

今井雄大*
八田竜夫**
森田佳道*

400Gbps小型集積EML-TOSA

400Gbps Compact Integrated EML - TOSA

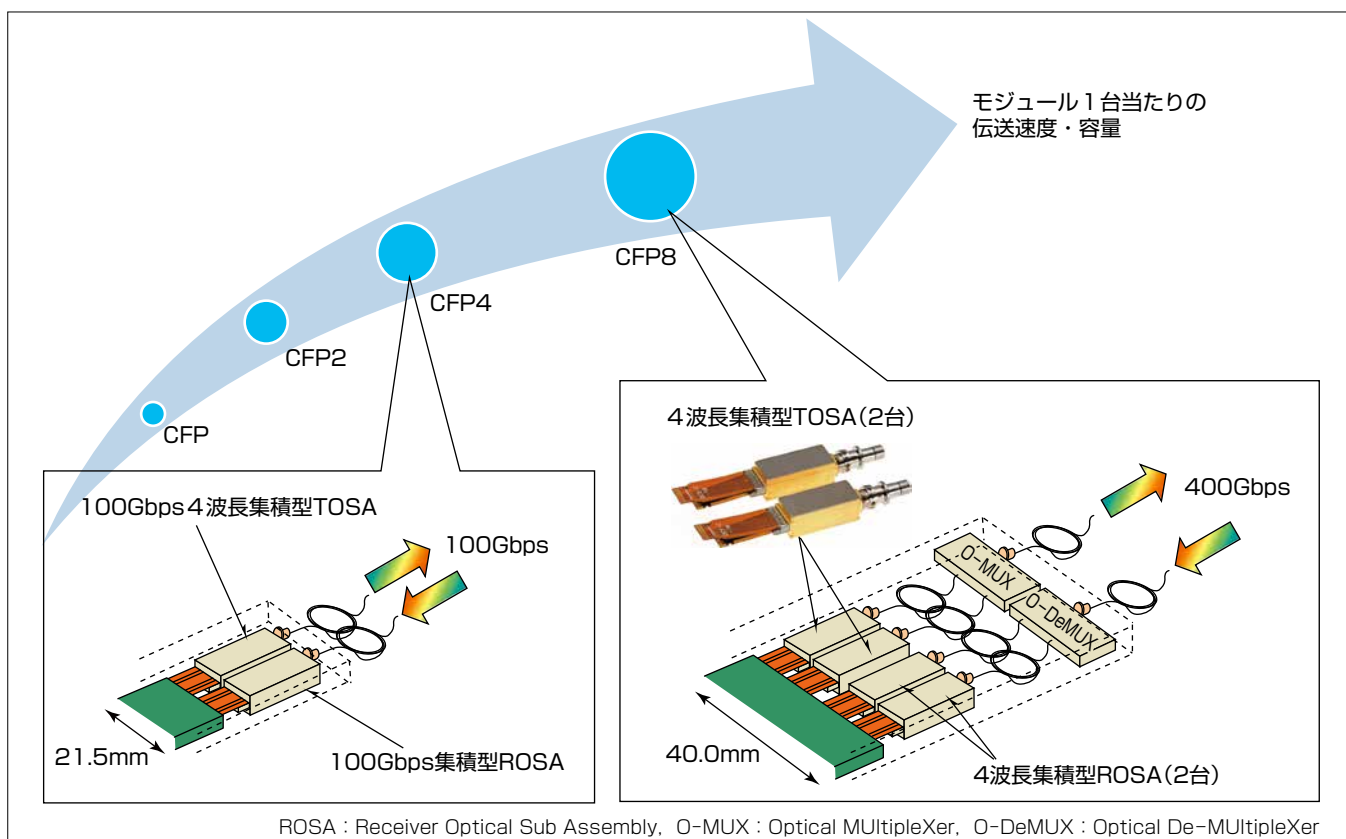
Yudai Imai, Tatsuo Hatta, Yoshimichi Morita

