

128 Gb/s DP-QPSK シリコン光変調器モジュール

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 石原啓樹¹・益子泰裕¹・五井一宏¹・
小川憲介²

128-Gb/s DP-QPSK Silicon Optical Modulator Module

T.-Y. Liow, X. Tu, G.-Q. Lo, D.-L. Kwong, H. Ishihara, Y. Mashiko, K. Goi,
and K. Ogawa.

概要：

長距離幹線系においてデジタルコヒーレント光通信システムの運用が始まり、今後は都市間通信網においても普及が期待されている。その実現には光デバイスの小型化と低コスト化が鍵であり、当社ではこのような要求を満たす光デバイスとして、シリコンを材料とする偏波多重・直交遷移位相光変調器の開発を進めてきた。本稿では、変調器駆動用の高周波電気ドライバと共に筐体の実装したシリコン光変調器モジュールを試作し、伝送速度 128 Gb/s で 1000 km の光伝送を行った結果について述べる。

Digital coherent optical-fiber telecommunication system has been already operated in long-haul transmission networks. This system is also expected to expand in metro networks, when small-footprint and low-cost optical devices are commercialized in near future. Fujikura has been developing a silicon-based optical modulator for dual-polarization quadrature phase-shift keying, as one of the promising optical devices to satisfy this requirement. In this paper, 1000-km optical-fiber transmission with high bit rate of 128-Gb/s is demonstrated using the silicon optical modulator module.

1. ま え が き

2000 年代に入り、ブロードバンド回線やスマートフォン、タブレット端末を利用した様々な情報通信サービスが普及し、幹線系光ファイバ通信のトラフィックは増加の一途を辿っている。このため、より大容量のトラフィックを収容可能な光通信システムが継続的に開発されている。近年では、これまで主流であった強度変調方式に代わり、位相変調を基本とするデジタルコヒーレント通信方式が提唱されたことを契機とし、この通信方式で必要となる要素技術の研究開発が精力的に行われている¹⁾。その成果として偏波多重・直交位相遷移変調 (DP-QPSK) 方式が実用化され、現在では商用システムへの導入が進められている²⁾。DP-QPSK 方式では、1 シンボル当たり 2 ビットに多値化した直交位相遷移変調 (QPSK) 信号を偏波多重することにより、合計 4 ビットの信号を伝送することができる。例えばシンボル速度が 25 Gbaud である場合、1 回の変調で 4 ビットの情報が含まれることから、伝送速度は 100 Gb/s となり、従来の

強度変調方式では達成し得なかった高速光伝送を実現することができる。その一方で、複数の電気入力チャンネルを要することや、位相検波、偏波制御機構などの新たな要素が加わるため、強度変調方式と比べ全体の構成は複雑となる。したがって都市間のような、多数の中継ノードが廉価に構成される通信網において DP-QPSK 方式を導入するためには、構成光デバイスの設置面積縮小や低コスト化が鍵となる。

デジタルコヒーレント通信システムの都市間通信網への導入に向け、光ネットワーク関連技術の業界団体である OIF では、CFP / CFP 2 / CFP 4 と呼ばれる小型トランスポンダの規格化が進められている³⁾⁻⁴⁾。都市間通信網では伝送距離が数百 km 程度に留まる一方、一定面積の中継装置に多数のトランスポンダを収容することが求められるため、構成光デバイスの小型化はより重要である。例えば幹線系で普及の進む 5 x 7 インチトランスポンダと CFP 4 トランスポンダの設置面積を比較すると、その比は 1 / 10 以下となるため、既存の光デバイスを CFP トランスポンダに適用することは困難である。

トランスポンダの構成要素をシリコン材料で作製すれば、デバイス単体と比較しても大幅な小型化が実現でき

1 シリコン技術研究部

2 シリコン技術研究部 首席研究員 (理学博士)

