

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390087

研究課題名(和文) 正弦電圧ゲート動作型シリコン雪崩フォトダイオードによる光検出に関する研究

研究課題名(英文) Photo-detection using a sinusoidally gated silicon avalanche photodiode

研究代表者

行方 直人 (NAMEKATA, Naoto)

日本大学・理工学部・助教

研究者番号：20453912

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、実用的であるシリコン雪崩フォトダイオード(Si-APD)を用いた超高効率単一光子検出器の実現を狙ったものである。開発した開放終端ゲート動作型受動クエンチング回路(OT-GPQC)によって、高い量子効率を有するSi-APDは過剰電圧37 V以上のゲートモードで動作された。ここで、ゲート幅はSi-APDの応答速度程度の4 nsとした。そのような高電圧ゲート動作によって、これまで不完全であった雪崩降伏確率は99%まで改善され、雑音の著しい増加も避けられた。その結果、波長780nmにおいて試験Si-APDの量子効率にほぼ等しい85.2%の単一光子検出効率を達成した。

研究成果の概要(英文)：In this research, the single-photon detector with a very high detection efficiency using a silicon avalanche photodiode (Si-APD). Si-SPAD was driven by the open-terminated gated passive quenching circuit (OT-GPQC). The OT-GPQC realizes the gate operation of the Si-APD with a reverse bias voltage of 37 V over the breakdown voltage and a gate duration of 4 ns (corresponds to a response time of the Si-SPAD). The very-high-voltage and short gate operation extremely enhanced the avalanche detection probability: the photo-excited carrier grows into detectable macroscopic current, without significant increase of noise counts. Finally the avalanche detection probability of 99% was achieved. The tested Si-APD then has a quantum efficiency of 85.6% at a wavelength of 780 nm. Therefore, the Si-APD operated with the OT-GPQC has had a single-photon detection efficiency of 85.2% with a dark count probability per gate of  $10^{-6}$ .

研究分野：量子光学

キーワード：単一光子検出 シリコン雪崩フォトダイオード

### 1. 研究開始当初の背景

単一光子検出器は、光量子情報技術だけでなく LIDAR や超高感度が要求されるイメージング技術等、次世代光技術に不可欠な要素技術である。性能指数のみで評価すれば、超伝導を用いた光子検出器[1,2]が優位であり、また、その単一光子検出効率 (PDE) は 90% を超え、雑音である暗計数率も低い。一方、実用面では、電子冷却された半導体素子、雪崩フォトダイオード (APD) が優位であり、また、コンパクトかつ簡便である。シリコンの (Si-)APD は可視域から近赤外 (400 nm ~ 900 nm) における性能指数が極めて高いものの、PDE は 70% 程度以下であった。本来、Si-APD は適切な設計及び無反射コート等の施しによって 90% を超える量子効率が実現されている。それにもかかわらず、量子効率 (値) に近い PDE が実現されていない理由は不完全な雪崩降伏確率にある。

PDE は量子効率と雪崩降伏確率の積で与えられる。雪崩降伏確率とは、単一光子吸収によって APD 内に励起された単一荷電キャリアが検出可能な巨視的電子雪崩信号へ成長できる確率である。APD 特有の過剰雑音、高電圧印加時におけるアフターパルス雑音や暗計数の著しい増加などの理由によって雪崩降伏確率に不完全性が生じていた。

### 2. 研究の目的

本研究では、先に述べた雪崩降伏確率の不完全性を改善し、Si-APD が本来持つはずのポテンシャル PDE (~量子効率) を実現することを目指した。それを達成することによって、超伝導系でしか達成されていない高 PDE ~90% を実用的な Si-APD によって実現させる可能性を示せる。具体的には、申請者が開発してきた Si-APD 駆動手法であるゲート動作を改良し、これまで以上の高電圧印加かつその条件下におけるアフターパルス雑音、暗計数の抑圧を同時に達成し、雪崩降伏確率 ~100% の実現可能性を調べた。

### 3. 研究の方法

本研究で使用した Si-APD は Excelitas technology 社製の SPCM-AQR-14 をリバースエンジニアしたものを使用した。その Si-APD は波長 780 nm において 85.6% の高い量子効率を有する一方、応答速度は 1GHz 未満であり、正弦電圧ゲート動作手法 [3] による動作が困難であった。よって、矩形電圧パルスによるゲート動作を採用し、電圧パルスを独自開発の回路によって高振幅化することにより高性能単一光子検出器の実現を図った。

