

# デジタルコヒーレント光通信用 224Gbit/s小型多値変調器

Compact 224-Gbit/s Modulator Modules for Digital Coherent Optical Communication Systems

関 守弘\*  
Morihiro Seki

河野 直哉  
Naoya Kono

北村 崇光  
Takamitsu Kitamura

板橋 直樹  
Naoki Itabashi

巽 泰三  
Taizo Tatsumi

山路 和宏  
Kazuhiro Yamaji

光通信伝送量の飛躍的な増大に対応すべく、多値変調方式を活用したデジタルコヒーレント光伝送技術が注目され、既に幹線系への導入が開始されている。今後のメトロ系への展開に向けては、光通信システム機器への高密度実装のために各光部品の小型化が望まれている。我々は、InP系材料を用いた多値変調素子の開発、リニアドライバICの開発を行った。更に、多値変調素子、4個のリニアドライバIC、偏波多重光学部品を内蔵した多値変調器サイズを $34.0 \times 16.5 \times 6.0 \text{mm}^3$ にまで小型化し、224Gbit/s DP-16QAM変調動作に向けてLiNbO<sub>3</sub>系変調器と同等の特性を実証した。

Digital coherent technology with multi-level modulation formats is an attractive solution to satisfy the rapid increase in optical traffic demand and has already been adopted in ultra-long haul systems. In the next generation, the application area will be expanded to metro systems, and smaller-sized, lower-power optical components are expected in order to realize high port density. We have developed InP-based modulators and linear driver ICs, which enabled the modulator module size as small as  $34.0 \times 16.5 \times 6.0 \text{mm}^3$ . We demonstrated that a 224-Gbit/s DP-16QAM modulator module including all of an InP-based modulator, four linear driver ICs, and polarization multiplexing micro-optics has comparable performance to LiNbO<sub>3</sub>-based modulators.

キーワード：デジタルコヒーレント伝送、InP、多値変調器、リニアドライバ、DP-16QAM

## 1. 緒 言

映像配信サービスの拡充・高画質化、モバイル端末の普及など、通信トラフィックの増大は止まる所を知らない。その需要を満足する次世代の長距離大容量光伝送システムとして、多値変調方式を活用したデジタルコヒーレント光伝送技術が注目され、既に幹線系へは1波あたり100Gbit/sのシステム導入が開始されている。今後、幹線系からメトロ系への展開に向けては、光トランシーバの小型化によるポート密度の向上ならびにポートあたりの伝送容量向上の要求が強いが、その実現には、小型低消費電力の変調器および受信器の開発が必須である<sup>(1)</sup>。

当社では、InP系の光素子を用いることで小型化を実現した変調器ならびに受信器にて128Gbit/s DP-QPSK<sup>\*1</sup>動作を実証している<sup>(2)</sup>、<sup>(3)</sup>。本稿では、更なる伝送容量向上に向けて、InP系変調素子とリニアドライバICを用いた小型多値変調器を作製し、224Gbit/s DP-16QAM<sup>\*2</sup>動作に向けてLiNbO<sub>3</sub>系変調器と同等の特性を実証<sup>(4)</sup>した取り組みについて報告する。

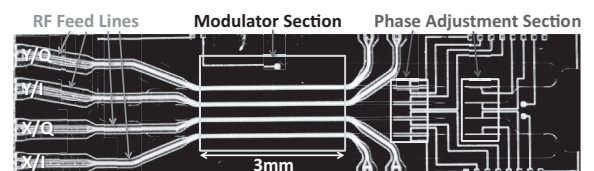
## 2. 素子特性

### 2-1 多値変調素子

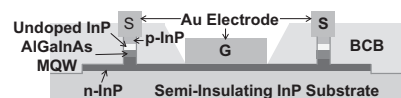
#### (1) 多値変調素子設計

図1 (a) に多値変調素子の上面写真、図1 (b) に多値変調素子変調部の断面模式図を示す。

1素子に4個のMach-Zehnder (MZ) 変調器を集積している。変調部長は3mmである。RF配線面積削減のためS-G-S差動電極構造とし、特性インピーダンスは差動90Ωで設計した。



