

データセンタ向け 53GBaud 変調器集積レーザ

53 GBaud Electro-Absorption Modulator Integrated Lasers for
Intra-Data Center Networks

本田 昌寛*
Masahiro Honda

田村 彰
Akira Tamura

高田 幹
Kan Takada

櫻井 謙司
Kenji Sakurai

金森 宏徳
Hironori Kanamori

山路 和宏
Kazuhiro Yamaji

情報通信量の急増に対応するため、データセンタでは400Gbit/s光トランシーバの導入が始まっており、高性能な電界吸収型変調器集積レーザ（Electro-absorption Modulator integrated Laser: EML）が求められている。今回我々は、53GBaud-PAM4動作可能な1271/1291/1311/1331nm帯のEMLを開発し、4波長帯全てで400Gbit/s光トランシーバの要求仕様を満たすことを確認した。本稿では、今回開発したEMLの構造や諸特性について報告する。

To cope with the rapid increase in data traffic, 400 Gbit/s optical transceivers have been introduced in data center optical communication systems, requiring high-performance electro-absorption modulator integrated lasers (EMLs). We have developed four EMLs with center wavelengths of 1271, 1291, 1311, and 1331 nm, which meet the specifications for 400 Gbit/s optical transceivers. This paper describes the design and typical characteristics of these new EMLs.

キーワード：EML、53GBaud、PAM4、データセンタ、400Gbit/s光トランシーバ

1. 緒言

スマートフォンの普及やSNS・動画配信サービスの拡大、また、新型コロナウイルス感染症に伴うテレワークの浸透等により、情報通信量は増加の一途を辿っている。このトレンドに対応するため、データセンタ内の光ネットワークでは、400Gbit/s光トランシーバを導入する動きが本格化している。400Gbit/s光トランシーバには様々な規格があるが、DR4^{*1}やFR4^{*2}といった規格では、変調速度53GBaudのPAM4^{*3}動作（伝送速度=106Gbit/s）に対応した電界吸収型変調器集積レーザ（Electro-absorption Modulator integrated Laser: EML）が使用される。DR4では1311nm帯のEMLを4個、FR4では1271/1291/1311/1331nm帯のEMLをそれぞれ1個ずつ用いて、400Gbit/s伝送を実現する。

住友電工デバイス・イノベーション(株)は、これまで10Gbit/sや25Gbit/s動作に対応したEMLを開発・量産してきた^{(1)~(3)}。それらをベースとし、今回我々は、53GBaud-PAM4動作に対応したEML（以下、53GBaud-PAM4 EML）を1271/1291/1311/1331nmの4波長ラインナップで開発した。

2. デバイス設計

2-1 目標仕様

表1に目標仕様を示す。IEEE802.3cuで策定された400GBASE-FR4規格を参考にした。1271/1291/1311/1331nm帯を、それぞれLane0/1/2/3と呼んでいる。相対

表1 目標仕様

Parameter	Specification	Unit
Signaling rate	53.125 ± 100 ppm	GBaud
Modulation format	PAM4	-
Wavelength	Lane0	1264.5 to 1277.5
	Lane1	1284.5 to 1297.5
	Lane2	1304.5 to 1317.5
	Lane3	1324.5 to 1337.5
Average relative intensity noise	≤ -147	dB/Hz
3dB bandwidth	≥ 35	GHz
TDECQ	≤ 3.4	dB
Optical modulation amplitude	≥ 5.5	dBm
Extinction ratio	≥ 3.5	dB

強度雑音（Relative Intensity Noise: RIN）とは、レーザ光のノイズの大きさを表す指標である。TDECQとはPAM4光波形の品質を表す指標であり、RINを小さく、3dB帯域を広くすることで、その値を小さくすることができる。

2-2 デバイス構造

今回開発した53GBaud-PAM4 EMLを写真1に示す。左側が単一モードで発振する分布帰還レーザ、右側が変調器である。レーザには直流電流を流し一定強度で発光させ、変調器に高周波電気信号を印加することで高周波光信号を生み出す。

