

## 超伝導転移端センサーによる光子数識別技術

福田 大治\*・R. M. T. Damayanthi\*<sup>\*,\*\*</sup>・高橋 浩之\*\*・大久保雅隆\*

### Photon Number Resolving with Superconducting Transition Edge Sensor

Daiji FUKUDA\*, R. M. T. DAMAYANTHI\*<sup>\*,\*\*</sup>, Hiroyuki TAKAHASHI\*\* and Masataka OHKUBO\*

A single photon detector with a superconducting transition edge sensor (TES) is one of low temperature detectors, which has a capability of photon number resolving, high quantum efficiency, and a low dark count rate. The operating principle of the detector is based on a calorimetric method, where the energy of an incident light pulse is determined by the resistance change of the transition edge sensor. This device consists of a superconducting film such as tungsten and titanium, an optical cavity for higher photon absorption ability, and a SQUID amplifier for an electrical current readout. Currently, the TES detectors show high quantum efficiency up to 88%, high energy resolving power of 0.2 eV. More than megahertz counting ratio would be possible in the near future by operating the detectors at higher temperature. These features are very practical and effective in many optical quantum measurements where photon number resolving at a telecommunication wavelength is crucial.

**Key words:** photon number resolving, single photon detector, quantum efficiency, counting rate, dark count, after pulse

超高速演算の実現を目指した量子コンピューターや、大容量超高速通信を目指した量子情報通信の分野では、光子間の量子ゲート回路<sup>1)</sup>や、測定誘起型非線形回路<sup>2)</sup>などの研究が近年活発に進められている。このような光演算回路を実現するための共通技術としては、高い可干渉性をもつ量子もつれ光子源、光子を量子干渉させる光学素子、そして、光子数識別の可能な単一光子検出器が必要である。特に、後者の光子数識別器としては、光子の到来をただ単に検出するだけでなく、対象となる光パルス中に何個の光子が含まれているかを同定できることが要求される。そのため、光子数識別器は到来検知型の単一光子検出器以上に高い性能をもつことが要求され、名称上もこれらの検出器とは区別してよばれることが多い。光パルス中の光子数を計数するためには、その検出器がエネルギーを測定する能力をもつことが必要となる。このエネルギー測定結果をもとに、そのエネルギーをもつ光子の検出頻度分布や、到達時

刻に関する分布を構築することが可能となる。表1に、代表的な光子数識別器の種類とその性能を示す。これらは、いずれも光入射により半導体中に生成される電子正孔対を検出原理としたものである。VLPC (visible light photon counter) は、Si半導体を母材とした検出器であり、スタンフォード大学を中心として開発が行われている<sup>3,4)</sup>。本検出器は、シリコン (Si) による光吸収層とSiにヒ素 (As) がドーピングされた電子増倍部をもち、光入射により光吸収層で生成した電子正孔対のうち正孔のみが電子増倍部に入射して、雪崩増幅されることにより信号が形成される。この増幅された信号の波高値は最初に光吸収層で作られた正孔の数に比例し、入射光パルスの光子数の情報を与えることになる。VLPCは694 nmの波長の光子に対して、量子効率88%、エネルギー分解能0.31 eV (FWHM) が達成されている。このように、VLPCは可視領域の光子に対しては高い性能が得られるものの、通信波長帯の光子に対

\* 産業技術総合研究所計測標準研究部門 (〒305-8563 つくば市梅園 1-1-1 中央 3-9) E-mail: d.fukuda@aist.go.jp

\*\* 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

表1 半導体を用いた代表的な光子数識別器とその諸性能。

光子数識別器	量子効率	最大計数率	暗計数率	エネルギー分解能	動作温度
VLPC <sup>3,4)</sup>	88%	$5.6 \times 10^5$	$2.0 \times 10^4$	0.31 eV	6.9 K
CIPD <sup>5,6)</sup>	80%	$4.0 \times 10^1$	—	0.62 eV	4.2 K

