

高効率・低雑音・高時間分解能を有した近赤外用超伝導単一光子 検出器の開発

Superconducting single photon detectors for near infrared wavelength with high sensitivity, low noise, and high timing resolution

○三木茂人, 山下太郎, 王鎮, 寺井弘高
Shigehito Miki, Taro Yamashita, Zhen Wang, and Hiroataka Terai

独立行政法人情報通信研究機構未来 ICT 研究所
Kobe Advanced Research Center, National Institute of Information and Communications Technology

Abstract

Recently, superconducting nanowire single photon detector (SNSPD or SSPD) is becoming a promising detector to achieve excellent performances as compared to semiconductor avalanche photo diode which is mostly used at present. In laser sensing research area, SSPD should be an attractive because of its high single photon sensitivity, low dark count, and short timing jitter. In this paper, we introduce the mechanism and features of SNSPD and report on the recent progress of our SNSPD system.

1. はじめに

可視から近赤外にいたる光の究極的な計測技術である光子検出技術は、量子光学、量子情報通信技術だけではなくレーザセンシング研究分野においても、必要不可欠な基盤技術であるといえる。現在、波長帯に応じて様々な光子検出器が存在するが、近年、通信波長帯域において、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (Superconducting Nanowire Single Photon Detector: 以下 SSPD¹⁾) が俄に注目されている。SSPD が提案されて以来、高性能化、高機能化の為に研究開発がなされてきたが、最近の進展状況には目を見張るものがあり、これまで競合検出器であった半導体アバランシェフォトダイオード (APD) では到達し得ない領域に足を踏み入れている^{2),3),4)}。応用上の課題として、極低温冷却の必要性やシステムサイズが指摘されることも多かったが、これらも解消されつつある⁵⁾。

本稿では、まず SSPD の動作原理と特徴について触れ、次に我々が開発した多チャンネル SSPD システムについて、最近の進展を中心に紹介する。

2. SSPD 素子の原理と特徴

SSPD 素子は図 1(a)に示すように、超伝導薄膜によるメアンダ状のナノワイヤによって構成されている。まず、超伝導転移温度 T_c 以下に冷却された素子に超伝導臨界電流 I_c よりもわずかに小さいバイアス電流 I_b を流した状態にすると、ナノワイヤ中には超伝導電流が流れる為に抵抗成分は発生しない。このとき、超伝導ギャップエネルギー 2Δ よりも十分に大きいエネルギーの単一光子が入射・吸収されると、超伝導薄膜中のクーパー対が破壊され、常伝導状態の領域 (ホットスポット) が生成される (図 1.(b)(i))。超伝導電流はホットスポット以外の部分を流れるが (図 1.(b)(ii))、その部分の電流密度も増大し、ホットスポットがナノワイヤの端から端を覆うように拡大し (図 1.(b)(iii))、抵抗成分が発生する (図 1.(b)(iv))。ホットスポット中の励起電子はエネルギーを拡散することによって超伝導状態へと回復するが、このホットスポット生成、回復による素子の抵抗変化により、電圧パルスとして観測することができる (図 1.(c))。

単一光子入射による SSPD 素子の検出効率を上げ

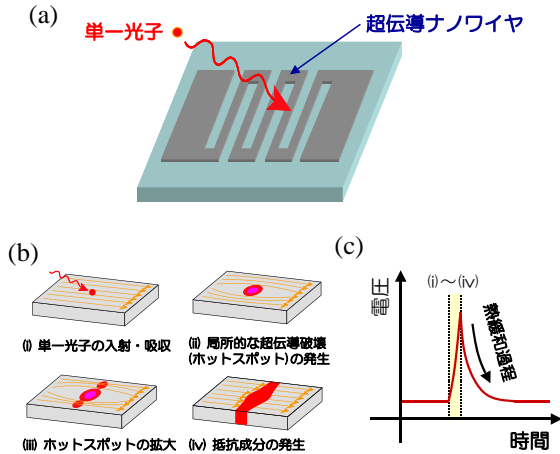


図 1. (a)SSPD 素子の概観 (b)超伝導ナノワイヤの単一光子検出メカニズム(18) (c)出力信号波形.

