

「超伝導単一光子検出器アレイを用いた単一光子の高効率分光検出技術の開発」
情報通信研究機構 藪野 正裕

1 研究の背景と目的

単一光子検出器は、光の最小単位である光子 1 個を検出可能な高性能な光検出器である。近年、単一光子検出器は、量子コンピューティングや量子暗号通信などの新しい情報処理通信技術、蛍光相関分光法や 2 光子励起顕微鏡などのバイオイメージング、LiDAR を用いた惑星環境計測や自動運転技術、レーザーを用いた宇宙通信などの先端光技術において必要不可欠なものとなっている。さらに、単一光子の波長（色、エネルギー）を弁別して検出する分光検出が可能になれば、波長多重通信や多色イメージング、スペクトル計測などが可能になり、これらの先端光技術のさらなる発展に繋がるものと期待される。そこで本研究では、超伝導技術を用いた高性能な単一光子検出器を分光器と組み合わせることで、単一光子の高効率な分光検出技術を開発することを研究目的としている。

近年、高性能な単一光子検出器として、超伝導ナノストリップ単一光子検出器(SNSPD)が注目されている。SNSPD は、厚さ数ナノメートル、線幅 100 nm 前後のメアンダ形状の超伝導線路を用いた単一光子検出器であり、光子エネルギーの吸収によって線路の超伝導状態が壊れる現象を利用することで高い効率で単一光子検出が可能である。SNSPD は、可視光から近赤外光までの広い波長帯に感度を持ち、80%を超える検出効率や 10 Hz 以下の低暗計数率（低ノイズ）、100 ps 以下の低ジッタ（高時間分解能）という優れた性能を備えることから、本技術を用いることで高性能な単一光子分光検出器の開発が可能になると期待できる。本研究では、複数波長の同時分光検出を可能にするため、①SNSPD の多ピクセルアレイ化の開発と②SNSPD の動作する冷凍機内で機能する分光器の開発を目指しており、これらを組み合わせることで高効率な単一光子分光検出器を開発することを目標としている。

