

# マルチチャネル超伝導ナノワイヤー単一光子検出システム

王 鎮

## Multichannel Superconducting Nano-Wire Single Photon Detector System

Zhen WANG

Superconducting single photon detector (SSPD) technology accomplished remarkable progress in a past decade. In this paper, we review the current status and technical issues in developing SSPD system, and present our present progress on development of a multichannel NbN SSPD system, performances of the system and its applications.

**Key words:** superconducting single photon detectors, NbN thin film, nanowires, quantum information, quantum communication

電磁波や光を発生し、伝搬して、検出することは、現代の高度情報通信社会を作り上げた基礎である。また、極限性能まで達する高感度な電磁波・光検出技術は、われわれを未知な世界へ導く探針となっている。巨視的量子現象である超伝導現象を利用した電磁波・光検出器は、他の検出器で追従できないほど究極な高感度と低雑音性を示し、電波天文や宇宙観測、量子情報通信、量子光学などさまざまな分野において活躍している。その中で、2001年に提案された超伝導ナノワイヤー単一光子検出器 (SSPD or SNSPD)<sup>1)</sup> は、従来の半導体アバランシフオトダイオード (APD) に比べて、アフターパルスフリーであるほかに、高い検出効率、低い暗計数率、かつ高速、広帯域など超伝導ならではの優位性を示し、新しい光子検出器として注目され、ここ十年で目覚ましい進展を成し遂げてきた。

SSPD は、超伝導ナノワイヤー (厚さ<5 nm, 線幅<100 nm) に光子を入射したとき発生した局所的抵抗 (ホットスポット) により生じた電圧パルスを測定することによって、光子1つを検出する。入射光子を吸収した後に、電子・フォノン緩和によりナノワイヤーが再び超伝導状態へ回復し、アフターパルス効果がなく繰り返し光子の検出が可能となる<sup>1)</sup>。また、SSPD は 4 K 以下の極低温で動作

するため、熱雑音がきわめて小さい。現在までに、検出効率 57% (@1550 nm)<sup>2)</sup>、暗計数率 1 Hz 以下<sup>3)</sup>、応答速度 10 GHz<sup>4)</sup>、タイミングジッター 30 ps<sup>5)</sup> などの高性能が報告され、量子暗号鍵配送 (QKD)<sup>6-10)</sup>、空間リンク光通信<sup>11,12)</sup>、半導体欠陥検査<sup>13,14)</sup>、単一光子光源評価<sup>15)</sup>、量子光学<sup>16)</sup> などさまざまな分野での応用が試みられ、SSPD の研究開発は材料やデバイスの基礎研究から、検出器実装、マルチチャネル化および小型化などの実用化のためのシステム開発、および応用のフェーズに入っている。

本文では、5年前に本誌で述べた SSPD デバイス開発に関する解説<sup>17)</sup> に続き、SSPD システム開発における技術課題を解説し、著者らが研究開発しているマルチチャネル窒化ニオブ (NbN) 超伝導ナノワイヤー単一光子検出システムの現状、性能および最新の研究動向と応用などについて紹介する。

### 1. SSPD システム要求性能と技術課題

SSPD システムに要求される基本性能として、デバイス単体と同様に高い検出効率、低い暗計数率、高速動作、小さいタイミングジッターなどがあげられるが、冷却システムや周辺回路などを含めた検出システム全体の性能評価が

