



# 導波路 APD 搭載 25Gbps 光受信器

25Gbps Optical Receiver with Waveguide Avalanche Photodiode

朝羽 貴士  
Takashi Asaba

金丸 聖  
Satoru Kanemaru

武井 竜太郎  
Ryutaro Takei

神杉 秀昭  
Hideaki Kamisugi

高機能モバイル端末の普及や、提供されるサービスの多様化に伴う通信トラフィックの増加に対応するため、5G への移行が進みつつある。5G のモバイルフロントホールには 25Gbps の光トランシーバが用いられており、伝送容量拡大のため、波長分割多重方式が広く用いられている。当社は、これまでに開発した CAN 型光受信デバイスと、C-Band 用端面入射型導波路アバランシェフォトダイオード (Avalanche Photodiode : APD) を組み合わせて、25Gbps DWDM トランシーバ (SFP28) に搭載可能な光受信デバイスの開発を行ったので、その結果を報告する。

Mobile networks are shifting to the fifth-generation mobile communication system (5G) to address the needs for increasing data traffic associated with the spread of high-performance mobile terminals and the diversification of services provided. 25 Gbps optical transceivers are used in 5G mobile fronthaul, and wavelength division multiplexing is widely used to expand transmission capacity. We have developed a new optical receiver module that can be integrated into a 25 Gbps dense wavelength division multiplexing (DWDM) transceiver by combining our CAN-type optical receiver module and edge-illuminated waveguide avalanche photodiode (APD) chip for C-Band. This paper presents the design and performance of the new optical receiver.

キーワード：25Gbps、高感度、広帯域、導波路 APD

## 1. 緒 言

スマートフォン、タブレット等の高機能モバイル端末の普及により、高品質のインターネットコンテンツが利用できるようになっている。また、様々な分野への IoT<sup>\*1</sup> の拡大、提供されるサービスの多様化、高度化も進んでおり、通信トラフィックは急激に増加している。近年、4G から 5G への移行も進みつつあり、更なる通信速度の向上、大容量化の需要が高まっている。

伝送ネットワークのアンテナと基地局の間 (モバイルフロントホール) は光ファイバで接続され、5G への移行に伴い、25Gbps の光通信が導入されており、キーコンポーネントの一つである光トランシーバは、SFP28<sup>\*2</sup> 等の小型の製品が広く用いられている。また、伝送容量拡大のため、1本の光ファイバに複数の波長の光信号を同時に伝送する波長分割多重方式 (Wavelength Division Multiplexing : WDM) が多く利用されている。

当社では、これまでに SFP28 に搭載可能な CAN 型光受信デバイス<sup>(1)</sup>、C-Band<sup>\*3</sup> 用端面入射型導波路 APD<sup>(2),(3)</sup> の開発を行ってきた。これらの技術を組み合わせて、25Gbps DWDM<sup>\*4</sup> SFP28 用光受信デバイスの開発を行ったので、その結果を報告する。

## 2. 開発目標仕様

写真1に SFP28 の外形を示す。幅は 13.8mm であり、ここに光送信・受信デバイスが並べて搭載されるため、今回開発した光受信デバイスは、その半分以下の幅となる 6mm

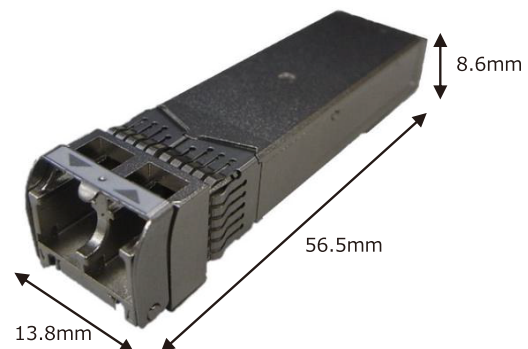


写真1 SFP28外形

以下を目標とした。

表1に光受信デバイスの目標仕様を示す。IEEE<sup>\*5</sup>標準や MSA<sup>\*6</sup>をベースに、市場要求を加味した上で、当社が独自

表1 目標仕様

項目	仕様	単位
動作温度	-40~85	℃
伝送速度	25.78125	Gbps
変調方式	NRZ	-
伝送距離	2m~10km	-
波長	1528~1567	nm
最小受信感度 <sup>†</sup>	<-19	dBm

