



# 高速 (100G/200G/400G用) 高感度 APD チップ搭載4ch集積受信デバイス

Integrated ROSA with High-Sensitivity APD Chips for up to 400 Gbit/s Communication

中島 史博\*  
Fumihiro Nakajima

平山 徹  
Toru Hirayama

遠藤 匠  
Takumi Endo

前川 享平  
Kyouhei Maekawa

栗原 涼  
Ryo Kuwahara

矢崎 厚志  
Atsushi Yasaki

インターネット環境の更なる向上に対する社会要請に応えるため、光部品市場のニーズは現在主流である100G製品から、早くも200G/400G製品へと移行しつつある。当社はその高速化に加え、20 km超の中長距離伝送に対するニーズにも応えるべく、内製APDを搭載した4ch APD集積受信デバイスを開発した。これまで開発してきた4ch集積受信デバイスの設計をベースとし、当社独自設計の高感度APDチップと光挿入損失の小さい空間結合型の光分波器を内蔵した、伝送速度200 Gbit/sにおいて優れた性能を有する4ch APD集積受信デバイスを実現した。本稿ではデバイス構造や、1シンボルあたり2ビットの情報を伝送することが可能な4値パルス振幅変調 (4-level Pulse Amplitude Modulation, PAM4) 信号を用いた53 Gbit/sでの受信感度等の諸特性について紹介する。

In response to market expectations for 200 Gbit/s and 400 Gbit/s optical devices, we have developed a new compact receiver with four avalanche photodiodes and an integrated optical de-multiplexer for 20-40 km distance applications. This receiver is based on the structure of our previous 40 Gbit/s and 100 Gbit/s receivers and employs newly developed avalanche photodiodes for high responsibility. This paper presents the design and performance of the receiver, including its sensitivity in 53 Gbit/s PAM4 (pulse amplitude modulation 4) signal transmission.

キーワード：100G超、受信デバイス、高集積、APD

## 1. 緒 言

LTE<sup>\*1</sup>等の高速な無線ネットワークのサービス拡大に加え、昨今の携帯端末の漸進的な進歩によって、動画コンテンツなど大容量データへのアクセスが容易に行われるようになってきた。産業界においてもビッグデータ、IoTといったキーワードで語られるように、社会全体の情報通信への依存度が益々大きくなっている。

その社会要請に応えるため、**図1**に示したCFP<sup>\*2</sup>や、より小型のCFP4<sup>\*2</sup>、QSFP28<sup>\*3</sup>といった伝送速度100 Gbit/s

の光トランシーバが、ネットワーク構築のための主流製品として用いられている。しかしながら、市場のニーズは早くも伝送速度200 Gbit/sや400 Gbit/s製品へと移行しつつあり、CFP8<sup>\*2</sup>やQSFP-DD<sup>\*3</sup>などの次世代光トランシーバの開発が進められている。

当社はこれまでにQSFP28に搭載可能なサイズで、かつ4波長の信号光を1つのデバイスで受信できる、小型の4ch集積受信デバイスを開発してきた<sup>(1)~(3)</sup>。200 Gbit/s超の高速化への要求に加え、20 km超の中長距離伝送のニーズにも応えるため、当社が開発した4ch集積受信デバイスの設計をベースに、当社独自の高感度のアバランシェフォトダイオード (Avalanche Photodiode, APD) を内蔵した、伝送速度100 Gbit/sおよび200 Gbit/s、伝送距離20 km超に対応した4ch APD集積受信デバイスを開発した。

## 2. 4ch APD集積受信デバイスの構成

### 2-1 デバイス構造

**図2**に今回開発した4ch APD集積受信デバイスの外観図、**図3**にデバイス構成の模式図を示す。レセプタクルやケースといった光トランシーバ設計に関わる構成部品を、既存の4ch集積受信デバイスと共通化することで、小型光トランシーバのQSFP28筐体にも搭載可能なサイズとなっている。

