

次世代データセンター向け 100GBaud 導波路型受光素子

100G Baud Waveguide Photodetectors for Next-Generation Data Centers

海老原 幸司*

Koji Ebihara

沖本 拓也

Takuya Okimoto

山崎 功一郎

Kouichiro Yamazaki

岡本 悟

Satoru Okamoto

芦澤 建

Ken Ashizawa

米田 昌博

Yoshihiro Yoneda

次世代 (800Gbit/s) データセンターネットワークを構成する強度変調-直接検波用受信器では、変調速度が50GBaudから100GBaud級への超高速化の期待が高まっている。本報告では、偏波無依存型スポットサイズ変換器を一体集積したInP系導波路型受光素子による広帯域・高感度化の成果について報告するとともに、APDへの応用についても述べる。

Optical receivers with intensity-modulation direct detection strongly require ultra-high-speed and high-responsivity performance upto 100 GBaudclass toward the next-generation 800 Gbit/s data center networks. This paper demonstrates wide-bandwidth and high-responsivity performance of the InP-based waveguide photodetector integrated with the spot size converter having no polarization dependence. In addition, we also introduce the waveguide avalanche photodiodes.

キーワード：強度変調-直接検波用受信器、導波路型受光素子、偏波無依存型スポットサイズ変換器、100GBaud、データセンター

1. 緒 言

5Gモバイル通信網の拡大や動画配信・クラウドサービスの市場成長により、通信トラフィックは年々増大し続けている。これらを背景にデータセンター (DC) ネットワークを構成する光伝送装置のインターフェースやスイッチ/ルーターにおいては、400Gbit/s光トランシーバによる12.8Tbit/s級DC内通信の導入が本格化している。一方で、早くも更なるデータ伝送の高速大容量化のニーズが高まっており、25.6Tbit/sもしくは51.2Tbit/s級DC内通信を目指す「800G Pluggable MSA^{*1}」が結成され、800Gbit/s光トランシーバ (800G Pluggable Transceiver) が検討されている。

写真1に800G Pluggable Transceiver 外観例としてQSFP-DD^{*2}形態を示す。200Gbit/s×4チャンネル構成のFR4規格^{*3}用受信器では、変調速度112GBaud^{*4}のPAM4^{*5}信号受信において最小受信感度-6.8dBmが求めら

れており、搭載される受光素子の特性には、60GHz以上の3dB帯域幅と0.6A/W以上の受光感度が必要とされ、広帯域・高感度の両立が要求されている。

一般に受光素子の構造には、光吸収層への入射方向から面入射型と側面入射型の2種類の構造がある。面入射型は、大きな円形の受光部を形成することで吸収層への高い光結合効率が容易に得られる反面、フォトダイオード (PD) の接合容量が増加する。このことから3dB帯域幅と受光感度特性の間にはトレードオフの関係が生じる。一方で側面入射型は、膜厚方向からの光入射のため、吸収層との高い光結合効率を得ることが難しい反面、光入射の方向と発生キャリアの走行方向を直交させることができるため3dB帯域幅と受光感度を独立に設計することが可能となる。当社では、広帯域・高感度の両立を目指した側面入射型の受光素子として、これまでにコヒーレント通信^{*6}用受信器向けにバットジョイント構造を有する導波路型pin-PD^{(1),(2)}を実用化している。

図1にバットジョイント導波路型pin-PDの構造断面図を示す。InP系モノリシック集積要素技術⁽³⁾を用いて側面入射部に光導波路を集積しており、導波路コア層とPD吸収層を直接接合することにより、吸収層との高い光結合効率を実現し、広周波数応答帯域と高受光感度の両立を可能としている。今回、このバットジョイント導波路型pin-PD技術を次世代DC向け受光素子にも展開し、800Gbit/s光トランシーバに搭載可能な広周波数応答帯域・高受光感度特性を有する100GBaud導波路型受光素子を実現したので、これを解説する。また光電流の増幅機能を有するアバランシェフォトダイオード (APD) への応用についても述べる。



写真1 800G Pluggable Transceiver 外観例
(QSFP-DD 58.26×18.35×8.5mm)

