

波長多重 11.1Gbit/s プラガブル 小型光トランシーバ (SFP+)

島田 洋二*・井上 真吾・安西 志摩子
河村 裕史・甘利 彰悟・乙部 健二

11.1 Gbit/s Pluggable Small Form Factor Optical Transceiver Module — by Yoji Shimada, Shingo Inoue, Shimako Anzai, Hiroshi Kawamura, Shogo Amari and Kenji Otake — We have developed an SFP+ (Enhanced Small Form Factor Pluggable) optical transceiver module for 11.1 Gbit/s DWDM (dense wavelength division multiplexing) application, which can cover up to 100 km reach over standard single-mode fiber. We have also successfully reduced its total power consumption to less than 1.5 W by utilizing a newly developed laser diode chip. This world's smallest and power-saving DWDM SFP+ optical transceiver will contribute to the downsizing of high density optical transmission equipment.

Keywords: SFP+, DWDM, 11.1 Gbit/s, long haul, low power dissipation

1. 緒言

近年、情報通信のデータ量の増大により幹線系に使用される伝送装置の高ビットレート化や波長多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) ^{*1}化が急速に進められている。これら伝送装置には SFP+ (Enhanced Small Form Factor Pluggable) 等の光トランシーバが搭載されている。従来製品の 10Gbit/s 光トランシーバである XFP (10Gbit/s Small Form Factor Pluggable) と比較して SFP+ は 30 % 以上の小型化を実現しており、伝送装置に搭載できる光トランシーバの数を増やすことが可能となった。その反面熱設計の観点から、使用される SFP+ には低消費電力化が要求されている。

今回、我々はこれら要求に適合した 70°C、11.1Gbit/s で動作する 100km (分散量で 1600ps/nm) 伝送用 SFP+ 波長多重光トランシーバの開発および製品化に成功した。

本稿では、SFP+ の MSA ^{*2}規格⁽¹⁾ Level II 動作の 1.5W 以下での 70°C 動作を可能にした低消費電力化設計と、開発した光トランシーバの特性について報告する。

2. 開発した光トランシーバの構成と諸元

2-1 主要諸元 開発した SFP+ の主要諸元を表 1 に示す。本製品は動作温度範囲 0~70°C、標準シングルモードファイバにて、外付けの電子分散補償回路 (EDC: Electrical Dispersion Compensator) で分散補償を行うことにより、11.1Gbit/s、100km までの伝送を可能とする光トランシーバである。

波長多重光トランシーバでは通信分野の標準策定をおこなう国際電気通信連合 (ITU-T) が定めた波長グリッドに波長を合わせる必要がある。レーザーダイオード (LD: Laser

Diode) の波長は温度依存性があるため、LD を温度制御素子 (TEC: Thermoelectric Cooler) にて 40~50°C の間で調節し ITU-T 規格で定められた中心波長 (グリッド)⁽²⁾ に波長を合わせている。

SFP+ の表面温度 (ケース温度) と LD の温度の差が大きくなると、LD の温度を一定に保つため TEC の消費電力は

表 1 主要諸元

動作ケース温度		0~70°C	
外形寸法		56.5mm × 13.8mm × 8.6mm	
電気インターフェイス		20PIN コネクタ	
伝送速度		9.95/10.3/10.7/11.1Gbit/s	
光送信部	光送信デバイス	EA 変調器レーザ	
	中心波長	1530nm ~ 1565nm	
	波長安定性	± 100pm	
	光出力パワー	-1 ~ 3dBm	
	消光比	9dB 以上	
光受信部	受光デバイス	APD	
	受信感度	10.3Gbit/s	-23dBm 以下 (0ps/nm, 1E-12) -20dBm 以下 (1600ps/nm, 1E-12)
		11.1Gbit/s	-27dBm 以下 (0ps/nm, 1E-3) -24dBm 以下 (1300ps/nm, 1E-3)
	OSNR 耐性	10.3Gbit/s	24dBm/0.1nm 以下 (0ps/nm, 1E-12) 27dBm/0.1nm 以下 (1600ps/nm, 1E-12)
		11.1Gbit/s	15dBm/0.1nm 以下 (0ps/nm, 1E-3) 16dBm/0.1nm 以下 (1100ps/nm, 1E-3)
	オーバーロード	-7dBm 以上	
電源電圧	3.3V ± 5%		
消費電力	最大 1.5W		

