

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

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 小川憲介¹・五井一宏²・岡徹²
日下裕幸³・益子泰裕²

128-Gb/s Monolithic Silicon Optical Modulator for Digital Coherent Communication

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

シリコン導波路は小型化、モノリシック集積、および大面積ウエファでの量産によるコスト低減に適している。シリコン導波路を用いて、高速光ファイバネットワークとして主流となるデジタルコヒーレント通信への応用に向け、フットプリントの小さいモノリシックシリコン偏波多重・直交位相偏移光変調器を作製した。その設計法および特性評価について報告する。モノリシックシリコン偏波多重・直交位相偏移光変調器は直交位相偏移変調部と偏波多重光回路を集積化した構成を基本としている。偏波多重光回路はシリコンコアおよびシリカクラッドのみで構成され、直交位相偏移変調部のシリコンリブ導波路と同時に作製することができ、量産に適する。この偏波多重光回路との集積化により、低損失のモノリシックシリコン偏波多重・直交位相偏移光変調器が実現できることを示す。コンスタレーション波形およびビットエラーレートの測定より、シリコン光変調器では最高速となるビットレート 128 Gb/sでの偏波多重・直交位相偏移変調の実証を示す。

Silicon waveguides are suitable for footprint reduction, monolithic integration and cost reduction by mass production using large-diameter wafers. Design, fabrication and performance characterization of a small-footprint monolithic silicon dual-polarization quadrature phase-shift keying optical modulator for digital coherent communication, which plays major roles in high-speed optical-fiber networks, are reported. The monolithic silicon dual-polarization quadrature phase-shift keying optical modulator consists basically of parts for quadrature phase-shift keying and a polarization-multiplexing optical circuit, which are monolithically integrated. The polarization-multiplexing optical circuit is based on silicon waveguides which contain silicon cores and silica claddings only, and suitable for mass production because the circuit can be fabricated simultaneously with silicon rib waveguides in the parts for quadrature phase-shift keying. A low-loss monolithic silicon dual-polarization quadrature phase-shift keying optical modulator integrated with a polarization-multiplexing optical circuit is shown to have low optical loss. Dual-polarization quadrature phase-shift keying of 128-Gb/s, which is the operation at the fastest bitrate for silicon optical modulators, is demonstrated based on constellation and bit-error-rate measurements.

1. ま え が き

ブロードバンド回線の普及に加え、スマートフォンやタブレット端末の普及は通信トラフィックの増加に拍車をかけている。これらの回線やワイヤレス端末で送受信されるデータは光ファイバ通信ネットワークを介して配

信される。このため、幹線系光ファイバ通信のトラフィックも増加の一途をたどり、より高速の伝送レートを有する光通信システムの導入が必要となっている。伝送レート的高速化に向けては、シンボルレートを増すとともに、シンボルあたりのビット数を増して多値化すること、および光信号の多重化をはかることにより、総ビットレートを増大させることが進められている。多値化には、各ビットの状態を位相の異なる状態に割りあてて信号を符号化するQPSKのような多値位相変調方式が採用

1 応用電子技術研究部 上席研究員（理学博士）
2 応用電子技術研究部
3 応用電子技術研究部（博士（工学））

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying	直交位相偏移変調と呼ばれる変調方式であり、1シンボルあたり2ビットのデータを含み、2ビットの各状態を4つの位相状態に対応づけて信号を発生させる方式
DP-QPSK	Dual-Polarization Quadrature Phase-Shift Keying	デジタルコヒーレント通信に用いられる変調方式であり、直交する二つの直線偏波モードにあるQPSK光信号を多重する方式
WDM	Wavelength Division Multiplexing	波長分割多重と呼ばれる信号多重方式であり、一定の波長間隔でチャンネル分割し、各波長チャンネルに光信号を割りあてて多重する方式
PDM	Polarization Division Multiplexing	偏波分割多重と呼ばれる信号多重方式であり、異なる偏波モードの信号を多重して伝送する方式
I	In-Phase	複素平面の円周上で、光の位相が実軸と交差する点にある状態
Q	Quadrature	複素平面の円周上で、光の位相がI成分の位相と直交し、虚軸と交差する点にある状態
LO	Local Oscillator	デジタルコヒーレント通信においてコヒーレント受信用光源として使用する局発光源あるいは局発光
RF	Radio Frequency	高周波電気信号
TE 偏波	Transverse-Electric Polarization	横電界偏波と呼ばれ、平面型導波路の場合、電界が基板面に水平となる直線偏波モード
TM 偏波	Transverse-Magnetic Polarization	横磁界偏波と呼ばれ、平面型導波路の場合、磁界が基板面に水平となり、電界の主成分は基板面に垂直となる直線偏波モード
SOI ウエファ	Silicon-on-Insulator Wafer	シリコン支持基板上に埋め込み酸化層 (BOX層) が形成され、さらにBOX層上に薄膜単結晶シリコン層 (SOI層) が形成されたウエファ
TO 効果	Thermo-Optic Effect	熱光学効果と呼ばれ、温度により半導体や絶縁体の屈折率が変化する現象
キャリアプラズマ分散	Carrier-Plasma Dispersion	半導体中の自由キャリア吸収により屈折率が変化する現象
PRBS	Pseudo-Random Bit Stream	擬似ランダムビット系列
BER	Bit Error Rate	ビット誤り率
OSNR	Optical Singal-to-Noise ratio	光信号対雑音比
VOA	Variable Optical Attenuator	可変光減衰器
EDFA	Erbium-Doped Fiber Amplifier	エルビウム添加光ファイバ増幅器
BPF	Band Pass Filter	帯域透過フィルタ