(独)情報通信研究機構未来 ICT 研究所 (〒651-2492 神戸市西区岩岡町岩岡 588-2) E-mail: wang@nict.go.jp

必要となる。また、応用のためマルチチャンネル化およびシステムの安定性、信頼性、可搬性なども要求されている。

システム検出効率  $\eta_{\text{sys}}$  は、一般に  $\eta_{\text{sys}} = \eta_c * \eta_a * \eta_d$  によって定義されている。ここで、 $\eta_c$  は入射光子と検出器の結合効率、 $\eta_a$  は入射光子に対する検出器の吸収効率、 $\eta_d$  は検出器デバイスの固有検出効率である。結合効率  $\eta_c$  は、入射光のスポットと検出器サイズによってほぼ決定される。ファイバー結合の場合、用いるファイバーの直径より大きな検出器面積が望ましいが、検出器の面積を大きくすることによってナノワイヤーのインダクタンスも大きくなり、応答速度が遅くなる。これを解決するために、基板を薄くすることやレンズ付きファイバーを用いることによって、効率よく入射光子と検出器の結合を実現している<sup>18,19)</sup>。検出器の吸収効率  $\eta_a$  はナノワイヤーに用いる超伝導薄膜の吸収率に依存しているが、薄い超伝導薄膜により構成されたナノワイヤーの吸収率を高めるために、光学キャビティー構造がよく用いられている<sup>20)</sup>。検出器デバイスの固有検出効率  $\eta_d$  は、検出器に吸収された光子エネルギーが出力パルスとして変換されるファクターであり、ナノワイヤーの品質や均一性などに強く依存している。したがって、高いシステム検出効率を得るためには、光ファイバーと検出器の結合効率、検出器の吸収効率、およびデバイスの固有検出効率をすべて向上させなければならない。

SSPDの動作速度は電圧パルスの立ち上がりとりカバーリ時間によって制限される。立ち上がり時間は光子の入射により生成した最初のホットスポットをいかに速くナノワイヤーの端から端へ拡散させるかによって決定され、ナノワイヤーの厚さと線幅に依存している。一方、リカバーリ時間は、物理的に励起された準粒子のエネルギー拡散過程に依存する。その拡散過程は、原理的に電子-フォノン緩和時間  $\tau_{\text{e-ph}}$ 、およびフォノン拡散時間  $\tau_p$  によって決まる。電子-フォノン緩和時間  $\tau_{\text{e-ph}}$  は使用された超伝導材料の固有性質であり、超伝導転移温度  $T_c$  に比例する。 $T_c$  が高いほど  $\tau_{\text{e-ph}}$  は短い。高  $T_c$  の材料は超伝導エネルギーギャップも大きいため、1個の光子で生成されたホットスポットのサイズ(準粒子の数)も小さい。したがって、波長帯により最適な超伝導材料およびナノワイヤーの厚さや線幅などの選択が重要である。SSPDは原理的に10 GHz以上の応答速度で動作する高いポテンシャルを有している。しかし、薄くかつ長い超伝導ナノワイヤーが大きな力学インダクタンスをもたらすため、SSPDの動作速度はデバイスの構造によって大きく制限されている。この問題を解決するために、検出器のさらなる小型化、アレイ化など、さまざまなアプローチがなされている<sup>21,22)</sup>。

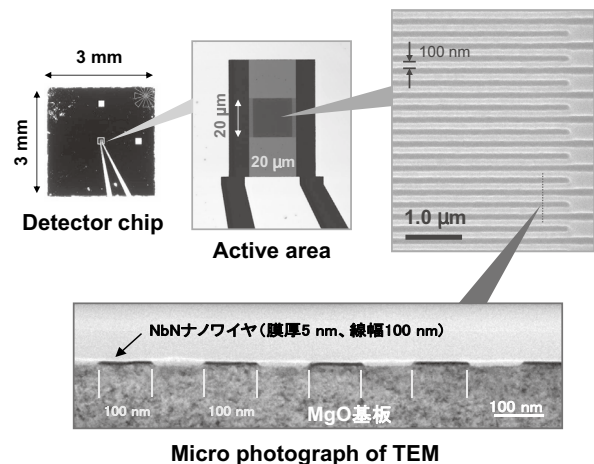


図1 NbN超伝導ナノワイヤー単一光子検出素子。

## 2. マルチチャンネル SSPD システム開発

### 2.1 NbN 薄膜および素子作製

高品質・極薄 NbN 薄膜の作製は、単一光子検出器の性能を左右するキーテクノロジーのひとつである。われわれは、いままでに開発してきた単結晶 MgO 基板における高品質 NbN 薄膜のエピタキシャル成長技術<sup>23,24)</sup>と電子ビーム描画、フォトリソグラフィ技術などを駆使して、厚さ 4 nm 以下、線幅 80~100 nm の NbN ナノワイヤー単一光子検出素子の作製に成功した<sup>25,26)</sup>。図1は作製した素子である。検出器チップサイズは 3 mm×3 mm であり、その中心に厚さ 4 nm、線幅 100 nm のナノワイヤーが設置されている。受光部の面積は、光入力に用いるファイバー(直径 10 μm)との結合を十分取れるために 15 μm×15 μm に設定した。出力電圧の読み出しは、NbN コプレナーウェーブガイドライン(CPW)伝送線路により行われている。

