



データセンター間通信用 IC-TROSA の開発

Development of IC-TROSA for Data Center Interconnect

長島 和哉 ^{*1,2}
Kazuya Nagashima

石川 陽三 ^{*1,2}
Yozo Ishikawa

伊澤 敦 ^{*1,2}
Atsushi Izawa

西田 昌義 ^{*3}
Masayoshi Nishita

松原 礼高 ^{*2}
Noritaka Matsubara

石井 啓之 ^{*2}
Hiroyuki Ishii

Thanakit Saeyang ^{*4}

神徳 正樹 ^{*1,2}
Masaki Kotoku

〈概要〉

メトロエリアおよびデータセンター間光通信の大容量化に向けて、小型の光トランシーバへ搭載可能なデジタルコヒーレント通信用集積光モジュールの需要が高まっている。我々は、DBR反射器とリング共振器型反射器を用いたレーザチップとPLC波長ロッカで構成される小型波長可変レーザ、InP変調器を用いた送信器、PLCコヒーレントミキサとInGaAs PDを用いた受信器をハイブリッド実装し、小型の集積コヒーレント送受信光サブアセンブリ (IC-TROSA) を開発した。このIC-TROSAは、400 Gb/s動作に必要な40 GHz以上のE/OおよびO/E帯域幅を有することを確認した。

1. はじめに

高画質な動画配信サービスやSNS、スマートフォンが普及し、インターネットトラフィックは急激に増大し続けている。これに伴い、大容量光伝送システムが必要とされ、高性能なICによるデジタル信号処理技術と、コヒーレント光伝送技術を組み合わせた、デジタルコヒーレント光伝送技術が開発された。これまでに長距離基幹系光ネットワークへ導入され、波長可変レーザによる波長多重通信を前提に、1波長あたり100 Gb/sの大容量光伝送システムが実現している。

近年、デジタルコヒーレント光伝送技術は、長距離通信システムのみならず、メトロエリア・ネットワークやデータセンター・インターコネクト (DCI) などの領域への適用が期待されている。比較的短距離な領域への適用に伴い、従来よりも小型かつ高速に動作する光トランシーバの高密度実装が必要となっている。これらの背景をもとに、業界標準化団体のOIF (Optical Internetworking Forum) は、DCIで用いられる400 Gb/s光リンクの目標性能を規定した400ZR¹⁾を発行した。本規格は、QSFP-DD²⁾などの小型光トランシーバへの適用が想定されている。更に、2倍の伝送速度が必要となる800 Gb/s光リンクも議論がなされており、将来的な高速化も期待されている³⁾。当該団体は、これらの規格を実現するための光モジュールとして、集積コヒーレント送受信光サブアセンブリ (Integrated Coherent

Transmit-Receive Optical Sub-Assembly, IC-TROSA) の規格も発行した⁴⁾。本規格は、type1とtype2という2種類の高集積光モジュールを規定している。IC-TROSA type1は、偏波多重コヒーレント変調器、受信器が単一のBGA (Ball Grid Array) タイプパッケージに集積されている。パッケージサイズは22.5(L) × 15(W) × 3.6(H) mmであり、外部の波長可変レーザと組み合わせて光トランシーバに組み込まれることが想定されている。一方、IC-TROSA type2は、上記の光デバイスに加えて、波長可変レーザも30.0(L) × 15.1(W) × 6.5(H) mmの小型のゴールドボックスパッケージに内蔵する必要がある。我々はこれまで、DBR (Distributed Bragg Reflector) 反射器とリング共振型反射器をInP基板にモノリシックに集積したレーザチップと、超高デルタPLC (Planar Lightwave Circuit) 技術を用いた波長ロッカを用いて、超小型かつ低消費電力のNano-ITLAを実現してきた。IC-TROSA type1と共にQSFP-DDに搭載可能な寸法であり、400 Gb/s光リンクにおいて良好な伝送特性を確認している⁵⁾。今回、光モジュールの実装面積と部品点数を可能な限り削減するため、小型のITLA、および送受信に必要な全ての光デバイスを単一筐体に集積し、400 Gb/s動作対応のIC-TROSA type2を開発した。本論文では、その設計と特性について述べると共に、将来的に必要とされる800 Gb/s超の動作に向けた開発状況を報告する。