図 1 に Si-APD を駆動させるための回路を示す。本回路の基本構成はゲート動作型受動クエンチング回路 (Gated passive quenching circuit) [4] であるが、ゲート用電圧パルス入力ポートに本来並列接続される 50 Ω 終端抵抗を取り除いている。つまり、ゲート用電圧パルス入力部の入力インピーダンスはク

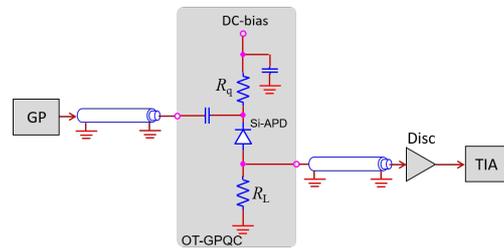


図 1. 開放終端 GPQC 回路による Si-APD の駆動. GP, ゲート用電圧パルサー; Disc, 識別器; TIA, 時間相関測定器.



図 2. ゲート用電圧パルス波形 (50 Ω 終端、20dB 減衰後)

エンチング抵抗  $R_q$  (50 Ω) に近い値となる。したがって、ゲート用電圧パルス (交流信号) のみ、Si-APD のカソードへその開放端電圧が印加されることになる。これは、ゲート用電圧パルス発生回路を変更せずとも 2 倍の振幅を持つ電圧パルス印加が可能であることを意味する。以上のように、開放端電圧によるゲート用電圧パルス印加を可能とする GPQC を開放終端 (OT-) GPQC と名付けた。OT-GPQC によって、直流電圧に重畳されたゲート用電圧パルスは Si-APD のカソードへ印加される。Si-APD のアノードから出力される電子雪崩信号は抵抗  $R_L$  によって電圧変換された後、OT-GPQC から出力される。電圧変換された電子雪崩信号は識別器によって識別され、最終的に時間相関器 (TIA) によって計数された。計数結果より、単一光子検出効率 (PDE) だけでなく暗計数確率 (DCP)、アフターパルス発生確率 (AP) を評価することができる。[5]

使用した Si-APD の応答速度より、ゲート用電圧パルスの幅は 4ns 程度、振幅は 40V 以上が必要であると判断された。そこで、そのような条件を満たすゲート用高電圧パルス発生回路 (GP) を開発した。図 2 に開発した GP から出力された電圧パルスのオシロスコープ波形を示す。ただし、測定は 50 Ω 終端、20 dB 減衰という条件下で行った。同図から、

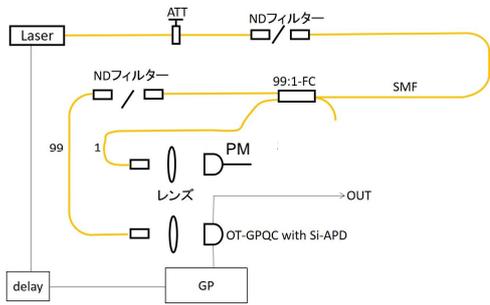


図 3. 単一光子検出器性能評価系. BATT: 可変光減衰器; SMF, 単一モードファイバ; PM, 光パワーメータ, 99:1FC, 99:1 ファイバーカップラ.

半値幅 4 ns、振幅 19 V のパルス電圧が発生できていることがわかる。また開発した GP は繰り返し周波数 500 kHz（外部同期可）で動作する。さらには、開放端反射によってほとんどのパルスエネルギーが GP 出力端へ戻ってきて回路は破損しないことが確認された。したがって、本 GP は OT-GPQC と組み合わせ使用するのに適しており、50 Ω 終端条件において 19 V であった振幅は、Si-APD のカソード上において、その開放端電圧である 38 V とすることができた。

図 3 に今回構築した単一光子検出効率 (PDE) 測定系を示す。PDE の測定は時間幅 50 ps のパルスレーザー光（波長 780 nm）を単一光子レベルまで減衰させた微弱コヒーレントパルス（平均光子数：0.01 以下）を用いた。入射平均光パワーの校正基準は NIST 標準から ±5% の不確かさを持つ光パワーメータ (PM) を用いた。実験系は全光ファイバ系によって構築され、極めて高い安定性を実現し、最終的に各光パワーメータの不確かさと同程度のシステム不確かさを実現した。

