

3-4 光子数識別器の開発と現状

3-4 Status of Development of Photon Number Resolving Detectors

藤原幹生 辻野賢治 秋葉 誠 佐々木雅英

FUJIWARA Mikio, TSUJINO Kenji, AKIBA Makoto, and SASAKI Masahide

要旨

光子数識別器とは光パルス内の光子の数を正確に数える装置であり、非古典光と組み合わせることにより、光万能量子ゲートが構築できる。この量子ゲートが完成すれば、小規模量子コンピュータの実現に大きく寄与し、将来、受信機に組み込むことにより、情報伝送量の大幅な拡大が可能になるとされている。我々は光量子ゲート構築のための要素技術である光子数識別器の開発を進めており、その現状を報告する。

Photon number resolving detectors that can count number of photons in the pulses precisely are the important devices for developing universal photonic quantum gates, by combination with non-classical light. This technology will be used to establish quantum decoders that offer a significant upsurge in the capacity of communications channel. We describe our research activities for developing of photon number resolving detectors.

【キーワード】

量子通信, 量子暗号, スクィーズド光, 量子状態, 光子数識別器

Quantum communications, Quantum cryptography, Squeezed light, Quantum state, Photon-number resolving detector

1 まえがき

光子数識別器とは光入射パルスに含まれる光子の数をカウントできるデバイスのことであり、一つ以上の光子があることを検出できる単一光子検出器とは区別される。極端な例を挙げれば、光子数識別器には超短パルス内の光子数をも正確にカウントする機能を必要とする。光子数を識別できるほどの高感度な検出器は物性、天体、生物など精密分光測定を必要とする分野に朗報となることは言うまでもなく、量子情報の分野においても以下のような応用が考えられる。

(1) スクィーズド光、単一光子源と組み合わせることによる光万能量子ゲートの構築

理論的な証明、詳細等は文献[1]–[3]を参考にしたい。この量子ゲートが実現すれば、光量子コンピュータ具現化への大きな技術的進歩となる。量子情報デバイスとして広い技術領域

での応用が可能であり、この分野において不可欠なデバイスである。

(2) 量子暗号鍵配送システムの高信頼性化

現在商品化に向けて開発が進められている量子暗号鍵配送システムには、微弱コヒーレント光が使用されている。フォトンナンバースプリテイングアタックを避け、安全性を高めるためには1ビットあたりに2光子以上が含まれる確率を限りなく0に近づける必要がある。そのため1ビット当たりの光子数は0.1個程度であり、2個以上の光子が含まれる確率は非常に小さいが、コヒーレント光の光子数はポアソン分布しており、有限の確率で2光子以上が含まれる。また、光源に単一光子源を用いた場合でも、それらの信頼性の評価に光子数識別器が利用できる。

以上のように、光子数識別技術は光量子情報分野において根幹をなす技術であるにもかかわらず、技術的開発課題が山積している現状である。

現在世界中で光子数識別器実現に向けて様々なデバイス材料、構造で研究が進められている。例えば米国スタンフォード大学の visible light photon counter (VLPC) [4] や米国国務省標準技術局の transit edge sensor [5] など、現在その高性能化に向けた研究が進められている。ここでは現在量子光学の先端的な研究が進められている可視・近赤外領域と光ファイバ通信との親和性を考慮し、1.5 μm 帯、いわゆる通信波長帯に感度を有する光子数識別器について、現在情報通信研究機構で開発を進めている光子数識別を目指した高感度光検出器 charge integration photon detector (CIPD) の説明を行う。

2 通信波長帯 CIPD

まず CIPD とは、光検出器と電荷蓄積型読み出し回路を組み合わせたものであり、ここで使用される読み出し回路方式は精密分光測定などの機器に応用されてきた。本来通信用の読み出し回路ではなく、非常に簡単な言い方をすれば、読み出し帯域を犠牲にする代わりに信号対ノイズ比 (S/N) を向上させることができる読み出し方式である。最初に通信波長帯 CIPD の説明を行う。

通信波長帯に高い感度を持つ InGaAs PIN photodiode を光検出器として用いる。InGaAs PIN photodiode では 1 光子に対して 1 対の電子-ホールペアが生成される。量子効率が充分高い場合、発生する電荷を正確にカウントできれば光子数を識別することが可能となる。図 1 に CIPD の概略図を示す。枠で囲まれた部分を 4.2 K まで冷