2. 設計

図1に開発したIC-TROSA type2の上面模式図を示す。モノリシック集積型レーザチップとPLC波長ロッカで構成される波長可変レーザと、InP変調器を用いた送信器およびPLCコ

^{*1} 次世代フォトンクス事業創造プロジェクトチーム

^{*2} 研究開発本部 情報通信・エネルギー研究所

^{*3} ファイテル製品事業部門

^{*4} Furukawa FITEL (Thailand)

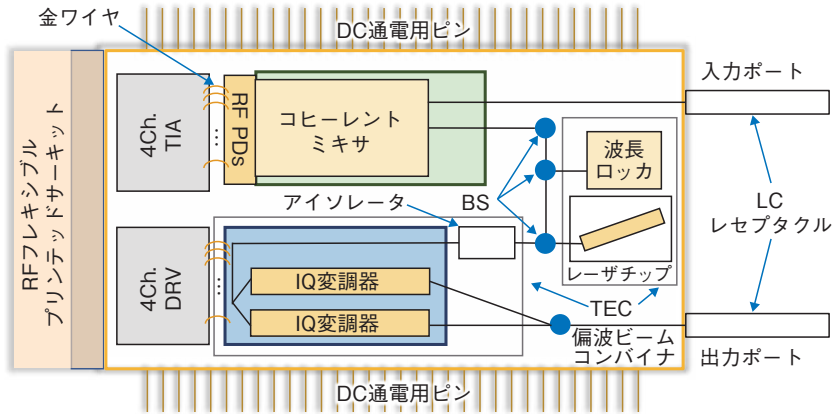


図1 IC-TROSA type2の上面模式図
Schematic illustration for the IC-TROSA type2.

ヒーレントミキサを用いた受信器をハイブリッドに集積し、シンプルな製造プロセスと良好な特性の両立をコンセプトとした。波長可変レーザと変調器はそれぞれ個別のTEC (Thermoelectric Cooler) 上に搭載され温度制御される。光インターフェースはLCレセプタクルを採用した。光モジュールの後方にフレキシブルプリントドサーキット (FPC) が接続されており、FPCを通してRF信号の入出力が行われる。低コストな光学系構築に向けて、コリメートレンズと集光レンズからなる簡素な2レンズ系を採用した。波長可変レーザチップの出力光はレンズによりコリメート光に変換されたのち分岐され、レンズで集光され各デバイスに入射される。レーザ出力光の分岐比は、変調器へ75%、コヒーレントミキサへ22.5%、波長ロックへ2.5%とした。

図2に波長可変レーザチップの概略構造図を示す。レーザチップは2種類の波長選択型反射器を有し、それぞれの反射器上に形成された局所ヒータにより波長スペクトルを任意に調整できる。レーザチップのサイズは3(L)×0.35(W) mmである。図3にPLC波長ロックの概略図を示す。このPLCはSiO₂-ZrO₂コアから成り、比屈折率差(Δ)が約5%と大きい⁵⁾ため、導波路の最小曲げ半径を小さくでき、1.7(L)×2.5(W) mmと小型の波長ロックを実現できた。これらを組み合わせた波長可変レーザモジュールは、動作温度範囲において±0.5 GHzの波長ロック精度、C帯波長全域で100 kHzの狭線幅を実現している⁶⁾。

送信器には、InP偏波多重IQマツハツェンダー (MZ) 変調器と4チャンネルのモジュレータドライバ(DRV)を採用した。InP変調器は、シリコンフォトニクス変調器と比較して、低挿入損失、高速動作が可能であり、位相をπ変化させるために必要な電圧(Vπ)が小さいという特長を有する⁷⁾。図4はInP変調器の模式図であり、光モジュールのフットプリントを小さくするために、光入出力ポートが同一面上に配置されている。これらのポートには、良好な結合効率を実現し、レンズ調芯位置ズレの許容度を拡大するために、スポットサイズ変換器(SSC)が集積されている。また、変調器には容量装荷型進行波電極(CL-TWE)を採用し、電気的な帯域を拡大した。これらの設計により、9.1(L)×3.3(W) mmの小型変調器チップサイズ、40 GHzを超える広帯域、および1.5 Vという低駆動電圧を実現している⁸⁾。変調器とそのドライバは、直径20 μmの金ワイヤで接続されている。