してはそのエネルギーがSiのバンドギャップ以下となるため測定することは不可能となる。また、室温からの背景輻射による暗計数率が大きいことも問題となっている。

一方、CIPD (charge integration photon detector) は、情報通信研究機構 (NICT) により研究開発が行われている検出器である<sup>5,6)</sup>。母材としてSiを用いたAPD (avalanche photodiode) やInGaAs PIN photodiodeなどが試みられている。この検出器では、光子入射により生じた電荷を低ノイズの電荷増幅器で蓄積して読み出す方式が採用されている。InGaAs検出器では通信波長帯の光子にも適用可能であり、最大計数率40 Hz、量子効率80%で光電荷数分布のピーク群が得られることが示されている。

このような背景の中で、超伝導体を用いた光子数識別器が近年登場し、半導体検出器では得られない低い暗計数率と高いエネルギー分解能が得られることから大きな注目を集めている<sup>7,8)</sup>。この検出器は、米国の国立標準技術研究所 (NIST) やアルビオン大学、国内では産業技術総合研究所 (AIST)<sup>9,10)</sup>で研究開発が進められており、量子暗号情報通信<sup>11)</sup>や量子光実験<sup>12)</sup>への適用も行われつつある。本論文では、これら超伝導転移端センサーによる光子数識別技術についてその原理と現状について紹介する。

## 1. 超伝導転移端光子数識別器

### 1.1 検出原理

超伝導転移端センサー (superconducting transition edge sensor; TES) による光子数識別器は、入射光パルスのエネルギーを熱的に測定することで、パルス中の光子数を同定する検出器である<sup>13)</sup>。本検出器の構造を図1 (a) に示す。光パルスを吸収してフォノンの温度変化へと変換する吸収体、その温度上昇を測定するための温度計であるTES、吸収体と温度一定の熱浴を適当な熱コンダクタンスで結ぶ熱リンクの3つが基本構造となっている。TES自身は、超伝導薄膜からできており、特に近赤外波長帯域の光子を測定対象とした場合は、熱容量を低減させるため吸収体とTESが同一構造となっている場合が多い。TESの光パルスの検出であるが、今、図1 (b) に示すようにTES薄膜がある初期平衡状態 (温度  $T_0$ 、抵抗値  $R_0$ ) にあるとする。ここでエネルギー  $E$  をもつ光パルスが入射

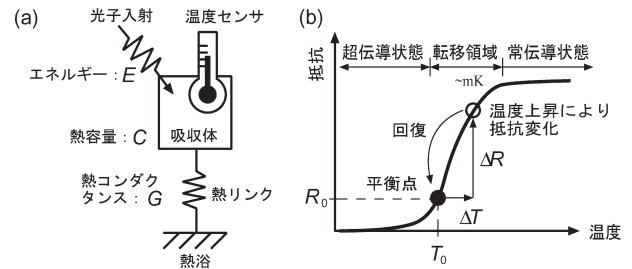


図1 超伝導転移端センサー (TES) による光子検出の模式図。(a) 熱輸送に関する模式図、(b) 光エネルギー入射によるTESの温度変化。

すると、TESの熱容量を  $C$  として、その温度は  $\Delta T = E/C$  だけ上昇する。この  $\Delta T$  により、TESの抵抗値が  $\Delta R$  だけ変化する。今、TESには一定の電圧  $V$  が印加されているとすると、 $\Delta R$  によりTESを流れる電流  $\Delta I$  が変化する。この  $\Delta I$  は、