† 符号誤り率 =  $5 \times 10^{-5}$  での平均光入力パワー

に設定したものを目標仕様とした。

また、モバイルフロントホール部分は通常屋外に設置されるため、I-Temp (Industrial Temperature) と呼ばれる -40~85°C の温度範囲で動作することが必要となる。

### 3. APD 構造

光通信で使用される受光素子は、その形状から図1に示すように面入射型 (surface-illuminated) と端面入射型 (edge-illuminated) の2種類に大別される。

面入射型は、大口径の受光部を形成することで高い受光感度を容易に得られる反面、PDの接合容量が増加するため、帯域特性とのトレードオフが生じる。端面入射型は、光の入射方向と光電流が流れる方向が異なるため、吸収層の長さや厚さを電気的、光学的な観点から独立して設計することができる、つまり、受光感度と帯域を独立して設計できるという大きな長所がある。

その反面、端面入射型はその構造上、必然的に受光部の面積が小さくなるため、光の結合を取りづらいという欠点がある。当社では、端面入射型APDの光入射部にスポットサイズコンバータ (Spot Size Converter : SSC)<sup>\*7</sup>機能を持つ光導波路を集積し、入射面のモードフィールド径 (Mode Field Diameter : MFD) を拡大、光結合トランスを改善し、広帯域、高感度化の両立を実現している。

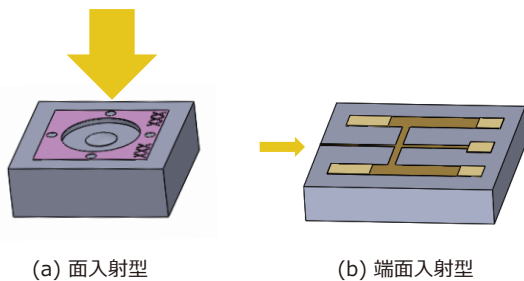


図1 受光素子の形状

図2に当社が開発したAPDチップの外観、図3に断面構造の模式図を示す。

本APDは、入射した光信号をAPD吸収層に伝搬する光導波路と、光-電気変換を行うAPDチップで構成され、InP系モノリシック集積要素技術<sup>(4)</sup>を用いて同一チップ上に集積している。これらをバットジョイント (Butt-joint) 成長技術を用いて、導波路とAPDの吸収層を直接結合させることにより、高い受光感度を実現している。

pn接合領域の小型化による容量低減、吸収層の薄膜化によるキャリア走行時間短縮により広帯域化を実現し、且つAPDの増倍に必要な電圧を低く設定することができるため、低消費電力化に有利である。

