

100Gbit/s 超 40km 伝送用光増幅器搭載 4ch 集積光受信器

4-ch Integrated Optical Receiver Module with Semiconductor Optical Amplifier
for Over 100-Gbit/s and 40km Transmission

前川 享平*
Kyohei Maekawa

三井 主成
Kazuaki Mii

平山 徹
Toru Hirayama

寺西 良太
Ryota Teranishi

原 弘
Hiroshi Hara

スマートフォンなどの高機能な端末の普及やインターネット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、データセンター内の光通信では伝送速度100Gbit/s超の小型光トランシーバが導入されている。さらに、データセンター間の接続など長距離伝送のため、伝送距離の長延化も求められている。当社は、半導体光増幅器（SOA）を搭載することで、40km/80kmの長距離伝送に対応し、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。

To address the needs for increasing data traffic resulting from the widespread use of advanced mobile terminals and the diversification of internet-based services, over 100-Gbit/s optical transceivers have been used in optical communication systems of data centers. Furthermore, there has been a strong demand for extended reach connection between data centers. We have developed a new compact receiver with a semiconductor optical amplifier for 40 km/80 km transmission. This paper describes the design and typical characteristics of the new optical receiver.

キーワード：100GBASE-ER4、半導体光増幅器（SOA）、可変光減衰器（VOA）、光受信モジュール、QSFP28

1. 緒言

近年、スマートフォンなどの高機能な通信端末が広く普及し、様々なインターネットコンテンツの利用が手軽にできるようになっている。さらに、ビッグデータの活用や5Gの実用化に伴い、IoT（Internet of Things）への期待も高まっている。このような背景から、データ通信量は急激な増加を見せており、更なる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内では、伝送速度100Gbit/s超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、QSFP28やQSFP-DD^{*1}などの小型の製品が広く利用されている。一方で、データセンター間のネットワークのように長距離の伝送においては、損失を補償するために半導体光増幅器（Semiconductor Optical Amplifier, SOA）モジュールが使用されているが、光受信モジュールとともに小型光トランシーバへ搭載するのが難しいことが課題であった。

当社伝送デバイス研究所と住友電工デバイス・イノベーション(株)は小型光トランシーバに搭載可能な100Gbit/s超用の4ch集積光受信モジュール^{(1)~(4)}やSOAモジュール⁽⁵⁾を開発してきた。それらの設計をベースとし、光受信モジュールにSOAを搭載することにより、小型かつ100Gbit/s超の伝送速度と40kmの長距離伝送を実現する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。IEEEの802.3baで策定された伝送距離40kmの100GBASE-ER4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おり、100GBASE-ER4では波長1300nm帯のLAN-WDM^{*2}グリッドの4波長を使用する。符号化方式は非ゼロ復帰（Non Return to Zero, NRZ）で、伝送速度は1波長あたり25.78125Gbit/sであり、4波長合計で103.125Gbit/sとなる。

表1 光受信モジュール目標仕様

項目	仕様	単位	
伝送速度	25.78125±100ppm	Gbit/s	
符号化方式	NRZ	—	
波長	レーン0	1294.53 ~ 1296.59	nm
	レーン1	1299.02 ~ 1301.09	
	レーン2	1303.54 ~ 1305.63	
	レーン3	1308.09 ~ 1310.19	
最小受信感度 (OMA ^{*3}) [†]	≤ -21.4	dBm	
オーバーロード (OMA) [†]	≥ +4.5		

† 符号誤り率 = 1×10^{-12} での光パワー

3. 4ch 集積光受信モジュールの構成

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22.6mm×6.7mm×5.3mmで小型光トランシーバQSFP28に搭載可能な大きさを実現している。

図1に4ch集積光受信モジュールの構成を示す。光ファイバと接続するレセプタクルと、SOAや可変光減衰器 (Variable Optical Attenuator, VOA)、フォトダイオード (PD) やトランスインピーダンスアンプ (Transimpedance Amplifier, TIA) などのチップ部品と、光分波器などの光学部品、ペルチェモジュール^{*4}とパッケージから構成される。図2に4ch集積光モジュールの光学系の概要を示す。レセプタクルから入射した光信号は、大入力時にはVOAで減衰され、逆に小入力時にはSOAで増幅される。SOAから出た光は、光分波器内で反射を繰り返し、フィルタにより波長ごとに分離され、各レーンのPDに結合される。PDは裏面入射構造で、裏面に形成したモノリシックレンズに



