

40 Gb/s・100 Gb/s 伝送に向けたシリコン多値位相光変調器

シンガポール マイクロエレクトロニクス研究所 Tsung-Yang Liow・Xiaoguang Tu
Guo-Qiang Lo・Dim-Lee Kwong
光電子技術研究所 五井一宏¹・岡徹¹
日下裕幸²・小川憲介³

Silicon Quadrature Phase-shift-keying Modulator for 40- and 100-Gb/s Transmission

T. -Y. Liow, X. Tu, G. -Q. Lo, D. -L. Kwong,
K. Goi, A. Oka, H. Kusaka, and K. Ogawa

シリコン光変調器は、商用で普及している lithium niobate (LN) 光変調器に比べて大幅な小型化・低コスト化が期待できることから注目を集めている。我々は、今後主流となる四値位相変調 (QPSK) 方式に対応したシリコン光変調器の開発を進めている。試作した変調素子長は 3.5 mm で、LN 光変調素子に比べて約 10 分の 1 の小型化を実現した。本素子を用いて 44.6 Gb/s DQPSK 方式で良好な BER 特性を達成し、40 Gb/s 変調器に資することを実証した。さらに、最大 64 Gb/s の QPSK 信号生成が可能であることから、偏波多重機能の集積による 100 Gb/s 変調器への適用が期待される。

Silicon modulators have attracted considerable attentions for its small footprint and low-cost manufacturing in comparison with commercial lithium niobate (LN) modulators. In this report, we demonstrate quadrature phase-shift-keying (QPSK) modulation using the silicon modulator. The fabricated modulator chip has short length of 3.5 mm, which is approximately one tenth of the LN modulator chips. QPSK modulation as high as 64 Gb/s has been achieved with low bit-error-rate. The silicon modulator will be applied to 40-and 100-Gb/s transmissions.

1. ま え が き

近年、ブロードバンド回線の普及に加え、スマートフォンに代表されるモバイル機器による高速通信利用の拡大により、光通信網におけるデータ通信需要は増加の一途をたどっている。この通信需要に応えるため、長距離通信網ではこれまで利用されてきた 10 Gb/s の伝送方式から、40 Gb/s・100 Gb/s へと高速化が進められている。40 Gb/s 以降の伝送方式では、既存のファイバ網で高速な伝送を実現するために、10 Gb/s で用いられてきた強度変調 (OOK) 方式に代わり、四値位相変調 (QPSK) 方式が主流となる。QPSK は光の 4 つの位相状態にデータを対応づける変調方式で、光の 2 つの強度 (オンとオフ) にデータを対応づける OOK に比べて多くの情報を送ることができる。しかしながら、QPSK 用光変調器は複雑な構造を持つためコストが高く、QPSK 方式をより広範囲に適用するには、変調器の小型化・低コスト化が課題である。

この課題を解決できる新たな変調器として、シリコン光変調器が注目されている。高い屈折率をもつシリコンをコアとする光導波路は、半径数 μm 程度の急峻な曲げが可能であることから複雑な構造を小型に作ることができる。また、エレクトロニクス分野で培われてきた加工技術、量産技術を利用することにより、低コストでデバイスを作製することができる。

当社ではこれまで、長距離通信用途にむけて OOK 用シリコン光変調器の開発を進め、商用で用いられている lithium niobate (LN) 光変調器に匹敵する長距離伝送性能を実証してきた^{1) 2)}。本稿では、この技術を基に開発した、QPSK 用シリコン光変調器について報告する。

2. シリコン多値位相光変調器

2.1 光変調器の構成

まずはじめに、QPSK 方式の変調動作と光変調器の構成について説明する。図 1 は OOK、二値位相変調 (BPSK)、及び QPSK における、変調された光 (搬送波) の時間変化とコンスタレーション、及び対応する光変調器の構造を示している。ここで、コンスタレーションと

1 応用電子技術研究部

2 応用電子技術研究部 (博士 (工学))