却し熱雑音と漏れ電流を抑えている。初段のアンプとして GaAs JFET を採用しており、ソースフォロア接続されている。GaAs JFET は低温においてキックやヒステリシスなどが発生せず、良好な静特性が得られる。さらに、誘電分極ノイズといわれる電荷のコンペンセーションが行われない場合に発生する熱的なノイズも少ないことが確かめられている。PIN photodiode で発生した電荷は GaAs JFET のゲート電極に蓄積され、蓄積電荷の発生する電圧がソース電極に反映される。FET の線形動作領域から外れる前に蓄積電荷をリセットする必要がある。通常リセットにも FET が使用されるが、ノイズと容量の増加につながるため、現在はメカニカルプローブを使用している。リセット時以外では電極との物理的距離を保つことが可能であり、付加的な容量の増加を最小限にとどめることが可能となっている。出力電圧 V_{out} は以下の式で表される。

$$V_{out} = G_M \frac{MQ}{C_{in}} \quad (1)$$

ここで G_M : source follower gain、 M : 電荷数、 Q : 素電荷、 C_{in} : 入力容量である。簡単のために $G_M=1$ として、単一電荷がゲートに蓄積された場合、もし入力容量が 0.1 pF であれば 1.6 μV の電圧が発生することになる。読み出し回路のノイズをこの出力以下に抑えることが可能であれば、光電荷のカウントが可能になり、結果的に光子数の計測が可能になる。

このような電荷を蓄積していることから現在使用しているアンプは積分型アンプと呼ばれている。このような回路は correlation double sampling (CDS) と呼ばれる読み出し方法がとられる [6]。すなわち、信号の入射の前後での出力の差を読み取ることで、蓄積電荷を見積もる。その際、読み出しレートと、電圧読み出し時の平均化時間及びシステムのノイズスペクトルで実行ノイズが決定される。CDS を用いた場合、出力だけではなく、ノイズもバンド幅だけ積分されることから、信号検出において最適な読み出し速度を検討する必要がある。まず、時間間隔 T でのサンプリングを $g(t) = \delta(t+T) - \delta(t)$ と表現でき、そのフーリエ変換は以下の式で表される。

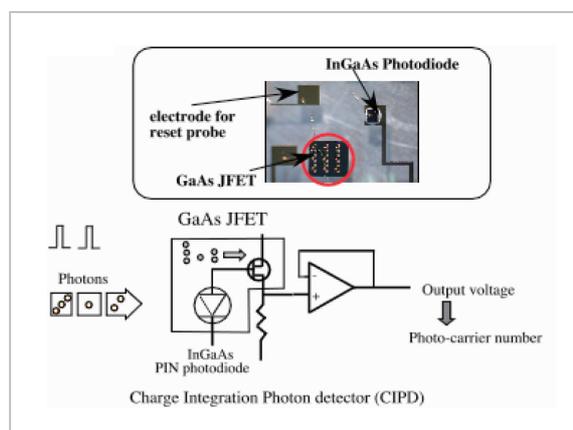


図 1 通信波長帯 charge integration photon detector (CIPD) 概略図

$$|F(f)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} g(t) \exp(-2\pi ft) dt \right| \quad (2)$$

$$= 2|\sin(\pi fT)|$$

この式から、CDS はサンプリング周期のくし型フィルタとしての効果が得られることが分かる。また、読み出し時間 T_0 の平均化を式で表現すると以下ようになる。

$$h(t) = \begin{cases} 1 & \dots -T_0/2 < t < T_0/2 \\ 0 & \dots t < -T_0/2, T_0/2 \end{cases}$$

$$|H(f)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \exp(-2\pi ft) dt \right| \quad (3)$$

$$= \left| \frac{\sin(\pi T_0 f)}{\pi f} \right|$$

この式から明らかなようにローパスフィルタとしての効果が得られる。最終的に CDS におけるノイズ電圧は以下の式で表される。

$$V_{noise.CDS}^2 = \int_0^{\infty} \frac{V_{noise}^2 |F(f)|^2 |H(f)|^2}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} df \quad (4)$$