写真1 4ch集積光受信モジュール

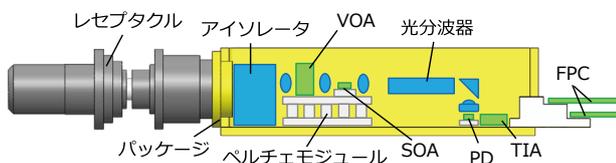


図1 4ch集積光受信モジュールの構成

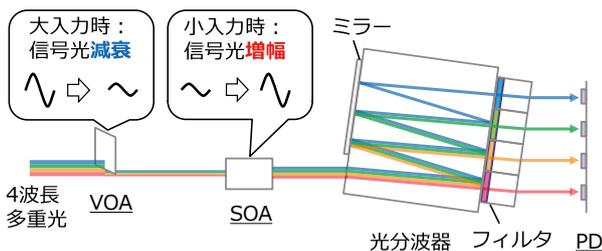


図2 4ch集積光受信モジュールの光学系概要

より有効受光径を拡大しており、広い調芯トレランスを実現している。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フレキシブル基板 (FPC) を介して光トランシーバに伝達される。また、SOAチップは一定の動作温度で駆動できるように、SOAチップ近傍に搭載したサーミスタ抵抗値のフィードバックから温度制御する構成としており、VOA、入出力のレンズとともにペルチェモジュール上に搭載している。VOAはMEMS^{*5}チップで、シャッタを駆動させて光を遮ることによりSOAに入射する光を減衰させる。

4. 光受信モジュール特性

4-1 分波・受光感度特性

図3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、LAN-WDM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。各レーンの波長規格内における変動量は0.5dB以下であり、レーン間のアイソレーションは25dB以上の良好な特性が得られている。

図4に4ch集積光受信モジュールのSOA電流と受光感度の関係を示す。受光感度は、結合損失とSOAの利得とPDの受光感度を含んだ値である。

SOAに流れる電流が増加すると利得が増加するため、受

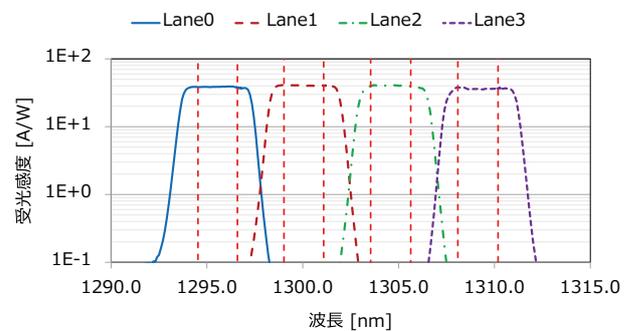


図3 各レーンの分波特性

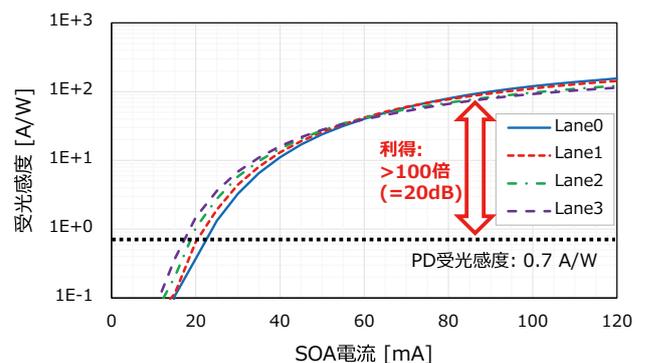


図4 各レーンの受光感度特性

光感度が高くなる。低損失な光学系を実現しており、SOA 電流90mA以上の条件では、PD単体の受光感度が約0.7 A/Wであるのに対して、100倍（20dB）以上高い値が得られている。

4-2 最小受信感度特性

図5に受信モジュールのケース温度25℃、SOAを電流80mA、温度30℃の条件で駆動させた際の、伝送速度25.78125Gbit/s、PRBS31^{*6}のNRZ信号入力時の符号誤り率を示す。符号誤り率=1×10⁻¹²での最小受信感度（OMA）は-25.9dBm以下を示し、目標仕様-21.4dBmに対し4.5dB以上のマージンを有している。また、この結果は各レーン間にパワー差がない状態での結果であるが、測定レーン以外のレーンに4.5dB大きいパワーを入力した場合でも、クロストークによる受信感度劣化は0.5dB以下であることを確認している。