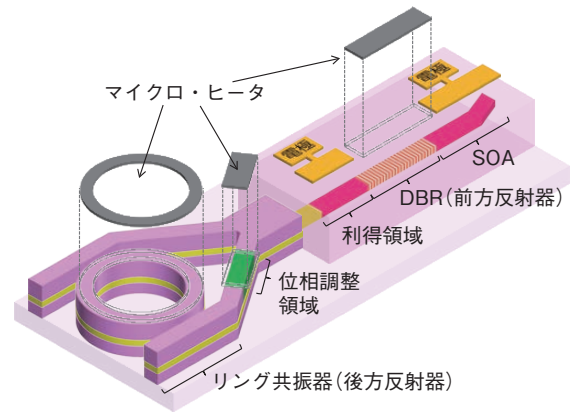


図2 波長可変レーザチップの概略構造図
Schematic illustration for the wavelength tunable laser chip.

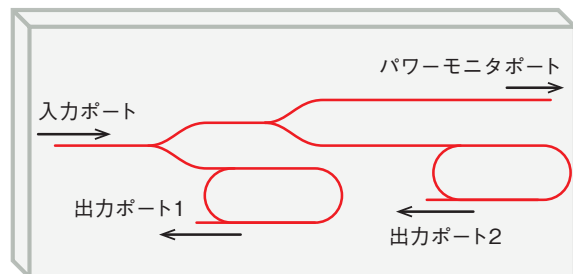


図3 PLC波長ロックの概略図
Schematic illustration for the PLC-based wavelength locker.

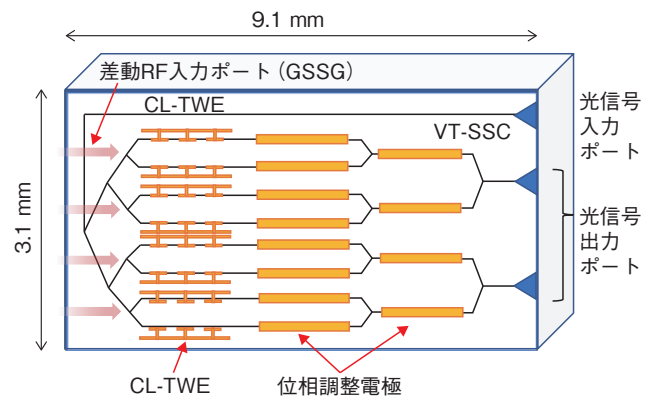


図4 InP変調器の模式図
Schematic illustration for the InP-based modulator.

受信器は、PLCコヒーレントミキサ、InGaAs PIN-PDアレイ、4チャンネルのTIA (Transimpedance Amplifier) から構成される。図5に、PLCコヒーレントミキサの模式図を示す。右側の端面には、局部発振器(LO)入力、信号入力、モニタPDの出力ポートが形成されている。信号光路には、可変光減衰器(VOA)と偏光ビームスプリッター(PBS)が配置されている。コヒーレントミキサは、信号光とLO光を90度光ハイブリッドで干渉させ、位相情報を抽出する。位相に応じてX-Ip~Y-Qnの8ポートに振り分けられた光は、出力ポートから射出され、後段のPDアレイに結合する。図6にInGaAs PIN-PDアレイを基板上に実装した模式図を示す。レンズアレイを集積した裏面入射型8チャンネルPDアレイを採用し、アクティブ領域の小径化と開口サイズの拡大を両立させた。図7に光/電気(O/E)応答を示す。図7(a)はPDの逆バイアス電圧を変化させたときのO/E応答である。1 V以上の逆バイアス電圧を印加した場合、3 dB帯域幅は49 GHz以上となった。PDとTIAの電極を接続するために、高速伝送線を有するガラス基板を採用した。上面に形成された伝送線路は、ワイヤーボンディングによりTIAに接続されている。2つのアノード(A)電極の間には、差動チャンネル内で共通のカソード(C)電極が形成されている。電気的なクロストークを最小限に抑えるため、信号線の間にはグラウンド(G)電極が形成されている。その結果、電極配置はGACAGとなっている。グラウンド電極同士は金ワイヤで接続され、配線長を最短化している。上述の8チャンネルPDアレイを、フリップチップボンディングプロセスにより、このガラス基板に実装した。PDサブアセンブリのO/E応答測定結果を図7(b)に示す。駆動時の逆バイアスは2 Vである。X-IpからY-Qnまでの8チャンネルすべてのO/E応答が均一な特性を示し、全チャンネルで40 GHz前後の3 dB帯域幅が得られている。図8に示すように、このPDアセンブリをUV接着剤でPLCコヒーレントミキサに貼り付け、小型の受信器を作製した。

