

超伝導単一光子検出器

Superconducting Single Photon Detectors

福田大治 吉澤明男 土田英実

A bstract

超伝導現象に基づく単一光子検出器は、暗計数が小さい、量子効率が高い、時間分解能が高いなど、既存の半導体による単一光子検出器をはるかにりょうがする性能を有している。この性能を生かし、量子情報通信分野や量子光学の分野では、単一光子レベルの微弱な光パルスを受光するための検出器として超伝導検出器の応用が急速に進められている。特に、量子暗号鍵配布実験では、秘密鍵を共有するための光子検出器に超伝導単一光子検出器を用いることで、量子鍵伝送速度の向上や伝送距離の長距離化が可能であることが実証されている。今後、更なる性能向上や安価な冷凍機の普及が進めば、量子情報通信分野において超伝導単一光子検出器は大きな役割を果たすものと期待されている。

キーワード：単一光子，量子効率，光子数識別，アフターパルス，低ノイズ

1. はじめに

我々が普段目にしている光は“光子 (photon)”の粒の集合から成り立っており、日常空間には様々な波長を持つたくさんの光子が満ちあふれている。一方、近年、扱う光子の数を1個程度までに極端に少なくした新しい光の利用が広がっている。光子1個はそれ以上分割できないことからその存在自体が量子的であり、また、光子数スキージング、量子もつれ状態、巨視的重ね合わせなど、古典的な光とは全く異なる量子的な振舞いを示す。このような非古典光を利用して、量子情報通信、量子光計算、量子計測などの様々な応用が進められている。特に、量子情報通信では、光子1個を情報の担体とすることにより絶対的な安全性を持つ通信が可能となるため、実用化を目指した研究開発が盛んである。このような背景の中で、極微弱光パルスの検出や光パルス中の光子数

識別などの単一光子検出技術は、量子光学分野においては必須の技術の一つであり、半導検出器や光電子増倍管、超伝導検出器など、様々な原理に基づいた検出技術開発が試みられている。

表1⁽¹⁾⁻⁽¹²⁾に代表的な単一光子検出器の諸性能を示す。In-GaAs APD (Avalanche PhotoDiode) 検出器は、量子光学実験や量子暗号鍵配布で広く使用されている検出器の一つである。量子効率がやや低いものの、MHz程度の計数率動作、 $-60\sim-30^{\circ}\text{C}$ 程度のペルチエ冷却で到達できる温度で動作可能などの特徴がある。しかしながら、アフターパルスや熱電子励起による暗計数率が高いという問題がある。Si APD 検出器は、比較的高速な応答速度と良好な暗計数率特性を持ち、可視領域の光子に対する量子光学実験によく使用されている。しかしながら、 $1\mu\text{m}$ より長い波長の光子に対しては感度を持たないため、通信波長帯域光子に適用することは困難である。

以上のような背景の中で、近年、超伝導トンネル接合(STJ)検出器、超伝導ナノワイヤ単一光子検出器(SSPD)、及び、超伝導転移端単一光子検出器(TES)など、超伝導現象を用いた新しい単一光子検出器が登場してきた。これら超伝導単一光子検出器は、既存の検出器に比べて低暗計数率、超高速性、高量子効率などが可能であり、その性能を生かして量子暗号情報通信での量子鍵配布実験や、量子もつれ光子対の検出などへの適用が試みられて

福田大治 独立行政法人産業技術総合研究所計測標準研究部門
E-mail d.fukuda@aist.go.jp
吉澤明男 正員 独立行政法人産業技術総合研究所光技術研究部門
E-mail yosizawa-akio@aist.go.jp
土田英実 正員 独立行政法人産業技術総合研究所光技術研究部門
E-mail h-tsuchida@aist.go.jp
Daiji FUKUDA, Nonmember (National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba-shi, 305-8563 Japan), Akio YOSHIZAWA, and Hidemi TSUCHIDA, Members (Photonics Research Institute, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba-shi, 305-8563 Japan).
電子情報通信学会誌 Vol.90 No.8 pp.674-679 2007年8月