されている。多重化には、WDMによる波長チャンネルの多重に加えて、異なる偏波モードごとに光信号を割りあてるPDMが導入されている。現在、PDMとQPSKを組み合わせたDP-QPSKという変調方式、および信号光とLO光との干渉による位相検出に基づく信号受信を用いて、ひとつの波長チャンネルあたりビットレート 128 Gb/sで光信号の伝送を可能とするデジタルコヒーレント通信システムの実用化が進められている^{1)~4)}。DP-QPSKという高度な変調方式では、光デバイスは複雑となって大型化してしまい、コストも増大してしまう。よって、デジタルコヒーレント通信システムの普及には、光デバイス

の小型化およびコスト低減が避けられない。

シリコン光デバイスでは、シリコンをコア、シリカをクラッドとする高屈折率差光導波路を基本要素としており、曲率半径わずか数 μm の急峻な曲線導波路が可能であるなど、複雑な構造を小型に作るができるという長所がある。さらに、シリコン光デバイスは大規模集積化CMOSデバイスの発達に対応するべく進化を続けるシリコンプロセスを駆使して作製される。よって、小型化、モノリシック集積、および大面積ウエファでの量産によるコスト低減に適している。数ある光デバイスの中でも光変調器は高速光ファイバ通信のキーデバイスであ

る。したがって、128 Gb/s DP-QPSK動作に対応する小型で安価なモノリシックシリコン光変調器を実用化することにより、デジタルコヒーレント通信システムの普及に弾みがつく。

当社ではこれまで、長距離光ファイバ通信用途にむけてシリコン光変調器の開発を進め、商用で用いられているニオブ酸リチウム (lithium niobate, LN) 光変調器に匹敵する長距離伝送性能を実証し、ビットレート 64 Gb/sでQPSK動作する小型・低損失シリコン光変調器を開発した^{5) 6)}。本稿では、128 Gb/sデジタルコヒーレント通信への応用に向け、これらの技術を基に開発したモノリシックシリコンDP-QPSK光変調器について報告する。

2. モノリシックシリコン DP-QPSK 光変調器

2.1 概要

DP-QPSK光変調器では、2系統のQPSK信号を発生しDP-QPSK光信号として異なる偏波モードに多重する。モノリシックシリコンDP-QPSK光変調器では、ふたつのQPSK変調部と異なる偏波モードに多重するPDM光回路をシリコン導波路を基本要素として設計・作製する。その結果、これらの要素をシリコンウエファ上にモノリシック集積し、フットプリントを縮小することができる。

以下、モノリシックシリコンDP-QPSK光変調器の構成とDP-QPSK方式の変調信号の概要について図1に基づいて説明する。レーザ光源からの単一波長の連続光をシリコンDP-QPSK光変調器に入射し、等パワーで2経路に分岐してふたつのQPSK変調部 (QPSK 1, QPSK 2) に入射する。各QPSK変調部は図1のようにネスト型Mach-Zehnder (MZ) 干渉計の配置を有する⁶⁾。ネスト型MZ干渉計はシリコン導波路で構成されている。ネスト型MZ干渉計はIおよびQ成分の位相変調信号を発生する二つのサブMZ干渉計を含んでいる。サブMZ干渉計では、入射側の単一導波路が二方向に分岐してふたつのアームを構成し、再び合流して単一の出射側導波路となる。両アームには、高速で位相変調するための位相変調部を設けている。シリコン導波路で形成されたネスト型MZ干渉計はTE偏波のみで動作するため、2つのQPSK変調部から出射する変調光はともにTE偏波にある。そこで、偏波ローテータ (Polarization Rotator, PR) を通してQPSK 2からの変調光の偏波をTM偏波に回転させて偏波ビームコンバイナ (Polarization Beam Combiner, PBC) でQPSK 1からの変調光と合波し、直交する偏波状態にある2系列のQPSK光信号が多重されたDP-QPSK光信号を得る。PDM光回路はPRおよびPBCが接続された光導波路により構成される。なお、シリコンDP-QPSK光変調器を投入するデジタルコヒーレント通信シ