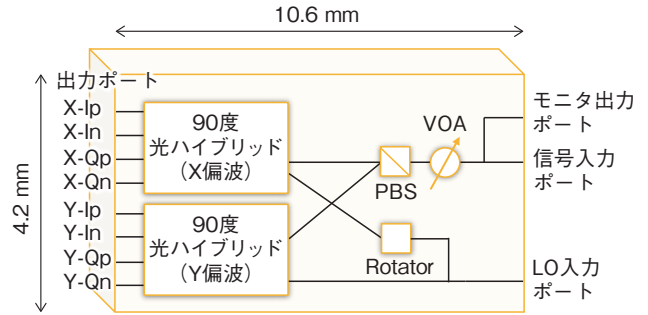


図5 PLCコヒーレントミキサの模式図
Schematic illustration for the PLC-based coherent mixer.

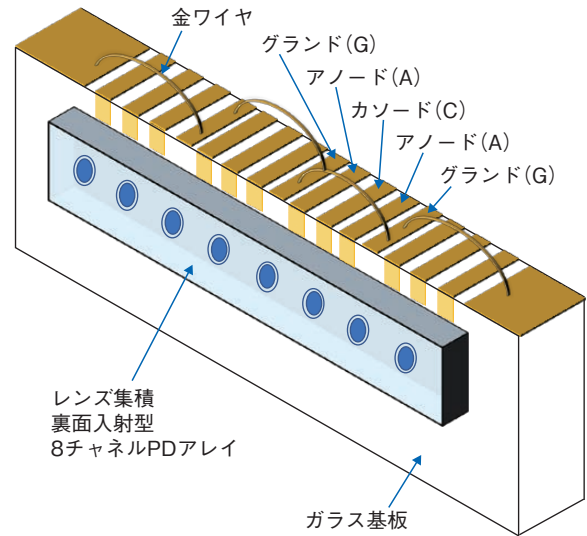


図6 PDサブアセンブリの模式図
Schematic illustration for the PD sub-assembly.

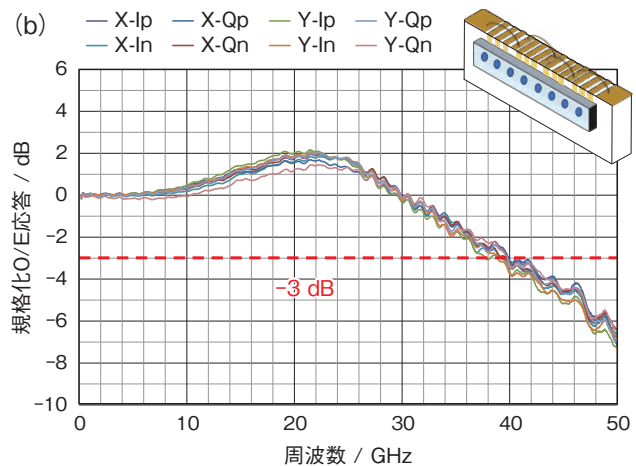
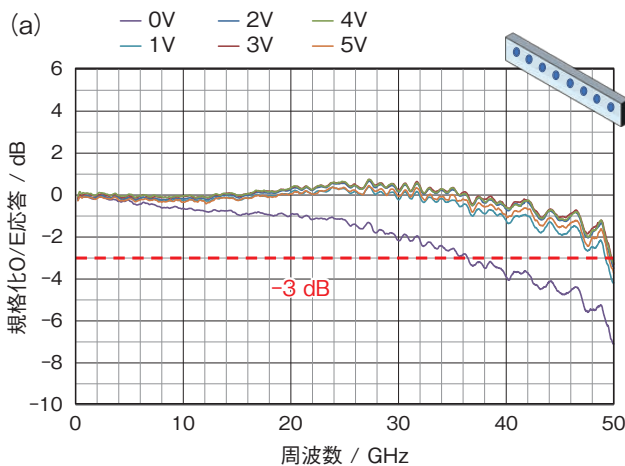


図7 O/E応答特性 (a) PD単体, (b) PDサブアセンブリ
O/E responses (a) PD and (b) PD sub-assembly.