大きくなる。そのため動作温度上限（ケース温度70℃）のときSFP+の消費電力が最大となる。一般的に波長制御が不要なTECを内蔵した光トランシーバ、例えば時分割多重（TDM: Time Domain Multiplexing）方式の光トランシーバでは、LDの温度を上限の50℃にできるだけ近づけてLDとケース温度の差を小さくし消費電力を抑えている。対してTECの温度で波長を制御する波長多重光トランシーバではLDの波長ばらつきにより設定温度を40～50℃の間で調整する。LDの温度を50℃から40℃に下げると消費電力はケース温度70℃のときに最大で0.2W増加する。一般的に波長多重光トランシーバではTDM方式の光トランシーバと比較して消費電力を低く抑えることは困難であるが、市場の要求を満たすため消費電力をケース温度70℃で1.5W以下に抑えることを目標とした。

SFP+は受信側の仕様の違いにより、光信号を電気信号に線形に変換して出力するリニアインターフェイス（Linear I/F）と振幅を飽和させることで一定の振幅で出力するリミッティングインターフェイス（Limiting I/F）とに分けることができる。Limiting I/Fは従来のSFP+と同

じ伝送装置のHOSTボードを使用することができる。対してLinear I/FはEDCをHOSTボード側に設置する必要がある。本稿ではEDCをHOSTボード側に設置して伝送特性を改善するLinear I/FのSFP+について説明する。

図1にLinear I/F、図2にLimiting I/Fのブロックダイアグラムを示す。本SFP+は、光送信部、光受信部及び制御部の3つの部分より構成される。以下に詳細を示す。

2-2 内部構成1 光送信部 光送信部は①電気信号を光信号に変換する送信用小型光デバイス（TOSA: Transmitter Optical Sub-Assembly）*3、②電気信号の振幅を制御するレーザダイオードドライバ（LDD: Laser Diode Driver）、③LDの駆動電流を制御する光パワー制御回路、④TOSA内のLDの温度の制御を行う温度制御回路の4つの部分により構成されている。

TOSA外形を図3に示す。電気信号を光信号に変換するTOSAは、0～70℃、11.1Gbit/sまで動作する100km伝送用のEA変調器レーザ（EML: Electro-Absorption Modulator Integrated Laser Diode）を搭載している他TECが内蔵されている。

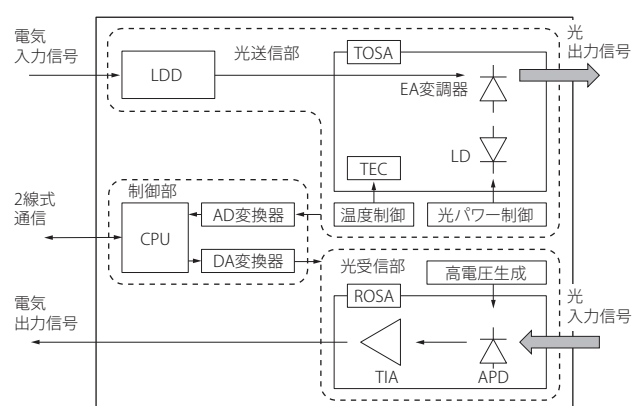


図1 ブロックダイアグラム (Linear I/F)