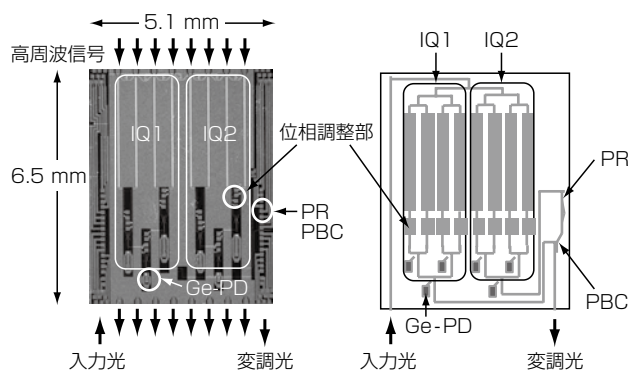
略語・専門用語	正式表記	説明
強度変調方式	On-Off Keying	光の電界強度のOn/Offによって1ビット信号を伝送する方式。
デジタルコヒーレント通信	Digital Coherent Communication	光の位相を変調し情報を伝送する方式。復調にデジタル信号処理を導入することで、従来困難であった位相検波および偏波多重分離が可能となった。
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying	直交遷移位相変調方式。90°毎の位相で4値に符号化することで、1シンボルで2ビットの信号を伝送する方式。
OIF	Optical Internetworking Forum	光ネットワーク関連技術の業界団体。
SOIウエファ	Silicon On Insulator Wafer	シリコン基板上に厚さ数ミクロンの熱酸化膜（シリカ層）を形成し、さらにその上にシリコン単結晶薄膜を成長したウエファ。シリコンフォトンクスではシリコン単結晶層をコアとして利用する。
IQ変調器	In-Phase Quadrature Modulator	変調波形の同相(In-Phase)成分と直交位相(Quadrature)成分を軸とする平面上で符号化が可能なる変調器。位相変調方式のほか、位相と振幅を同時に変調するような方式において用いられる。
TE偏光	Transverse Electric Polarization	基板面方向に電界成分を持つ光。
TM偏光	Transverse Magnetic Polarization	基板面方向に磁界成分を持つ光。
C帯	Conventional band	1530 - 1565 nmの光通信波長域。光ファイバの伝搬損失が小さく商用システムで広く利用される。
L帯	Long Wavelength band	1565 - 1625 nmの光通信波長域。伝送容量拡大へ向け、本波長域を利用したシステム開発が進められている。

るうえに、複数の機能をモノリシックに集積化することで設置面積を大幅に縮小できる。シリコン光デバイスは、SOIウエファ上に形成される高比屈折率光導波路を基本要素としており、光の閉じ込めが強く数 μm の微細な曲げ構造が可能で、複雑な構成を小型で作製できる。さらに大面積のウエファ上に、既存の半導体製造プロセスを利用して光デバイスを作製できることから、トランスポンダの小型化・低コスト化への寄与が期待される。当社ではこれまで都市間通信網での応用に適したDP-QPSKシリコン光変調器の開発を進めており、素子での評価において、伝送速度 128 Gb/sの変調動作を実証している⁵⁾⁻⁶⁾。本稿では、高周波電気ドライバとともに実装したシリコンDP-QPSK変調器モジュールを試作し、伝送速度 128 Gb/sで最長 1000 kmの光伝送を行った結果について述べる。

2. 128 Gb/s DP-QPSK シリコン 光変調器モジュール

当社が開発した変調素子の構成を図1に示す。DP-QPSK変調方式では、入れ子型に形成されたマッハツェンダIQ変調器を並列に配置し、各々がQPSK変調により各2ビット、計4ビットの信号を生成する。各IQ変調器のサブマッハツェンダ変調器の後段には、各QPSK符

号の位相差を90度を保つために設けられた位相調整部と、位相状態観測用のゲルマニウムフォトダイオード(Ge-PD)が集積されている。このGe-PDはC帯及びL帯の全域において受光感度を有している⁷⁾。2つのIQ変調器のうち一方(IQ2)の後段には、偏波回転子(PR)が設けられ、偏波状態がTE偏光からTM偏光へ変換される。



IQ: IQ変調器
Ge-PD: ゲルマニウムフォトダイオード
PR: 偏波回転子
PBC: 偏波ビームコンバイナ

図1 シリコンDP-QPSK光変調素子の構成
Fig. 1. Schematic diagrams of silicon DP-QPSK optical modulator.

偏波回転子は位相変調部と一括で形成可能であり、プロセスを複雑化させることなく偏波回転機能の集積を実現している⁵⁾⁻⁶⁾。TE及びTM偏波の信号は偏波ビームコンバイナ (PBC) によって合波され、偏波多重される。偏波の合波には、方向性結合器におけるTE偏波とTM偏波の結合長の差を利用している⁵⁾。このようにして多重化されたDP-QPSK信号は、1回の変調当たり4ビットに多値化されている。実際の伝送信号は100 Gb/sの情報ビットのほかに、復調時のビット誤りを補償するための前方誤り訂正符号の冗長ビットを含むため⁸⁾、素子をシンボル速度32 Gbaudで変調し、伝送速度128 Gb/sの光信号を生成している。本素子はこれらの機能を6.5 x 5.1 mm²の小面積でモノリシックに集積している。