(a) 上面写真



(b) 変調部断面模式図

図1 多値変調素子

光導波路構造は、幅1.6 $\mu\text{m}$ 、深さ3 $\mu\text{m}$ のディープリッジ光導波路構造を採用している<sup>(5)</sup>。コア部への光閉じ込めが強いため光導波路曲げ半径を小さく出来る点、半導体部体積が少なくなることからS-G間の容量を低減出来る点が利点である。コア層には、アンドープのAlGaInAs多重量子井戸構造を用いることで、電圧印加時の光損失増加に対する変調効率を高めている。また配線形成を行うためBenzocyclobutene (BCB) 樹脂にて光導波路を埋め込んでいる。

## (2) 多値変調素子特性評価結果

図2に光導波路幅に対する光導波損失の評価結果を示す。1.6 $\mu\text{m}$ 幅の光導波路において波長1530-1570nmのC-band帯で0.25dB/mm以下の光導波損失であり、光吸収および光導波路側面での散乱損失は十分に抑制されていると考えられる。

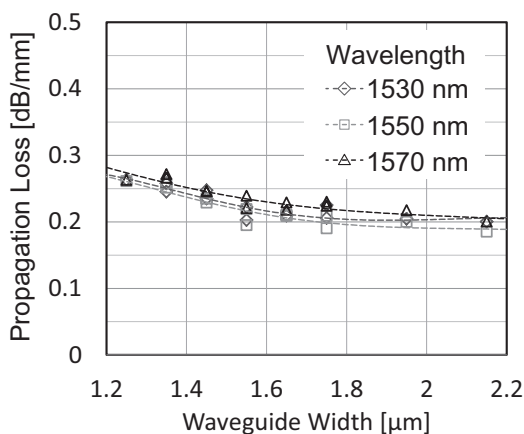


図2 光導波損失の光導波路幅依存性評価結果

図3に逆バイアス電圧印加時における光損失増加の評価結果を示す。波長1570nm、逆バイアス電圧11Vでの光損失増加は1dB以下である。

図4に典型的なDC消光特性評価結果を示す。逆バイアス電圧11V、波長1570nmで25dB以上の消光比 (ER) が得られている。

## 2-2 リニアドライバIC

### (1) リニアドライバIC設計

図5にリニアドライバICのブロック図を示す。高速動作とドライバIC入出力での低い反射損失を実現するため、Traveling wave amplifier (TWA)<sup>(6)</sup>を用いている。本TWAは、6つのリニア増幅ユニットセルとそれを並列接続するコプレーナラインで構成される。TWA 1段構成を用いることで、線形性と低消費電力を両立させている。

またドライバICの周波数特性に周波数ピーキングを持たせることで、変調器内のRF線路における高周波信号損失を

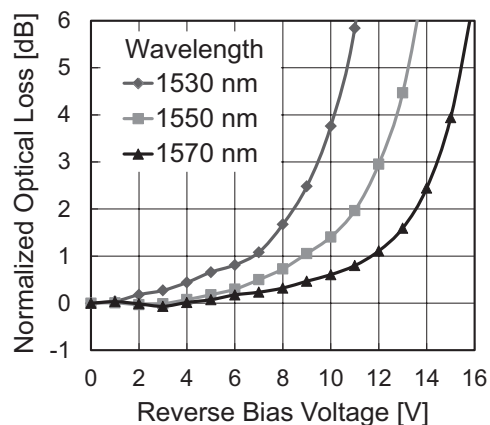


図3 電圧印加時の光損失増加特性評価結果

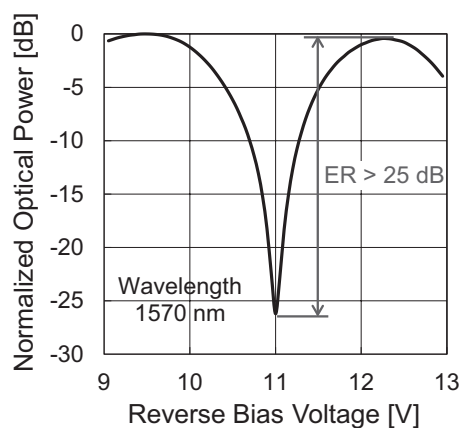


図4 DC消光特性評価結果

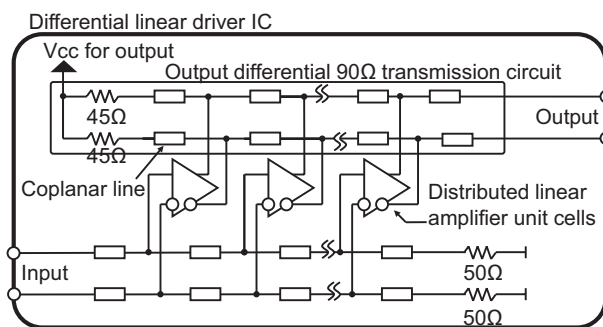


図5 リニアドライバICブロック図

補償し、E/O応答の周波数特性改善を図っている。

ドライバICの出力振幅は差動2.5Vppであるが、本電圧駆動にて1.0V $\pi$ 変調となるように2-1項の多値変調素子は調整を行っている。この場合、2.0V $\pi$ 変調時に比べて変調器の光出力が3dB低下するが、ドライバICの低消費電力化、DCバイアス用プルアップインダクタの削除による実装面積

