

超伝導ナノストリップを用いた単一光子検出技術

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 三木 茂人

1. はじめに

超伝導ナノストリップを用いた単一光子検出器 (Superconducting Nano Strip Photon Detector: SNSPD) は、2001 年に基本構造や動作原理の提案以来、目覚ましい性能改善の発展とともに、実際に、量子情報通信技術をはじめとする様々な先端技術分野に適用されることで、その地位を確固たるものとしている。本稿では、情報通信研究機構(NICT)においてこれまで推進してきた超伝導ナノストリップを用いた単一光子検出器に関する研究開発について紹介する。

2. 超伝導ナノストリップ単一光子検出器システムの開発

図 1 に我々が作製した SNSPD 素子の電子顕微鏡による観察像を示す。SNSPD 素子は、膜厚 10 nm 以下の超伝導窒化ニオブチタン(NbTiN)薄膜を線幅 100 nm 以下の超伝導ナノストリップに形成し、入射光子との効率的な光結合を実現するために、受光部中(図 1 においては $15 \times 15 \mu\text{m}^2$)に超伝導ナノストリップがメアンダ状に配された構造をしている。超伝導ナノストリップに、単一光子が吸収されることによって、局所的に常伝導領域が形成されることにより、抵抗成分が発生する。局所的な常伝導領域は、エネルギーの拡散過程を経て再び超伝導状態に回復するが、この過程における抵抗成分の遷移を出力パルスとして観測することで、単一光子の検出を行うことが可能となる。

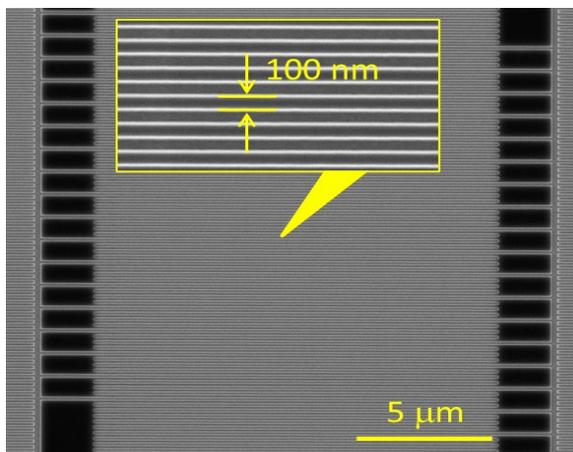


図 1. SNSPD 素子の電子顕微鏡観察像

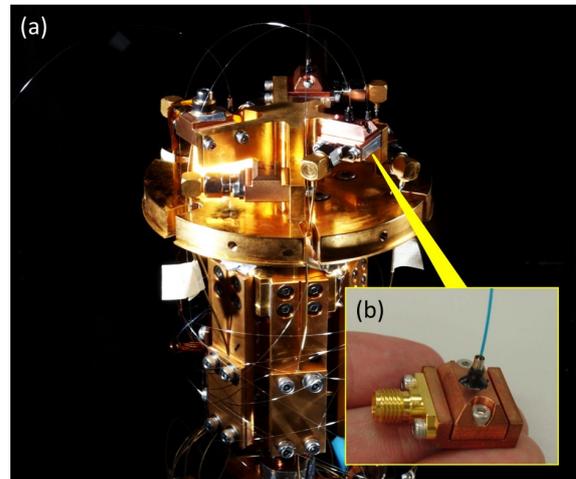


図 2.(a)多チャンネル SNSPD システム内部写真

SNSPD 素子を動作させるためには素子を T_c 以下にまで冷却する必要があるため、極低温冷却システムが必要となるが、様々な応用分野への適用を考えると、小型・簡便・連続運転可能な冷却システムが望ましい。NICT では、量子情報通信技術への適用を見据え、小型可搬式ギフォード・マクマホン (GM) 冷凍機を用いた SNSPD システムを開発した。図 2(a)に多チャンネル SNSPD システムにおける冷凍機内部写真を示す。GM 冷凍機システムは液体冷媒を必要とせず、交流 100V 電源で自動冷却が可能となっている。また、連続運転が可能で試料ステージの最低到達温度は 2.3K 以下まで冷却可能となっている。開発された冷凍機システムは、図 2(b)に示す様な SNSPD 素子が実装されたパッケージを複数個(図 2 のシステムでは 6 個)導入することが可能でそれぞれ独立した入出力ポートを備えている為、複数の検出器を必要とする応用にも一台のシステムで賄う事が可能となっている。実装された SNSPD 素子は冷凍機内に導入された同軸ケーブルを通して、バイアス印可および出力信号の取り出しが行われる。また、パッケージは 1550nm 波長帯用シングルモード(SM)ファイバが各 SNSPD 素子と結合されており、室温に設置された光入力ポートから光子を入射することが可能となっている。