EMLの断面模式図を図1に示す。n型のInP基板の上に、有機金属気相成長法により各半導体層を成長した。レーザ

活性層・変調器吸収層ともに、多重量子井戸 (Multiple Quantum Well: MQW) からなっている。これらはそれぞれ別の構造を持つMQWであり、バットジョイント成長技術により両者を接続した。バットジョイント部での光の反射・散乱を抑えるため、レーザ部と変調器部での光強度分布が良く重なるようにしている。表面保護膜や端面膜の材料には、耐湿性の高い誘電体を採用した。また、戻り光の影響を抑えるために出射側端面には反射防止膜を設け、反対側の端面には光出力改善のために高反射膜を設けている。

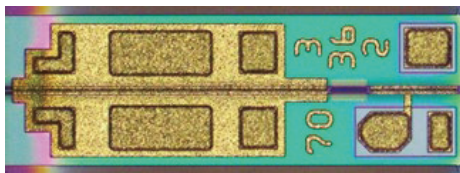


写真1 53GBaud-PAM4 EML

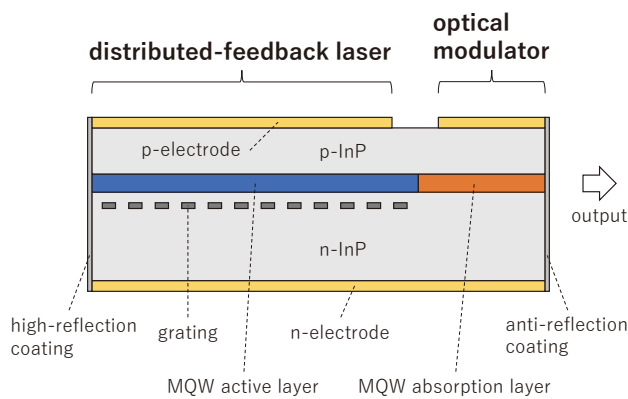


図1 EMLの断面模式図

2-3 レーザ設計

ノイズが小さく、光出力が高いレーザを実現するためには、レーザMQWの最適化が必要である。図2に、レーザMQWのバンド模式図を示す。伝導帯側・価電子帯側ともに、井戸の深さが重要である。まず伝導帯側であるが、井戸は深い方が好ましい。井戸が浅いと、軽い電子が井戸から飛び出し、諸特性の悪化を引き起こすためである (電子のオーバーフロー、図2 (a) 参照)。特に、バンドギャップを大きくする必要がある Lane0 において注意しなければならない。次に価電子帯側であるが、井戸は浅い方が好ましい。正孔は電子よりも重いいため、井戸が深いと p 側の井戸にしか正孔が注入されず、諸特性が悪化してしまう (正孔の不均一注入、図2 (a) 参照)。今回我々はMQWの構造パラメータを最適化し、伝導帯側の井戸が深く、価電子帯側の井戸が浅い、図2 (b) に示したようなMQWを実現した。

