

# 100Gbit/s 4波長集積小型光送信モジュール

Compact Optical Transmitter Module with Integrated Optical Multiplexer for 100 Gbit/s

佐伯 智哉\*  
Tomoya Saeki

佐藤 俊介  
Shunsuke Satoh

黒川 宗高  
Munetaka Kurokawa

鈴木 三千男  
Michio Suzuki

田中 啓二  
Keiji Tanaka

藤村 康  
Yasushi Fujimura

情報通信量の増大に伴い、市場では光トランシーバの高速化と小型化の要求が急速に高まり、伝送速度100Gbit/s用の光トランシーバCFPの市場流通が本格化している。さらなる大容量化の要求に対し、高密度実装に適した超小型光トランシーバCFP4の規格が標準化されている。我々は、小型で低損失な光合波器とLDドライバIC、4波長LD (Laser-Diode) を小型パッケージに集積した、CFP4に搭載可能な100Gbit/s 4波長小型集積光送信モジュールを開発し、良好な光波形特性と低消費電力特性を確認した。本稿ではその設計と基本特性について報告する。

High-speed and small-sized transceivers are strongly required to support the rapidly growing internet traffic. The CFP (100G form-factor pluggable) using four-wavelength LAN-WDM (wavelength division multiplexing) is now widely used. To increase the transmission capacity of a line card, CFP4, a very small transceiver, has been standardized. To support this trend, we have developed a 100 Gbit/s compact optical transmitter module for CFP4 and integrated a compact low-loss optical multiplexer, quad-channel laser diode driver, and four laser diodes. The module achieves clear eye openings at low power consumption. This paper describes the design and basic characteristics of the module.

キーワード：光送信モジュール、光合波器、CFP4、100GBASE-LR4

## 1. 緒言

スマートフォンやタブレット端末の普及とクラウドサービスの拡大に伴い情報通信量は飛躍的に増大し、市場では光トランシーバの高速、小型化の要求が急速に高まり、CFP\*1に代表される光合波/分波器を内蔵した100Gbit/s光トランシーバが既に製品化されている。これに対し、さらに実装密度を高め1ラインカード当たりの伝送容量を拡大するために、CFPの面積比約1/6サイズの小型光トランシーバCFP4\*1の標準化が進められ、各社にて開発が進められている。今回我々はCFP4に搭載可能な4波長集積小型光送信モジュール<sup>(2),(3)</sup>を開発した。本稿では性能実現のための主要な技術である電気・光学実装設計を中心に報告する。

## 2. 光送信モジュールの現状と課題

光トランシーバCFP及びCFP4の構造を図1に示す。CFPの光送信部は、4つの光送信モジュールと光合波器で構成されており、それらは光ファイバにより接続されている。一方、CFP4は小型化を実現するため全幅21.5mm (CFPの約1/4) が要求されており、光送信部、光受信部で許容される幅は各7mm以下となる。従って、光送信モジュールは、CFPの光送信部の機能を1つのパッケージ内に集積化し、7mm以下の幅に収める必要がある。

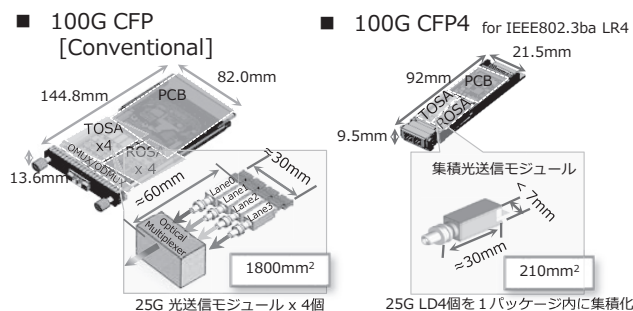


図1 CFP及びCFP4と内部の光送信モジュール

## 3. 要求仕様と光送信モジュールの開発目標

表1に要求仕様となる、IEEE802.3ba 100GBASE-LR4<sup>(1)</sup>で規定される光送信部の仕様を示す。

今回の100GBASE-LR4規格では、LAN-WDM光に対応した波長規格となり、中心波長が4.5nmという極めて狭い波長間隔で配置された信号光を送信する必要がある。さらに各波長レーンの光パワーとともにレーン間光パワー差が規定されており、光送信モジュールの全ての波長レーンに対し、これらの仕様を満たす必要がある。