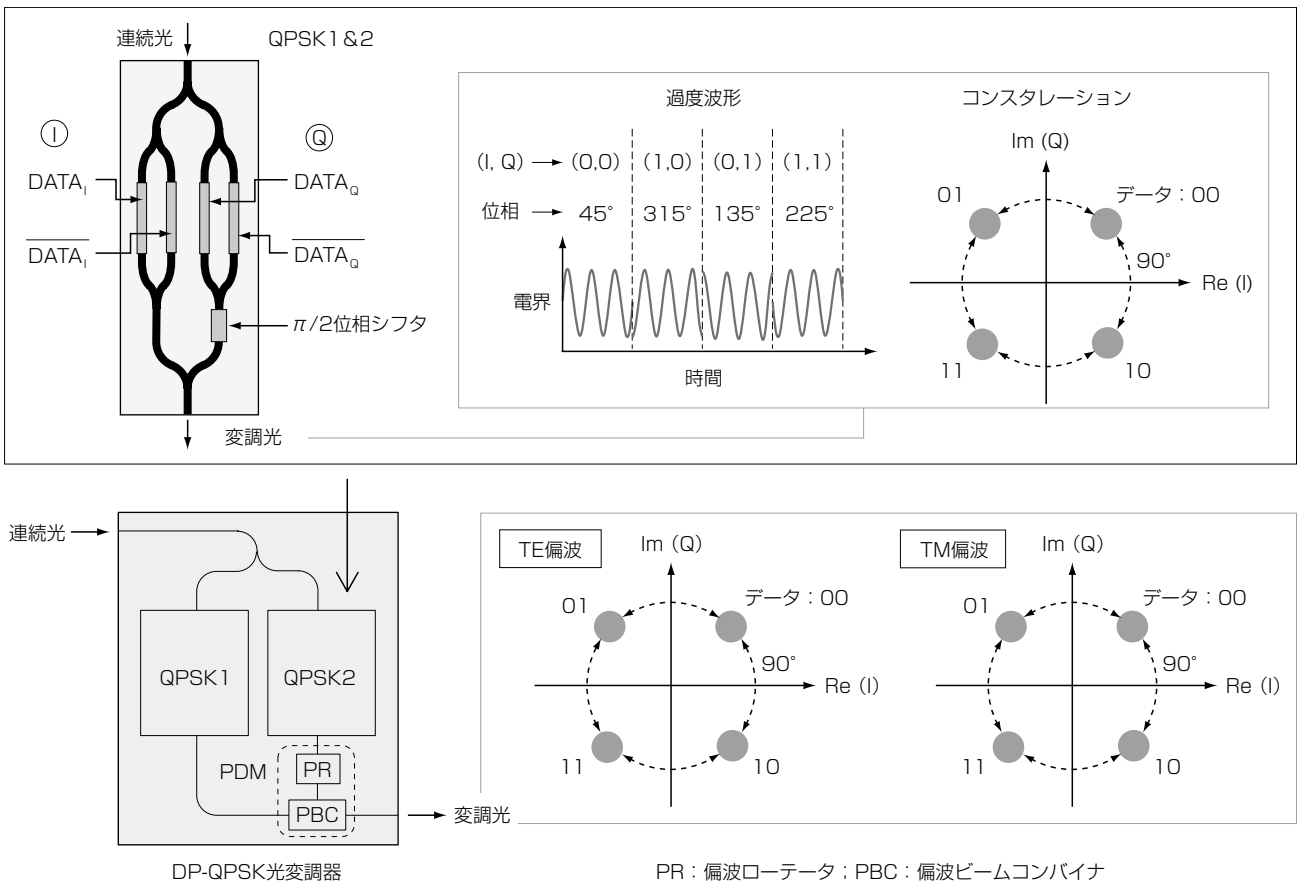


図1 シリコン DP-QPSK 光変調器の模式図
Fig. 1. Schematic diagram of silicon DP-QPSK optical modulator.

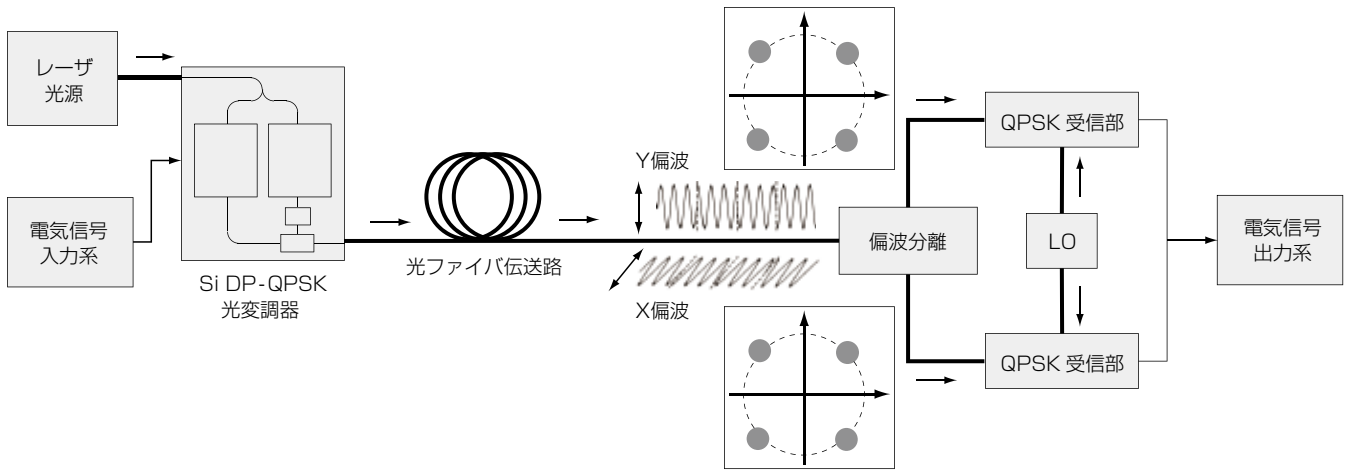


図2 デジタルコヒーレント通信システムの模式図
Fig. 2. Schematic diagram of digital coherent communication system.