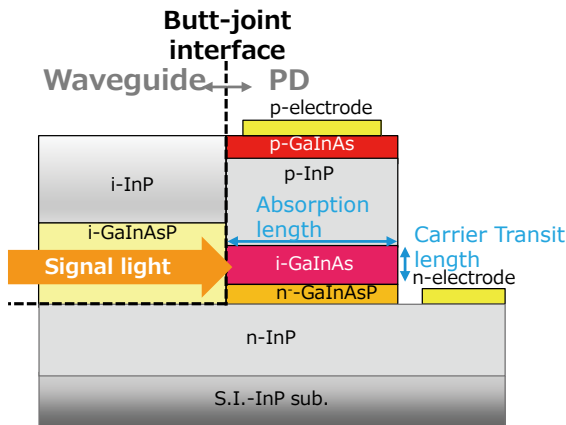


図1 バットジョイント導波路型 pin-PD 構造断面図

2. 偏波無依存型スポットサイズ変換器の集積

光搬送波の振幅や位相変調を利用するコヒーレント検波方式では、PD だけでは変調信号を直接検波できないので、局部発振光と信号光との干渉により PD が直接検波可能な強度信号に変換・分離する“90°ハイブリッド”と呼ばれる光機能導波路を導波路型 pin-PD の前段に配置する必要がある。このため信号光の偏波方向が保持され、入射導波路は、光の偏波方向⁷が一定であることを前提とした設計となっている。一方で、DC ネットワークに広く用いられる強度変調-直接検波 (IM-DD) 方式⁽⁴⁾では、信号光の偏波方向の保持は行われない。このため PD に入射される信号光の偏波方向は一定とならずに変動している。図2に面入射型と側面入射型の光吸収層への入射形態と偏波方向の関係を示す。(a)の面入射型では、平面での受光であるため、偏波方向の変動により受光感度特性の変動は発生しない。一方で広帯域・高感度の両立に有利な (b)の側面入射型で

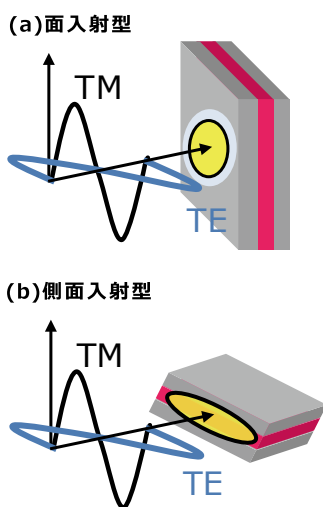


図2 面入射型 (a) と側面入射 (b) の光吸収層への入射形態と偏波方向の関係

は、縦横に非対称な積層構造側面からの受光であるため、偏波方向が変動すると等価屈折率が変化し、受光感度変動する。そこで当社では、IM-DD方式を用いる次世代DC向け導波路型受光素子の入力導波路に対し、偏波方向の変動による受光感度特性の変動を抑えるべく偏波無依存型スポットサイズ変換器 (SSC)^{*8}の集積をおこなっている。

図3に3次元ビーム伝搬法によるSSC導波路の伝搬シミュレーション結果に示す。光学系の実装の容易さからSSC導波路の入射面 (入口側) の光のモードフィールド径は3μmとしている。入射面のモードフィールドは、円形として対称性を高くしており、一方でPD構造側面に出射される出口側のモードフィールドは、PD吸収層の膜厚形状に合わせた形としている。SSC導波路の透過率は90%以上とし、偏波依存性 (TE/TM比) は1%以下に抑えている。