るためには、ホットスポットがラインの端から端を覆うように生成させる為に、入射光子よりも十分に小さい 2Δ を有した超伝導材料を用いて極細く均一なナノワイヤを実現する必要がある。超伝導窒化ニオブ薄膜(NbN)薄膜は $2\Delta \sim 5 \text{ meV}$ と入射光子エネルギー ($\sim 0.8 \text{ eV}$ at 1550 nm) に比べ十分に小さく、極微細加工も可能であるため現在最も用いられている材料となっている。また、単一光子を素子に効率よく入射させるためには、メアンダ状の素子受光部を大きくしなければならない。しかし、受光部を大きくすることは、単純にナノワイヤ長の長距離化を招くため、均一なワイヤの作製を困難にするとともに、後で述べる実質的な応答速度の低下を招いてしまう。従って、適度な受光部面積、極低温環境下での高度な集光・実装技術が求められる。また、ナノワイヤは膜厚数 nm の非常に薄い超伝導薄膜によって構成されているため、ナノワイヤ層の光吸収効率(例えば NbN で 30%程度)によって検出効率が律則されてしまう^{6),7)}。ナノワイヤ層の吸収効率を改善するために、光キャビティ構造の採用が提案、実現されている^{2),3),4)}。

SSPD 素子の本質的な応答速度は、励起電子のエネルギー緩和時間に依存し、NbN 薄膜を用いた場合、緩和時間は 30 ps 程度⁸⁾ と非常に短く、本質的な動作周波数は数十 GHz に相当する。しかし、現実的には SSPD 素子の応答速度は、長いナノワイヤ長に起因する素子の寄生インダクタンス L_k によって制限されてしまい、実際の動作速度は現状として数 $10 \sim$ 数 100 MHz 程度に留まっている⁹⁾。従って、いかに寄生インダクタンスを低減できるかが、素子応答速度短縮の鍵となる。

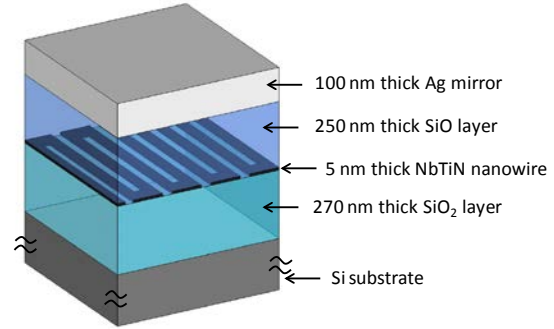


図 2. (a)光キャビティ構造付き SSPD 素子構造.

