

# 量子情報通信用超伝導ナノワイヤー単一光子検出器

王 鎮\*・三木 茂人\*・藤原 幹生\*\*・佐々木雅英\*\*

## Superconducting Nano-Wire Single Photon Detectors for Quantum Information and Communications

Zhen WANG\*, Shigehito MIKI\*, Mikio FUJIWARA\*\* and Masahide SASAKI\*\*

Superconducting detectors based on macroscopic quantum phenomenon in superconductors have been widely applied for high-sensitive detection from electromagnetic wave to light, because of its ultra-high sensitivity, high energy resolution and low temperature operation. In this paper, we review recent progress on superconducting single photon detectors which is recently spotlighted in quantum information and communications, and describe our research results of NbN superconducting single photon detectors in communication wavelength.

**Key words:** superconducting single photon detectors, superconducting thin film, nanotechnology, quantum information and communication

量子力学の原理に基づく量子情報通信技術は、物理的に「絶対安全な通信」を提供しうるため、21世紀における安全・安心ネットワーク社会を支える基盤技術として20世紀末から注目されてきた。光子の集団である「光」の波動性を利用した現在の「光通信」とは違って、量子情報通信では「光子」の一粒一粒を自由自在に操り、また情報を乗せることにより情報伝達を行うため、光子1つである「単一光子」を発生、伝送、検出するなどの技術は量子情報通信を支える不可欠な基盤技術である。しかしながら、通信波長帯域における単一光子の発生や検出などの技術開発は遅れており、実用化に向けた解決すべき課題が多々残されている。その中で、単一光子検出器の高性能化（高検出効率、低暗計数率、高速動作、光子数識別等）は特に重要な研究課題となっている。

量子情報通信用単一光子検出器に要求される性能として、高速動作（GHz）、高検出効率（量子効率）、低暗計数率などがあげられる。また、実用のニーズから1.55  $\mu\text{m}$ の長い波長帯での動作および高い動作温度が望ましい。表1には、現在市販および研究開発されているおもな単一光子

検出素子の種類とその性能を示す。半導体を用いたアバランシフォトダイオード（APD）は、汎用的な素子として量子鍵配送や量子テレポーテーションなどの試験に用いられているが<sup>1-3)</sup>、1.55  $\mu\text{m}$ 波長帯に感度を有するInGaAsを用いたAPDにおいても検出効率は16%程度であり、また暗計数率も非常に高いことから、実際の信号検出効率はさらに低い。また、原理的に、APDではアフターパルスの影響により動作速度が制限され<sup>4)</sup>、高速通信を必要とした場合には不十分である。一方、超伝導転移端センサー（TES）や、超伝導ナノワイヤー単一光子検出器（SNSPD）などの超伝導材料を用いた単一光子検出素子は、表1に示すように速度、検出効率、暗計数率などすべて半導体素子よりはるかにすぐれた性能をもっており、高速、高効率かつ高分解能単一光子検出素子として注目と期待が寄せられている。

本稿では、超伝導単一光子検出器の原理、研究現状などを紹介し、量子情報通信応用への技術課題を解説する。また、筆者らが研究している窒化ニオブ（NbN）超伝導ナノワイヤー単一光子検出器の作製、性能評価システムの開

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

\*\* (独)情報通信研究機構新世代ネットワーク研究センター (〒187-8795 小金井市貫井北町 4-2-1)

表1 単一光子検出素子の性能比較.

検出器	応答速度 (Hz)	検出効率 (%)	暗計数率 (c/s)	動作温度 (K)
InGaAs APD	5 M	16	10000	270
Si APD	5 M	0.01	25	270
光電子増倍管 (PMT)	9 M	0.5	20000	250
量子ドット (QD)	—	0.14	100	4.2
超伝導 TES	50 K	88	0.001	0.1
超伝導ナノワイヤー 検出素子	2 G	57	0.1	4.2

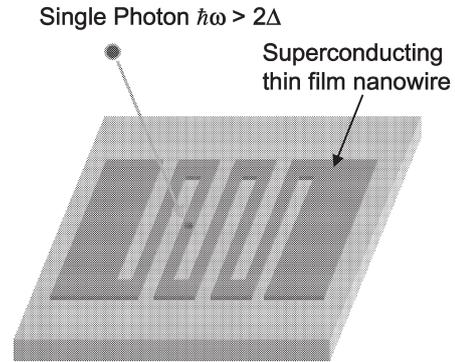
発および検出器の直流特性と光応答特性などを紹介する.