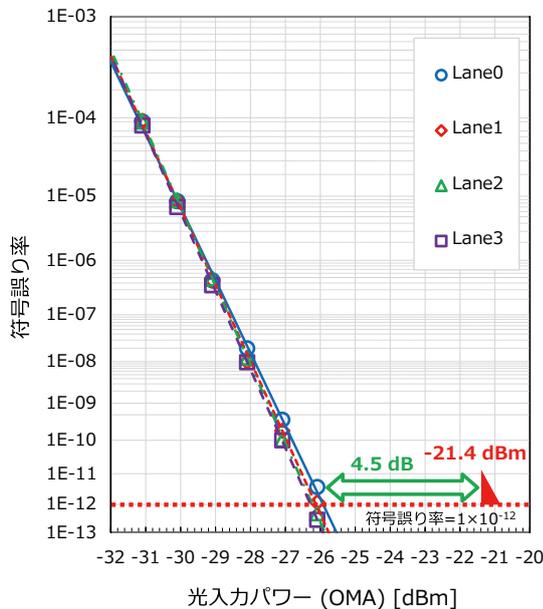


図5 最小受信感度側符号誤り率

4-3 減衰特性・オーバーロード特性

図6にデバイス温度25℃、入力パワー0dBmでのVOAによる減衰特性を示す。3V以下の低電圧で20dBを超える高い減衰量が得られている。

図7にオーバーロード側の符号誤り率を示す。SOA電流は30mAに下げている。それ以外の測定条件は最小受信感度測定時と同様である。VOA非搭載の場合、符号誤り率=1×10⁻¹²でのオーバーロード（OMA）が全レーンで0dBm以上という結果が得られているが、全レーンで規格を満足することはできない。このため、VOAを搭載して入力パワーを減衰させる必要がある。適切にVOAを使用することで、目標仕様+4.5dBmに対して2.4dB高い入力パ

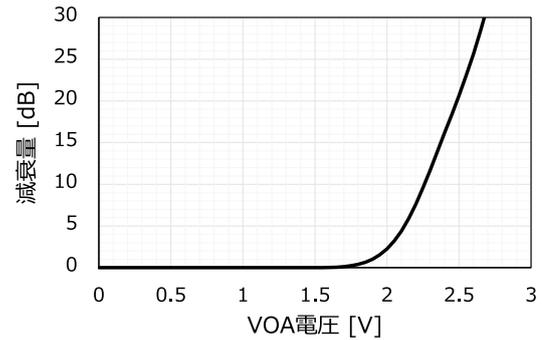


図6 減衰特性

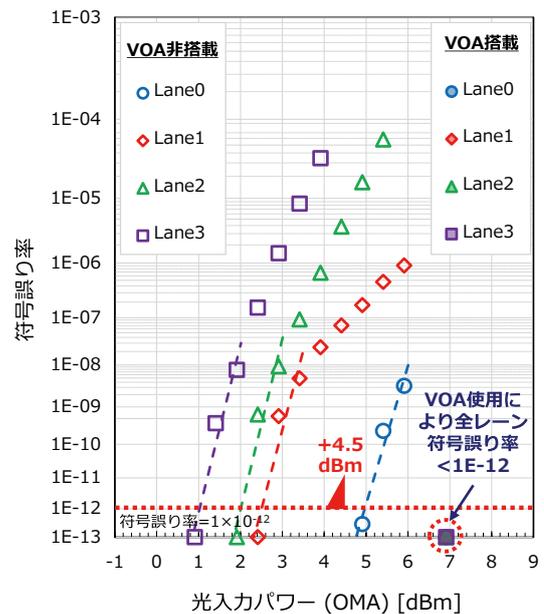


図7 オーバーロード側符号誤り率

ワー+6.9dBmの条件においても、各レーンの符号誤り率が1×10⁻¹²以下であることを確認しており、オーバーロードの規格を十分満足する結果が得られている。

5. 100Gbit/s超への取り組み

5-1 目標仕様

当社では、400Gbit/sの40km伝送への適用も進めている。具体的には、変調速度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を用いる。図8に示すようにPAM4では1シンボルあたり2ビットの情報を伝送できるため、NRZと同じシンボルレートでありながら2倍の情報量を伝送することが可能となる。よって、伝送速度は1波長あたり106.25Gbit/sとなり、4波長合計で425Gbit/sとなる。表2に100G Lambda MSA⁽⁶⁾で標準化が進められている、1波長40km伝送の規格である100G-

ER1-40で求められる仕様を示している。

当社では、すでに伝送距離2kmの400Gbit/s 伝送に対応した4ch集積受信モジュール⁽⁴⁾を開発しており、その設計をベースとし、現在開発中のリニアリティを改善したSOAチップを搭載して評価を行った。

