

低駆動電圧シリコン DP-IQ 光変調器

先端技術総合研究所 五井一宏¹・石倉徳洋²・朱海柯²
小川憲介³
国立研究開発法人 情報通信研究機構 吉田悠来
光産業創成大学院大学 北山研一
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

Low Driving Voltage Silicon DP-IQ Modulator

K. Goi, N. Ishikura, H. Zhu, K. Ogawa, Y. Yoshida, K. Kitayama,
T.-Y. Liow, X. Tu, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong

シリコンを主材料として光デバイスを構成するシリコンフォトンクスは、様々な光通信デバイスに飛躍的な小型化・低コスト化をもたらす革新的技術として注目されている。当社ではこれまで、長距離通信網で普及の進むデジタルコヒーレント通信に対応するシリコン DP-IQ 光変調器の開発を進めてきた。本稿では、一層高まる省電力化の要求に応じて駆動電圧を低減した低駆動電圧シリコン DP-IQ 光変調器について報告する。新たに開発した位相変調部は、シリコン光導波路内部の pn 接合を垂直方向に形成することで変調効率を高め、代表的な指標である V_{π} で 2.5 V を達成した。また、偏波多重導波路は C バンド及び L バンドを含む広い波長帯域にわたり挿入損失 0.5 dB 以下の良好な特性を備える。作製した光変調器パッケージを用いて、DP-16/32 QAM フォーマットによる高速変調への対応を確認し、商用で用いられる 128 Gb/s DP-QPSK フォーマットによる 2000 km の SMF 伝送を実証した。

Silicon photonics is promising technology to bring drastic reduction in cost and size for various kinds of optical devices. In this paper, we report a low-driving voltage silicon dual polarization (DP) in-phase quadrature modulator especially for a digital coherent transmission system requiring low power consumption. The modulator includes a newly developed phase shifter and polarization multiplexing waveguide. The phase shifter employs a pn junction formed in vertical direction, which enhances modulation efficiency and allows low V_{π} of 2.5 V. The polarization multiplexing waveguide enables polarization rotation and combination at a low insertion loss less than 0.5 dB in a broad wavelength range of C and L bands. A packaged modulator has exhibited high-speed modulations such as DP 16- and 32-quadrature amplitude modulations, and has achieved 2000-km standard SMF transmission in DP quadrature phases shift keying used well in commercial optical fiber networks.

1. ま え が き

スマートフォンの普及による情報端末の増加や、大容量通信を前提としたクラウドサービスの利用拡大により、通信需要は増加の一途をたどっている。この需要に対応するため、幹線系光ファイバ網ではデジタルコヒーレント通信が導入され、既設光ファイバ網に 1 波長 100 Gb/s を超える大容量化をもたらした¹⁾。近年、この高速通信方式を都市内やデータセンタ間での光ファイバ通信網に適

用するため、スペース・電力の限られた環境で利用できる送受信器の実現に向けた規格化及びデバイス開発が進められている。たとえば、光通信に関する業界団体である OIF (Optical Internetworking Forum) では、小型プラグラブルフォームファクタ CFP 2 (C Form-factor Pluggable2) を採用した送受信器の標準仕様が公開され、さらに、一層の小型化・高密度化を狙った CFP 8 の実現に向けて議論が行われている²⁾。デジタルコヒーレント通信では、光の振幅・位相状態を受信するコヒーレント検波とデジタル信号処理 (DSP: Digital Signal Processing) を使用するの、従来方式に比べて多くの高機能な電子・光デバイスを必要とする。したがって、次世代の送受信器を実現するために、電子・光デバイスの一層の小型化