の削減、光出力の非線形性抑制が可能といった利点がある。

ドライバIC素子サイズは1chあたり $2.1 \times 1.1 \text{ mm}^2$ 、実装面積は4chで $2.1 \times 9.0 \text{ mm}^2$ である。なおドライバICは、InP double heterojunction bipolar transistor (DHBT) プロセスを用いて設計している。トランジスタのFtとFmaxは、それぞれ150GHzと200GHzである。

(2) リニアドライバIC特性評価結果

図6 (a) にS-parameterの評価結果を示す。Sdd11およびSdd22は、周波数50GHz以下において-10dB以下である。Sdd21の-3dB帯域は45GHzであり、3GHzから28GHzにかけての2dB程度の緩やかな周波数ピーキングにより、変調器内のRF線路における高周波信号損失の補償を行う。

図6 (b) に1GHz Sin波の差動入力に対する全高調波歪 (THD) の評価結果を示す。差動出力振幅2.5VppにおいてTHDは2.5%程度である。

図6 (c) に28Gbaudでの4値振幅変調時のアイパターンを示す。なおリニアドライバICへの入力振幅は差動650mVppであり、これはDigital to analog converter (DAC) で直接駆動可能な入力振幅である。本アイパターンの出力振幅は差動2.5Vppであり、良好なアイパターンが確認された。

3. 多値変調器特性

写真1に作製した多値変調器の外観写真、図7に多値変調器のブロック図を示す。多値変調器内には、

- ① 4個のMZ変調器を集積したInP系多値変調素子
- ② 4個のリニアドライバIC
- ③ 偏波多重用のための光学部品
- ④ ①および③を同一温度に保つためのTEC

を内蔵している。また実装での小型化を実現するために、光の入出力ファイバを同一面に配置した他、RF信号の入力を反対面に配置した。多値変調器サイズとして、 $34.0 \times 16.5 \times 6.0 \text{ mm}^3$ までの小型化を達成している。

図8に小信号での (a) E/O応答および (b) Sdd11の評価結果を示す。17.5GHzと21GHzに、信号入力部のインピーダンスミスマッチによるSdd11の増大があり、同じ周波数で

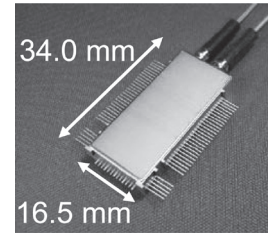


写真1 多値変調器外観写真

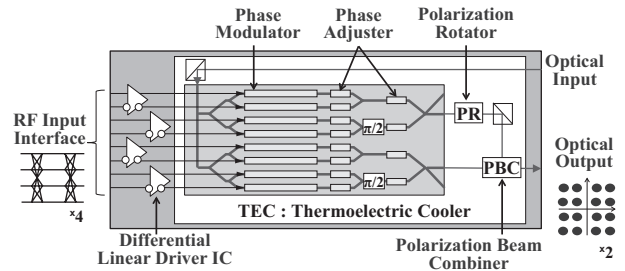


図7 多値変調器ブロック図

E/O応答に窪みが発生しているが、本影響を除けば、E/O応答の-3dB帯域は20GHz程度である。

図9に14Gbaudおよび28GbaudでのSingle-polarization (SP)-16QAM動作時の評価結果を示す。図9 (a) および (b) は光信号対雑音比 (OSNR) に対するBack to Back評価での符号誤り率 (BER) 特性である。図9 (c) と (d) はSP-16QAM変調における信号処理後のコンスタレーション<sup>\*3</sup>である。本評価に使用したレーザ光源の線幅はおよそ500kHzであり、コヒーレントレシーバで受信し、50GS/sのオシロスコープを用いてオフライン処理を行っている。また理論値<sup>(7)</sup>およびLiNbO<sub>3</sub>系変調器 (-3dB帯域は22GHz以上) を同一評価系で評価した結果も図9 (a) (b) にプロットしている。これらの評価結果では、今回開発した多値変調器とLiNbO<sub>3</sub>系変調器とのBER特性の差は小さく、またBER = 10<sup>-3</sup>における理論値との乖離は14Gbaudで2.8dB、28Gbaudで5.6dBであった。