要旨

近年のスマートフォンやタブレットパソコンなどの携帯端末の普及や情報のクラウド化に伴い、データ通信量が急激に増大し、光ファイバ通信機器収容局(データセンターなど)内の伝送速度の高速化と大容量化が求められる。400Gbps光ネットワークの導入が急速に進んでいる。データセンター間を結ぶ高速ネットワークや、メトロネットワークでは、伝送装置内での高密度実装の要求に対応するためのプラットフォームの一つとして、CFP (Centum gigabit Form-factor Pluggable) 8(縦102×横40(mm))などのトランシーバサイズへの移行が進んでおり、400Gbps伝送に対応する小型の送信デバイスに対する要求が高まっている。400Gbpsの送信モジュールの方式の一つとして、25Gbpsで駆動する四つの EML (Elec-

tro-absorption Modulated Laser) と各EMLからの光を平行光化するレンズ及びその光を合波する光合波器とを一つのパッケージに内蔵する構成の小型モジュールを2台(8波長)使用し、さらに伝送時の変調方式の変更によってモジュール1台当たりの伝送容量を増やす方式がある。

今回開発した400Gbps小型集積EML-TOSA (Transmitter Optical Sub Assembly) では、CFP4プラットフォーム対応の100Gbps小型集積EML-TOSAと同サイズの短波長用TOSAと長波長用TOSAの二つを組み合わせ、変調方式にPAM-4 (Pulse Amplitude Modulation-4) を採用することで、8波長で400Gbps(1波長当たり50Gbps)の大容量高速通信を実現した。また、高出力かつ高消光比であるEMLを搭載することで、伝送距離10kmを実現した。



光トランシーバの小型化・大容量化

CFPとは100Gbpsの通信に使用される光トランシーバの業界標準規格の一つである。初期のCFPから、CFP2、CFP4とより小型になる光トランシーバの標準化が進められてきた。CFP8はそれに反してCFP4より約2倍のサイズとなっているが、伝送容量は4倍と規定されている。

1. ま え が き

近年のスマートフォンやタブレットパソコンなどの携帯端末の普及や情報のクラウド化に伴い、データ通信量が急激に増大し、光ファイバ通信機器収容局(データセンターなど)内の伝送速度の高速化と大容量化が求められている。急増するトラフィックに対応していくためには、伝送装置内のラインカード当たりの実装密度を更に高める必要があり、必然的に光トランシーバにも更なる大容量化と高速化が求められている。これまでは伝送容量100Gbps光トランシーバが主流であったが、高速化・大容量化のニーズに応えるため、伝送容量400Gbpsトランシーバに2台のTOSA(8波長)で適合する製品を開発した。

2台のTOSAにはそれぞれ短波長帯(1,270~1,290nm)と長波長帯(1,290~1,310nm)で発光するEMLが四つずつ搭載されており、これらは新しく採用したPAM-4変調方式を用いて各50Gbpsで変調される。四つの出射光はTOSA内部で高精度に固定されたレンズと波長多重フィルタによって束ねられ、さらに2台のTOSAそれぞれからの出射光をTOSA外部のO-MUXで合波し、1本のSMF(Single Mode Fiber)に入射させることで、トランシーバ内で8波合波による400Gbps伝送を実現する方式になっている。

400Gbps伝送を実現するためには、本稿に述べる方式(50Gbps×8λ)ではなく、搭載されるEML素子当たりの伝送容量を2倍(50Gbps)にし、PAM-4変調方式を採用する(100Gbps×4λ)方式も考えられるが、TOSAとしての高周波特性(帯域)を2倍近く向上させる必要があり、変調器を駆動するドライバ回路や、変調器自身の広帯域化に課題が多い。今回開発した400Gbps小型集積EML-TOSAでは、既存の製品である100Gbps小型集積EML-TOSAの構造的な特徴や生産方法を踏襲することで、高品質な光出力波形、低消費電力などの特性面でのメリットを確保しつつ、開発コストの抑制を図っている。また10km以上の伝送距離をサポートできる400Gbps光デバイスとしての期待も高まっている⁽¹⁾。

本稿では、400Gbps小型集積EML-TOSAの設計結果と評価結果について述べる。

2. 製品の仕様

表1に400Gbps小型集積EML-TOSA(1台当たり)の主要な電気・光特性の仕様を示す。IEEE(米国電気電子技術者協会)が定める伝送速度400Gbps、伝送距離10km、8波長のイーサネット標準規格である400GBASE-LR8に準拠した仕様となっている。