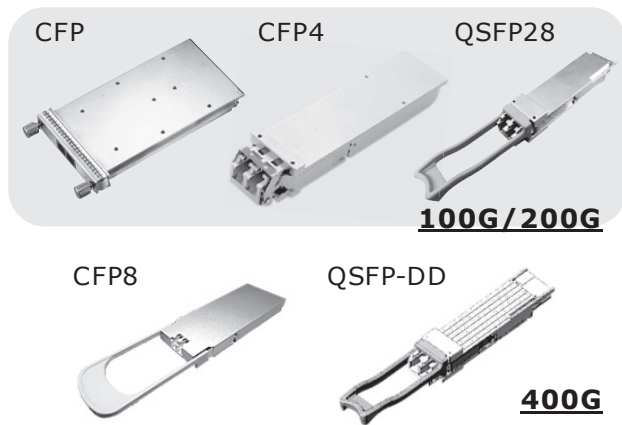


図1 100 Gbit/s超光トランシーバの外観図

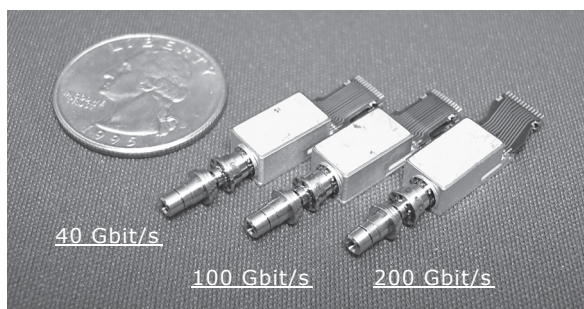


図2 4ch集積受信デバイスの外観図



図3 4ch集積受信デバイスの構成模式図

図4に、4ch APD集積受信デバイスの光学系の概要を示す。4波長の信号光が多重化された光が、ケース外部のレセプタクルに内蔵されたレンズにより平行光化されたのち、ケース内の光分波器で4波長の信号光に空間的に分離される。光分波器は、各信号光の波長帯のみ透過するバンドパスフィルタとミラーが対向配置された構造で、その間を多重化された信号光が透過・反射を繰り返すことで波長ごとに分波される。

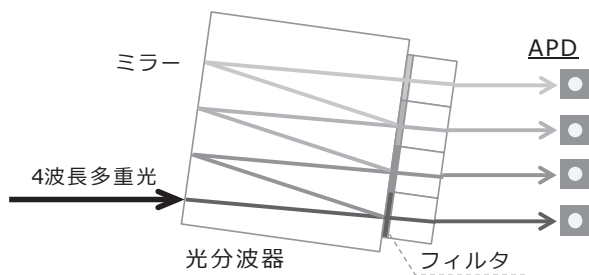


図4 4ch APD集積受信デバイスの光学系概要

各信号光は、その後方に配置されたAPDに集光される。APDは後述のように当社の独自設計であり、裏面入射、モノリシックレンズ集積、高受光感度といった点を特徴とする。図5に電気信号系の機能ブロック図を示す。APDで光電変換された信号は、後段のトランスインピーダンスアンプ (Transimpedance Amplifier, TIA) で増幅されたの

ち、ケースおよびフレキシブル基板上に設けられた高周波線路を經由して光トランシーバに伝達される。

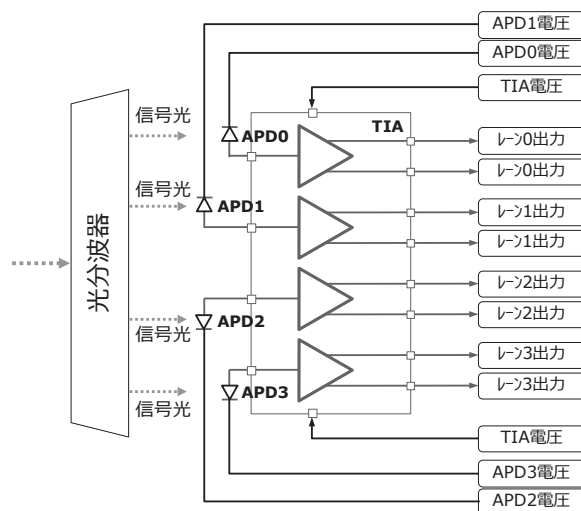


図5 4ch APD集積受信デバイスの機能ブロック図

1信号光あたり50 Gbit/s超の伝送速度を実現するため、従来の1シンボルで1ビットの情報を伝送するNRZ (Non-Return to Zero) 信号ではなく、4値パルス振幅変調 (4-level Pulse Amplitude Modulation, PAM4) 信号がIEEEの標準規格として定められた<sup>(4)</sup>。図6に示すように、PAM4信号は1シンボルあたり2ビットの情報を含むため、NRZ信号と同じシンボルレートでありながら2倍の情報量を伝送することが可能となる。