表 1 各種単一光子検出器の代表的な特性

検出器	量子効率	暗計数率	時間ジッタ	最大計数率	動作温度	光子数識別	文献	
半導体検出器	InGaAsAPD	0.3 at 1,550 nm	$\sim 10^3$ cps	800 ps	500 kHz	210 K	不可	(1), (2)
	Si APD 1	0.76 at 702 nm	65 cps	200 ps	5 MHz	-3℃	不可	(3), (4)
	Si APD 2	0.88 at 694 nm	2×10^4 cps	< 2 ns	600 kHz	6.9 K	可能	(5), (6)
超伝導検出器	STJ	0.5 at 200 ~ 500 nm			3 kHz	0.4 K	可能	(7), (8)
	SSPD (Moscow)	0.1 at 1.3 ~ 1.5 μm	$10^2 \sim 10^3$ cps	181 ps	2 GHz	2.3 K	不可	(9)
	SSPD (MIT)	0.57 at 1.5 μm		41 ps		1.8 K	不可	(10)
	TES (NIST)	0.88 at 1.5 μm	4×10^2 cps	72 ns	50 kHz	0.1 K	可能	(11), (12)

いる。本稿では、これら超伝導単一光子検出器として、量子暗号鍵配布への応用が急速に進められている SSPD と TES を取り上げ、これらの検出器の原理と開発の現況、及びその応用について紹介する。

2. 超伝導単一光子検出器

2.1 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器

超伝導ナノワイヤ単一光子検出器は、モスクワ州立教育大学⁽¹³⁾、ロチェスター大学等で当初研究が開始され、現在では、更にマサチューセッツ工科大学(MIT)や米国立標準技術研究所(NIST)などで精力的に研究が行われている。国内では、情報通信研究機構(NICT)のグループが取り組んでいる。この検出器は、SSPD (Superconducting Single Photon Detector) と通常呼ばれているが、本稿では他の超伝導検出器と区別するために「ナノワイヤ」と日本語では併記した。

SSPD は、幅 100nm、厚さ数 nm の極めて薄い超伝導ワイヤをメアンダ状に配置した構造をしている。この概略を図 1(a) に示す。このナノワイヤに臨界電流密度 J_c よりわずかに小さいバイアス電流 $I_b \sim J_c \times A$ を流しておく。A はナノワイヤの断面積である。この状態で光子が入射すると、局所的に常伝導となる領域が形成され(図 1(b))、そのとき生じる抵抗を電圧信号として読み出すことで光子を検出する。この常伝導領域は、電子的に熱い状態(ホットエレクトロン: hot electrons)となっており、電子系、フォノン系を経てエネルギー拡散し再び元の平衡状態へと緩和することになる。この緩和時間は、超伝導転移温度 T_c が高く電子-フォノンの相互作用が強い材料ほど短くなる。そのため、超伝導体としては 12K 程度に T_c を持つ窒化ニオブ(NbN)が用いられており、その緩和時間はおよそ数十 ps である。よって、NbN-SSPD の応答は原理的に高速であり、GHz を超える最大計数率にまで光子を計測できる。SSPD は、冷却温度も 1.6 ~ 4.2K 程度でよく、液体ヘリウムを用いた簡便なデューワーや機械式冷凍機が適用可能である。これは実用化の点では極めて望ましい。量子効率については、NbN の反射特性の点から数%程度の低い値が従来報告

されていた。これを改善するため、MIT では図 1(c) のように光吸収キャビティ^(注1)を SSPD に埋め込むことにより量子効率を向上させる試みが行われている⁽¹⁰⁾。この光キャビティは、超伝導ナノワイヤを無反射コーティングと金/Ti ミラーで挟み込んだものであり、素子下面から入射した光子はこの構造により効率的に超伝導薄膜に吸収されることになる。MIT では、素子単体の量子効率として 57% を得たと報告している。