3 応用電子技術研究部 上席研究員 (理学博士)

| 略語・専門用語 | 正式表記 | 説明 |
|------------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| OOK | On-Off Keying | 1 bitのデータを光のオンとオフに対応づける変調方式 |
| BPSK | Binary Phase-Shift Keying | 1 bitのデータを2つの位相状態に対応づける変調方式 |
| QPSK | Quadrature Phase-Shift Keying | 2 bitのデータを4つの位相状態に対応づける変調方式 |
| DQPSK | Differential Quadrature Phase-Shift Keying | QPSK変調方式であって、直前のシンボルとの位相差に情報を与える方式 |
| DP-QPSK | Dual-Polarization Quadrature Phase-Shift Keying | 直交する2つの偏波モードにQPSK変調信号を多重する方式 |
| MZI | Mach-Zehnder Interferometer | 光を二手に分けて別々の経路を通過させた後再び合波させる構造の干渉計 |
| キャリアプラズマ効果 | | シリコン中の自由キャリアにより、屈折率が変化する現象 |
| 熱光学効果 | | 温度によりシリコンやシリカ(SiO ₂)の屈折率が変化する現象 |
| リブ型光導波路 | | 中央に凸部を持つコアからなる光導波路 |
| コプレーナ型電極 | | 信号電極が基板の同一面上でグラウンド電極に挟まれて配置された構造を持つ電極 |

