

# 100Gbps光通信向け半導体光増幅器集積InP位相変調器

鈴木洋介\* 堀口裕一郎\*  
西川智志\* 秋山浩一\*\*  
林 周作\*

*InP - Based Modulator for 100Gbps Optical Transmission Integrated with a Semiconductor Optical Amplifier*

*Yosuke Suzuki, Satoshi Nishikawa, Shusaku Hayashi, Yuichiro Horiguchi, Koichi Akiyama*

## 要 旨

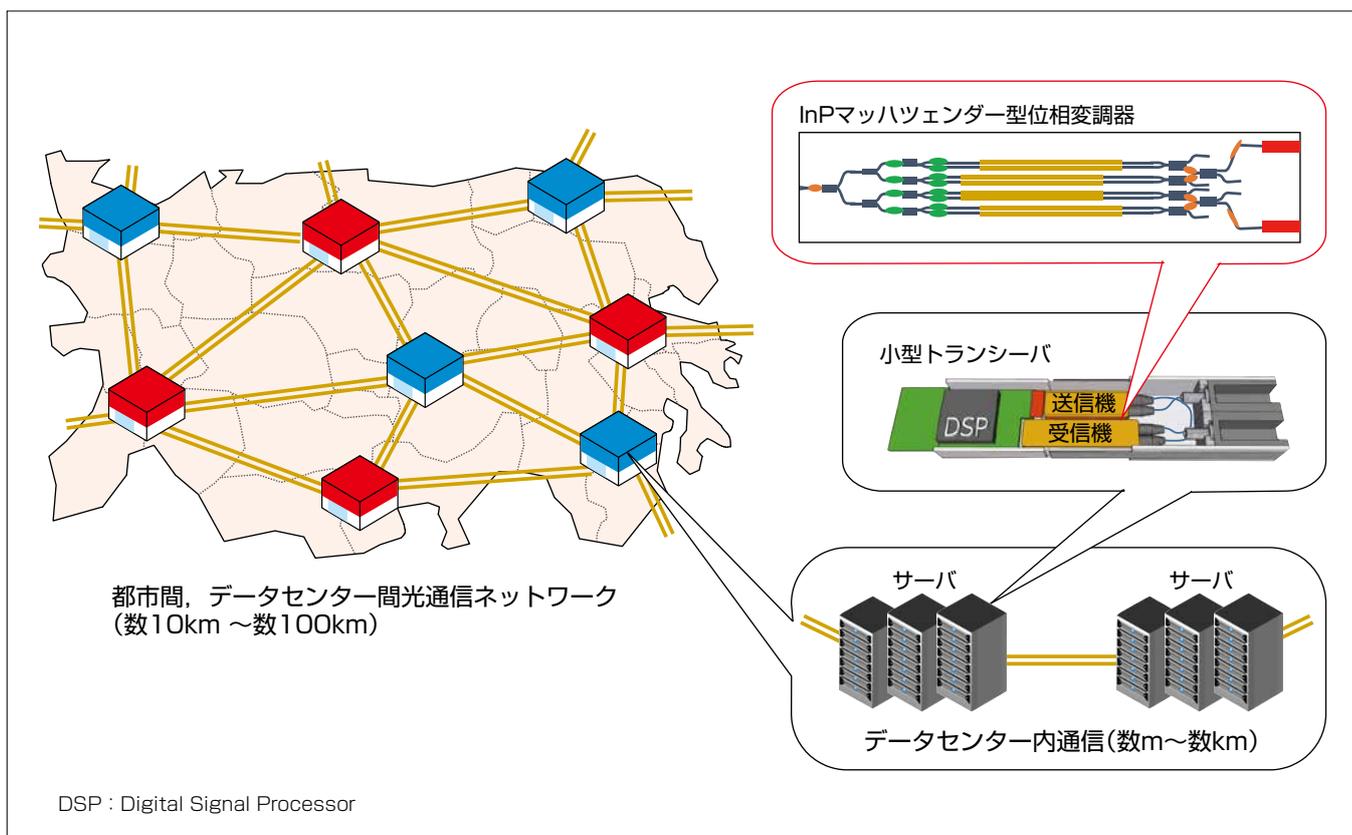
スマートフォンなどの移動体通信端末の普及、クラウドを用いたデータサービスの多様化などによって、通信トラフィックは急速に増大している。これに伴い、大都市間を結ぶ幹線系光通信ネットワークはもとより、都市間、データセンター間など比較的短距離の光通信ネットワークでも高速・大容量化が求められている。大容量化には、多値変調が可能なコヒーレント位相変調方式が有利であるが、これらの光通信ネットワークでは同時に光トランシーバの小型・低消費電力化も必要とされている。