システムは図 2 に示した模式図の構成を有する。光ファイバ伝送路を伝搬した光信号は受信系においてXおよびY偏波に分離され、さらにLOとの干渉によるコヒーレント位相検波によりQPSK信号として受信される²⁾。

I成分およびQ成分のサブMZ干渉計を用いた位相変調により、各QPSK変調部では図 1 のようにQPSK光信号が生成される⁶⁾⁷⁾。QPSKでは、光信号は90度($\pi/2$)ずつ等間隔で隔たった4つの位相状態を用いて符号化される。各シンボルごとに位相が変調され、変調光は模式的に図 1 の過渡波形を示す。シンボルは一回に送り出す信号を意味し、単位はbaudである。QPSKでは1シンボルあたり2ビット送出する。変調光の4つの位相状態を明示するためコンスタレーション図を表示すると、4つの位相状態が二次元複素平面の円周上に配列した点群として表示される。この二次元複素平面表示ではI成分およびQ成分はおのおの実軸(Re)および虚軸(Im)に対応しており、おのおの間には $\pi/2$ の位相差が必要である。 $\pi/2$ 位相差を発生・保持するために、TO効果を利用した $\pi/2$ 位相シフタを設けてある⁵⁾。高速の位相変調における変調スペクトルの拡がりや信号波形のゆがみを避けるため、サブMZ干渉計の各アームには互いに符号が反転した高周波電気信号(DATAおよび反転DATA)を入力信号として印加し、プッシュ・プル駆動する。MZ干渉計を用いた光変調器をプッシュ・プル駆動すると、光信号の波形劣化の要因となるスペクトル拡がりや周波数チャープを抑制することができ^{8)~9)}、長距離・高速光ファイバ通信では有利である。

2.2 設計および作製

モノリシックシリコンDP-QPSK光変調器は8インチSOIウエファを用いてCMOSデバイス加工プロセスに基づいて作製される。作製したモノリシックシリコンDP-QPSK光変調器チップの上面写真を導波路レイアウトとともに図 3 に示す。ふたつのQPSK変調部(QPSK 1・QPSK 2)およびPDM光回路がゲルマニウム光検知器(Ge Photodetector, Ge PD)¹⁰⁾とともに集積され、そのフ

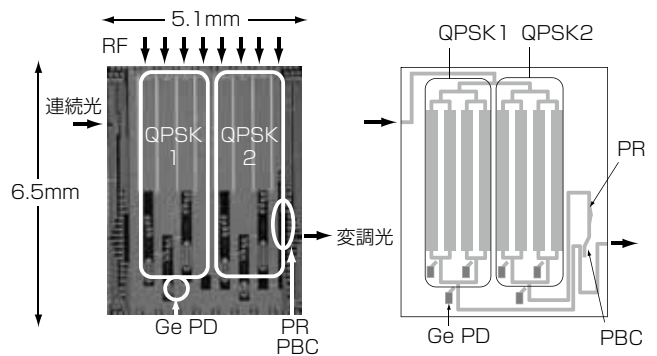


図3 モノリシックシリコンDP-QPSK光変調部の上面写真および導波路レイアウト
Fig. 3. Top-view photo and waveguide layout of monolithic silicon DP-QPSK optical modulator.

ットプリントは6.5 mm x 5.1 mmと、素子長で商用のLN光変調器の10分の1程度である。Ge PDは各QPSK変調部の出力状態をモニタして $\pi/2$ 位相差を保持するための光検知部として使用する。

128-Gb/s DP-QPSKを実現するには、サブMZ干渉計の各アームに設けられた位相変調部がシンボルレート32 Gbaudで動作することが必須となる。このような高速動作では、位相変調部に入力するRFのパワーが変調器チップ上で減衰することが問題となる。RFパワーの減衰を抑えるため、64 Gb/s シリコンQPSK光変調器で採用した構成⁶⁾⁷⁾と同様に、RF入力用の電極パッドを光変調器チップ端に設け、電極パッドを位相変調部の導波路上に形成された進行波電極に直接接続してある(図 3 上面写真参照)。位相変調部後方では、PDM光回路およびGe PDを集積した領域を経てチップ反対側のRF終端パッドまで、進行波電極で接続されている。接続用の進行波電極でRFパワーは減衰するが、すでに位相変調後であるので支障はない。進行波電極および電極パッドはアルミニウム積層により形成されており、その厚みは約2 μm である。RF電極パッドをチップ端に設けて電気信号コネクタとワイヤ接続するため、シリコン導波路への

光の入出射はチップ側部，すなわち 90 度回転した方向から行わねばならない．このため，図 3 導波路レイアウトのように曲げ導波路を用いてシリコン導波路を接続し，チップ側部に入出射光結合用シリコン導波路を設けている．前述のように曲率半径の小さい曲げ導波路で接続できるため，入出射用シリコン導波路のフットプリント増加はQPSK変調部が占める領域のフットプリントと比較して 10 % 以下に収まっている．さらに，曲率半径の小さい曲げ導波路を利用すると，入出射シリコン導波路の長さも短く抑えられるので，挿入光損失を低減できるという利点がある．