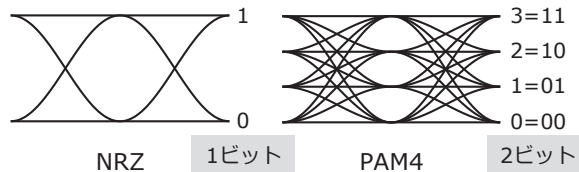


図6 NRZおよびPAM4信号の概略図

## 2-2 APD構造

図7に当社が開発したAPDチップの外観図と、断面構造の模式図を示す。本デバイスに搭載するAPDチップは、CR時定数やキャリア走行時間、増倍立ち上がり時間を各々最適化することで高速動作を実現している。容量低減のため小口径化した受光領域に対し、入射した信号光を効率よく

結合するために裏面入射構造を採用し、かつその入射面にモノリシックレンズを設けることで、広い有効受光径を実現している。チップには半田バンプを形成することで、基板上へのフリップチップ実装<sup>\*4</sup>を容易にしている。一方、キャリア走行時間と増倍立ち上がり時間の短縮化のため、半導体層全体の電界設計に基づいて構成する光吸収層や増倍層の厚さやキャリア濃度を最適化している。これら半導体層の形成には、層厚や不純物濃度の制御性に優れた有機金属気相成長法を用いている。

キャリア走行時間の短縮のためには光吸収層の薄膜化が有効であるが、それに伴う受光感度低下を抑制するため、当社APDチップには反射ミラーを設けている。これにより、光吸収層で吸収されず一度透過した信号光を反射させることで受光感度を向上させると共に、電極金属と反射ミラーを兼ねた構造とすることで、層構成を複雑にすることなく製造性を考慮した設計としている。

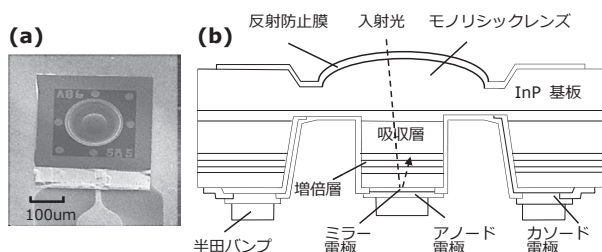


図7 APDチップの (a) 外観図、および (b) 構造図

### 2-3 APD 特性

図8に、デバイス温度25℃、光入力パワー-27 dBmにおけるAPDチップの電流-電圧特性を示す。ブレイクダウン電圧の90%に相当する印加電圧において、400 nA以下の低暗電流を実現し、かつ最大増倍率30以上の良好な増倍特

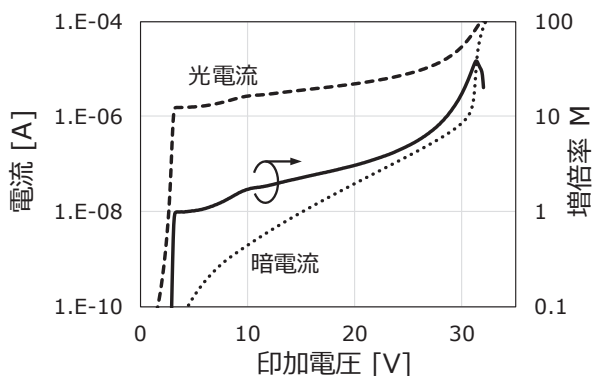


図8 APDの電流-電圧曲線

性を得ている。図9は、デバイス温度25℃、増倍率10におけるモノリシックレンズ面内の受光感度を表しており、反射ミラーをもたない従来型素子の受光感度の最大値で規格化したものである。反射ミラーの採用により最大受光感度は1.3倍向上し、広い有効受光径と高い受光感度を兼ね備えていることがわかる。

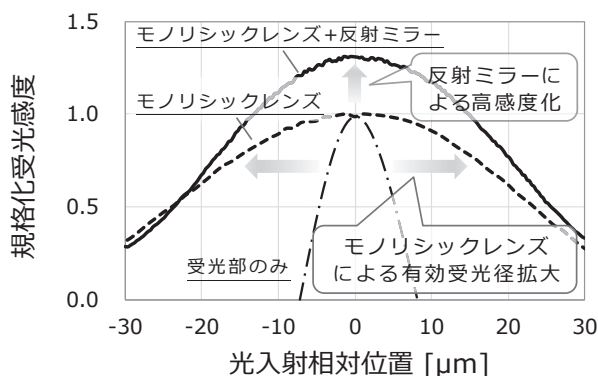


図9 APDの受光感度特性

### 3. 開発目標仕様

表1に、4ch APD集積受信デバイスの開発目標仕様を示す。IEEE標準や4WDM<sup>(5)</sup>等のMSA<sup>\*5</sup>をベースに、市場要求を加味した上で当社が独自に設定したものを開発目標とした。