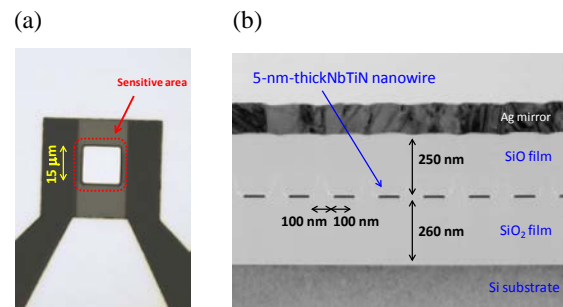


図 3. (a)SSPD 素子顕微鏡写真 (b)TEM 像による SSPD 素子断面図

3. 多チャンネル SSPD システムの開発

SSPD 素子は、超伝導窒化ニオブ(NbN)薄膜による膜厚 $5\text{--}9 \text{ nm}$ 、幅約 100 nm のナノワイヤと、ナノワイヤへの光吸収率を向上させるためのキャビティ層を備えている。我々は最近、図 2 に示す様なダブルサイドキャビティ構造を採用し、光学設計の最適化を行うことにより、 95% を越える光吸収率が達成可能であることを見出した³⁾。図 3 に、実際に作製した SSPD 素子の顕微鏡写真を示す。受光部面積は、入射単一光子との高い光結合効率を得る為に、 $15 \mu\text{m}$ 角となっている。作製された SSPD 素子は、素子実装用ブロックに固定される。入射光子と素子受光部との高効率光結合を実現するために小型 GRIN レンズが融着された光ファイバをファイバ固定用ブロックに固定し、素子実装用ブロック背面に設置された。GRIN レンズは素子受光部に焦点距離が設定され、かつ焦点距離で光スポット径が $10 \mu\text{m}$ 程度となるように設計されており、正確に調心を行えば、 98% 以上の光結合率が実現されるようになっている¹⁰⁾。実装用ブロックは小型であるため、後で述べる冷凍機システムに複数個導入する事が可能で、一台の冷凍機システムで複数のポートを有する単一光子検出システムを構成することが可能となっている。

図 4 に、多チャンネル SSPD システムの写真を示

す。ギフォード・マクマホン(GM)式冷凍機を用いているため、液体冷媒を必要とせず、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 で温度変動は 10mK 以内となっている。開発された SSPD システムは素子実装されたパッケージを最大 6 個まで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¹⁰⁾。実装された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、1550nm 波長帯用シングルモード (SM)ファイバが各検出器ブロックに導入されており、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。

図 4 に実装された SSPD 素子のシステム検出効率、暗計数率、およびタイミングジッタのバイアス電流依存特性を示す。バイアス電流の増加に伴い検出効率も増大し、バイアス電流が 18 μ A においてシステム検出効率 75 %、暗計数 50 c/s、タイミングジッタ 68 ps と優れた性能が得られている。表 1 にこれまで通信波長帯で使用されてきた InGaAs APD と今回得られた SSPD の性能を示す。表から分かるように、検出効率、暗計数率、タイミングジッタ全てにおいて、優位な性能を達成していることが分かる。

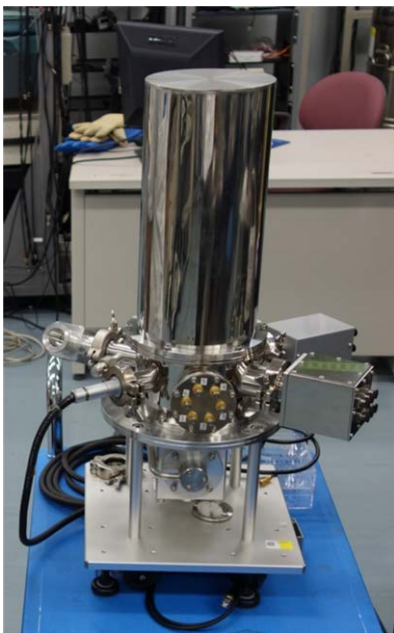


図 4. 多チャンネル SSPD システム写真

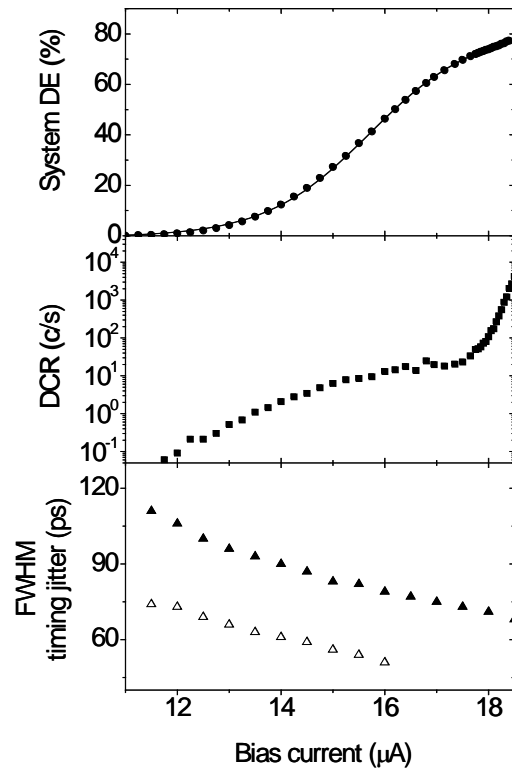


図 5. システム検出効率、暗計数率、タイミングジッタのバイアス電流依存特性

表 1. 検出器性能比較

検出器	検出効率 ($\lambda = 1550\text{nm}$)	暗計数率	ジッタ
InGaAs APD	10-20 %	1000 c/s	370 ps
SSPD	75 %	50 c/s	68 ps