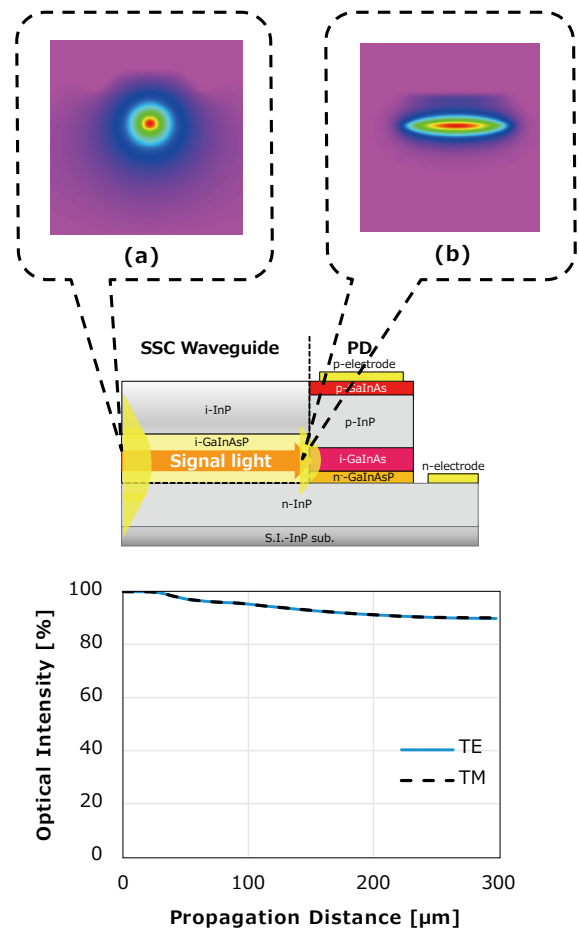


図3 SSC導波路の (a) 入口側および (b) 出口側での光のモードフィールド形状と伝搬方向の光強度 (入口強度で規格化)

3. 偏波無依存型スポットサイズ変換器を集積した導波路型受光素子の特性

バットジョイント再成長技術を用いて偏波無依存SSCを集積した導波路型受光素子を写真2に示す。受光素子のサ

サイズは500 μm ×550 μm としており、従来の受光素子と同程度のサイズとしている。電極パッドの配列・形状については後段のTIA (Transimpedance Amplifier)^{*9}-ICとの接続性を考慮しており、フリップチップ実装^{*10}にも対応できるように電極パッドをピラー構造としている。

図4に作製した導波路型受光素子の受光感度の偏波依存性を示す。偏波による受光感度の変動は1%以下に抑えられており、受光感度は0.77 A/W以上が得られている。また、図5に導波路型受光素子の周波数特性を示す。pin-PD接合容量の低減、発生キャリアの走行時間短縮により、60GHz以上の3dB帯域が得られている。次世代DC向け100GBaud 受信器に求められる広周波数応答帯域・高受光感度特性を実現できていることを確認した。

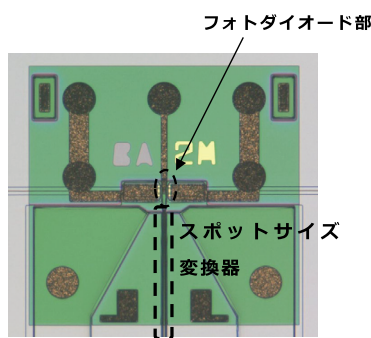


写真2 100GBaud 導波路型受光素子 (500 μm ×550 μm)

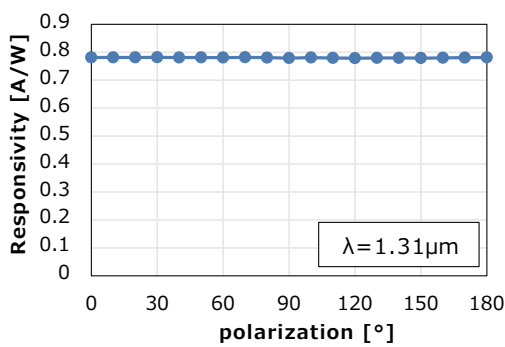


図4 導波路型受光素子の偏波依存性

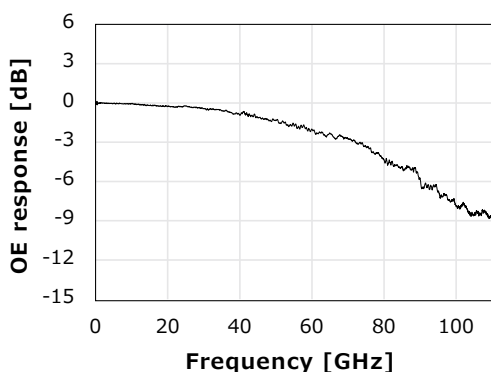


図5 導波路型受光素子の周波数特性

4. アバランシェフォトダイオード (APD) へ応用

pin-PDでは受信感度が得られない伝送距離10km以上の対応については、消費電力抑制の観点から光電流の増幅機能を有するAPDへの期待が高い。広帯域化に加えて高線形性に有利なバットジョイント導波路型pin-PD技術を応用し、導波路型受光素子 (APD) を実現している⁽⁴⁾。図6に導波路型受光素子 (APD) の構造断面図を示す。