動作ケース温度範囲は-5~80℃であり、PAM-4変調方式での動作(50Gbps/λ)が可能である。また短波長用

表1. 主要な電気・光特性の仕様

	最小	最大	
伝送速度(Gbps)	-	53.125(PAM-4)	
動作ケース温度(℃)	-5	80	
レーザ温度(℃)	50	60	
レーザ電流(mA)	40	100	
平均光出力(dBm)	-1.3	1.6	
消光比(dB)	8	-	
光変調振幅(OMA)(dBm)	0.32	3.4	
レーン間光出力差(dB)	-	2	
光波長(短)(nm)	L0	1272.83	1274.26
	L1	1277.17	1278.61
	L2	1281.53	1283.00
	L3	1285.93	1287.41
光波長(長)(nm)	L4	1294.53	1296.59
	L5	1299.02	1301.09
	L6	1303.54	1305.19
	L7	1308.09	1310.19

OMA : Optical Modulation Amplitude

TOSAと長波長用TOSAの違いは波長だけであり、その他の仕様は同一である。

3. 製品の構成

図1に400Gbps小型集積EML-TOSAの外観を示す。パッケージは金属とセラミックが一体となったパッケージを採用している。電気信号のインタフェースには、変調信号を通すRF(Radio Frequency)接続用とLD(Laser Diode)・PD(Photo Diode)・TEC(ThermoElectric Cooler)へ給電するDC(Direct Current)接続用の2枚のFPC(Flexible Printed Circuits)でパッケージと接続する。従来、パッケージにリード端子を設けてFPCと接続していたが、パッケージを小型化するためセラミック上の狭ピッチ化された金属パターン上にFPCを直接接続する。

RF接続用のFPCには、信号線がFPCの内層に配置される3層構造を採用した⁽²⁾。これによって接続部の電極間隔を広げ、ショートを回避しつつ理想的なインピーダンス整合を実現している。

DC接続用のFPCはトランシーバの基板側に実装されたFPCコネクタに対応する形状及び電極配置になっており、基板との接続を容易にしている。光出力インタフェースとしてはLC(Local Connector)レセプタクルを採用している。

1台当たりのパッケージ部分のサイズは、15.0×6.5×5.4(mm)になっており、2台でCFP8トランシーバに搭載可能なサイズになっている⁽³⁾。

図2に回路ブロック図、表2にFPCの入力端子一覧を示す。TOSA内部に四つのEMLとそれぞれの光出力をモニタする四つのPD、EMLを一定の温度で制御するためのTECと温度をモニタするためのサーミスタが内蔵されている。TECで発生した熱量は、パッケージ下面を通して排熱する構造となっている。

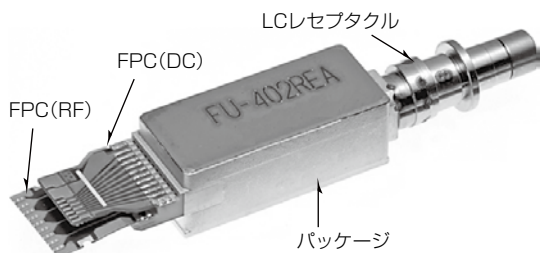
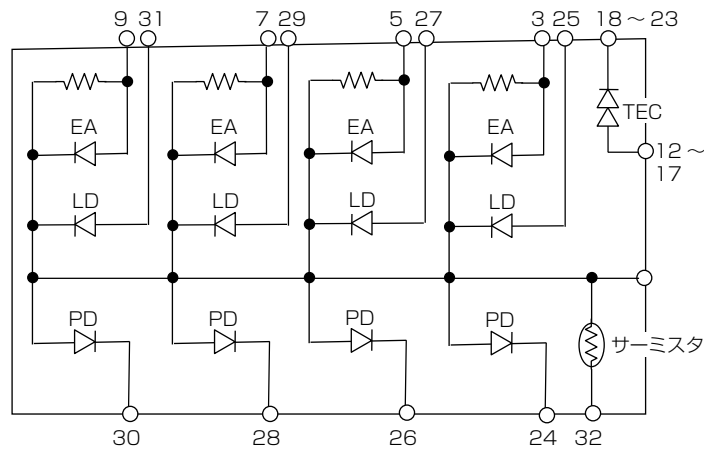


図1. 400G小型集積EML-TOSA



GND(パッケージとは分離) : 1, 2, 4, 6, 8, 10, 11, 33, 34

GND : GrouND, EA : Electro Absorption

図2. 回路ブロック図とFPCの入出力端子

表2. FPCの入出力端子一覧

番号	機能
1	GND
2	GND
3	EA(Anode) - L3
4	GND
5	EA(Anode) - L2
6	GND
7	EA(Anode) - L1
8	GND
9	EA(Anode) - L0
10	GND
11	GND
12~17	TEC(Anode)
18~23	TEC(Cathode)
24	PD(Cathode) - L3
25	LD(Anode) - L3
26	PD(Cathode) - L2
27	LD(Anode) - L2
28	PD(Cathode) - L1
29	LD(Anode) - L1
30	PD(Cathode) - L0
31	LD(Anode) - L0
32	Thermistor
33~34	Thermistor - GND