我々は SNSPD の研究開始以来、検出器としての性

能改善に取り組んできたが、特にシステム検出効率、暗係数率においては、図3におけるような変遷を経て目覚ましい性能改善が進んだ。研究開始当初は、検出効率は数%程度であったが²⁾、超伝導ナノストリップに、光共振構造を具備する事で、ナノストリップ層への吸収効率を改善することに成功するなどによって、検出効率を改善することに成功しており^{3,4)}、2017年にはアバランシェ型構造を採用することで、検出効率81%、暗係数率7c/sといった優れた性能を達成している⁵⁾。これは、図3に示している商用半導体アバランシェフォトディテクターの性能と比べると圧倒的な性能有意性(高検出効率、低暗計数率)を達成していることが分かる。また、我々が開発したSNSPDシステムは、様々な先端技術分野への適用がなされている。例えば、量子情報通信技術においては、東京都内に敷設された光ファイバ網を用いた量子暗号鍵配送試験(東京QKDネットワーク)への適用や⁶⁾、量子光のパルス波形を制御する手法の開発⁷⁾などにも適用されている。また、蛍光物質の分子運動を調べるための蛍光相関分光への適用など生物学分野への応用展開もなされている⁸⁾。我々が開発したSNSPD技術の社会実装へ向けた取り組みも進められており、浜松ホトニクス株式会社への技術移転も完了し、同社が開発したSNSPDシステムの量子情報通信技術への適用が実証されている⁹⁾。

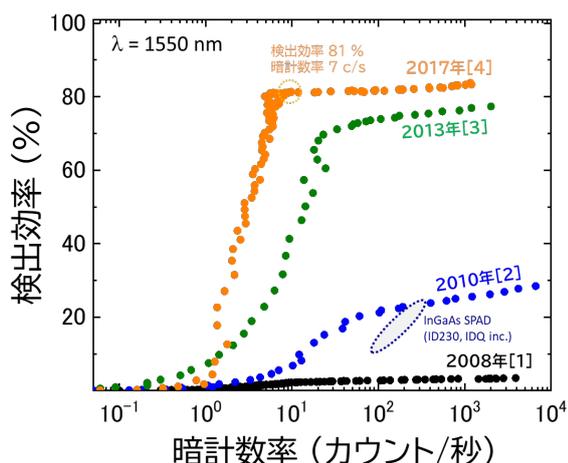


図3. 検出効率、暗係数率改善の変遷

3.高度化に向けた取り組み

従来の SNSPD 素子は図1に示すように単一の受光面を有するものであるが、受光面(ピクセル)を複数個配置して多ピクセルアレイ化する事により、最大計数率の向上、受光面積の増大、疑似光子数識別、空間分解能を得る事が可能となり、量子計測、光子分光、イメージングライダ、半導体LSI動的解析や生体イメージングなど、幅広い先端計測分野において多大なるインパクトを与える事が期待出来る。多ピクセル SNSPD アレイの実現においてピクセル数の増大に伴って直面する課題の一つとして、多出力信号読み出しにおける冷凍機システムへの熱流入負荷の低減が挙げられるが、NICTでは、極低温環境下において低消費電力・低ジッタ・高速動作が可能な超伝導単一磁束量子(SFQ)回路を用いた SNSPD 用多重化信号処理方式を世界に先駆けて提案し、動作実証を行ってきた。複数の SNSPD からの出力信号を多重化するための回路¹⁰⁾や、アドレス情報をエンコードする回路¹¹⁾、2個の検出器の同時計数出力回路¹²⁾など用途に応じた回路を柔軟に設計、開発することが出来る事が大きな強みとなっている。

4. さいごに

NICTが開発したSNSPDシステムは、その高性能性と汎用性の高さから、量子情報通知技術においては必要不可欠な基盤技術として決定づける成果を発信することに成功してきた。今後さらなる性能改善や高度化に取り組むことにより、より広範囲な先端技術分野へ適用範囲を拡大することを期待したい。

5. 参考文献

- 1) G. Gol'tsman et al.: Appl. Phys. Lett. **79** (2001) 705
- 2) S. Miki et al.: Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 061116
- 3) S. Miki et al.: Opt. Lett. **35** (2010) 2133
- 4) S. Miki et al.: Opt. Exp. **21** (2013) 10208
- 5) S. Miki et al.: Opt. Exp. **25** (2017) 6796
- 6) M. Sasaki et al.: Opt. Exp. **19** (2011) 10387
- 7) K. Takase et al.: Sci. Adv. **8** (2022) 4019
- 8) T. Yamashita et al.: Opt. Exp. **22** (2014) 28783
- 9) <https://www.nict.go.jp/press/2022/09/16-1.html>
- 10) S. Miki et al.: Opt. Lett. **46** (2021) 6015
- 11) M. Yabuno et al.: Opt. Exp. **28** (2020) 12047
- 12) S. Miki et al.: Appl. Phys. Lett. **112** (2018) 262601