2. 3 高速シリコン位相変調部

シリコン DP-QPSK 光変調器では，シリコン QPSK 光変調器⁶⁾と同様に，シリコンリブ導波路型位相変調部を用い，キャリアプラズマ分散^{11) 12)}に基づいて高速の位相変調を行う．キャリアプラズマ分散により，シリコン中の自由キャリア密度を増加すると屈折率が減少し，自由キャリア密度が減少すると屈折率が増加する．この現象を用いて，リブ導波路中に PN 接合を形成し，リブ導波路中の自由キャリア密度を制御して屈折率変調，すなわち位相変調を行うことができる．PN 接合に直流逆バイアス電圧を印加すると逆バイアス電界のもとで自由キャリアは高速移動するため¹³⁾，32 Gbaud での位相変調が可能である¹⁴⁾．

シリコンリブ導波路型位相変調部は図 4 に示した構造を有する．シリコンリブコアは SOI ウェファの SOI 中

に形成され，幅 500 nm 高さ 220 nm とサブミクロンオーダーの寸法を有する．中央リブに隣接するスラブ部の高さは 95 nm である．リブコアは上部・下部クラッドで挟まれている．中央リブに横型 PN 接合が形成されている．横型 PN 接合はイオン注入のみで形成することができ，加工プロセスは簡便であるため，量産に適している¹⁵⁾．隣接スラブ部に進行波電極を接続する．進行波電極との接続抵抗を低減するため，接続部周辺のスラブ領域には中央リブよりもドーピング密度を増している (P+ および N+ 領域)．進行波電極はコブレナ型を採用している．コブレナ型は広い接地面を有し高周波信号の絶縁に優れるため，MZ 干渉計の各アームに印加する高周波信号間のクロストークを低減することが容易である．

2. 4 偏波多重光回路

偏波多重光回路は図 5 の模式図のように偏波ロータータおよび偏波ビームコンバイナが接続されたシリコン導波路からなる．QPSK 1 から出射した TE 偏波の光信号は導波路 1 および PBC を通過し，導波路 1 から光変調器の外部へと出射する．QPSK 2 から出射した TE 偏波の光信号のは，その偏波状態は導波路 2 上の PR で TM 偏波へと回転し，TM 偏波の光信号となって PBC において導波路 1 へ移行し，QPSK 1 からの光信号と多重されて導波路 1 から光変調器の外部へと出射する．本稿では，受信系での X 偏波が TE 偏波に，受信系での Y 偏波が TM 偏波におのおの対応するものとする．

PR はシリコン部分リブ導波路からなり，TE 偏波の導

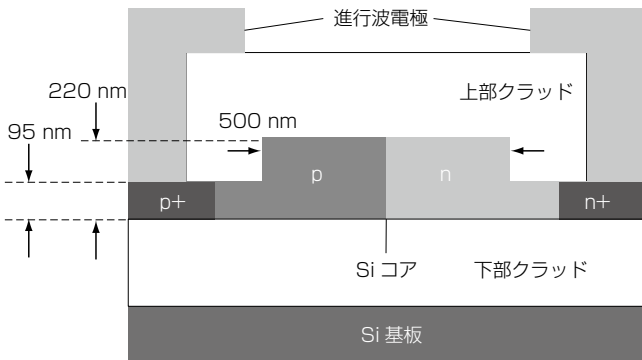


図 4 シリコンリブ導波路位相変調部

Fig. 4. Cross-section of silicon rib-waveguide phase shifter.

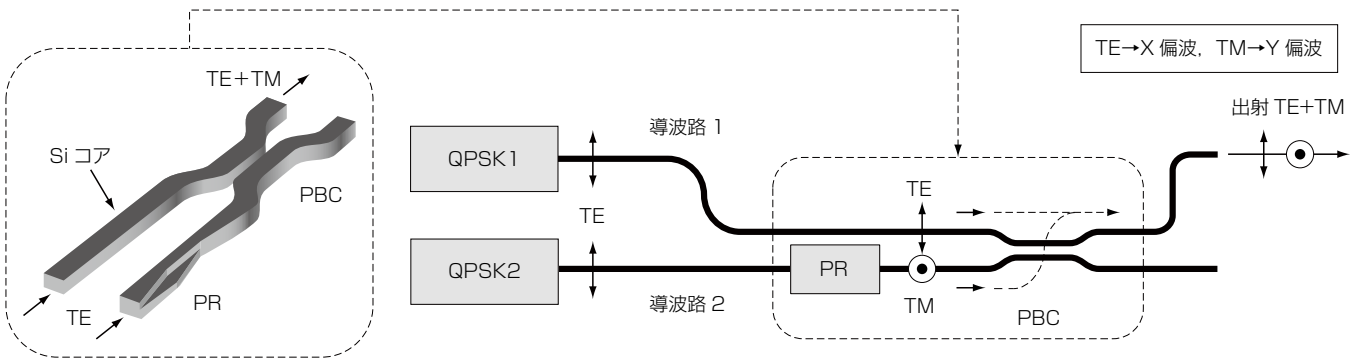
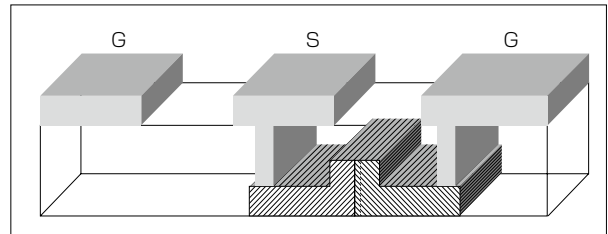


図 5 シリコン偏波多重光回路

Fig. 5. Silicon PDM optical circuit.