4. TOSA内部構造

図3に集積TOSA内部での光学系の概念図を示す。パッケージ内には四つのEML、レンズ、及び空間光学系合波器が集積されている。光合波器は3枚のBPF(Band-Pass

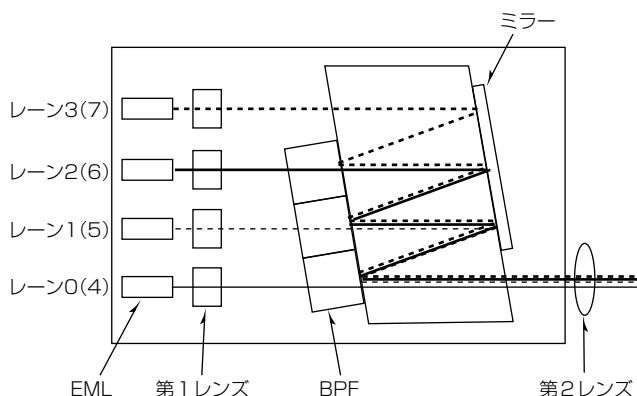


図3. 集積TOSA内部での光学系の概念図

Filter)と1枚のミラーで構成されており、それぞれ土台となるガラス材に固定されている。

この製品は2枚レンズの光学系を採用しており、パッケージ内部に第1レンズ、パッケージの外側に第2レンズが実装されている。

またEML素子先端部に設けられたスポットサイズ変換器によって出射する光のスポットサイズを広げており、SMFに結合するためのレンズの倍率を低くすることが可能になっている。これによって実装に要求されるトレランスを緩和すると同時に高い光結合効率を実現している。

第1レンズを通過したコリメート光は、空間光学系合波器に入射され、BPFとミラー間を多重反射することによって、レーン0(4)、1(5)、2(6)、及び3(7)の4波長が合波される⁽⁴⁾。

5. PAM-4変調方式

図4にPAM-4変調時の光波形を示す。先に述べたように、400Gbps小型集積EML-TOSAでは伝送容量を大きくするために、変調方式としてPAM-4が採用されている。

従来の変調方式であるNRZ(Non-Return-to-Zero)が、“0”と“1”から成るビット列をそのまま二つの電圧レベルのパルス信号として変調して伝送する方式(2値変調)であるのに対し、PAM-4は“0”と“1”から成るビット列を“00”“01”“10”“11”の四つの電圧レベルのパルス信号として変調して伝送する方式(4値変調)であり、単位時間当たりの伝送容量は2倍になる。

しかしながらPAM-4信号は中間レベルの複雑な遷移などから従来の2値信号のアイパターンとは異なる対応が必要になる。例えば信号品質に対しても、2値のアイ開口(NRZの光波形)に対しては多少のオーバーシュートやアンダーシュートは許容されるが、4値では中段のオーバーシュートやアンダーシュートは上下段のアイ開口を妨げ、通信品質の劣化を引き起こす可能性がある。

そこで、NRZのアイマスク試験に相当する、三つのア

イ開口の度合いを示すTDECQ(Transmitter and Dispersion Eye Closure Quaternary for PAM-4)という評価項目がある。TDECQとは、規定されたUI(Unit Interval)での信号の分布と、光出力のしきい値という二つの要素から求めることができる、通信品質を数値化した値のことである。TDECQについての考え方を図5に示す。

具体的には、PAM-4変調波形に対し、波形の交点の平均から0 UIと1 UIが決定され、そこから中心が0.45UIと0.55UIで幅が0.04UIのヒストグラムウィンドウが一意に規定される。そのUIでの信号分布ヒストグラムにガウシアンノイズを加算したヒストグラムと、OMAとP_{ave}(平均光出力)から定まるしきい値P_{th}との交点が信号誤り率であり、その信号誤り率から求まる値がTDECQである。

