

Co-Packaged Optics 用外部光源の開発

Development of an External Laser Source for Co-Packaged Optics

澤村 壮嗣 *¹
Taketsugu Sawamura鹿島 和彦 *¹
Kazuhiko Kashima永井 京子 *¹
Kyoko Nagai武田 大樹 *¹
Daiki Takeda齋藤 恒聡 *¹
Tsunetoshi Saito梅田 康平 *¹
Kouhei Umeta木村 賢宜 *²
Masayoshi Kimura那須 秀行 *¹
Hideyuki NasuNitidet Thudsalingkarnsakul *³Rattanaorn Suksomboon *³Sanguan Anantathanasarn *³

〈概要〉

我々は、CPO (Co-Packaged Optics) を用いたネットワークスイッチ装置向けに外部光源の開発を行った。ハウジングは光トランシーバで広く採用されている QSFP フォームファクタを採用し、内部には新たに開発した小型非冷却8チャンネルTOSA (Transmitter Optical Sub-Assembly) と駆動回路を搭載した。低消費電力特性を実現するために、当社の高出力DFB (Distributed-FeedBack) レーザ素子を用いて、放熱構造や光学系、省電力レーザ駆動回路などの検討を行い、ハウジング温度55℃、光出力20 dBmの駆動条件下において、消費電力5.6 W、業界最高の電力変換効率14.3%を達成した。また、偏波消光比20 dB以上、SMSR 50 dB以上と、その他の特性においても良好な結果を得た。

1. はじめに

クラウドサービス、5Gなどの新しい情報通信サービスや機械学習、AI (Artificial Intelligence) の進展により、全世界のデータ量は爆発的に増加し、データセンタにおける高速なデータ処理の重要性が、さらに増してきている。データセンタにおいては、ネットワークスイッチ装置が大きな役割を果たし、その伝送容量はスイッチASIC (Application Specific Integrated Circuit) の性能に依存している。2010年より、スイッチASICの帯域は2年で倍というスピードで拡大し、2022年には51.2 Tbpsに達した¹⁾。現在のネットワークスイッチ装置は、フロントパネルに光トランシーバを設置する構成となっているため、光トランシーバとスイッチASIC間の電気伝送路は長く、伝送損失が高い。広帯域化に対応するためには、電気伝送時に劣化した信号の波形再生や整形を行う電子デバイスが必要なり、高い消費電力が課題となっている。

そのため、ネットワークスイッチ装置内の電気配線の一部を光に置き換えるCPOの導入が期待されている。図1にCPOの実装形態を示す。CPOは、1枚の基板の中心にスイッチASICを配置し、その周りに光トランシーバを配置する実装形態となるので、スイッチASICと光トランシーバ間の電気伝送路の距離を50 mm以下と顕著に短尺化でき、伝送損失を低減することができる。そのため、電気信号の品質劣化を補償する電子デバイスを省略することができるため、光トランシーバの消費電

力を抑制することが可能である。光トランシーバ自体の温度上昇は消費電力が低くなることで抑制されるが、スイッチASICは大きな電力を消費し、発熱するため、近接して配置される光トランシーバの温度が上昇する。それ故、光源が光トランシーバに搭載されている場合、光源の特性及び信頼性が劣化することが懸念される。そのため、環境温度が低いフロントパネルに光源を配置し、SFF (Small Form Factor) を採用することで、故障した際は交換可能な外部光源が目ざされている。

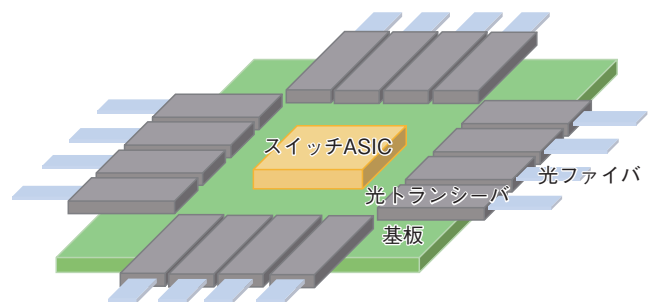


図1 CPOの実装形態
Schematic illustration of the CPO.