$$\Delta I = -\frac{\alpha I_0}{T_0} \frac{E}{C} \quad (1)$$

と書ける。ここで、 $\alpha = (T_0/R_0)(dR/dT)$  はTESの温度感度、 $I_0 = V/R_0$  はTESのバイアス電流である。式(1)から、 $\Delta I$  は入射したエネルギー  $E$  に比例することがわかる。よって、 $\Delta I$  を波高弁別器等でヒストグラムをとれば、入射光パルスのエネルギーに関する分布が得られることになる。生じた温度上昇  $\Delta T$  は、その後、熱コンダクタンス  $G$  をもつ熱リンクを通して冷却され、ある時定数で再びもとの平衡温度  $T_0$  へと回復する。一方、TESを正しく動作させるためには、初期平衡温度  $T_0$  を数 mK 以内のきわめて狭い転移温度領域に制御することが必要である。TES検出器では、この問題を電熱フィードバック (electrothermal feedback; ETF) とよばれる方法で解決している<sup>13)</sup>。これは、TESを定電圧駆動させることで、自身のジュール熱を巧みに利用して温度の安定化を行うものである。今、抵抗値  $R_0$  のTESに定電圧  $V$  を印加すると、ジュール熱  $P = V^2/R_0$  が発生する。ここで何らかの擾乱  $\Delta P_{\text{inp}}$  により、TESの温度が上昇すると、抵抗値  $R_0$  も増大する。しかし、 $P$  と  $R_0$  は反比例の関係にあるから、 $P$  は減少することになる。このことは、 $\Delta P_{\text{inp}}$  の擾乱により温度変化  $\Delta T$  が生じると、それを相殺するように  $P$  が変化して、温度がもとの平衡温度  $T_0$  に回復させる負帰還が動的に働くということを意味している。このETFの機構により、TES全体に加わるパワーは常に一定となり、温度  $T_0$  は転移領域内のある一点に安定に自己制御されることになる。

### 1.2 光子数識別能力と最大計数率

TES検出器の光子数識別能力を示す性能因子であるエ

エネルギー分解能  $\Delta E_{FWHM}$  は、主として TES 自身の抵抗に起因したジョンソンノイズと、熱浴との熱コンダクタンスに由来したフォノンノイズによって決定され、以下のよう  
に記述できる<sup>13)</sup>。

$$\Delta E_{FWHM} = 2.36 \sqrt{4kT^2C(1/\alpha)\sqrt{n/2}} \quad (2)$$

ここで、 $k$  はボルツマン定数、 $T$  は動作温度、 $C$  は熱容量、 $n$  は熱輸送特性に依存した定数であり 4~5 程度の値である。 $C$  は TES の動作温度付近では電子比熱が主体 ( $C \propto T$ ) であるから、式 (2) より  $\Delta E_{FWHM}$  は  $T$  に対して 1.5 乗に比例し、光子数識別能は TES を低温で動作させたほうが向上することがわかる。

一方、素子が測定することができる光パルスの最大計数率は、光パルスが入射してから再びもとの温度へ回復するまでの時間によって決まる。この回復時間は、応答時定数とよばれ、ETF 動作の場合、

$$\tau_{ETF} = \frac{C}{G} \frac{1}{1 + \alpha/n} \quad (3)$$

と記述される<sup>14)</sup>。熱コンダクタンス  $G$  は、温度に対し 3~4 乗に比例するから、 $\tau_{ETF}$  は素子動作温度の 2~3 乗に反比例する。よって、最大計数率を大きくするためには TES を高温で動作させたほうが有利である。式 (2)、(3) から、光子数識別能力と最大計数率は動作温度に関して互いに相反する関係にあることがわかる。TES の動作温度  $T$  は、使用した超伝導体の臨界温度  $T_c$  で決まるため、その選択はきわめて重要となる。通信波長帯光子の検出用には、熱容量の低減と光学的な反射特性の点から単一元素の超伝導体を用いられることが多い。より高いエネルギーをもつ X 線などの検出用途には、超伝導薄膜と金などの常伝導金属薄膜を用いた近接二重層型超伝導薄膜が使用されている<sup>15)</sup>。この近接二重層膜では、各層の厚さによって任意の温度に  $T_c$  を制御することが可能である。

### 1.3 光吸収素子構造

検出器に入射した光は、超伝導薄膜で吸収されて熱に変換されるが、量子効率を高めるためには薄膜の光学的な反射特性が重要である。一般の金属は、1550 nm 帯の光子に対して 80% 以上の比較的大きな反射率を示す。これでは、大部分の入射光子が反射されてしまい量子効率の低下につながることになる。この問題を解決するため、NIST のグループでは、光閉じ込め構造 (光キャビティー) を用いて量子効率を改善することが試みられている<sup>16)</sup>。図 2 には、この光キャビティーを Ti- TES に適用した産総研の素子の例を示す。SiO<sub>2</sub>(無反射層)/Ti(TES)/SiO<sub>2</sub>(誘電層)/Al(ミラー) の各層からなり、入射光子は、無反射層とミ