1 光デバイス研究部 主査
2 光デバイス研究部
3 光デバイス研究部 上席研究員

略語・専門用語リスト

略語・専門用語	正式表記	説明
OIF	Optical Internetworking Forum	光ネットワーク機器, 部品全般にかかわる業界標準の推進を行う標準化団体.
CFP	C Form-factor Pluggable	活線挿抜可能な小型光トランシーバの形態の一つ.
DSP	Digital Signal Processing	デジタル信号処理.
コンステレーション図	Constellation diagram	変調信号を複素平面上に表した図.
I	In-Phase	光の位相がコンステレーション図で実軸上に位置する状態.
Q	Quadrature	光の位相がコンステレーション図で虚軸上に位置する状態.
OOK	On-Off Keying	1ビットのデータを光のオンとオフに対応づける強度変調方式.
BPSK	Binary Phase-Shift Keying	1ビットのデータを二つの位相状態に対応づける位相変調方式.
QPSK	Quadrature Phase-Shift Keying	2ビットのデータを四つの位相状態に対応づける位相変調方式.
QAM	Quadrature Amplitude Modulation	データを位相状態と強度に対応づける変調方式. 16 QAM, 32 QAMではそれぞれ4ビット, 5ビットを1シンボルで表す.
DP-QPSK	Dual-Polarization Quadrature Phase-Shift Keying	直交する二つの偏波モードにQPSK信号を多重する方式.
MZ干渉計	Mach-Zehnder interferometer	光を二手に分けて別々の経路を透過させたのち, 再び合波させる構造の干渉計.
MZ光変調器	Mach-Zehnder modulator	MZ干渉計の各アームに位相変化を与えることで動作させる光変調器. OOKやBPSKを生成することができる.
IQ光変調器	In-phase Quadrature modulator	MZ光変調器を二つ組み合わせた光変調器. 位相と振幅を組み合わせた変調方式に対応し, QPSKやQAMを生成することができる.
DP-IQ光変調器	Dual Polarization In-phase Quadrature modulator	二つのIQ光変調器と, 偏波多重機能を組み合わせた変調器. DP-QPSKなどの偏波多重された変調信号を生成することができる.
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.
V_{π}	Half wave voltage	位相変調器で半波長位相をシフトさせるために必要な電圧.
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偏波モード. 本稿では「主」電界が基板面に水平となる疑似的なTE偏波モードを含む.
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偏波モード. 本稿では「主」磁界が基板面に水平となる疑似的なTM偏波モードを含む.
Cバンド/Lバンド		幹線系光ファイバ網で使用される波長帯域. 1530- 1565 nm (Cバンド), 及び 1565- 1625 nm (Lバンド).
TEC	Thermoelectric Cooler	電氣的に加熱・冷却が可能な温度制御器.
PAM	Pulse Amplitude Modulation	複数ビットを振幅に割り当てる変調方式.
AWG	Arbitrary Waveform Generator	任意信号発生器.
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.
BER	Bit Error Rate	ビット誤り率.
FEC	Forward Error Correction	前方誤り訂正.

と高密度実装に不可欠な省電力化が強く求められている。シリコンフォトニクスは、シリコン半導体デバイス製造で培われた微細加工技術を用いてシリコンをベースに各種光デバイスを実現する技術である。高い屈折率を持つシリコンを用いることで光をサブミクロンの領域に閉じ込めた微小な光導波路を形成することができる。また半導体材料であることを活かして、光を電気的に制御することも可能である。従来様々な材料で個別に作製されていた光デバイスをシリコン基板上に集積することで、飛躍的な小型化とコスト低減をもたらす可能性がある。当社ではこれまで、デジタルコヒーレント通信向け光変調器にこの技術を適用し、シリコンDP(Dual Polarization)-IQ(In-phase Quadrature)光変調器を開発してきた。高速位相変調部、偏波多重導波路およびフォトディテクタをはじめとした光デバイスをシリコン基板上にモノリシック集積し、従来から利用されているニオブ酸リチウムを主材料とする光変調素子の1/10となる小型変調素子を実現した^{3),4)}。さらに、位相変調部の効率化を図り、駆動電圧を低減したDP-IQ光変調器パッケージを作製した⁵⁾。本稿では、この低駆動電圧DP-IQ光変調器の主要部である位相変調部と偏波多重導波路の特徴を述べ、光変調器パッケージを用いて行ったDP-16/32 QAM (Quadrature

Amplitude Modulation) フォーマットを含む高速変調動作、及びDP-QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) フォーマットでの長距離伝送について報告する。

2. デジタルコヒーレント通信用 DP-IQ光変調器の構成

デジタルコヒーレント通信では変調信号の生成にDP-IQ光変調器を使用する。DP-IQ光変調器は光の強度と位相を組み合わせた変調信号を生成し、さらにそれらを偏波多重する機能を備える。このDP-IQ光変調器の構成と動作を、その部分構成要素であるIQ光変調器及びマッハ・ツェンダ (MZ: Mach-Zehnder) 光変調器と併せて説明する。