### 2.2 キャビティー構造

SSPDの検出効率および動作速度はナノワイヤーの厚さに強く依存しているが、薄いナノワイヤーの光吸収率は低く、厚さ 4 nm の NbN 薄膜の光吸収率は 1550 nm 波長において約 30% 弱である。ナノワイヤーの吸収率を高めるために、多層膜光キャビティー構造を用いて検出器の吸収率  $\eta_a$  を向上させる試みがなされてきた<sup>18-20)</sup>。図2にわれわれが用いた光キャビティー構造の模式図を示す。厚さ 4 nm の NbN ナノワイヤーの上に、250 nm の SiO 薄膜と 100 nm の銀あるいは金薄膜ミラーを設置している。SiO 薄膜の厚さは波長帯によって設計され、1550 nm 波長帯では 250 nm となっている。光子は MgO 基板側から入射している。図3は検出器に用いた厚さ 4 nm の NbN 薄膜の光吸収率の波長依存性を示している。4 nm の NbN 薄膜の吸収率は、波長帯に依存せず 1000~1800 nm において約 30% となっているが、光キャビティーを用いることによって、設計し

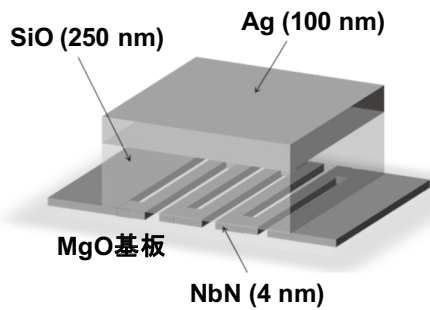


図2 SSPD 光キャビティー構造の模式図.

た中心波長帯 1550 nm 付近において 90% を超える吸収率を達成した。また、シミュレーション結果と実測値はよく一致しており、光キャビティーは設計通りに作成されていることを示している。

### 2.3 素子実装技術

SSPD と入射光子の結合技術 (実装技術) として、ファイバーダイレクト結合による方法、およびファイバーとナノステージを用いた方法が提案されている<sup>18,19,27)</sup>。われわれは実用化に向けて、市販小型 GM 冷凍機に適したファイバー結合技術を用いて SSPD 検出器の実装パッケージを開発した<sup>18,19)</sup>。図4はパッケージの模式図 (a) と実物の写真 (b) である。開発したパッケージは3枚の無酸素銅ブロックによって構成され、ファイバー導入系と直流バイアス、信号電圧読み出し系が一体化となっている。ファイバーの先端に屈折率分布型 (GRIN) レンズを内蔵しており、受光部サイズ 15  $\mu\text{m}$  角の検出器に入射した光スポットサイズを約 10  $\mu\text{m}$  に絞り、入射光子と検出器の結合効率を高めている。ファイバーと検出器の位置合わせは、光学顕微鏡とマイクロステージにより構成されたアライメントシステムを用いて行い、位置精度は 1  $\mu\text{m}$  以内である。

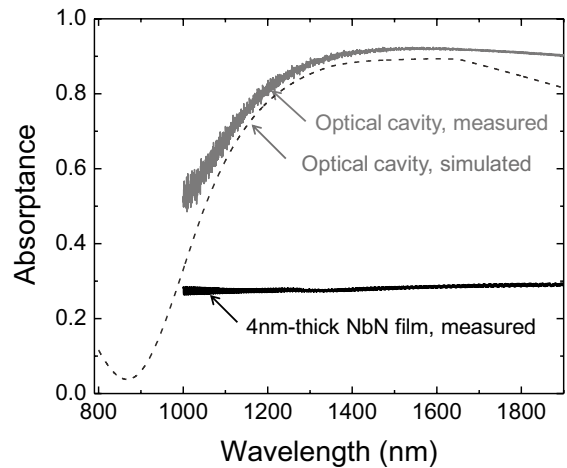


図3 厚さ 4 nm の NbN 薄膜の光吸収率波長依存性.