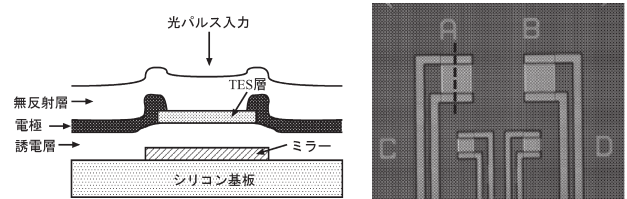


図2 産総研にて作製した光吸収キャビティー Ti- TES 素子写真。左模式図は、右写真点線の断面を示したものである。

表2 TES を用いた光子数識別器とその諸性能。

機関	量子効率	応答時定数	暗計数率	エネルギー分解能	動作温度
NIST <sup>17)</sup>	88%	4 $\mu$ s	400 Hz	0.2 eV (FWHM)	W@0.1 K
AIST <sup>10)</sup>	28%*1	0.3 $\mu$ s	—	0.7 eV (FWHM)	Ti@0.36 K

\*1 光吸収構造をもたない 20  $\mu$ m 角の素子で評価したときの値。

ラー層の間に効率的に閉じ込められ、超伝導体による吸収が高められることになる。計算機シミュレーションでは、1550 nm において 0.3% にまで反射率を抑えることが示されている。

TES 素子の大きさとしては、面積 10~20  $\mu$ m 角、厚さ 20~50 nm 程度の形状がよく用いられている。光パルスは、この TES 素子のすぐ前面に置いた光ファイバーから導光される。典型的なシングルモードファイバーのコア径は 10  $\mu$ m 程度であるから、ファイバーは TES 位置と精密な調芯が必要である。TES に照射する微弱光パルスの光源としては、レーザーと光減衰器を組み合わせたものがよく用いられている。光源の波長  $\lambda$ 、パルスレーザーの繰り返し周波数  $f$ 、平均パワー  $P$ 、光減衰器の減衰量  $A$  とすると、光パルス 1 個あたりに含まれる光子の平均個数  $n$  は、 $n = \lambda P / f A h c$  となる。ここで  $h$  と  $c$  は、プランク定数と光速である。後述する筆者らの実験では、この方法で光子数を概算している。

### 1.4 超伝導光子数識別器の現状

現在までに、通信波長帯の光パルスに対して、NIST のグループと筆者らの AIST のグループが TES による光子数識別に成功している。表 2 に、これらの TES 検出器の代表的な性能を示す。NIST では、超伝導体としてタングステン (W- TES) が使用されており、その  $T_c$  は 0.1 K 程度である。この比較的低い温度に  $T_c$  をもつことから、検出素子の熱容量が抑制され、高いエネルギー分解能  $\Delta E_{FWHM} = 0.2$  eV が達成されている。1550 nm 光子 1 個のエネルギーは 0.8 eV であるから、この分解能は、きわめて低い光子数誤り率を与える。また、暗計数率も半導体検出器に比べて 100 分の 1 から 1000 分の 1 程度にまで減少



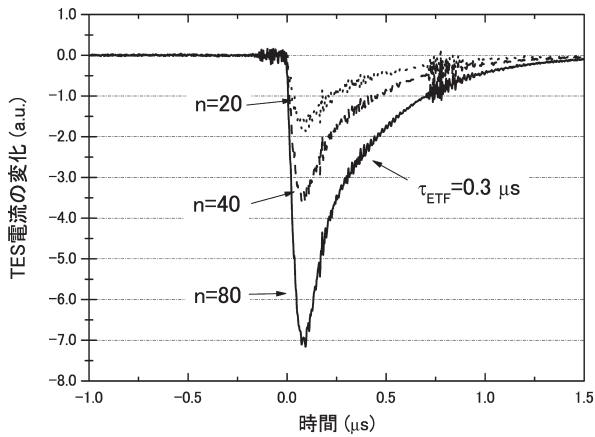


図3 光パルス入力に対するTi-TESの応答信号例。 $n$ は、入射した1550 nm光子の概算個数を表す。時間0.7  $\mu$ s付近の振動成分は外来成分によるノイズである。

