

光通信波長帯における高速単一光子検出

井上 修一郎

High Speed Single-Photon Detection at Telecommunication Wavelengths

Shuichiro INOUE

Single-photon detection at telecommunication wavelengths with a high repetition rate was realized using an InGaAs/InP avalanche photodiode operated with a sine wave gating. At a repetition frequency of 800 MHz, the overall afterpulsing probability was 6.0% with a detection efficiency of 8.5% and a dark count probability of 9.2×10^{-6} . Using the single-photon detector operated at a repetition frequency of 500 MHz, we implemented a differential phase shift quantum key distribution protocol. A secure key generation rate of 330 kbit/s was achieved over a communication distance of 15 km.

Key words: single-photon detection, gated mode, avalanche photodiode, afterpulsing, quantum key distribution

1984年のベネットとブラサール (C. H. Bennet and G. Brassard) による量子暗号プロトコルの発表¹⁾から24年が経過した現在、量子暗号はさまざまなフィールド試験²⁻⁴⁾を乗り越え、最も実用化に近い量子情報処理技術と考えられている。量子暗号の実用化に向けた研究は1990年代中ごろから始められ、光ファイバーによる長距離通信を目指して、InGaAs/InP アバランシフォトダイオード (APD) による光通信波長帯単一光子検出技術の開発が精力的に進められてきた^{5,6)}。量子暗号の実用化の鍵となる長距離化と高速化は、いずれも単一光子検出器の性能向上により実現することができる。長距離化を実現するためには、単一光子検出器の暗計数確率を低減しなければならない⁷⁾。一方、高速化にはアフターパルスを抑圧しなければならない⁸⁾。本稿では、InGaAs/InP APD を用いた光通信波長帯における高速単一光子検出とその量子暗号 (量子鍵配送) への応用について述べる。

1. APD による単一光子検出

APD は光子吸収によって発生した電子を高電界で加速し、なだれ電流を発生させることにより、光子を巨視的な電流に変換する。このとき、APD にはブレイクダウン電圧よりも大きな逆バイアス電圧を印加する。この状態はガイガーモードとよばれる。APD の駆動回路としては図1

に示すゲート動作型受動クエンチング回路を採用する。

バンドギャップの狭い InGaAs/InP APD では熱的に励起される電子による雑音 (ダークカウント) が非常に大きいので、ある短い時間 T_G だけ光子検出可能なように APD の端子電圧をブレイクダウン電圧以上にバイアスする (ゲート動作)。ここで、印加電圧とブレイクダウン電圧の差を過剰電圧とよぶ。このとき、 T_G 以外の時間では APD の端子電圧はブレイクダウン電圧以下なので、ダークカウントの発生を抑圧することができる。InGaAs/InP APD をゲート動作させることが光通信波長帯における単一光子検出の基本である⁶⁾。

2. 単一光子検出における雑音

APD による単一光子検出においては、ダークカウント、アフターパルス、チャージパルスとよばれる3つの雑音が存在する。このうち、ダークカウントは熱的に励起された電子による雑音で S/N 比の劣化を引き起こす。アフターパルスはなだれ電流が流れた際に、APD 中の欠陥に捕獲された電子 (トラップキャリア) が一定時間の後に放出され、その電子が二次的な電子なだれを引き起こす現象である。このアフターパルスは単一光子検出速度を制限する。チャージパルスはゲート信号の微分出力、すなわち定常的な雑音であり、光子計数閾レベルを決定する。

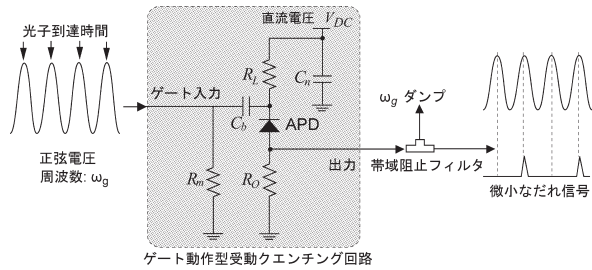


図1 正弦電圧ゲート動作 APD による単一光子検出。

ダークカウントは熱励起電子数・バイアス時間・過剰電圧に依存するので、低温におけるゲート動作により低減することができる。アフターパルスは、ゲートオフの時間がトラップキャリア寿命よりも長いゲート動作により消去することができる。ただし、APDの動作速度はトラップキャリア寿命の逆数で決まる周波数より低くなる。

3. 単一光子検出の高速化

上記のように、単一光子検出速度はアフターパルスによって決まる。そのため、高速化するためにはアフターパルスを低減しなければならない。アフターパルスはなだれ電流が流れた際に、APD中の欠陥に捕獲される電子に起因するので、なだれ電流を低減することによりアフターパルスを低減することができる。なだれ電流を低減するためには、ゲート動作における過剰電圧・ゲート時間を低減しなければならないが、なだれ電流が小さくなるに従い光子検出によるアバランシパルスも小さくなり、あるところでチャージパルスと識別できなくなる。そのため、単一光子検出の高速化には閾レベルの低減、すなわち、チャージパルスの低減が不可欠となる。これにより、光子検出の高速化のみならず、さらなる低雑音化を図ることができる。