そこで、我々は、これまでに光トランシーバで広く採用されているQSFPのフォームファクタを採用し、QSFPハウジングに、新たに開発した小型非冷却8チャンネルTOSAと駆動回路を収納して、CPO用外部光源を作製した。特性は、ハウジング温度55℃において、光出力20 dBmを達成し、消費電力5.6 W、電力変換効率で業界最高の14.3%を達成することができたので報告する。

*¹ フォトニクス研究所 光電融合技術開発部

*² フォトニクス研究所 フォトニックデバイス開発部

*³ Furukawa FITEL (Thailand)

2. CPO用外部光源と開発目標

CPO用外部光源のガイドランス及び仕様として、CPO collaboration 及びOIF (Optical Internetworking Forum) からELS guidance document²⁾とELSFP Implementation Agreement³⁾が発行されている。提案されているハウジングは、光トランシーバで採用されてきたQSFP-DDやOSFP、そして外部光源用に新たに提案されたフォームファクタのELSFP (External Laser Small Form Factor Pluggable)である。外部光源には400GBASE-FR4または400GBASE-DR4に準拠したOバンド帯の1271 nm, 1291 nm, 1311 nm, 1331 nmの波長が適用され、これらの波長の光源を複数搭載することが求められている。また、CPO用外部光源の特性は、低消費電力、高電力変換効率であることが望ましく、レーザ素子を冷却するTEC (Thermo-Electric Cooler) を内蔵しない非冷却構造を採用した外部光源が報告されている。Johnson等は、従来のQSFP-DDの2倍の高さを有する独自のQSFP Double Heightを使用した非冷却8チャンネル外部光源を報告している。特性は、ハウジング温度50°Cにおいて、チャンネル当たり光出力20 dBmを達成し、消費電力は8.0 W、電力変換効率は約10%であった⁴⁾。

今回、我々は提案されている全てのハウジングに、駆動回路と共に収納できる小型の非冷却8チャンネルTOSAを開発し、外部光源向けに提案されているハウジングの中で最も小さいQSFPを用いて外部光源を開発することとした。目標特性は、ハウジング温度55°Cにおいて、全チャンネルの光出力を20 dBm以上、消費電力は6.5 W以下とした。

3. 非冷却8チャンネルTOSAの設計

図2にQSFP ELS, OSFP ELS, ELSFPの内部レイアウトを示す。TOSAの目標サイズは各ハウジングに収納可能な、22.5 mm (L)×13.0 mm (W)×4.0 mm (H)とした。また、TOSAには駆動回路と電気接続を行うフレキシブルケーブルを取り付けた。外部光源のレーザ光は、光トランシーバ内のシリコンフォトニクス変調器で変調される。そのため、直線偏光を供給するために偏波保持光ファイバを用いている。レーザ素子は、非冷却の駆動において光出力20 dBmを達成するため、当社で開発した高出力DFBレーザ素子⁵⁾を採用した。さらに、このレーザ素子を実装する基板の温度をTOSAケース温度と定義し、ケース温度55°C、光出力20 dBmの駆動条件下において、信頼性を考慮してレーザ温度が65°C以下となるように構造設計を行った。さらに、レーザ素子と光ファイバ間の結合効率の目標値を75%とし、レーザ素子の光出力特性から光出力20 dBmを得るレーザ電流の目標値を350 mA以下とした。

はじめに、8つのレーザ素子の実装ピッチを設計するため、ピッチサイズとレーザ温度の関係を熱シミュレーションより計算した。結果を図3に示す。ピッチが狭いと隣接するレーザ素子からの熱の影響でレーザ温度が上昇する。また、ピッチを広げるとレーザ温度は下がり、ピッチ1.2 mmからレーザ温度が飽和し始める。この結果から、TOSAの目標サイズである幅13.0 mmを実現しつつ、レーザ温度の上昇を抑制できる1.2 mmの実装ピッチを採用した。さらに、レーザ電流とレーザ温度の関係を、熱シ

ミュレーションを用いて確認した。結果を図4に示す。レーザ電流を350 mAとした場合、レーザ温度は、ケース温度の55°Cから約6°C上昇し、61°Cに達する。また、レーザ温度が65°C以下となるレーザ電流の上限値は550 mAとなることが分かった。