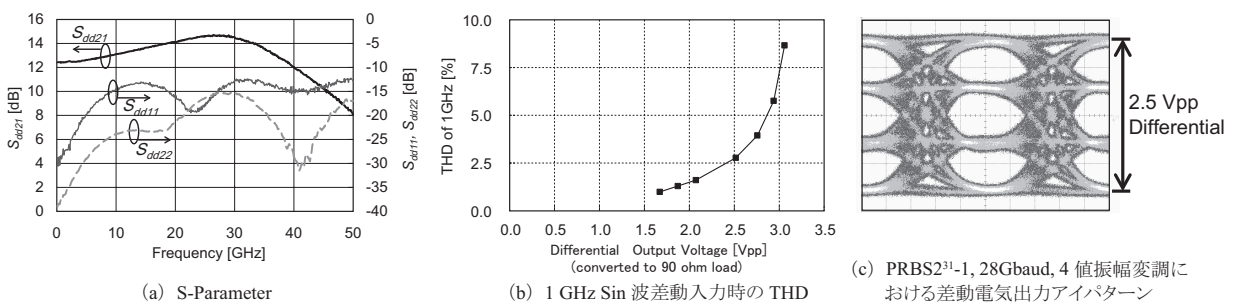


図6 リニアドライバIC特性評価結果

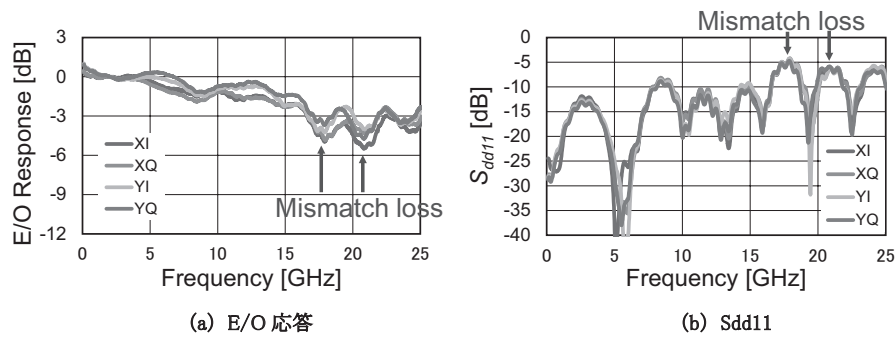


図8 多値変調器の小信号周波数応答評価結果

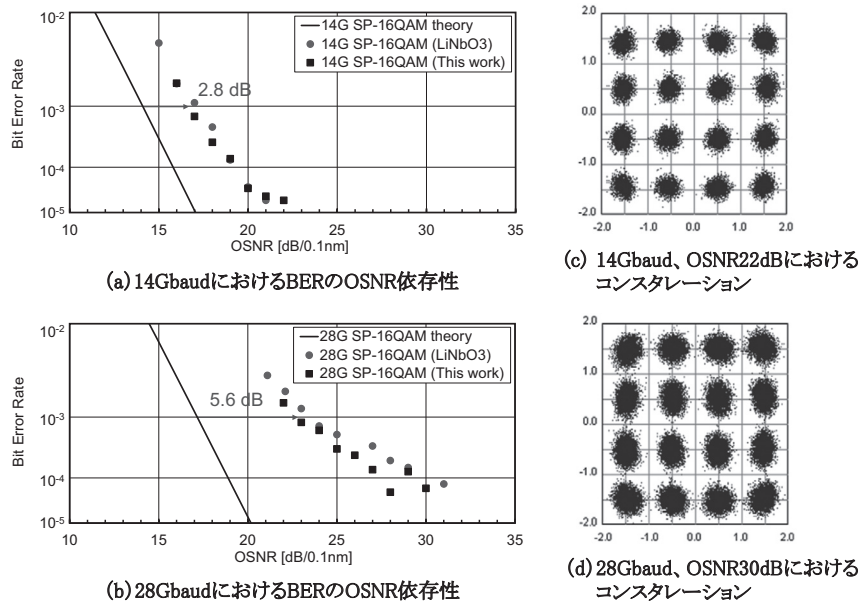


図9 多値変調器SP-16QAM伝送特性評価結果

なお消費電力は、4個のドライバIC合計で2.4W以下、TEC部で0.8W以下であり、変調器の消費電力は3.2W以下であった。

#### 4. 結 言

InP系材料を用いた小型多値変調素子の開発、およびInP-DHBTプロセスを用いた低消費電力で小実装面積のリニアドライバICの開発を行った。また多値変調素子、4個のリニアドライバIC、偏波多重光学部品を内蔵した多値変調器サイズを $34.0 \times 16.5 \times 6.0 \text{mm}^3$ にまで小型化し、224Gbit/s DP-16QAM変調動作に向けてLiNbO<sub>3</sub>系変調器と同等の特性を実証した。

#### 用語集

##### ※1 DP-QPSK

Dual-Polarization Quadrature Phase Shift Keying: QPSKは四位相偏移変調。90° 間隔でずれた4位相を組み合わせることで、一度に2 bitの情報を伝送する通信方式。更に、直交する二偏波を用いる (DP) ことで、同時に2つのQPSK信号を送り、計4 bitの情報伝送が可能となる。

##### ※2 16QAM

16 Quadrature Amplitude Modulation: QAMは直交振幅変調。90° 間隔でずれた4位相に加え、2つの振幅を組み合わせることで、一度に16値すなわち4bitの情報を伝送する通信方式。

### ※3 コンスタレーション

伝送されるデジタル信号の位相と振幅の関係を複素平面上に示した図。

#### 参 考 文 献

- (1) W. Forsyia, "Progress in InP-based Photonic Components and Sub-systems for Digital Coherent Systems at 100Gbit/s and beyond," ECOC13, Mo.3.C.2 (2013)
- (2) N. Kono, T. Kitamura, H. Yagi, N. Itabashi, T. Tatsumi, Y. Yamauchi, K. Fujii, K. Horino, S. Yamanaka, K. Tanaka, K. Yamaji, C. Fukuda, and H. Shoji, "Compact and Low Power DP-QPSK Modulator Module with InP-Based Modulator and Driver ICs," OFC/NFOEC2013, OW1G.2.
- (3) H. Yagi, N. Inoue, Y. Onishi, R. Masuyama, T. Katsuyama, T. Kikuchi, Y. Yoneda, and H. Shoji, "High-Efficient InP-Based Balanced Photodiodes Integrated with 90° Hybrid MMI for Compact 100 Gb/s Coherent Receiver," OFC/NFOEC2013, OW3J.5.