表1 4ch APD集積受信デバイスの開発目標仕様

	100 Gbit/s	200 Gbit/s	単位
変調方式	NRZ	PAM4	-
伝送速度	25.78125	53.125	Gbit/s
波長	1294.53~1296.59		nm
	1299.02~1301.09		
	1303.54~1305.63		
	1308.09~1310.19		
最小受信感度† (OMA <sup>*6</sup> )	< -18.5	-	dBm
最小受信感度‡ (OMA <sup>*6</sup> )	-	< -15.0	dBm

†符号誤り率=5×10<sup>-5</sup>での光入力パワーとして定義  
‡符号誤り率=2×10<sup>-4</sup>での光入力パワーとして定義

### 4. デバイス特性

#### 4-1 分波特性

図10に4ch APD集積受信デバイスの分波特性を示す。本デバイスには、既存の4ch集積ROSAにも採用しているIEEE準拠の波長グリッドに対応した光分波器を搭載している。

ここで示す受光感度は、平均光入力パワー-20 dBm、増倍率1での値である。表1に示した各レーンの波長範囲での受光感度は0.65 A/W以上で、かつその変動量は0.5 dB以下である。これは4波長の信号光が4つのAPDチップに対し同時に高効率で結合していることを表し、当社APDチップのモノリシックレンズ集積構造と高感度設計によるものである。

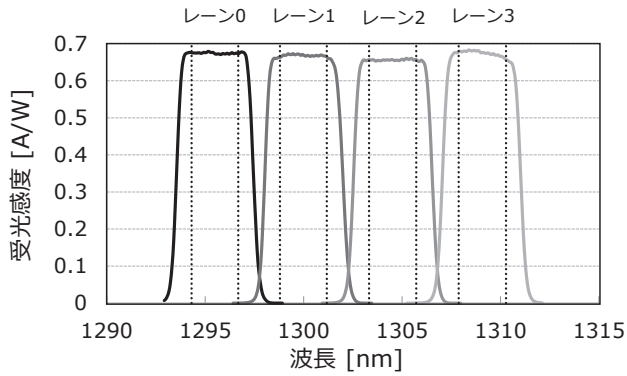


図10 各レーンの分波特性

#### 4-2 全高調波歪み／出力振幅

図11に、変調周波数1 GHz、変調度30%の信号光を用いて測定した全高調波歪み (Total Harmonic Distortion, THD)、および出力波形振幅の光入力パワー依存性を示す。平均光入力パワーが0 dBm以下でのTHDは1%以下、+2 dBmにおいても2%以下であり、優れた線形性を有していることがわかる。出力振幅は、-15 dBm以下での小信号領域では単調に増加し、+2 dBmまではTIAの利得調整機能によりほぼ一定値を示し、PAM4信号処理に十分な出力振幅が得られている。

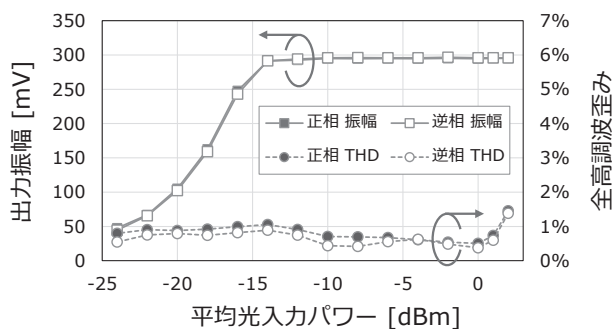


図11 全高調波歪みおよび出力振幅

#### 4-3 受信感度特性

図12にデバイス温度25℃、伝送速度25.78125 Gbit/s (PRBS2<sup>31</sup>-1)、NRZ信号入力時の符号誤り率を示す。ここで示す符号誤り率は、他の3レーンに光入力がある状態、つまりクロストークの影響を含む測定値である。符号誤り率=5×10<sup>-5</sup>での最小受信感度 (OMA) は-23 dBm以下を示し、目標仕様-18.5 dBmに対し4.5 dB以上のマージンを有している。また、クロストークによる受信感度劣化は0.5 dB以下であることを確認している。