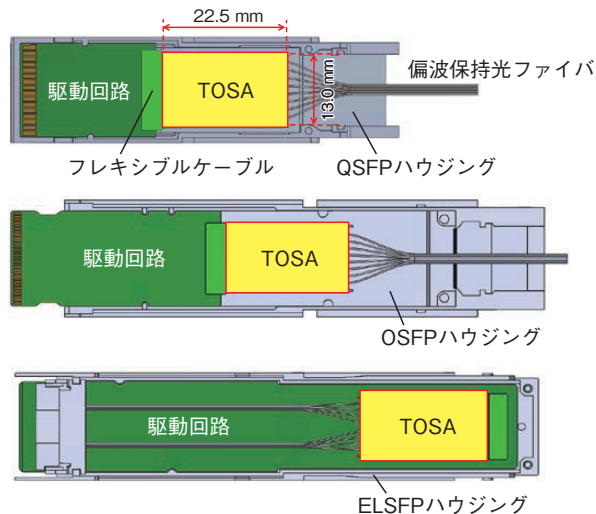


図2 QSFP, OSFP, ELSFPを用いた外部光源の内部レイアウト Internal layouts of ELSs (external laser sources) using QSFP, OSFP and ELSFP.

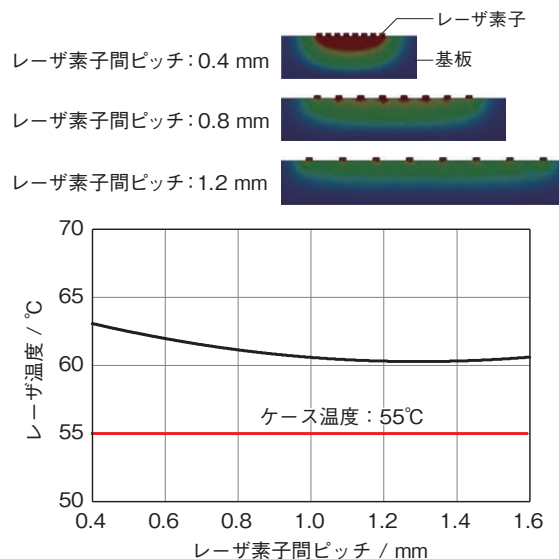


図3 レーザ素子間ピッチに対するレーザ温度の計算結果 Calculated LD temperature as a function of the pitch size between DFB-LDs.

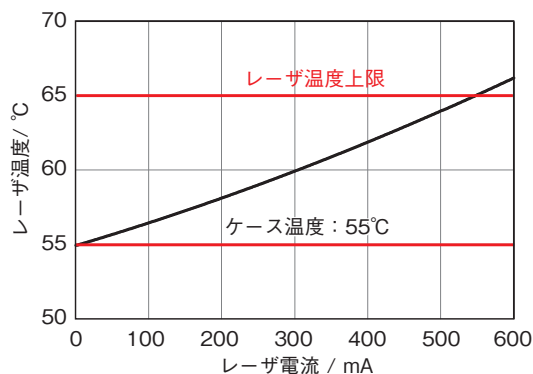


図4 レーザ電流に対するレーザ温度の計算結果 Simulated LD temperature as a function of LD bias current.

図5に設計したTOSAの内部構造を示す。各レーザ素子を基板上に1.2 mmピッチで配置し、レーザ素子の後方には、光出力モニタ用のフォトダイオードを実装した。光学系は、1枚の集光レンズと、レーザ素子への戻り光を抑制する光アイソレータ、偏波保持光ファイバで構成し、偏波保持光ファイバは高い光出力、偏波消光比を得るように調心、固定を行う設計とした。次に、この構造においてケース温度が25℃から55℃へ変化した場合の、TOSAの変形や光ファイバの変位量を熱応力シミュレーションより見積もり、光出力特性への影響を見積もった。図6にケース温度25℃から55℃へ変化した時のTOSAの変形のシミュレーション結果を示す。防塵対策として被せているアルミカバーは3 μm程、わずかに変形していることがわかる。また、このときの光ファイバの変位量は約0.2 μm とさらに小さい値であった。図7に光ファイバの変位量に対する光出力(相対値)を計算した結果を示す。0.2 μmの変位量における光出力変化量は1%以下と小さく、本構造や光学系を用いることで、ケース温度に依存せずに安定した光結合損失を実現できることが分かった。

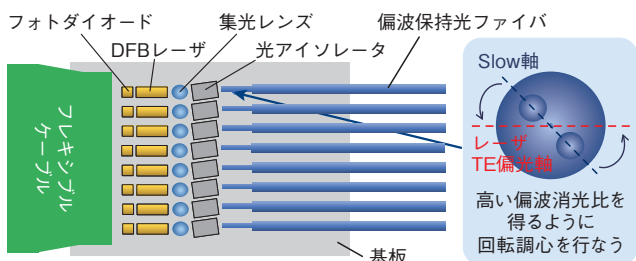


図5 TOSA内部構造
Schematic top view for the TOSA structure.