小型・低消費電力化には、幹線系光通信ネットワークで利用されてきた誘電体位相変調器に代えて、半導体位相

変調器を用いることが有効である。しかしながら、半導体位相変調器は光損失が大きいと、高出力光源や光ファイバ増幅器が必要になるという課題があった。

今回、InP(インジウムリン)半導体マッハツェンダー型位相変調器の光出力部に位相変調に適した半導体光増幅器をモノリシック集積することで、128GbpsのDP-QPSK (Dual Polarization Quadrature Phase Shift Keying) 変調で、+13dBmの光入力パワーに対し、高い光出力(+2.5dBm)の良好な変調信号波形が得られた。

これによって、小型・低消費電力のコヒーレント位相変調通信ネットワークの構築に貢献できる。



## 100Gbps光通信向け半導体光増幅器集積InP位相変調器とその適用例

都市間、データセンター間などの光通信ネットワークの高速・大容量化に向けて、小型・低消費電力のコヒーレント位相変調方式を用いた光トランシーバが求められている。InP半導体を用い、光増幅器をモノリシック集積したマッハツェンダー型位相変調器を開発し、良好な変調信号波形と高光出力を実現した。これによって、増大するデータ通信量に対応する光通信ネットワークシステムの構築に貢献できる。

### 1. ま え が き

スマートフォンなどの移動体通信端末の普及、クラウドを用いたデータサービスの多様化などによって、通信トラフィックは急速に増大している。これに伴い、大都市間を結ぶ幹線系光ネットワークはもとより、都市間、データセンター間など比較的短距離の光通信ネットワークでも更なる高速化、大容量化が求められている。そこで、強度変調方式より高度な信号変調が可能な、デジタルコヒーレント位相変調方式の適用が検討されている。

今回、小型、高速、低消費電力な光トランシーバを実現するため、InP系半導体を用いてマッハツェンダー型位相変調器と半導体光増幅器(Semiconductor Optical Amplifier : SOA)をモノリシック集積した素子を試作した。このとき、SOAを位相変調に対して最適化することで、DP-QPSK変調時に128Gbpsの信号伝送に相当する32Gbaud動作で、+13dBmの光入力パワーに対し、高い光出力(+2.5dBm)の良好な変調信号波形が得られた。

### 2. 素 子 設 計

#### 2.1 位相変調用SOAの最適化

InP光導波路の光損失は、従来の位相変調器で用いられてきたLiNbO<sub>3</sub>(ニオブ酸リチウム)光導波路と比べて大きい。SOAを用いて光を増幅することが有効である<sup>(1)</sup>。しかし、SOAによって増幅された位相変調光は、利得が小さい領域ではASE(Amplified Spontaneous Emission)による位相雑音によって、また、利得が大きく、飽和した領域では位相歪(ひず)みによって、変調波形が劣化することが知られている<sup>(2)(3)</sup>。そこで、線形応答領域で所望の利得が得られるように最適化を行った。

まず、SOAへの光入力、変調器への入力と変調器内での損失等を考慮して-15dBmから-5dBmの範囲であると想定した。このとき10dBの利得が得られるように多重量子井戸構造(Multiple Quantum Wells : MQW)を設計し、導波路長を300 $\mu$ m, 500 $\mu$ m, 750 $\mu$ mとしたSOAをそれぞれ試作し、評価を行った。