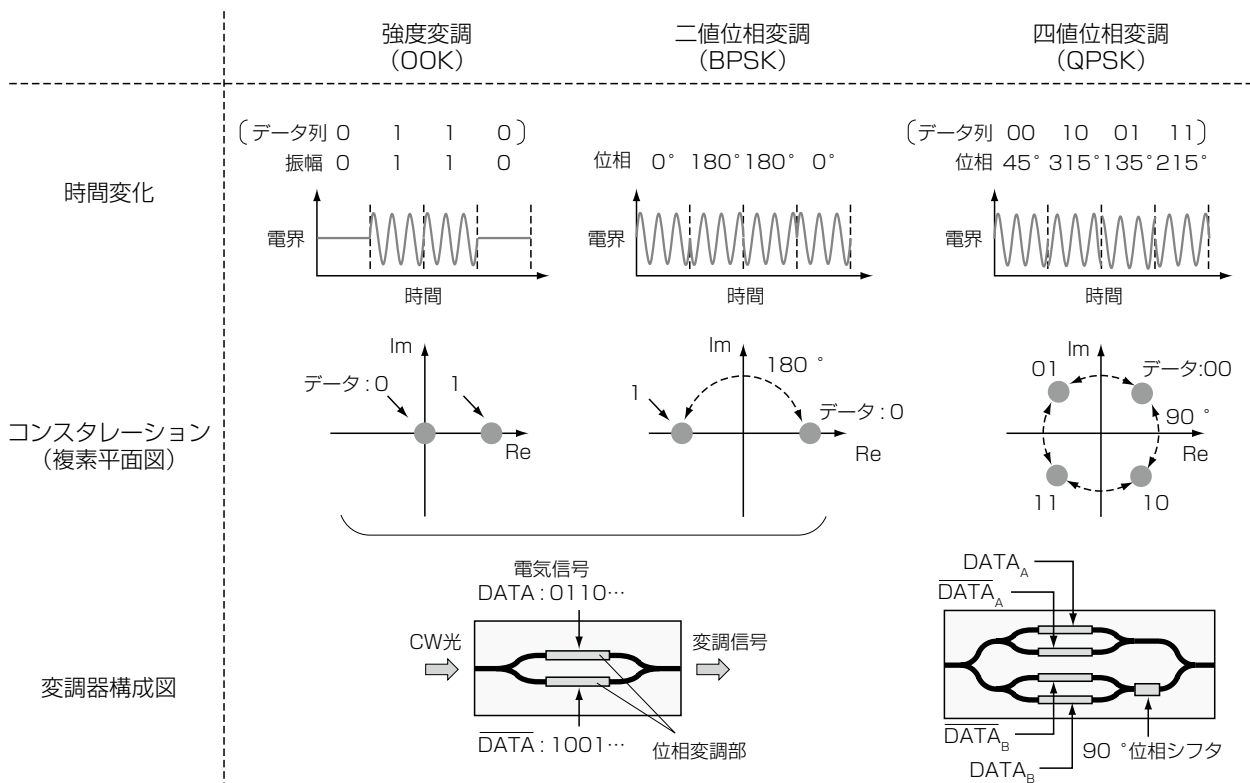


図1 各変調方式における変調信号の状態模式図と変調器
 Fig. 1. Schematics of modulated signals and modulators for various modulation formats.

は変調された光の振幅（強度）・位相状態と伝送データの対応を表した図であり、中心からの距離が振幅を、方位角が位相を表す。

従来用いられてきたOOKは、データを光のオンとオフとの2つの強度に対応づける変調方式である。一方、BPSKはデータを光の位相状態に対応づける変調方式

で、コンスタレーションに示すように、互いに180°異なる2つの位相状態を利用する。これらの変調方式では、1シンボル（1回の変調で生成する光の状態）が1bitの情報を持つ。一方、QPSKでは、コンスタレーションに示すように90°ずつ異なる4つの位相状態にデータを対応づける³⁾。このため、1シンボルが2bitの

情報を持つ。従って、同じシンボルレートで比較すると、QPSKでは2倍のデータを伝送することができる。

これらの変調信号は、二手に分かれたアームを備えたマッハ・ツェンダー干渉計 (MZI) を利用した光変調器により生成される。MZIより出力される光の振幅・位相状態は、二つのアームを伝搬する光の位相差によって決まる。このため、各アームに備えられた位相変調部に電気信号を入力して位相差を調整することで、出力光の振幅・位相状態を制御することができる。OOKとBPSKでは単一のMZIを持つ光変調器が用いられ、駆動条件によりそれぞれの変調信号を生成する。一方、QPSKでは、図に示すようにMZIの各アームの中にさらにMZIを設けたネストMZIを持つ光変調器が用いられる。それぞれのMZIでBPSK信号を生成し、これらの信号に 90° の位相差をつけて合成することで、4つの位相状態の光を出力することができる。

2.2 シリコン光変調器の動作原理

シリコン光変調器では、前述のMZIの各アームに備えた位相変調部において電気信号により光の位相を制御するために、キャリアプラズマ効果を利用する⁴⁾。キャリアプラズマ効果とは、シリコン中の自由キャリアにより屈折率が下がる現象である。以下、この現象を利用した位相変調部の構造 (図2) と動作原理を説明する。

位相変調部の光導波路は、リブ型に形成されたシリコンのコアとその周囲を取り囲む SiO_2 のクラッドから構成される (リブ型光導波路)。シリコンコアにはドーピングによりpn接合が形成されており、側方に位置する高濃度のドーピング領域を介して電極に接続されている。ドーピングされたシリコン中には自由キャリアが存在するが、pn接合部には空乏層と呼ばれる自由キャリア密度の低い領域が生じる。空乏層の幅はpn層間に印加されるバイアス電圧により変わるので、バイアス電圧により自由キャリア密度を制御することができる。自由キ

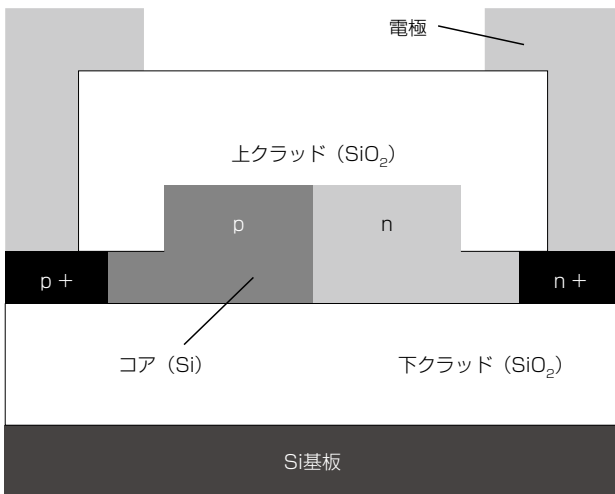


図2 シリコン位相変調部断面図
Fig. 2. Cross-section of the silicon phase shifter.

