



400Gbit/s 伝送用小型4ch 集積光受信モジュール

Compact 4-ch Integrated Optical Receiver Module for 400-Gbit/s Transmission

三井 主成*
Kazuaki Mii

川村 正信
Masanobu Kawamura

中山 謙一
Kenichi Nakayama

原 弘
Hiroshi Hara

高機能な携帯端末の普及やインターネットを利用したサービスの多様化に伴うデータ通信量の急増に対応するため、光通信網では伝送速度100Gbit/sの光トランシーバが導入されている。更なる伝送容量の拡大に向けて、伝送速度400Gbit/sの光通信規格の標準化が進められており、対応する光トランシーバの開発も活発に行われている。当社は、100Gbit/s用4ch集積光受信モジュールをベースに、400Gbit/s小型光トランシーバに搭載可能な4ch集積光受信モジュールを開発した。本稿では、その構造と諸特性について紹介する。

There has been a strong demand for increasing data traffic resulting from the widespread use of advanced mobile terminals and the diversification of internet-based services. To address the needs, 100-Gbit/s optical transceivers have been used in optical communication systems. For further increase in data capacity, a new specification for 400-Gbit/s optical communications has been standardized, and optical transceivers applicable to it have been developed actively. We have developed a new compact receiver for 400-Gbit/s transmission based on the structure of our previous 100-Gbit/s receivers. This paper describes the design and typical characteristics of the new optical receiver.

キーワード：光受信モジュール、400G、クロストーク

1. 緒言

スマートフォンに代表される高機能な通信端末の普及に伴い、様々なインターネットコンテンツが開発され、手軽に利用できるようになっている。ビッグデータの活用や5Gの実用化も進んでおり、IoT (Internet of Things) への期待も益々高まっている。このような背景から、データ通信量は急激に増加しており、通信速度の向上や通信装置の小型化の需要は非常に強くなっている。

ネットワークの主要施設であるデータセンターでは、伝送速度100Gbit/sの光通信が導入されており、基幹部品の一つである光トランシーバは、CFP4^{*1}やQSFP28^{*2}などの小型の製品が広く利用されている。それと並行して、更に大容量で高速な通信の実現に向け、400Gbit/s光通信規格の標準化が100G Lambda MSA⁽¹⁾にて進められており、QSFP-DD^{*2}などの光トランシーバの開発が行われている。

当社はこれまでにQSFP28に搭載可能な100Gbit/s用の小型4ch集積光受信モジュールを開発してきた^{(2)~(4)}。次世代の400Gbit/s伝送には、更なるモジュールの高速化が求められており、今回、この高速伝送を実現する4ch集積光受信モジュールを開発した。

2. 開発目標仕様

表1に目標仕様を示す。MSA^{*3}で策定された伝送距離

2kmの400G-FR4規格を参考にしている。光通信では伝送容量拡大の手段の一つとして、1本の光ファイバに複数の波長の光を同時に伝送させる波長分割多重方式が利用されている。400G-FR4では、波長1300nm帯のCWDM^{*4}グリッドの4波長を使用する。変調速度は53.125Gbaud、変調方式は4値パルス振幅変調 (4-level Pulse Amplitude Modulation, PAM4) で、グレイコーディングされた信号が使用される。図1に示すようにPAM4では1シンボルあたり2ビットの情報伝送できるため、伝送速度は1波長あたり106.25Gbit/sであり、4波長合計で425Gbit/sとなる。

表1 光受信モジュール仕様

項目	仕様	単位	
変調速度	53.125±100ppm	Gbaud	
変調方式	PAM4	-	
波長	レーン0	1264.5~1277.5	nm
	レーン1	1284.5~1297.5	
	レーン2	1304.5~1317.5	
	レーン3	1324.5~1337.5	
オーバーロード (OMA ^{*5}) †	≥3.7	dBm	
レーン間パワー差 (OMA)	≤4.1	dB	
最小受信感度 (OMA) †	式(1)	dBm	
光反射減衰量	≥26	dB	

†符号誤り率=2.4×10⁻⁴での光パワー

$$\text{最小受信感度} = \begin{cases} -4.6 (SECQ^{*6} < 1.4) \\ SECQ - 6.0 (1.4 \leq SECQ \leq 3.4) \end{cases} \dots (1)$$

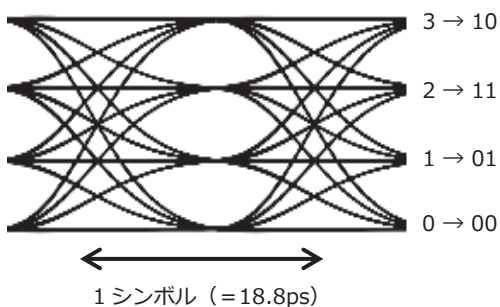


図1 PAM4信号

3. 4ch集積光受信モジュールの設計

3-1 モジュール構造

写真1に4ch集積光受信モジュールの外観を示す。パッケージサイズは15.4mm×6.7mm×5.3mmで小型光トランシーバQSFP-DDに搭載可能な大きさを実現している。