また、端面入射型は吸収層長を十分に確保することができ、層内に電界が集中しにくい構造になっているため、高い過入力耐圧を有している。

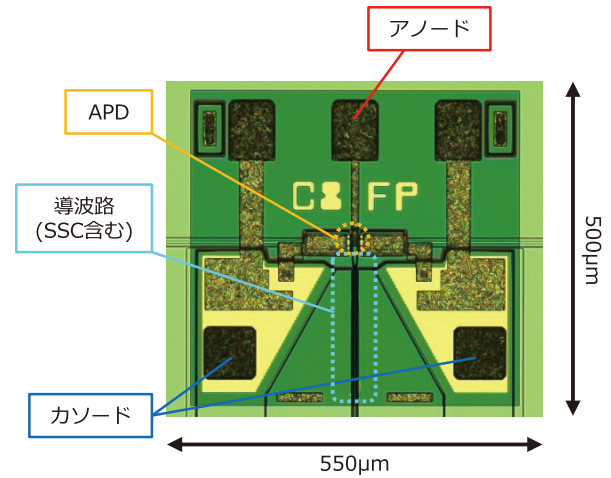


図2 APDチップ外観

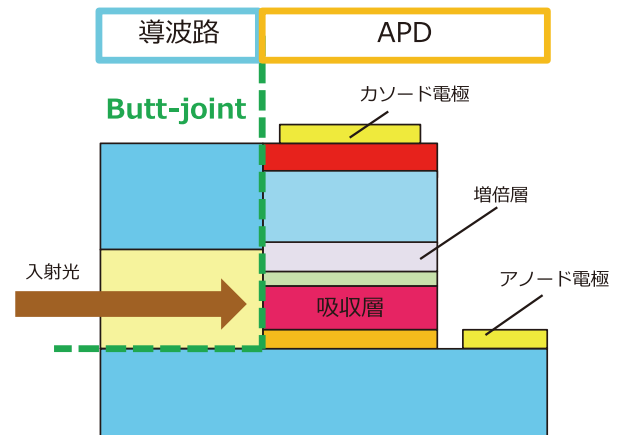


図3 APD断面構造模式図

### 4. デバイス構造

写真2にデバイスの外観を示す。パッケージサイズはφ5.6mm、全長14.8mmで、小型光トランシーバSFP28に搭載可能なサイズを実現している。

図4にデバイスの構造を示す。パッケージ内には、APD、トランスインピーダンスアンプ (Transimpedance Amplifier : TIA) 等のチップ部品、レンズが搭載され、シングルモードファイバ (SMF) スタブを内蔵したLCレセプタクル、トランシーバとの電気的な接続を行うフレキシブル基板 (Flexible printed circuits : FPC) から構成される。

レセプタクルから入射した光信号は、キャップに一体成型された1<sup>st</sup>レンズで平行光に変換され、APDチップ直近に

配置された2<sup>nd</sup>レンズを介してAPDチップに集光される。APDで光-電気変換された信号はTIAで増幅され、パッケージ、FPCの高周波線路を經由して光トランシーバに伝達される。

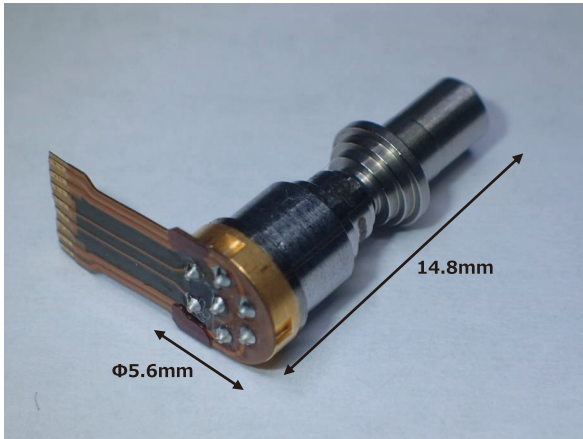


写真2 デバイス外観

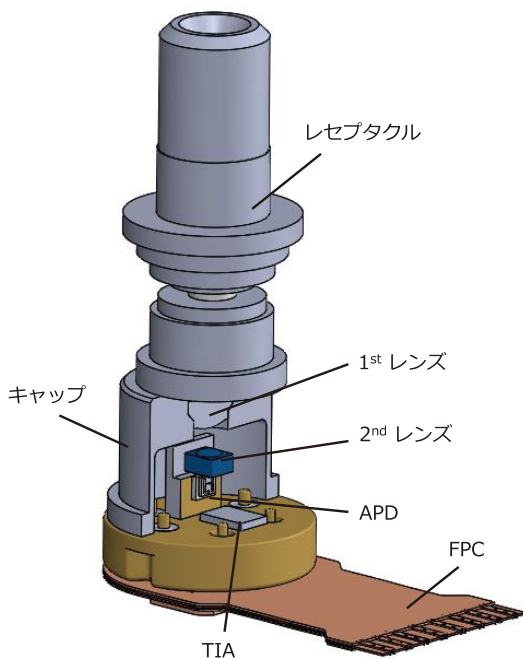


図4 デバイス構造

本デバイスでは、レンズの固定ズレによる結合効率の低下を抑制するため、1<sup>st</sup>レンズ、2<sup>nd</sup>レンズから成る2レンズ結合系を採用している。図5に1<sup>st</sup>レンズのトレランスの計算結果を示す。ピーク結合で約98%と非常に高い結合効率を得られており、40 $\mu$ m オフセットしても約90%の高い結合効率を得られている。この効果により、レンズの固定ズレ

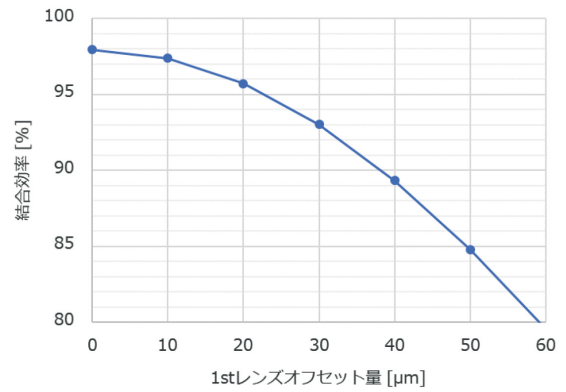


図5 1<sup>st</sup>レンズトレランス計算結果

レによる結合効率の低下を抑制し、更に環境温度の変化に対する変動にも効果が得られる。

## 5. デバイス特性

### 5-1 暗電流、光電流

図6にデバイス温度25 $^{\circ}$ C、光入力パワー10 $\mu$ W、光源波長1.55 $\mu$ mにおける暗電流、光電流特性を示す。ブレイクダウン電圧は約22Vで、ブレイクダウン電圧の90%に相当する印加電圧（約19V）では、2nA以下の低暗電流を実現している。また、増倍率1に相当する印加電圧（約9V）で、0.8A/Wの受光感度を得られている。