2.2 超伝導転移端マイクロカロリメータ

超伝導転移端マイクロカロリメータ(TES microcalorimeter)は、光子入射によって生じた温度変化を超伝導体の転移領域を利用して検出するものである。図 2(a) に TES の検出概念を示す。入射した光子が超伝導転移端センサで吸収されるとそのエネルギーにより素子の温度が上昇する。この温度上昇を図 2(b) のように超伝導の抵抗変化として検出する。通常、超伝導体はその臨界温度付近で、mK 以内の幅で常伝導から超伝導へ相転移する。よって、この転移領域を光子入射に伴う温度変化の検出に利用することで、高い検出感度を持った測定器を実現できることになる。TES の抵抗変化は、自身を流れる電流変化となって現れ、これを超伝導量子干渉素子(SQUID)による電流アンプで電圧信号として取り出す。その後、TES はある緩和時間で再び平衡状態へ戻ることになる。TES の出力信号は、その動作点が転移領域内にある限り、入射光パルスのエネルギーに比例する。微弱光パルスの場合、光パルス中に含まれる光子数に応じてそのエネルギーは飛び飛びの値をとるから、TES を用いればその光パルス中に光子が幾つ含まれているかを知ることが可能となる。このことは、非古典的な光源の光子数分布側定や量子光演算における非ガウス形量子演算子の実現⁽¹⁴⁾などに絶大な威力を発揮すると期待されている。一方、現在達成されている TES の典型的な緩和時間としては、通信波長帯域用の素子で数 μs である。これは SSPD と比較すると遅く、量子情報通信

(注 1) この光閉込め型の吸収キャビティのアイデアは、NIST のグループより初めて提唱され、2.2 で紹介する TES に対して初めて適用された。

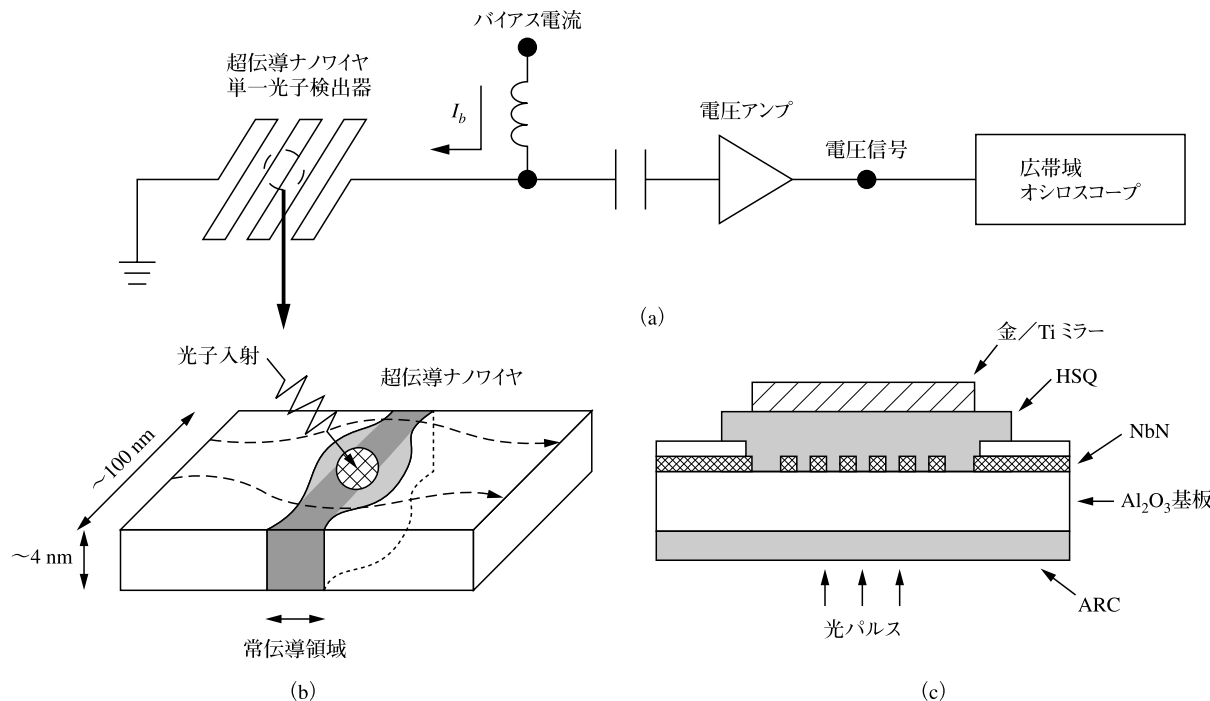


図1 超伝導ナノワイヤ単一光子検出器の概念 (a)超伝導ナノワイヤ単一光子検出器と信号読み出し回路。検出素子は、受光面積を広くするためにメアンダ構造をとる。素子には超伝導臨界電流にほぼ等しい電流が流される。光子入射に伴う抵抗変化は、電圧信号として読み出される。(b)超伝導ナノワイヤの拡大図。光子が入射すると局所的な常伝導領域(ホットスポット)が形成される。超伝導電流はこの領域をう回するように流れるが、電流密度の上昇により周辺部も常伝導状態となり抵抗領域が生じる。(c)MITによる吸収キャビティを持つSSPD(断面図)⁽¹⁰⁾。光パルスは下方より入射し無反射コーティング(ARC)とアルミナ基板を経てNbNメアンダラインで吸収される。透過した光は、金/Tiミラーで反射され、再びNbN層で吸収される。HSQ(Hydrogel Silsequioxane)はNbNと金/Tiの絶縁層である。