図1に各光変調器の構造と、光変調器により生成される代表的な変調フォーマットをまとめた。上段に示すのは、DP-IQ光変調器の基礎となるMZ光変調器である。二つのアームを持つMZ干渉計からなり、各アームには電気信号により透過する光の位相を変化させる位相変調部を備える。デジタルコヒーレント通信では、この各アームを透過する光に互いに逆方向となるように位相変化を与える。MZ光変調器から出力される光は、合波部へ入力される光の位相差に応じて決まる強度・位相を持つ。電

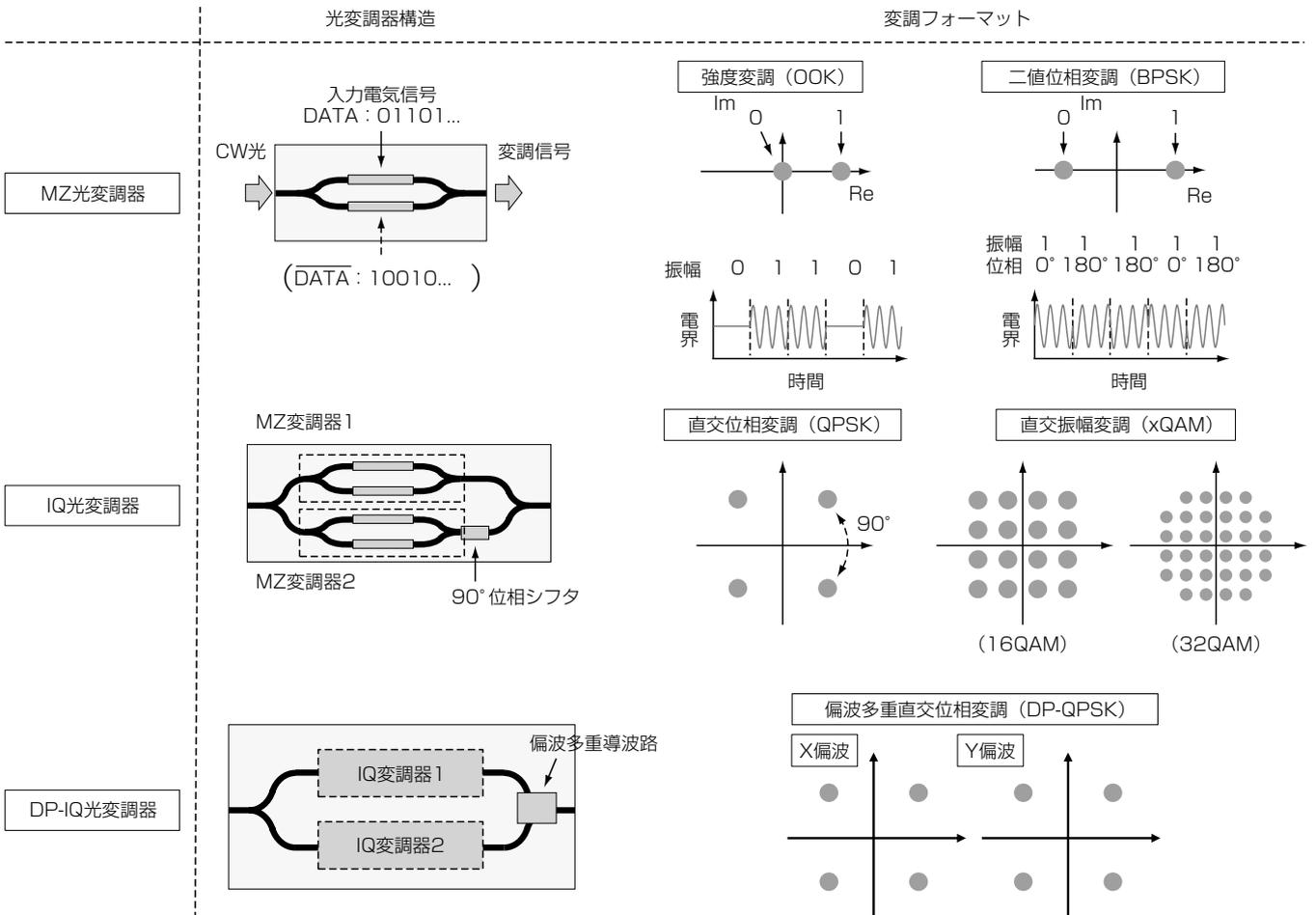


図1 各光変調器の構造と変調フォーマット
Fig. 1. Modulator structures and modulation formats.