- (4) T. Tatsumi, N. Itabashi, T. Ikagawa, N. Kono, M. Seki, K. Tanaka, K. Yamaji, Y. Fujimura, K. Uesaka, T. Nakabayashi, H. Shoji and S. Ogita, "A Compact Low-Power 224-Gb/s DP-16QAM Modulator Module with InP-based Modulator and Linear Driver ICs," OFC/NFOEC 2014, Tu3H.5.
- (5) H. Yagi, T. Kitamura, N. Kono, H. Kobayashi, N. Inoue, K. Horino, D. Kimura, K. Fujii, Y. Yoneda, C. Fukuda and H. Shoji, "Low driving voltage InP-based Mach-Zehnder modulators for compact 128 Gb/s DP-QPSK modulator," in Conf. on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, and OptoElectronics and Commun. Conf./Photonics in Switching (CLEO-PR&OECC/PS), WK2-1 (July 2013)
- (6) Y. Baeyens, N. Weimann, P. Roux, A. Leven, V. Houtsma, R. F. Kopf, Y. Yang, J. Franckoviak, A. Tate, J. S. Weiner, P. Paschke, and Y.-K. Chen, "High Gain-Bandwidth Differential Distributed InP D-HBT Driver Amplifiers With Large (11.3Vpp) Output Swing at 40Gb/s," IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS, VOL.39, NO.10 (OCT. 2004)
- (7) K. Kikuchi, and S. Tsukamoto, "Evaluation of Sensitivity of the Digital Coherent Receiver," JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 26, NO. 13 (JULY 1, 2008)

#### 執 筆 者

関 守弘\* : 伝送デバイス研究所 主席



河野 直哉 : 伝送デバイス研究所 主査  
博士 (情報科学)



北村 崇光 : 伝送デバイス研究所



板橋 直樹 : 伝送デバイス研究所



巽 泰三 : 伝送デバイス研究所 主席



山路 和宏 : 伝送デバイス研究所 主席



\*主執筆者