波モードの実効屈折率とTM偏波の導波モードの実効屈折率が徐々に大小関係を入れ替えるよう、導波方向に沿ってコアの断面形状を変化させている。これにより、低損失の偏波回転が可能となる¹⁶⁾。PBCは方向性結合器型シリコン導波路からなる。方向性結合器を構成するふたつの導波路間の結合定数がTE偏波とTM偏波とで相違することを利用して、TM偏波のみを導波路2から導波路1へと移行することを可能としている。PRおよびPBCとも高さ220nmのシリコンコアを用いており、上部および下部クラッドはシリカである。したがって、位相変調部のシリコンリブ導波路と同一加工工程で作製することができるという特徴を有し、量産に適している。

3. モノリシックシリコンDP-QPSK 光変調器の特性

3.1 偏波多重特性

シリコンQPSK光変調器では、すでに64 Gb/s QPSK動作する低損失シリコン光変調器が実現されている^{6) 7)}。したがって、モノリシックシリコンDP-QPSK光変調器の低損失化をはかるには、低損失シリコン偏波多重光回路を実現することが必要である。前節で記述したPRおよび

PBCからなる偏波多重光回路のCバンドにおける透過スペクトルを図6に示す。これは単独のPDM光回路サンプルを用いて測定した結果である。QPSK1位相変調部からのTE偏波の伝搬光(TE①→TE①)の透過率は-1dB以上である。TEからTMへの偏波回転および導波路2から導波路1への移行をとまなうQPSK2位相変調部からの伝搬光(TE②→TM①)の透過率は-3dB以上である。以上より、低損失PDM光回路が実現されている。

このPDM光回路、位相変調部(QPSK1およびQPSK2)などをモノリシック集積したシリコンDP-QPSK光変調器のCバンドにおける挿入損失スペクトルを図7に示す。図1の模式図に示した $\pi/2$ 位相シフトの位相を調節すると、QPSK1もしくはQPSK2のうち一方を消光することができ、TE偏波(TE①→TE①)もしくはTM偏波(TE②→TM①)のみの挿入損失を測定することができる。この挿入損失は17dB以下である。QPSK1およびQPSK2を100%透過状態としてTEおよびTM偏波の全出射光に対する挿入損失を測定すると、13dB以下となる。この数値は他のモノリシックシリコンDP-QPSK光変調器¹⁷⁾よりも低く、モノリシックシリコンDP-QPSK光変調器の低損失化が達成されている。

3.2 128-Gb/s DP-QPSK特性

コンスタレーション測定およびBER測定により、DP-QPSK特性を評価した。測定系の構成を図8に示す。モノリシックシリコンDP-QPSK光変調器へ入力する電

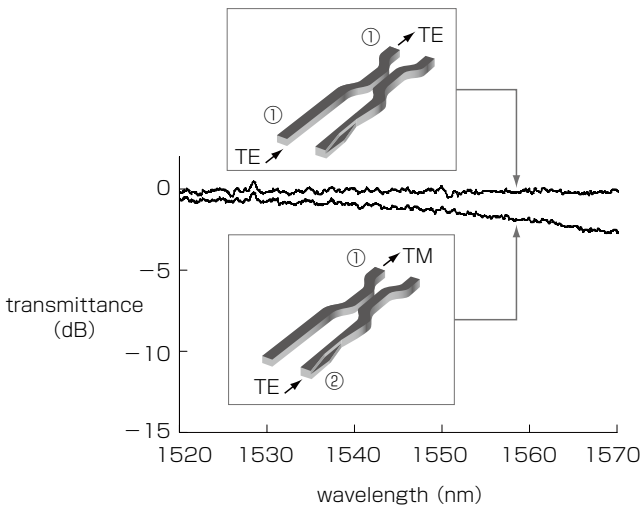


図6 シリコン偏波多重光回路の透過スペクトル
Fig. 6. Transmission spectra of silicon PDM optical circuit.

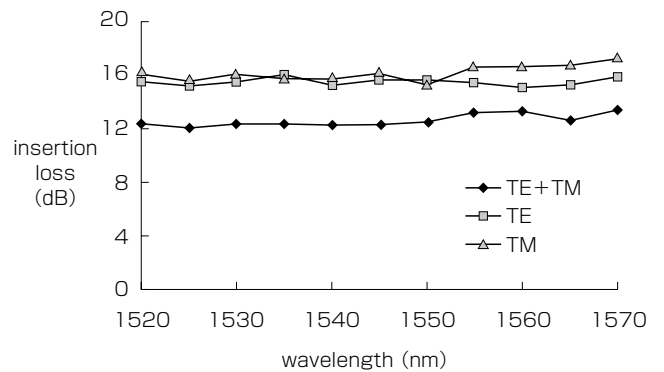


図7 シリコンDP-QPSK光変調器の挿入損失スペクトル
Fig. 7. Insertion loss spectra of silicon DP-QPSK optical modulator.