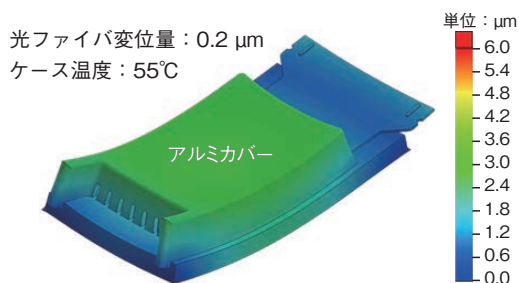


図6 熱応力シミュレーション結果
3D model of the TOSA deformed in thermal stress simulation.

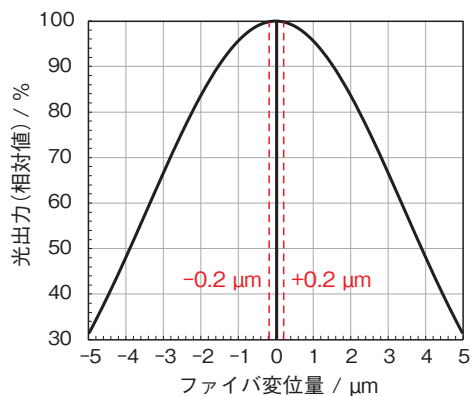


図7 ファイバ変位量と光出力(相対値)の計算結果
Optical power change as a function of optical axis displacement.

4. 非冷却8チャンネルTOSAの特性

図8に作製した非冷却8チャンネルTOSAの外観を示す。アルミカバーの左側にはレーザ素子とフォトダイオードへ接続するフレキシブルケーブルが取り付けられている。また、アルミカバーの右側には8本の偏波保持光ファイバが取り付けられている。



図8 作製した非冷却8チャンネルTOSA
Photograph of the 8-channel uncooled TOSA.

図9にケース温度25℃と55℃で測定した全8チャンネルの光出力特性を示す。結合効率はケース温度に依存せず安定しており80～85%であった。そのため、ケース温度25℃、55℃において、光出力20 dBmを得るレーザ電流値は、想定した350 mAよりも低い300 mA以下となった。また、ケース温度55℃、光

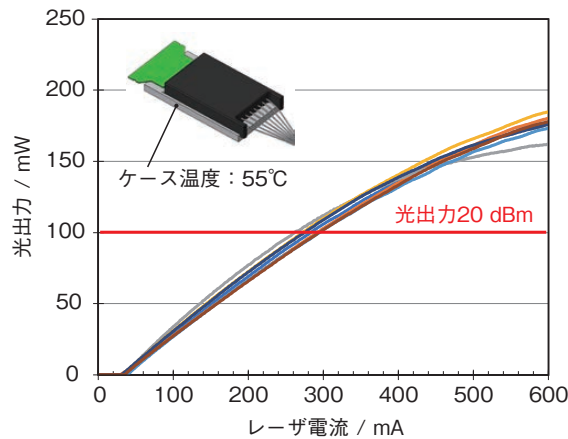
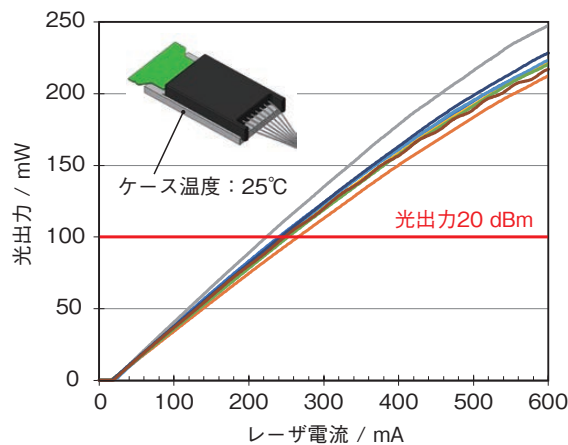


図9 TOSA ケース温度25℃、55℃における光出力-レーザ電流特性
Optical power characteristics as a function of LD bias current and at the case temperatures of 25℃ and 55℃.