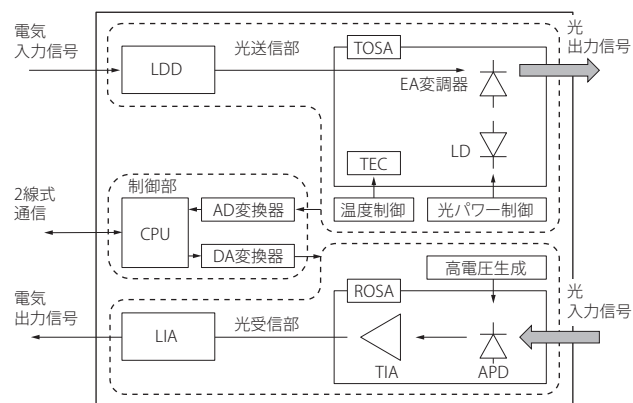


図2 ブロックダイアグラム (Limiting I/F)

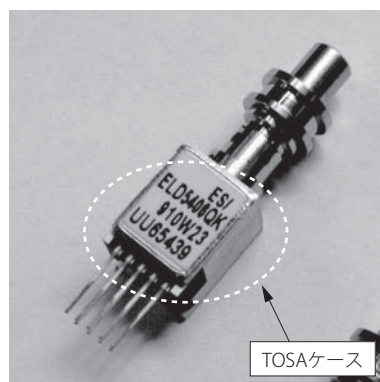


図3 TOSA外形

2-3 内部構成2 光受信部 光受信部は①光信号を電気信号に変換する受信用小型光デバイス（ROSA: Receiver Optical Sub-Assembly）*4、②アバランシェフォトダイオード（APD: Avalanche Photodiode）*5にバイアス電圧を印加する高電圧生成回路の2つの部分により構成されている。

ROSA外形を図4に示す。光信号を電気信号に変換するROSAにはInGaAs APDと電流電圧変換増幅器（TIA: Transimpedance Amplifier）が内蔵されている。

Linear I/FではEDCが出力した電気信号を分散補償し受信感度を改善する。このため、光信号を線形的に電気信号に変換する自動利得制御（AGC: Auto Gain Control）タイプのTIAを使用している。

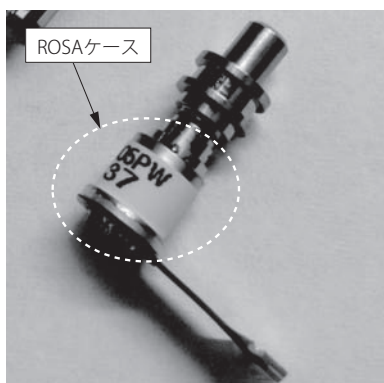


図4 ROSA外形

Limiting I/FではTIAが電圧増幅をおこない、TIAの出力電圧で電気信号からクロック情報を抽出するクロック・データ抽出器(CDR: Clock Data Recovery)を駆動する。しかしTIAの出力ではCDRを駆動するには電圧が不足するためさらに光出力制御増幅器(LIA: Limiting Amplifier)を使いCDRを駆動できる電圧まで増幅している。

2-4 内部構成3 制御部 制御部のブロックダイアグラムを図5に示す。制御部は①SFP+の温度や受信部に入力される光パワーなどの動作状況をモニタしているアナログ-デジタル(AD: Analog-Digital)変換器、②EA変調器駆動電圧やレーザ駆動電流などの制御を行っているデジタル-アナログ(DA: Digital-Analog)変換器、③AD/DA変換器やSFP+全体の動作を監視しているCPUの3つの部分から構成される。また、CPUは2線式通信機能により外部との通信を行うことができ、光トランシーバ外部から内部の動作確認、異常検知、固体識別や各種機能のコントロールを行っている。

