

位相変調方式光伝送システム向けデュアル PIN フォトダイオード

Dual PIN Photodiode for Phase Shift Keying Optical Telecommunication Systems

梅 沢 俊 匡^{*1} 工 藤 貴 裕^{*1}
 UMEZAWA Toshimasa KUDOU Takahiro

日 原 衛^{*2} 和 田 守 夫^{*2}
 HIHARA Mamoru WADA Morio

自社開発した化合物半導体デバイスにより、DPSK (Differential Phase Shift Keying) や DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) に代表される新しい光伝送方式に対応した受信用デュアルPINフォトダイオードモジュールを開発した。デュアルPIN素子は面入射型ツイン構造とし、後段アンプと一体モジュール化した。ファイバ長を含めたデュアルPIN間でのスキューずれが考慮され、40 Gbpsの高速応答、高感度特性、高い同相除去比及び誤り率特性に優れた性能を実現した。このフォトダイオードは、当社が世界に先駆け製品化した40 Gbpsでの長距離伝送を可能にした RZ-DQPSK トランスポンダ (PNTR404) にも適用されている。

We have developed 40-Gbps dual PIN photodiode modules for Differential Phase Shift Keying (DPSK) or Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) telecommunication systems using proprietary compound semiconductor devices. The modules are composed of a surface illuminated dual PIN device, unifying a post amplifier with a twin pigtail fiber. The modules offer high responsivity of 40 Gbps, good frequency response, high common mode reduction ratio, and low bit error rate. This dual PIN photodiode is used in Yokogawa's RZ-DQPSK transponder (PNTR404), the world's first to enable 40-Gbps long-distance transmission.

1. はじめに

近年のブロードバンドアクセスの急速な普及と共に通信トラフィックは増加の一途を続け、基幹系長距離光通信ネットワークの高速・大容量化が求められている。通信トラフィックの増大に対し1波当たりの伝送レートを10 Gbps から 40 Gbps に増やすことが検討されているが、NRZ (Non Return to Zero) 方式に代表される On-Off Keying では伝送距離の制限があった。この問題を解決するために、RZ-DQPSK (Return to Zero Differential Quadrature Phase Shift Keying) 等の位相変調を用いた伝送方式が検討されている。

今回我々は、このような位相変調による長距離伝送システムの実現に向け、DPSK (Differential Phase Shift Keying) もしくは DQPSK フロントエンドに使用できるデュアル PIN フォトダイオード (Photodiode : PD) モ