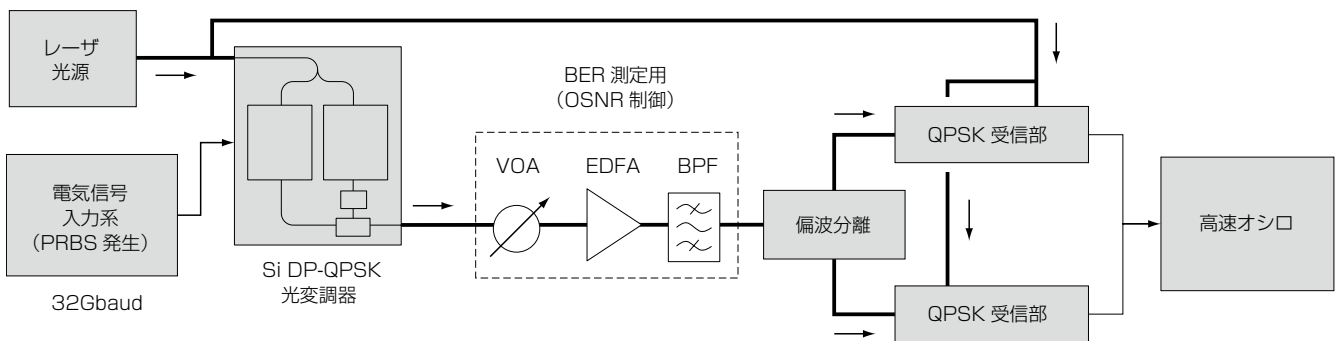


図8 コンスタレーションおよびBER測定ブロック図
Fig. 8. Block diagram for constellation and BER measurements.

気信号はシンボルレート 32 GbaudのPRBS信号である。光変調器に入射するレーザー光源の光をLOとしてXおよびY偏波に対するコヒーレント位相検波に利用する。コンスタレーション波形は高速オシロスコープを用いて受信した信号をデジタル信号処理により復調して取得する。コンスタレーションからは同時にBERを測定することができる。BER測定ではOSNRを制御する必要があるため、EDFAを自然放出光による雑音源として使用し、VOAによりEDFAに入射する光信号の強度を変えることで、所望のOSNRとなるよう調節した。

XおよびY偏波におけるコンスタレーション波形の測定結果を模式波形とともに図9に示す。QPSK信号の模式波形として示した4つの位相状態がXおよびY偏波でのコンスタレーション波形に明瞭にあらわれており、ビットレート128 Gb/sでのDP-QPSK動作を確認した。図9のコンスタレーション波形の測定では、BERは 10^{-6} である。

128 Gb/sのビットレートでDP-QPSK動作が可能となれば、20%のビットマージンを必要とする高精度エラー訂正アルゴリズム⁴⁾を導入することができ、エラー除去性能の優れたDP-QPSK通信システムへの応用が可能である。これまでシリコン光変調器では、ビットレート112 Gb/sでのDP-QPSK動作が報告されている^{17) 18)}。よって、上記の結果はシリコンDP-QPSK光変調器としては最速動作の報告となる。

BER特性では、図10のようにノイズフロアのない良好な結果が得られている。前述した高精度エラー訂正アルゴリズムが機能するBER上限 10^{-2} に対応するOSNRは約15 dBである。よって、本シリコン光変調器を用ると、OSNR 15 dB以上でのエラーフリーDP-QPSK動作が可能である。

4. む す び

デジタルコヒーレント通信への応用に向けたモノリシックシリコン光変調器の構成および特性について報告した。シリコンコアおよびシリカコアからなる量産に適した構成の偏波多重光回路を用いて低損失の偏波多重が可能であり、既報のモノリシックシリコンDP-QPSK光変調器よりも低い挿入損失を達成した。コンスタレーション波形およびBER測定より、シリコン光変調器としては最高速となる128 Gb/sでのDP-QPSK動作を確認し、実システムへの応用上重要となるエラーフリー動作が可能であることを示した。

参 考 文 献

- 1) 宮本裕, 森田逸郎:「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) K. Kikuchi: "Coherent Transmission Systems," 34th European Conference and Exhibition on Optical Communication (IEEE, Piscataway, 2008), Th.2.A.1

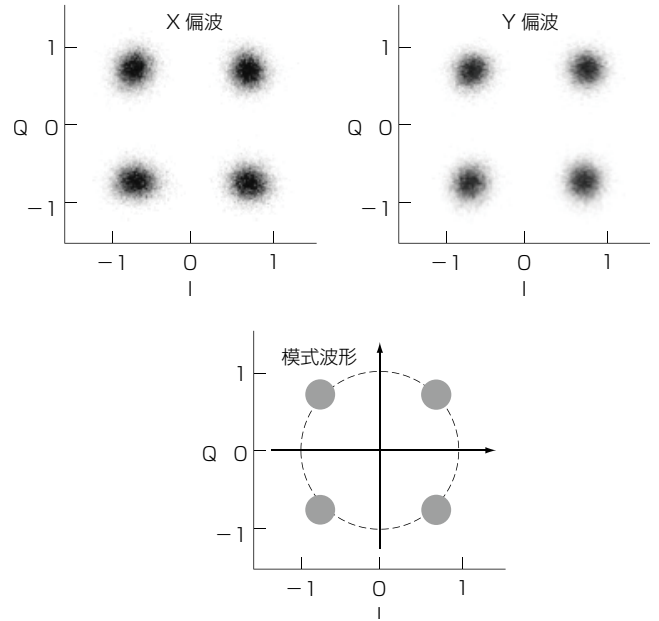


図9 XおよびY偏波に対して得たコンスタレーション波形と参照用の模式波形
Fig. 9. Constellation diagrams obtained in X and Y polarization states and a schematic diagram for reference.