図2に光受信モジュールの構造を示す。光ファイバと接続するレセプタクルと、光トランシーバのプリント回路基板

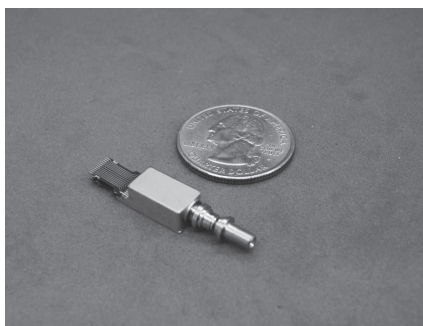


写真1 4ch集積光受信モジュール

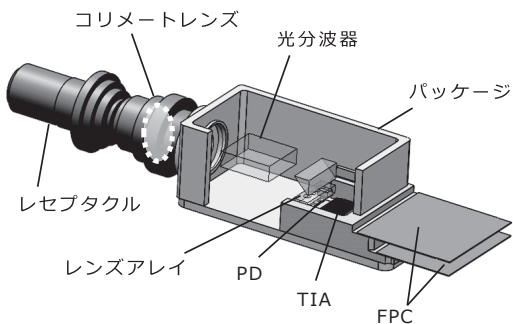


図2 4ch集積光受信モジュール構造

と接続するフレキシブル基板 (FPC)、フォトダイオード (PD) やトランスインピーダンスアンプ (TIA) などのチップ部品と、光分波器などの光学部品が実装され、気密封止されるパッケージから構成される。PDは裏面入射構造で、キャリア上にフリップチップ実装^{*7}され、キャリア、TIA、パッケージはワイヤで接続される。PD裏面に形成したモノリシックレンズにより有効受光径を拡大しており、広い組立てトレランスを実現している。

レセプタクルから入射した光信号は、コリメートレンズで平行光に変換され、図3のように光分波器内で反射を繰り返して、フィルタにより波長ごとに分離され、レンズアレイを通して各レーンのPDに結合される。光信号はPDで電流に変換され、TIAで電圧信号に変換・増幅された後、差動電気信号としてパッケージとFPCを介して光トランシーバに伝達される。

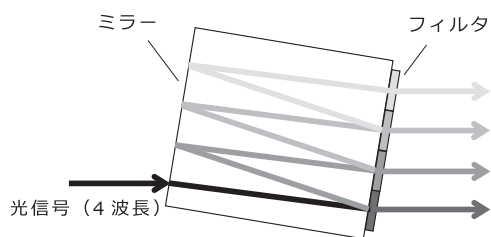


図3 光分波器

3-2 高周波設計

TIAの入力部では、PDを実装するキャリアとTIAはAuワイヤで接続され、ワイヤのインダクタンス L_1 とキャリアの寄生容量 C_1 により共振回路が形成される⁽⁵⁾。簡略化した等価回路は図4の追加パスがない状態となり、この場合の共振周波数は、

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \dots (2)$$

で表される。ここで、 L_1 は0.2nH、 C_1 は75fFであるため、その共振周波数はおよそ41GHzとなり、53Gbaud変調信号の伝達では、この周波数近傍で損失を生じる。また、他のレーンへ干渉し信号品質を劣化させるクロストークも発生する。これを解決するため、図4に示す追加パスをキャリアに実装し、 L_1 、 L_2 、 C_1 の並列共振回路を形成した。この場合の共振周波数は、