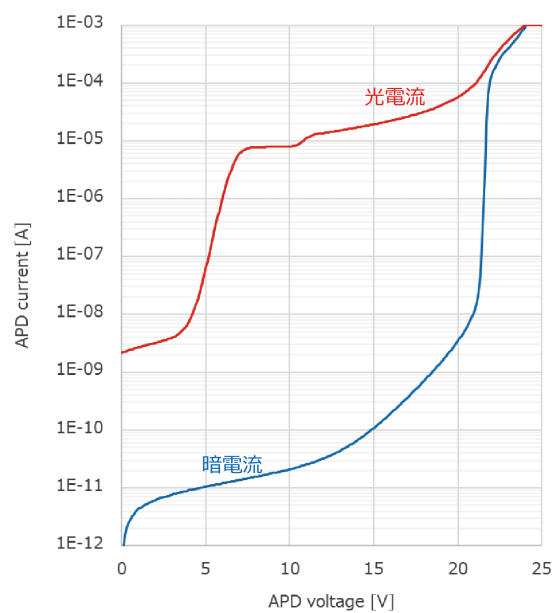


図6 暗電流、光電流特性

### 5-2 周波数特性

図7にデバイス温度25°C、光入力パワー10μW、増倍率5における光電気変換利得の周波数特性を示す。3dB帯域幅 (Bandwidth : BW) は約14GHzであり、25GbpsのNRZ変調信号を十分に受信することが可能である。

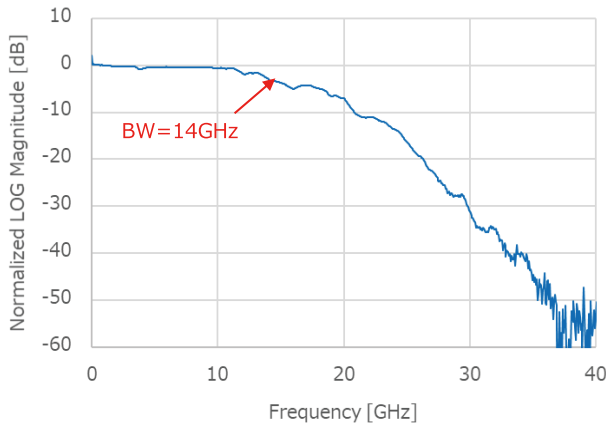


図7 光電気変換利得周波数特性

### 5-3 光受信特性

図8にデバイス温度25°C、伝送速度25.78125Gbps、PRBS31<sup>\*8</sup>のNRZ信号入力での0km、10km伝送後の符号誤り率 (Bit Error Rate : BER) を示す。光源は、当社で

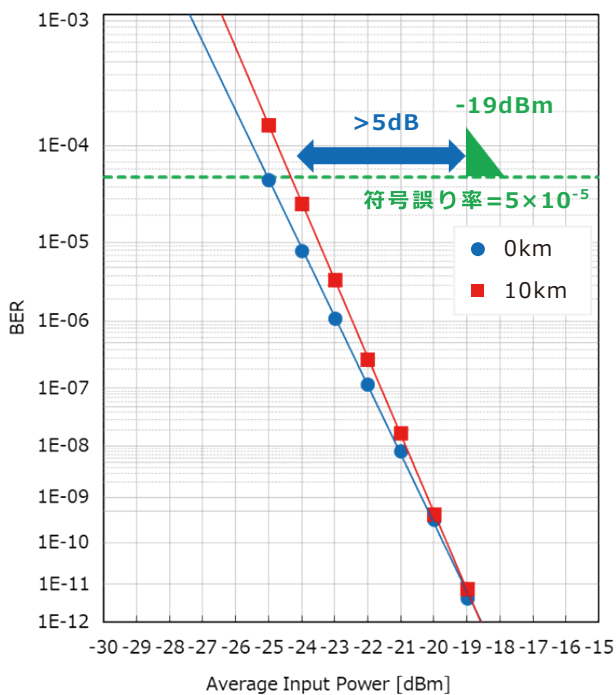


図8 符号誤り率

開発した電界吸収型変調器集積レーザダイオードを搭載した25Gbps光送信デバイス<sup>(5)</sup>を使用した。符号誤り率=5×10<sup>-5</sup>となる最小受信感度は、0km、10km伝送後ともに-24dBm以下であり、目標仕様-19dBmに対し5dB以上のマージンを有しており、10km伝送後の受信感度劣化 (伝送ペナルティ) は0.7dBと良好な結果が得られている。