界を複素平面上で表すコンステレーション図では、変調信号は直線状に推移する。位相差に応じて、強度変調方式であるOOK (On Off Keying) や、位相変調方式であるBPSK (Binary Phase Shift Keying) の変調信号が生成される。

次に、中段に示すIQ光変調器は、二つのMZ光変調器と90°位相シフタから構成される。生成できる変調フォーマットは、90°ずつ異なる4つの位相状態に情報を載せるQPSKや、位相に加えて強度も多値化された変調方式である16/32 QAMなどである。

そして、下段に示すのが、DP-IQ光変調器である。IQ光変調器を二つ備え、その出力を互いに直交する二つの偏波状態に割り当てる偏波多重導波路から構成される。IQ光変調器により生成される変調フォーマットを偏波多重したDP-QPSKやDP-16/32 QAMを生成する。

このように、DP-IQ光変調器は、従来から使用されてきた光変調器を内包し、多数の機能デバイスを組み合わせた複雑な構成をもつ。このため、素子の長大化や、偏波多重機能のために異種材料が必要となるなど、サイズ・コストの増加が課題であり、その改善が求められている。

3. シリコンDP-IQ光変調器と要素技術

シリコンフォトリクスを利用するとDP-IQ光変調器に必要な各要素をシリコン基板上にモノリシックに集積することができる^{3,4)}。今回開発したシリコンDP-IQ光変調器の構成要素のうち、駆動電圧を下げるために導入した位相変調部、及び広波長帯域化を図った偏波多重導波路について、その特徴を述べる。

3.1 低電圧シリコン位相変調部

位相変調部を実現するには、電気信号に応じて光の位相を変える機構が必要であり、利用できる物理現象は材料系により決まる。シリコン光変調器ではキャリアプラズマ分散を利用することができる⁶⁾。これは、シリコン中の自由キャリアにより導波する光の感じる屈折率が変化する現象である。デジタルコヒーレント通信で利用され

るCバンドやLバンドの波長では、キャリア密度が増加すると屈折率は減少し、キャリア密度が減少すると屈折率は増加する⁷⁾。屈折率、すなわち光の速度が変わることで、出力される光の位相が変化する。したがって、シリコン光導波路中にキャリア密度を電気的に制御できる構造を形成することで、透過する光の位相を制御するシリコン位相変調部を実現できる。

図2にシリコン位相変調部の模式図を示す。光導波路は、コアにシリコン、クラッドにシリカを用い、中央部に厚みのあるリブ部を備えたリブ型形状である。リブ部にp型領域とn型領域からなるダイオード構造を持つ。p型領域とn型領域は各々、高濃度にドーパされたp+, n+領域を介して上部の電極に接続されている。電極はコプレーナ型の進行波電極であり、電気を光と併走させて作用させることで、電気信号と光信号の速度ずれによる変調効率の低下を避けて高速変調を行うことができる。また、逆バイアス下で動作させることで、順バイアス時に生じるキャリアの再結合による速度劣化を避けて、高速変調を行うことができる。

本位相変調部ではリブ部のドーパント分布を、垂直方向にpとnが分かれるように設計した。この構造は、次の理由で駆動電圧の低減に寄与している。pn接合部に逆バイアスを印加すると、pn接合部に位置する空乏層は広がり、導波路中のキャリア密度は減少する。このキャリア密度の変化は、図3(a)に示すシミュレーションからもわかるように、リブ部の広範な領域に及ぶ。一方、導波路を透過する光の強度分布も、図3(b)に示すようにリブ部全体に広がっている。このように、両者の重なりが大きいため、導波光へ効果的に実効屈折率変化を与えることができる。すなわち、より小さな電圧変化で、所定の位相変化を与えて位相変調部を駆動することが可能となる。

