

長距離検出と太陽光干渉耐性を備えた 低雑音 Sb 系アバランシェ光検出器

Low-Noise Sb-Based APD with Long-Range Detection and Resistance to Sunlight Interference

黒川 宗高*
Munetaka Kurokawa

佐藤 将来
Masaki Sato

平野 充遥
Mitsuharu Hirano

三澤 太一
Taichi Misawa

伊藤 真也
Shinya Ito

夏目 和俊
Kazutoshi Natsume

自動運転のロボタクシーが主要都市で定着し始めているが、今後は物流を中心に、我々の身近な生活の場への拡大が期待されている。それに伴い、自動運転で重要なセンサである ToF-LiDAR には、検出距離の延長とレーザ安全性の両立、そして屋外での耐環境性がより求められる。波長 1550 nm 帯がレーザ安全性では有利だが、これまで低雑音の受光素子がなく、検出距離の律速となっていた。そこで我々は、アンチモン (Sb) 系材料を増倍層に使用した低雑音のアバランシェ光検出器 (APD) を開発した。今回、検出距離と太陽光耐性について、既存の波長 905 nm 帯と Sb-APD を用いた波長 1550 nm 帯をシステムの SNR の観点から比較評価した結果を報告する。

Self-driving taxis are beginning to become popular in major cities. In the future, autonomous driving is expected to expand mainly in logistics and enter our everyday lives more closely. ToF-LiDAR, which is an essential sensor for autonomous driving, is required to achieve both a longer detection range and laser safety, as well as stronger environmental robustness in outdoor settings. Although the 1550 nm wavelength band is advantageous for laser safety, its detection range has so far been limited by the lack of low-noise photodetectors. Therefore, we developed a low-noise avalanche photodiode (APD) using an antimony (Sb)-based material in the multiplication layer. In this work, we report results from a comparative evaluation of detection distance and sunlight resilience, considering system SNR, between the existing 905 nm band and the 1550 nm band equipped with the Sb-APD.

キーワード : APD、Sb、LiDAR

1. 緒 言

飛行時間法による測距 (ToF-LiDAR^{*1}) は、障害物検出や自己位置推定に用いられており、今後、より高速な自動運転の需要増加や、住宅地への普及に伴い、目へのレーザ安全を確保しながら検出距離を拡大する必要性が高まることが予想される。

ToF-LiDAR には、コスト効率に優れた波長 905 nm 帯のデバイスが広く使われているが、905 nm 帯システムで検出距離を延ばすには、レーザ安全規格⁽¹⁾で定めるクラス 1 を超える光出力が必要となる。一方、1300 nm 以上の波長域では、レーザ安全規格が緩和されるため、クラス 1 の範囲内でより高い光出力が可能である⁽²⁾。そこで、1550 nm 帯システムでは高光品質・高光出力のファイバレーザを光源に用いた高光出力のシステムが実用化されているが、受光素子は雑音の大きい材料である InP や InAlAs を増倍層^{*2}に用いるアバランシェ光検出器 (APD^{*3}) が一般的で、長距離検出の律速となっている。これに対し、アンチモン (Sb) 系材料はこれら材料よりも雑音が小さいことが報告されており^{(3)~(9)}、実用化が期待される。

そこで我々は、Sb 系の複合材料の AlGaAsSb を増倍層に適用した APD (Sb-APD) を開発している^{(10)、(11)}。本報告では、ToF-LiDAR への応用を想定し、905 nm 帯システ

ムで用いられている増倍層にシリコン (Si) を用いた APD (Si-APD) との信号対雑音比 (SNR) の比較、および 905 nm 帯システムに対する 1550 nm 帯システムの利点として太陽光干渉に対する耐性を、疑似太陽光源を用いて SNR への影響の観点から評価した結果を報告する。

2. デバイス特性

2-1 電流-電圧、増倍率-電圧特性

一般的な APD は、吸収層と増倍層を分離した構造により、吸収層に印可する電界を抑制することで暗電流を低減している。今回、吸収層に InGaAs、増倍層には InP と格子整合する $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{As}_{0.56}\text{Sb}_{0.44}$ の層構成として、分子線エピタキシー法^{*4}により半絶縁性 InP 基板上に積層した後、一般的な加工プロセスにより受光径が 200 μm の APD を作製した⁽¹²⁾。図 1 は、印可電圧に対する光電流および暗電流 (主軸) と増倍率^{*5} (第 2 軸) の特性を示す。光電流の立ち上がり電圧は約 31 V で、降伏電圧^{*6}は約 56 V である。降伏電圧近傍まで暗電流は 30 nA 以下で、増倍率は 100 を大きく上回る結果が得られた。図 2 に、増倍率の温度依存性を示す。増倍率 100 における降伏電圧の温度係数は 16 mV/°C である。これは、増倍層に InAlAs、InP、Si を使用した APD