## 1. 超伝導単一光子検出器の研究現状

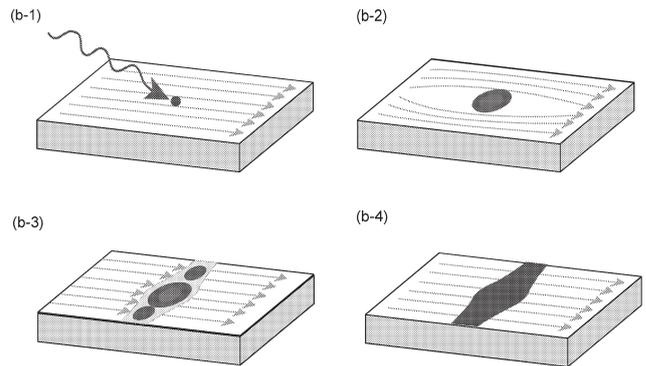
超伝導現象を利用した光子検出器は、動作原理により超伝導トンネル接合 (STJ), 超伝導転移端センサー (TES), および超伝導ナノワイヤー単一光子検出器 (SNSPD) に大別される. STJ は, 超伝導 SIS トンネル接合におけるフォトン励起により準粒子トンネリング現象を利用して光子検出を行い, 原理的に光子数の識別が可能である. しかし, 分解能を高めるために高品質なトンネル接合の作製が困難であることと, 応答速度が低いことから, 通信波長帯での単一光子検出例はまだ報告されていない.

現在, 通信波長帯での単一光子検出器として最も期待されているのは TES と SNSPD である. TES は, 超伝導薄膜における超伝導転移による急激な抵抗変化を温度センサーとして単一光子を検出する. 現在では 90% までの高い量子検出効率と 0.001 c/s の低暗計数率を示しており, さらに光子数分解能を有する高感度なフォトン検出器であるが, 数百 mK 以下の極低温環境が必要であることや応答速度が遅いことは, 高速性が必要とされる情報通信応用には不利な面がある<sup>9)</sup>. 一方, SNSPD は, 巨視的量子現象である超伝導状態における電子-フォノン相互作用を利用して, 超高速 (GHz) フォトン検出が可能である. また, 50% 以上の高い検出効率と 0.1 c/s 以下の低暗計数率を有し, 信号検出の効率は TES より若干低いが APD よりはるかに高い. それより, 数十 GHz 以上での高速動作と 4.2 K で動作可能であることは, 超高速量子通信の実用上にとっては非常に魅力的である<sup>9)</sup>.

超伝導ナノワイヤー単一光子検出器は, 1990 年代に提案され, 現在海外ではロシアのモスクワ州立教育大学, アメリカのマサチューセッツ工科大学 (MIT) や国立標準研究所 (NIST) などが中心に研究開発を行っており, 2 GHz での高速動作や 57% の検出効率などの高いパフォーマンスと高速通信応用へのポテンシャルを示し, 近年量子情報通信単一光子検出器として注目されてきた<sup>7-10)</sup>. 国



(a)



(b)

図1 超伝導ナノワイヤー単一光子検出素子の概略図 (a) とホットスポット生成過程の概念図 (b)<sup>9)</sup>.

内では, この分野の研究開発が立ち遅れており, 筆者らのグループが量子情報通信応用の目的で研究を開始したばかりである<sup>11,12)</sup>.

