

InGaAs/InP アバランシェフォトダイオードの為のリセット機能付き受動クエンチング回路 Passive-quenching circuit with active reset for an InGaAs/InP single-photon avalanche photodiode

○高野晃¹, 行方直人², 井上修一郎²*Akira Takano¹, Naoto Namekata², Shuichiro Inoue²

Abstract: We report on single-photon detection at 1550 nm using a Geiger-mode InGaAs/InP single-photon avalanche photodiode (SPAD) operated with a passive-quenching circuit with active reset. The Geiger-mode InGaAs/InP-SPAD realizes free-running single-photon detection with a detection efficiency of higher than 10% at 1550 nm, while an afterpulse probability is negligibly small when the dead time (the bias hold-off) is set to longer than 20 μ s.

1. はじめに

近赤外単一光子検出器は超高感度イメージング、センシングをはじめとする次世代フォトニクスを実現する要素技術として精力的に開発が進められている。様々な応用分野の中でも、量子情報通信や深宇宙通信は単一光子検出性能に対する要求が極めて高く、高い光子検出効率、低い暗計数率、フリーラン動作が同時に実現されなければならない。それらは超伝導ナノ細線光子検出器(SNSPD)によってほぼ達成されてきているが、極低温動作、偏波依存性等、実用上の課題が残されている。他方、実用的な近赤外単一光子検出器として、ガイガーモード動作(降伏電圧を超える逆電圧を印加する)させた InGaAs/InP 単一光子検出アバランシェフォトダイオード(SPAD)が挙げられる。それによって 10~30%程度の光子検出効率が実現されてきているが、アフターパルスによる雑音計数(SNSPD では無視することができる)による光子検出性能の劣化が問題となっている。アフターパルスフリー光子検出は InGaAs/InP-SPAD をゲート動作することによって容易に実現するものの、ゲート動作時では極めて短いゲート時間(ナノ秒以下)に同期された単一光子しか検出できない(非フリーラン)。

SPAD をガイガーモード動作させる最も単純な駆動回路は受動クエンチング回路(PQC)であり、これはフリーラン光子検出を実現する[1]。PQCによる動作においては、時定数 $\tau \sim C_d R_q$ によって検出不能時間(DT)が決まり、数百 k Ω 程度($\tau < 1 \mu$ s)の R_q が用いられてきた。ここで C_d は SPAD の容量、 R_q は PQC のクエンチング抵抗である(図 1 を参照)。近年、高効率かつ低アフターパルス雑音を実現するために SPAD からの光増倍電流をできるだけ小さくする試みがなされている[2]。PQCにおいては、 R_q を高くすることでそれが実現できる。一方で、高 R_q (例えば $> 100 \text{ M}\Omega$)の採用は DT を

著しく長くしてしまう。今回、我々は高 R_q と短い DT を両立する最も簡素な SPAD 駆動回路を試作し、それによって駆動された InGaAs/InP-SPAD のフリーラン単一光子検出性能の評価を行った。

2. 実験系

Fig.1 に提案する SPAD 駆動回路の概略を示す。本回路は PQC を基礎としており、SPAD 端子間電圧のリセットのみが能動的に行われる。今回、回路試験用の InGaAs/InP-SPAD として Princeton Lightwave 社製の PGA-300 (降伏電圧: 64.1 V)を用いた。FET の drain-source 間のオン抵抗は 160 Ω であり、一方、オフ抵抗は $\sim 1 \text{ G}\Omega$ である。よって、最大で 1G Ω 程度の R_q が

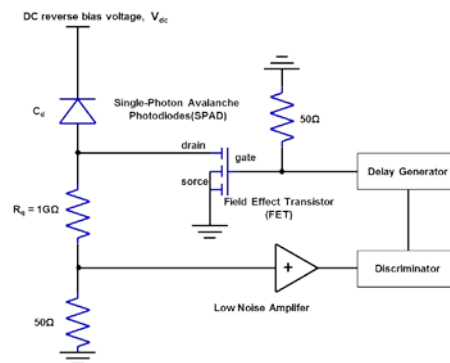


Figure 1. Passive-quenching circuit with active reset (PQC-AR).

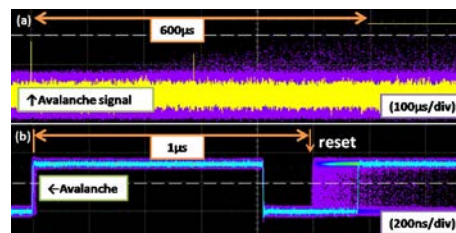


Figure 2. Oscilloscope traces of the detection signals when the SPAD was driven by (a)PQC($R_q = 1 \text{ G}\Omega$) or (b)PQC-AR($R_q = 1 \text{ G}\Omega$).

