

超伝導ナノワイヤによる高感度単一光子検出技術

三木茂人

光子検出技術は様々な応用研究分野において重要な基盤技術のひとつであり、性能改善が強く求められている。超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (SSPD) は、従来用いられている半導体アバランシェフォトダイオードと比べて、高検出効率、高速応答、低ジッタ、低暗計数といった優れた特徴を有していることから、有望な検出器として期待されている。本稿では、SSPDの動作原理や特徴およびNICTにおいて開発されたSSPDシステムについて紹介する。

1 まえがき

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、生体医療計測等、様々な研究開発を推進する上で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、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器 (Superconducting Nanowire Single Photon Detector: 以下 SSPD^[1]) が、にわかに注目されている。SSPDの研究開発が加速したのは比較的最近であるため、未だ発展途上な部分が多く見受けられるが、注目すべきはポテンシャルの高さであり、現時点においても半導体素子と比べて優位な性能を有していることである。低ジッタ、低雑音、ギガビット級の高速性が期待され、波長感度領域が極めて広いこと、Siアバランシェフォトダイオード (APD) や InGaAs/InP-APDの感度領域をすべてカバーすることができる。また通信波長帯 APDと異なり、ゲート同期が不要であるため、システム構成を格段に容易にできる。SSPDは冷却方法や検出効率の低さが、応用上の課題点として指摘されることが多かったが、これらも解消されつつあり^{[2][3]}、今後一層盛んに応用研究に用いられる流れとなりつつある^{[4]-[7]}。

本稿では、まず SSPDの動作原理と特徴について触れ、次にNICTにおいて開発された多チャンネル SSPDシステムについて、素子作成、実装、システム構成、および応用上重要なシステム性能について紹介する。

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、電圧パルスを信号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 (NbN) 薄膜は $2\Delta \sim 5 \text{ meV}$ と入射光子エネルギー ($\sim 0.8 \text{ eV}$ @ 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^{[8][9]}。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

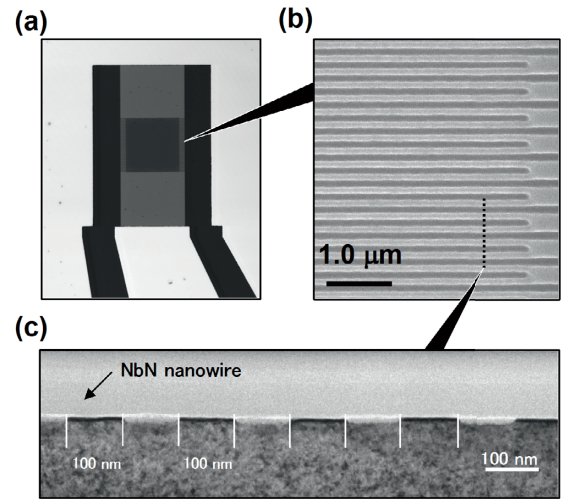
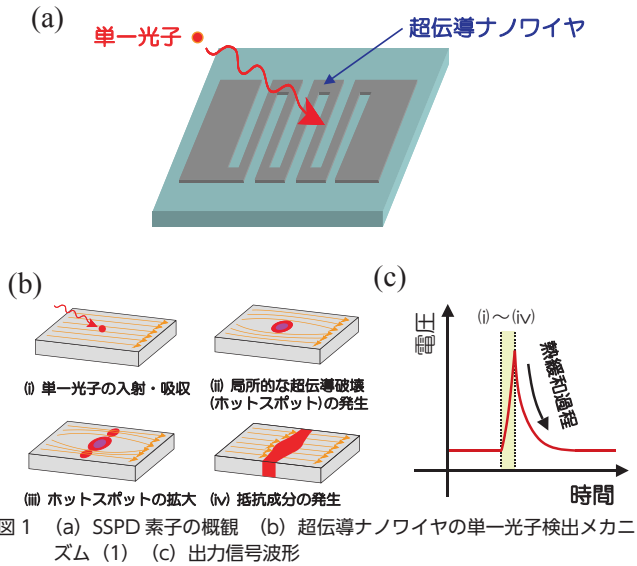


図1 (a) SSPD 素子の概観 (b) 超伝導ナノワイヤの単一光子検出メカニズム (1) (c) 出力信号波形

図2 SSPD 素子写真 (a) 光学顕微鏡による受光部写真 (b) SEM 観察像によるナノワイヤ写真 (c) TEM 観察像によるナノワイヤの断面写真

が提案、実現されている^{[2][3][10]}。

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^[11] 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十～数百 MHz 程度に留まっている^[11]。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。