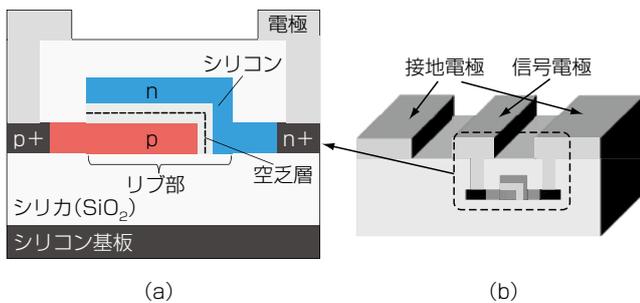


図2 シリコン位相変調部模式図:
(a) 断面図, 及び (b) 電極構造
Fig. 2. Schematics of silicon phase shifter :
(a) cross section and (b) electrodes.

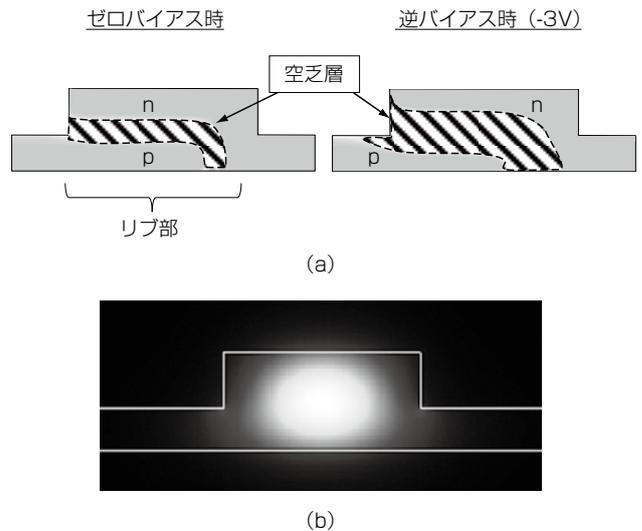


図3 位相変調部での (a) キャリア分布, 及び (b) 導波光の強度分布
Fig. 3. (a) Carrier distribution and (b) mode field intensity distribution.

位相変調部の電圧に対する位相変化の効率を表す指標には、位相を 90° (π) シフトさせるために必要な電圧である半波長電圧 (V_π) が用いられる。試作した MZ 光変調器の電圧に対する出力光強度を図 4 に示す。 V_π は最小光強度から最大光強度に要する電圧変化であり、2.5 V の V_π となる良好な結果を得た。次に、 V_π の波長・温度依存性を図 5 に示す。デジタルコヒーレント通信で利用される C バンド及び L バンドの広い波長範囲において、また、 150°C までの広い温度範囲においても V_π に大きな変

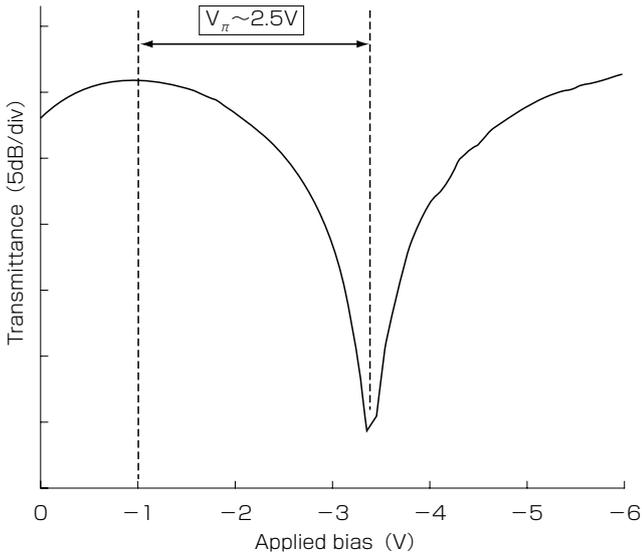


図4 MZ 光変調器の印加電圧に対する光出力特性
Fig. 4. Applied bias vs. output power in MZ modulator.