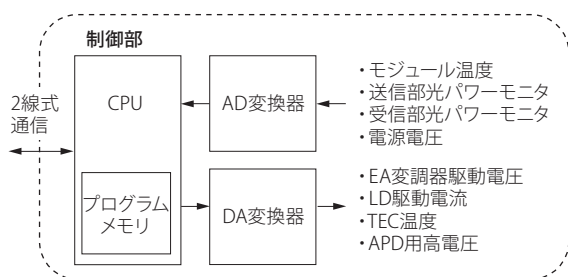


図5 制御部のブロックダイアグラム

3. 低消費電力設計

3-1 従来技術を用いたSFP+の消費電力 図6に従来技術を用いた設計時の消費電力見積りを示す。SFP+の

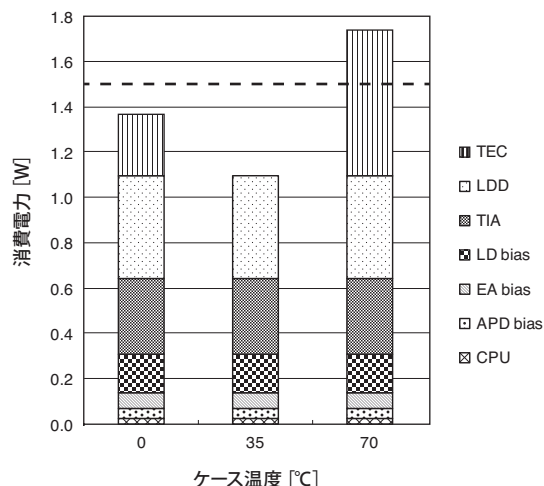


図6 従来技術を用いた場合のSFP+の消費電力

ケース温度が高温になるとLD温度を一定に保つためにTECが冷却素子として働き、TEC電力が上昇する。またケース温度が低温になると、TECは加熱素子として働き、TEC電力が上昇する。

図に示す通り、70°CでのTECの消費電力が全体の1/3を占めている。

従来のLDでは伝送特性が劣化するためLDの温度範囲は35~45°Cに制限されていた。このためケース温度70°Cで動作させる場合は、ケース温度とLDの温度の差が最大で35°Cとなり常温(ケース温度35°C)のときよりも0.65Wも消費電力が増大する。その結果70°Cの全消費電力は1.75Wになり、目標の1.5Wよりも大きくなる結果となった。TEC周辺部以外にもLDD部など消費電力が大きい回路があり、これらの低消費電力化も必須である。

3-2 新たに開発した低消費電力SFP+ 今回開発したSFP+は下記3点の対策を行うことで低消費電力化を実現した。

(1) 高温動作LDチップ

ケース温度70°CでTEC消費電力を0.07W削減
新規に開発したLDを採用し、特性の劣化なく従来チップよりもLDの温度範囲を従来の35~45°Cから40~50°Cへ5°C上げること成功した。

(2) 高効率TEC駆動回路

ケース温度70°CでTEC消費電力を0.1W削減
消費電力が最大になるケース温度70°Cで最大効率になるように最適化したディスクリートのTEC駆動回路を開発し、従来使用していた市販のTEC IC回路と比較して高効率化できた。