で報告される温度係数の約50、100、1000 mV/℃と比較して、動作電圧の温度変動が小さいことを示している。

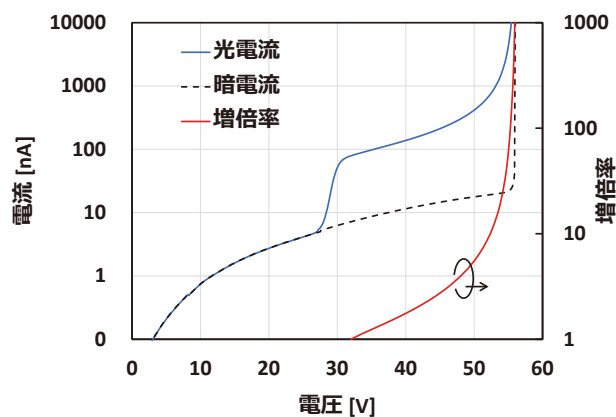


図1 電流-電圧、増倍率-電圧特性

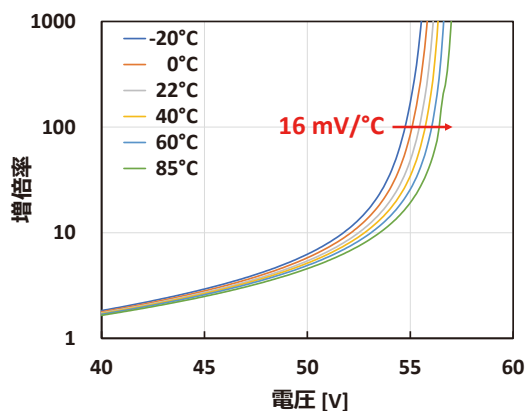


図2 増倍率-電圧の温度依存性

2-2 イオン化率評価

APDは雪崩的に励起された電子を増幅するが、増幅は一樣ではなく統計的な揺らぎにより過剰雑音が発生させる。この過剰雑音係数 F は、増倍率 M を用いた(1)式で表される。ここで k は電子(α)と正孔(β)のイオン化率比($k = \beta/\alpha$)であり、増倍層の材料によって決まる。また、 $F(M)$ とSNRの関係は(2)式で表すことができる。

$$F(M) = M \left[1 - (1 - k) \left(\frac{M-1}{M} \right)^2 \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$SNR = \frac{I_p^2 M^2}{2q(I_p + I_d) M^2 F(M) B_w + N_{circuit}^2} \quad \dots\dots\dots (2)$$

I_p は光電流、 I_d は暗電流、 B_w は雑音帯域幅、 $N_{circuit}$ は増幅器起因のノイズである。増倍率が大きいと増幅器起因の

ノイズの影響が相対的に小さくなり、過剰雑音係数が支配的となる。したがって、 k が小さい材料ほどSNRは有利である。図3には、増倍率に対する過剰雑音係数の実験結果と、(1)式に基づく最小二乗法のフィッティング結果を破線で示す。ここから、Sb-APDの k は約0.02となり、点線で示す典型的な長波長材料のInAlAs ($k: \sim 0.2$)と比較して、1桁小さい結果が得られた。これはSiと同等で、Sb系材料が低雑音材料であることを示している。

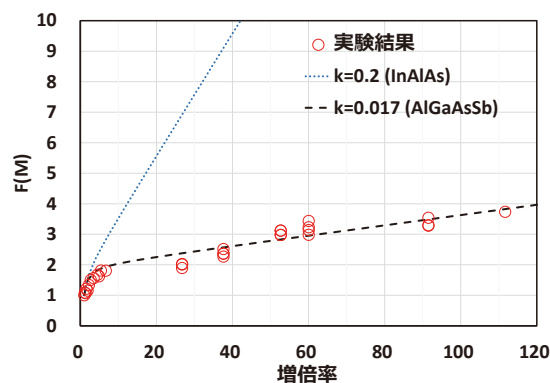


図3 過剰雑音係数の増倍率依存

3. 信号対雑音比 (SNR)