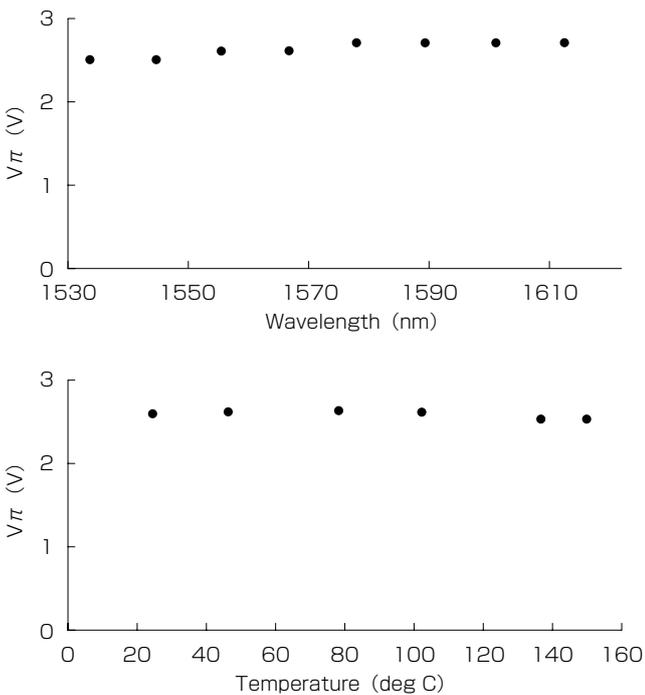


図5 V_π の波長・温度依存性
Fig. 5. Wavelength and temperature dependence of V_π .

化はなく、高い波長・温度安定性が確認できる。このため、本位相変調部は電力を要する TEC (Thermoelectric Cooler) などによる温度コントロールを使用せずに利用することができる。

3. 2 広波長帯域偏波多重導波路

基板上に作製されるシリコン光導波路デバイスは、基板に水平な方向と垂直な方向で構造が異なる。このため、導波光のとりえる二つの偏波である TE (Transverse Electric) 偏波と TM (Transverse Magnetic) 偏波に対する特性は異なる。本位相変調部は TE 偏波に対して作用するように設計しているので、DP-IQ 光変調器として偏波多重された信号を生成するには、二つの IQ 光変調器より出力される TE 偏波の変調信号のうち、片方の偏波を TM 偏波へ変換して他方の TE 偏波と重ね合わせればよい。当社で DP-IQ 光変調器に集積した初期の偏波多重導波路ではその一部に波長依存性のある方向性結合器を利用しており、偏波多重機能の L バンドでの使用が制限されていた^{4), 8)}。今回新たに開発した偏波多重導波路では、波長依存性の少ないモード発展型の変換を利用することで、広波長帯域化を実現した⁹⁾。

偏波多重導波路を図 6 に示す。基本となる構造はシリコンリブ導波路をもとに変形した二段の高さを持つ導波路であり、2本の導波路が結合した形状をもつ。各々の高さは位相変調部に用いるシリコンリブ導波路と等しくなるように設計しているため、シリコン位相変調部の作製時に工程を追加することなく一括して形成することができる。

偏波多重導波路の入力ポート 1 に入射した TE 偏波は、領域 A にて他方の導波路での高次 TE 偏波 (TE') に変換され、さらに領域 B にて TM 偏波に変換されて出力ポートにいたる。一方入力ポート 2 に入射した TE 偏波は、他方の導波路には結合せず、出力ポートに TE 偏波のまま到達する。このように、本デバイスは偏波変換と多重の両機能を実現している。入力ポート 1 と入力ポート 2 を二つの IQ 光変調器の出力と接続すれば、偏波多重された変調信号が出力ポートから出射される。これらの偏波

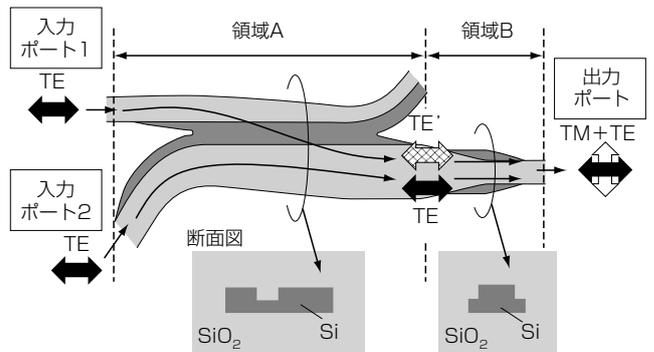


図6 偏波多重導波路模式図
Fig. 6. Schematic view of polarization multiplexing waveguide.