図1に試作したSOAへ連続光を入力したときの光入力に対する利得の関係を示す。なお、SOAの駆動電流はいずれも100mAとした。導波路長300 $\mu$ mでは、光入力-15dBmから+7dBmの広範囲で一定の利得が得られたが、利得は目標以下の7.5dBであった。また、導波路長750 $\mu$ mでは、光入力-15dBmで18dBの利得が得られたが、光入力の増加とともに利得が大きく低下する非線形応答を示した。一方、導波路長500 $\mu$ mでは、光入力-15dBmから-3dBmの範囲で利得はほぼ一定となる線形応答を示し、目標を上回る12dBの利得が得られることが分かった。

次に図2に示すように、DSP(Digital Signal Processor)

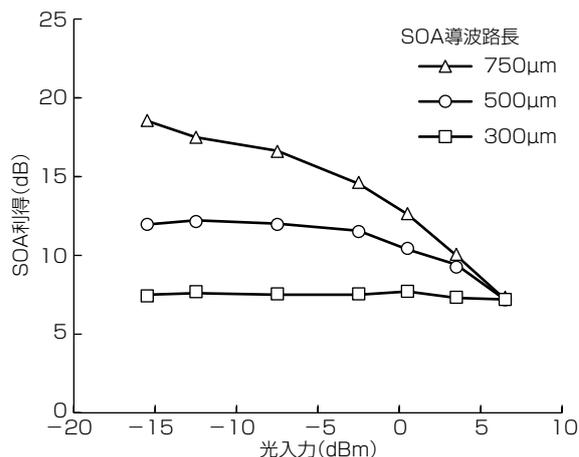


図1. 光入力に対するSOAの利得特性

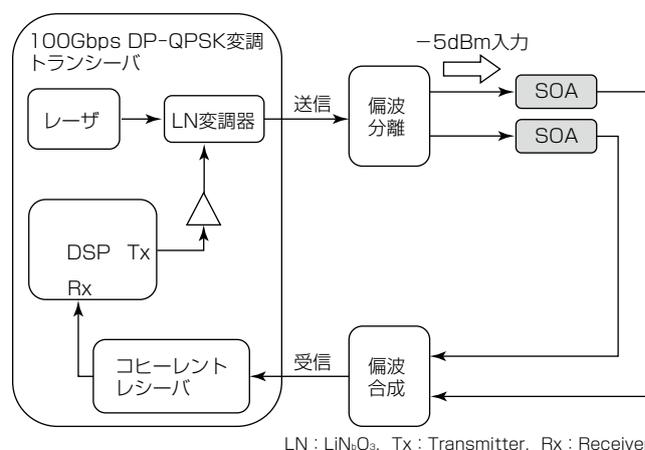


図2. 位相変調信号特性の評価系

を内蔵したトランシーバを用いた位相変調特性の評価系を構築し、オフライン測定による変調波形のコンステレーション評価を行った。評価したSOAの導波路長は500 $\mu$ m, 及び750 $\mu$ m, SOAへの光入力は平均パワー-5dBmの100Gbps DP-QPSK変調光とした。

図3に片偏波のコンステレーション、図4に伝送性能の指標の一つであるQ値とSOA利得の関係を示す。導波路長500 $\mu$ mのSOAを用いたときには、利得の線形性が高いことから広い駆動電流範囲で位相雑音の少ないコンステレーションが得られた。また、SOA利得2dBから12dBの範囲で15.5dB以上のQ値が得られ、SOAを用いないときのQ値15.9dBと同等であることが分かった。一方、導波路長750 $\mu$ mのSOAを用いたときには、低い駆動電流領域ではコンステレーションが全体的に広がるASEによる信号劣化が観測された。また、高い駆動電流領域ではコンステレーションが同心円状に広がる位相歪みが観測され、Q値が12.8dB以下と大きく劣化した。

これらから、SOAの導波路長に応じて利得飽和特性が変化すること、導波路長500 $\mu$ mのSOAで変調信号歪みが小さく、12dBの高利得を得られることが分かった。