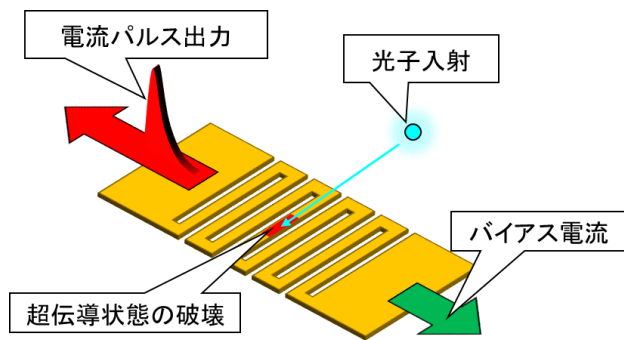


図 1: 超伝導ナノストリップ単一光子検出器

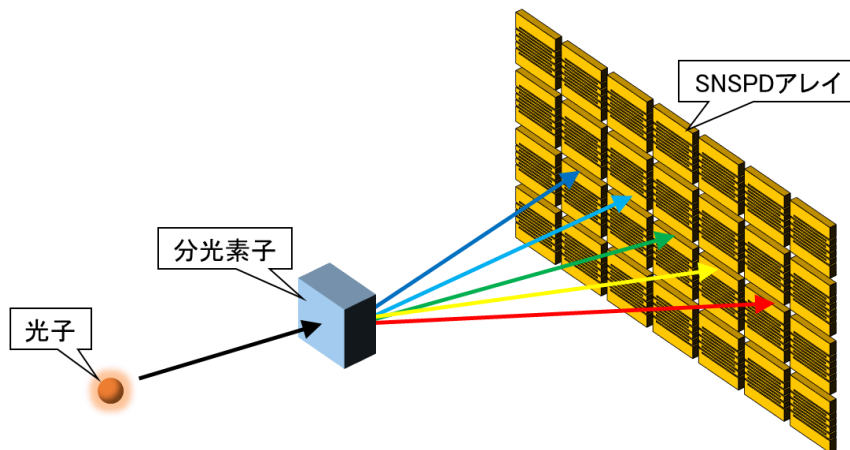


図 2: SNSPD アレイを用いた単一光子分光検出

2 研究方法・研究内容

(a) SNSPD アレイの開発

本研究では、複数波長の光子を一度に検出するために SNSPD の多ピクセルアレイ化に取り組む。SNSPD を多ピクセルアレイ化するためには信号読み出しの多重化が必要不可欠である。通常は SNSPD の 1 検出素子の信号読み出しには 1 本の信号ケーブルが必要とされる。しかし、超伝導検出器である SNSPD は 2.4 K 以下の動作温度に冷却する必要がある、その一方で、熱負荷の問題から SNSPD を冷却するための極低温冷凍機に実装できる信号ケーブルの本数には制限がある。そのため、SNSPD の多ピクセルアレイ化を実現するためには、1 本の信号ケーブルを用いて複数ピクセルからの出力信号を読み出すことが可能な信号多重化技術が必要となる。本研究では、図 3 のような多重信号読み出し回路構造を採用した SNSPD アレイの開発を行う。この多重信号読み出し回路構造では、各ピクセルの SNSPD 素子は横方向の信号線と縦方向の信号線に対してそれぞれ並列接続されている。これにより光子を検出した際に横方向と縦方向の信号線にそれぞれ検出信号が出力されることで、検出信号が出力された 2 本の信号線の交点として光子を検出したピクセルを特定することが可能となる。この多重信号読み出し回路構造を用いることで $N \times N$ 個のピクセルを持つ SNSPD アレイの読み出しに必要な信号ケーブル数を $2 \times N$ 本にまで削減可能である。また配線構造を維持したまま素子チップ内でのピクセル配置を変えることでリニアアレイなどの素子配置を取ることも可能である。本研究期間では、1024 個のピクセルを持つ SNSPD アレイの開発を目標として、素子設計・作製・評価を行った。

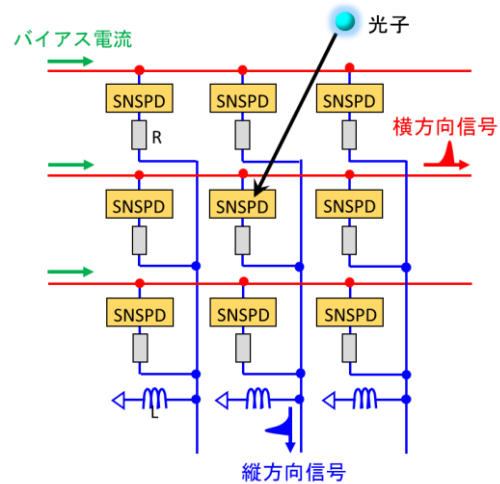


図 3: 多重信号読み出し回路構造

(b) 分光器の開発

本研究では、冷凍機内に構築した分光器と SNSPD アレイを組み合わせ、分光器出力を SNSPD アレイで直接検出することで単一光子分光検出器を構築することを目指している。そのためには、冷凍機内のステージ上に実装可能なサイズの分光器の開発が必要である。本研究では、冷凍機内部への光子の導入は光ファイバを用いて行い、図 4 のような反射型回折格子を用いた分光器の開発を行う。開発手順としては、まず室温環境において分光器光学系の試作と評価を行い、分光器の構成を決定する。次に、その結果に基づいて分光器光学系と SNSPD アレイを一体に冷凍機内に配置するためのハウジングの設計・製作を行う。最終的に、ハウジングに収めた分光器光学系と SNSPD アレイを冷凍機内へ実装して、単一光子分光検出器としての動作評価を行う計画である。本研究期間では、室温環境における分光器の試作に取り組んだ。