ャリアの密度変化により光の位相変化が生じるメカニズムは次のとおりである。

- (i) コアの一部の自由キャリア密度変化により、その領域の屈折率が変化する。(キャリアプラズマ効果)
- (ii) 位相変調部を伝搬する光に対する実効的な屈折率 (光の伝搬速度) が変化する。
- (iii) 位相変調部から出力される光の位相が変化する。

以上のメカニズムを利用して各アームを伝搬する光の位相を変化させることにより、MZIから出力される光の振幅・位相状態を制御することができる。

このように、位相変調部を各アームに備えたシリコン光変調器は、バイアス電圧の調整により、出力光の振幅・位相状態を制御することができる。また、位相変調部を適切に設計することで、現在主流であるLN光変調器よりもはるかに短尺で位相差制御を行うことができ、小型変調器を実現することができる。

2.3 シリコン多値位相光変調器の構造

図3に今回設計したQPSK用シリコン光変調器の上面図を示す。本変調器は2.1項で説明したようにMZIを組み合わせたネストMZIからなる。MZIの各アームに設けた位相変調部には、コプレーナ型の進行波型電極が形成されている。進行波電極を適切に設計することで、光と電気の伝搬速度を整合させ、高い高周波特性を得ることができる。また、高周波特性を向上させるためには、外部の信号源から位相変調部までの電気配線も重要である。開発したシリコン光変調器では、光の入力部と出力部を位相変調部の光導波路に対して 90° 傾けて配置することで、配線距離を短尺化し特性を向上させている。この構造により電気信号の入力を素子片側のみに配置できるため、パッケージ設計・動作基板設計も容易となる⁵⁾。

二つのアーム間の位相差を 90° に調整する位相シフタには、熱光学 (TO) 効果を利用したTO位相調整部を用いた。TO位相調整部は、コア部にドーピングする必要がないので、損失の小さい位相シフタを実現することができる。

素子長は3.5 mmであり、数cmを必要とするLN光変調素子に比べて、約10分の1の小型化を実現した。

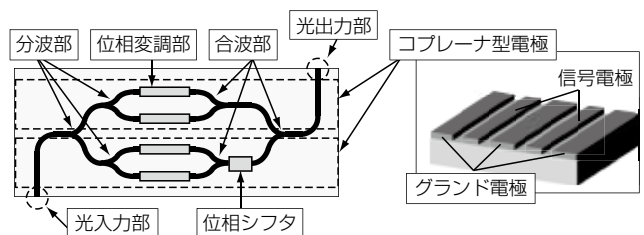


図3 QPSK用シリコン光変調器上面図
Fig. 3. Top view of the silicon QPSK modulator.

素子の小型化に加えて、シリコン系デバイスでは、8インチ以上の大口径ウェハに対応したプロセスラインが利用できるため、量産時には素子当たりのコストを大幅に低減することができる。

3. シリコン多値位相光変調器の性能

3. 1 44.6 Gb/s DQPSK 性能評価

試作したシリコン光変調器を用いて、40 Gb/s 伝送方式で使用される伝送速度 44.6 Gb/s での特性評価を行った。変調方式には QPSK の一種である差動 QPSK (Differential QPSK : DQPSK) 方式を用いた。

図 4 に測定系を示す。伝送データには、DQPSK 用にプリコーディングした 31 段の疑似ランダム信号を使用した。パルスパターンジェネレータ (PPG) から差動出力された電気信号をドライバンプにより $8 V_{pp}$ に増幅し、光変調器の 2 組 4 本の各アームに印加して変調を行った。光変調器より出力された変調信号は、伝送用光ファイバを伝搬した後、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) で増幅される。増幅された変調信号を遅延干渉計とバランス PD からなる DQPSK 受信系により、電気信号へと復元した。