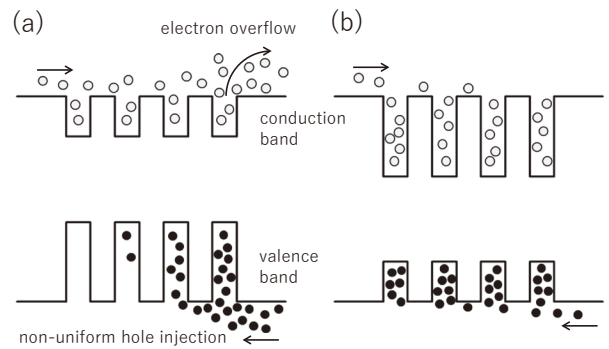


図2 レーザMQWのバンド模式図

2-4 変調器設計

まず、変調器の動作原理について説明する。図3 (a) は、左が変調器への印加電圧 (V_{MOD}) が0Vのとき、右が逆方向電圧を印加したときの、変調器量子井戸と波動関数の模式図である。逆方向電圧を印加することで、バンドギャップは小さくなる。これを量子閉じ込めシュタルク効果 (Quantum Confined Stark Effect: QCSE) と呼ぶ。図3 (b) には、光吸収スペクトルの模式図を示している。 V_{MOD} が0Vのときは、吸収スペクトル端とレーザ発振波長 (λ_{LD}) が離れているため、変調器MQWはレーザ光をほとんど吸収しない。対して逆方向電圧を印加すると、QCSEにより吸収スペクトル端が長波側にシフトし、変調器MQWがレーザ光を吸収するようになるため、光出力が低くなる。すなわち、変調器に印加する電圧を変えることで、光出力をコントロールすることができる。

3dB帯域が広く、消光比が高い変調器を実現するためには、 $\Delta\lambda$ (レーザ発振波長と吸収スペクトル端の差、

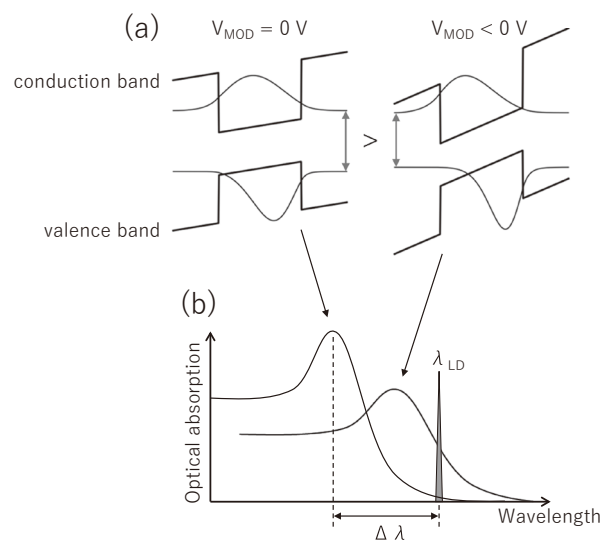


図3 変調器の動作原理 (a) 変調器量子井戸と波動関数、(b) 光吸収スペクトルの模式図

図3 (b) 参照) と変調器サイズが重要なパラメータとなる。 $\Delta\lambda$ が小さいと、 V_{MOD} が0Vのときでもレーザ光の大部分を変調器が吸収し、光出力が極端に低くなってしまふ。 $\Delta\lambda$ が大きいと、逆方向電圧を印加しても吸収スペクトル端とレーザ発振波長が離れたままとなるので、変調器は光をほとんど吸収せず、消光比が小さくなってしまふ。本開発では、目標以上の消光比が得られるように $\Delta\lambda$ を調整した。次に変調器サイズであるが、帯域の観点からはサイズは小さい方が良い。サイズが小さいほど、素子容量が小さくなるためである。しかし、消光比を大きくするためには、変調器サイズを大きくして光吸収量を増やす必要がある。すなわち、帯域と消光比はトレードオフの関係にある。本開発ではこのトレードオフを十分に考慮し、変調器サイズを決定した。

3. デバイス特性

3-1 静特性

静特性評価として、レーザ光スペクトルとRINスペクトルの評価を行った。評価時の温度は60℃、レーザ電流は100mA、変調器電圧は0Vとした。

図4にレーザ光スペクトルを示す。表1に示した目標波長範囲を帯状に示しているが、全Laneともこの範囲内にメインピークを持っていることがわかる。また、サイドモード抑圧比（メインピークとサブピークの比）は40dB以上と十分な値が得られている。