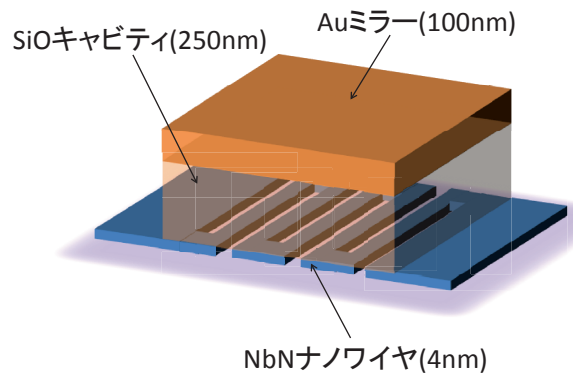


図3 光キャビティ構造付き SSPD 素子構造

3 SSPD システムの開発

3.1 SSPD 素子

SSPD 素子は、NbN 極薄膜からなるナノワイヤ部と電極部、さらに、ナノワイヤへの光吸収効率を向上させるためのキャビティ層を備える (図3)。前項で述べたように高感度、高速応答可能な SSPD 素子を実現するためには、極薄かつ均一なナノワイヤを実現する必要がある。我々は、単結晶 MgO 基板上に直流反応性スパッタリング法による成膜を行い、初期成長膜からエピタキシャル成長させた極薄 NbN 薄膜をナノワイヤ層として用いている。成膜された NbN 薄膜は膜厚 4 nm 程度の極薄膜においても $T_c \sim 12$ K、抵抗率 $120 \mu\Omega\text{cm}$ 程度の良好な超伝導特性が得られている^[11]。NbN 薄膜は電子線直描リソグラフィ技術および反応性イオンエッチングによって、線幅 100 nm ナノワイヤによるメアンダ形状のパターンへと形成される。図2(a)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、 $15 - 20 \mu\text{m}$ 角程度となっている。

3.2 素子実装技術の開発

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、図4に示すような高光結合効率可能な実装技術の開発を行った^[2]。実装用ブロックは、素子用ブロックとファイバ固定用ブロックから構成されており、光キャビティ付の SSPD 素子は素子用ブロック上に固定される。ナノワイヤ上に光キャビティ構造が付加されている為、入射光は基板裏面から結合させなければならない。0.4 mm の厚みを介して単一光子を効率よく受光部に結合させるため、図4 (b) に示すような小型 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いる。素子受光部面積が $15 \mu\text{m}$ 角であれば図4 (c) に示す様に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。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ことが可能で、1 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