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_1}} \dots (3)$$

と表せ、インダクタンス L_2 を小さくすることで入力ワイヤ L_1 によらず共振周波数を高くすることができる。

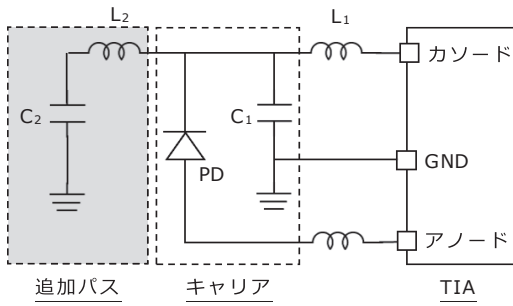


図4 等価回路

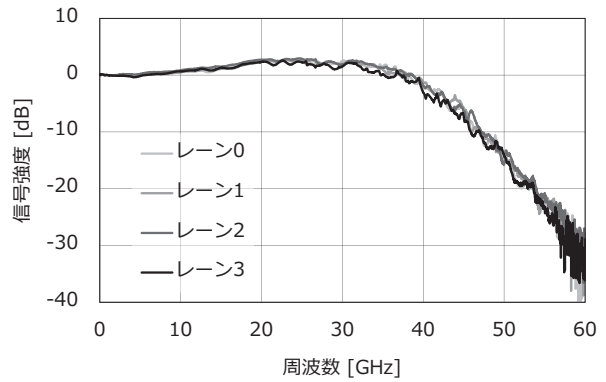


図6 光電気変換利得の周波数特性

4. 光受信モジュール特性

4-1 光学特性

図5に4ch集積光受信モジュールの分波特性を示す。本モジュールには、CWDM波長グリッドに対応した光分波器を搭載しており、図中の点線は波長規格を示している。各レーンの受光感度は0.6A/W以上で、波長規格内における変動量は0.5dB以下である。モノリシックレンズを集積したPD構造と薄膜フィルタを用いた光分波器により低損失な光学系を実現した。レーン間のアイソレーションは25dB以上、光反射減衰量も26dB以上で規格を十分に満足する結果が得られた。

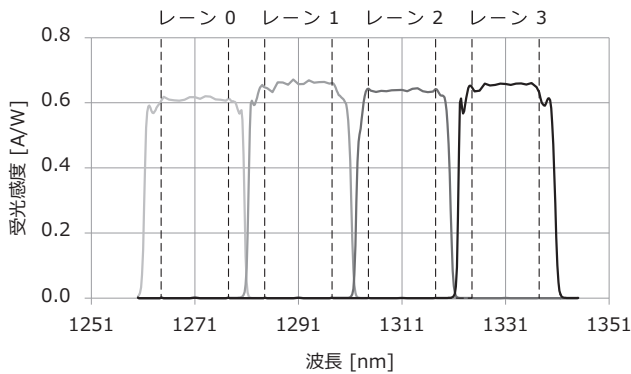


図5 分波特性

4-2 周波数応答特性

低周波数帯の信号強度で規格化した光電気変換利得の周波数特性を図6に示す。3dB帯域幅は40GHz以上と広く、共振周波数を高周波側に移動させたことにより、60GHz以下に共振は見られない。レーン間のばらつきは小さく、53Gbaudの変調信号を十分に受信可能である。図7はクロストークの周波数依存性で、レーンx (x = 0, 1, 2) の光信号がレーン3の電気信号として出力される強度を示し

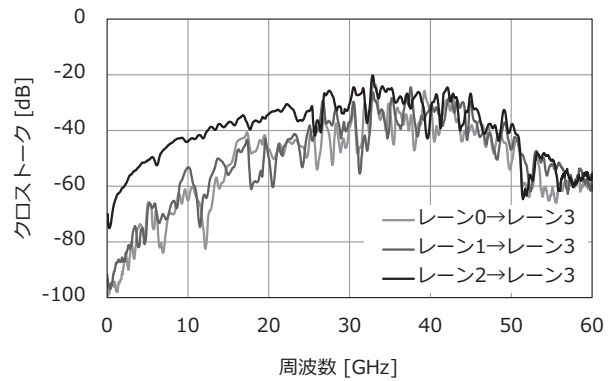
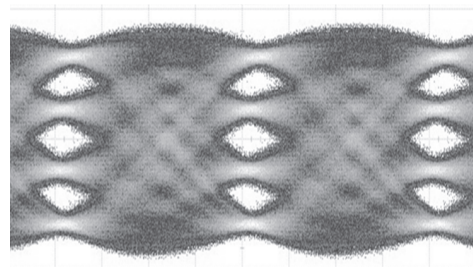


図7 クロストークの周波数依存性

ている。隣接するレーン2からのクロストークであっても-20dB以下と十分に小さく、4-3に示すようにレーン間クロストークの伝送特性への影響は非常に小さい。

4-3 光受信特性

53Gbaud PAM4信号を入力した際のモジュール温度25°Cにおける電気出力波形と符号誤り率の評価を行った。光源は外部変調器付きレーザーダイオードを搭載した光トランシーバを使用した。光波形の消光比は5.4dB、SECQは2.0dBである。図8は、光パワー-9dBm、信号パターン



53.125Gbaud, PRBS15Q, FFE (11タップ)