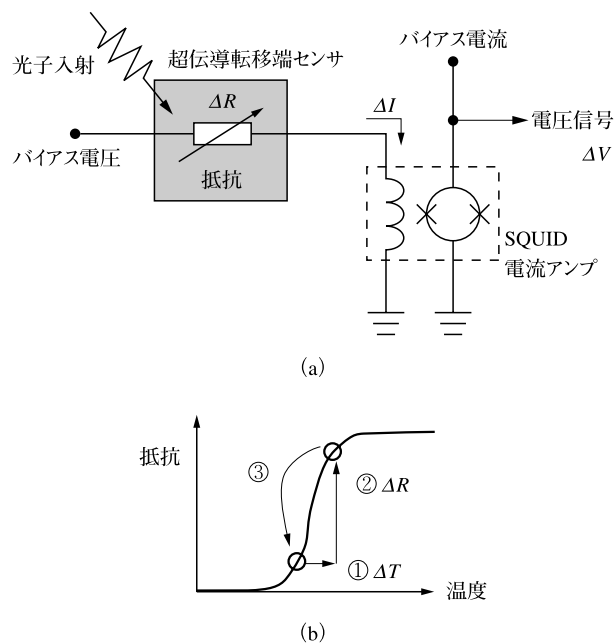


図2 TESの検出概念 光子入射①によって生じた温度変化 ΔT によりTESの抵抗値が変化する②。この抵抗変化 ΔR は、電流変化 ΔI としてSQUIDによる電流アンプで読み出される。その後、TESは再び元の温度へと回復する③。超伝導体としては、NISTの素子はW($T_c=100\text{mK}$)、AISTではTi(360mK)が使用されている。

など高速性が要求される分野では、時間特性の改善は重要な研究開発課題となっている。

TESを用いた通信波長帯域単一光子検出器は、現在、NISTやスタンフォード大、アルビオン大のグループによって精力的に行われている^{(12),(15)}。彼らのグループでは、90~100mKに転移温度を持つタンゲステン(W-TES)が使用されている。彼らのW-TES素子は、大きさ $20\mu\text{m}$ 角、厚さ20nmであり、素子のすぐ近傍に光ファイバが結合されている。素子は、無冷媒の断熱消磁型機械式冷凍機内で50mKにまで冷却される。また、2.1で述べたとおり、ミラー及びアモルファスSiによる無反射層を用いた光閉込め構造をTES素子に構築して量子効率を改善する試みがNISTのグループにより行われている⁽¹⁵⁾。SSPDと異なりTESは受光面積の充てん率を大きく取れるため、光閉込め構造により光子の吸収特性は大きく改善し、素子単体の量子効率としては1,550nmの光子に対して88%が達成されている。また、光子数識別能力に関連した性能指数であるエネルギー分解能は、0.2eV(FWHM)が達成されている。1,550nmの光子1個のエネルギーは0.8eVであるから、光子数識別を行う上ではほぼ十分な分光特性が達成されているといえる。

2.3 超伝導単一光子検出器の量子鍵配布応用

SSPDやTESなど超伝導単一光子検出器の持つ高速性

や低雑音性から NIST のグループを中心として、量子鍵配布 (QKD : Quantum Key Distribution)⁽¹⁶⁾、単一光子源の発光特性評価⁽¹⁷⁾、量子もつれ光子対の測定⁽¹⁸⁾など、様々な量子光学実験が行われている。

