

コヒーレント光通信向け小型光受信器

Compact Optical Receivers for Coherent Optical Communication

武智 勝*
Masaru Takechi

立岩 義弘
Yoshihiro Tateiwa

黒川 宗高
Munetaka Kurokawa

八木 英樹
Hideki Yagi

原 弘
Hiroshi Hara

光通信伝送量の飛躍的な増大に対応すべく、多値変調方式を活用したデジタルコヒーレント光通信技術が注目されており、既に幹線系システムへは広く導入されている。今後、幹線系からメトロ系への展開に向けて光トランシーバの小型化が強く求められている。今回CFP2-ACO光トランシーバに搭載可能なOIF Micro-ICR仕様に準拠した小型光受信器を開発した。導波路型PDと90°ハイブリッドを集積したInP系光集積素子を採用することで、高受光感度かつ12.0×22.7×4.5mmの小型パッケージの光受信器を実現した。光受信器には、VOA及び信号光モニタPDも内蔵し高機能化を図った。128Gbit/s DP-QPSK変調信号および224Gbit/s DP-16QAM変調信号の復調を行い、デジタルコヒーレント伝送の実証を行った。本稿では、開発した小型光受信器の設計と代表的な特性を紹介する。

Digital coherent optical communication technology using multi-level modulation formats has been adopted in long haul systems as a crucial solution to the rapidly increasing optical traffic. This technology is expected to further expand to metro systems, where smaller optical transceivers are required. We have developed compact optical receivers that can be installed in the CFP2-ACO optical transceivers, complying with OIF (Optical Internetworking Forum) implementation agreement for Micro-ICR (intradynne coherent receivers). The new optical receivers have achieved a high responsivity in a small package of 12.0 × 22.7 × 4.5 mm due to an InP-based photonic integrated circuit that consists of waveguide PDs (photodiodes) and a 90 degree hybrid. They also include a VOA (variable optical attenuator) and signal monitor PD. The digital coherent transmission was verified by the successful demodulation of 128 Gbit/s DP-QPSK (dual-polarization quadrature phase-shift-keying) modulation and 224 Gbit/s DP-16QAM (quadrature amplitude modulation). This paper presents the design and typical characteristics of the compact optical receivers.

キーワード：光受信器、コヒーレント光通信、InP、ICR、CFP2-ACO

1. 緒言

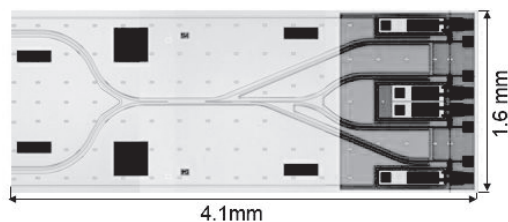
スマートフォンなどの高速・大容量な通信を必要とする通信機器の普及や映像配信サービスの拡充など、通信トラフィックの増大は止まることを知らない。その需要を満足する長距離・大容量光通信システムとして、多値変調方式を活用したデジタルコヒーレント光通信技術が注目されており、既に幹線系システムへは広く導入が行われている。今後、幹線系からメトロ系への展開に向けては、光トランシーバの小型化によるポート密度の向上ならびにポートあたりの伝送容量向上が強く求められており、なかでもOIF^{*1}により規格化されたCFP2-ACO^{*2}光トランシーバ⁽¹⁾が注目されている。

当社では2013年に、InP系の光素子を用いることで小型化を実現したコヒーレント光通信向け光受信器を開発してきた^{(2),(3)}。本稿では、CFP2-ACO光トランシーバに搭載可能な光受信器としてOIFで規格化された、Micro-ICR^{*3}仕様⁽⁴⁾に準拠した小型光受信器を開発したので報告する。