変換と多重の過程では、モード発展型と呼ばれる一つの導波モードが導波路に沿って連続的に変化する方式を利用している。この方法の大きな利点は、波長依存性が低いことである。作製したデバイスの特性を図7に示す。Cバンド及びLバンドを超える広い波長範囲で、挿入損失0.5 dB以下の良好な特性を得た。

4. 低電圧駆動による変調動作特性

図8に示すセラミックパッケージに収めたシリコンDP-IQ光変調器を用いて、低駆動電圧でのQAMフォーマットを含む多値変調動作と、DP-QPSKフォーマットによる長距離伝送を評価した。

評価系を図9に示す。送信系では、光変調器に入力す

る電気信号の生成に、QAMフォーマットに必要なパルス振幅変調 (PAM: Pulse Amplitude Modulation) を生成できる任意信号発生器 (AWG: Arbitrary Waveform Generator) を用いた。出力される電気信号は振幅 $1.4 V_{ppd}$ または $2.0 V_{ppd}$ の差動信号 (p, n極の各端子は $0.7 V_{pp}$ 又は $1.0 V_{pp}$) で、ドライバンプを使用せずに、直接光変調器パッケージに入力した。光源には、線幅 100 kHz以下のCW光源を用いた。波長は 1550 nmである。受信系では、コヒーレントレシーバにより光入力を電気信号へ変換し、80 GSのリアルタイムオシロスコープで受信した後、オフラインのDSPで復調した。伝送系には、測定に応じて、BtoB (Back-to-back) 又は標準SMF (ITU-T G.652 .B準拠) を用いた一周 100 kmの周回系を構成した。

まず、BtoBにて、QAMを含む多値変調動作を行った。

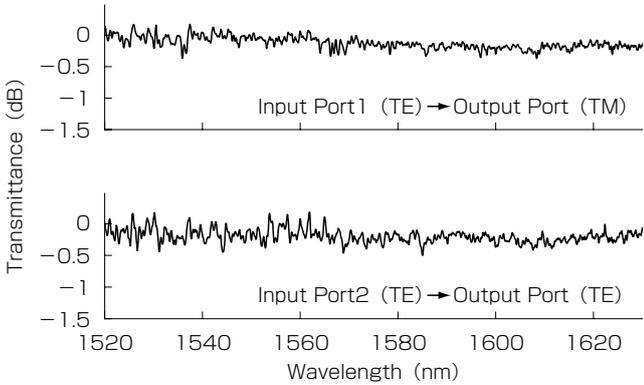


図7 偏波多重導波路の透過スペクトル
Fig. 7. Transmission spectra of polarization multiplexing waveguide.



図8 シリコンDP-IQ光変調器パッケージ
Fig. 8. Silicon DP-IQ modulator package.