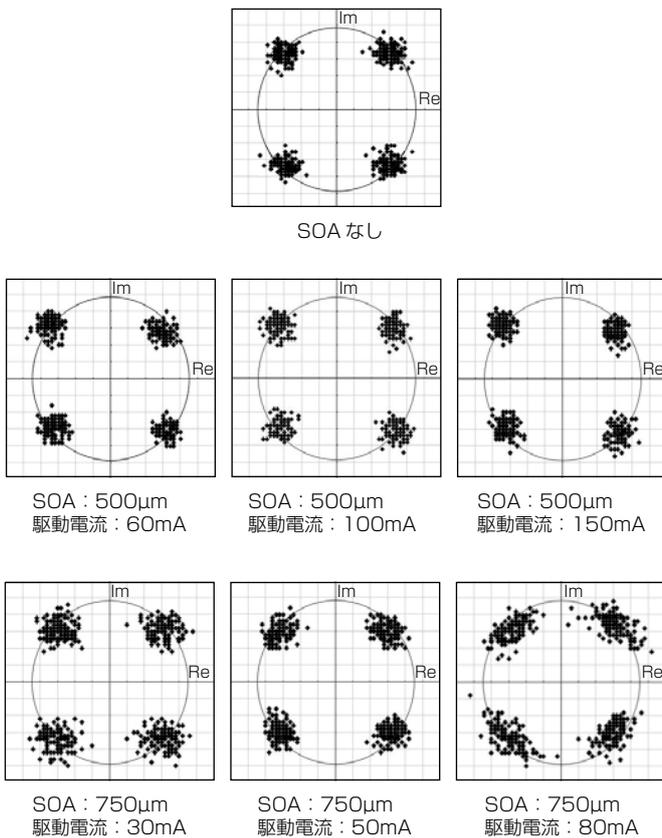


図3. QPSK変調信号のコンステレーション

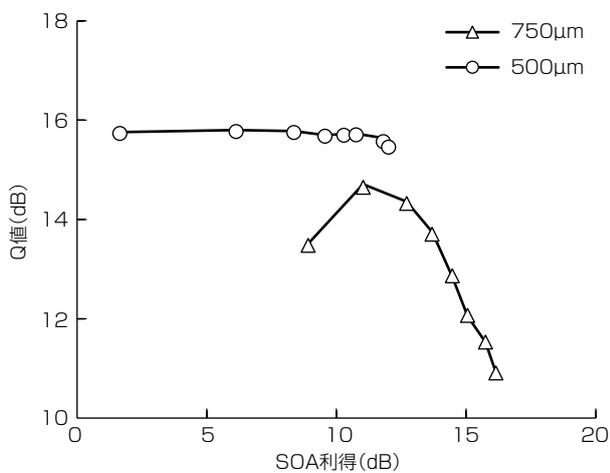
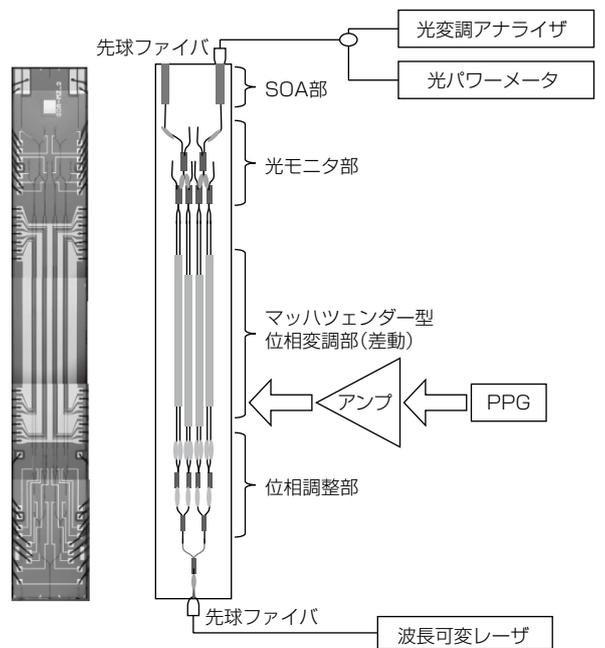