V_{noise} はシステム全体のノイズスペクトル、 f_c は外部 1 次元ローパスフィルタのカットオフ周波数である。

この回路で重要なのは式 (1) から明らかなように、入力容量の低減化による高ゲイン化と読み出しノイズの低減化である。単一電荷で生じる電圧以上に読み出しノイズを低く抑えるために、GaAs JFET の最適動作条件の探索が必要不可欠である。低容量化のためには JFET のゲートサイズの微細化が効果的である。しかしながらゲートサイズの微小化は $1/f$ ノイズや random telegraph signal ノイズの増加を伴い、低雑音化のためにはゲートサイズの慎重な最適化が必要となる。我々は thermal cure といわれる我々独自の低雑音化の手法⁷⁾と動作条件の最適化を進め、ゲート幅 $5\mu\text{m}$ ゲート長 $10\mu\text{m}$ のサンプルで $500\text{ nV/Hz}^{1/2}$ at 1 Hz を切る低雑音化に成功し、その結果、GaAs JFET のゲート入力容量は 0.037 pF という低容量を実現した。

もう一つのコンポーネントである InGaAs PIN photodiode の低容量化のための方策としては受光面積の低減が上げられるが、ファイバとの結合効

率を考えるとこれ以上の微小化は難しい。一方で空乏層の厚いサンプルがあれば低容量化は可能となる。それに対し市販されている高いドーパント濃度を持つサンプルは同時に光吸収層が厚いということが判明し、極低温に冷却した場合、キャリアの凍結が起り空乏層が成長し、結果的に低容量化が可能となり 0.017 pF という結果が得られた。

GaAs JFET と InGaAs PIN photodiode を CaF_2 基板上に配置し、中空実装をすることにより、トータルとして入力容量 0.054 pF を実現し、1 電荷が蓄積した際の出力電圧は $3\mu\text{V}$ となった。ノイズスペクトルから CDS を用いた場合に $S/N > 2$ で識別できる読み出し速度は 50 Hz 程度と予想され、我々は 40 Hz での読み出し試験を行った。

図 2-1 に光を入射していない場合の出力のヒストグラムを示す。標準偏差は光電荷換算で 0.26 electron であるので、単一電荷が蓄積した場合に $S/N = 4$ 程度が期待できる。しかしながら実際の場面においては電源ノイズの影響などから S/N は $2\sim 3$ 程度となる。

図 2-2 に平均光電荷数 $1.04\sim 2.85\text{ electron/pulse}$ のヒストグラムを示す^[8]。分解能は 0.1 電荷である。図中の曲線はポアソン分布と、読み出し回路の雑音をガウス分布で近似したものであり、下記の式で表現される。

$$N(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \sum_l^{\max} P_n(l) \exp\left\{-\frac{(x-l)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (5)$$