ジュールの開発を行った。本モジュールは、当社が世界に先駆け製品化した RZ-DQPSK トランスポンダ (PNTR404) ⁽¹⁾ に採用されている。

2. デュアル PIN フォトダイオードの設計

2.1 開発事例と考察

40 Gbps デュアル PIN フォトダイオードモジュールの開発は、いくつかの研究機関から報告されている。Sinsky

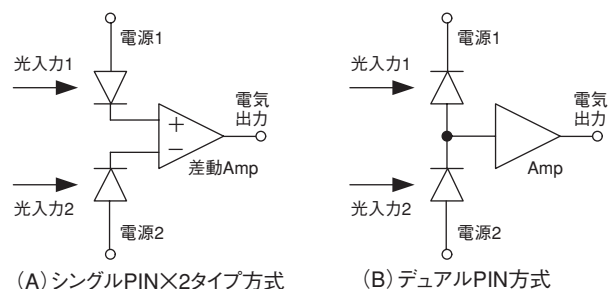


図1 デュアル PIN フォトダイオードモジュールの構成例

*1 フォトニクス事業部 第1技術部4チーム

*2 フォトニクス事業部 第4技術部2チーム

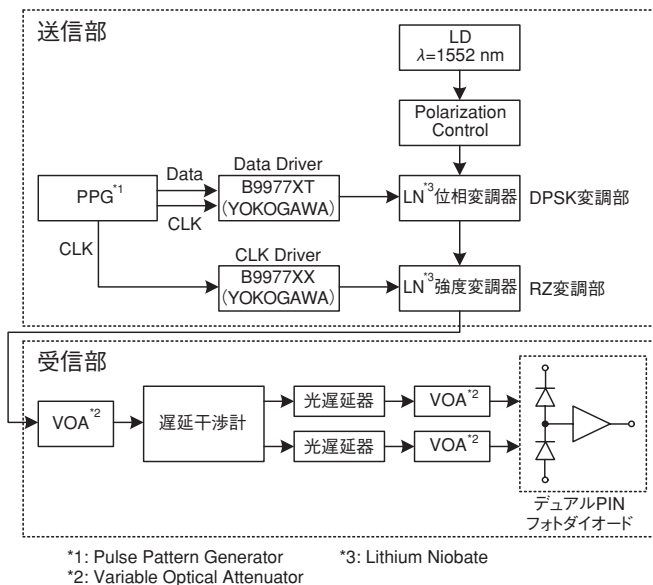


図2 RZ-DPSK 評価システム

らは、2つの導波路型InP系PDとSiGe系差動アンプおよび周囲のマッチング回路を集積化した構成でモジュール化した(図1-(A))⁽²⁾。モジュール内部のPD素子と光ファイバは、それぞれ独立に光結合が行われ、RZ-DPSK信号の場合の各種特性が評価されている。またBachらによる導波路型デュアルPINの開発報告がある⁽³⁾。受光径5 μm × 25 μmの導波路PDとの光ファイバ結合効率を上げるため、導波路PD手前にInGaAsP系スポットサイズ変換器を集積化している。導波路PDはCMRR(Common Mode Rejection Ratio)を向上させるため、Sinskyらとは異なり、2つのPD間にコモンモードを設けたツイン構成にしている(図1-(B))。DPSKシステムにおいては、デュアルPDのCMRRは重要であり、モジュールの構成上ツイン構成とすることが有利と考えられる。

同様に導波路PDを用いた報告があり、デュアルPINフォトダイオードの他、ポストアンプ内蔵型モジュールの開発がなされている⁽⁴⁾。いずれも、2本のファイバとPDとの光結合を考慮し導波路型を採用している点、アンプ内蔵型PDとして差動型アンプを採用している点の特徴である。導波モードが存在する導波路型PDは、面入射型に比べ偏波の影響を受け易い。また差動アンプは一般に定電流源を内蔵しており、一定の飽和出力レベルが得られるように設計される。一方、DQPSKもしくはDPSKシステムにおける遅延干渉計のFSR(Free Spectral Range)を制御するという視点からは、PDへの光入力に対する出力信号の直線性は重要である。遅延干渉計制御の面からは、差動アンプより、リニアアンプもしくは直線性の高いTIA(Trans Impedance Amplifier)を採用することがシステム上重要と考える。

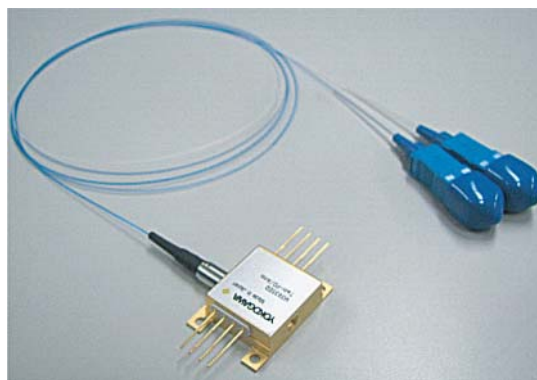


図3 40 Gbps DPSK用デュアルPIN フォトダイオード

2.2 当社開発モジュールの設計

当社が開発したデュアルPINフォトダイオードモジュールの基本構成は、図1-(B)である。デュアルPIN素子は、高速応答、高感度特性、CMRR、偏波依存性および実装性を考慮し、面入射型PINツイン構造とした。