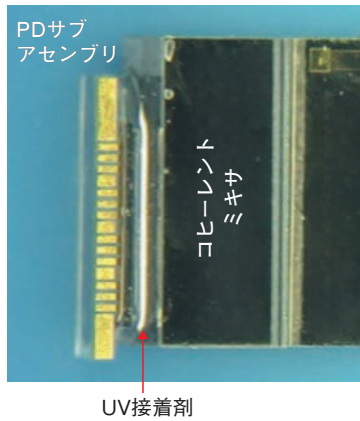


図8 PDサブアセンブリ実装後のコヒーレントミキサ上面写真
Photograph of coherent mixer with PD sub-assembly.

3. 特性

図9に試作したIC-TROSA type2の写真を示す。各部品の寸法を最小化し、光電気の入出力位置とレイアウトを最適化し、それらをハイブリッド集積することで、OIFのIC-TROSA type2規格で定義されているサイズより小さい26(L)×14(W)×4(H) mmの機械的サイズを達成した。特に、厚さは規定の高さより2 mm薄くなっているため、光トランシーバ筐体内部のクリアランスを広く取ることができ、IC-TROSAを制御ICとともに組み込むことが可能となる。

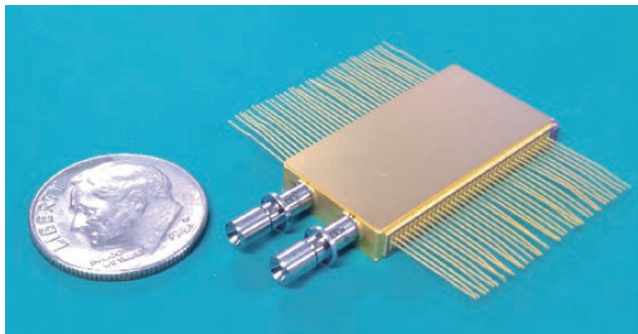


図9 IC-TROSA type2の写真
Photograph of IC-TROSA type2.

図10に内蔵した波長可変レーザの発振スペクトルを示す。波長可変幅は42 nmであり、IC-TROSAの形態においてもCバンド全域をカバーする出力が得られている。図11(a)に変調器側集光レンズの位置ずれトレランスカーブを示す。縦軸が規格化された損失で、横軸がレンズのずれ量を示している。水平方向の実測結果を赤い四角、垂直方向の実測結果を青いひし形でプロットしており、実線は理論値である。理論値と実測値を比較すると、設計通りにレンズが調芯出来ていることが分かる。また、SSCの寄与により、1 dB減衰幅も1 μm以上と、十分にレンズの位置制御可能な範囲であった。同様に、図11(b)にコヒーレントミキサ信号入力ポートの集光レンズ位置ずれトレランスカーブを示す。水平、垂直方向共に理論値と一致しており、設計通りに組み立てられていることが分かる。

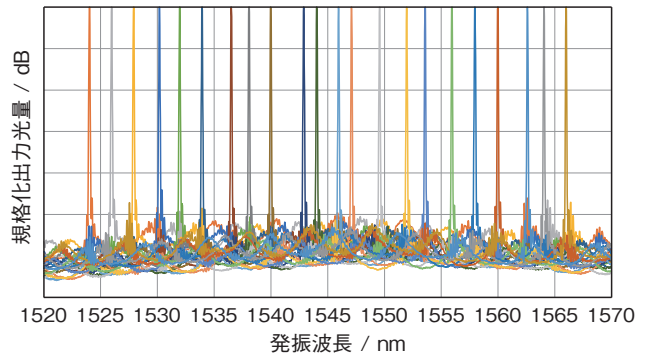


図10 IC-TROSA type2内蔵レーザの発振スペクトル
Lasing spectrum of the IC-TROSA type2.