## 2. 超伝導ナノワイヤー単一光子検出器

### 2.1 動作原理

SNSPD は図1に示すように, 薄い超伝導薄膜を用いた非常に細いメアンダーライン (ナノワイヤー) で構成され, 動作原理はとてもシンプルである. 図1には, SNSPD の素子概念図 (a) と動作原理の概略図 (b) を示す. まず, 超伝導薄膜の転移温度  $T_c$  以下に冷却した素子に, 超伝導ナノワイヤーの臨界電流  $I_c$  よりもわずかに小さい電流  $I_b$  をバイアスして, 検出器両端の出力電圧を測定する. このとき, 超伝導状態であるため, 出力電圧はゼロである. 単一光子 ( $\hbar\omega > 2\Delta$ ) が照射されると, 超伝導ナノワイヤーのクーパー対が破壊され, 常伝導状態の部分 (ホットスポット) が生成される (図1 (b-1)). その後, 超伝導電流はホットスポット以外の超伝導部分へ流れるが, その部分の電流密度も増大し, 新たなホットスポットが発生する (図1

(b-2), (b-3)). 最後に, ホットスポットが薄膜ナノワイヤーの端から端を覆うようになり, 超伝導電流が遮断されるとともに出力電圧が発生する. その後, ホットスポットの中の励起電子はエネルギーを拡散することによって再び超伝導状態へと回復するが, 出力電圧も再びゼロになる. その繰り返しの結果は, 入射した単一光子の信号が電圧パルスの出力として観測される.

## 2.2 技術課題

上述のように, SNSPD は超伝導ナノワイヤーにおけるホットスポットの生成, 回復による発生した素子の抵抗変化を電圧パルス信号として観測するため, 動作速度は電圧パルスの立ち上がりトリカバリー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る. そのために, ナノワイヤーの線幅が細ければ細いほど急峻な立ち上がりが得られ, 高度なナノワイヤー微細加工技術が必要とされる. 一方, リカバリー時間は, 物理的に励起された電子のエネルギー拡散過程に依存する. その拡散過程は, 励起された電子がフォノンとの相互作用, およびフォノンの基板への拡散を経由してエネルギーを拡散し, 超伝導状態へ回復することになる. いいかえれば, リカバリー時間は原理的に電子-フォノン緩和時間  $\tau_{e-ph}$ , 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  $\tau_{e-ph}$  は使用された超伝導材料の固有性質であり, 一般に超伝導転移温度  $T_c^{1-6}$  に比例する.  $T_c$  が高いほど  $\tau_{e-ph}$  は短い, 高  $T_c$  の材料が超伝導エネルギーギャップも大きい, 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) も少ない. そのため, 使用波長帯により最適な超伝導材料の選択が重要である. 一方, フォノン拡散時間  $\tau_p$  は超伝導ナノワイヤーの膜厚, 基板との界面特性および基板の熱拡散効率などに依存するため, 極薄 (5 nm 以下) かつ高品質な薄膜作製技術と界面制御技術が要求される<sup>13)</sup>.

したがって, ナノワイヤー単一光子検出素子の技術課題として, 応用する波長帯に応じてなるべく高い  $T_c$  をもつ超伝導材料の選択, 極薄かつ高品質薄膜の作製, およびナノメートル微細加工技術などがあげられる.  $1.55 \mu\text{m}$  の通信波長帯にとっては, 現在最も適している超伝導材料が窒化ニオブ (NbN) である. NbN の超伝導エネルギーギャップが約 5.12 meV であるため, 1 個の入射光子に対して約数百個の準粒子が励起され, ナノワイヤーの線幅が 200 nm 以下であれば十分動作しうると考えられる. また, NbN の  $T_c$  が約 16 K, 電子-フォノン緩和時間が数十 ps であり, 4.2 K の動作温度で数十 GHz での高速動作が理

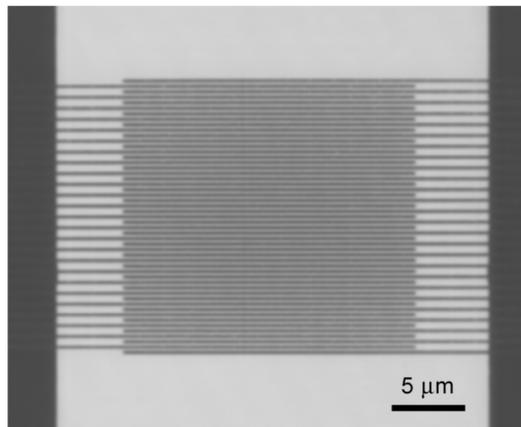


図2 NbN 超伝導ナノワイヤー単一光子検出素子のレーザー顕微鏡写真.

論的に予想されている.