図 5 (a), (b) に波長 1550 nm の入力光を変調して得

たアイパターンとコンスタレーションを示す。これらは変調器の出力光をオシロスコープ及びデジタルコヒーレントレーバを用いて測定したものである。アイパターンはシンボル間の遷移時のみ光強度が変化する典型的な QPSK 信号の波形であり、コンスタレーションからは明確なシンボル間の分離が見られる。また、図 5 (c), (d)

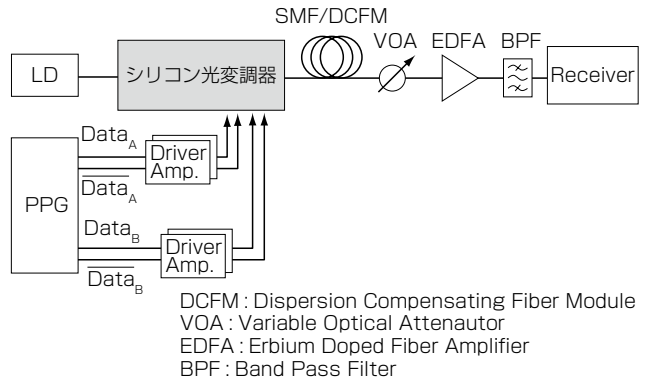


図 4 QPSK 伝送特性測定系
 Fig. 4. Experimental setup for fiber transmission in QPSK format.

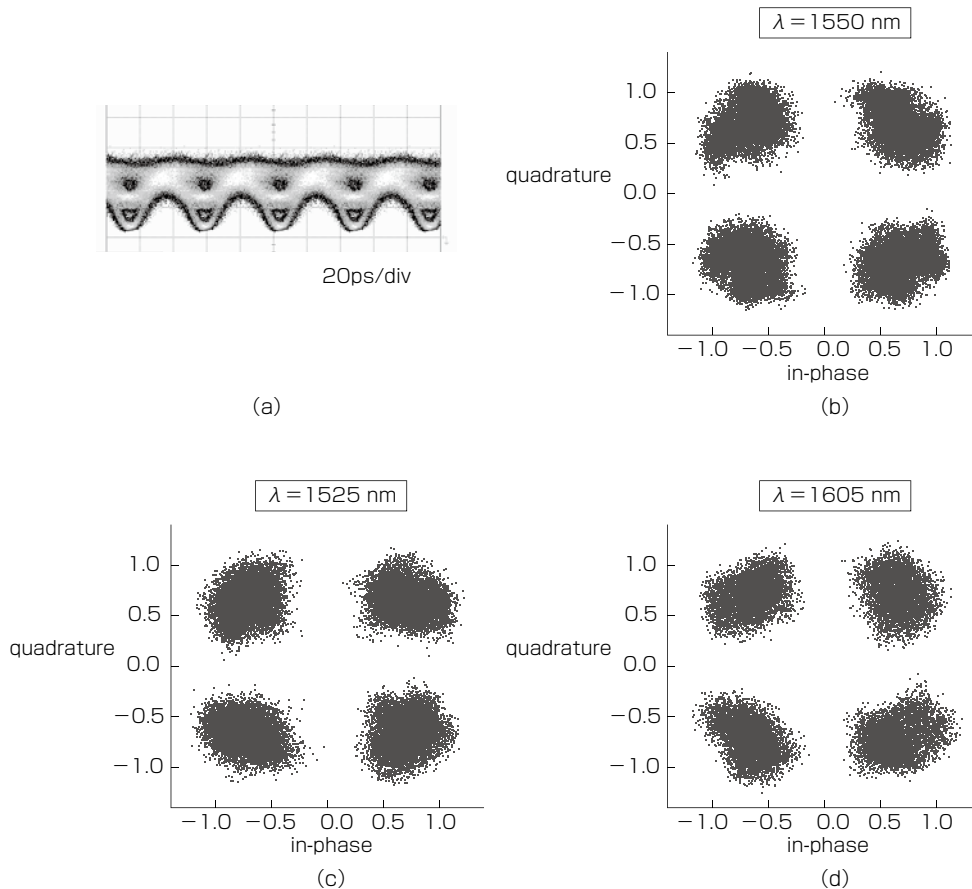


図 5 44.6Gb/s DQPSK 変調波形, 及びコンスタレーション図
 Fig. 5. Eye and constellation diagrams of 44.6-Gb/s DQPSK signals.