採用できる. SPAD からの光増倍電流はディスクリミネータによってしきい値検出され, また電圧ロジック信号へ変換される. その信号は遅延発生器による遅延およびパルス幅の制御を受けた後, FET の gate 端子へ入力され, FET はオン状態となる. この時, SPAD アノードからグランド (GND) へは 160Ω のバイパスができ, 時定数 $\tau \sim 1\text{ns}$ によって SPAD 端子間電圧が回復し, 再び光子検出可能な状態となる. 能動リセット機能が付加された PQC(PQC-AR)を用いることにより, PQC による駆動では本来 $600\ \mu\text{s}$ 以上となる DT を最短 $1\ \mu\text{s}$ 以下とすることが可能となった. (Fig.2)

3. PQC-AR 駆動 SPAD の光子検出性能

まず, R_q 値($10\ \text{M}$, $100\ \text{M}$, $0.5\ \text{G}\Omega$)に対する光増倍電流信号の波高値を測定した. Fig. 3 より, R_q を高くすることで, 光増倍信号波高が低くなるのがわかる. これは, 高 R_q 値の採用により, 単一光子を検出するために必要な光増倍電流量を低減でき, その結果, 捕獲された荷電キャリア(アフターパルス雑音の発生源)の数を低減できることを意味する. $R_q = 0.5\ \text{G}\Omega$ の場合, これまでの半分程度まで光増倍電流を低減できた.

PQC-AR ($R_q = 0.5\ \text{G}\Omega$)によって駆動された InGaAs/InP-SPAD のアフターパルス発生確率の評価 (Fig.4)を行った. 本測定では, 繰り返し周波数 $10\ \text{kHz}$, 波長 $1550\ \text{nm}$, パルス幅 $< 100\ \text{ps}$ の微弱コヒーレントパルス光を用いた. Fig.4 より, $\text{DT} > 20\ \mu\text{s}$ とすることでアフターパルス雑音を抑圧できることがわかる. PQC-AR ($R_q = 0.5\ \text{G}\Omega$)の DT を $20\ \mu\text{s}$ に固定し, 光子検出効率および暗計数を測定した (Fig.5). 光子検出効率, 暗計数はそれぞれ $11.29\ \%$, $1.67\ \text{kcps}$ を得た. それら性能は, 高 R_q の PQC 駆動では計数飽和によって得られないため, PQC-AR の能動リセット機能によって SPAD 端子間電圧回復時間の大幅な短縮, アフターパルス雑音計数の抑圧が同時に達成された結果といえる.

4. まとめ

PQC に能動リセット機構を加えた簡便な SPAD 駆動回路を開発した. 高 R_q 採用と能動リセット機構により, 低アフターパルス確率かつ短い検出不可能時間の両立が可能となった. その結果, 波長 $1550\ \text{nm}$ において光子検出効率 $> 10\ \%$ のフリーラン単一光子検出が実現した. 試験に用いた InGaAs/InP-SPAD の暗計数が高かった為, 本実験結果は今回開発した PQC-AR の性能を十

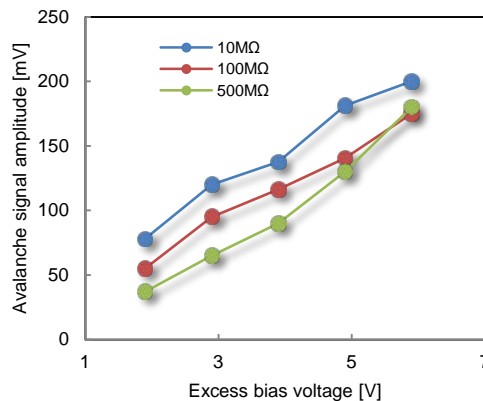


Figure 3. Avalanche signal amplitude when $R_q = 10\ \text{M}$, $100\ \text{M}$, $0.5\ \text{G}\Omega$.

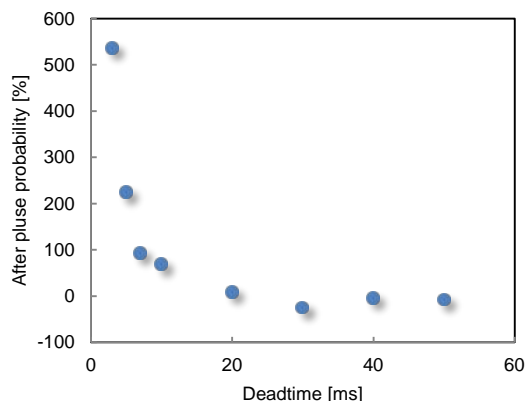


Figure 4. Afterpulse probability as a function of the dead time.

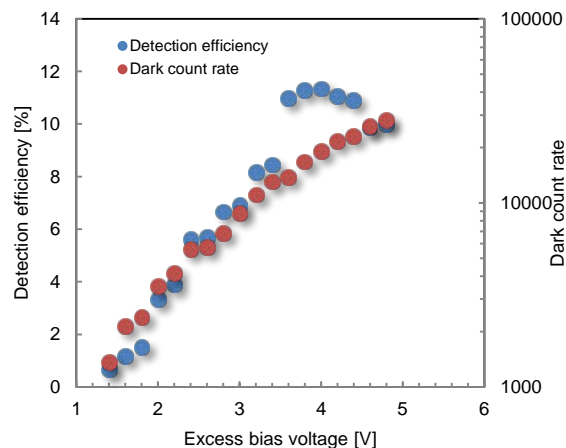


Figure 5. Detection efficiency and dark count rate as functions of the excess bias voltage.

分に反映してはいないと考えられる. より低雑音な SPAD を用いた性能評価が今後の課題となる.

参考文献

- [1] S.Cova, M.Ghioni, A. Lacaita, C.Samori, and F. Zappa, *Appl. Opt.*, **35**, 1956 (1996).
- [2] X. Jiang, M. A. Itzler, K. O'Donnell, M. Entwistle, and K. Slomkowski, in *Proc. SPIE*, **8033**, 80330K-1(2011).