## 3. NbN ナノワイヤー単一光子検出器

### 3.1 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. 筆者らは, 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>14-16)</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 5 nm 以下, 線幅 80~200 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>11,12)</sup>. 図2は, 作製した素子のレーザー顕微鏡写真である. 図に示した素子は, NbN 薄膜メアンダーラインとコプレーナーウェーブガイドライン (CPW) 伝送線路から構成され, 受光部面積が  $20 \times 20 \mu\text{m}^2$ , 線幅が 200 nm, フィリングファクター (ライン: スペース比) が 50% である.

素子の検出感度を向上させるためには, 極細のメアンダーラインかつ良好な超伝導特性を保つ素子作製技術の確立が不可欠である. 筆者らは, 電子線描画およびエッチング条件などの最適化により, 80 nm までの極細線に加工しても超伝導特性の劣化がない作製プロセスを開発した. 図3には, 膜厚 3.9 nm, 線幅 80 nm である NbN SNSPD 素子の電流-電圧特性を示す. この素子では, 80 nm まで微細加工されたにもかかわらず,  $T_c = 10.8 \text{ K}$ ,  $I_c = 19 \mu\text{A}$ ,  $J_c = 5.9 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  とすぐれた超伝導特性を示し, 高効率検出, 高速動作化に寄与することが期待される.

### 3.2 素子実装技術

SNSPD 素子の受光部分 (メアンダーライン部分) は数十  $\mu\text{m}$  角と非常に小さいため, 単一光子を素子に効率よく入射させるには, 単一光子が照射される範囲をできるだけ

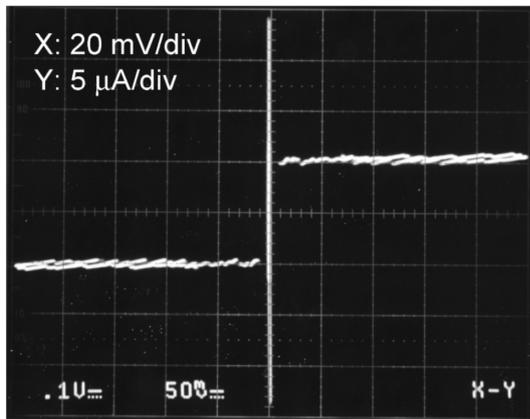


図3 NbN 超伝導ナノワイヤー単一光子検出素子の電流-電圧特性.

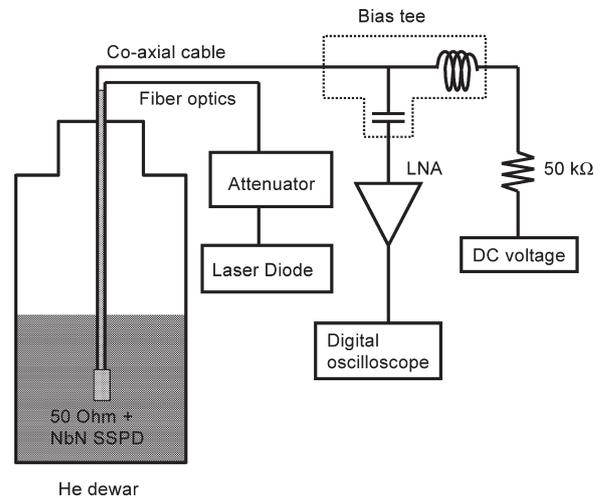
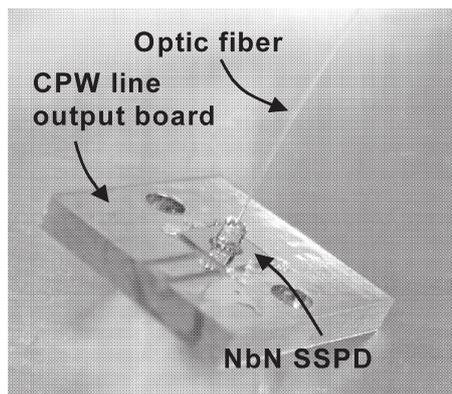
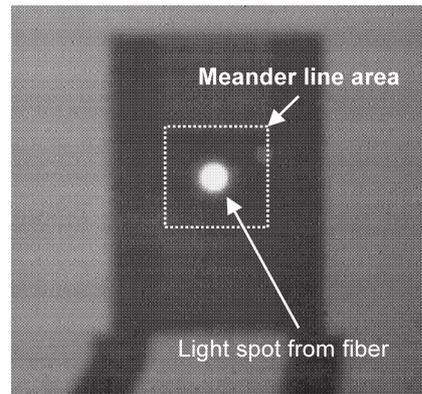


図5 光パルス照射, 検出器測定システム概略図.