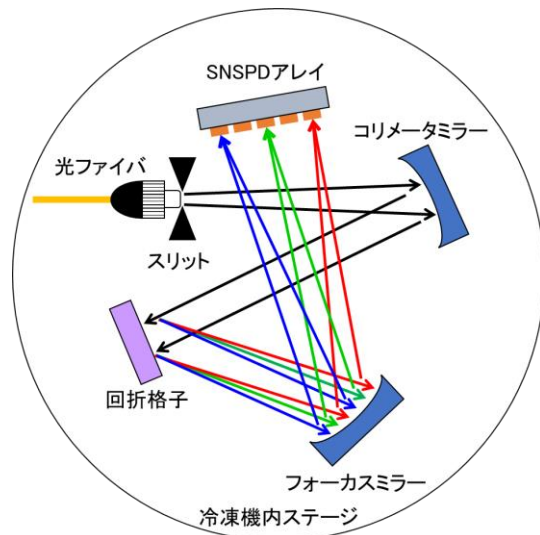


図 4: 分光器の構成

3 研究成果

図5は作製した SNSPD アレイ素子の写真である。32 個×32 個=合計 1024 個のピクセルを持つ SNSPD アレイの作製を行った。1 ピクセルのサイズは $75 \mu\text{m} \times 75 \mu\text{m}$ であり、その中のメアンダ状ナノストリップの占有領域のサイズは $60 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ である。受光領域の全体サイズは $2.4 \text{ mm} \times 2.4 \text{ mm}$ であり、素子チップのサイズは $5.0 \text{ mm} \times 5.0 \text{ mm}$ である。

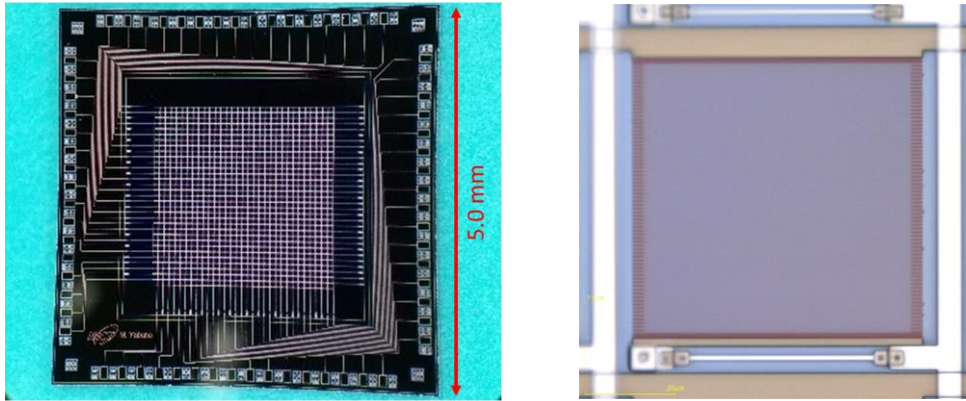


図5: 作製した素子の(左)チップ全体、(右)1ピクセル部分の顕微鏡写真

作製した素子を Gifford-McMahon 型冷凍機内に実装し、温度 2.2 K まで冷却して動作評価を行った。図6は SNSPD アレイの 32 行中の 1 行にバイアス電流を加えた時の電流-電圧特性である。低バイアス領域においてナノワイヤが超伝導状態にあり、バイアス電流が臨界値を超えると超伝導状態が壊れて抵抗状態にスイッチする様子が分かる。測定された臨界バイアス電流値は $544 \mu\text{A}$ であった。1 行には 32 素子が並列接続されていることから 1 素子当たりの臨界バイアス電流値は $17 \mu\text{A}$ であり、設計時に想定した $20 \mu\text{A}$ に近い値が得られた。次に、光ファイバを通して光子を冷凍機内に導入し、素子前面から照射した。図7は素子に光子を照射した際の実験と同様 1 行からの光子検出信号である。波長 1550 nm までの光子に対して単一光子検出が可能であることが確認された。しかし一方で、今回作製した素子では、一部の行で臨界バイアス電流値が想定よりも低く、正常な光子検出動作が得られない部分があった。これは主に素子作製において、ナノストリップを描画・加工するプロセスにおける歩留まりの問題により、ナノストリップが設計通りに均一に作製されていないためと考えられる。素子作製の歩留まりの向上が課題であり、それに向けて、素子デザインの再設計と作製プロセスの改良を現在進めているところである。