DP-QPSKシリコン光変調器モジュールの構成を図2に示す。変調素子を収容する筐体は、セラミックを基本材料とする。セラミック材料は線膨張係数がシリコンと近いので、通信用デバイスで想定される温度変動に対して、充分小さい熱歪みで素子を実装することができる。さらにセラミックは絶縁体であるため、埋め込み型配線によって比較的自由的な電極構成が可能である。内部には変調素子、駆動用の4チャンネル高周波電気ドライバ、および終端回路を高密度集積し、外寸わずか35 x 15 x 4.5 mm³の小型モジュールに仕上げている。このモジュール筐体の短辺には高周波信号を入力する電極端子を備え、長辺には定電圧信号を入力する電極端子を備える。また、高周波信号入力端子の対辺に光入出力部を設け、2本の光ファイバを実装するモジュール外観とした。

変調素子のシリコン光導波路と石英ガラス系光ファイバとの光学結合においては、これら導波路のモードフィールド径 (MFD) の整合が課題となる。シリコン光導波路は高比屈折率差導波路であるため光の閉じ込めが強く、高次の導波モード光を抑制して基本の導波モード光のみを伝搬させるために、導波路幅を500 nm程度まで細線化している。一方で石英ガラス系シングルモード光ファイバのMFDは約10 μmであるから、変調素子と光ファイバを高効率で結合するためには、シリコン導波路端部でMFDを変換する構造が必須である。従来当社では、素子端に設けた逆テーパ構造と空間光学レンズを組み合わせた構成を用いていたが⁹⁾、本DP-QPSK変調器においては、MFDを10 μm前後にまで拡大するサスペンデッド変

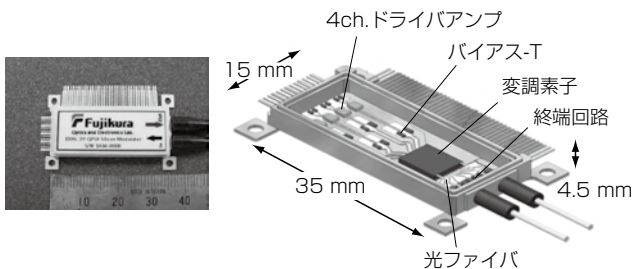


図2 シリコンDP-QPSK光変調器モジュール
Fig. 2. Overviews of silicon DP-QPSK modulator module.

換構造を素子端に設け、光ファイバと直接接合している。

図3にサスペンデッド変換構造の概要を示す。本変換構造は、3つの機能部により構成されている¹⁰⁾。1つ目の機能部はシリカをコア、空気をクラッドとする直線導波路であり、光ファイバとの直接接合部である。2つ目の機能部はMFDを縮小し、シリコンのテーパ細線導波路へ結合するために形成されたシリカの逆テーパ導波路である。3つ目の機能部はシリカの直線導波路であり、シリカコア内部の中央にシリコンテーパ細線導波路を埋め込んだ構造となっている。この機能部でシリカの導波路からシリコン導波路へ光が結合される。3つ目の機能部に形成されているシリコンテーパ細線は、導波路側面を徐々に細線化することにより、基板面方向に放射モードを形成している。いずれの機能部においてもシリカ導波路の下面にはシリコン基板があり、光のモードフィールドが基板と重なると吸収損失を生じてしまう。この吸収損失を避けるために、導波路下面をエッチングプロセスにより除去して溝を形成している。そのため導波路を固定する目的でシリカコア側面にブリッジが設けられている。

このサスペンデッド変換構造に偏波保持ファイバを直接接合した際の、光損失の波長特性を図4に示す。結合

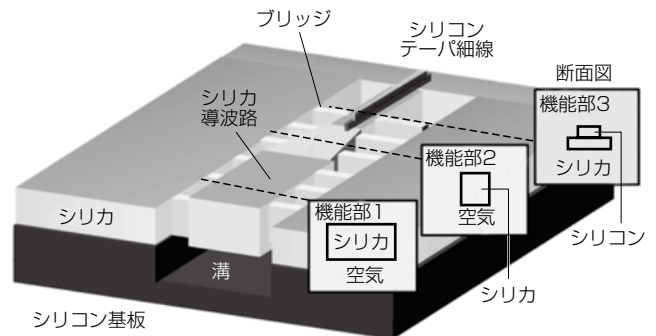


図3 サスペンデッドカプラの斜視図
Fig. 3. Schematic diagram of suspended coupler.