#### 4. 研究成果

Si-APD を OT-GPQC と GP を用いて高振幅ゲート動作（電圧パルス振幅 38V）させ、単一光子検出能を評価した。図 4(a) に直流 (DC) 電圧を変化させたときの PDE を、図 4(b) に DC 電圧を変化させたときの DCP をそれぞれ示す。DC 電圧の上昇とともに PDE および DCP は増加し、いわゆるトレードオフ関係性が見て取れる。PDE に関しては、DC 電圧 458V 以上において飽和しているのが見て取れる。使用した Si-APD の量子効率 は波長 780 nm において 85.6% であるのに対し、PDE を 85.2%（DC 電圧：460 V）まで高めることに成功した。これは、光子吸収により発生した単一荷電キャリアを検出可能な巨視的的雪崩信号へ成長できる確率、雪崩降伏確率を 99% まで高めることに成功したことを示唆している。ただし、Si-APD の逆降伏電圧が ~461 V であるため、これ以上の DC 電圧は印加できず、完

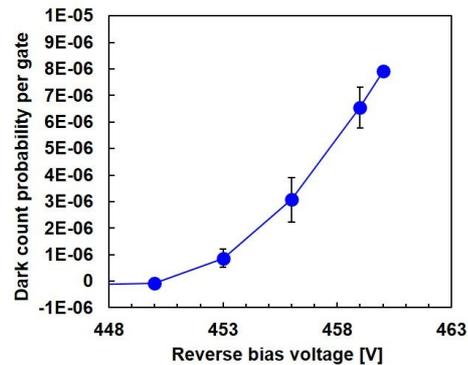
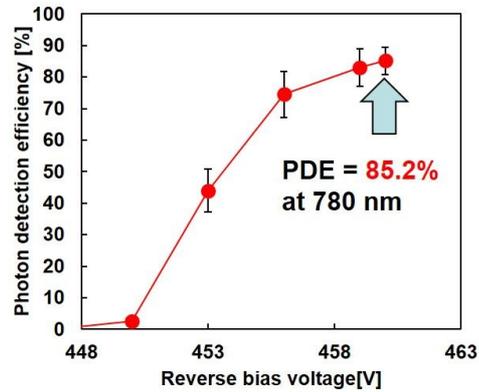


図 4. DC 電圧に対する (a) 単一光子検出光子検出 (PDE) と (b) 暗計数確率.

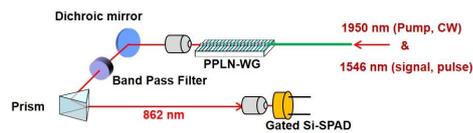


図 5. 波長変換を用いた 1550 nm 帯単一光子検出器

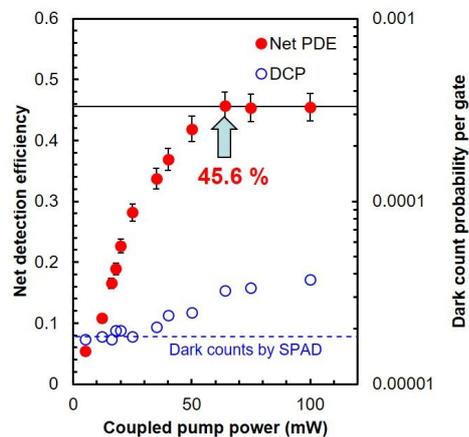


図 6. 波長変換素子用励起光強度に対する波長 1550 nm 単一光子検出効率

全なる PDE 飽和を観測するまでには至らなかった。これ以上の電圧を Si-APD へ印加するためにはゲート用電圧パルスの振幅をさらに高くする必要がある。

次に開発した単一光子検出器（高振幅ゲート動作 Si-APD）を 1550 nm 帯光子検出へ応用した。これは、先の波長 780nm 帯とは異なる波長帯における光計測標準系において PDE を評価することとなり、先の PDE 測定結果の妥当性を確認する意味も持つ。