3-1 評価方法

図4に、SNR評価のための実験系の概略図を示す。Si-APDでは波長905 nm、Sb-APDでは波長1550 nmの半導体レーザを光源に使用した。出射パルスビーム(光出力強度 P_t)は、反射率(ρ)10%の反射板で反射され、反射光は各APDに取り付けた直径1インチのレンズ(D_R)により、APD受光面に集光(光入力強度 P_s)される。また、不要な光の入射を排除するために、900 nm $\pm$ 25 nmおよび1550 nm $\pm$ 25 nmのバンドパスフィルタを各APDに装着した。APDからの出力電流は、トランスインピーダンスアンプ(利得10 k Ω)および後段アンプで増幅し、オシロスコープ(利得5倍)で測定される。

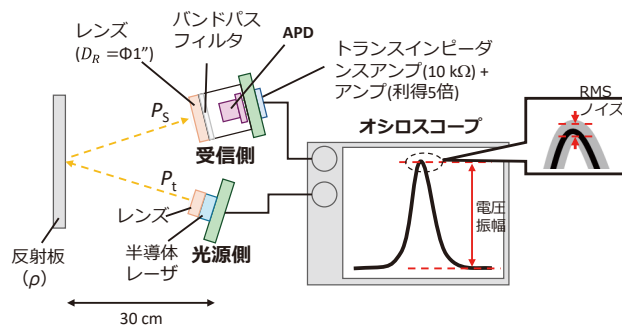


図4 SNR評価系

コープで出力電圧を観測した。評価にあたっては、実際の距離 (R) を伝搬させるのではなく、(3) 式に示す伝搬損失を理論計算⁽¹³⁾により算出し、APD への入力光パルス強度を調整することで実施した。SNR は、(4) 式に示すピーク電圧の RMS 雑音に対する出力振幅の割合で算出した。

$$P_s = \frac{\rho D_R^2 \exp(-2\sigma R)}{4R^2} P_t \quad \text{..... (3)}$$

$$SNR = \frac{\text{出力振幅}}{\text{ピーク出力の RMS ノイズ}} \quad \text{..... (4)}$$

3-2 評価結果

Si-APD と Sb-APD のそれぞれで、APD への光入力強度を 25 nW、39 nW、70 nW に設定した。これは、波長 905 nm 帯でパルス幅 7 ns 程度の光源を想定した場合、レーザ安全規格クラス 1 での最大許容光出力強度は 28 W であり、この光出力強度を (3) 式で換算すると、135 m、105 m、80 m 伝搬した後の光入力強度に相当する。同様に、1550 nm 帯では、クラス 1 規格内の 100 W の光出力強度に対して、250 m、200 m、150 m の伝搬距離に相当する。評価では、増倍率 100 において 99.9% の検出確率に必要な SNR の 17.8 dB 以上を判定基準とした。増倍率に対する SNR の理論計算と実測評価結果を図 5、6 に示す。Sb-APD の方が Si-APD より受光感度が高いため SNR の絶対値は大きく、増倍率 100 で Si-APD よりも約 3 dB の優位性が得られ、さらに、検出距離 200 m においても SNR は

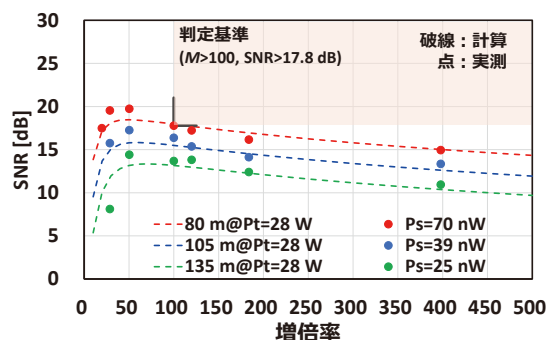


図5 Si-APD の SNR の増倍率依存

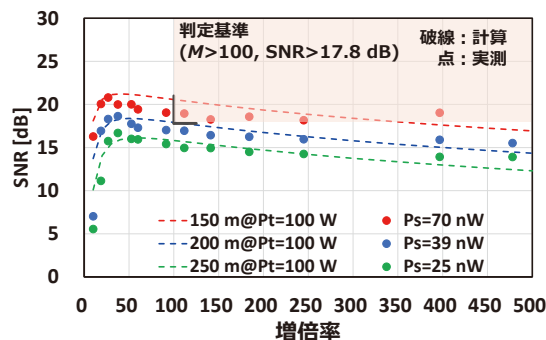


図6 Sb-APD の SNR の増倍率依存

17.8 dB を超えた。特に、ショットノイズ^{*7}が支配的となる高増倍率領域では、過剰雑音係数の大きい既存の InP や InAlAs を増倍層に有する APD では SNR が急激に劣化するが、Sb-APD は Si-APD と同等以上の特性を示す結果が得られた。