表1 IEEE規定の要求仕様 (光送信部)

項目	最小	最大	単位	
伝送距離	2m - 10km		-	
伝送速度	25.78125		Gbit/s	
光波長	Lane0	1294.53	1296.59	nm
	Lane1	1299.02	1301.09	nm
	Lane2	1303.54	1305.63	nm
	Lane3	1308.09	1310.19	nm
平均光パワー	-4.3	4.5	dBm	
レーン間光パワー差	-	5	dB	
消光比	4	-	dB	

表1の仕様に基づき、今回の4波長集積光送信モジュールの目標仕様を表2のように設定した。光パワー規格を満たすためには、LD (Laser-Diode) の全発光出力を+10dBmとし、不可避な光損失を考慮してマージンを確保した場合、光送信モジュールに必要とされる光結合損失は7.3dB以下と試算される。光波品質は、伝送速度25Gbit/sの動作条件下でファイバ伝送時の波形劣化などに対しても性能マージンを確保するため、パルスマスクマージン (PMM) を10%以上とした。また、消費電力は、CFP4に要求される6.0W以下から光送信モジュールの占有許容分を試算し、-5~75°Cの全動作温度範囲にて1.5W以下としている。

表2 光送信モジュールの目標仕様

項目	目標性能
パッケージサイズ	幅7.0mm以下
光結合損失	7.3dB以下
マスクマージン (PMM)	10%以上
消費電力	1.5W以下

## 4. 小型光送信モジュールの設計

### 4-1 電気・光学特性に関する設計

図2に光送信モジュールの構造模式図を示す。パッケージ幅の縮小のため、小型の積層セラミックを設けた箱型パッケージを採用し、光トランシーバとの電氣的な接続を担うフレキシブルプリント基板 (FPC) は、高周波性能の向上と設計最適化の観点から、高周波信号用とDC信号用の2枚を用いる設計とした。さらに、狭ピッチで並列に配置された4つのLDの高速駆動と4波長の光合波を最小スペースで可能とする高密度設計技術と高精度実装技術の開発により、パッケージ幅6.7mmを実現した。また、光出力ポートにはシングルモードファイバ (SMF) を内蔵した小型のLCレセプタクルを用いている。

既存のCFPには光波品質で優位なEA (電界吸収型) 変調器集積DFBレーザを搭載した光送信モジュール<sup>(7)</sup>が用いら

れているが、消費電力が1モジュールあたり約2W、4波長合計で約8Wと大きく、1.5W以下という目標を達成することは困難である。我々は、当社開発の高速動作が可能な直接変調型DFB-LD<sup>(5)</sup>を使用し、シャント駆動方式で動作することにより低消費電力化を実現した。

図3に当社で開発したLDドライバIC<sup>(4)</sup>を用いたシャント駆動方式を示す。シャント駆動は、一般的な差動駆動のLDドライバICに比べ、LD変調のための余分な電流を消費する出力終端を必要としないため、低消費電力化が可能である。見積られる消費電力は、LDとLDドライバICの動作条件下にて、1チャンネルあたり160mWと非常に小さく、光送信モジュール全体の消費電力1.5W以下を十分に達成可能である。また、このLDドライバICは、LDに近接して実装可能なため、電気信号損失を低減し、高い光波形品質が期待できる。

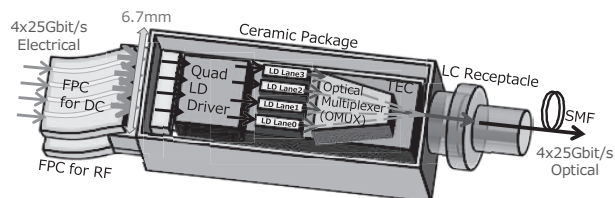


図2 光送信モジュールの構造図

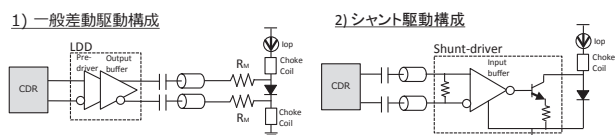


図3 一般的な差動駆動とシャント駆動の模式図

### 4-2 光合波器設計

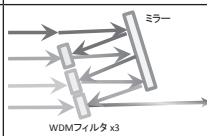
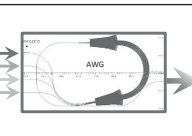
表3に一般的な光合波器の技術を示す。光合波器技術は大別して、光を導波路に入射して伝搬させて合波する光導波路方式と、薄膜フィルタを用いて空間で光を結合する空間結合方式がある。