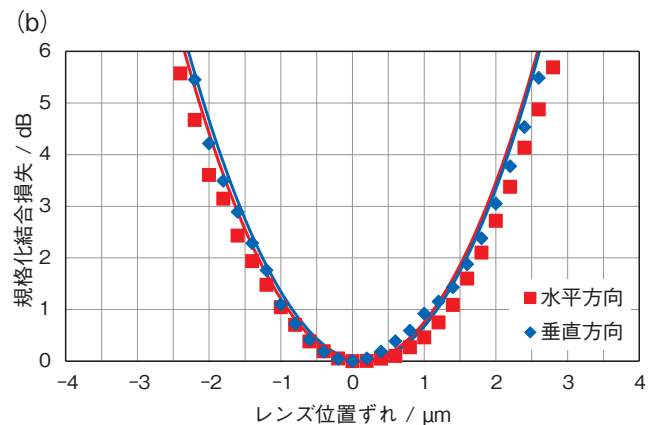
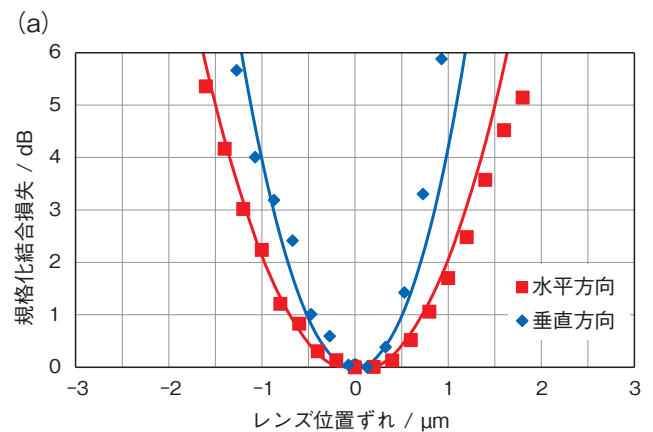


図11 集光レンズのトレランスカーブ (a)変調器入力ポート、(b)コヒーレントミキサ信号入力ポート
Coupling loss characteristics as a function of focus-lens displacement for (a) modulator and (b) coherent mixer.

図12に挿入損失特性の波長依存性を示す。赤丸で送信器側の損失をプロットしている。Cバンド全域での送信器側の挿入損失は、受信器側への分岐損失(約1.25 dB)とアイソレータ損失を含めて13.6 dB以内であった。レーザチップの出力を17.5 dBmに制御した場合、IC-TROSAからの出力はCバンド全域で3.9 dBm以上となる。同様に、受信器の挿入損失を青丸でプロットしている。波長によらずほぼ一定で、12.4 dB未満の損失であった。

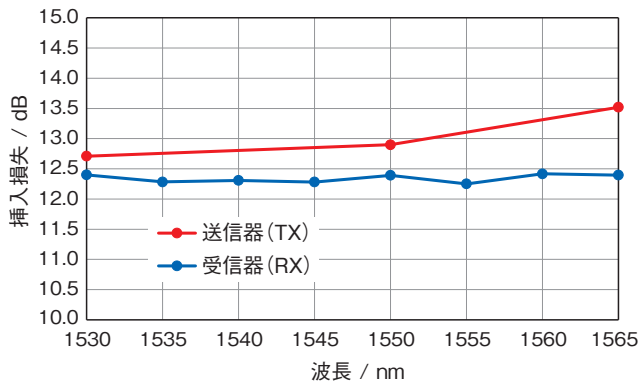


図12 挿入損失の波長依存性
Insertion loss characteristics as a function of wavelength.

次に、高周波特性の検証を行った。送信器の特定チャンネル(X-Q)の電気/光(E/O)応答特性を図13(a)に示す。室温条件下にて、RFプローブを介してIC-TROSAに電気信号を入力し、波長可変レーザから出力される光を変調した。レーザは45°Cの一定温度で動作させた。図に示すように45 GHzの3 dB帯域幅が得られている。図13(b)に受信器の特定チャンネル(Y-Q)のO/E応答特性を示す。送信器側と同様に、測定にはRFプローブを用いた。TIAのピーキング機能により、3 dB帯域幅は46 GHz

と、PDサブアセンブリの測定値よりも高い値が測定された。このE/OおよびO/E帯域は、400 Gb/s (64 Gbaud) 動作に必要な目標値40 GHzを十分に上回っている。