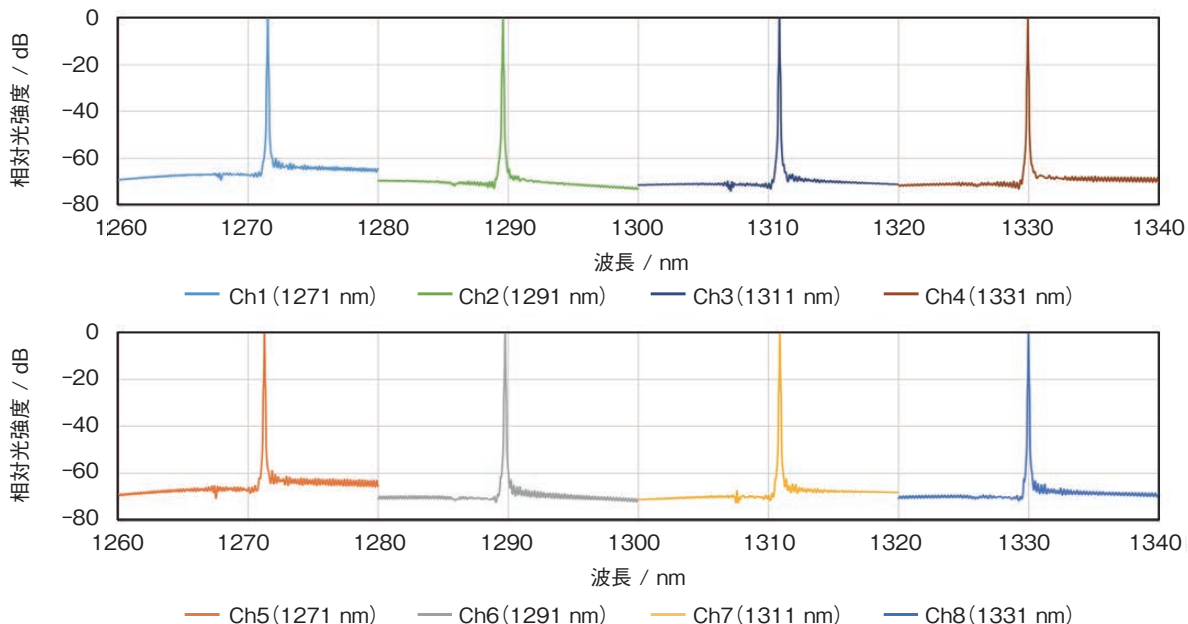


図10 光スペクトル測定結果
Measured optical spectra of the 8-channel TOSA.

出力 20 dBm の駆動条件下では、TOSA の消費電力は 3.7 W と良好で、電力変換効率は業界最高値である 21.2% を達成した。次に、図10に測定した8チャンネルの光スペクトルを示す。各波長はCWDM 4⁶⁾に準拠しており、SMSR (Side Mode Suppression Ratio) は全チャンネルで 50 dB を超える良好な結果を得ることができた。

5. QSFP を用いた外部光源の設計

図11に設計した外部光源の構造を示す。偏波保持光ファイバは、引張耐性を持たせるため抗張力体(アラミド繊維)と一緒にジャケットに挿通し、ファイバ端には12心のMPOコネクタが取り付けられている。また、MPOコネクタの接続部では、直線偏光を維持できるように、互いの光軸を合わせて接続することが重要である。そのため、MPOコネクタの組立工程では、偏波保持光ファイバの応力付与部の各中心を結ぶ線を、MT

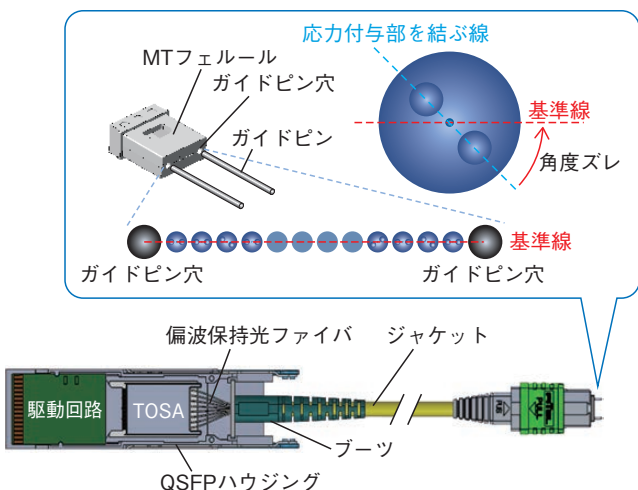


図11 ピグテイル型QSFP外部光源の構造
Schematic illustration for a pigtailed-QSFP ELS.