つまり定義は違うが、TDECQ評価もNRZ変調方式波

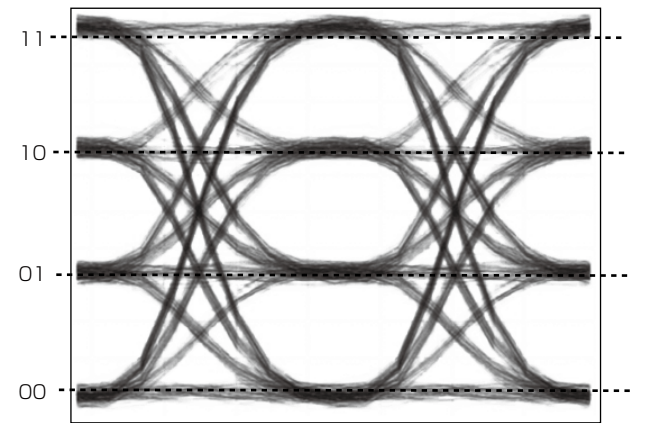
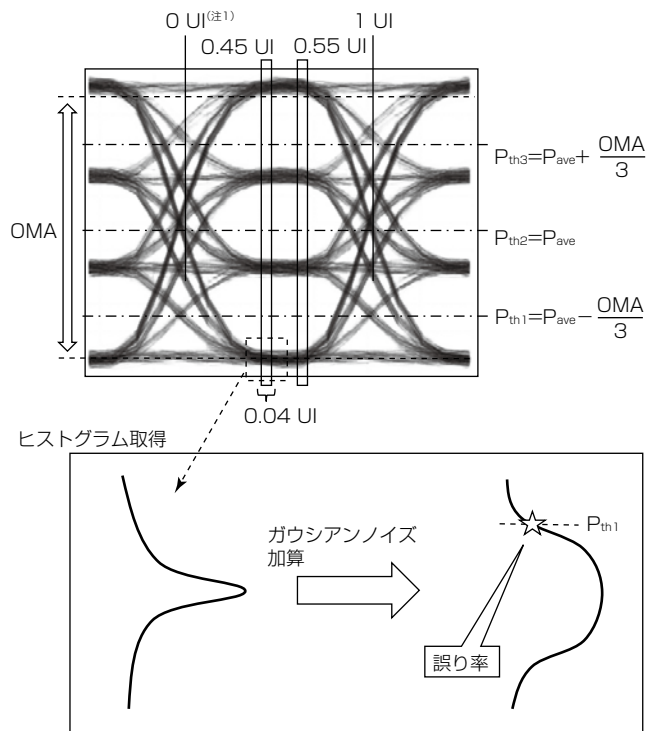


図4. PAM-4変調時の光波形



(注1) デジタル信号(ビット列)の一つのビットの長さに対応する時間

図5. TDECQの考え方

形に対するアイマスク試験と同様に、誤り率、ひいては通信品質を評価しているということになる。

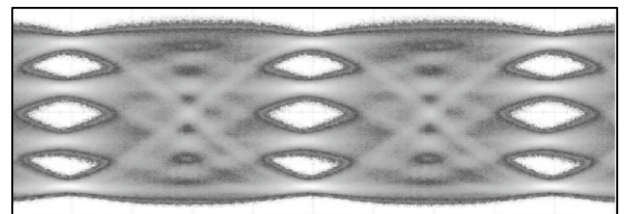
このTDECQの規格については、標準化活動を行う米国電子学会(IEEE)で3.3dB以下と規定されている⁽⁵⁾。

6. 評価結果

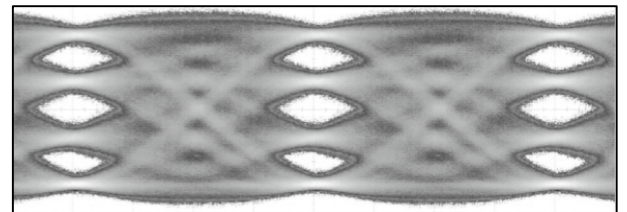
図6に実測した光波形(短波長側)を、表3に光波形の評価結果を示す。EMLは全レーンを同時にPAM-4変調している。全レーン共にEA変調器の電圧振幅が1.40Vの条件で8 dB以上の消光比と、2.7dB以下のTDECQの良好なアイ開口特性が得られている。