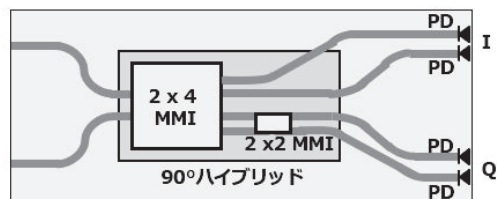
2. 小型光受信器の構成

2-1 InP系光集積素子

図1 (a) にInP系光集積素子の上面写真、図1 (b) にInP系光集積素子の機能ブロック図を示す。



(a) 上面写真



(b) 機能ブロック図

図1 InP系光集積回路

導波路型フォトダイオード (PD) 4個と90°ハイブリッドが1.6mm×4.1mmのInPチップに集積されている。90°ハイブリッド部分は2×4 MMI^{*4}と2×2 MMIを組み合わせた構成とすることで、出力光導波路の交差を不要とできる利点がある⁽⁵⁾。GaInAsPをコア層とする光導波路とGaInAsを光吸収層とするPDをバットジョイント (BJ) 結合することで高受光感度を実現している⁽⁶⁾。光入力部分にスポットサイズコンバータ (SSC) を設置することで入射光を効率良く光導波路層に結合できる構成になっている⁽⁷⁾。PDバイアス端子の高周波バイパス用にMIM (Metal Insulator Metal) キャパシタを集積しており、優れた高周波特性に寄与している⁽⁸⁾。

2-2 光受信器モジュールの構造

図2 (a) に光受信器モジュールの写真、図2 (b) に光受信器モジュールの構造図を示す⁽⁹⁾。

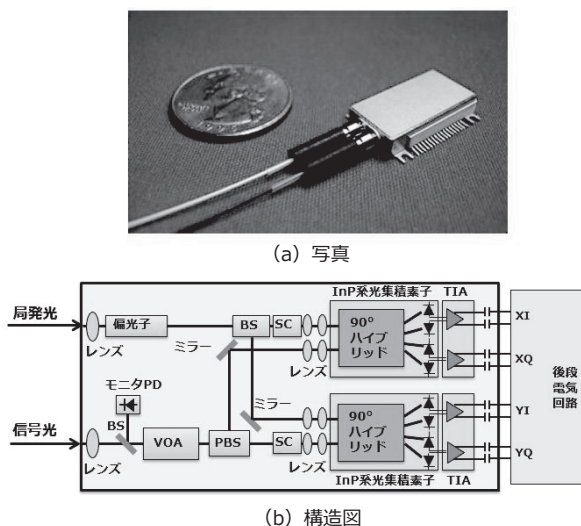


図2 光受信器モジュール

光ファイバから出射された信号光および局発光はレンズによってコリメート光に変換される。信号光はパワーモニタPD用のビームスプリッタ (BS) と可変光減衰器 (VOA) を通った後、偏波ビームスプリッタ (PBS) で直交する二つの偏波に分離される。直行する光は二つの偏波間の光路差を補償するスキュー調整素子 (SC) を通った後、レンズによりInP系光集積素子の入力導波路に集光される。もう片方の光は偏波方向を揃えるための半波長板を通った後、ミラーで反射されレンズにより別のInP系光集積素子の入力導波路に集光される。局発光は偏波方向を揃えるための偏光子を通った後、BSで二光路に分岐され、その後は半波長板がないことを除くと信号光と同様に二個のInP系光集積素子の入力導波路に集光される。

InP系光集積素子のPDで光-電流変換された電気信号は、トランスインピーダンスアンプ (TIA) で増幅された後DC成分除去用のコンデンサを通してパッケージの高周波端子から出力され後段の電気回路に接続される。

パッケージサイズは12.0×22.7×4.5mmで、外形及びピン配置はOIFのMicro-ICR Type1規格に準拠しており、CFP2-ACO光トランシーバ搭載に適したサイズを実現している。

2. 開発目標仕様

表1に小型光受信器の開発目標仕様を示す。

表1 開発目標仕様

項目	条件	最小値	最大値	単位
動作温度		-5	85	℃
動作周波数	C-band	191.35	196.20	THz
動作波長		1528.0	1566.7	nm
受光感度	信号光	50	-	mA/W
	局発光	50	-	mA/W
帯域		20	-	GHz
同相排除比 (CMRR)	DC, 信号光	-	-20	dB
	~22GHz 信号光	-	-16	dB
同相排除比 (CMRR)	DC, 信号光	-	-12	dB
	~22GHz 局発光	-	-10	dB
VOA減衰量		10	-	dB

これらの仕様は、デジタルコヒーレント光通信で多用される100 Gbit/s DP-QPSK^{*5}変調信号や200 Gbit/s DP-16QAM^{*6}変調信号の受信に必要な特性である。特に受光感度については、光増幅器無しで80km伝送する用途での使用も想定して比較的高い目標値を設定している。導波路型PDと90°ハイブリッドを集積したInP系光集積素子を採用することで高受光感度を実現している。