ここでは、その一つの例として量子暗号鍵配布実験について紹介する。暗号鍵配布における単一光子検出に関する性能評価因子として、①長距離にわたって、②高いビット転送レートで、③低い量子符号誤り率で鍵配布ができるかにある。図3は、SSPDによりQKDを行うための実験装置の概略であり、BB-84プロトコルによる位相変調方式を基にしている。BB-84についての詳細は、文献(19)等を参照されたい。まず送信側(Alice)で、マッハツェンダ干渉計により ϕ_A だけ位相変調した状態と時間遅延を加えた状態とを重ね合わせた光パルスを作成する。この光パルスを平均光子数 $\mu=0.1$ まで減衰させた後、ファイバリンクへ送出する。受信側(Bob)では、同様に組んだ干渉計で ϕ_B だけ位相変調した光パルスと遅延したパルスを重ね合わせる。

この干渉した結果を、SSPDによる二つの検出器A、Bで光子を検出する。測定に用いた変調位相 ϕ_A と ϕ_B 、及び検出器A、Bのどちらで光子が検出されたかの結果から、秘密鍵の値が決定される。また、検出器の暗計数率の影響を低減させるため、ある時間的なゲートを設けてその時間内に到達した信号のみを処理する方法が通常用いられている。検出器の暗計数率を n_{dark} 、ゲートの時間幅を $\Delta\tau$ とすると、暗計数による偶発的な計数は $P_{\text{dark}}=n_{\text{dark}}\Delta\tau$ にまで低減できることになる⁽¹⁹⁾。ただし、検出器の時間分解能が $\Delta\tau$ 程度かそれ以上あることが必要である。クロックレート3.3MHzでの光伝送周波数に対し $\Delta\tau=4\text{ns}$ でSSPDの偶発的な計数を評価したとこ

ろ、1ゲート当り $P_{\text{dark}}=4.5\times 10^{-7}$ であった。これは、同様の実験体系で $\Delta\tau=1\text{ns}$ でInGaAs APDにより測定した場合の計数率 $P_{\text{dark}}=3.5\times 10^{-5}$ と比較して二けた低い値である。よって、SSPDを用いると P_{dark} を大幅に低減することが可能であることが分かる。この低い P_{dark} により彼らのグループではInGaAs APDと比べて2倍の70 km以上の距離にわたって量子鍵を配布することに成功している。現状では、量子鍵配布の伝送レートは、SSPDの量子効率($\eta=0.9\%$)の低さから1~数十bit/sに限られている。しかしながら、SSPDの高い時間分解能特性からクロックレートを100 MHzに高めることは容易であり、これにより100bit/s以上の伝送レートを確保することができる。更にMITグループのような高い量子効率を持つ検出器を用いれば、伝送距離は210kmにまで到達すると予測している⁽¹⁶⁾。

TESによるQKDもNISTとロスアラモスを中心としたグループにより試みられている⁽²⁰⁾。TESの場合、SSPDよりも高い量子効率を持っているため光子の検出確率が飛躍的に増大し、148.7km($\mu=0.1$)の長距離にわたる量子鍵配布に成功している。これは、この文献(20)時点での世界最長記録である。一方、TESの時間分解能が低いことからクロックレートを高速化することが難しいこと、また、SSPDと比べて長いゲート時間(30~170 ns)を必要とするため暗計数の影響を受けやすいことなどが問題点となっている。今後、TESを高速化することにより時間分解能が向上し、ふく射等による暗計数の影響が低減できれば、到達距離は271 kmまで見込めると報告している⁽²¹⁾。