ここで P_n は平均光電荷数 n のポアソン分布、 \max はカットオフ光電荷数(ここでは 20 個)、 σ

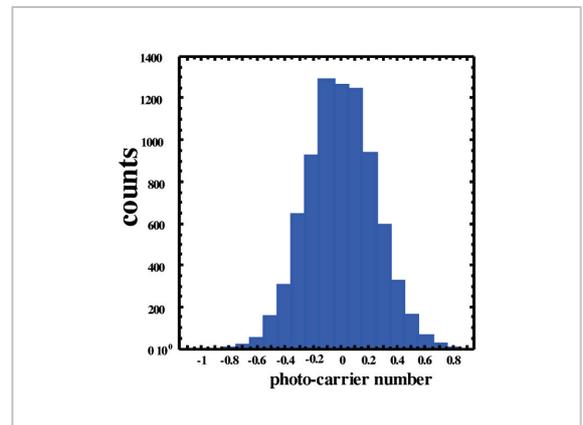


図2-1 読み出し速度 40 Hz における dark count

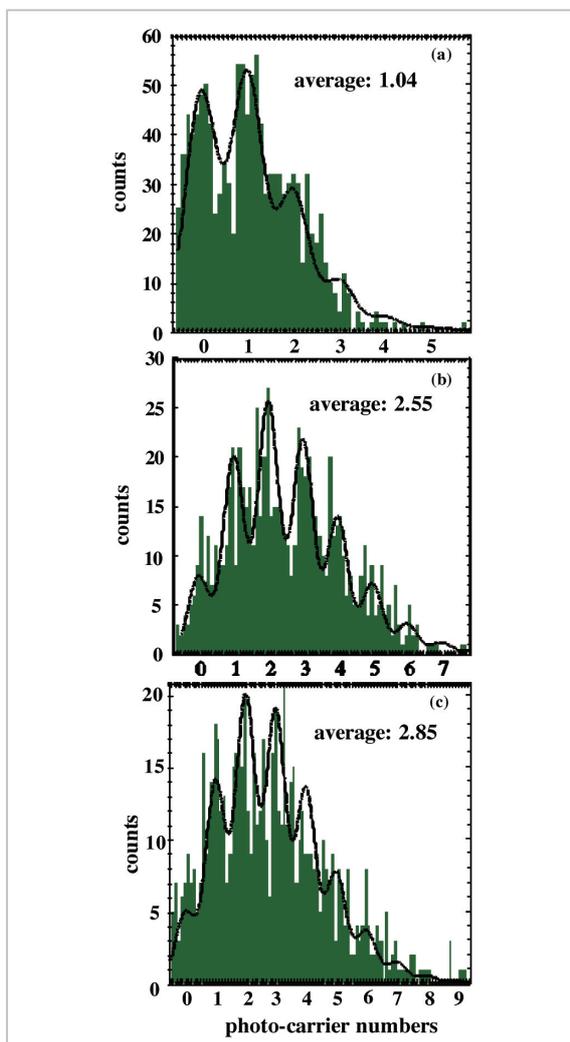


図2-2 光電荷分布のマルチピーク構造

は CIPD の読み出しノイズの標準偏差である。

図 2-2 上で、光電荷 0~4 個に相当するところにヒストグラムのピークが一致していることが確認できる。これは光電子が発生する出力電圧が離散的であることから生じる現象である。また近似式で用いた標準偏差から光電荷のカウントが $S/N=3$ 程度で行われていると思われる。量子効率は 80% 程度であり、ファイバと検出器のカップリング効率は最大で 80% である。離散的な出力分布の測定結果は入力容量の見積りの妥当性を証明するものであり、低容量測定技術は他の極低温デバイス技術の物性評価にも役立てられる。さらに、我々の CIPD は光検出器内での増倍をさせていないために、増倍ノイズが付加する懸念は生じない。このことは受光光子数が多数となっても動作できることが予想される。我々は平均光電荷

数 10 程度までのコヒーレント光の分布測定を行った。

図 3 に、1 pulse 当たりの平均光電荷数 1.58~10.18 個の分解能 1 電荷での分布測定結果を示す。破線で示している曲線はポアソン分布である。図中のヒストグラムはポアソン分布との良い一致を示している。図 3 から明らかなように増倍過程を用いていないため、数十光子の入射でも光子数測定が可能である。この通信波長帯 CIPD の長所としての大きな動作レンジを証明したことを意味している。この検出器の現性能において光万量子ゲートを構築するとしたときの検討を S/N と量子効率の面で行う。 S/N に関しては、万量子ゲートを構築する際に必要とされている光子数識別器の性能は光子数の立方根の精度での測定^[1]であり、信号に 3 光子を用いた場合 1.4 光子、10 光子を用いたとすると 2 光子程度の誤差が許されることとなり、現在の性能で十分に適用が可能と考えられる。一方量子効率はほぼ 100% の効率を必要とされているが、現在の量子効率は 80% 程度であり、また、ファイバとのカップリングロスを含めると、それ以下の性能となっている。今後、光検出器のコーティングの最適化、光吸収層の増加及び高精度アライメント技術を組み合わせ、更なる高感度化を進める必要がある。また、実用化のためには現在の動作速度 40 Hz を高速化する必要がある。これを可能にする技術は第一には FET の低雑音化であるが、現在の FET のノイズスペクトルから楽観的に見積もっても 1 KHz でスペクトルはプラトーとなり、それ以上の高速化はノイズパワーの積分値が増大し、 S/N の急激な劣化となることが容易に想像できる。FET のノイズ発生原因の追及と構造の最適化を進める必要がある。一方、現在は光検出器での信号の増倍は行っていないが、将来の高速化のためには増倍ノイズが非常に低い通信波長帯での APD の開発が望まれる。このような APD を実現するには、電子-ホールの移動度をコントロールできる超格子構造や漏れ電流の原因となる化合物半導体内の結晶性の向上など、半導体プロセスからの改善が必要となる。