フェルールの各ガイドピン穴の中心を結ぶ基準線に重なるように調心し、組立を行う設計とした。また、図11に示す角度ずれの目標値を±3度以下とした。

図12に駆動回路のブロックダイアグラムを示す。駆動回路は電源回路、MCU (Micro Control Unit)、レーザ駆動回路、温度センサで構成されている。提案されている外部光源の電源電圧は 3.3 V となっているため、省電力化のため電圧変換効率が高い DC/DC コンバータを採用し、レーザを駆動する最大の電圧値にまで変換する回路設計とした。

本駆動回路を用いることで、I2C (Inter Integrated Circuit) インターフェースを通じて、各レーザ素子を ACC (Auto Current Control) モードや APC (Auto Power Control) モードで駆動でき、各チャンネルの光出力やハウジング内の温度、レーザ素子や電源の電流、電圧を外部から読み取ることができるようにした。

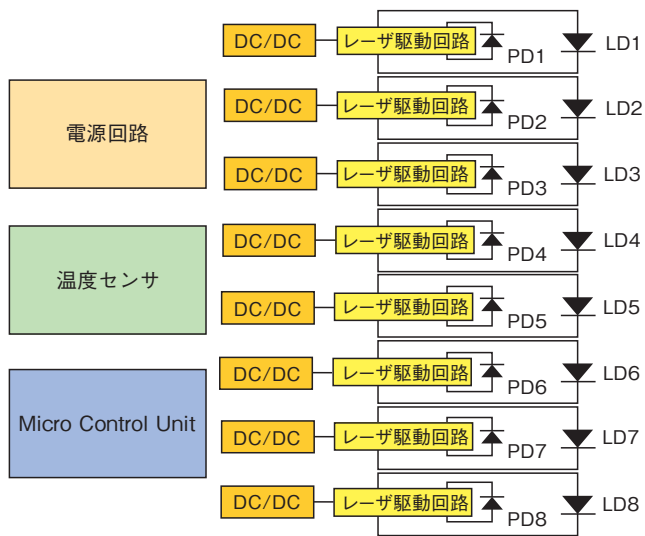


図12 駆動回路ブロック図
Block diagram for the driving circuitries.

図13に空冷環境におけるQSFPを用いた外部光源の断面図を示す。外部光源は、ケージに挿入されるとケージ上面の空冷ヒートシンクとQSFPハウジングの上面が接触し、ハウジング内部の熱は上面ハウジングを通じて空冷ヒートシンクに伝わり放熱される。我々は外部光源のハウジング温度を空冷ヒートシンクと接する上面ハウジングの表面温度と定義した。TOSAの特性を劣化させることなくQSFPハウジングの中で駆動するためには、ハウジング温度とTOSAケース温度の差を小さくすることが重要である。そのため、TOSAの放熱基板を上面ハウジング側に実装することで、熱抵抗を小さくする設計とした。図14はハウジング温度を55℃、レーザ電流300 mAで全チャンネルを駆動した時のハウジング内部の温度分布を示す熱シミュレーション結果である。TOSA ケース温度の上昇は約0.7℃と小さく、TOSA 放熱基板を上面ハウジングに実装することで、ハウジング内部のTOSA ケース温度やレーザ温度の上昇を抑制できることが分かった。

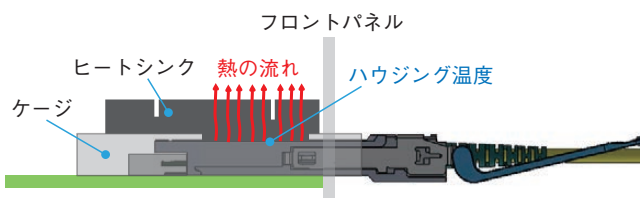


図13 QSFP外部光源の駆動環境
Driving environment of the QSFP ELS.