(a)



(b)

図4 光ファイバーに接着された単一光子検出素子 (a) と, 素子受光部分と光ファイバーから照射された光スポットの顕微鏡写真 (b).

け小さく, 精度よく受光部分に合わせることが必要である。筆者らは, 光ファイバー先端部分と素子受光部を直接接着し, 入射光の高效率化を図った。作製プロセスは, まず, 先端に直径 0.2 mm のキャピラリーをもつ光ファイバーを素子の表面まで接近させ, 光ファイバーから照射される光スポットと素子受光部を素子裏面から顕微鏡で観察しながら, ファイバー位置を中心に調整する。その後, ファイバーと素子を接触させた状態に保ち, 紫外線硬化樹脂によってファイバーと素子の接着を行った。図4に, 接着後のファイバーと素子の写真 (a) とファイバーから照射される光スポットの写真 (b) を示す。素子受光部面積は  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ , 光スポットの直径が約  $20 \mu\text{m}$  であり, 素子受光部内に完全に収まっていることは確認できる。また, 4.2 K と室温の冷却サイクルによる素子の劣化や接着のはがれもみられなかった。

### 3.3 光照射測定システム

図5には, 光パルス照射, 検出器測定系を示す。光ファイバーと接着した NbN ナノワイヤー検出素子は測定治具に固定し, プリント基板により CPW 線路を介して同軸線路に接続され, 液体ヘリウムにより直接冷却される。この際, バイアス電流によるサーマルフィードバック効果を防ぐために,  $50 \Omega$  の抵抗を素子に並列に接続した。素子は, 高抵抗 ( $50 \text{ k}\Omega$ ) を直列に接続した定電圧電源を定電流源として, 同軸線路とバイアスティーを通してバイアスされている。出力信号は同軸線路, バイアスティーを介した後, 室温低雑音増幅器 (利得 25 dB, 周波数帯域 0.1~18 GHz) により増幅され, デジタルオシロスコープ (周波数帯域 2 GHz) により観測された。入力光源は,  $1.55 \mu\text{m}$  波長帯域のレーザーダイオードを用いた。光源のパルス幅は約 2 ns で, 最大出力は  $-30 \text{ dbm}$ , これは光子数に

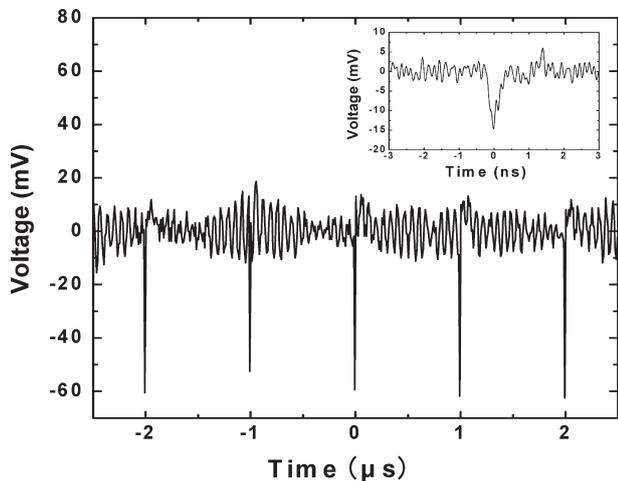


図6 光パルス照射による素子の出力電圧応答特性。

換算すると、 $0.78 \times 10^7$  光子/パルスとなる。光パルスの繰り返し周波数は1 Hz~1 MHzまで可変であり、出力パワーはアテニュエーターを挿入することによって単一光子レベルまで調整可能である。