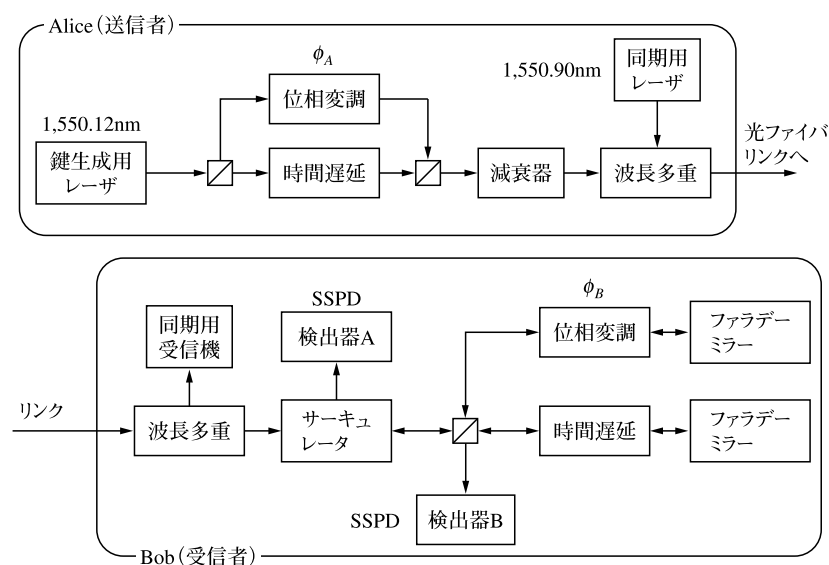


図3 NISTが行った位相変調方式による量子鍵配布実験装置⁽¹⁶⁾。上が送信側、下が受信側を示す。2台のSSPDが受信側の単一光子検出器として使用されている。位相情報 ϕ_A 、 ϕ_B 、及び、光子が検出された位置A、Bにより量子鍵が決定される。

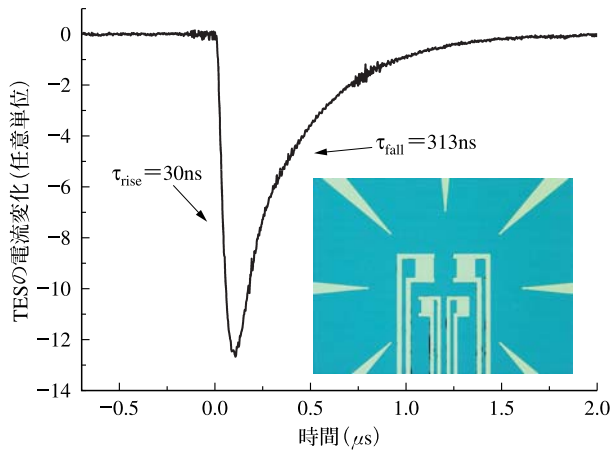


図4 AISTによって作成されたTi-TESによる信号応答の例。動作温度を360mKにすることで、応答速度が4 μ sから313nsへ10倍以上高速化することに成功している。挿入図は、Ti-TES素子の顕微鏡写真である。

2.4 TES単一光子検出の高速化

TESは、高い量子効率を持ち光子数識別能力があるなどSSPDにはない大きな特徴を持っている。しかしながら、その時間分解能は低く、上で述べたQKDへの応用や非古典光の光子数分布測定などに適用する場合、その高速化が必須となる。産総研(AIST)ではより高速な時間応答特性を持つ光子数識別技術の実現を目指して、TES単一光子検出器の高速化に取り組んでおり⁽²²⁾、本節ではその現況について紹介する。

TES検出器の応答時定数は、熱散逸が素子と熱浴との音響インピーダンス(Kapitza抵抗)に支配される場合には温度の二乗に反比例、素子内部の電子温度と格子温度の熱的な結合(ホットエレクトロン効果)に支配される場合には温度の三乗に反比例する⁽²³⁾。よって、TESの高速化には、より高い T_c を持つ超伝導体を適用し素子の動作温度を上げることが有効である。このような観点から、AISTではチタニウム(Ti)をTESに適用した素子開発を行っている。Tiはバルクで390mKに超伝導転移を持ち、また、1,550nmの波長に対して比較的高い光吸収率を有している。図4にAISTにて作成したTi-TESから得られた信号の例を示す。立ち上がり時間30ns、立ち下がり時間330nsを示し、高速な信号応答波形を得ることに成功している。これは、NISTのW-TES(立ち下がり時間4 μ s)と比べると10倍以上の高速性に相当する。また、図5には光子数識別能力の測定結果を示す。光パルスの光子数に依存したピークが観測されていることが分かる。実線はポアソン分布を検出器のエネルギー分解能を考慮して求めたものであり、両者は良好に一致する結果となった。これにより、1 μ s以下の応答時間でも光子数識別が可能であることを初めて示すことに成功した。現状では、達成したエネルギー分解能と量子効率はそれぞれ、0.7eV(FWHM)、28%であるが、今後、検出器形状に関する最適化、光吸収キャビ