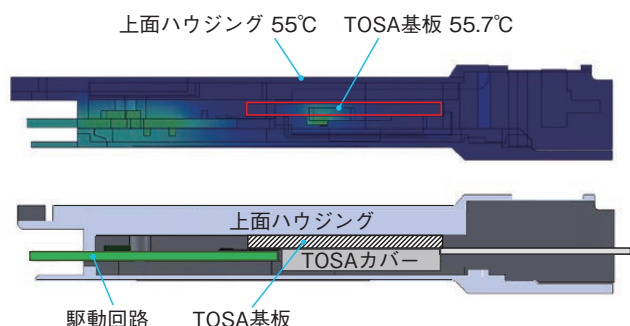


図14 QSFPハウジング内の温度分布
Cross-sectional view of a simulated temperature distributions inside the QSFP housing.

6. QSFP外部光源の特性

QSFP外部光源の外観およびハウジング内部の収納状態を図15に示す。TOSAと駆動回路は設計どおりQSFPハウジングに収納できており、偏波保持光ファイバケーブル端には12心のMPOコネクタが取り付けられている。図16は、MPOコネクタ端面の偏波保持光ファイバの外観を示したものである。表1に示す通り、偏波保持光ファイバの角度ずれは±2度以下と、良好な精度で組立を行うことができた。また、測定した偏波消光比は、全8チャンネルで20 dB以上を達成することができた。

図17にTOSA ケース温度55℃、QSFPハウジング温度55℃における、TOSAと外部光源それぞれの光出力特性を示す。

TOSAと外部光源の光出力特性は、よく一致していることがわかる。これは、熱シミュレーションで示されたとおり、ハウジング内部におけるTOSA ケース温度上昇が低く抑えられているためと考えられる。

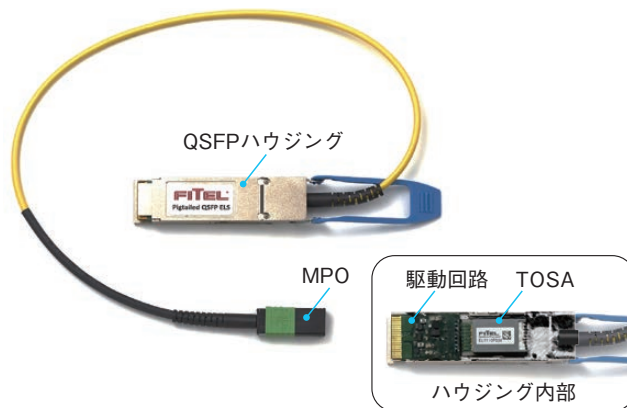


図15 作製したピグテイル型QSFP外部光源
Photograph of the pigtailed-QSFP ELS.

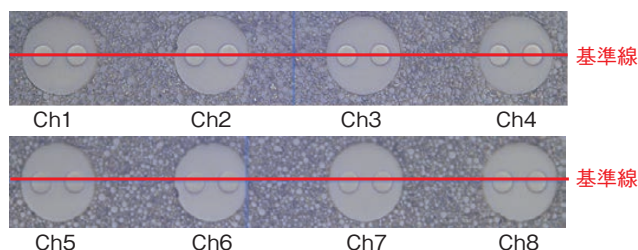


図16 MPOコネクタ端面の写真
Photographs of end face of the MT ferrule.

表1 偏波消光比と角度ずれの測定結果
Measured polarization extinction ratio and rotational angle error for each channel.

項目	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Ch8
角度ずれ (度)	0.1	0.9	1.1	0.9	1.6	1.2	0.8	0.2
偏波消光比 (dB)	24.3	25.8	25.1	22.8	25.1	24.2	24.7	24.7

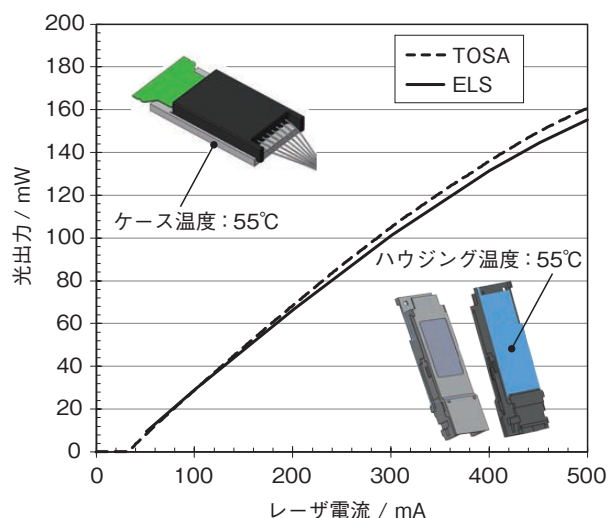


図17 外部光源とTOSAの光出力-レーザ電流特性比較
Optical power as a function of LD bias current for the TOSA and the pigtailed-QSFP ELS.