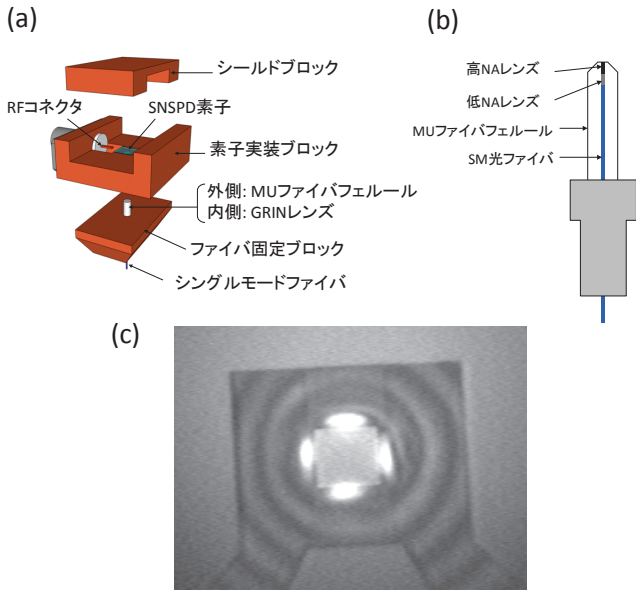


図4 (a) 高効率光結合のための実装ブロック図 (b)GRIN レンズ付光ファイバ (c) アライメント後の SSPD 素子受光部と入射光スポット

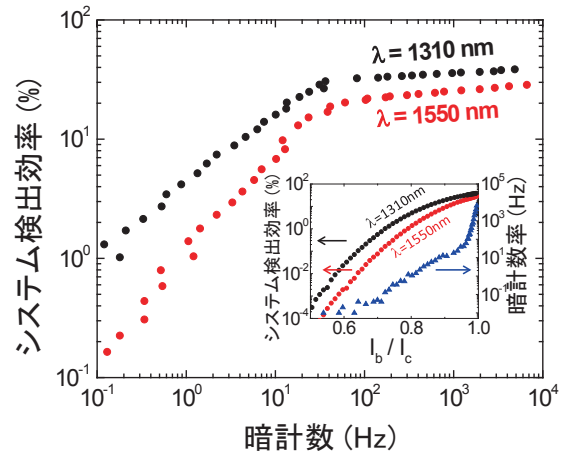


図6 光キャビティ付 SSPD の (a) システム検出効率-暗計数特性 (b) システム検出効率、暗計数率のバイアス電流依存性

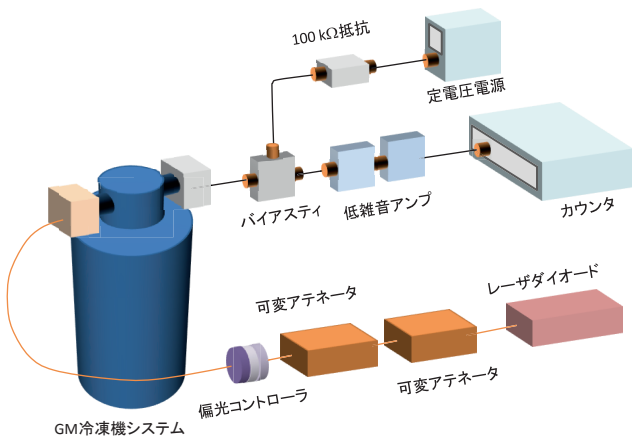


図5 SSPD システムおよび単一光子検出効率測定系概略図

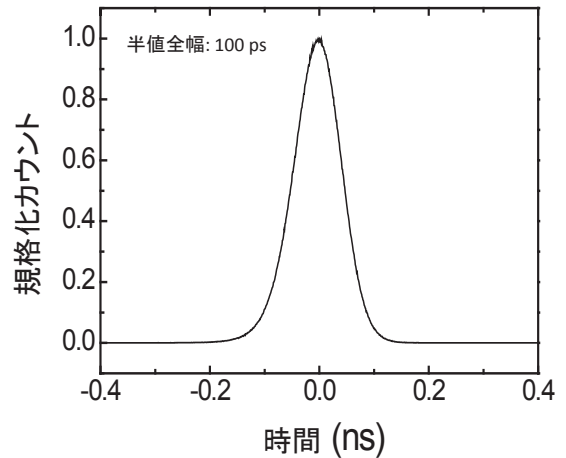


図7 SSPD のタイミングジッタ特性

テムを構成することが可能となっている。

図5に、SSPD システムおよび単一光子検出効率測定系の概略図を示す。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入出力ポートを備えている。最低到達温度は 2.9 K で温度変動は 10 mK 以内となっている。素子は同軸ケーブルを介してまずバイアスティに接続されている。バイアスティの DC ポートよりバイアス電流が引加され、RF ポートを通った出力電圧を低雑音アンプによって増幅した後、カウンターで観測を行った。1550 nm 波長帯用 SM ファイバが各パッケージへと導入され、単一光子が入射される。入射光源として 1310 nm および 1550 nm 波長帯連続光源を十分に減衰させ、システム入力ポートへの入力エネルギーが $10^6 - 10^7$ 光子/秒となるように調整された。入力ポート前には偏光コントローラが設置され、素子の感度が

4 SSPD システム性能

図6 (a) に光キャビティ付 SSPD のシステム検出効率-暗計数率特性、(b) にバイアス電流依存性を示す。バイアス電流の増加に伴い検出効率も増大し、 I_c 極近傍では、暗計数率も高い (>10 kc/s) が、1550 nm 波長帯で 28%、1310 nm 波長帯で 40% と高い検出効率を得られている。また、暗計数率が 100 c/s となるバイアス領域では、20% @ 1550 nm、35% @ 1310 nm となっている。光キャビティのない単層構造では、2-3% が典型的な検出効率であるのに対し、光キャビティ構造の付加により大幅な性能向上に成功している。