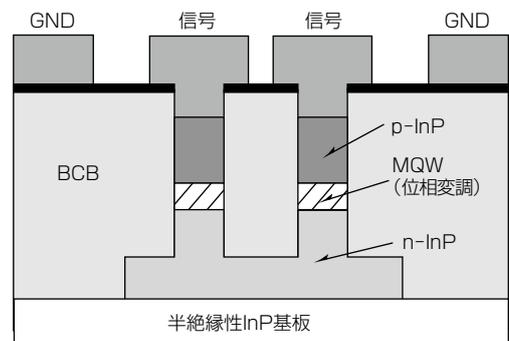
図4. SOA利得と伝送特性品質 (Q値) の関係

## 2.2 SOA集積位相変調器の設計

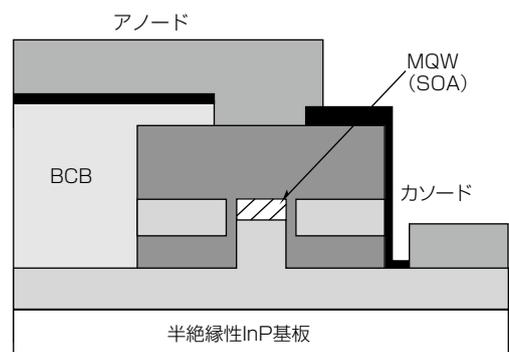
半絶縁性InP基板に、2.1節で述べた導波路長500 $\mu$ mのSOAとマッハツェンダー型位相変調器をモノリシック集積したInP位相変調器の素子構造を図5に示す。変調効率を高めて素子を小型化するため、位相調整部やマッハツェンダー型位相変調器は静電容量が小さく、光閉じ込め効果の高いハイメサ型導波路で形成し、SOA部は放熱性に優れる埋め込み型導波路で形成した。また、位相調整部にはインピーダンス100 $\Omega$ で差動駆動する進行波電極を形成し、半絶縁性InP基板と進行波電極の間には低誘電率誘電体であるBCB(ベンゾシクロブテン)を埋め込んだ。



(a) 素子上面



位相変調部



SOA

(b) 断面構造

GND : GrouND

図5. SOA集積InP位相変調器の素子構造

これによって静電容量を低減するとともに電極を平坦化し、高周波駆動時の電気信号伝搬特性の改善を図っている。チップサイズは9.6 $\times$ 1.3(mm)である。

## 3. SOA集積位相変調器の特性

試作したSOA集積位相変調器の光出力特性及び変調特性について述べる。素子への光入力、及び光出力には先

球ファイバを用い、PPG(Pulse Pattern Generator)からの変調信号をドライバアンプで増幅し、RF(Radio Frequency)プローブを用いて素子に印加した。また、位相調整部、光モニタ部、及びSOAにはそれぞれDCプローブを用いて電圧を印加した。

図6に変調電極間に印加したDC電圧に対する光出力特性、すなわち変調器の消光特性を示す。バイアス電圧が-10Vの条件下で消光比は23dB、駆動電圧を表す半波長電圧 $V\pi$ は1.8Vが得られた。LiNbO<sub>3</sub>位相変調器と比較すると、チップサイズは10分の1以下、消光比は同等、駆動電圧は約半分であり、光トランシーバの小型・低消費電力化に大きく寄与できることが分かった。

次に、波長可変レーザからの光入力を+5dBm、+13dBmとしたときのSOA駆動電流に対する位相変調器の挿入損失を図7に、SOA駆動電流に対する変調損失と結合損失を含む光出力を図8に示す。SOA駆動電流の増加とともに挿入損失は減少、光出力は増加しており、モノリシック集積したSOAで利得が正常に得られることを確認した。また、SOA駆動電流が100mAのとき、光入力+5dBmに対し挿入損失0dBを達成し、光入力+13dBmに対し+2.5dBmの高い光出力が得られた。