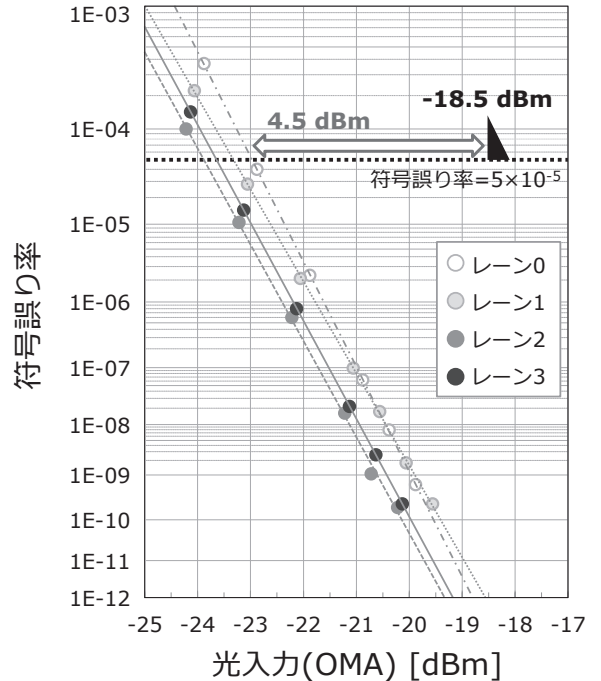


図12 25.78125 Gbit/s, NRZ信号での符号誤り率

図13に、デバイス温度25℃、伝送速度53.125 Gbit/s (PRBS2<sup>31</sup>-1)、PAM4信号入力時の符号誤り率を示す。符号誤り率は、他の3レーンからのクロストークがない状態での測定値である。光源には、当社が開発を進めている外部変調器付きレーザダイオードを一つのケースに集積した、4ch集積送信デバイスを使用した<sup>(6)</sup>。前方誤り訂正なしの最小受信感度 (OMA) は、すべてのレーンで-17 dBm (符号誤り率=2×10<sup>-4</sup>) 以下を示し、目標仕様を満足する特性を実現している。また前方誤り訂正ありでの最小受信感度 (OMA) も、-17 dBm以下 (符号誤り率=1×10<sup>-12</sup>) である。

#### 4-4 ファイバ伝送試験

図14に、デバイス温度25℃、伝送速度53.125 Gbit/s (PRBS2<sup>31</sup>-1)、PAM4信号での0 km、20 kmおよび40 km伝送後の符号誤り率を示す。光源には、前節と同じ4ch集積送信デバイスを使用した。符号誤り率=2×10<sup>-4</sup>における