閾レベルを低減する従来の方法としては、光子検出に使用する APD のほかに同種の APD を用意し、それぞれの APD を通過するチャージパルスを π ハイブリッドで合成し消去する方法がある⁹⁾。また、ディスチャージパルス(放電パルス)に閾レベルを設定し、光子検出によりディスチャージパルスが閾レベルよりも大きくなることを利用する方法がある¹⁰⁾。これらの方法におけるなだれ信号を含む増倍電子数は $10^6 \sim 10^7$ 程度であり、10 MHz 動作が限界である。

4. 正弦電圧ゲート動作

ゲート電圧として、通常用いられる方形パルス電圧ではなく、正弦電圧をゲート動作型受動クエンチング回路に印加する場合を考える(図1)。この場合、光子検出におけるゲート動作型受動クエンチング回路の出力は、抵抗比(APDの抵抗 $\gg R_0$)により減衰された正弦電圧となだれ信

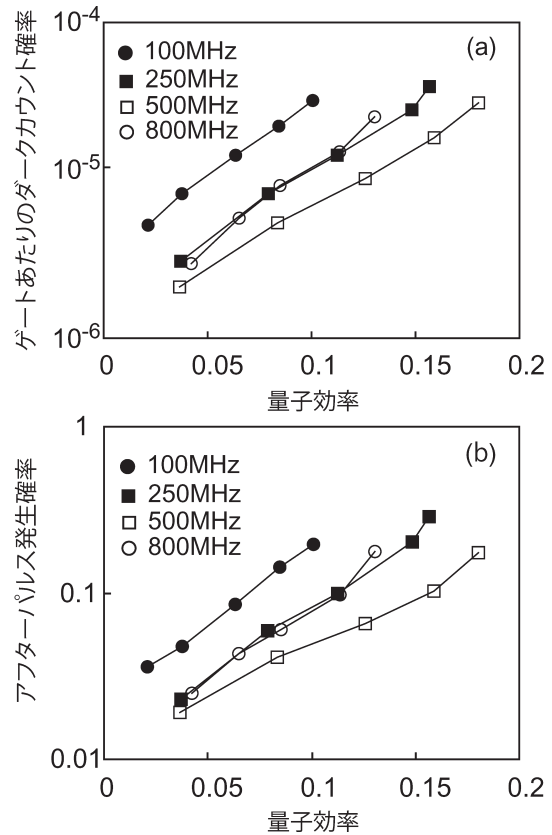


図2 100~800 MHzの繰り返し周波数における量子効率とダークカウント確率およびアフターパルス確率の関係。

号の和となる。この正弦電圧は帯域阻止フィルターにより容易に取り除くことができる。また、正弦電圧を使用する場合、周波数を高くする、あるいは過剰電圧は一定にして振幅を大きくすることにより、ゲート時間を数百 ps まで容易に減少させることができる。これにより、なだれ電流を極限まで低減することができる。

正弦電圧ゲート動作 APD の諸特性を図2に示す。APD (EPITAXX 社 EPM239BA) は電子冷却により -35°C で動作させた。図2(a)の横軸は量子効率、縦軸は1ゲートあたりのダークカウント確率である¹¹⁾。この結果から、500 MHz 動作において最も低いダークカウント確率が得られることがわかる。500 MHz よりも低い周波数では、ゲート時間が長いため、ダークカウント確率が大きくなる。一方、800 MHz ではゲート時間が APD の応答速度限界 (300~400 ps) に近づくため、なだれ信号を得るためには過剰電圧を増加させなければならない。そのため、ダークカウント確率が上昇する。図2(b)の横軸は量子効率、縦軸は総アフターパルス確率である。500 MHz 動作では量子効率が13%のとき、総アフターパルス確率は6.5%である。また、800 MHz 動作では検出効率が8.5%のとき、総アフターパルス確率は6.0%である。

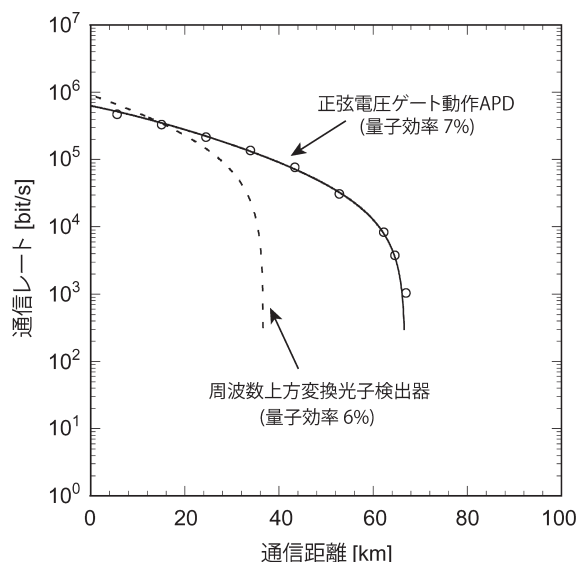


図3 差動位相シフト量子鍵配送における通信レートの比較。

上記の結果から、正弦電圧ゲートを使用する場合には、周波数を 500 MHz 程度に設定するのが S/N 比の点で最もよい。そのため、光源の繰り返し周波数が 500 MHz 以下の場合（例えば、80 MHz のモードロックレーザーの場合）には、その高調波の周波数（6 次高調波である 480 MHz）の正弦電圧ゲートを使用するのがよい⁸⁾。