3. 小型光受信器特性

3-1 受光感度

小型光受信器の25℃での信号光受光感度の波長依存性を図3 (a) に局発光受光感度の波長依存性を図3 (b) に示す。信号光・局発光共に動作波長範囲内で70mA/W以上の高受光感度が得られている。

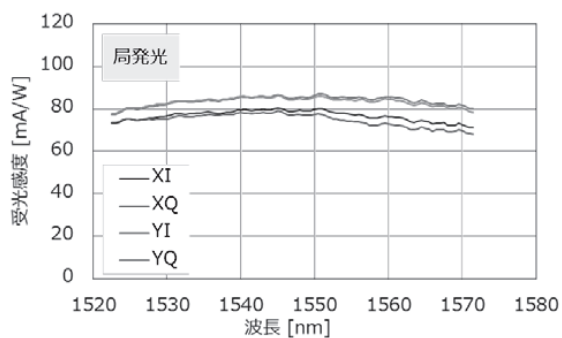
DC同相排除比 (CMRR) の波長依存性を図4に示す。動作波長範囲内で-25dB以下の良好な特性が得られている。図4は規格の厳しい信号光入力のデータを示しているが、局発光入力の場合でも信号光入力と同等の特性である。

受光感度変動の温度依存性を図5に示す。25℃での受光感度を基準に-5℃と85℃での1550nmにおける平均受光感

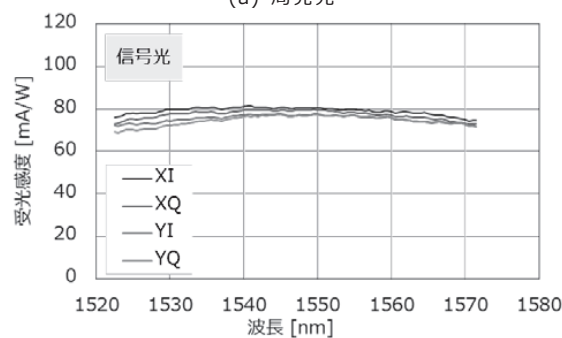
度の変動率をプロットしている。パッケージ温度-5~85℃での受光感度変動は±5%以下と小さいことを確認した。