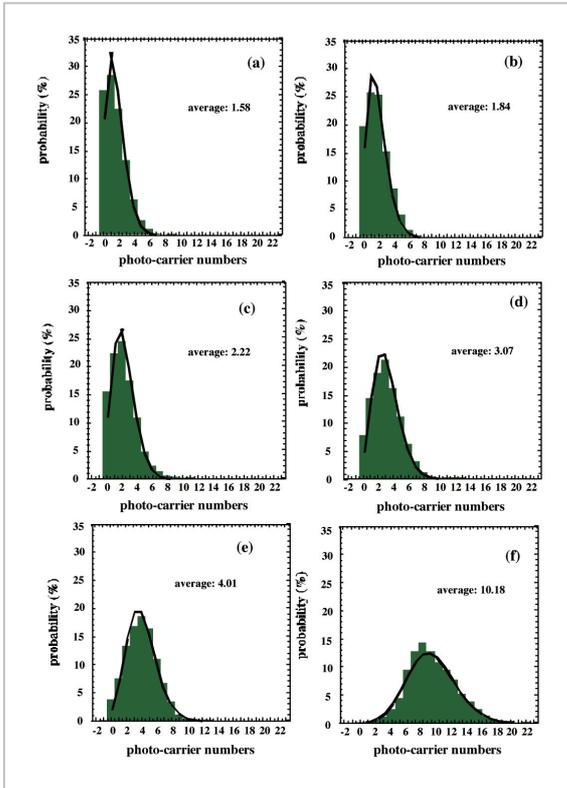


図3 読み出し速度 40 Hz における光電荷分布測定

3 可視・近赤外 CIPD

我々は可視域及び近赤外領域に感度を持つ CIPD の開発も進めている。現在光子・スクイーズド光を用いた量子情報分野における先端的検証実験は光源、検出器の技術的な成熟度から可視・近赤外波長帯でのフリースペース光学系が多く使用されている。可視・近赤外領域の CIPD はこれらの先端的実証実験に多大な貢献をすることが期待できる。以上のような境界条件から可視・近赤外 CIPD に必要とされる性能は以下にまとめられる。

- (1) 可視・近赤外領域で非常に高い量子効率 (90 %以上)
- (2) フリースペース光学系との良好な接合効率 (~100 %)

高い量子効率の実現性については Si を光吸収層に用いた VLPC においてほぼ 100 % の効率を得ていることから [4]、Si を母材とした光検出器の光吸収層の厚みの最適化を行えば将来十分に達成できる見通しがある。一方、良好な接合効率を得るためには、信号光導入部の光学系の最適化とともに極低温クライオスタットなどの使用を避

け、受光面積の拡大を選択せざるを得ない。極低温動作を避け、受光面積の大きな検出器を用いることは、漏れ電流や検出器が発生する誘電分極ノイズの増加を伴い、光電子のカウントを難しくしている。そのため、我々は光電子の増倍機能を持つ Si avalanche photodiode (Si APD) を採用した。一方、動作環境は比較的容易に実現できる 77 K での動作を前提とし、また、読み出し回路の初段アンプとしてこの動作温度で低雑音である Si JFET を用いた。77 K においては誘電分極ノイズが支配的となっていることが調べられている [9]。誘電分極ノイズは容量に比例するため、低容量実装が低雑音化に直結する。

我々が用いた CIPD の回路を図 4 に示す。検出器を除く部分は capacitive trans-impedance amplifier (CTIA) として知られており、天文観測用の読み出し回路に広く応用されている。受光素子から発生した n 個の電子はフィードバック容量 C_f に蓄積され、電圧変換される。オペアンプからの出力電圧は以下の式で表される。

$$V_{out} = \frac{nQ}{C_f} \quad (6)$$

フィードバック回路を用いることにより、電荷蓄積時のバイアスの安定性と動作レンジの拡大が可能となる。リセット機構としては通常のリセット用 FET を用いず、誘電分極ノイズの低減のため、微少容量のダイオードをリセット時に順バイアスに駆動することにより電荷引き抜きを行って