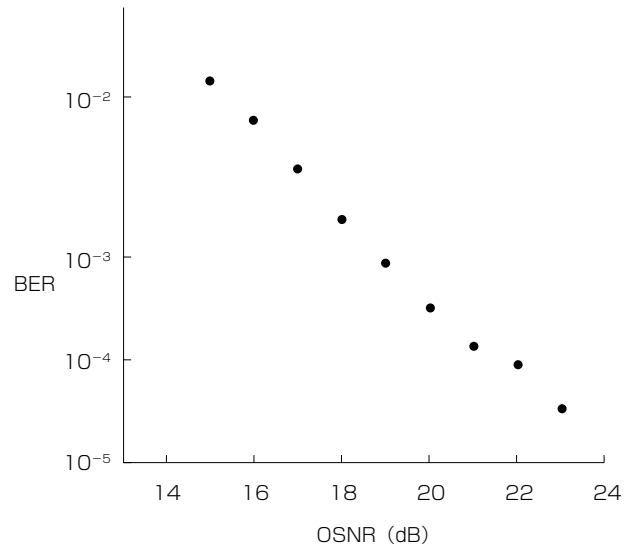


図10 BER特性
Fig. 10. BER characteristics.

- 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) K. Onohara et al: "Soft Decision FEC for 100G Transport Systems," in Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC) (Optical Society of America, Washington, DC, 2010), OThL1

- 5) K. Goi et al.: "11-Gb/s 80-km Transmission Performance of Zero-Chirp Silicon Mach-Zehnder Modulator," *Optics Express*, Vol.20, No.26, pp.B350-B356, 2012
- 6) K. Goi et al.: "DQPSK/QPSK Modulation at 40-60 Gb/s using Low-Loss Nested Silicon Mach-Zehnder Modulator," in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)* (Optical Society of America, Washington, DC, 2013), OW4J.4
- 7) 五井ほか: 「40 Gb/s・100 Gb/s伝送に向けたシリコン多値位相光変調器」, *フジクラ技報*, 第124号, pp.1-6, 2013
- 8) F. Koyama and K. Iga: "Frequency Chirping in External Modulators," *J. Lightwave Technol.* Vol.6, No.1, pp.87-93, 1988
- 9) A. H. Gnauck and P. J. Winzer: "Optical Phase-Shift-Keyed Transmission," *J. Lightwave Technol.*, Vol.23, No.1, pp.115-130, 2005
- 10) H. Kusaka et al.: "Monolithic Photonic Integrated Circuit for Optical Performance Monitoring of Silicon Mach-Zehnder Modulator in C and L Bands," in *18th OptoElectronics and Communications Conference / Photonics in Switching 2013 (IEICE, Kyoto, 2013)*, MM1-4
- 11) O. Mikami and H. Nakagome: "Waveguided Optical Switch in InGaAs/InP using Free-Carrier Plasma Dispersion," *Electron. Lett.*, Vol.20, No.6, pp. 228-229, 1984
- 12) R. A. Soref and B. R. Bennet: "Electrooptical Effects in Silicon," *J. Quantum Electron.*, Vol.23, No.1, pp.123-129, 1987
- 13) F. Y. Gardes et al.: "A Sub-Micron Depletion-Type Photonic Modulator in Silicon on Insulator," *Optics Express*, Vol.13, No.22, pp.8845-8854, 2005
- 14) K. Ogawa et al.: "Low-Loss High-Speed Silicon Mach-Zehnder Modulator for Optical-Fiber Telecommunications," *Proc. SPIE* Vol.8629, pp.86290U-1-86290U-8, 2013
- 15) T.-Y. Liow et al.: "Silicon Modulators and Germanium Photodetectors on SOI: Monolithic Integration, Compatibility, and Performance Optimization," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* Vol.16, No.1, pp.307-315, 2010
- 16) K. Goi et al.: "Low-Loss Silicon Partial-Rib Waveguide Polarization Rotator," in *18th Microoptics Conference (Tokyo, 2013)* F6
- 17) P. Dong et al.: "112-Gb/s Monolithic PDM-QPSK Modulator in Silicon," *Optics Express* Vol.20, No.26, pp.B624-B629, 2012
- 18) B. Milivojevic et al.: "112Gb/s DP-QPSK Transmission Over 2427km SSMF Using Small-Size Silicon Photonic IQ Modulator and Low-Power CMOS Driver," in *Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC)* (Optical Society of America, Washington, DC, 2013), OTh1D.1