O-24

# 高振幅正弦電圧ゲート動作 InGaAs/InP なだれフォトダイオードを用いた 1550 nm 帯 54%単一光子検出効率の実現 54% single-photon detection efficiency at 1550 nm

# using an InGaAs/InP avalanche photodiode gated with a high-amplitude sinusoidal voltage

○多田彬子<sup>1</sup>, 行方直人<sup>2</sup>, 井上修一郎<sup>2</sup> \*Akiko Tada<sup>1</sup>, Naoto Namekata<sup>2</sup>, Shuichiro Inoue<sup>2</sup>

Abstract: We report on single-photon detection at 1550 nm using a sinusoidally gated InGaAs/InP avalanche photodiode. The high-amplitude of sinusoidal voltage realized the excess voltage of higher than 18 V with an extremely short gate width of 193 ps, which resulted in the strong enhancement of the photon detection efficiency while the dark counts and the affterpulses were suppressed. A photon detection efficiency of 54.4 % was achieved with a dark count probability of 3.6 x  $10^{-4}$  per gate and an aftrerpulse probability of 1.1% at the gate repetition frequency of 1.27104 GHz.

## 1. はじめに

近年、長距離量子暗号通信の実現へ向けた取り組み が精力的に行われており、具体的には、高効率量子鍵 配送や高速量子もつれ交換等が実現されている。[1,2] それらの実験には高効率かつ低雑音な通信波長帯単一 光子検出器として超伝導ナノワイヤー単一光子検出器 <sup>[3]</sup>が使用されているが、実用化には不向きという問題 点がある。そこで、簡便かつ実用的な通信波長帯単一 光子検出器として、InGaAs/InP アバランシェフォトダ イオード (APD) が注目されている。我々のグループ では、正弦電圧ゲート動作させた APD を用いた単一光 子検出器の開発を行ってきた。[4] 本ゲート手法は、伝 統的な矩形電圧パルスを用いたゲート手法に比べ、高 繰り返し、高効率かつ低雑音な光子検出が可能となる。 本研究では、正弦電圧ゲート動作用回路を改良し、 InGaAs/InP-APD を用いた光子検出器としては最高水 準の光子検出効率を低雑音で実現したので報告する。 2. 実験系

Fig.1 に開発した正弦電圧ゲート動作単一光子検出 器の概略図を示す。InGaAs/InP-APD は、ペルチェ冷却 により約 16 ℃で動作させた。性能評価には、繰り返 し周波数 19.861 MHz、パルス幅 5 psec、1 パルスあた り平均光子数が 0.01 の微弱コヒーレントパルス光を使 用した。また、直流電圧(V<sub>DC</sub>)にゲート用交流信号を 重畳するために、改良型ゲート動作クエンチング回路

(GPQC)を使用した。信号発生器(SG)からの周波数 1.271104 GHz、電圧 4 dBmの正弦電圧は、25 dBの増幅と帯域通過フィルター(BPF)による濾波の後、ゲート用交流電圧として APD へ印加される。その際、GPQCのゲート用交流信号の伝送特性インピーダンス

1:日大理工・院(前)・量子 2:日大・教員・量科研

Zは、50 Ωとした。一方、改良型 GPQC の交流入力イ ンピーダンスは高 Z であり、APD へ印加される正弦電 圧は準開放電圧となり、50Ωでインピーダンス整合さ せた場合に比べて 2 倍程度まで正弦電圧ゲート振幅の 増強が可能となった。APD からのゲート動作に起因す る伝達信号は、帯域除去フィルター(BEF)により除 去した。その後、BEF からの出力信号は 40dB 増幅後、

BEF とローパスフィルター (LPF) によって、2.56 GHz (第 2 高調波)以上の雑音は低減された。最後に、識 別器 (DISC) より出力されたロジック信号を時間相関 測定器 (TIA) で記録し、得られた計数ヒストグラムよ り光子計数確率 (PDE)、アフターパルス確率 (AP)、 暗計数確率 (DP) を求めた。



SG: signal generator, AMP: amplifier, BPF: band-pass-filter, GPQC: gated passive quenching circuit, BEF: band-elimination-filter, LPF: low-pass-filter, DISC: discriminator, TIA; time interval analyzer,

Figure 1. Diagram of the single-photon detection circuit.

### 3. 結果

Fig.2 に測定結果を示す。DE = 54.4 %、AP = 1.1%、 DP = 3.6 × 10<sup>-4</sup> を得た。また、Table 1 に Self-differencing ゲート手法<sup>[5]</sup> との性能比較を示す。 Table 1 より、ほぼ最高の PDE 得つつ低い AP 確率を得 られていることがわかる。これは、高振幅正弦電圧ゲ ートの採用により、高過剰電圧印加(~18 V)と短ゲ ート幅(~193 psec)(Fig.2(c)参照)が両立したためであ る。今回、高余剰電圧下における AP を低減するため にやや高い動作温度を採用した。しかし、本実験結果 から、より低温動作によっても AP は量子鍵配送へ応 用可能なほど十分低く抑えられる可能性が高い。した がって、電子冷却が容易な-20℃程度まで APD を冷却 し、DP を 1 桁以上低減することにより超伝導ナノワイ ヤー光子検出器に匹敵する性能指数の実現を図りたい。

Table 1. Comparison of the single-photon detectorperformances.

fren:	repetition	frequency	of the	gate
J rep.	repetition	nequency	01 1110	Succ

	PDE	AP	f <sub>req</sub> [Ghz]
This work	54.4	1.1	1.271104
<b>Ref.</b> [5]	55	10.2	1

#### 4. まとめ

InGaAs/InP APD を高振幅正弦電圧で動作させること により、高い PDE = 54.4 %かつ低い AP = 1.1%を実現し た。今後は、低温動作によるより高い性能指数の実現 とこの単一光子検出器を量子鍵配送へ応用し、実用的 な系による長距離伝送可能かつ高速秘密鍵レートの実 現を目指す。

#### 謝辞

本研究は日本大学理工学部プロジェクト研究助成を 受けて実施されたものである。

#### 参考文献

[1] Rui-Bo Jin, Ryosuke Shimizu, Kentaro Wakui, Mikio Fujiwara, Taro Yamashita, Shigehito Miki, Hirotaka Terai, Zhen Wang, and Masahide Sasaki, *Opt. Express* **22**, 10, pp11498-11507, 2014.

[2] Rui-Bo Jin, Masahiro Takeoka, Utako Takagi, Ryosuke Shimizu, Masahide Sasaki, *Scientific Reports* **5**, 9333, 2015. [3] F. Marsili, V. B. Verma, J. A. Stern, S. Harrington, A. E. Lita, T. Gerrits, I. Vayshenker, B. Baek, M. D. Shaw, R. P. Mirin, S. W. Nam, *Nat. Photon.* 7, 3, pp210-214, 2013.

[4] N. Namekata, S. Sasamori, S. Inoue, *Opt. Express* **14**, 21, pp10043-10049, 2006.

[5] L. C. Comandar, B. Fröhlich, J. F. Dynes, A. W. Sharpe,M. Lucamarini, Z. L. Yuan, R. V. Penty, and A. J. Shields,*Appl. Phys. Lett.* **117**, 083109, 2015.



**Figure 2.** (a) the photon detection efficiency, the dark-count probability and (b) the afterpulse probability as functions of the reverse bias voltage. (c) the detector counts of the gate time.