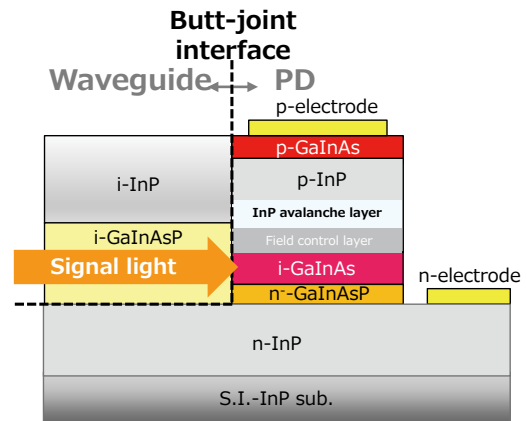


図6 バットジョイント導波路型受光素子 (APD) の構造断面図

InP系モノリシック集積要素技術のバットジョイント再成長により、i-GaInAsPをコア層とする入射導波路とInP (厚さ100nm以下) を増倍層とするAPDをモノリシックに集積している。導波路コア層をAPD吸収層 (i-GaInAs) 側面へ直接結合させた本構造は、吸収層における高い量子効率を維持しながら、pn接合領域の小型化によるCR帯域の拡大と、吸収層の薄層化によるキャリア走行帯域の拡大によって高速化を図っている。また薄層化した吸収層内の電界強度を増加させ、高入力条件下での空間電荷効果やヘテロ界面トラップを抑えることによって線形性を高めている。

導波路型受光素子 (APD) の暗電流特性と1.31 μm 波長での増倍特性をそれぞれ図7と図8に示す。ブレイクダウン電圧は21.6V、ブレイクダウン電圧の90%の電圧値での暗電流は5nA以下と低い暗電流特性が得られている。また受光感度は、1.31 μm 波長における増倍率1において0.70A/Wであり、最大増倍率20のエッジブレイクダウンのない良好な増倍特性が得られている。