シングルPDへの光入力と異なり、2入力光に対する感度バランスを均一に保つことは、後で紹介する出力波形の対象性を維持する上で重要である。感度特性として特長的な点は、WDM(Wavelength Division Multiplexing)のOバンドからUバンドまで対応できる点である。これは、InGaAs光吸収層のIn組成を、ストイキオメトリ(化学量論的組成比)からややリッチな条件にすることで実現した。感度は、Lバンド端では一般的なPIN構造のものに比べ3割程度、Uバンド帯では6割以上の改善がなされている⁽⁵⁾。

高速応答性については、InGaAs光吸収層の厚みを最適化することで実現した。接合容量の観点からは、イントリンシクなInGaAs吸収層を厚くする方が接合容量低減には有利である。一方、電子走行時間の観点からは、空乏層で光励起された電子・ホールをPもしくはN層へ短時間で走行させる必要があるため、光吸収層は薄くする必要がある。両者はトレードオフの関係にあるが、開発したデュアルPINフォトダイオードモジュールでは、最適となるInGaAs層厚を選択した。

面入射型PDは、TE(Transverse Electric)、TM(Transverse Magnetic)の導波モードに依存しないため、偏波依存性に優れている。

CMRRについては、2芯光ファイバコアピッチを考慮し、PD間隔を最適化し、2入力光に対する感度バランスを均一に保つよう設計した。

デュアルPINには二つの光入力が存在し、等長化の配慮が必要である。2本の光ファイバ長の差を考えた場合、1 mmの差は時間ずれに換算すると約5 psに相当する。40 Gbps伝送では、1ビット間隔は時間軸に換算すると25 psであり、ファイバ長1 mmの差はデュアルPIN部で20%

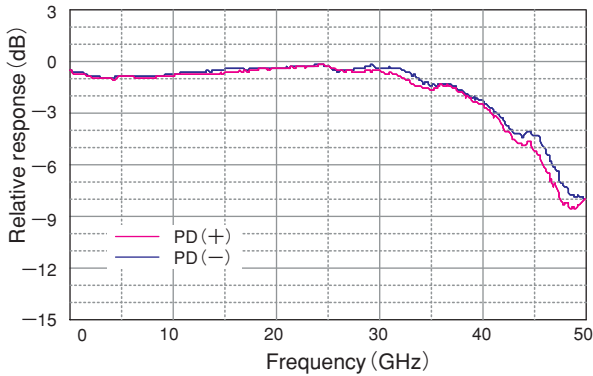


図4 40 Gbps デュアル PIN 部の周波数特性

のスキュー差を生じることになる。その結果、出力波形の時間軸方向に歪を与えることになる。我々はこのスキューずれの課題に対し、ファイバ長を最適化することで約 2 ps 以内を実現した。

3. モジュール性能評価システム

図2に、モジュールの性能評価に用いた DPSK 評価システムを示す。送信部は、初段の位相変調器と次段の RZ カーバーと呼ばれる強度変調器から成る。位相変調には一般の LN (Lithium Niobate) 強度変調器を用い、2 倍の半波長電圧 ($2V\pi$) と適切な DC バイアス点を選ぶことで位相変調を実現している。次段の RZ カーバーは伝送システムの SN をさらに向上させるため、初段の位相変調信号にサイン波の強度変調を施している。受信部の主な構成要素は、遅延干渉計とデュアル PIN フォトダイオードである。RZ-DPSK 信号として生成された光は受信部に入力され、1 ビット遅延干渉器にて位相変調を強度変調へ変え、デュアル PIN モジュールへ入力される。

4. 開発品の性能

今回は、DPSK 伝送を目的に、40 Gbps、10 Gbps 用のデュアル PIN フォトダイオードを開発した。また、40 Gbps RZ-DQPSK 用として動作するデュアル PIN フォトダイオードも開発した。いずれも、デュアル PIN と後段にアンプを組み合わせた構成となっている (図 1-(B))。

4.1 40 Gbps DPSK 用デュアル PIN フォトダイオードモジュール

図3に、40 Gbps DPSK 用デュアル PIN フォトダイオードモジュールの外観写真を示す。27 mm × 17.5 mm × 8 mm の金属パッケージ内にデュアル PIN とアンプが内蔵されている。SMPM コネクタによる RF (Radio Frequency) 出力端子が設けられており、2 芯ファイバはスキュー差を考慮し等長化されている。後段との光接続インタフェースとしては、SC コネクタを採用した。