に示す波長 1525 nm, 1605 nm の入力光での変調信号においてもコンスタレーションは良好であり、シリコン光変調器がC・L両バンドで使用可能であることが確認された。

次に変調信号の符号誤り率 (BER) 特性を示す。光信号対雑音比 (OSNR) は、EDFA への入力パワーを変えることで調整した。図 6 (a) は back to back での BER 特性を示す。17 dB 以上の OSNR において、エラー訂正 (FEC) を用いてエラーフリー伝送が可能な 10^{-3} 以下の BER を達成している。図 6 (b) は、光ファイバ伝送後に BER を 10^{-3} 以下とするために必要な OSNR を、back to back との差として表したものである。伝送路の波長分散は、正の分散値をもつシングルモードファイバ (SMF) と負の分散値を持つ分散シフトファイバモジュール (DSFM) を組み合わせて調整した。図に示すように、 ± 80 ps/nm の波長分散に対してパワーペナルティ 2 dB 以下となる分散耐力を持つことを確認した。

以上の結果より、開発したシリコン光変調器が

40 Gb/s 変調器に資することを実証した。今後の課題として、駆動電圧の低減が挙げられるが、シリコンコアのキャリア密度設計、及び電極構造の最適化により改善見込みである。

3. 2 50-64 Gb/s QPSK の性能評価

現在、100 Gb/s 用の変調方式として、原理的に QPSK 方式の 2 倍の伝送速度を持つ偏波多重 QPSK (Dual Polarization-QPSK : DP-QPSK) 方式が注目されている。DP-QPSK 方式は光ファイバ中を直交する二つの偏波面を持つ光が伝搬できることを利用して、2 つの QPSK 信号を送信する方式である。DP-QPSK 方式においても、各偏波の QPSK 信号は前述の QPSK 用光変調器により生成される。DP-QPSK では、128 Gb/s までの伝送速度が用いられており、一つの QPSK 光変調器では 64 Gb/s での動作が必要となる。そこで、開発した光変調器を用いて 50-64 Gb/s の QPSK 信号生成を行った。光変調器の駆動方法は前項の DQPSK 方式と同様である。

図 7 に各々の変調速度におけるコンスタレーション

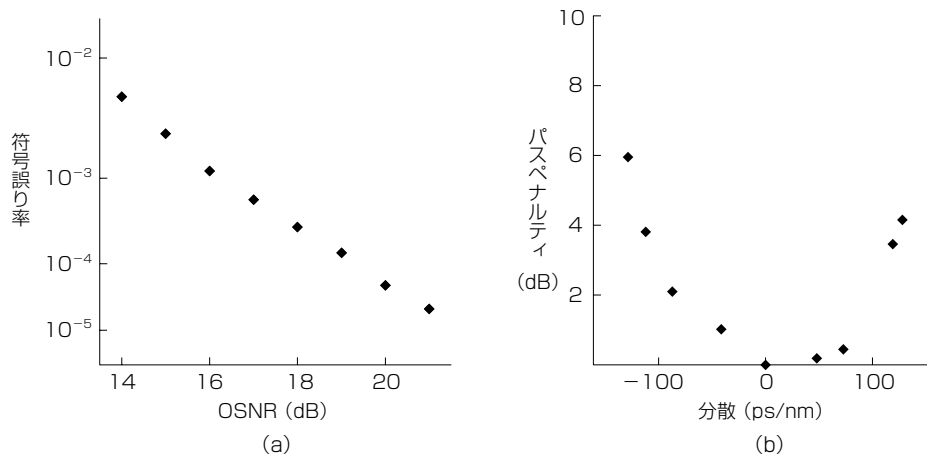


図6 44.6-Gb/s DQPSK伝送の (a) BER特性, 及び (b) 波長分散耐力
Fig. 6. BER characteristics and dispersion tolerance in 44.6-Gb/s DQPSK transmissions.