続いて、図9にSOA駆動電流が100mAのときの32Gbaud-QPSKのコンステレーションを示す。コンステレーションは市販の光変調アナライザ(Keysight社製、N4391)を用いて取得した。10dB以上のSOA利得を得ながらも良好なコンステレーションを示しており、理想波形に対する変調波形のズレを表すEVM(Error Vector Magnitude)は17%、符号誤り率BER(Bit Error Rate)は8.9E-9と、位相雑音、位相歪みなどによる信号劣化を抑制した高出力InP位相変調器を実現できた。

この開発素子からの光出力を+2dBm、受信感度を-18dBm、光ファイバでの光損失を0.25dB/kmと想定すると、EDFA(Erbium Doped optical Fiber Ampli-

fier)を利用せずに80kmの信号伝送が可能になる。すなわち、都市間、データセンター間光通信ネットワークに対して適切な小型、低消費電力、低コストの光トランシーバの実現が可能になる。

更なる伝送容量の大容量化に向け、今後は多値化が進行

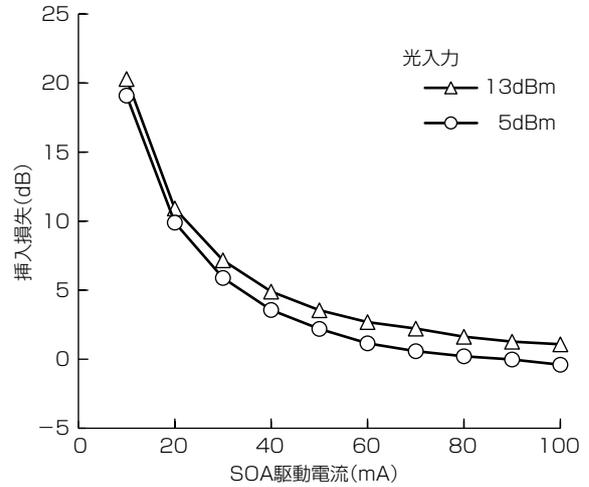


図7. SOA駆動電流に対する位相変調器の挿入損失

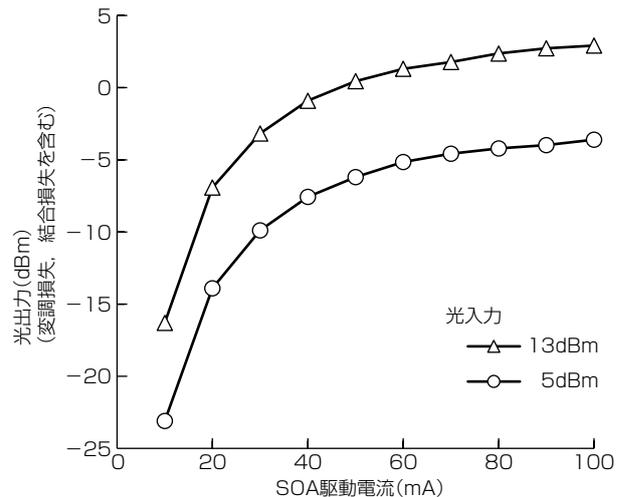


図8. SOA駆動電流に対する位相変調器の光出力

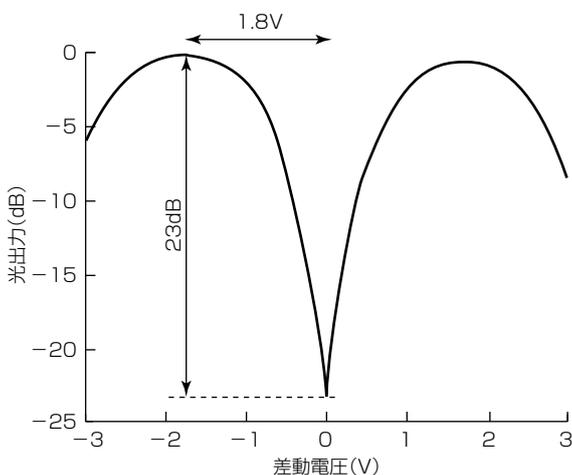


図6. 位相変調器の消光特性

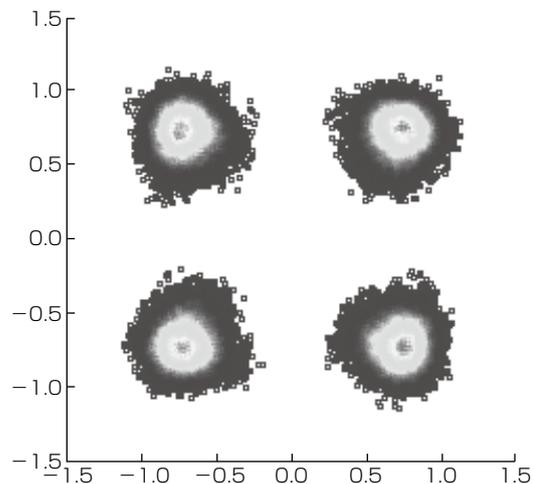


図9. 32Gbaud-QPSKのコンステレーション

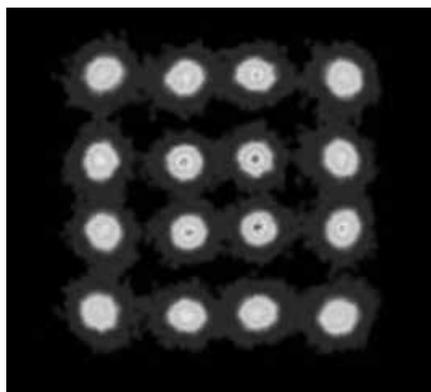


図10. 32Gbaud-16QAMのコンステレーション

することが予想される。そこで、位相歪みが更に低減するように調整したSOAをモノリシック集積した位相変調器を用い、利得11.5dBのSOA駆動条件で16値直交振幅変調(16-Quadrature Amplitude Modulation: 16QAM)評価を行った(図10)。

16QAM変調でも明瞭なコンステレーションが得られ、EVMとBERはそれぞれ9.6%,  $1.97E-4$ と良好であった。次世代400Gbps規格としてOIF(Optical Internetworking Forum)で議論が進められている、16QAM変調を用いた400ZR規格<sup>(4)</sup>に対しても、SOA集積InP位相変調器は有力な候補であることが実証された。