光導波路方式は、それ自体が合波器として機能し1つの部品として扱うことができるため、実装プロセスが容易であることが最大の利点であるが、部品の光透過損失が大きいという性質がある。比較的損失の小さいAWG (Arrayed-Waveguide Grating) 方式においても、約4dBの光損失を有するため、LD出力光をSMFに結合させるためのレンズ光学系の結合効率を含めると、目標光損失の7.3dBを満たすことは難しい。

一方で、空間結合方式は、複数の光学薄膜フィルタで構成される。フィルタ単体の光透過損失は、0.3dB以下と非常に

小さく、複数のフィルタ構成でも1.5dB以下の挿入損失が可能である。さらにレンズ系での光結合効率を考慮しても、光損失7.3dB以下の光合波器が実現可能であり、我々は空間結合方式の光合波器を採用した。しかしながらこの方式で低光損失を実現するためには、複数のフィルタを高精度に実装することが必要である。我々は接着剤の選定、硬化条件や実装方法の最適化により、実装精度1.0 $\mu$ m以下、実装角度 $\pm 0.2^\circ$ 以下と、従来条件比1/3の樹脂実装技術を新たに開発することで高精度実装を実現した。

表3 光合波技術のベンチマーク

	空間結合方式	光導波路方式
構造		
挿入損失	0.5dB ~ 1.0dB	3.5dB ~ 5.0dB
光結合損失	3.0dB ~ 5.0dB	6.0dB ~ 8.0dB
サイズ	幅4.5mm	幅4.5mm
実装技術	フィルタ実装 +レンズ調心	レンズ調心

一般的な空間結合方式の光合波器は、表3内に示すように3枚のWDMフィルタ\*2とミラーで構成されている。LAN-WDM規格は波長間隔が4.5nmと狭いため、この光合波器のWDMフィルタには急峻な波長透過特性が求められ、技術難易度が高い部品となる。我々は、LDの偏光特性を積極的に利用し、2枚のWDMフィルタと偏波選択フィルタにより4波長を合波する当社独自の光合波方式を設計した。この合波方式はWDMフィルタを削減できるとともに、図4に示すようにWDMフィルタの波長透過特性を2倍に緩和できるため、フィルタ設計が容易となり、かつ低光損失の実現も可能である。

設計した光合波器の模式図を図5に示す。LDからの4波長の光はレンズにより平行ビームに変換され、光合波器に入力される。レーン0とレーン2のビーム光は、WDMフィルタ#1にて波長合波され、P偏光のまま偏波フィルタを透過する。次に、レーン1とレーン3のビーム光は、同じくWDM

フィルタ#2で波長合波され、半波長板によりP偏光からS偏光に変換され、最終的に偏波選択フィルタによってレーン0~3のビーム光が合波される。

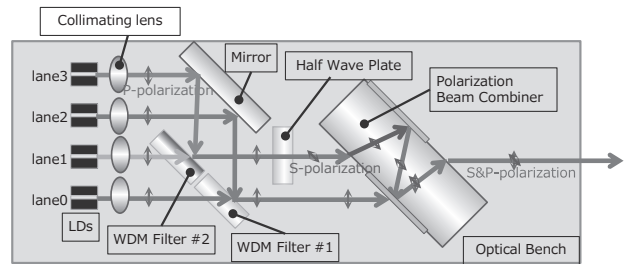


図5 光合波器の模式図

#### 4-3 光結合系に関する設計

図6に一般的な2レンズ光学系と本光送信モジュールに採用した3レンズ光学系の模式図と組立トレランスの比較を示す。一般的な光モジュールのレンズ固定には、サブミクロンの精度で固定が可能なレーザ溶接が用いられるため、組立トレランスの厳しい2レンズ系が適用可能であるが、レンズと金属ホルダで構成される部品のため、広い実装面積が必要である。本モジュールは幅7mm以下を実現するため、ベアレンズを樹脂で実装する設計とした。しかし、開発した実装精度 $\pm 1\mu$ m以下の高精度実装技術を用いても、2レンズ光学系に必要な実装精度は満たすことが難しく、光結合損失の増大に加え、レーン間の光パワー差が拡大することが懸念される。これに対し我々は、第2レンズを調整レンズとした3レンズ光学系を採用することで、高い光結合効率を維持しつつ、組立トレランスを約5倍に拡大し、レンズの樹脂実装を可能とする光学設計を採用した。