(3) LDD, TIAの電源電圧抑制

ケース温度70°CでLDD, TIAの消費電力0.09W削減
低電圧の安定化電源を作り、LDD, TIAへの印加電圧を抑制した。

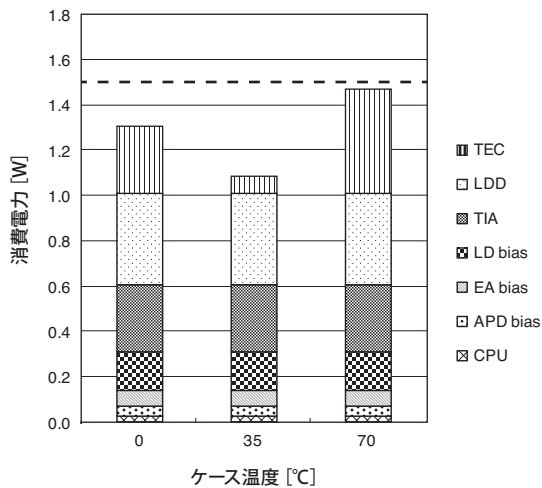


図7 新たに設計したSFP+の消費電力

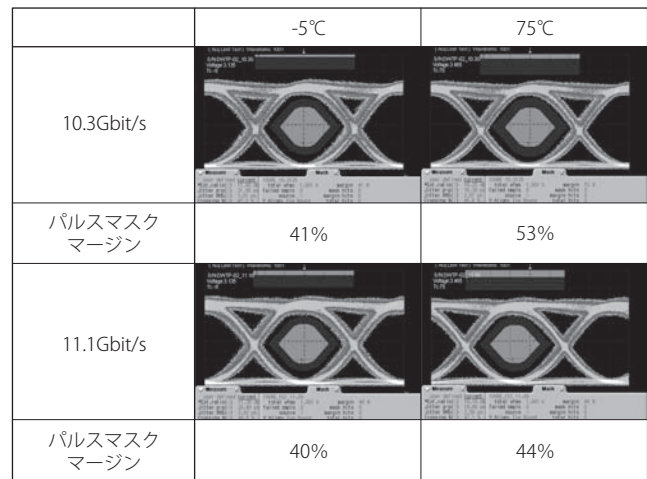


図9 光波形 (PRBS31)

これらの対策を施した結果を図7に示す。従来技術で支配的なTEC周辺やLD駆動回路の消費電力は、新規設計品では70°Cで0.26Wを削減する見積りとなっている。

4. 諸特性

4-1 消費電力 図8に開発したSFP+全体の消費電力を示す。消費電力はケース温度35°Cで最大1.15W、70°Cで最大1.47Wとなり、設計とほぼ同等の消費電力が実現できており、目標の1.5W以下を実現できた。

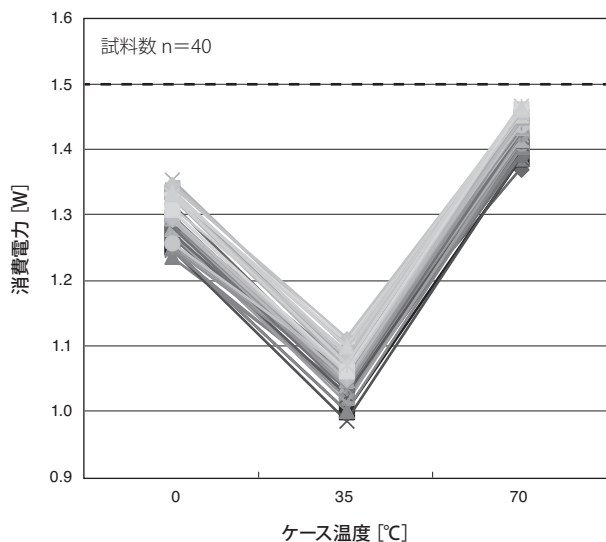


図8 SFP+の消費電力

規定を満足しており、マスク規定に対する波形のマージン40%以上を確保することができた。

4-3 光波長安定度 図10に光波長のケース温度に対する安定度を示す。本製品は100GHz (800pm) 間隔のDWDM*6での使用を想定している。LDの温度をSFP+のケース温度に関わらずTECで一定にすることでLDの波長ケース温度依存性を抑えた。その結果、動作ケース温度の0~70°Cにおいて、常温を基準にした波長のずれを±10pm以下に抑えることができた。