次に、レーザ電流に対する外部光源の総消費電力の計算値と測定値の比較を図18に示す。測定した消費電力は計算値とよく一致している。ハウジング温度55℃において、光出力20 dBmを得るためのレーザ電流値は300 mA以下であり、この時の外部光源の総消費電力は5.6 Wとなった。開発目標である消費電力6.5 W以下を達成し、電力変換効率では業界最高値の14.3%を実現した。

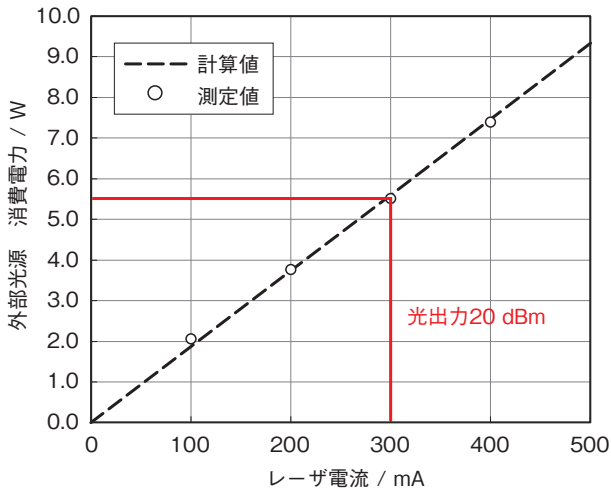


図18 レーザ電流値に対する外部光源の消費電力測定結果
Calculated and measured power consumption as a function of LD bias current for the pigtailed-QSFP ELS.

7. おわりに

我々は、CPO用外部光源用に当社が開発した高出力DFBレーザ素子を搭載した非冷却8チャンネルTOSAの設計と作製を行った。TOSAサイズは、22.5 mm (L) × 13.0 mm (W) × 4.0 mm (H) と小さく、外部光源用に提案されている様々なハウジングに、駆動回路と一緒に収納することができる。また、レーザ温度の上昇を抑制する放熱構造、高い結合効率を実現する光学系を実現し、TOSA ケース温度55℃、光出力20 dBmの駆動条件下においてSMSR 50 dB以上、消費電力3.7 W、業界最高となる電力変換効率21.2%を実現した。

さらに、外部光源向けに提案されているハウジングの中で最も小さいQSFPを用いてCPO用外部光源の設計と作製を行った。駆動回路を省電力化し、ハウジング内部の熱抵抗を低減することで、ハウジング温度55℃、光出力20 dBmの駆動条件下において、総消費電力5.6 W、電力変換効率では業界最高値の14.3%を実現した。また、偏波保持光ファイバの角度を高精度に調心してMPOコネクタの組立を行い、全チャンネルで偏波消光比20 dB以上を実現した。

参考文献

- 1) Broadcom News Release “Broadcom Ships Tomahawk 5, Industry’s Highest Bandwidth Switch Chip to Accelerate AI/ML Workloads,” Aug. 2022. [Online] Available: <https://www.broadcom.com/company/news/product-releases/60456>
- 2) CPO Collaboration, “Co-packaged Optics External Laser Source Guidance Document,” Version 1.0, Jan. 2020.
- 3) Optical Internetworking Forum, “External Laser Small Form Factor Pluggable (ELSFP) Implementation Agreement,” OIF-ELSFP-01.0, Aug. 2023.
- 4) J. E. Johnson, K. Bacher, R. Schaevitz, and V. Raghunathan, “Performance and Reliability of Advanced CW Lasers for Silicon Photonics Applications” Optical Fiber Communication Conference 2022, TuD.1, Mar. 2022.
- 5) 古河電工HP > ニュースリリース > 高出力100mW DFBレーザダイオードチップを量産化 (参照日: 2024年2月20日) [Online] Available: https://www.furukawa.co.jp/release/2023/comm_20230925.html
- 6) CWDM4 MSA, “100G CWDM4 MSA Technical Specifications,” Rev. 1.0, Aug. 2014.