### 2.4 小型冷凍機を用いたマルチチャンネルシステム

SSPD の性能は冷却温度に依存しているため、極低温で動作させることが必須である。また、実用化の観点においては、液体ヘリウムを用いた冷却システムではなく、無冷媒小型冷凍機を用いた冷却システムが望ましい。われわれは、さまざまな応用目的への適応を目指して、100 V 電源で駆動可能な小型可搬式ギフォート・マクマホン (GM) 冷凍機を用いたマルチチャンネル SSPD システムを開発した<sup>26)</sup>。図5は開発したシステムの写真である。検出器用クライオスタット、冷凍機コンプレッサーおよび周辺エレクトロニクスなどはすべて高さ 175 cm のラックに収納され、液体ヘリウムを使用せずに連続運転が可能である。このシステムには、図4に示した SSPD パッケージを6個実装しており、同時に6チャンネルの光子検出が可能となっている。検出システムの到達冷却温度は 2.2 K であり、温度安定度は 10 mK 程度に達成している。

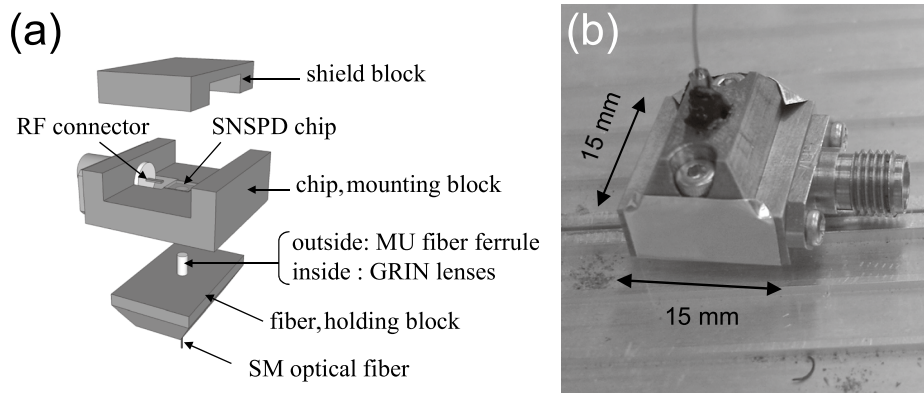


図4 SSPD パッケージの模式図 (a) と実物の写真 (b).



図5 GM 冷凍機を用いたマルチチャンネル SSPD システム。

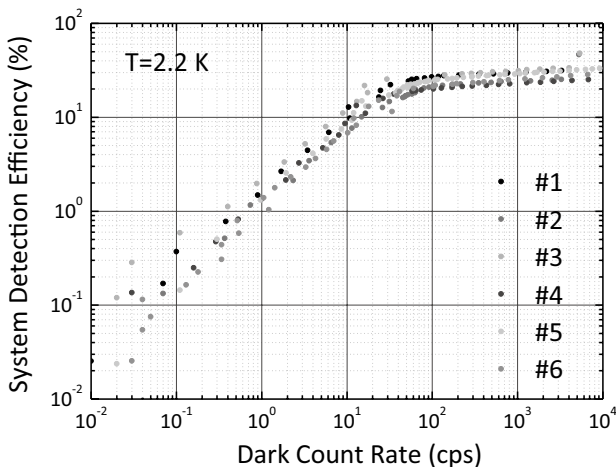


図6 1550 nm 波長帯における6チャンネル SSPD システムの検出効率と暗計数率。

### 3. システム性能と応用

#### 3.1 システム性能

システム性能評価は、検出器パッケージをマルチチャンネルシステムに実装し、2.2 K 温度において行った。図6は1550 nm 波長帯における6チャンネル検出器のシステム検出効率と暗計数率を示している。システム検出効率は入射光子数と検出器の出力パルス数の比として定義され、すべてのチャンネルでは暗計数率100 cpsにおいて20%を超える高い検出効率を得た。暗計数率1000 cpsではシステム検出効率は最大30%以上になる。また、1310 nm 波長帯においては、暗計数率100で検出効率が40%に達成している。図7は測定した1つのチャンネルの典型的なシステムジッターで