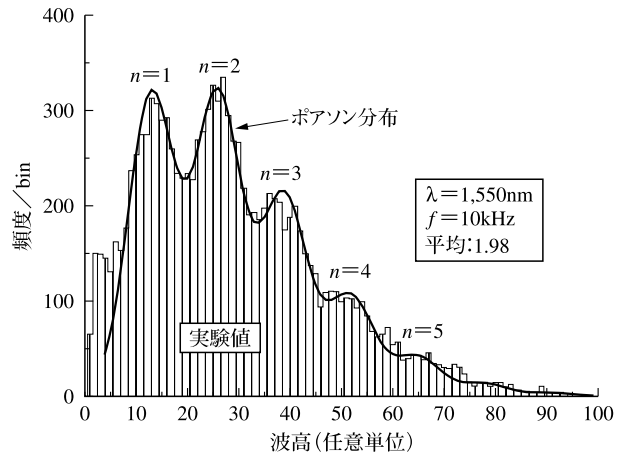


図5 微弱コヒーレント光パルスを測定したときの応答信号波高値のスペクトル。実線は検出器のエネルギー分解能とポアソン分布から求めた理論スペクトル。

ティの適用等により、これらの性能は大幅に向上できるものと期待している。

3. ま と め

超伝導単一光子検出器は、通信波長帯の光子を低い暗計数率、小さな時間ジッタ、高い量子効率で測定することが可能であり、パルス中の光子数も同定することができる。この性能を生かして、様々な研究機関で量子暗号鍵配布等の実験に超伝導検出器の適用が試みられ、その優位性が実証されつつある。超伝導検出器の弱点として極低温環境が問題であったが、近年の冷却技術の進歩により無冷媒で極低温が得られる商用の冷凍機が容易に入手可能となってきた。特に2K付近の温度でも動作が可能なSSPDは、量子暗号通信のマーケットの展開とともに、今後、商用化に向けて大きく動いていくものと考えている。TESについても通信波長帯光子を数百kHz以上の計数率で光子数識別できる唯一な技術として、今後、量子光計算等に大きな役割を果たしていくものと期待している。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、多大な御支援を頂いた小柳正男氏、大久保正隆氏に感謝します。また、デバイス作成や超伝導技術、量子暗号技術について議論して頂いた浮辺雅宏氏、板谷太郎氏、宮崎利行氏、大館暁氏に感謝致します。本研究の一部は、情報通信研究機構(NICT)の委託研究として行っています。

文 献

- (1) F. Zappa, A. Lacaita, S. Cova, and P. Webb, "Nanosecond single-photon timing with InGaAs/InP photodiodes," *Opt. Lett.*, vol.19, no.11, pp.846-848, 1994.
- (2) J.G. Rarity, T.E. Wall, K.D. Ridley, P.C.M. Owens, and P.R. Tapster, "Single-photon counting for the 1300-1600-nm range by use of peltier-cooled and passively quenched InGaAs avalanche photodiodes," *Opt. Lett.*, vol.20, no.11, pp.1111-1113, 1995.