している。この低い暗計数率特性は、量子暗号情報通信における符号誤り率の低減や長距離化に大きく寄与している<sup>11)</sup>。一方で、応答時定数については、 $\tau_{\text{ETF}}=4 \mu\text{s}$ と遅く最大計数率も50 kHz程度に制限される。この計数率では、通常の量子光学実験で使用されるパルスレーザーの繰り返し周波数(MHz超)に対応することは不十分である。この低速な応答特性は、TESを実際の量子光実験に応用するうえで最大の弱点とされていた。この問題を解決するため、AISTではより高い温度に $T_c$ をもつチタニウムを用いたTES(Ti-TES)により応答速度を改善する試みが行われている。チタニウムはバルク材で0.39 Kに $T_c$ をもつため、W-TESのように断熱消磁型冷凍機や希釈冷凍機など比較的大規模な冷凍機で0.1 K以下にまで冷却する必要はなく、<sup>3</sup>He冷凍機を用いて簡便に実験を行うことが可能となる。また、チタンは1550 nmで光学的反射が低く、量子効率の向上に向けた設計などにも有利である。図3は、筆者らのTi-TESによる検出器の応答信号波形例(平均パルス)を示したものである。応答時定数 $\tau_{\text{ETF}}=0.3 \mu\text{s}$ をもつ信号波形が観察され、W-TESに比べて10倍以上の高速性を実現することに成功している。これにより、0.6 MHz程度の最大計数率まで $\Delta E_{\text{FWHM}}$ を劣化させることなく測定できるものと期待できる。また、図3の $n$ は入射光子数であるが、 $n$ に応じて信号の波高値が比例して変化していることがわかる。これは、式(1)を反映したものであり、検出器がエネルギー測定能力をもっていることを示している。各測定波形の波高値から、その波高値に対する頻度分布を求めた結果を図4に示す。パルスレーザーの光強度を極度に減衰させたとき、そのパルス中に含まれる光子数の分布はポアソン分布になることが知

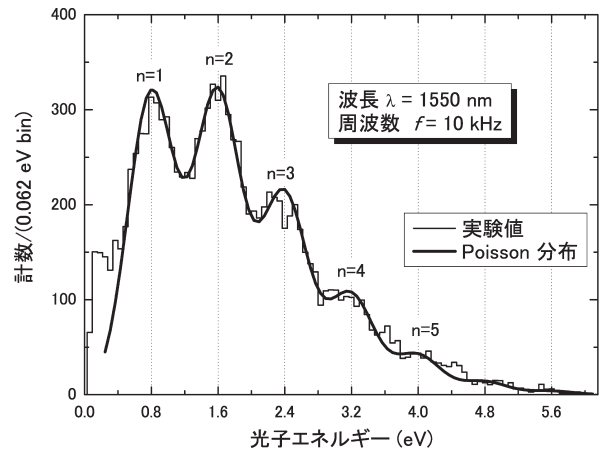


図4 微弱コヒーレントパルス光をTi-TESで測定したときの波高分布測定結果。細線は実験結果、太線はポアソン分布とのフィッティング結果である。

られているが、この分布を反映して光子数分布に起因したピーク群が観測されていることがわかる。図4の太線は、測定器のエネルギー分解能を考慮して求めた理論的なポアソン分布であり、実験値と良好に一致していることがわかる。現在AISTのTi-TES素子のエネルギー分解能は0.7 eV(FWHM)であるが、今後、読み出しノイズの低減や素子構造の最適化などにより、光子数ピーク群はさらに明確に分離できるものと考えている。