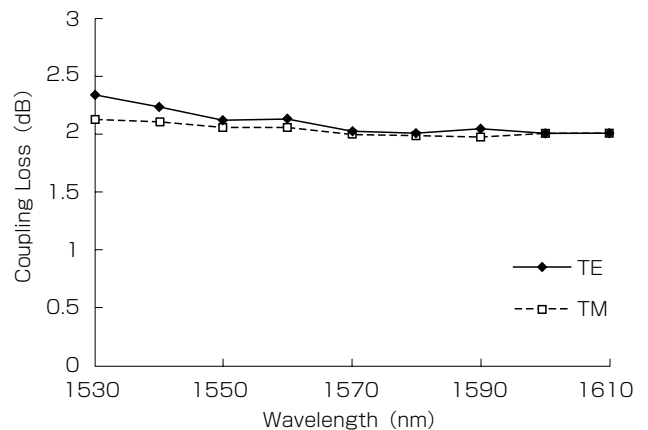


図4 サスペンデッドカプラと偏波保持ファイバとの接続損失
Fig. 4. Coupling losses between suspended coupler and polarization-maintaining fiber.

損失は設計中心である 1550 nmにおいて 2.0 dB/facet 程度であり、直交 2 偏波間の損失差は 0.1 dB以下と小さい。また、C及びL帯にわたる波長帯域においても損失特性は比較的平坦であり、もっとも直交 2 偏波間の損失差が大きい 1530 nmにおいても 0.3 dB未満であることから両偏波を利用するDP-QPSK変調方式に適した特性といえる。

2 端の光ファイバ結合損失を含んだDP-QPSKモジュールの光挿入損失は、15 dB以下である。この光挿入損失は非変調動作時における値であり、入射した測定光の出力光パワーが最大となるよう各IQ変調器の位相を調整している。光損失の要因としては、光ファイバとの結合損失のほかに、位相変調部における自由キャリアの光吸収や、導波路の側壁荒れによる光散乱などが挙げられる。これらの最適化によって一層の低損失化が見込まれる。

3. 伝送特性

シリコン変調器モジュールの伝送特性を評価するための周回実験系を図 5 に示す。変調モジュールに入力する信号用光源として、線幅 100 kHz以下の狭帯域光源を用いている。入力光源の一部は分岐され、復調用の局発光(LO)として受信系に入力される。電気入力信号として、パルスパターン発生器によって、31 段の疑似ランダム差動信号をシンボル速度 32 Gbaudで生成している。モジュールへ入力した電気信号は、内部に搭載された高周波電気ドライバによって、電圧振幅 ± 3.25 Vまでに増幅された後に変調素子へ入力され、伝送速度 128 Gb/sのDP-QPSK信号を生成する。出力信号は光スイッチを介して周回系へと入力する。

周回系は光スイッチ、2 x 2 光カプラ、伝搬用の 100 kmシングルモードファイバ (SMF)、エルビウム添加光ファイバ増幅器 (EDFA) によって構成されている。変調信号は光スイッチにより周回系への入力がOn/Off制

御されており、光スイッチを一時的にOnにすることによってバースト信号が生成される。信号光は 100 kmの光ファイバを伝搬した後にEDFAによって伝搬損失を補償することで、光パワーが減衰することなく系を周回する。光増幅器後段に設けたバンドパスフィルタ (BPF) は、増幅器の自然放光に起因する雑音成分を取り除くために用いられる。増幅処理された光信号は、出力側に 1:1 の分岐比を有する 2 x 2 光カプラに入力され、半分が受信系に出力し、半分は再度周回系へ入力する。周回した信号は再び 100 km伝搬した後に光カプラにより半分が受信され、半分が周回系へ入力する。このような信号の伝搬が繰り返されることによって、周回ごとに受信系へ信号が出力される。コンスタレーション波形観測用のオシロスコープは光スイッチと同期しており、何番目に到達した信号光であるかを観測することができるので、到達順から観測した信号の伝送距離を算出することができる。

伝送実験結果を図 6 に示す。周回系を通過せずに直接検波された信号 (back-to-back) におけるビット誤り率 (BER) は 10^{-5} であり、前方誤り訂正符号によって訂正可能なしきい値である 10^{-2} 以下であった。500 km, 1000 km伝搬後のコンスタレーション波形は、伝搬距離に相関してその面積が拡大しているものの、シンボルが明瞭に分離されている。1000 km伝搬後のビット誤り率は 5.3×10^{-3} であり、前方誤り訂正によってエラーフリー伝送が可能な水準であることが確認された。

