

O-14

正弦電圧ゲート動作型シリコンアバランシェフォトダイオードを用いた単一光子検出 Single-photon detection using a sinusoidally gated silicon avalanche photodiode

○鈴木信悟¹, 行方直人¹, 辻野賢治², 井上修一郎¹○Shingo Suzuki¹, Naoto Namekata¹, Kenji Tsujino² and Shuichiro Inoue¹

Abstract: We report on a visible-light single photon detection using a sinusoidally gated silicon avalanche photodiode. A detection efficiency of 70.6 % was achieved at a wavelength of 520 nm when an electrically cooled silicon avalanche photodiode with a quantum efficiency of 72.4 % was used, which implies that a photo-excited single-electron in the silicon avalanche photodiode can trigger a detectable avalanche (charge) signal with a probability of 97.6 %.

1. はじめに

量子暗号通信や量子計算など近年研究が盛んに行なわれている量子情報処理技術において、高効率単一光子検出は最も重要な要素技術である。これまでに 90% を超える極めて高い光子検出効率が超伝導素子を用いて実現されている^[1]。しかし、それは、「極低温動作」や「フリースペース化が困難」など、実用上の課題を持っている。一方で、可視から近赤外領域における実用的な単一光子検出器として降伏電圧を超える逆電圧を印加されたシリコン・アバランシェフォトダイオード (Si-APD) が挙げられる^[2]。Si-APD の量子効率自体は 90% 以上が実現されている。しかし、雪崩降伏確率 (<80%) の低さが正味の光子検出効率の低下を招いている。雪崩降伏確率を改善するためには、より高い逆電圧印加により Si-APD 内部の電場強度を増加させる必要がある。しかし、高い逆電圧印加時には、暗計数やアフターパルスなどの雑音計数も上昇する。その問題を解決する手法として、一般的にはゲート動作が用いられる。ゲート動作とは、光子の入射タイミングに合わせて極めて短い時間だけ降伏電圧を超える逆電圧を印加する手法であり、それにより雑音計数を抑圧することが可能になる。通常、ゲート用交流電圧には矩形またはパルス状電圧が用いられるが、「ゲート用交流電圧印加に起因する充放電パルスの相殺」、「高振幅交流電圧印加」、「短いゲート幅」を同時に実現することが困難であるため、それによる雪崩降伏確率の改善は 1 例のみに留まっている^[3]。

一方、我々のグループで開発した正弦電圧ゲート動作^[4]では、先の 3 つの困難を同時に克服可能である。本研究では、InGaAs/InP-APD による単一光子検出を高速化するために開発した正弦電圧ゲート動作を Si-APD へ応用し、高い逆電圧印加による高い雪崩降伏確率の実現性を検討した。

2. 実験系

図 1 に今回作製した単一光子検出器の概略を示す。Si-APD へは正弦電圧(周波数; $\omega=79.4\text{MHz}$)が重畳された直流逆電圧 (V_{DC}) を印加する。それにより正弦電圧ゲート動作が実現する。暗計数を低減するために、Si-APD は 276K まで電子冷却した。信号発生器 (SG) から出力される正弦電圧は、先ず 2 分岐し、その一方は、高電力増幅器 1 (P-AMP1) により増幅した後、ゲート用交流電圧として使用した。もう一方は Si-APD から出力されるゲート伝達信号を相殺するために用いた。ゲート伝達信号の相殺は方向性結合器 (DCP) を用いて逆位同期した正弦電圧を加えることで実現した。位相器 (PS) を用いた正確な位相調節、可変減衰器 (VATT)、増幅器(P-AMP2)による振幅調整により 60dB の抑圧比を達成した。ここで、LPF1 および LPF2(遮断周波数;90MHz)は高調波雑音を取り除くために用いた。光子検出 (雪崩) 信号は利得 46dB の低雑音電力増幅器 (LNA) を用いて増幅された。最終的に、光子検出信号は 0.5 ナノ秒の電圧パルス信号を識別可能な識別器 (DISC) によって識別し、同時に NIM レベルのロジック信号に変換した。