4. 高速(≥800 Gb/s)動作に向けた開発

将来的な高速化対応に向けて、ハイブリッド集積型IC-TROSAのコンセプトは踏襲しつつ、高速デバイスの導入による高性能化を検討した。変調器はn-i-p-nヘテロ構造を有する低損失、広帯域なものを採用した。RF電極にはCL-TWE構造を採用し、チップ上に終端抵抗を内蔵している。InP変調器単体のE/O帯域は67 GHz以上であり、 V_{π} は2 V以下である⁹⁾。この変調器と帯域90 GHz以上の4チャンネルDRVを組み合わせて、ドライバ集積変調器モジュールとして測定したE/O応答特性を図14(a)に示す¹⁰⁾。評価ボードの損失を含めてもE/O帯域は75 GHzを超え、IC-TROSA形態でも同様に広帯域化が期待できる。同様に、コヒーレントミキサとPDを集積したレシーバチップと、70 GHz以上の帯域を有するTIAを組み合わせて、RFプローブを用いてO/E応答特性を測定した。図14(b)に実測結果を示す。測定装置の制約により実測データは50 GHzまでに限定されるが、帯域は50 GHzを超えており、>800 Gb/sの高速動作が期待できる。

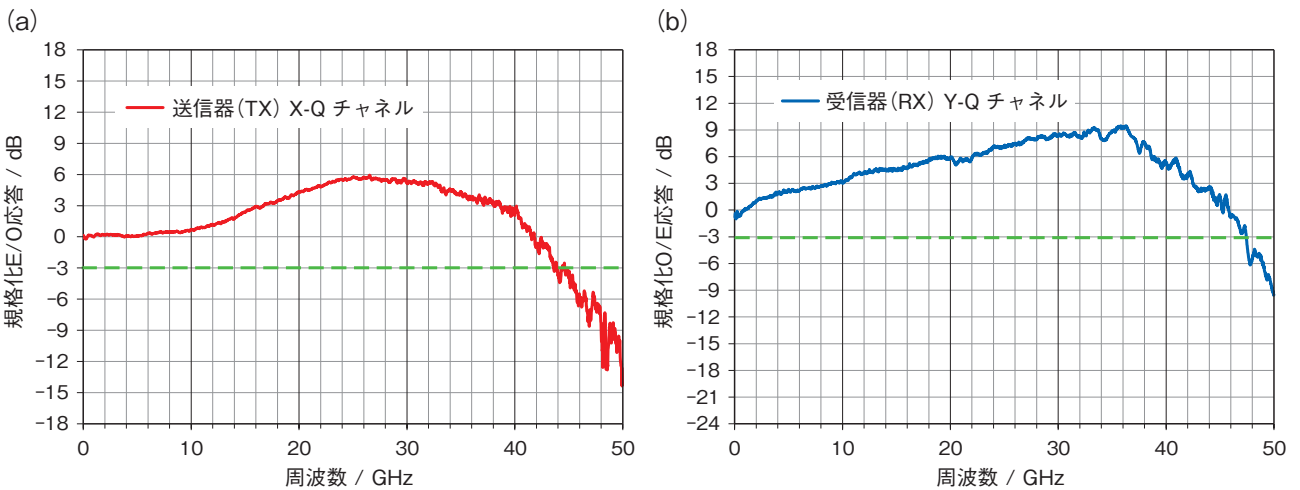


図13 周波数応答特性 (a) E/O応答, (b) O/E応答
Frequency response characteristics (a) E/O response and (b) O/E response.