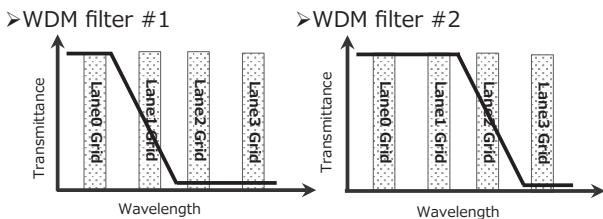
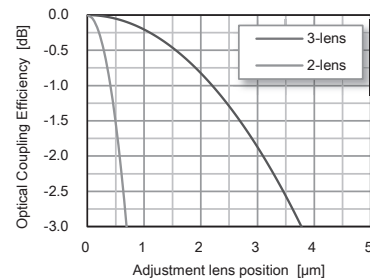


図4 2枚のWDMフィルタの波長透過特性

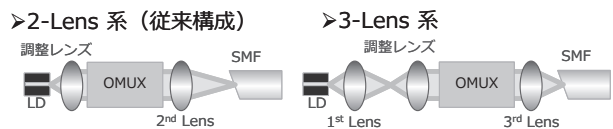


図6 3レンズ系模式図と調整レンズの組立トレランス

## 5. 小型光送信モジュールの特性

### 5-1 光結合損失

図7に光結合損失とレーン間の光パワー差を示す。独自設計の空間結合方式の光合波器と3レンズ光学系の採用により、4.2dB以下（平均2.5dB）で目標性能の7.3dB以下を十分に達成する低光結合損失であることを確認した。さらに、レーン間光パワー差は1.0dB以下と、全レーンで安定した光パワーが得られている。

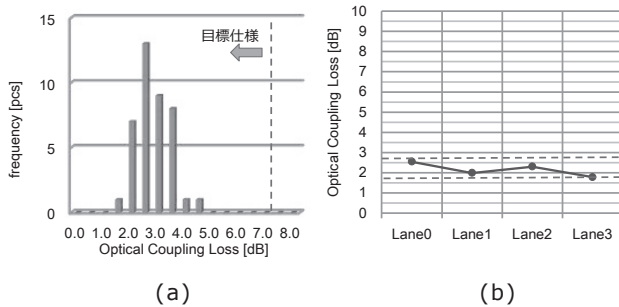


図7 (a) 光結合損失の分布、(b) レーン間光出力差

### 5-2 高周波特性

内製DFB-LDとLDドライバICを採用し、高周波設計を最適化した本開発品の高周波特性の評価結果について報告する。図8に電気-光変換の周波数特性を示す。概ね平坦な周波数特性であり、3dB動作帯域として約20GHzが得られており、25Gbit/sの動作には十分である。

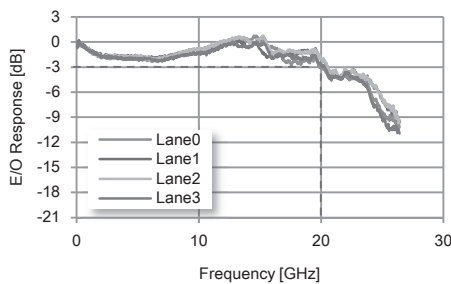


図8 光送信モジュールの周波数特性

図9には、25.78125Gbit/sにおける光波形を示す。全波長レーンにてPMM24%以上の十分な光波形品質が得られている。

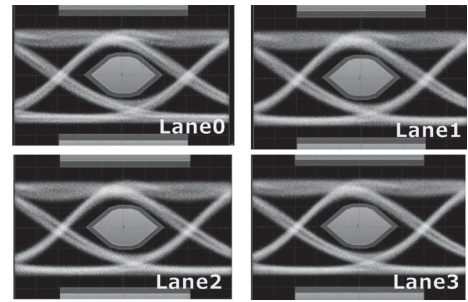


図9 25Gbit/s動作での光波形

### 5-3 光出力の温度依存性

図10に光出力の温度依存性を示す。複数の光学部品を用いた複雑な光学系においても、開発した樹脂実装技術을適用することで、全温度範囲、全レーンにおいて、光出力変動は±0.5dB以下と非常に良好である。