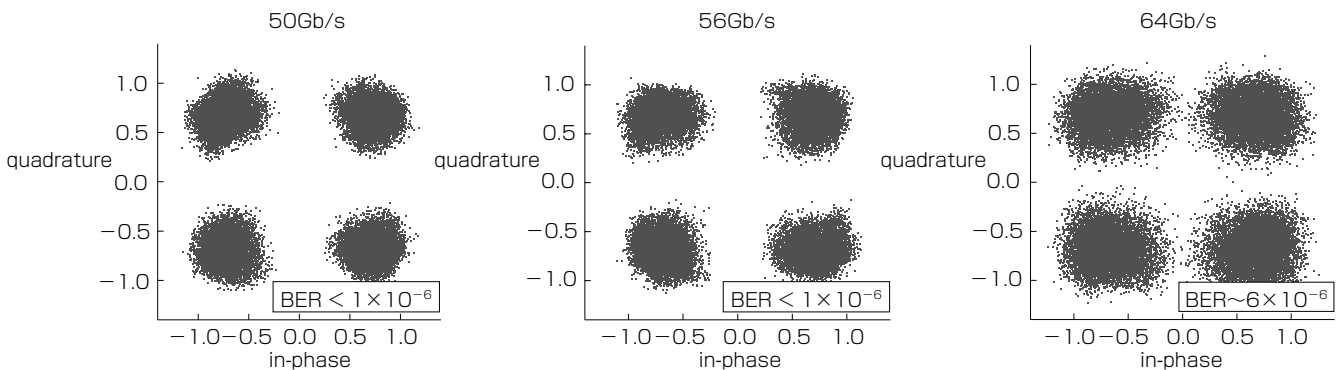


図7 50-64 Gb/s QPSK 信号のコンスタレーション
Fig. 7. Constellation diagrams of 50-64-Gb/s QPSK signals.

と OSNR 30 dBにおけるBERを示す。64 Gb/sにおいても、明瞭なコンスタレーションが得られ、 6×10^{-6} のBERを実現している。この結果より、偏波多重機能の集積により本光変調器が100 Gb/s伝送へ適用可能であることが確認された。

4. む す び

本稿では、40 Gb/s・100 Gb/s伝送に向けて開発した、シリコン多値位相光変調器について報告した。試作したシリコン光変調素子を用いて、44.6 Gb/s DQPSK方式によるファイバ伝送で良好なBER特性を達成し、40 Gb/s変調器に資することを実証した。また、最大64 Gb/sのQPSK信号生成が可能であることから、偏波多重機能の集積により100 Gb/s変調器への応用が可能である。

参 考 文 献

- 1) K. Ogawa, et al.: "Silicon Mach-Zehnder modulator of extinction ratio beyond 10 dB at 10.0-12.5Gb/s," Optics Express, Vol. 19, No. 26, B26-31, 2011
- 2) K. Goi, et al.: "11-Gb/s 80-km transmission performance of zero-chirp silicon Mach-Zehnder modulator," Optics Express, Vol. 20, No. 26, B350-356, 2012
- 3) P. J. Winzer and R. J. Essiambre : "Advanced modulation formats for high-capacity optical transport networks," J. Lightwave Technol., Vol. 24, No. 12, pp. 4711-4728, 2006
- 4) R. A. Soref and B. R. Bennet : "Electrooptical effects in silicon," J. Quantum Electron., Vol. 23, No. 1, pp. 123-129, 1987
- 5) K. Goi, et al.: "DQPSK/QPSK Modulation at 40-60 Gb/s using Low-Loss Nested Silicon Mach-Zehnder Modulator," in Proceedings of Optical Fiber Communication Conference (Anaheim, USA, 2013), paper OW4J.4