#### 4. む す び

都市間、データセンター間などの100Gbps光通信ネットワークに適用可能な小型・低消費電力のSOA集積InP半導体位相変調器を開発した。

位相変調に合わせたSOAの最適化を行い、導波路長

500 $\mu$ mのSOAを線形応答領域で動作することで、伝送信号性能の劣化を抑制しつつ10dB以上の利得を実現した。

半絶縁InP基板上位相変調器とSOAをモノリシック集積した素子を試作し、DC特性、及び変調特性について評価を行った。SOA駆動電流100mAで、挿入損失0dB、及び+2.5dBmという高いQPSK変調光出力が得られ、良好なコンステレーションを確認した。これによってEDFAを利用せずに80kmの信号伝送が可能になるため、都市間、データセンター間の光通信ネットワークに向けた小型・低消費電力の光トランシーバの実現に貢献できる。

さらに、16QAM変調評価を行い、良好なコンステレーションと伝送波形品質を確認した。SOA集積InP位相変調器は次世代の400Gbps通信ネットワークでも適用できる技術である。

#### 参 考 文 献

- (1) Griffin, R.A., et al.: InP Coherent Optical Modulator with Integrated Amplification for High Capacity Transmission, OFC2015, Th4E.2 (2015)
- (2) Bonk, R., et al.: Linear semiconductor optical amplifiers for amplification of advanced modulation formats, Optics Express, **20**, No.9, 9657~9672 (2012)
- (3) Freude, W., et al.: Linear and Nonlinear Semiconductor Optical Amplifiers, ICTON2010, We.D4.1 (2010)
- (4) Optical Internetworking Forum  
<http://www.oiforum.com/>