5. 量子暗号への応用

最後に、正弦電圧ゲート動作 APD を差動位相シフトプロトコルによる量子鍵配送に使用した場合の通信レートを示す。図 3 の横軸は通信距離で、縦軸は通信レートである。破線は周波数上方変換光子検出器（波長 1550 nm の光子を波長 800 nm の光子に変換し、シリコン APD で検出）を使用した場合¹²⁾ であり、実線は 500 MHz 正弦電圧ゲート動作 APD を使用した場合である¹³⁾。周波数上方変換光子検出器を使用した場合、通信距離 10 km での安全鍵の生成率は 450 kbps であった。通信距離が 10 km では、正弦電圧ゲート動作 APD を使用した場合も周波数上方変換光子検出器を使用した場合と同程度の通信レートが得られた。

光通信波長帯における InGaAs/InP APD による従来型単一光子検出器の限界を克服するために、周波数上方変換光子検出器や超伝導単一光子検出器 (SSPD) の開発が行われているが、簡便さおよび電子冷却温度で動作可能な点を考慮すると、50 km までの通信距離では正弦電圧ゲート動作 APD による単一光子検出のほうが優位であるといえる。

量子鍵配送実験にご協力いただいた NTT 物性科学基礎

研究所の武居弘樹博士、本庄利守博士に深く感謝いたします。本研究は、文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「光ファイバー通信波長帯量子ドットを用いた高次機能光子源の研究」および情報通信研究機構「光通信波長帯量子制御光変復調技術に関する研究開発」による研究成果である。

文 献

- 1) C. H. Bennett and G. Brassard: "Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing," *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing* (Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 1984) pp. 175-179.
- 2) D. Stucki, N. Gisin, O. Guinnard, G. Ribordy and H. Zbinden: "Quantum key distribution over 67 km with a plug & play system," *New J. Phys.*, **4** (2002) 41.1-41.8.
- 3) N. Namekata, S. Mori and S. Inoue: "Quantum key distribution over an installed multimode optical fiber local area network," *Opt. Express*, **13** (2005) 9961-9969.
- 4) T. S. Manderbach, H. Weier, M. Furst, R. Ursin, F. Tiefenbacher, T. Scheidl, J. Perdigues, Z. Sodnik, C. Kurtsiefer, J. G. Rarity, A. Zeilinger and H. Weinfurter: "Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km," *Phys. Rev. Lett.*, **98** (2007) 01504-1-01504-2.
- 5) D. Stucki, G. Ribordy, A. Stefanov, H. Zbinden, J. G. Rarity and T. Wall: "Photon counting for quantum key distribution with Peltier cooled InGaAs APDs," *J. Mod. Opt.*, **48** (2001) 1967-1982.
- 6) N. Namekata, Y. Makino and S. Inoue: "Single-photon detector for long-distance fiber-optic quantum key distribution," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 954-956.
- 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) 笹森真司, 行方直人, 井上修一郎: "1550 nm 帯単一光子検出器の 500 MHz 動作", 電子情報通信学会論文誌 (C), **J89-C** (2006) 1085-1096.
- 9) A. Tomita and K. Nakamura: "Balanced gated-mode photon detector for quantum-bit discrimination at 1550 nm," *Opt. Lett.*, **27** (2002) 1827-1829.
- 10) A. Yoshizawa, R. Kaji and H. Tsuchida: "Gated-mode single-photon detection at 1550 nm by discharge pulse counting," *Appl. Phys. Lett.*, **84** (2004) 3606-3608.
- 11) N. Namekata, S. Sasamori and S. Inoue: "800 MHz single-photon detection at 1550-nm using an InGaAs/InP avalanche photodiode operated with a sine wave gating," *Opt. Express*, **14** (2006) 10043-10049.
- 12) E. Diamanti, H. Takesue, C. Langrock, M. M. Fejer and Y. Yamamoto: "100 km differential phase shift quantum key distribution experiment with low jitter up-conversion detectors," *Opt. Express*, **14** (2006) 13073-13082.
- 13) N. Namekata, G. Fujii, T. Honjo, H. Takesue and S. Inoue: "Differential phase shift quantum key distribution using single-photon detectors based on a sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode," *Appl. Phys. Lett.*, **91** (2007) 011112-1-011112-3.

(2008 年 4 月 4 日受理)