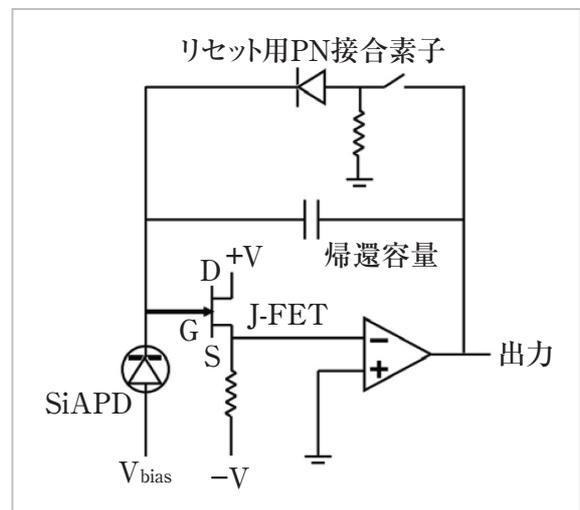


図4 可視・近赤外 CIPD 概略図。オペアンプ以外、動作温度 77 K

いる。初段アンプである Si JFET は高い入力インピーダンスを有し、漏れ電流が少なく、またこの動作温度において他のトランジスタと比較し低ノイズである。読み出し回路のノイズの低減のためには誘電分極ノイズの削減が有効であり、そのためには各素子の容量の低減が必要である。誘電分極ノイズは誘電体の複素誘電率 C'' を用いて以下の式で表される。

$$I_n^2 = 4kT\omega C''$$

$$V_n^2 = I_n^2 / (\omega C_f)^2 \quad (7)$$

ここで k ：ボルツマン定数、 T ：動作温度、 ω ：角周波数である。誘電分極ノイズは材料の結晶性に大きく依存し、結晶性の高い材料を選択することによりノイズを抑えることが可能となる。我々は結晶性の優れた Si 半導体及び誘電体で可視・近赤外 CIPD を構築し、更に低容量化を進め、低ノイズ化を図っている。各素子の低容量化を進めた結果を表 1 にまとめる。

これらの素子を用いた CIPD の雑音測定を行った。出力信号の積分時間は 40 msec であり、25 Hz の読み出し速度に相当する。図 5 に縦軸に発生頻度、横軸電荷数換算のノイズ分布を示す。測定結果をガウスフィットした結果より得られた

表 1 各素子のキャパシタンスの一例

素子	Si APD (浜松ホトニクス, S8890)	Si PIN PD (浜松ホトニクス, S7911)	帰還容量 (合成石英)	Si JFET (MOXTEK, MX30)
容量 (pF)	0.52	0.23	0.074	0.33

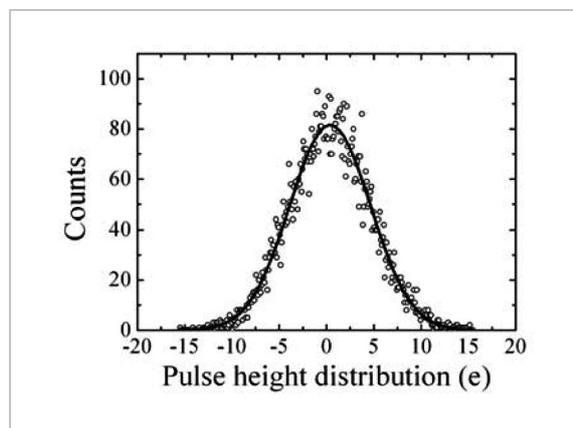


図 5 可視・近赤外 CIPD 読み出し回路の電荷換算雑音分布

標準偏差は 4.3 electrons であり、以前の読み出し回路 [10] と比較し 40 % のノイズ削減に成功している。

読み出し回路の雑音が 4.3 electron であるのに対し、光子数の識別を行うためには Si APD での増幅は 10 倍以上を必要とする。

一方 Si APD においては増倍に伴う過剰雑音が発生することが知られている。従来、増倍雑音が支配的になるため、Si APD においては光子数識別が不可能であるとの予想があったが、我々は低温、低増倍率での動作条件において光子数識別が可能であると考えられる領域を見いだした。可視光に感度を持つ Si APD に対し、増倍率 10.8、動作温度 77 K において過剰雑音指数 1.07 という低い増倍雑音を実現した [11]。図 6 に平均的光電荷発生数が 1、3、7、10 個の場合での増倍後の電子数発生頻度のグラフを示す。このときのシステムの読み出し雑音が 7 e/pulse であったために、光子数識別には至っていないが、単一光子に対して $S/N \approx 1$ 程度の読み出しに成功していると考えられる。今後、APD の近赤外領域に適した構造の探求と、低ノイズ読み出し回路と組み合わせて、現在高品質なスキューズド光源が得られている波長 860 nm における光子数識別実験に進む予定である。