4. 太陽光干渉耐性

4-1 評価方法

太陽光は幅広い波長スペクトルを持ち、雑音として SNR を低下させる。地表に到達する放射強度は大気で減衰し、波長 905 nm では 0.76 W/m²/nm、波長 1550 nm では 0.26 W/m²/nm と差がある⁽¹⁴⁾。したがって、905 nm 帯システムと比べ 1550 nm 帯システムの方が、太陽光による SNR 低下は小さいと予想される。そこで我々は、疑似太陽光源を用いて、太陽光干渉が SNR に与える影響を評価する実験を行った。図 7 に測定系の概略図を示す。図 4 の SNR 評価系に疑似太陽光源（朝日分光機製 HAL-320W）を追加した構成で、APD へ垂直に照射する最悪条件を想定し評価した。

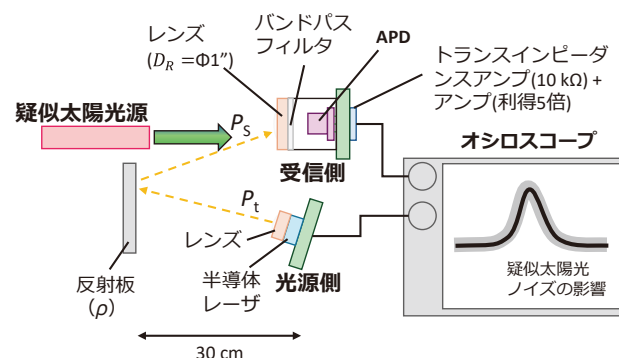


図7 太陽光耐性評価系

4-2 評価結果

図 8 は、真夏の直射日光条件を模擬した 1-SUN (1000 W/m²) 下での、Sb-APD および Si-APD の SNR の検出距離依存性の評価結果を示す。光出力強度はレーザ安全規格クラス 1 の最大出力とし、各 APD の増倍率は約 100 とした。SNR が 17.8 dB 以上となる検出可能距離は、Si-APD で 28 m に対し Sb-APD では 72 m であり、約 2.5 倍に延長できる結果が得られた。

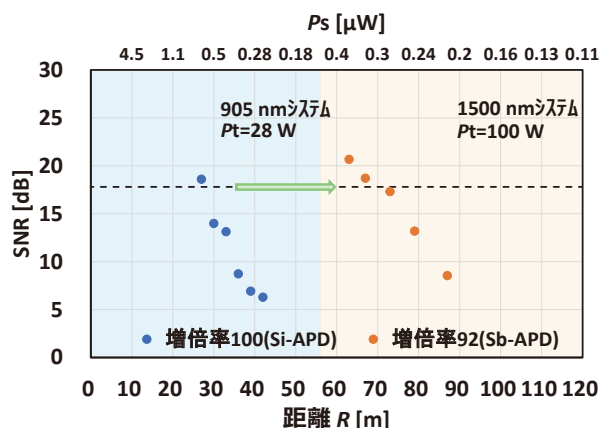


図8 Si-APDとSb-APDの1-SUN照射条件下におけるSNRの距離依存

5. 結 言

増倍層にAlGaAsSb、吸収層にInGaAsを用いた低雑音のSb-APDを開発し、ToF-LiDAR用センサとして1550 nm帯システムの性能を評価した。Si-APDを用いた905 nm帯システムと比較すると、増倍率100でのSNRは約3 dB高く、さらに光出力強度100 Wの光源と組み合わせることで、検出距離200 mにおいて17.8 dB以上のSNRが得られることを確認した。また、放射強度1-SUNの直接照射条件下におけるSNRの耐性評価を実施し、905 nm帯システムに対して約2.5倍の検出距離が得られることを確認した。以上から、1550 nm帯ToF-LiDARシステムにおいて、高出力光源と本Sb-APDの組み合わせることで、目への安全性を確保しつつ長距離検出を実現し、かつ屋外用途へのさらなる拡大が期待できる。

用語集

※1 ToF-LiDAR

Time-of-Flight Light Detection and Ranging: レーザパルス光を対象物に向けて照射し、反射して戻ってくるまでの時間から測距する方法。