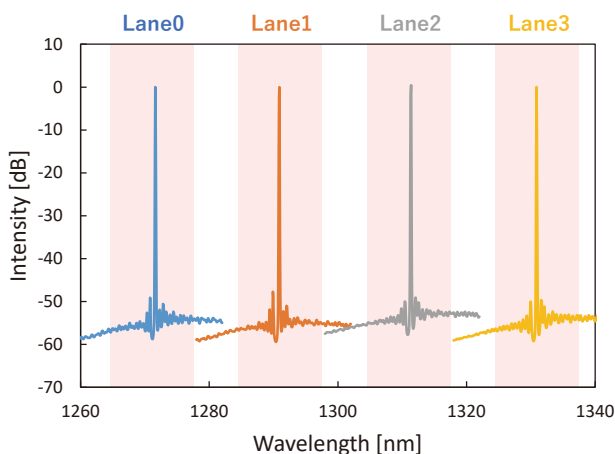


図4 レーザ光スペクトル

図5にRINスペクトルを示す。各Laneの平均RINはそれぞれ-152.1/-152.0/-152.1/-152.0dB/Hzであり、目標である-147dB/Hz以下を全Laneで満たしている。また、10GHz付近の最大値も全Laneで-147dB/Hz以下となっており、優れた特性を持っていると言える。

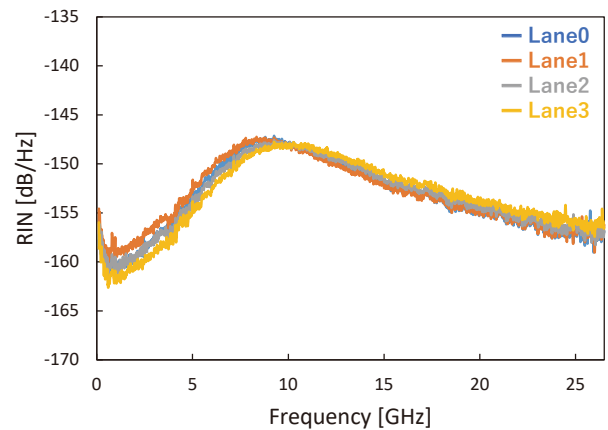


図5 RINスペクトル

3-2 高周波特性

高周波特性評価として、周波数応答とPAM4光波形の評価を行った。評価時の温度は60℃、レーザ電流は100mAとした。

図6に周波数応答の評価系を示す。光コンポーネントアナライザから出力された電気信号は、高周波プローブを経由し、サブマウント上に実装したEMLチップに入力した。また、EMLから出た光信号は、光ファイバを経由し、光コンポーネントアナライザに入力した。図7に周波数応答の結果を示す。

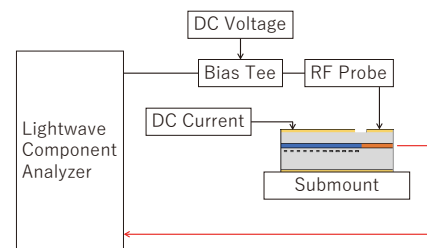


図6 周波数応答評価系

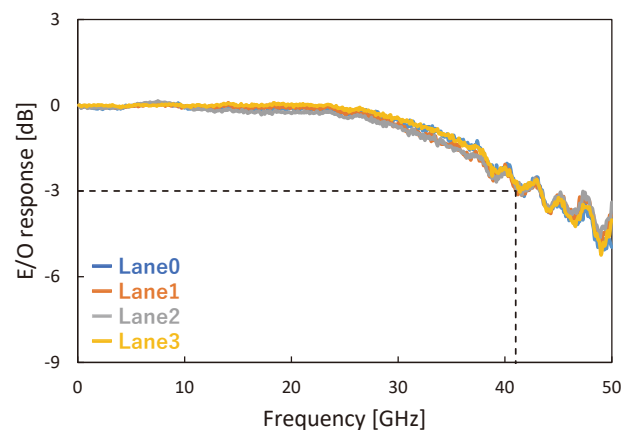


図7 周波数応答評価結果

評価結果を示す。3dB帯域は全Laneで約41GHzとなっており、目標の35GHzを上回っている。出射側端面に設けた反射防止膜の反射率が十分低い場合、周波数応答のフラットネスが悪化し光波形に悪影響を与えることが知られている⁽⁴⁾が、今回開発したEMLは約30GHzまでほぼフラットな周波数応答を有している。