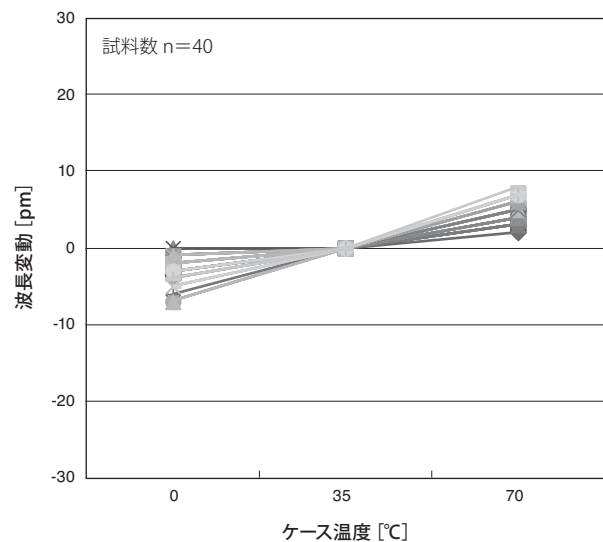


図10 光波長安定度

4-2 光波形 図9に光波形を示す。10.3Gbit/sと11.1Gbit/sにおいて0~70°Cで、10G Ethernetのマスク

4-4 伝送特性 DWDMの伝送装置では複数の波長を1本の光ファイバで伝送するために光信号合成/分配器が使用される。この光信号合成/分配器は一般的にロスが大

大きく 100km もの距離を伝送させるため送信器と受信器の間に光増幅器を設置することが一般的である。光増幅器は自身で発生する増幅された自然放出光（ASE: Amplified Spontaneous Emission）ノイズを発生する。

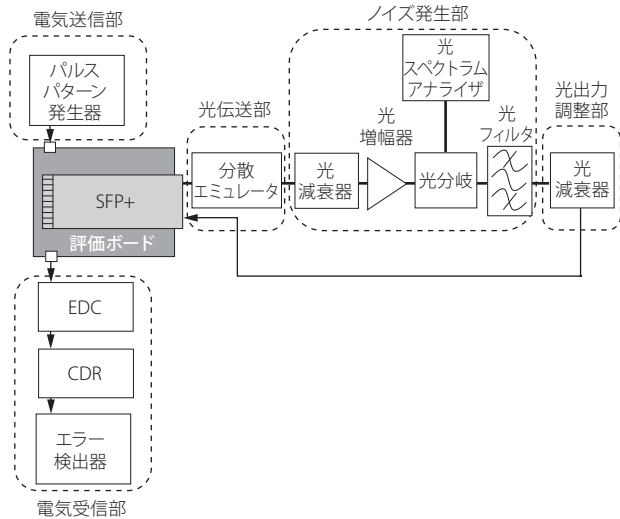


図 11 光伝送特性測定系

ASE ノイズが大きいと受信感度が劣化し、信号レベルとノイズレベルの比率である光信号雑音比（OSNR: Optical Signal Noise Ratio）がノイズの大きさの指標として使用される。OSNR に対する耐性が光トランシーバに要求される。そのため本製品の伝送特性は図 11 に示す測定系を用い評価を行った。低挿入損失な分散エミュレータをファイバの代わりに使用し、ノイズ生成部にて OSNR を設定している。また、SFP+ の出力電気信号は EDC および CDR を通過してエラー検出器で符号誤り率（BER: Bit Error Rate）を測定している。

図 12 に Limiting I/F の SFP+ と Linear I/F の SFP+（本製品）の伝送特性を示す。EDC により 1600ps/nm 伝送で Limiting I/F に比較して受信感度が 3dB 改善している。

35℃ ケース温度での BER グラフを図 13 に示す。10.3Gbit/s、BER 1E-12 では波長分散 0ps/nm での受信感度規格 -23dBm および、1600ps/nm の受信感度規格 -20dBm に対して 3dB 以上のマージンを持った特性となった。

また 11.1Gbit/s、BER 1E-3 でも同様に波長分散 0ps/nm での規格 -27dBm、1300ps/nm 伝送時の規格 -24dBm に対して 3dB 以上のマージンを持った特性を得ることができた。

OSNR への耐力を改善するには EA 変調器へのバイアス電圧を調整する方法がある。OSNR を 24dB/0.1nm に設定し 1600ps/nm 伝送した光信号に対して EA 変調器へのバイアスを浅く (-0.25V) した場合と深く (-0.41V) した場合の光波形を図 14 に示す。