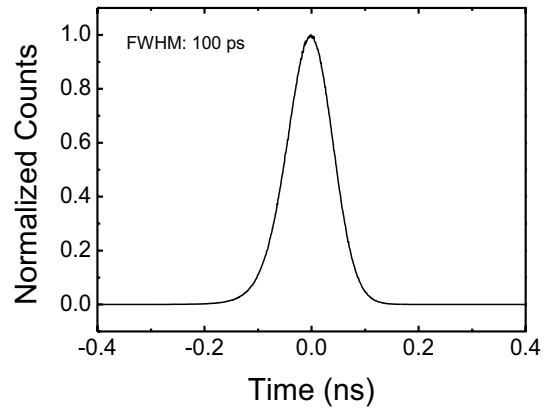


図7 典型的な SSPD システムジッター。

ある。周辺回路などを含めてシステムジッターは100 psであり、検出器の性能向上とシステムの最適化によりさらに小さくすることが可能である。応答速度は、実測したナノワイヤーのインダクタンス<sup>28)</sup>より約100 MHzと見積もられている。検出効率や暗計数率、ジッターなどの総合的システム性能は半導体 APD を大きく凌駕しており、すでに実用化可能なレベルに到達している。

#### 3.2 SSPD 応用

開発した SSPD とマルチチャンネルシステムは、量子暗号鍵配送 (QKD) フィールド実験や量子光学、単一光子光源評価などさまざまな分野で応用されている。2007 年に京阪奈地区において行った量子暗号鍵配送フィールド実験では、実際の敷設光ファイバーで世界最長距離 (97 km) かつ最高速 (10 kbits/s/photon) で量子暗号鍵配送に成功した<sup>8)</sup>。また、2010 年に東京 QKD ネットワークに2台のマルチチャンネル SSPD システムを導入し、都市圏敷設光ファイバー網で世界初の量子暗号鍵によるテレビ会議の実現に貢献した<sup>10)</sup>。

SSPD による単一光子検出技術は、将来の量子情報通信技術を支えるコア技術として、実用化に向けた研究開発が始まったばかりである。SSPD が提案されてわずか10年で、すでに実用化可能な光子検出システムとして半導体 APD を超える性能を示しており、素子の改良とシステムの最適化を図ることにより、さらなる性能アップも期待できる。本稿では、現在開発進行中の SSPD システム現状、技術課題および筆者らのマルチチャンネル SSPD システム性能と応用に関する成果などを中心に紹介したが、研究の進展はこの紙面では追いつかない。今後、究極の光子検出器として、量子情報通信分野だけでなく、量子光学、宇宙物理学、生体質量分析、新薬開発、低エネルギー粒子検出などさまざまな分野での実用化も可能となり、これからの研