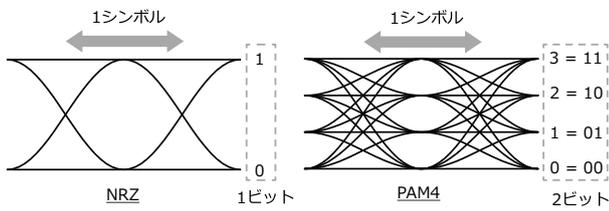


図8 NRZ信号とPAM4信号の概略

表2 100G-ER1-40の仕様

項目	仕様	単位
変調速度	53.125 ± 100ppm	GBaud
変調方式	PAM4	—
波長	1304.5 ~ 1317.5	nm
最小受信感度 (OMA) [†]	TECQ ^{*7} < 1.4dB	≤ -13.8
	1.4dB ≤ TECQ ≤ 3.9dB	≤ -15.2 + TECQ
オーバーロード (OMA) [†]		≥ -2.6

† 符号誤り率 = 2.4×10^{-4} での光パワー

5-2 受信特性

25℃における符号誤り率の評価を行った。光源はレーザダイオードを搭載した光送信モジュールを使用した。光

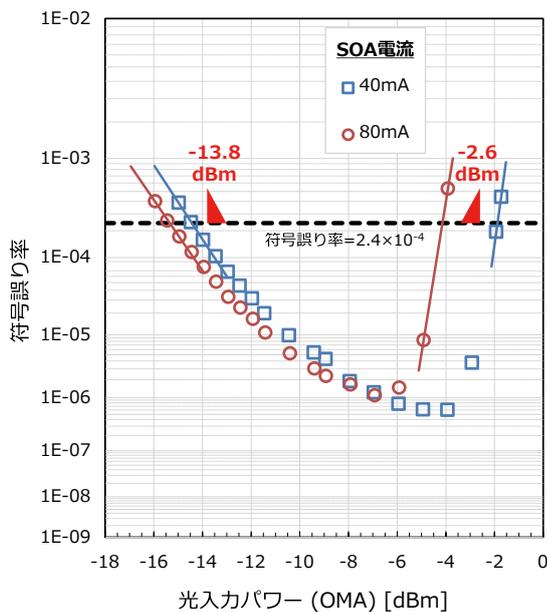


図9 100Gbit/s PAM4信号入力時の符号誤り率

波形の消光比は5.6dB、TECQは1.6dBである。図9に符号誤り率の測定結果を示す。信号パターンはPRBS15Q^{*6}を使用した。最小受信感度はSOA電流80mAの条件で-15.3dBmであり、オーバーロードはSOA電流40mAの条件で-1.9dBmと仕様を満足する結果が得られた。

6. 結 言

当社は、伝送速度100Gbit/s、伝送距離40km用途の小型光トランシーバQSFP28に搭載可能な、SOA搭載4ch集積受信デバイスを開発した。当社設計のSOAチップを搭載することで、高い受光感度を実現し、25.78125Gbit/s、NRZ信号での最小受信感度 (OMA) は-25.9dBm以下と良好な特性を示した。さらにVOAを搭載することにより、100GBASE-ER4規格を満足することを確認した。前方誤り訂正との併用により、伝送距離80kmへの適用も可能と考えている。また、開発中のSOAチップを搭載することで、1波長100Gbit/sの40km伝送規格100G-ER1-40を満足する結果も得られており、4ch使用することで400Gbit/sで40km伝送にも対応可能な見込みを得た。

用語集

※1 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。

※2 LAN-WDM

波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing) 技術の一つで、波長間隔が約5nmの4波長の伝送信号を一本のファイバで伝送させる。

※3 OMA

Optical Modulation Amplitude: 光変調振幅。

※4 ペルチェモジュール

熱電素子の一つ。ペルチェ効果を利用した加熱/冷却素子。

※5 MEMS

Micro Electro Mechanical Systems: 微小電子機械システム。半導体などの基板上に微小なセンサや回路、可動機構などを集積したデバイス。

※6 PRBS31 / PRBS15Q

PRBSはPseudo-Random Bit Sequence (疑似ランダムビット列) の略。
PRBS31は、パターン周期が $2^{31}-1$ のNRZ信号系列。
PRBS15Qは、パターン周期が $2^{15}-1$ のPAM4シンボル系列。

※7 TECQ

Transmitter Eye Closure Quaternary: 波形品質指標の一つ。

参考文献

- (1) 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)
- (2) 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)
- (3) 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)
- (4) 三井主成、「400Gbit/s伝送用小型4ch集積光受信モジュール」、SEIテクニカルレビュー第195号 (2019年7月)
- (5) 寺西良太、「100Gbit/s CFP光トランシーバ搭載用小型半導体光増幅器 (SOAモジュール)」、SEIテクニカルレビュー第184号 (2014年1月)
- (6) "100G Lambda Multi-Source Agreement"
<http://100lambda.com/>

執筆者

前川 享平* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



三井 主成 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 主席



平山 徹 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 主席



寺西 良太 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 主席



原 弘 : 住友電工デバイス・イノベーション(株) 部長補佐



* 主執筆者