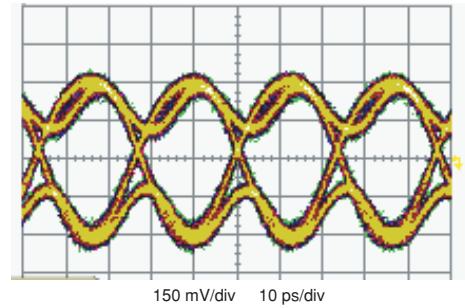


図5 40 Gbps デュアル PIN フォトダイオード出力波形

図4に、デュアル PIN 素子部の周波数特性を示す。3 dB カットオフ周波数帯域は 40 GHz 超であり、良好な平坦性が得られている。2 光入力間での周波数特性差もなく、CMRR 向上に寄与している。このデュアル PIN に 40 GHz 超の帯域を持つ広帯域アンプを接続し、一体モジュール化を行った。2 つの光入力に対する周波数特性は等しく、結果として良好な波形が得られている。図5に、遅延干渉計を通した 40 Gbps デュアル PIN アンプの出力波形を示す。ファイバ片側に 0 dBm を入力した場合、振幅約 600 mV が得られている。

4.2 10 Gbps DPSK 用デュアル PIN フォトダイオードモジュール

図6に、10 Gbps DPSK 用デュアル PIN フォトダイオードモジュールの外観写真を示す。現在 10 Gbps 長距離伝送は、主として NRZ や CSRZ (Carrier-Suppressed Return to Zero) に代表される On-Off Keying 伝送方式が採用されているが、近年海洋通信を中心に DPSK 伝送方式への切り替えが進んでいる。モジュールパッケージは、MSA (Multi-Source Agreement) 準拠の表面実装型となっている。セラミックケースから成り、小型、低コスト化を実現している。パッケージサイズは 10 mm × 6 mm × 4.5 mm である。2 芯ファイバは等長化されていて、光接続インタ

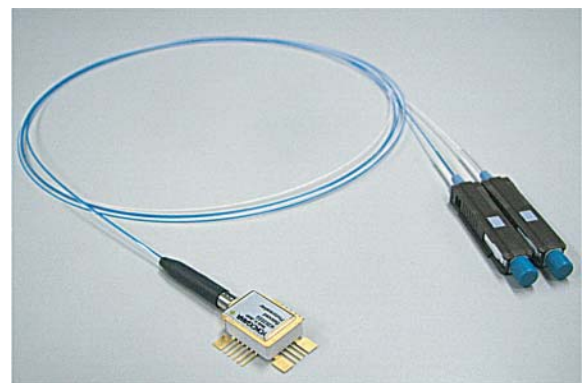


図6 10 Gbps DPSK 用デュアル PIN フォトダイオード

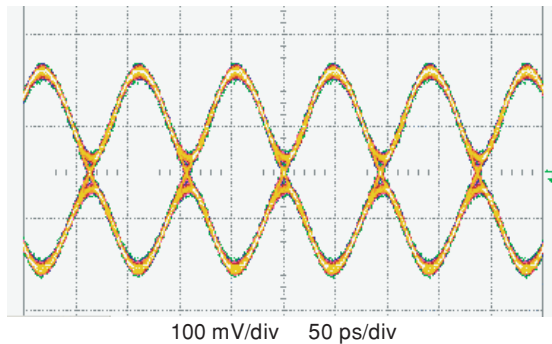


図7 10 Gbps デュアル PIN フォトダイオード出力波形

フェースはMUコネクタ，RF出力はフィード形で差動出力となっている。

40 Gbps用フォトダイオード同様，2光入力間での周波数特性差はなく，CMRR向上に寄与している。3 dBカットオフ周波数は約8 GHz，3 dBカットオフ周波数後のロールオフも少ない。図7に，出力波形を示す。光ファイバ結合を含めたデュアル PIN 特性の電気出力バランスが良好な点と周波数特性のロールオフの点から，波形の対象性に優れている。BER (Bit Error Rate) 特性としては最小受信感度約 -20 dBm が得られており，ノイズ耐力にも優れていることが確認できている。