## 2. 光子数識別器の応用

光子数識別器では、到達検知型の単一光子検出器では得られない光パルスの本質的な情報を得ることが可能である。これは、量子光学のさまざまな分野に対して、きわめて有益な計測手段を与えることになる。この一例として、図5に、光干渉計と光子数識別器からなる線形光学量子演算子を示す<sup>12)</sup>。これは、量子ビット(qubit)の量子状態を制御するためのCNOTゲート(controlled-not gate)として動作し、制御ビットの量子状態に応じて標的ビットの量子状態を反転させるものである<sup>18,19)</sup>。この量子回路は、量子計算や量子情報処理を実現するためには必須の演算要素となる。今、標的ビットにある量子状態を入力し、量子相関もつれにある光子対のひとつと偏光ビームスプリッターで干渉させる。一方、光子対のもう片方を制御ビットの量子状態と干渉させる。これらの干渉結果に応じて、2つの光子検出器には0, 1, 2個のいずれかの個数の光子が到達することになる。このうち、CNOT演算が正しく行われるのは、光子数識別器が光子をどちらも1つだけ検出したときのみであり、この事象のみを選択して演算結果として採用する。

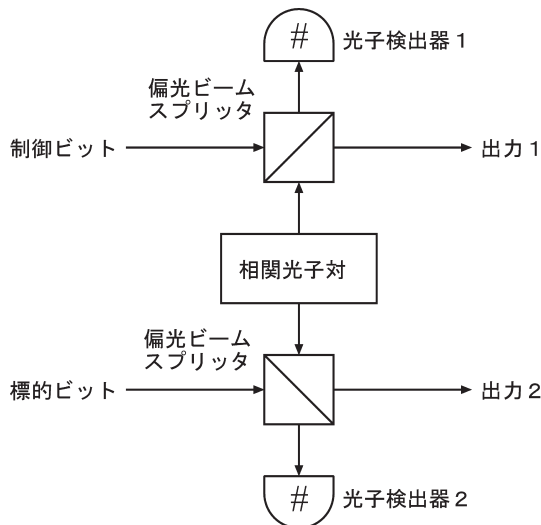


図5 相関量子光子対，線形光学素子，および光子数識別器を組み合わせたCNOTゲートの例<sup>12)</sup>。制御ビットの量子状態に応じて，標的ビットのNOT演算結果が出力2から出力される。

このように，光を用いた量子演算回路では，光子数識別器は本質的な役割を演じる。光量子演算を有効に行うためには，99.99%以上の量子効率と数MHz以上の最大計数率をもつことが検出器に要求される。超伝導転移端センサーを用いた光子数識別器は，動作温度を高くすることでサブMHz領域での動作が可能になりつつあることは述べた。また，最近の冷凍技術の進歩により，無冷媒で動作可能な商用の冷凍機が入手できるようになってきている。これらのことから，超伝導光子数識別器は，量子光学に関連した分野で重要な役割を果たしていくものと期待している。

超伝導転移端センサーによる光子数識別器は，暗計数率が低いなど既存の半導体検出器にはない特徴をもち，特に通信波長帯の光子に対しては，数十kHz以上の計数率で光子数識別できる唯一の技術となっている。そのため，光による量子ゲートの実現など光パルス中の光子数を識別することが重要な用途には，超伝導光子検出器が今後きわめて有効な計測手段になるものと考えている。また，極低温での超高速信号読み出し技術や冷媒不要の冷凍機技術の開発も近年急速に進んでいる。このような技術を用いれば，超伝導光子数識別器もさらなる性能向上が図れるものとともに，安価な極低温冷凍機の普及が進むにつれ，超伝導光子数識別器が手軽な計測装置として利用できるようになるものと期待している。

本研究を遂行するにあたり常にご支援いただいた産業技術総合研究所小柳正男主席評価役，三戸章裕副部門長に感

謝いたします。また，光を用いた量子現象や超伝導デバイスの作製にあたり助言していただいた土田英実上席研究員，吉澤明男主任研究員，浮辺雅宏主任研究員に感謝します。本研究の一部は，総務省戦略的情報通信研究開発推進制度（SCOPE），および，文科省科学研究費補助金若手研究（A）の補助を受けて行いました。