- che photodiodes,” Appl. Opt., vol.39, no.36, pp.6746-6753, 2000.
- (3) P.G. Kwiat, A.M. Steinberg, R.Y. Chiao, P.H. Eberhard, and M.D. Petroff, “High-efficiency single-photon detectors,” Phys. Rev. A, vol.48, no.2, pp.R867-R870, 1993.
 - (4) H. Dautet, P. Deschamps, B. Dion, A.D. Macgregor, D. Macsween, R.J. McIntyre, C. Trottier, and P.P. Webb, “Photon-counting techniques with silicon avalanche photodiodes,” Appl. Opt., vol.32, no.21, pp.3894-3900, 1993.
 - (5) J.S. Kim, S. Takeuchi, Y. Yamamoto, and H.H. Hogue, “Multiphoton detection using visible light photon counter,” Appl. Phys. Lett., vol.74, no.7, pp.902-904, 1999.
 - (6) S. Takeuchi, J. Kim, Y. Yamamoto, and H.H. Hogue, “Development of a high-quantum-efficiency single-photon counting system,” Appl. Phys. Lett., vol.74, no.8, pp.1063-1065, 1999.
 - (7) A. Peacock, P. Verhoeve, N. Rando, A. van Dordrecht, B.G. Taylor, C. Erd, M.A.C. Perryman, R. Venn, J. Howlett, D.J. Goldie, J. Lumley, and M. Wallis, “Single optical photon detection with a superconducting tunnel junction,” Nature, vol.381, no.6578, pp.135-137, 1996.
 - (8) G. Brammertz, A. Peacock, P. Verhoeve, D. Martin, and R. Venn, “Optical photon detection in a superconducting tunnel junction,” Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip., vol.520, no.1-3, pp.508-511, 2004.
 - (9) A. Verevkin, A. Pearlman, W. Slys, J. Zhang, M. Currie, A. Korneev, G. Chulkova, O. Okunev, P. Kouminov, K. Smirnov, B. Voronov, G.N. Gol’tsman, and R. Sobolewski, “Ultrafast superconducting single-photon detectors for near-infrared-wavelength quantum communications,” J. Mod. Opt., vol.51, no.9-10, pp.1447-1458, 2004.
 - (10) 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, vol.14, no.2, pp.527-534, 2006.
 - (11) D. Rosenberg, A.E. Lita, A.J. Miller, and S.W. Nam, “Noise-free high-efficiency photon-number-resolving detectors,” Phys. Rev. A, vol.71, no.6, p. 061803, 2005.
 - (12) 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., vol.83, no.4, pp.791-793, 2003.
 - (13) G.N. 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 optical detector,” Appl. Phys. Lett., vol.79, no.6, pp.705-707, 2001.
 - (14) M. Dakna, T. Anhut, T. Opatrny, L. Knöll, and D.-G. Welsch, “Generating Schrödinger-cat-like states by means of conditional measurements on a beam splitter,” Phys. Rev. A, vol.55, no.4, pp.3184-3194, 1997.
 - (15) 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., vol.15, no.2, pp.575-578, 2005.
 - (16) R. H. Hadfield, J.L. Habif, J. Schlafer, R.E. Schwall, and S. W. Nam, “Quantum key distribution at 1550nm with twin superconducting single-photon detectors,” Appl. Phys. Lett., vol.89, no.24, 241129, 2006.
 - (17) R.H. Hadfield, M.J. Stevens, S.S. Gruber, A.J. Miller, R.E. Schwall, R.P. Mirin, and S.W. Nam, “Single photon source characterization with a superconducting single photon detector,” Opt. Express, vol.13, no.26, pp.10846-10853, 2005.
 - (18) M.A. Jaspan, J.L. Habif, R.H. Hadfield, and S.W. Nam, “Heralding of telecommunication photon pairs with a superconducting single photon detector,” Appl. Phys. Lett., vol.89, no.3, 031112, 2006.
 - (19) H. Zbinden, H. Bechmann-Pasquinucci, N. Gisin, and G. Ribordy, “Quantum cryptography,” Appl. Phys. B, Lasers Opt., vol.67, no.6, pp.743-748, 1998.
 - (20) P. A. Hiskett, D. Rosenberg, C.G. Peterson, R.J. Hughes, S. Nam, A.E. Lita, A.J. Miller, and J.E. Nordholt, “Long-distance quantum key distribution in optical fibre,” New J. Phys., vol.8, no.193, p. 193, 2006.
 - (21) 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., vol.88, no.2, 021108, 2006.
 - (22) D. Fukuda, R.M.T. Dayamanthi, A. Yoshizawa, N. Zen, H. Takahashi, K. Amemiya, and M. Ohkubo, “Titanium based transition edge microcalorimeters for optical photon measurements,” IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.17, no.2, 2007.
 - (23) Cryogenic particle detection, C. Enss, ed., p.350, Springer, 2005.

(平成 19 年 2 月 16 日受付 平成 19 年 4 月 27 日最終受付)



福田 大治

平 7 東大・工・システム量子卒。平 11 同大学院博士課程中退。同年同大学助手。以来、超伝導センサによる高精度フォトン検出技術に従事。平 15 産総研に入所。現在同所計測標準研究部門研究員。工博。平 13 電気学会論文発表賞受賞。



吉澤 明男 (正員)

昭 63 筑波大・情報学類卒。平 2 同大学院修士課程了。同年電子技術総合研究所に入所。平 13 産総研へ出向。光計測、量子工学の研究に従事。現在、光技術研究部門主任研究員。工博。



土田 英実 (正員)

昭 54 東工大・工・電子物理卒。昭 59 同大学院博士課程了。同年電子技術総合研究所入所。平 3~4 カリフォルニア工科大客員研究員。平 13 より産総研光技術研究部門。現在同部門上席研究員。昭 59 丹羽記念賞受賞。