4.3 40 Gbps DQPSK用デュアルPINフォトダイオードモジュール

DQPSK受信部システムの遅延干渉計には $\pi/2$ 位相差を設けた2組の遅延干渉計を用意し，4つの光出力に対して2つのデュアルPINフォトダイオードモジュールにより光電気変換を行う。それぞれのデュアルPINモジュールは20 Gbpsでの動作となっていて，後段のDeserializerへ接続される。開発したモジュールのデュアルPIN素子は40 Gbps用と共用している。内蔵アンプは40 Gbps用に比べ帯域がやや狭く，数dB利得が高いアンプを採用した。いずれも，光入力に対し出力波形振幅の高い線形性を有する。また，2つのモジュールの出力波形，BER特性は等しく，誤り率 1×10^{-12} でのOSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) 値16 dBを達成した。

DQPSK用遅延干渉計と組み合わせた2つのデュアルPINフォトダイオードモジュール出力波形を，図8に示す。遅延干渉計入力+4 dBmでの波形出力として約500 mVの出力振幅が得られており，Ach，Bch間で振幅，波形品位，BER特性差は少ない。このDQPSK用デュアルPINフォトダイオードは，当社が世界に先駆け製品化し

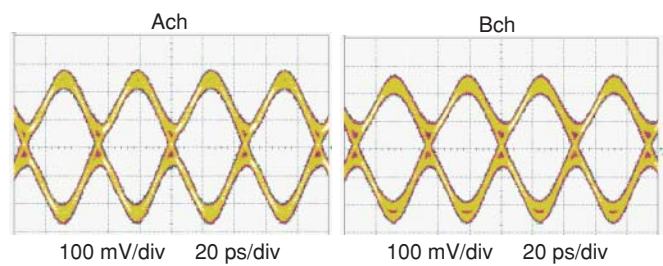


図8 DQPSK用20 Gbps デュアル PIN フォトダイオード出力波形

たRZ-DQPSKトランスポンダ(PNTR404)に採用されている。

5. おわりに

本稿では，DQPSKもしくはDPSKといった新しい光伝送方式の受信用として開発したデュアルPINモジュールを紹介した。現在，40 Gbps光通信市場はまさに10 Gbpsから40 Gbpsへ立ち上がりを見せており，今後さらなる最適化設計・性能改善・高信頼性を継続して行っていく。開発した受光モジュールのさらなる性能面，生産面のブラッシュアップを行うと共に，次世代光通信用モジュールの性能向上を追及し，付加価値の高い製品を提供していきたい。

参考文献

- (1) 太田篤伸，谷村大輔，客野智彦，飯尾晋司，“長距離光伝送システム向け43Gbps RZ-DQPSKトランスポンダ”，横河技報，Vol. 52，No. 3，2008，p. 77-80
- (2) Jeffrey H. Sinsky, Andrew Adamiecki, Alan Gnauck, Charles A. Burrus, et. al., "RZ-DPSK Transmission Using a 42.7-Gb/s Integrated Balanced Optical Front End With Record Sensivity," Journal of Lightwave Tech., Vol. 22, No. 1, January 2004, pp. 180-185
- (3) Heinz-Gunter Bach, "InP-Based High-Speed Photoreceivers for Optical Fiber Communications," 11th ECIO '03, 1. -4. Vol. 2, 2003, pp. 123-134
- (4) Preliminary Datasheet, "45GHz Balanced Photodetector," u2t photonics, 2003
- (5) 三浦明，松浦裕之，和田守夫，八木原剛，小高洋寿，池澤克哉，“化合物半導体技術の光通信分野への展開”，横河技報，Vol. 49，No. 3，2005，p. 123-126