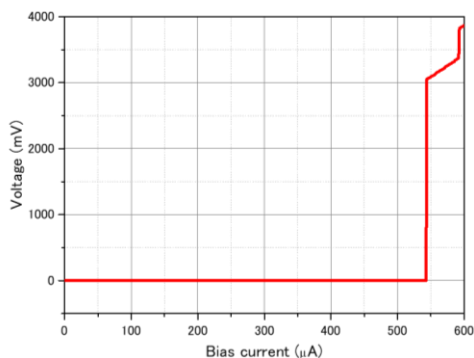


図6: 1行(32素子並列)にバイアス電流を加えた時の電流-電圧特性

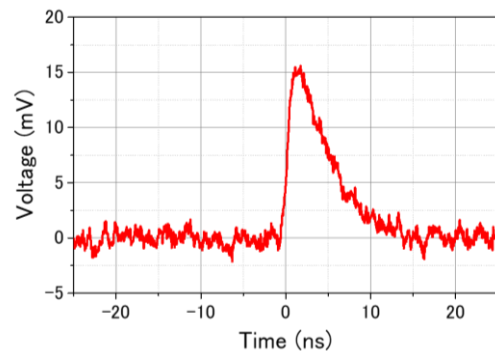


図7: 光子検出信号(横方向出力)

分光器開発では、室温環境において分光器の試作を行った。図8は試作した分光器光学系の写真である。光学系は冷凍機内のスペースに収めることを考慮して組まれている。光学系の構成は、まずシングルモード光ファイバを用いて①の光ファイバコネクタから光子を入力、開口部をスリットとする。次に、②のコリメートミラー(軸外放物面ミラー)を用いて入射光をコリメートする。そして、③の反射型回折格子を用いて分光した後、④のフォーカスマイラー(凹面ミラー)を用いて波長ごとに分離した位置に集光する。波長ごとに分離・集光された光子は集光位置に配置された⑤の光ファイバアレイを用いて捕集され、SNSPDを用いて検出される。将来的に冷凍機内に構築する分光システムでは、光ファイバアレイ位置に SNSPD アレイを配置し、各波長の光子を直接検出することで単一光子分光検出器を構築する予定である。今回、波長 1500 nm 帯をターゲットにして分光器の構築を行い、光ファイバアレイの出力を SNSPD で検出することで波長 1470 nm~1570 nm の範囲で分光動作を確認することができた。今後は、さらに光学系の調整を進めた後に、分光光学系と SNSPD アレイを一体に配置するハウジングの設計・製作を行い、冷凍機内でのシステムの評価へと繋げたいと考えている。

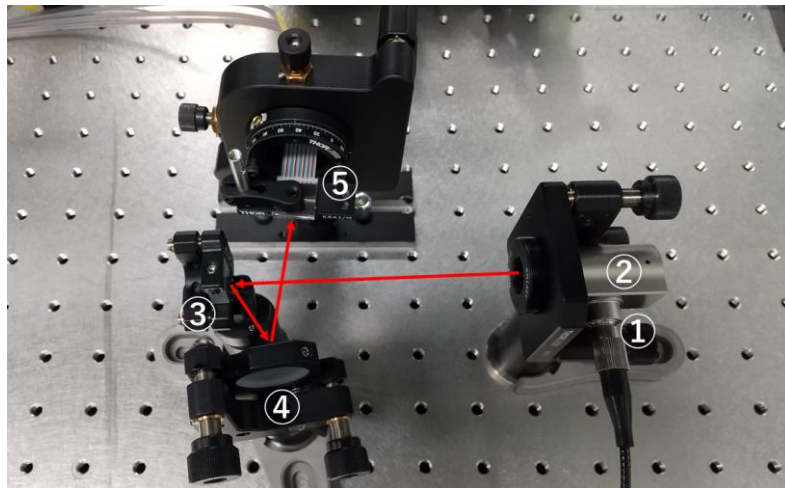


図8: 室温環境に試作した分光器光学系の写真

4 生活や産業への貢献および波及効果

単一光子検出器は、量子暗号通信、バイオイメージング、リモートセンシング、宇宙通信などの先端技術に不可欠な基盤技術であり、本研究が目標とする高効率な単一光子分光検出技術が実現すれば、これら先端技術のさらなる発展・高度化に繋がると期待される。また、分光計測は自然科学を研究するための基本的な方法の一つであり、生物医学から宇宙物理学まであらゆる研究分野において活用されている。それゆえ、高感度な単一光子分光検出器は、従来の分光計測の測定限界を打破する技術として広範な研究分野で応用され、自然科学における新たな発見や科学技術の発展へと繋がることが期待される。