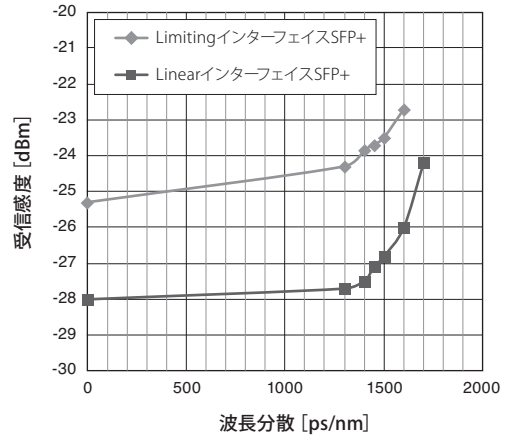


図 12 受信感度比較（10.3Gbit/s, 35℃, PRBS31 ※7）

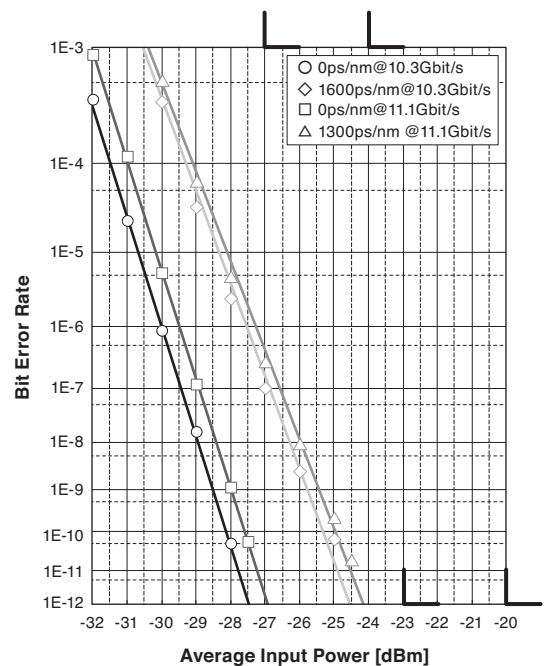


図 13 受信感度（35℃, PRBS31）

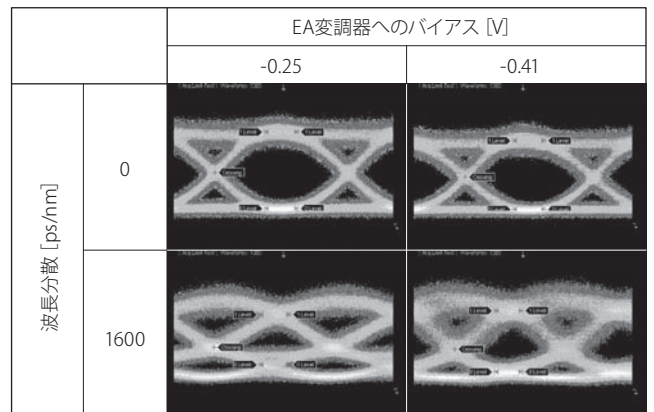


図 14 EA 変調器バイアス比較

EA変調器へのバイアス-0.41Vの方が-0.25Vよりも1600ps/nm伝送後の光波形が大きく開口していることがわかる。大きく開口していると信号レベル1と信号レベル0の判定が容易になりBERは改善する。

しかし、開口が大きくなる半面伝送前のパルスマスクマージンが劣化する。OSNR耐力とパルスマスクマージンはトレードオフの関係にあるためEA変調器へのバイアスを最適化した。

図15に35°Cケース温度でのOSNR耐性を表すBERグラフを示す。10.3Gbit/s、BER 1E-12では波長分散0ps/nmでの規格24dB/0.1nm、1600ps/nm伝送時の規格27dB/0.1nmに対して3dB以上のマージンを持っている。