究開発の進展に期待される。

本稿で紹介した研究成果の共同研究者である三木茂人、山下太郎、寺井弘高、藤原幹生、佐々木雅英各氏に深く感謝します。

## 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** (2001) 705-707.
- 2) K. M. Rosfjord, J. K. W. Yang, E. A. Dauler, A. J. Kerman, V. Anant, B. M. Voronov, G. N. Gol'tsman and K. K. Berggren: "Nanowire single-photon detector with an integrated optical cavity and anti-reflection coating," *Opt. Express*, **14** (2006) 527-534.
- 3) G. N. Gol'tsman, A. Korneev, I. Rubtsova, I. Milostnaya, G. Chulkova, O. Minaeva, K. Smirnov, B. Voronov, W. Slysz, A. Pearlman, A. Verevkin and R. Sobolewski: "Ultrafast superconducting single-photon detectors for near-infrared-wavelength quantum communications," *Phys. Status Solidi C*, **2** (2005) 1480-1488.
- 4) A. Pearlman, A. Cross, W. Slysz, J. Zhang, A. Verevkin, M. Currie, A. Korneev, P. Kouminov, K. Smirnov, B. Voronov, G. Gol'tsman and R. Sobolewski: "Gigahertz counting rates of NbN single-photon detectors for quantum communications," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15** (2005) 579-582.
- 5) E. A. Dauler, A. J. Kerman, B. S. Robinson, J. K. W. Yang, B. Voronov, G. Gol'tsman, S. A. Hamilton and K. K. Berggren: "Photon-number-resolution with sub-30-ps timing using multi-element superconducting nanowire single photon detectors," *J. Mod. Opt.*, **56** (2009) 364-373.
- 6) R. H. Hadfield, J. L. Habif, J. Schlafer, R. E. Schwall and S. W. Nam: "Quantum key distribution at 1550 nm with twin superconducting single-photon detectors," *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006) 241129.
- 7) H. Takesue, S. W. Nam, Q. Zhang, R. H. Hadfield, T. Honjo, K. Tamaki and Y. Yamamoto: "Quantum key distribution over a 40-dB channel loss using superconducting single-photon detectors," *Nat. Photonics*, **1** (2007) 343-348.
- 8) 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 97 km installed telecom fiber with wavelength division multiplexing clock synchronization," *Opt. Exp.*, **16** (2008) 11354-11360.
- 9) T. Honjo, S. W. Nam, H. Takesue, Q. Zhang, H. Kamada, 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. Exp.*, **16** (2008) 19118-19126.
- 10) M. Sasaki, M. Fujiwara, H. Ishizuka, W. Klaus, K. Wakui, M. Takeoka, S. Miki, T. Yamashita, Z. Wang, A. Tanaka, K. Yoshino, Y. Nambu, S. Takahashi, A. Tajima, A. Tomita, T. Domeki, T. Hasegawa, Y. Sakai, H. Kobayashi, T. Asai, K. Shimizu, T. Tokura, T. Tsurumaru, M. Matsui, T. Honjo, K. Tamaki, H. Takesue, Y. Tokura, J. F. Dynes, A. R. Dixon, A. W. Sharpe, Z. L. Yuan, A. J. Shields, S. Uchikoga, M. Legré, S. Robyr, P. Trinkler, L. Monat, J.-B. Page, G. Ribordy, A. Poppe, A. Allacher, O. Maurhart, T. Länger, M. Peev and A. Zeilinger: "Field test of quantum key distribution in the Tokyo QKD Network", *Opt. Exp.*, **19** (2011) 10387-10409.
- 11) B. S. Robinson, A. J. Kerman, E. A. Dauler, R. J. Barron, D. O. Caplan, M. L. Stevens, J. J. Carney, S. A. Hamilton, J. K. Yang and K. K. Berggren: "781 Mbit/s photon-counting optical communications using a superconducting nanowire detector," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 444-446.
- 12) E. A. Dauler, B. S. Robinson, A. J. Kerman, V. Anant, R. J. Barron, K. K. Berggren, D. O. Caplan, J. J. Carney, S. A. Hamilton, K. M. Rosfjord, M. L. Stevens and J. K. W. Yang: "1.25-Gbit/s photon-counting optical communications using a two-element superconducting nanowire single photon detector," *Proc. SPIE*, **6372** (2006) 637212.
- 13) J. Zhang, N. Boiadjeva, G. Chulkova, H. Deslandes, G. N. Gol'tsman, A. Korneev, P. Kouminov, M. Leibowitz, W. Lo, R. Malinsky, O. Okunev, A. Pearlman, W. Slysz, K. Smimov, C. Tsao, A. Verevkin, B. Voronov, K. Wilsher and R. Sobolewski: "Noninvasive CMOS circuit testing with NbN superconducting single-photon detectors," *Electron. Lett.*, **39** (2003) 1086-1088.