3-2 VOA特性

光減衰量のVOA電圧依存性を図6に、光減衰量のXY間差の平均光減衰量依存性を図7に示す。



(a) 局発光



(b) 信号光

図3 受光感度の波長依存性

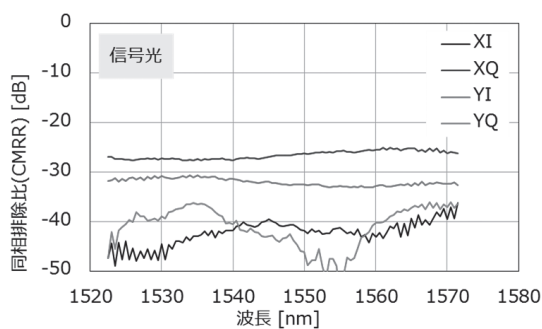


図4 DC同相排除比 (CMRR) の波長依存性

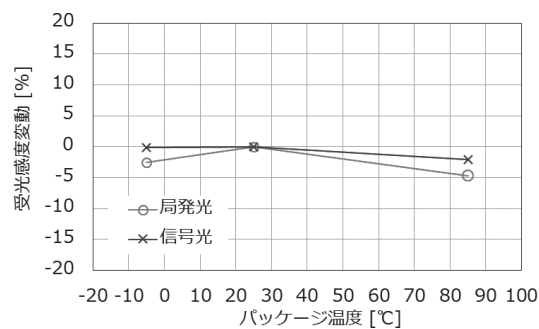


図5 受光感度変動の温度依存性

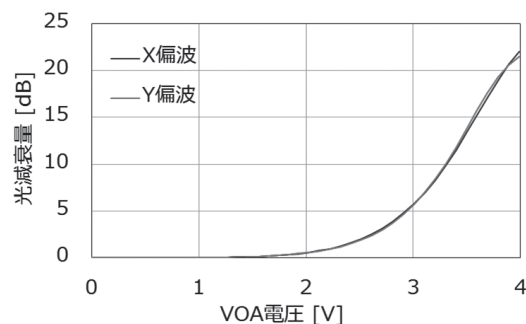


図6 光減衰量のVOA電圧依存性

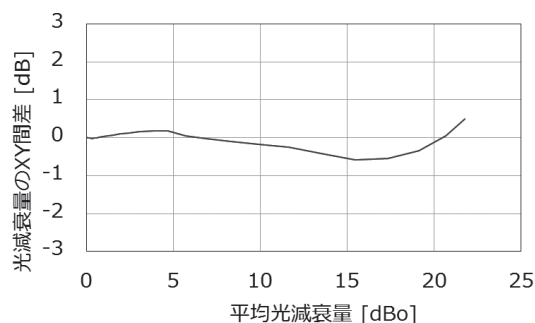


図7 光減衰量のXY間差の平均光減衰量依存性

MEMS^{※7}型VOAを採用することで20dB以上の大きな光減衰量が得られた。減衰量のXY間差は0.6dB以下と小さい。光減衰量および光減衰量のXY間差の温度依存性も、パッケージ温度-5~85℃で±0.5dB以下と小さいことを確認している。

3-3 高周波特性

光電気変換利得の周波数依存性を図8に示す。3dB帯域は27GHz以上であり、シンボル速度が32GBaudの変調信

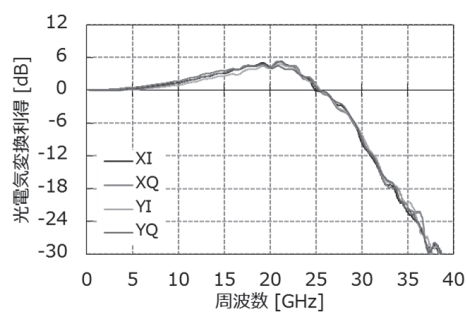


図8 光電気変換利得の周波数特性

号を受信するには十分な帯域である。4ch間の利得変化も±1dB以下と小さく均一な特性が得られた。

同相排除比 (CMRR) の周波数依存性を図9に示す。22GHz迄の周波数で-27dB以下であり目標仕様に対して十分なマージンを持つ良好な特性が得られた。

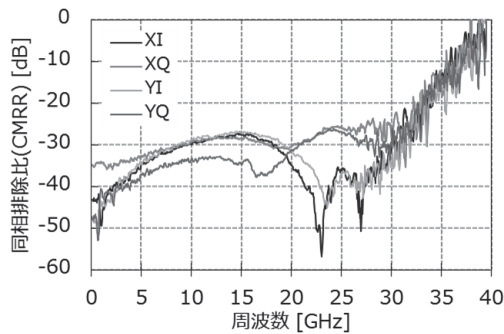
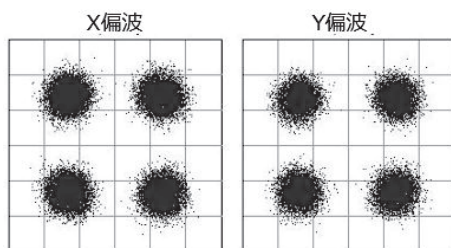


図9 同相排除比 (CMRR) の周波数特性

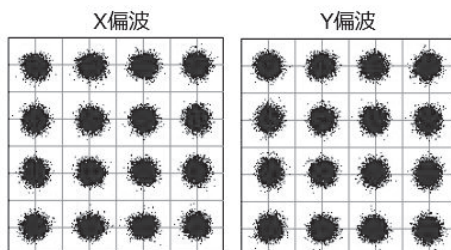
3-4 伝送特性

128 Gbit/s DP-QPSK 変調信号および224 Gbit/s DP-16QAM 変調信号の復調コンスタレーションを図10 (a) と図10 (b) に示す。

信号光の光信号雑音比 (OSNR) は、DP-QSPK 変調では20dB、DP-16QAM 変調では41dBである。どちらの変調方式においてもシンボル間が明瞭に区別されており良好な伝送特性が実現できている。



(a) 128 Gbit/s DP-QPSK



(b) 224 Gbit/s DP-16QAM

図10 復調コンスタレーション

4. 結 言

CFP2-ACO 光トランシーバに搭載可能な OIF Micro-ICR 仕様準拠した小型光受信器を開発した。導波路型 PD と 90° ハイブリッドを集積した InP 系光集積素子を採用することで、高受光感度かつ小型の光受信器を実現した。光受信器には、VOA 及び信号光モニタ PD も内蔵し高機能化を図った。128 Gbit/s DP-QPSK 変調信号および224 Gbit/s DP-16QAM 変調信号の復調を行い、デジタルコヒーレント伝送の実証を行った。