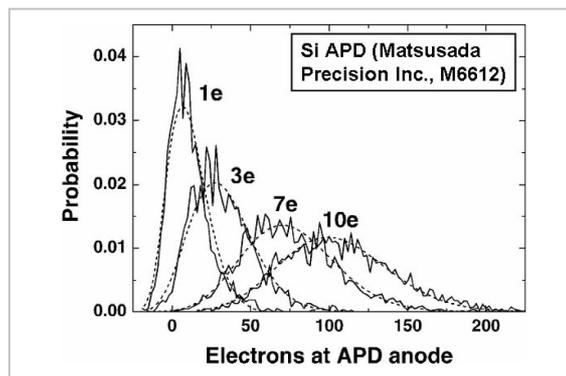


図 6 平均的光電荷発生数 1、3、7、10 個の可視光用 Si APD 増倍後の電子数発生頻度

4 まとめ

光子数識別器実現に向けた取組で、主に情報通信研究機構内で進めている研究をご紹介したが、

これら以外の方法も当然考えられる。しかしながら世界中の研究機関で開発が進められている光子数識別に向けた開発は、いずれの取組においても十分な性能を得るに至っていない。光子数識別技術の波及効果は量子光学、量子情報技術にとどまらず、あらゆる光計測技術の発展に寄与するものと考えられ、その波及効果は計り知れない。この

課題の技術開発は火急かつ重要な課題であると考ええる。現在のメーカーが進めている光検出器の開発は、通信波長帯での高速化等に限られており、将来の基礎研究を担う先端的な計測技術のための光検出器開発は、国の研究機関である情報通信研究機構が率先して行うべきものとする。

参考文献

- 1 D.Gottesman, A.Kitaev, and J.Preskill, "Encoding a qubit in an oscillator", Phys. Rev. A 64, 012310, 2001.
- 2 N.Knill, R.Laflamme, and G.J.Millburn, "A scheme for effective quantum computation with linear optics", nature 4009, 46, 2001.
- 3 S.D.Bartlett and B.C.Sanders, "Universal continuous-variable quantum computation: Requirement of optical non linearity for photon counting", Phys. Rev. A 65, 04234, 2002.
- 4 E.Waks, E.Diamanti, B.C.Sanders, S.D.Bartlett, and Y.Yamamoto, "Direct observation of nonclassical photon statistics in parametric down-conversion", Phys. Rev. Lett. 92, 113602, 2004.
- 5 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, 791, 2003.
- 6 H.Murakami, M.Akiba, T.Matsumoto, and M.Noda, "Low-noise infrared detection system with InSb photodiode for infrared astronomy", Jpn. J. Appl. Phys. 27, L1973, 1988.
- 7 M.Fujiwara, M.Sasaki, and M.Akiba, "Reduction method for low-frequency noise of GaAs junction field-effect transistor at a cryogenic temperature", Appl. Phys. Lett., 80, 1844, 2002.
- 8 M.Fujiwara and M.Sasaki, "Photon-number-resolving detection at a telecommunications wavelength with a charge-integration photon detector", Opt. Lett., 31, 691, 2006.
- 9 M.Akiba, "1/f dielectric polarization noise in silicon p-n junction", Appl. Phys. Lett. 77, 3236, 1997.
- 10 M.Akiba and M.Fujiwara, "Ultralow-noise near-infrared detection system with a Si p-i-n photodiode", Opt. Lett. 28, 1010, 2003.
- 11 M.Akiba, M.Fujiwara, and M.Sasaki, "Ultra-high-sensitivity high-linearity photodetection system using a low-gain avalanche photodiode with an ultralow-noise readout circuit", Opt. Lett. 30, 123, 2005.



みじわらみきお
藤原幹生

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ主任研究員
(旧基礎先端部門量子情報技術研究グループ主任研究員) 博士(理学)
光検出技術、極低温エレクトロニクス



つじのけんじ
辻野賢治

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ有期研究員
(旧基礎先端部門量子情報技術研究グループ専攻研究員) 博士(理学) 量子光学



あきばまこと
秋葉 誠

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ主任研究員
(旧基礎先端部門量子情報技術研究グループ主任研究員) 博士(理学) 光計測技術



ささきまさhide
佐々木雅英

新世代ネットワーク研究センター光波量子・ミリ波 ICT グループ研究マネージャー
(旧基礎先端部門量子情報技術グループリーダー) 博士(理学)
量子情報理論、物性理論