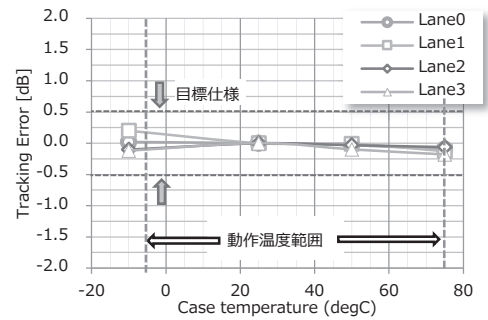


図10 光出力の温度依存性

### 5-4 消費電力

図11に光送信モジュールの消費電力のケース温度依存性の典型例を示す。内製のDFB-LDとシャント駆動LDドライ

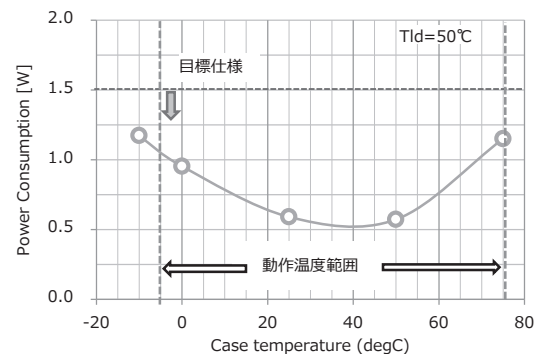


図11 消費電力の温度依存性

バICを採用することで、消費電力は全温度範囲において目標の1.5Wを十分下回る良好な結果が得られている。

## 6. 結 言

光トランシーバCFP4に搭載可能な4波長集積小型光送信モジュールを開発した。波長合波と偏波合波を利用した独自の光合波器設計と高精度・高密度実装技術の開発により、小型化、低光損失化を実現し、全レーンにおいて安定した光パワーを確認した。内製の直接変調型DFB-LDとシャント駆動ドライバICを採用し、伝送速度25Gbit/s条件下にて良好な動作特性と全温度範囲における低消費電力特性を確認した。

今後は更なる小型化、高速化の市場要求に応えるべく、本開発で得た技術を活用し、新たな光モジュールの開発を進める。

## 用語集

### ※1 CFP, CFP2, CFP4

100G Form-factor pluggable : 100Gbit/s用の業界標準規格の光トランシーバ。

### ※2 WDMフィルタ

波長選択フィルタ。特定波長のみ透過させる薄膜を施した光学フィルタ。

## 参 考 文 献

- (1) "IEEE 802.3ba Media Access Control Parameters," Physical Layers, and "Management Parameters for 40Gb/s and 100Gb/s Operation"
- (2) 藤村康, 「100Gbit/s小型WDM集積TOSA, ROSA」, 電子情報通信学会ソサイエティ大会2014 CI-1-7
- (3) Tomoya Saeki, "100Gbit/s Compact Transmitter Module Integrated with Optical Multiplexer," IEEE Photonics Conference 2013, TuG3.2
- (4) Akihiro Moto, "A Low Power Quad 25.78-Gbit/s 2.5 V Laser Diode Driver Using Shunt-Driving in 0.18  $\mu$ m SiGe-BiCMOS," IEEE Compound Semiconductor Integrated Circuit Symposium 2013 G-3
- (5) Yasuo Yamasaki, "High Reliability 1.3- $\mu$ m Buried Heterostructure AlGaInAs-MQW DFB Laser Operated at 28-Gbit/s Direct Modulation," IEEE International Semiconductor Laser Conference 2012, TuB2
- (6) 川村正信, 「40G/100Gbit/s 用光分波器集積小型光受信モジュール」, SEIテクニカルレビュー第186号 (2015年1月)
- (7) 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)

## 執 筆 者

佐伯 智哉\* : 伝送デバイス研究所 主査



佐藤 俊介 : 伝送デバイス研究所 主査



黒川 宗高 : 伝送デバイス研究所



鈴木三千男 : 伝送デバイス研究所



田中 啓二 : 伝送デバイス研究所 グループ長



藤村 康 : 伝送デバイス研究所 グループ長



\*主執筆者