図8にPAM4光波形の評価系を示す。任意波形発生器で信号パターンがSSPRQの53.125GBaud-PAM4電気信号を生成し、アンプを用いて振幅を1.2Vppとした。周波数応答評価時と同様に、電気信号は高周波プローブを経由し、サブマウント上に実装したEMLチップに入力した。EMLから出た光信号は、オシロスコープに取り込み、イコライザによる信号処理を施した。表2にPAM4光波形の評価結果を示す。全Laneで明瞭なアイ開口が得られており、TDECQは2dB以下と良好な結果が得られた。また、約5dBの消光比、約6.8dBm以上の光変調振幅が得られ、表1に示した目標仕様を全て満たすことが確認できた。

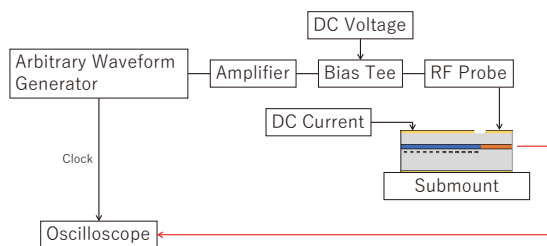


図8 PAM4光波形評価系

4. 結 言

今回我々は、400Gbit/s光トランシーバ用の53GBaud-PAM4 EMLを、1271/1291/1311/1331nmの4波長ラインナップで開発した。低ノイズと高光出力を実現するため、レーザMQWの最適化により、電子のオーバーフローと正孔の不均一注入を抑制した。また、広帯域と高消光比

の両立のため、 $\Delta\lambda$ と変調器サイズを最適化した。その結果、-147dB/Hz以下の平均RIN、35GHz以上の3dB帯域を達成し、光波形評価では2dB以下のTDECQ、約5dBの消光比、約6.8dBm以上の光変調振幅を確認した。今回開発した53GBaud-PAM4 EMLは、400Gbit/s光トランシーバ用として優れた性能を有している。

用語集

※1 DR4

伝送距離500mまでの光トランシーバの標準化規格。

※2 FR4

伝送距離2kmまでの光トランシーバの標準化規格。

※3 PAM4

4値のパルス振幅変調方式。従来のNRZ（2値）変調方式に比べて倍の情報を扱える。

参考文献

- (1) 深澤永考、「高温動作DWDM TOSA・ROSA」、SEIテクニカルレビュー第177号（2010年7月）
- (2) 藤田尚士、「光トランシーバ向け25Gbit/s光送信モジュール」、SEIテクニカルレビュー第186号（2015年1月）
- (3) 寺西良太、「高速（100G/200G/400G用）外部変調器内蔵LDチップ搭載4ch集積送信デバイス」、SEIテクニカルレビュー第192号（2018年1月）
- (4) C. Sun et al., "Influence of Residual Facet Reflection on the Eye-Diagram Performance of High-Speed Electroabsorption Modulated Lasers," J. Lightw. Technol., vol. 27, no. 15, pp. 2970-2976 (August 2009)

表2 53.125GBaud-PAM4光波形評価結果

	Lane0	Lane1	Lane2	Lane3
Optical waveform (Back to Back)				
TDECQ [dB]	2.00	1.88	1.88	1.95
Extinction ratio [dB]	5.06	5.02	5.01	5.06
Optical modulation amplitude [dBm]	6.87	6.83	7.43	7.42

執 筆 者

本田 昌寛* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



田村 彰 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)



高田 幹 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
主席



櫻井 謙司 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
主席



金森 宏徳 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
主席



山路 和宏 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)
主幹



*主執筆者