## 文 献

- 1) E. Knill, R. Laflamme and G. J. Milburn: "A scheme for efficient quantum computation with linear optics," *Nature*, **409** (2001) 46-52.
- 2) M. Dakna, T. Anhut, T. Opatrnr, L. Knöll and D.-G. Welsch: "Generating Schrödinger-cat-like states by means of conditional measurements on a beam splitter," *Phys. Rev. A*, **55** (1997) 3184-3194.
- 3) J. S. Kim, S. Takeuchi, Y. Yamamoto and H. H. Hogue: "Multiphoton detection using visible light photon counter," *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1999) 902-904.
- 4) S. Takeuchi, J. Kim, Y. Yamamoto and H. H. Hogue: "Development of a high-quantum-efficiency single-photon counting system," *Appl. Phys. Lett.*, **74** (1999) 1063-1065.
- 5) M. Fujiwara and M. Sasaki: "Multiphoton discrimination at telecom wavelength with charge integration photon detector," *Appl. Phys. Lett.*, **86** (2005) 111119.
- 6) M. Fujiwara and M. Sasaki: "Photon-number-resolving detection at a telecommunications wavelength with a charge-integration photon detector," *Opt. Lett.*, **31** (2006) 691-693.
- 7) A. J. Miller, B. Cabrera, R. W. Romani, E. Figueroa-Feliciano, S. W. Nam and R. M. Clarke: "Development of wide-band, time and energy resolving, optical photon detectors with application to imaging astronomy," *Nucl. Instrum. Methods A*, **444** (2000) 445-448.
- 8) A. J. Miller, S. W. Nam, J. M. Martinis and A. V. Sergienko: "Demonstration of a low-noise near-infrared photon counter with multiphoton discrimination," *Appl. Phys. Lett.*, **83** (2003) 791-793.
- 9) D. Fukuda, H. Takahashi, Y. Kunieda, N. Zen, M. Ohkubo and M. Nakazawa: "Noise and signal analysis of Ir/Au TES with asymmetrical slits parallel to the electric current," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, **15** (2005) 522-525.
- 10) D. Fukuda, R. M. T. Damayanthi, A. Yoshizawa, N. Zen, H. Takahashi, K. Amemiya and M. Ohkubo: "Titanium based transition edge microcalorimeters for optical photon measurements," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* (2007) to be published.
- 11) D. Rosenberg, S. W. Nam, P. A. Hiskett, C. G. Peterson, R. J. Hughes, J. E. Nordholt, A. E. Lita and A. J. Miller: "Quantum key distribution at telecom wavelengths with noise-free detectors," *Appl. Phys. Lett.*, **88** (2006) 021108.
- 12) S. Nam, A. J. Miller and D. Rosenberg: "Low-temperature optical photon detectors for quantum information applications," *Nucl. Instrum. Methods A*, **520** (2004) 523-526.
- 13) K. D. Irwin: "An application of electrothermal feedback for high-resolution cryogenic particle-detection," *Appl. Phys. Lett.*, **66** (1995) 1998-2000.
- 14) K. D. Irwin, G. C. Hilton, D. A. Wollman and J. M. Martinis: "Thermal-response time of superconducting transition-edge microcalorimeters," *J. Appl. Phys.*, **83** (1998) 3978-3985.
- 15) J. M. Martinis, G. C. Hilton, K. D. Irwin and D. A. Wollman:

- “Calculation of  $T_c$  in a normal-superconductor bilayer using the microscopic-based Usadel theory,” Nucl. Instrum. Meth. A, **444** (2000) 23-27.
- 16) D. Rosenberg, A. E. Lita, A. J. Miller, S. Nam and R. E. Schwall: “Performance of photon-number resolving transition-edge sensors with integrated 1550 nm resonant cavities,” IEEE Trans. Appl. Supercond., **15** (2005) 575-578.
- 17) D. Rosenberg, A. E. Lita, A. J. Miller and S. W. Nam: “Noise-free high-efficiency photon-number-resolving detectors,” Phys. Rev. A, **72** (2005) 061803.
- 18) M. Koashi, T. Yamamoto and N. Imoto: “Probabilistic manipulation of entangled photons,” Phys. Rev. A, **63** (2001) 030301.
- 19) T. B. Pittman, B. C. Jacobs and J. D. Franson: “Probabilistic quantum logic operations using polarizing beam splitters,” Phys. Rev. A, **64** (2001) 062311.

(2007年3月8日受理)