用語集

※1 OIF

Optical Internetworking Forum : 光ネットワーク技術に関する業界団体。

※2 CFP2-ACO

CFP (100G Form-Factor Pluggable) として標準化された小型光トランシーバの業界標準規格の一つである CFP2 を、OIF においてコヒーレント光通信に拡張した小型光トランシーバの規格。ACO は Analog Coherent Optics の略。

※3 Micro-ICR

Micro-Intradyn Coherent Receivers : OIF で仕様化された小型コヒーレント光受信器

※4 MMI

Multi Mode Interference : 多モード干渉。もしくは、多モード干渉を利用して光を分離・合成する素子。

※5 DP-QPSK

Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying : QPSK は4位相偏移変調。90° 間隔でずれた4位相を組み合わせることで、一度に2bit の情報を伝送する通信方式。更に直交する2偏波を用いる (DP) ことで、同時に2つの QPSK 信号を送り、計4bit の情報伝送が可能となる。

※6 DP-16QAM

Dual-Polarization 16 Quadrature Amplitude Modulation : 16QAM は90° 間隔でずれた4位相に加え、2つの振幅を組み合わせることで、一度に16値すなわち4bit の情報を伝送する通信方式。更に直交する2偏波を用いる (DP) ことで、同時に2つの 16QAM 信号を送り、計8bit の情報伝送が可能となる。

※7 MEMS

Micro Electro Mechanical Systems : 機械要素部品と電

子回路を一つのシリコン基板などの上に微細加工技術によって集積化したデバイス。

- ・InPは、ハミングヘッド(株)の登録商標です。
- ・ICRは、ソニー(株)の登録商標です。

参 考 文 献

- (1) "Implementation Agreement for CFP2-Analogue Coherent Optics Module," IA#OIF-CFP2-ACO-01.0, January 22nd 2016, <http://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-CFP2-ACO-01.0.pdf>
- (2) 立岩義弘、[InP系ミキサを用いた100Gbit/s小型コヒーレント光受信器]、SEIテクニカルレビュー第183号(2013年7月)
- (3) M. Takechi et al., "Small Size 100G Coherent Receiver Using InP-based 90Hybrid Integrated with Photodiodes," ECOC 2013, paper P.2.8 (2013)
- (4) "Implementation Agreement for Integrated Dual Polarization Micro-Intradyn Coherent Receivers," IA#OIF-DPC-MRX-01.0, March 31st 2015, <http://www.oiforum.com/wp-content/uploads/OIF-DPC-MRX-01.0-IA.pdf>
- (5) S. H. Jeong and K. Morito, "Novel Optical 90° Hybrid Consisting of a Paired Interference Based 2 × 4 MMI Coupler, a Phase Shifter and a 2×2 MMI Coupler," J. Lightw. Technol., vol. 28, no. 9, pp. 1323-1331 (May 1, 2010)
- (6) H. Yagi et al., "InP-Based p-i-n-Photodiode Array Integrated With 90° Hybrid Using Butt-Joint Regrowth for Compact 100 Gbit/s Coherent Receiver," IEEE J. Sel. Topics. Quantum Electron., vol. 20, no. 6, pp. 374-380 (Nov.-Dec. 2014)
- (7) H. Yagi et al., "High receiver responsivity and low dark current of InP-based pin-photodiode array monolithically integrated with 90° hybrid and spot-size converter using selective embedding regrowth," IEICE Electronics Express, vol. 12, no. 2, pp. 1-7 (Jan. 2015)
- (8) R. Masuyama et al., "Monolithic Integration of InP-Based Waveguide Photodiodes with MIM Capacitors for Compact Coherent Receiver," IPRM 2013, paper MoD3-6 (2013)
- (9) 黒川宗高、[可変光減衰器を内蔵した100 Gbit/s 小型コヒーレントレシーバ]、2016年電子情報通信学会エレクトロニクス講演論文集、C-4-15、p.167

執 筆 者

武智 勝* : 伝送デバイス研究所 主席



立岩 義弘 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 光部品事業部



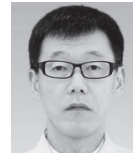
黒川 宗高 : 伝送デバイス研究所



八木 英樹 : 伝送デバイス研究所 主席 博士(工学)



原 弘 : 伝送デバイス研究所 グループ長



*主執筆者