図7に SSPD 素子のタイミングジッタ特性を示す。タイミングジッタは時間相関単一光子計測装置を用い、SSPD からの出力パルススタート信号、フェムト秒

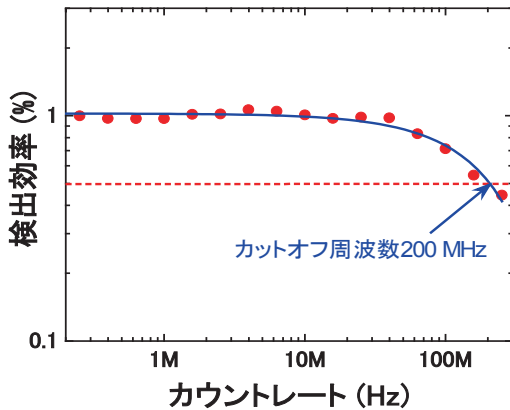


図8 検出効率-カウントレート依存性 (5×5 μm 素子)

パルス光源からのトリガ信号をストップ信号として時間相関のヒストグラムを測定することにより得られた。今回測定したSSPD素子は、受光面積10 μm 角のものであるが、半値幅で100 psと小さいタイミングジッタが得られている。量子暗号鍵配送などの応用実験において、タイミングジッタはビットエラーレート等を左右する重要な性能となっており、今後のジッタ低減により、さらなる性能向上が期待出来る。

次に、SSPDの応答速度特性について紹介する。2で述べたように、SSPDの応答速度は素子の寄生インダクタンス L_k によって決定される。従って、素子受光面積が小さいほど、素子応答速度が速くなる。図8には受光面積5 μm 角素子の検出効率-カウントレート特性を示す。カウントレートが増大するにつれ、検出効率が減少し正常に動作しなくなっていることが分かるが、40 MHz程度までは正常に動作していることを確認した。これは市販のAPD素子と比較すると十分に早い。研究室レベルではAPDでも100 MHz動作に成功しており、今後の性能向上が望まれる。

5 まとめ

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。SSPDシステムは現時点でAPDを上回るパフォーマンスを示すことに成功しており、既に様々な用途で使用されていることから、その活躍が期待される。加えて、まだその潜在性能は十分に引き出されていないことから今後の性能向上も可能であり、今後期待されたい。

【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, pp. 705-707, 2001.
- 2 S. Miki, M. Takeda, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Compactly

packaged superconducting nanowire single-photon detector with an optical cavity for multichannel system," Opt. Express, Vol. 17, pp. 23557-23564, 2009.

- 3 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.
- 4 H. Takesue, S. Nam, Q. Zhang, R. H. Hadfield, and Y. Yamamoto, "Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors," Nat. Photonics 1, pp. 343-348, 2007.
- 5 R. H. Hadfield, J. L. Habif, J. Schlafer, and R. E. Schwall, "Quantum key distribution at 1550 nm with twin superconducting single-photon detectors," Appl. Phys. Lett. 89, 241129, 2006.
- 6 A. Tanaka, M. Fujiwara, S. W. Nam, Y. Nambu, S. Takahashi, W. Maeda, K. Yoshino, S. Miki, B. Baek, Z. Wang, A. Tajima, M. Sasaki, and A. Tomita, "Ultra fast quantum key distribution over a 97km installed telecom fiber with wavelength division multiplexing clock synchronization," Opt. Express 16, 11354-11360, 2008.
- 7 T. Honjo, S. W. Nam, H. Takesue, Q. Zhang, H. Kamada1, Y. Nishida, O. Tadanaga, M. Asobe, B. Baek, R. Hadfield, S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, Z. Wang, K. Inoue, and Y. Yamamoto, "Long-distance entanglement-based quantum key distribution over optical fiber," Opt. Express 16, 19118-19126, 2008.
- 8 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. Slys, 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.
- 9 S. Miki and T. Yamashita, "Enhancing detection efficiency by applying an optical cavity structure in a superconducting nanowire single-photon detector," IEICE Trans. Electron., Vol. E94-C, No. 3, Mar., 2011, to be published.
- 10 K. M. Rosfjord, J. K. W. Yang, E. A. Dauler, A. J. Kerman, V. Anant, B. M. Boronov, G. N. Gol'tsman, and K. K. Berggren, "Nanowire single photon detector with an integrated optical cavity and anti-reflection coating," Opt. Express, 14, 527-534, 2006.
- 11 Z. Wang, S. Miki, and M. Fujiwara, "Superconducting Nanowire Single-Photon Detectors for Quantum Information and Communications," IEEE Journal of selected topics in quantum electronics, Vol. 15, No. 6, pp. 1741-1747, 2009.
- 12 S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, and Z. Wang, "Development of SNSPD System with Gifford-McMahon Cryocooler," IEEE. Trans. Appl. Supercond., to be published.



三木茂人 (みき しげひと)

未来 ICT 研究所ナノ ICT 研究室主任研究員
博士 (工学)
超伝導デバイス、光子検出器