- 14) S. Somani, S. Kasapi, K. Wilsher, W. Lo, R. Sobolewski and G. Gol'tsman: "New photon detector for device analysis: Superconducting single-photon detector based on a hot electron effect," *J. Vac. Sci. Technol. B*, **19** (2001) 2766-2769.
- 15) M. J. Stevens, R. H. Hadfield, R. E. Schwall, S. W. Nam, R. P. Mirin and J. A. Gupta: "Fast lifetime measurements of infrared emitters using a low-jitter superconducting single-photon detector," *Appl. Phys. Lett.*, **89** (2006) 031109.
- 16) A. Korneev, Y. Vachtomin, O. Minaeva, A. Divochiy, K. Smirnov, O. Okunev, G. Gol'tsman, C. Zinoni, N. Chauvin, L. Balet, F. Marsili, D. Bitauld, B. Alloing, L. Li, A. Fiore, L. Lunghi, A. Gerardino, M. Halder, C. Jorel and H. Zbinden: "Single-photon detection system for quantum optics applications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum.*, **13** (2007) 944-945.
- 17) 王 鎮, 三木茂人, 藤原幹生, 佐々木雅英: "量子情報通信用超伝導ナノワイヤ単一光子検出器", *光学*, **36** (2007) 375-380.
- 18) 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. Exp.*, **17** (2009) 23557-23564.
- 19) S. Miki, M. Takeda, M. Fujiwara, M. Sasaki and Z. Wang: "Multichannel SNSPD system with high detection efficiency at telecommunication wavelength," *Opt. Lett.*, **35** (2010) 2133-2135.
- 20) K. M. Rosfjord, J. K. W. Yang, E. A. Dauler, A. J. Kerman, V. Anant, B. M. Voronov, G. N. Gol'tsman and K. K. Berggren: "Nanowire Single-photon detector with an integrated optical cavity and anti-reflection coating," *Opt. Exp.*, **14** (2006) 527-534.
- 21) G. Gol'tsman, O. Okunev, G. Chulkova, A. Lipatov, A. Dzardanov, K. Smirnov, A. Semenov, B. Voronov, C. Williams and R. Sobolewski: "Fabrication and properties of an ultrafast NbN hot-electron single-photon detector," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **11** (2001) 574-577.
- 22) A. Divochiy, F. Marsili, D. Bitauld, A. Gaggero, R. Leoni, F. Mattioli, A. Korneev, V. Seleznev, N. Kaurova, O. Minaeva, G. Gol'tsman, K. G. Lagoudakis, M. Benkhaoul, F. Lévy and A. Fiore: "Superconducting nanowire photon-number-resolving detector at telecommunication wavelengths," *Nat. Photon.*, **2** (2008) 302-306.
- 23) Z. Wang, A. Kawakami, Y. Uzawa and B. Komiyama: "Superconducting properties and crystal structures of single-crystal niobium nitride thin films deposited at ambient substrate temperature," *J. Appl. Phys.*, **79** (1996) 7837-7842.
- 24) 三木茂人, 鶴澤佳徳, 川上 彰, 王 鎮: "NbN ホットエレクトロンポロメータの作製と IF 帯域幅の評価", *電子情報通*

信学会論文誌 C, **J83-C** (2000) 867-873.

- 25) S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki and Z. Wang: "NbN superconducting single photon detectors prepared on single crystal MgO substrates," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **17** (2007) 285-288.
- 26) Z. Wang, S. Miki and M. Fujiwara: "Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information and communications," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15** (2009) 1741-1747.
- 27) X. Hu, T. Zhong, J. E. White, E. A. Dauler, F. Najafi, C. H. Herder, F. N. C. Wong, and K. K. Berggren: "Fiber-coupled nanowire photon counter at 1550 nm with 24% system detection efficiency," *Opt. Exp.*, **34** (2009) 3607-3609.
- 28) S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki, B. Baek, A. J. Miller, R. H. Hadfield, S. W. Nam and Z. Wang: "Large sensitive-area NbN nanowire superconducting single-photon detectors fabricated on single-crystal MgO substrates," *Appl. Phys. Lett.*, **92** (2008) 061116.

(2012年4月26日受理)