※2 増倍層

APDの構成で、光から変換された電子を雪崩的に増幅させる層。

※3 APD

Avalanche Photodiode: 光を電気に変える光センサの一種で、内部で信号を増幅する機能を持つ素子。

※4 分子線エピタキシー法

超高真空中において原子レベルで基板上に1層ずつ積層する技術で、高品質膜を作製する結晶成長技術の一つ。

※5 増倍率

APDにより増幅される光電流の割合。

※6 降伏電圧

APDの雪崩現象を持続的に発生できる限界の電圧。

※7 ショットノイズ

光から変換された電子の統計的ゆらぎによる雑音。

参 考 文 献

- (1) IEC 60825-1; Safety of Laser Products — Part 1: Equipment Classification and Requirements. IEC: Geneva, Switzerland (2014)
- (2) Z. Dai, A. Wolf, P.-P. Ley, T. Glück, M. C. Sundermeier, and R. Lachmayer, "Requirements for Automotive LiDAR Systems," *Sensors*, vol. 22, no. 19, p. 7532 (Oct. 2022)
- (3) J. Taylor-Mew, V. Shulyak, B. White, C. H. Tan, and J. S. Ng, "Low excess noise of Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.56}Sb_{0.44} avalanche photodiode from pure electron injection," *IEEE Photonics Technol. Lett.* 33 (20) , 1155-1158 (2021)
- (4) B. Guo, X. Jin, S. Lee, S. Z. Ahmed, A. H. Jones, X. Xue, B. Liang, H. I. J. Lewis, S. H. Kodati, D. Chen, T. J. Ronningen, C. H. Grein, A. W. Ghosh, S. Krishna, J. P. R. David, and J. C. Campbell, "Impact Ionization Coefficients of Digital Alloy and Random Alloy Al_{0.85}Ga_{0.15}As_{0.56}Sb_{0.44} in a Wide Electric Field Range," *J. Light. Technol.* 40(14), 4758-4764 (2022)
- (5) B. Sheridan, X. Collins, J. Taylor-Mew, B. White, J. S. Ng, and C. H. Tan, "An Extremely Low Noise-Equivalent Power Photoreceiver Using High-Gain InGaAs/AlGaAsSb-APDs," *J. Light. Technol.*, vol. 43, no. 2, pp. 741-746 (Jan. 2025)
- (6) Y. Cao, T. Osman, E. Clarke, P. K. Patil, J. S. Ng, and C. H. Tan, "A GaAsSb/AlGaAsSb Avalanche Photodiode With a Very Small Temperature Coefficient of Breakdown Voltage," *J. Lightwave Technol.*, 40(14), 4709-4713 (2022)
- (7) X. Collins, B. Sheridan, D. Price, Y. Cao, T. Blain, J. S. Ng, C. H. Tan, and B. White, "Low-noise AlGaAsSb avalanche photodiodes for 1550 nm light detection," *Proc. SPIE 12417, Optical Components and Materials XX*, 124170K (2023)
- (8) C. H. Tan, T. Blain, J. Taylor-Mew, Y. Cao, B. White, X. Collins, J. S. Ng, and J. P. David "Low photon detection using low-noise InAs and AlGaAsSb avalanche photodiodes," *Proc. SPIE 13046, Infrared Technology and Applications L*, 130460K (2024)
- (9) W. Xiang, S. Zhang, C. Chen, J. Wu, Y. Ding and K. Wang, "AlGaAsSb-APDs for 1550nm Lidar with High Sensitivity and Reliability," *ECOC2024*, Th1G.1
- (10) M. Kurokawa, K. Natsume, T. Misawa, S. Ito, and K. Uesaka, "A long-range LiDAR system resilient to sunlight interference using low-noise InGaAs-APD," *ECOC2025*, Tu.03.08.2
- (11) M. Kurokawa, K. Natsume, T. Misawa, S. Ito, and K. Uesaka, "Enhanced long-range detection and superior sunlight interference resilience in a 1300-nm band LiDAR system utilizing low-noise InGaAs-APD with AlGaAsSb multiplication layer," *Proc. SPIE 13842, Optical Fibers and Sensors for Medical Diagnostics, Treatment, and Environmental Applications XXVI*, 1384213 (2026)
- (12) M. Hirano, T. Okada, M. Kurokawa, M. Sato, R. Sugahara, K. Natsume, "AlGaAsSb-APD for 1550 nm LiDAR Maintaining Sufficient SNR in High-Gain Operation," *2025 IEEE SENSORS*
- (13) H. N. Burns, C. G. Christodoulou, Glenn D. Boreman, "System design of a pulsed laser rangefinder," *Opt. Eng.*, vol. 30, no. 3, p. 323 (1991)
- (14) <https://nsrdb.nrel.gov/>

執 筆 者

黒川 宗高*：伝送デバイス研究所 主席



佐藤 将来：伝送デバイス研究所 主査



平野 充遥：伝送デバイス研究所 主査



三澤 太一：伝送デバイス研究所 主査



伊藤 真也：情報ネットワーク研究所 主席



夏目 和俊：伝送デバイス研究所 主席



*主執筆者