40 km 伝送後の受信感度劣化（伝送ペナルティ）は、前方誤り訂正なし・あり共に0.1 dB以下と、良好な特性を得ている。

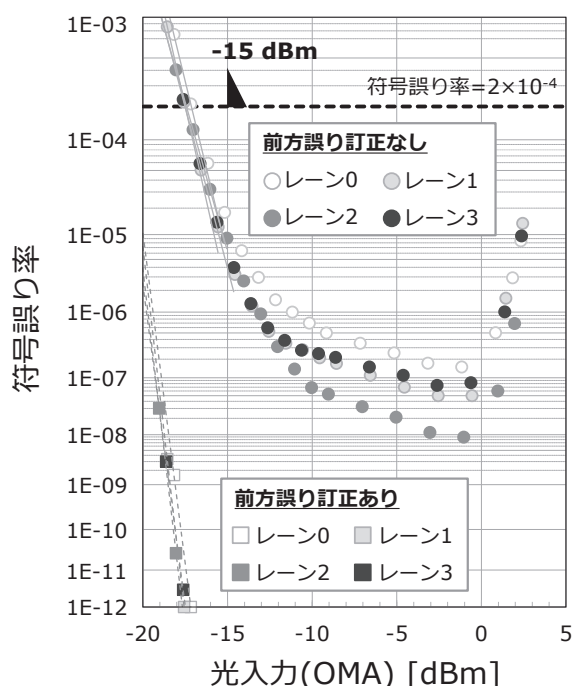


図13 53.125 Gbit/s, PAM4信号での符号誤り率

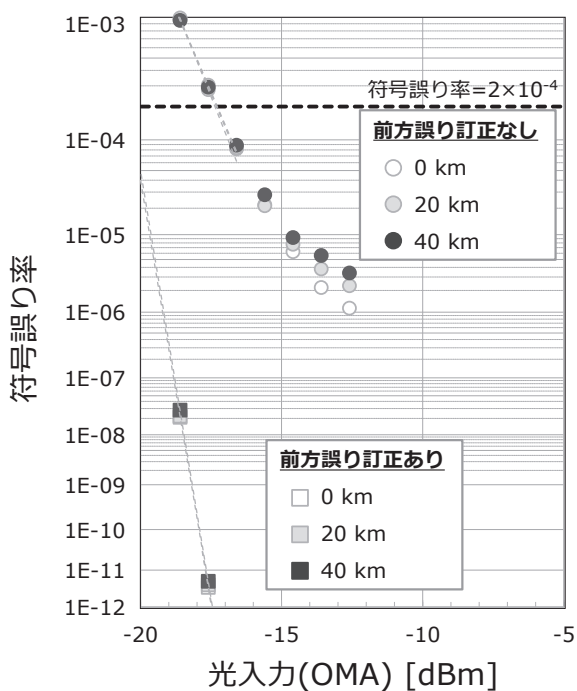


図14 ファイバ伝送後の符号誤り率

## 5. 結 言

当社は、伝送速度200 Gbit/s、伝送距離20 km超用途の光トランシーバに搭載可能な、4ch APD集積受信デバイスを開発した。当社独自設計のAPDチップを搭載することで、高い受光感度と優れた製造性を実現した。25.78125 Gbit/s、NRZ信号での最小受信感度（OMA）は-23 dBm以下、53.125 Gbit/s、PAM4信号では-17 dBm以下を示し、40 km 伝送後の受信感度劣化は0.1 dB以下と良好な特性を示した。また、1274/1278/1282/1287 nmの波長グリッドに対応した光分波器を搭載することで、400 Gbit/s 伝送を実現するCFP8にも対応することが可能である。

### 用語集

#### ※1 LTE

Long Term Evolution：携帯電話通信規格の一つ。4Gとも表記される。伝送速度は最大100 Mbit/s。

#### ※2 CFP/CFP4/CFP8

C Form-factor Pluggable：100 Gbit/s超用光トランシーバの業界標準の一つ。CFP8は伝送速度50 Gbit/s、8波長の信号光を用いて400 Gbit/sを実現する。

#### ※3 QSFP28/QSFP-DD

Quad Small Form-factor Pluggable：100 Gbit/s超用小型光トランシーバの業界標準の一つ。QSFP-DD（Double Density）は、伝送速度100 Gbit/s、4波長の信号光を用いて400 Gbit/sを実現する。

#### ※4 フリップチップ実装

基板上への部品実装方法の一つ。ワイヤによる接続ではなく、導電性材料からなる電極を介して、基板と部品とを電氣的に接続する。

#### ※5 MSA

Multi Source Agreement：部品ベンダーによる、部品仕様等の業界規格、いわゆるデファクトスタンダード。

#### ※6 OMA

Optical Modulation Amplitude：光変調振幅のこと。

参 考 文 献

- (1) 沖和重、「40ギガビット光分波器集積小型光受信モジュールの開発」、SEIテクニカルレビュー第182号 (2013年1月)
- (2) 川村正信、「40G/100Gbit/s用光分波器集積光受信モジュール」、SEIテクニカルレビュー第186号 (2015年1月)
- (3) Fumihiko Nakajima, "100Gbit/s Compact Receiver Module with the Built-in Optical De-Multiplexer," IEEE Photonics Conference 2013, TuG3.1
- (4) <http://www.ieee802.org/3/bs/>
- (5) <http://4wdm-msa.org/>
- (6) 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)

執 筆 者

中島 史博\* : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
光部品事業部  
博士 (科学)



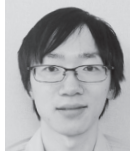
平山 徹 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
光部品事業部



遠藤 匠 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
光部品事業部



前川 享平 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
光部品事業部



栞原 涼 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
光部品事業部 課長



矢崎 厚志 : 住友電工デバイス・イノベーション(株)  
光部品事業部 担当部長



\*主執筆者