1550nm 帯の光子検出系は開発した単一光子検出器と、周期分極反転二オブ酸リチウム導波路 (PPLN-WG) を用いた波長変換系から成る。図 5 に実験系を示す。波長 1546 nm の被検出光子は、波長 1950 nm の連続光によって励起された PPLN-WG 中の和周波発生過程によって、波長 862 nm へ波長変換される。波長変換された光子は高振幅ゲート動作 Si-APD によって検出される。波長 862 nm における Si-APD の量子効率 は 76.5% であり、損失を含めた正味の波長変換効率が 61.0% であった。したがって、波長 1546 nm の単一光子に対して最大で 45.8% の検出効率の実現が期待できた。図 6 に実験結果を示す。PPLN-WG 励起光強度が 60~70mW 程度のとき波長変換効率は最大となり、その時の波長 1546 nm の光子に対するシステム PDE は 45.6% を得た。したがって、本系においても Si-APD における雪崩降伏確率が 99% であることが確認された。

#### 引用文献

- [1] D. Fukuda, et al, Opt. Express **19**, 870 (2011).
- [2] F. Marsili, et al., Nat. Photon. **7**, 210 (2013).
- [3] N. Namekata, S. Sasamori, and S. Inoue, Opt. Express **14**, 10043 (2006).
- [4] N. Namekata, Y. Makino, and S. Inoue, Opt. Lett., **27**, 954 (2002).
- [5] N. Namekata, S. Adachi, and S. Inoue, Opt. Express, **17**, 6275 (2009).

#### 5. 主な発表論文等

〔学会発表〕(計 9 件)

Tada, N. Namekata and S. Inoue, "Single-photon buffer at a telecommunication wavelength using a fiber-optic switch," *2017 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR 2017)*, Singapore, Republic of Singapore (July 31-August 4, 2017). (発表予定)

高畑理希, 多田彬子, 行方直人, 井上修一郎, "InGaAs/InP-SPAD による 900 nm 帯単一光子検出," 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, パシフィコ横浜 (神奈川県、横浜市), 16p-P12-1, (2017. 3.14-17).

N. Namekata, A. Tada, G.-L. Shentu, Q. Zhang, J.-W. Pan, and S. Inoue, "85% Single-Photon Detection Efficiency at 780 nm Using a Silicon Avalanche Photodiode with High-Voltage Gating," *5th International Conference on Quantum Cryptography (QCrypt2015)*, Hitotsubashi Memorial Hall, Tokyo, Japan, (Sept. 28 -Oct. 2, 2015).

行方直人, G.-L. Shentu, Q. Zhang, J.-W. Pan, 井上修一郎, "Frequency-up-conversion single-photon detector at a telecom-wavelength with a high-efficiency gated Si avalanche photodiode," 第 76 回応用物理学会秋季学術講演会, 名古屋国際会議場 (愛知県、名古屋市), 15a-4D-12 (Sep. 13-15, 2015).

N. Namekata, A. Tada, and S. Inoue, "High Efficiency Near-Infrared Single-Photon Detector Using a Sinusoidally Gated InGaAs/InP Single-Photon Avalanche Photodiode," *Single Photon Workshop 2015*, Geneva, Switzerland, (July 13-17, 2015). (招待講演)

A. Tada, N. Namekata, and S. Inoue, "Gated Silicon Avalanche Photodiode With 85% Single-Photon Detection Efficiency," *Single Photon Workshop 2015*, Geneva, Switzerland, (July 13-17, 2015).

高野晃, 行方直人, 井上修一郎, "高効率単一光子検出へ向けた SPAD クエンチング抵抗に関する一考察," 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 東海大学(神奈川県、平塚市), 11a-A17-8, (March, 11, 2015).

高野晃, 行方直人, 井上修一郎, "単一光子検出アバランシェフォトダイオードののリセット機能付き受動クエンチング回路," 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学(北海道、札幌市), 19a-PA7-3, (Sep. 17, 2014).

多田彬子, 行方直人, 井上修一郎, "高振幅正弦電圧ゲート動作 InGaAs/InP アバランシェフォトダイオードによる単一光子検出," 第 75 回応用物理学会秋季学術講演会, 北海道大学 (北海道、札幌市), 18p-C2-5, (Sep. 17, 2014).

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

行方直人 (NAMEKATA, Naoto)  
日本大学・理工学部・助教  
研究者番号: 20453912