また11.1Gbit/s、BER 1E-3で0ps/nmでの規格15dBおよび、1100ps/nm伝送時の規格16dBに対してこちらも3dB以上のマージンを持つ特性となった。

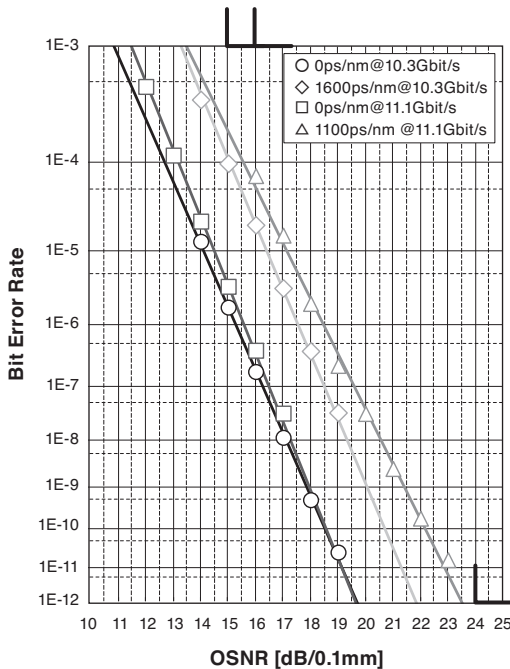


図15 OSNR耐力 (35°C, PRBS31)

5. 結 言

新規に開発したTOSAの採用および新たに回路を設計することによってケース温度70°Cにて1.5W以下の消費電力を実現し100km、11.1Gbit/sまでの伝送を可能とするSFP+DWDMの開発および製品化に成功した。本製品を用いることで伝送装置のボードあたりのSFP+の数量を効果的に増やすことが可能になる。また一本の光ファイバに対して複数波長の信号を流すことが可能なため、敷設済みの既存の光ファイバネットワークに対し低コストで伝送容量

を増やすことができ、情報量増大のニーズに対応できると考えられる。

用語集

※1 WDM

Wavelength Division Multiplexing (波長分割多重方式)：波長毎に異なる信号を変調し、1本のファイバに結合させる。

※2 MSA

Multi-Source Agreement：モジュールサプライヤ各社が、外部仕様を共通化するための協定。

※3 TOSA

Transmitter Optical Sub-Assembly：発光素子と光ファイバとを容易に光学結合させることができるレセプタクルタイプのモジュール。

※4 ROSA

Receiver Optical Sub-Assembly：受光素子と光ファイバとを容易に光学結合させることができるレセプタクルタイプのモジュール。

※5 APD

Avalanche Photo Diode：アバランシェ増倍現象を利用して、光信号を高感度で電気出力に変換するダイオード。

※6 DWDM

Dense Wavelength Division Multiplexing：高密度波長分割多重。1.6nmもしくは0.8nm、0.4nm間隔で波長多重する方式。多重波長数は、16～160程度。幹線系の高性能なWDMシステムに利用される。

※7 PRBS31

Pseudo-random bit sequence: 擬似ランダム・ビット・シーケンスの略。擬似乱数は統計的にはランダムであっても、その生成の仕方から再現性があり予測可能である。この性質を利用して一般的にテストパターンとして使用される。31はデータ・パターン長を表す。

参考文献

- (1) SFF Committee, "SFF-8431 Specifications for Enhanced Small Form Factor Pluggable Module SFP+", Revision 4.1 (July 6, 2009)
- (2) ITU-T勧告, "G694.1 Spectral grids for WDM applications: DWDM frequency grid" (June 13, 2002)

執筆者

島田 洋二* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
光コンポーネント事業部



井上 真吾 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
電子デバイス事業部



安西志摩子 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
光コンポーネント事業部



河村 裕史 : 伝送デバイス研究所



甘利 彰悟 : 伝送デバイス研究所



乙部 健二 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
光コンポーネント事業部 課長



*主執筆者