### 5-4 受信感度温度特性

図9にデバイス温度-40~85°Cにおける最小受信感度の温度特性を示す。0km、10km伝送後ともに-23dBm以下であり、温度変動を加味しても、目標仕様-19dBmに対して4dB以上のマージンが確保できている。

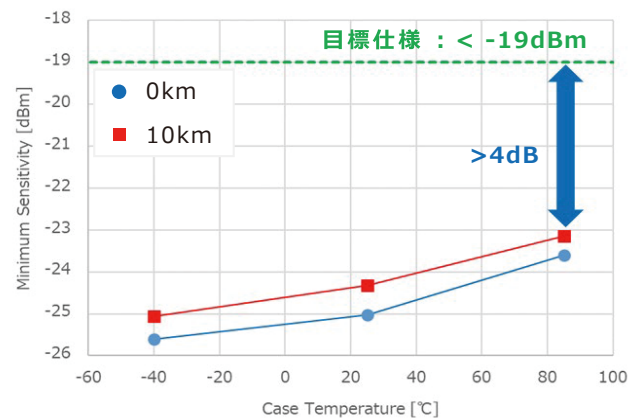


図9 最小受信感度温度特性

## 6. 結 言

SFP28に搭載可能な25Gbps DWDM用光受信デバイスを開発した。当社で開発した端面入射型導波路APDチップを搭載することで、広帯域、高感度化の両立を実現した。伝送速度25.78125GbpsのNRZ信号での10km伝送後の最小受信感度は-24dBm以下であり、デバイス温度が-40~85°Cの環境下でも-23dBm以下と良好な結果が得られた。

## 用語集

## ※1 IoT

Internet of Things : 様々な「モノ (物)」がインターネットに接続され、情報交換することにより相互に制御する仕組み。

## ※2 SFP28

Small Form-factor Pluggable : 25GbE に準拠した小型光トランシーバの業界標準の一つ。伝送速度は25Gbps。

## ※3 C-band

Conventional-band : 光通信で使用される波長帯域の一つ。波長は1530~1565nm。

## ※4 DWDM

Dense Wavelength Division Multiplexing : 波長分割多重方式の一つ。1.5 $\mu$ m 帯の波長 (C-Band) が用いられ、波長間隔は約0.4nm。

## ※5 IEEE

Institute of Electrical and Electronics Engineers : アメリカ電気電子学会の略称で、電気、電子技術分野における規格の標準化を行っている。

## ※6 MSA

Multi-source Agreement : ベンダ間の相互互換性を目的とする部品仕様の共通規格。

## ※7 スポットサイズコンバータ

入出力光のビーム形状を変換する機能を持つ導波路構造。

## ※8 PRBS31

Pseudo-Random Bit Sequence : 疑似ランダムビット列。PRBS31は231-1の周期を持つランダム信号系列。

## 参考文献

- (1) 田中成斗、「50G-EPON 曲側装置用受信器」、SEIテクニカルレビュー第197号 (2020年7月)
- (2) Y. Yoneda et al., "InP-Based waveguide photodetectors for IMDD/coherent transmission applications," IEICE Technical Report, No.LQE2020-5 (2020)
- (3) 海老原幸司、「次世代データセンター向け100GBaud 導波路型受光素子」、住友電工テクニカルレビュー第200号 (2022年1月)
- (4) 井上尚子、「100Gbit/s 小型コヒーレントレシーバ向け InP 系90° ハイブリッド集積型受光素子」、SEIテクニカルレビュー第185号 (2014年7月)
- (5) 藤田尚士、「光トランシーバ向け25Gbit/s 光送信モジュール」、SEIテクニカルレビュー第186号 (2015年1月)

## 執筆者

朝羽 貴士\* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



金丸 聖 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 主席



武井竜太郎 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 課長



神杉 秀昭 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 部長



\*主執筆者