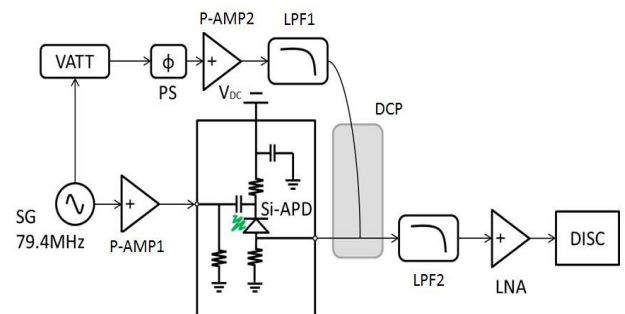


図 1. 正弦電圧ゲート動作型 Si-APD 光子検出器の概略図

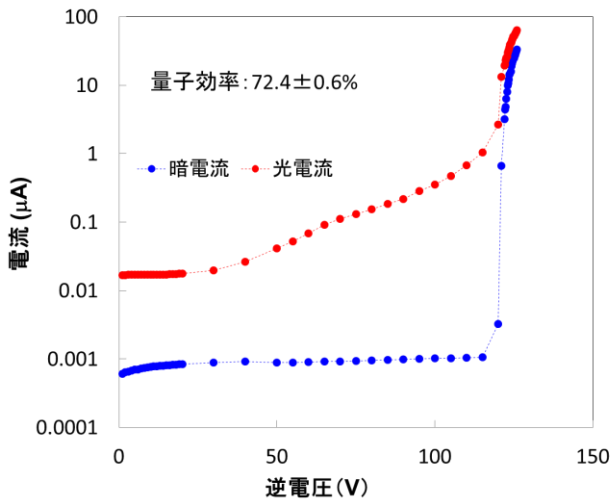


図 2. 逆電圧に対する暗電流と光電流

3. 効率測定結果

先ず、実験に用いた Si-APD の量子効率測定を行った。本測定では、繰り返し周波数 19.8MHz、波長 520nm、パルス幅 < 10ps のパルスレーザーを用いた。また、Si-APD へはゲート用交流電圧を印加せず、 V_{DC} のみを印加して行った。図 2 に平均パワー 50nW のパルスレーザーを Si-APD へ入射したときの逆電圧 V_{DC} に対する光電流測定値を示す。光入射が無い場合(暗電流)も合わせて示す。 V_{DC} が 15V 以下の時、光電流は増加していない。これは、Si-APD 内の電界が低いため雪崩増倍が起らず、Si-APD が単なるフォトダイオードとして動作していることを示している。よって、Si-APD へ入射される平均光子数と計測された光電流(電子数)より量子効率が容易に求まる。本結果より、実験に用いた Si-APD の量子効率は $72.4 \pm 0.6\%$ である。

続いて、この Si-APD を正弦電圧ゲート動作させ、その光子検出効率の評価を行なった。本実験では、振幅 29V_{p-p}(最大)、 $\omega=79.4$ MHz の正弦電圧を印加することでゲート動作させ、 V_{DC} を変化させながら光子検出効率を測定した。評価用の光源は先のパルスレーザーを単一光子レベルまで減衰させて使用した。

光子検出効率は量子効率 η と雪崩降伏確率 α を用いて、 $\eta\alpha$ で与えられる。ここで α は Si-APD 内部で発生した光電子による巨視的降伏電流の発生確率である。図 3 に正弦電圧の振幅が 15、20、29V_{p-p} であるときの V_{DC} に対する雪崩降伏確率 α を示す。また、アフターパルス確率も同時に示す。 V_{DC} の上昇と共に α は上昇している。これは、高い逆電圧印加によって α を高めるこ

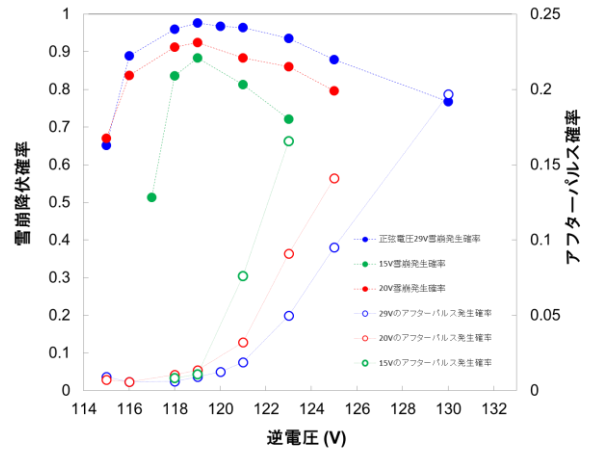


図 3. 逆電圧に対する雪崩降伏確率とアフターパルス確率

とが可能であることを示している。同時に V_{DC} の上昇と共にアフターパルス確率も上昇してしまう。その影響を小さくするためには、より高い振幅を持つ正弦電圧を用いることが有効である。図 3 より、正弦電圧振幅を高くすることで、アフターパルス確率を抑えた状態でより高い逆電圧印加が可能であることがわかる。正弦電圧振幅 29V_{p-p}、 $V_{DC}=119$ V の時、 $\alpha=97.6 \pm 0.4\%$ (光子検出効率 70.6%) を得た。この時、過剰電圧(降伏電圧を超過した逆電圧値)は 18V に達しており、そのような高い過剰電圧が高い雪崩降伏確率を実現した。

4. まとめ

Si-APD を正弦電圧ゲート動作させることで、雪崩降伏確率 $97.6 \pm 0.4\%$ を達成した。本結果は正弦電圧ゲート動作が高い逆電圧印加(高い過剰電圧)を可能とし、光子検出効率を決定する量子効率以外の要素を著しく高効率化できることを示唆している。今後、量子効率がより高い Si-APD に本手法を応用し、光子検出効率 90% 以上の実現を目指す。

参考文献

- [1] D.Fukuda, et al, Opt.Express **19**,870,(2011).
- [2] S. Cova, M. Ghioni, A. Lotito, I. Rech, and F. Zappa, J. Mod. Opt. **51**,1267 (2004).
- [3] O. Thomas, Z. L. Yuan, J. F. Dynes, A. W. Sharpe, and A. J. Shields, APL **97**, 031102 (2010)
- [4] N.Namekata, S.Sasamori, and S. Inoue, opt. Express **14**, 10043-10049 (2006)