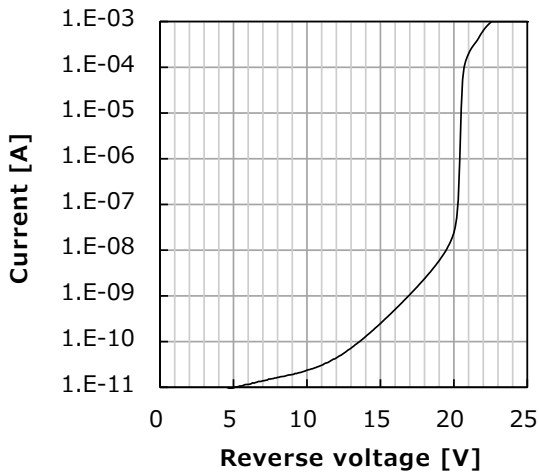


図7 導波路型受光素子 (APD) の暗電流特性

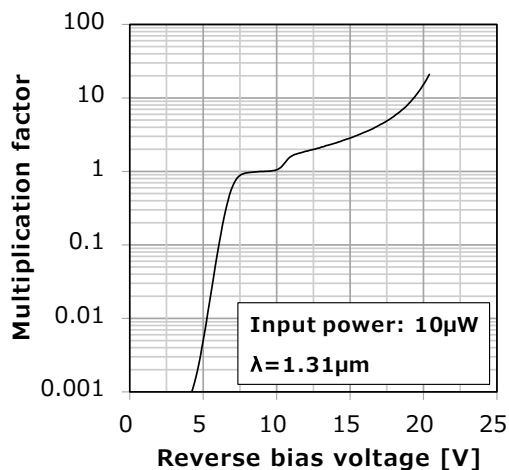


図8 導波路型受光素子 (APD) の増倍特性

5. 結 言

コヒーレント通用受信器向けに実用化されたバットジョイント構造を有する導波路型 pin-PD 技術をベースとして、直接検波に不可欠な偏波無依存型のスポットサイズ変換器を一体集積し、100GBd 受信器に求められる PD 帯域 (>60GHz) と受光感度 (>0.7A/W) の両立に成功した。また光電流の増幅機能を有する APD への応用についても示した。

用語集

※1 800G Pluggable MSA

Multi-Source Agreement: 2019年9月に開発ベンダー10社にて結成。次世代データセンター通信用光トランシーバ仕様の標準化により互換性のある共通仕様の製品を各社が開発・製品化するための取り決め (契約)。

※2 QSFP-DD

Quad Small Form Factor Pluggable Double Density: 挿抜可能 (プラグブル) 光トランシーバの業界標準のひとつ。伝送速度200Gbit/s、4波長の信号光を用いて800Gbit/sを実現する。

※3 FR4規格

伝送距離2kmまでの光トランシーバの標準化規格。4波長の信号光を用いて分割多重伝送をおこなう。

※4 Baud (ボー)

変調速度の単位。搬送波に対する1秒あたりの変調回数。

※5 PAM4

4-level Pulse Amplitude Modulation: 1シンボルあたり2ビットの情報を伝送可能な、4値パルス振幅変調方式。

※6 コヒーレント通信

光の振幅 (強度) と位相を変調させて伝送する通信方式。通常2つの固定された偏波光が伝送に使われる。

※7 光の偏波方向

光の電界 (磁界) の振幅方向。電界成分が入射面に対し横向きである偏波方向を TE 波、電界成分が入射面に対し縦向きである偏波方向を TM 波という。

※8 スポットサイズ変換器

光のビーム径を変換する機能を持つ導波路構造。

※9 TIA

Transimpedance Amplifier: 受光電流を電圧に変換するアンプ。受光素子の後段に置かれる。

※10 フリップチップ実装

半導体チップの上面・下面を反転させて外部回路へ接続する実装方法。

参 考 文 献

- (1) T. Okimoto, H. Yagi, K. Ebihara, K. Yamazaki, S. Okamoto, Y. Ohkura, K. Horino, K. Ashizawa, M. Ekawa, and Y. Yoneda, "InP-based PIC integrated with Butt-joint Coupled Waveguide p-i-n PDs for 100GBaud Coherent Networks," in Proceedings of OFC2021, F2C.6 (2021)
- (2) T. Okimoto, H. Yagi, K. Ebihara, K. Yamazaki, S. Okamoto, Y. Ohkura, K. Horino, M. Kurokawa, M. Takechi, M. Ekawa, and Y. Yoneda, "InP-based Butt-joint Coupled Waveguide Photodiodes Integrated with Various Functions for 100 GBaud Coherent Detection," IEEE JSTQE, vol.22 (Sep. 2021)
- (3) 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)
- (4) Y. Yoneda, T. Okimoto, K. Ashizawa, K. Ebihara, S. Okamoto, K. Horino, H. Yagi and M. Ekawa "InP-Based Waveguide Photodetectors for IMDD/Coherent Transmission Applications," IECE Technical Report, no.LQE2020-5 (Aug. 2020)
- (5) T. Okimoto, H. Yagi, S. Okamoto, K. Sakurai, K. Ebihara, K. Yamazaki, Y. Nishimoto, K. Horino, T. Takeuchi, Y. Yamasaki, M. Ekawa, and Y. Yoneda, "High Linearity and Uniform Characteristics of InP-based 8-CH Waveguide Avalanche Photodiode Array for 400 GbE." in Proceedings of OFC2020, Th3C.2 (2020)

執 筆 者

海老原幸司* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



沖本 拓也 : 伝送デバイス研究所



山崎功一朗 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



岡本 悟 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



芦澤 建 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
主席



米田 昌博 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
主幹



* 主執筆者