図8 電気出力波形

PRBS15Q^{*8}の条件で、モジュールの出力波形を11タップのFFE^{*9}で信号処理した波形であり、良好なアイパターンが得られている。

図9に符号誤り率の測定結果を示す。信号パターンはPRBS31Q^{*8}を使用した。符号誤り率が 2.4×10^{-4} となる最小受信感度 (OMA) の規格は、式(1)より-4.0dBm以下となる。最小受信感度は-10.2dBmであり、オーバーロードも4.9dBmと規格を十分に満足している。クロストークがある場合の符号誤り率は、表1のレーン間パワー差 (OMA) の規定に従い、被測定レーンに測定レーンより4.1dB大きい光パワーを入力して評価した。その結果、最小受信感度の劣化は0.1dB以下であり、周波数特性から推測されるようにレーン間クロストークによる特性劣化は小さいことが確認できた。

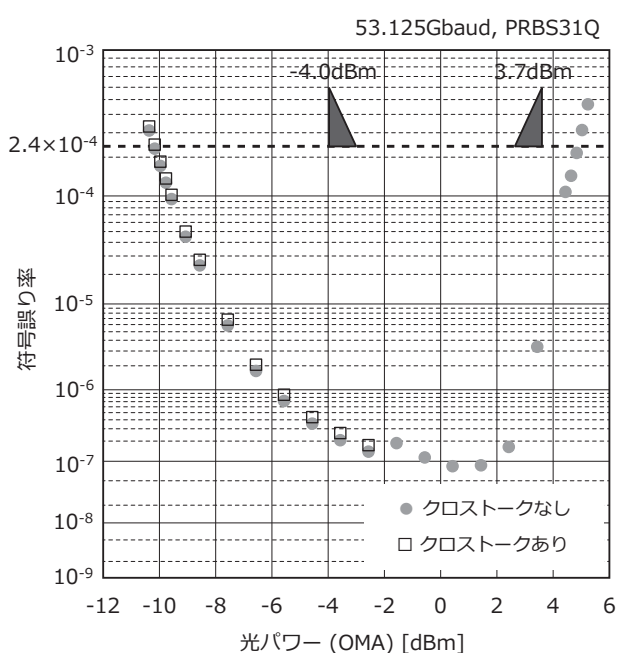


図9 符号誤り率

5. 結 言

伝送速度400Gbit/s、伝送距離2km用途の小型光トランシーバに搭載可能な4ch集積光受信モジュールを開発した。高周波信号の伝達のために設計を最適化することで、53Gbaud PAM4信号に対して、最小受信感度-10.2dBm、レーン間クロストーク0.1dB以下の優れた特性が得られ、400G-FR4規格を満足することを確認した。

用語集

※1 CFP4

C Form-factor Pluggable : 100Gbit/s超用光トランシーバの業界標準の一つ。

※2 QSFP28 / QSFP-DD

Quad Small Form-factor Pluggable : 100Gbit/s超用小型光トランシーバの業界標準の一つ。QSFP-DD (Double Density) は、伝送速度100Gbit/s、4波長の信号光を用いて400Gbit/sを実現する。

※3 MSA

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

※4 CWDM

Coarse Wavelength Division Multiplexing : 波長分割多重技術の一つで、波長間隔が20nmの通信方式。

※5 OMA

Optical Modulation Amplitude : 光変調振幅。

※6 SECQ

Stressed Eye Closure for PAM4: 波形品質の指標の一つ。

※7 フリップチップ実装

基板上へのチップ実装方法の一つ。ワイヤによる接続ではなく、チップ表面の金属端子を直接基板に接合する。

※8 PRBS15Q / PRBS31Q

PRBSnQは、パターン周期が $2^n - 1$ のPAM4シンボル系列。PRBSはPseudo-Random Bit Sequence (疑似ランダムビット列) の略。

※9 FFE

Feed Forward Equalizer : 伝送路の周波数特性による損失を補う方法の一つ。

参考文献

- (1) "100G Lambda Multi-Source Agreement"
<http://100glambda.com/>
- (2) 沖和重、「40ギガビット光分波器集積小型光受信モジュールの開発」、SEIテクニカルレビュー第182号 (2013年1月)
- (3) 川村正信、「40G/100Gbit/s用光分波器集積光受信モジュール」、SEIテクニカルレビュー第186号 (2015年1月)
- (4) 中島史博、「高速(100G/200G/400G用)高感度APDチップ搭載4ch集積受信デバイス」、SEIテクニカルレビュー第192号 (2018年1月)
- (5) K. Nakayama et al., "Very Low Crosstalk Compact Integrated ROSA for 400G-FR4," ECOC2018, Th2.11

執筆者

三井 主成* : 伝送デバイス研究所 主査



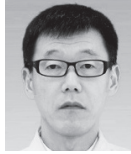
川村 正信 : 伝送デバイス研究所 主席



中山 謙一 : 伝送デバイス研究所



原 弘 : 伝送デバイス研究所 グループ長



*主執筆者