4. むすび

都市間通信網への応用に適した 128 Gb/s DP-QPSK シリコン光変調器をモジュール化し、その伝送特性を評価した。DP-QPSK変調機能を 6.5×5.1 mm² の大きさでモノリシックに集積した変調素子を、4 チャンネルの高周波電気ドライバとともに、 $35 \times 15 \times 4.5$ mm³ の小型セラミック筐体の実装している。変調素子端に設けたサスペン

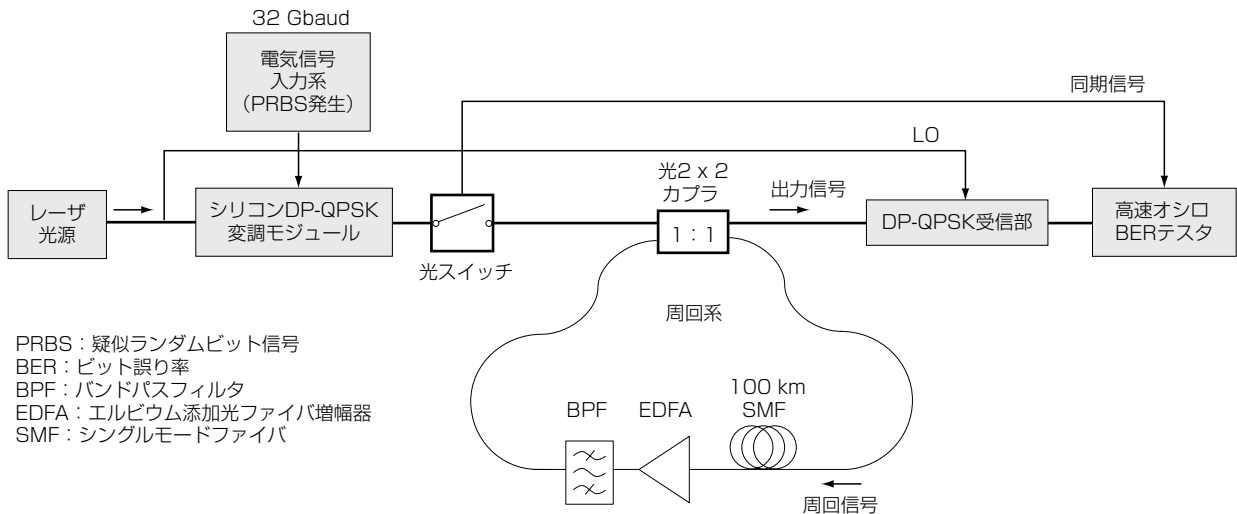


図5 周回伝送実験系
Fig. 5. Experimental setup of round-trip transmission.