4. さいごに

SSPD の動作原理・特徴から、実際の SSPD システム開発とシステム性能について報告した。最近の目覚ましい進展により、SSPD システムは通信波長帯において世界最高性能を誇る単一光子検出器となっている。また、既に様々な用途で使用されており、SSPD を用いて、数百 m 離れた物体の cm 深さイメージング取得に成功した等の応用報告もなされてきている¹¹⁾。今後のさらなる性能向上と高機能化、使いやすさ向上により、レーザセンシングの分野に与える影響が大きいことが期待される。

参考文献

- 1) G. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A.

- Semenov, K. Smirnov, B. Voronov, A. Dzardanov, C. Williams, and R. Sobolewski, " Picosecond superconducting single photon detector," *Appl. Phys. Lett.* 79, 705-707 (2001).
- 2) F. Marsili, V. B. Verma, J. A. Stern, S. Harrington, A. E. Lita, T. Gerrits, I. Vayshenker, B. Baek, M. D. Shaw, R. P. Mirin, and S. W. Nam, "Detecting Single Infrared Photons with 93% System Efficiency," *Nat. Photonics* 7, 210-214 (2013).
 - 3) S. Miki, T. Yamashita, H. Terai, and Z. Wang, " High performance fiber-coupled NbTiN superconducting nanowire single photon detectors with Gifford-McMahon cryocooler," *Opt. Exp.* 21, 10208-10214 (2013).
 - 4) D. Rosenberg, A. J. Kerman, R. J. Molnar, and E. A. Dauler, "High-speed and high-efficiency superconducting nanowire single photon detector array," *Opt. Exp.* 21, 1440-1447 (2013).
 - 5) S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, " Development of SNSPD System with Gifford-McMahon Cryocooler," *IEEE. Trans. Appl. Supercond.*, to be published.
 - 6) A. Korneev, P. Kouminov, V. Matvienko, G. Chulkova, K. Smirnov, B. Voronov, G. N. Gol'tsman, M. Currie, W. Lo, K. Wilsher, J. Zhang, W. Słysz, A. Pearlman, A. Verevkin, and R. Sobolewski, "Sensitivity and gigahertz counting performance of NbN superconducting single-photon detectors," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, pp. 5338–5340, 2004.
 - 7) S. Miki, T. Yamashita, "Enhancing detection efficiency by applying an optical cavity structure in a superconducting nanowire single-photon detector," *IEICE Trans. Electron.*, Vol.E94-C, 260-265 (2011).
 - 8) K. S. Il'in, M. Lindgren, M. Currie, A. D. Semenov, G. N. Gol'tsman, S. I. Cherednichenko and E. M. Gershenzon, " Picosecond hot-electron energy relaxation in NbN superconducting photodetectors," *Appl. Phys. Lett.* 76, 2752-2754 (2000).
 - 9) and Roman Sobolewskid)A. J. Kerman, E. A. Dauler, W. E. Keicher, J. K. W. Yang, K. K. Berggren, G. Gol'tsman and B. Voronov, "Kinetic-inductance-limited reset time of superconducting nanowire photon counters," *Appl. Phys. Lett.* 88, 111116 (2006).
 - 10) S. Miki, T. Yamashita, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Multichannel SNSPD system with high detection efficiency at telecommunication wavelength," *Opt. Lett.*, vol. 35, No. 13, pp. 2133-2135 (2010)
 - 11) A McCarthy, N. J. Krichel, N. R. Gemmell, X. Ren, M. G. Tanner, S. N. Dorenbos, V. Zwiller, R. H. Hadfield, and G. S. Buller, " Kilometer-range, high resolution depth imaging via 1560 nm wavelength single-photon detection," *Opt. Exp.* 21, 8904-8907 (2013).