### 3.4 光応答特性

光応答実験は、まず素子を臨界電流  $I_c$  の95%程度にバイアスして、信号源のパワーを減衰せずに光パルスを照射し、出力応答特性を観測した。図6には、素子の応答特性を示している。繰り返し周波数1 MHzの光パルス信号に対して、素子は確実に応答していることが確認された。また、出力信号のパルス幅は約500 ps程度であり、この素子は少なくとも1 GHzで高速動作が可能であることを示唆している。応答速度は励起電子の理論的な拡散速度よりやや遅いが、これは素子構造上の大きな寄生インダクタンスに起因していると考えられる。次に、照射パワーを0.5光子/パルスまで減衰させたときの出力応答特性を観測した。非常に低い確率であるが、図6に示した出力特性と同じ波形が観察され、単一光子の照射に対しても応答していることを確認した。しかしながら、検出効率は非常に低く、測定を行えるレベルには至っていない。今後、素子の膜厚や線幅、および構造などの最適化と、計測システムの高速度・低雑音化などを行い、量子検出効率の向上と高速動作を図る。

超伝導ナノワイヤー単一光子検出器は、将来の量子情報通信技術におけるキーデバイスとして期待され、実用化に向けた研究開発が活発になっている。本稿では、現時点までの研究現状および技術課題と、筆者らの研究結果などを中心に紹介したが、研究の進展にはこの誌面で追いつかない。今後、実用化に向けて既存半導体デバイスとの競争も

強いられ、素子開発だけではなく、高速計測や冷却などのシステム化の研究も非常に重要となってくる。超伝導の高感度、高速性を生かして、量子情報通信の分野で超伝導検出器の実用化を目指して、これから研究開発の進展が期待される。

### 文 献

- 1) G. Ribordy, J. D. Gautier, N. Gisin, O. Guinnard and H. Zbinden: "Fast and user-friendly quantum key distribution," *J. Mod. Opt.*, **47** (2000) 517-531.
- 2) G. Ribordy, J. Brendel, J. D. Gautier, N. Gisin and H. Zbinden: "Long-distance entanglement-based quantum key distribution," *Phys. Rev. A*, **63** (2000) 012309.
- 3) I. Marcikic, H. de Riedmatten, W. Tittel, H. Zbinden and N. Gisin: "Long distance teleportation of qubits at telecommunication wavelengths," *Nature*, **421** (2003) 509-513.
- 4) A. Tomita and K. Nakamura: "Balanced, gated-mode photon detector for quantum-bit discrimination at 1550 nm," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1827-1829.
- 5) D. Rosenberg, A. E. Lita, A. J. Miller and S. W. Nam: "Noise-free high-efficiency photon-number-resolving detectors," *Phys. Rev. A*, **71** (2005) 061803.
- 6) 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.
- 7) 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** (2006) 527-534.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) A. Korneev, V. Matvienko, O. Minaeva, I. Milostnaya, I. Rubtsova, G. Chulkova, K. Smirnov, V. Voronov, G. Gol'tsman, W. Slysz, A. Pearlman, A. Verevkin and R. Sobolewski: "Quantum efficiency and noise equivalent power of nanostructured, NbN, single-photon detectors in the wavelength from the visible to infrared," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15** (2005) 571-574.
- 11) 王 鎮, 三木茂人, 藤原幹生, 佐々木雅英: "窒化ニオブ(NbN)超伝導ナノワイヤー単一光子検出器", 電子情報通信学会第15回量子情報技術研究会資料, QIT2006-47-102 (2006) pp. 10-15.
- 12) S. Miki, M. Fujiwara, M. Sasaki and Z. Wang: "NbN superconducting single photon detectors prepared on single crystal MgO substrates," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, to be published.
- 13) Y. P. Gousev, G. N. Gol'tsman, A. D. Semenov, E. M. Gershenzon, R. S. Nebosis, M. A. Heusinger and K. F. Renk: "Broadband ultrafast superconducting NbN detector

- for electromagnetic radiation," J. Appl. Phys., **75** (1994) 3695-3697.
- 14) 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.
- 15) 三木茂人, 鶴澤佳徳, 川上 彰, 王 鎮: "NbN ホットエレクトロンボロメータの作製と IF 帯域幅の評価, 電子情報通信学会論文誌 C, **J83-C** (2000) 867.
- 16) S. Miki, Y. Uzawa, A. Kawakami and Z. Wang: "Fabrication and IF bandwidth measurement of NbN hot-electron bolometers," Electron. Commun. Jpn., **85** (2002) 77-80.

(2007年2月13日受理)