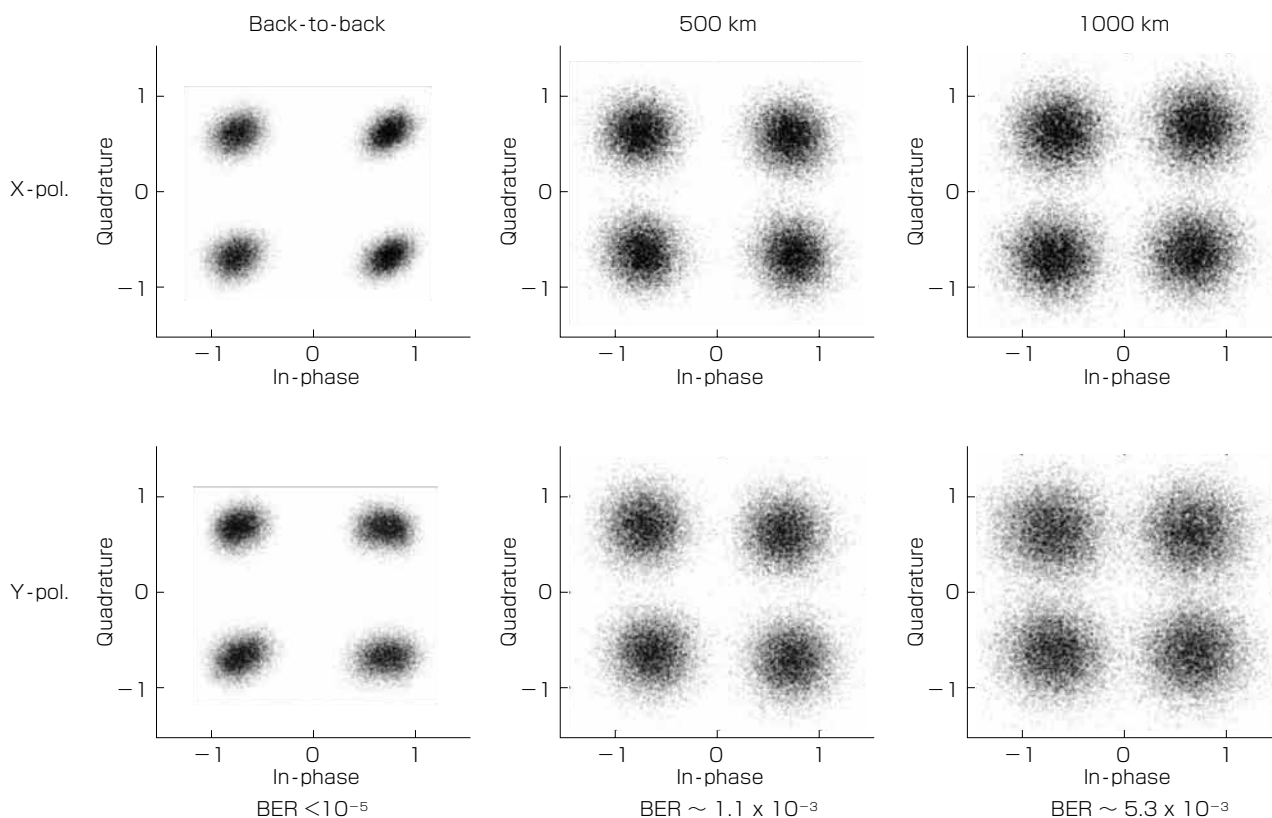


図6 コンスタレーション波形
Fig. 6. Constellation diagrams.

デッド変換構造によりシリコン光導波路のMFDを石英系シングルモード光ファイバのMFD前後にまで拡大し、光ファイバと直接接合により素子を実装している。このシリコン光変調器モジュールを用いて周回系による伝送実験を行い、500 kmおよび1000 km伝送後において明瞭なコンスタレーション波形が得られ、誤り訂正可能なビット誤り率で伝送可能であることが確認された。

参 考 文 献

- 1) 宮本ほか：「デジタル信号処理技術で開く大容量光通信システム」, 電子情報通信学会誌, vol. 94, no. 2, pp. 72-78, 2011
- 2) 鈴木ほか：「光通信ネットワークの大容量化に向けたデジタルコヒーレント信号処理技術の研究開発」, 電子情報通信学会誌, vol. 95, no. 12, pp. 1100-1116, 2012
- 3) CFP Multi-Source Agreement Documents, <http://www.cfp-msa.org/documents.html>
- 4) C. Cole, "Next Generation CFP Modules," in Optical Fiber Communication Conference and Exposition and National Fiber Optic Engineers Conference 2012 (OFC/NFOEC, Los Angeles, 2012), NTu1F.1
- 5) 小川ほか：「デジタルコヒーレント通信に向けた128 Gb/s モノリシックシリコン光変調器」, フジクラ技報, 第124号, pp. 31-38, 2014
- 6) K. Goi, et al, "128-Gb/s DP-QPSK using low-loss monolithic silicon IQ modulator integrated with partial-rib polarization rotator," in Optical Fiber Communication Conference and Exhibition 2014 (OFC, San Francisco, 2014), W11.2
- 7) H. Kusaka, et al, "Monolithic Photonic Integrated Circuit for Optical Performance Monitoring of Silicon Mach-Zehnder Modulator in C and L Bands," in 18th Opto-Electronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (IEICE, Kyoto, 2013), MM1-4
- 8) K. Onohara, et al, "Soft-Decision-Based Forward Error Correction for 100 Gb/s Transport Systems," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 16, no. 5, pp. 1258-1267, 2010
- 9) H. Ishihara, et al, "High-On/Off-Contrast 10-Gb/s Silicon Mach-Zehnder Modulator in High-Speed Low-Loss Package," in International Conference on Electronics Packaging 2014 (ICEP, Toyama, 2014), FE2-1
- 10) Q. Fang, et al, "Mode-size converter with high coupling efficiency and broad bandwidth," Optics Express, vol. 19, no. 22, pp. 21588-21594, 2011