図7に素子駆動温度を60℃に設定した場合の、2台のTOSAのTEC消費電力の合計とケース温度の関係を示す。

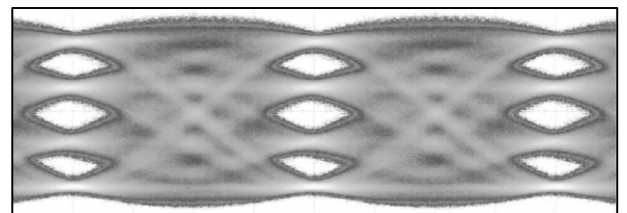
TOSA 1台当たりのTEC消費電力は100Gbps小型集積



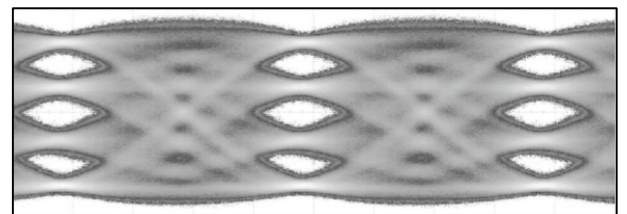
(a) レーン0



(b) レーン1



(c) レーン2



(d) レーン3

図6. 光波形(短波長側PAM-4駆動)

表3. 光波形(PAM-4)の評価結果

	L0	L1	L2	L3
EA変調電圧(V)	1.40	1.40	1.40	1.40
消光比(dB)	8.50	9.00	8.50	8.60
TDECQ(dB)	2.40	2.61	2.67	2.55

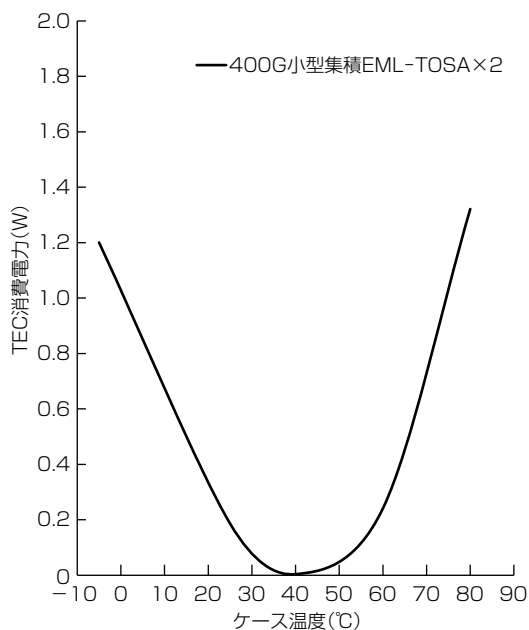


図7. TEC消費電力(LD動作電流：100mA時)

EML-TOSAと同等で、-5~80℃の動作温度範囲でのTEC消費電力を2台で1.3W以下に抑えられており、伝送容量の増大に対応しつつ、消費電力の増加も抑えることができる。

7. むすび

今回、既存の製品である100Gbps小型集積EML-TOSAの構造や生産方法を踏襲し、かつPAM-4という新しい変調方式を採用することによって、低消費電力性やIEEEのTDECQ規格に適合した良好な光出力波形(伝送品

質)等の特性を実現しつつ、CFP8に搭載可能な、2台のTOSAで400Gbpsの大容量高速伝送に対応する小型集積EML-TOSAを開発した。

この製品によって、今後急速に市場が拡大していくと見られている400Gbpsネットワークでの、光トランシーバの普及に貢献する。またこの製品で得たPAM-4変調方式に対する知見を生かし、QSFP-DD(Quad Small Form-factor Pluggable Double Density)プラットフォームに搭載可能な、更に小型のTOSAの開発に取り組み、トランシーバの更なる小型化に貢献してゆく。

参考文献

- (1) Shirao, M., et al.: A miniaturized 43 Gbps EML TOSA employing impedance matched FPC connection, OFC 2013, OTh4H.6 (2013)
- (2) Birk, M., et al.: First 400GBASE-LR8 interoperability using CFP8 modules, OFC 2017, Th5B.7 (2017)
- (3) CFP-MSA
<http://www.cfp-msa.org/>
- (4) 村尾覚士, ほか: 高出力レーザ高精度調芯手法を用いた空間光学系集積小型100GbE光送信モジュールの開発, 電子情報通信学会, 2015年レーザ・量子エレクトロニクス研究会予稿 (2015)
- (5) IEEE Std 802.3bs: Media Access Control Parameters, Physical Layers and Management Parameters for 200Gb/s and 400Gb/s Operation (2017)