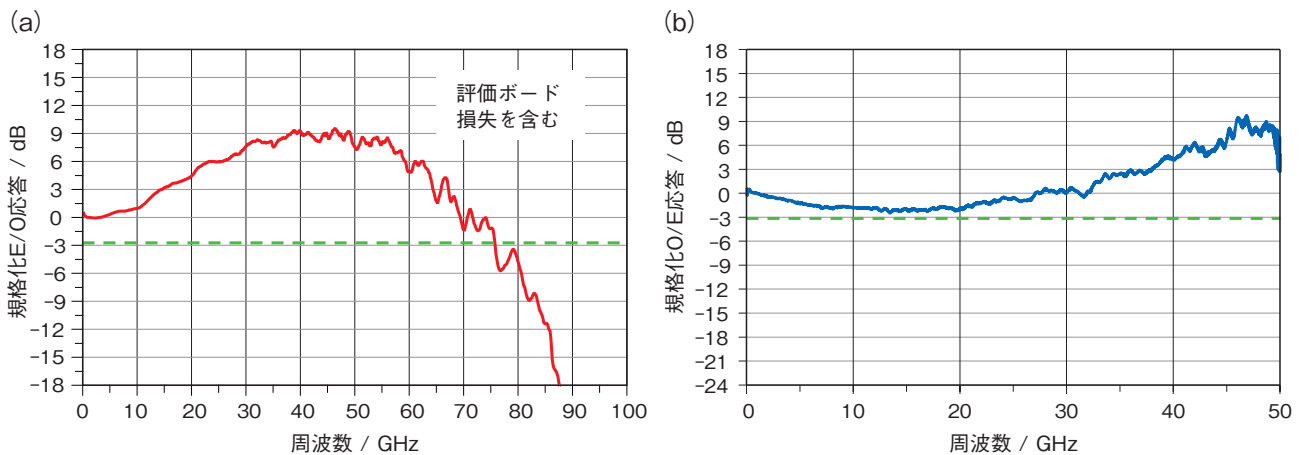


図14 >800 Gb/s動作向けデバイスの周波数応答特性 (a) E/O応答¹⁰⁾, (b) O/E応答
Frequency response characteristics for >800 Gb/s transmission (a) E/O response and (b) O/E response.

5. おわりに

リング共振器とDBRをモノリシックに集積したレーザチップと超高 Δ PLCを用いた波長ロックとで構成される超小型の波長可変レーザ, InP変調器とDRVで構成される送信器, そしてPLC コヒーレントミキサとInGaAs PDとTIAとで構成される受信器を単一筐体内にハイブリッド集積し, IC-TROSA type2を作製した。OIFのIC-TROSA type2規格よりも小型な, 26(L)×14(W)×4(H) mmという機械的寸法を実現し, Cバンド全域をカバーするレーザ発振が得られ, 送信器側13.6 dB以下, 受信器側12.4 dB以下の低挿入損失を達成した。E/OおよびO/E帯域幅は40 GHz以上であり, 400 Gb/s動作に十分な広帯域を達成した。将来の高度情報化社会を支える基盤として, ≥ 800 Gb/s動作対応の高集積光モジュールの実現を目指して開発を行っていく。

謝辞

本成果の創出においてはNTTデバイスイノベーションセンタに多大なるご協力をいただきました。研究・開発成果である1 Tb/s級超広帯域ドライバ集積変調器モジュールの高周波特性評価データをご提供いただき, 感謝いたします。

参考文献

- 1) Implementation Agreement for 400ZR, IA # OIF-400ZR-01.0, March 10, 2020.
- 2) Quad Small Form Factor Pluggable Double Density MSA, [online] Available: <http://www.qsfp-dd.com>
- 3) OIF Launches 800G Coherent and Co-Packaging Framework IA Projects, Elects New Board Members/Positions, Officers and Working Group Chairs, December 8, 2020. [online] Available: <https://www.oiforum.com/oif-launches-800g-coherent-and-co-packaging-framework-ia-projects-elects-new-board-members-positions-officers-and-working-group-chairs/>
- 4) Implementation Agreement for Integrated Coherent Transmit-Receive Optical Sub Assembly, IA # OIF-IC-TROSA-01.0, August 20, 2019.
- 5) J. Hasegawa et al., "32-Port 5.5%- Δ Silica-Based Connecting Device for Low-Loss Coupling between SMFs and Silicon Waveguides," in Proc. Optical Fiber Conf., 2018, Tu3A.4.
- 6) 西田他, 古河電工時報第140号, 2021年, 40-43.
- 7) M. C. Larson et al., "InP vs Si Photonic Integrated Circuit Platforms for Coherent Data Center Interconnects," in Proc. European Conference on Optical Commun., 2018, 23-27.
- 8) Y. Ogiso et al., "Over 67 GHz bandwidth and 1.5 V $V\pi$ InP-based optical IQ modulator with n-i-p-n heterostructure," J. Lightw. Technol., vol. 35, no. 8, pp. 1450-1455, Apr. 2017.
- 9) J. Ozaki et al., "Coherent Driver Modulator with Flexible Printed Circuit RF Interface for 128-Gbaud Operations," Photon. Technol. Lett. Vol. 34, issue 23, pp. 1289-1292, Dec. 2022.
- 10) J. Ozaki et al., "Class-80 InP-based high-bandwidth coherent driver modulator with flexible printed circuit RF interface," in Proc. European Conference on Optical Commun., 2022, Mo4F. 1.