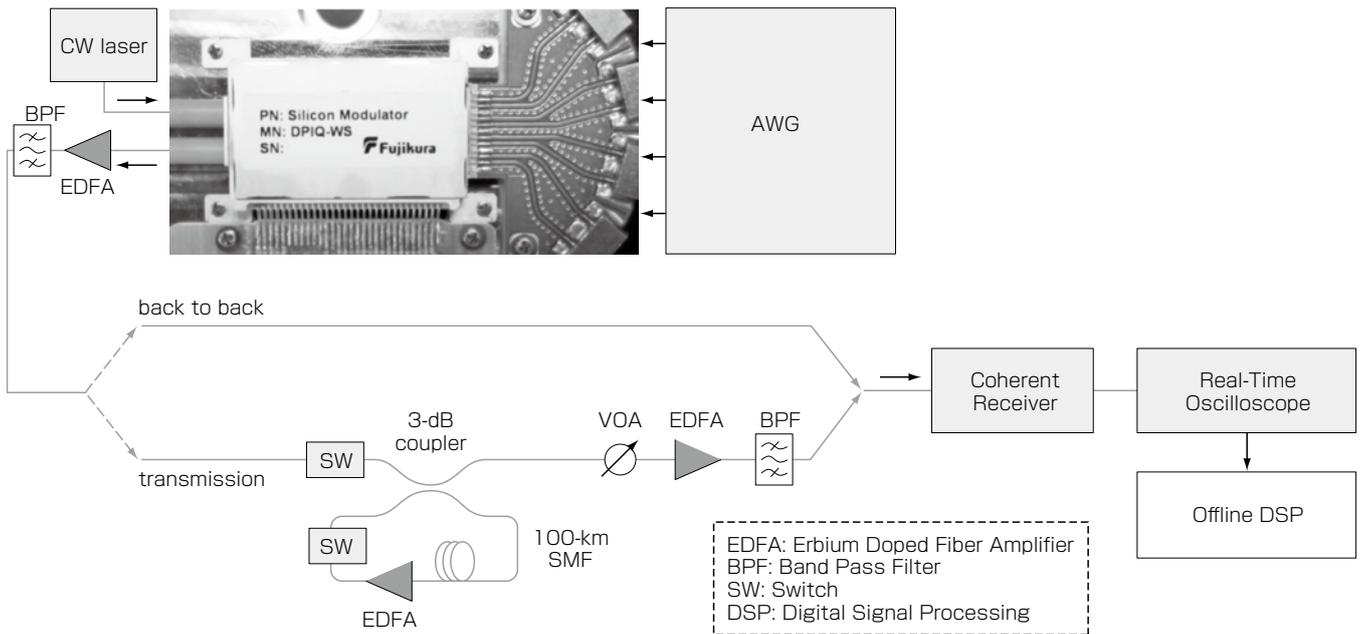


図9 伝送評価系
Fig. 9. Experimental setup for transmission.

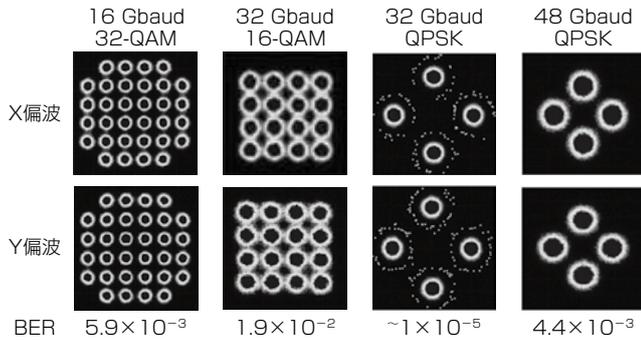


図10 各変調フォーマットのコンステレーション図
Fig. 10. Constellation diagrams of various modulation formats.

AWGの出力は $1.4 V_{ppd}$ である。図10に取得したコンステレーション図を示す。各変調フォーマットにおいて、誤り率 (BER: Bit Error Rate) は 2.0×10^{-2} 以下であり、誤り訂正 (FEC: Forward Error Correction) を利用した場合の訂正限界以内の値を得ている¹⁰⁾。コンステレーション図の各シンボルは直線状に整列しており、また、各シンボルの分布が等方的でゆがみのないことから、DP-IQ光変調器内部の各MZ光変調器では左右のバランスのとれたプッシュプル変調が実現できていることがわかる。DP-QPSKフォーマットでは48 Gbaudの高速変調の可能性も示した。このようにドライバンプを介さない低電圧駆動ながら、FECに使用する情報を差し引いた実効レートにて200 Gb/sに達する高速フォーマットへの対応を確認した。

次に、商用ネットワークに導入されている128 Gb/s DP-QPSKフォーマットでの伝送実験を行った。ここでは、光変調器の駆動振幅を $2 V_{ppd}$ とした。光ファイバの波長分散は、受信後のDSPで補償した。図11にBtoBと各距離伝送後の変調波形を示す。伝送距離が伸びるにつれ、コンステレーション図で波形の劣化は見られるものの、2000 km伝送後もBERは 6.1×10^{-3} とFEC訂正限界以下の値を得た。差動信号で $2 V_{ppd}$ 、すなわちp, n極の各端子 $1 V_{pp}$ という低振幅の電気信号ながら、2000 kmの長距離伝送が可能である。

5. む す び

デジタルコヒーレント通信に向け、 V_{π} を低減したシリコンDP-IQ光変調器を開発した。位相変調部には垂直方向にpn接合を持つ構造を採用し、 V_{π} 2.5 Vを実現した。また、この位相変調部は、波長、温度変化に対する安定性に優れており、温度コントロールなく使用できる。また、偏波多重導波路は、Cバンド及びLバンドにわたる広い波長範囲で挿入損失0.5 dB以下であることを示した。シリコンDP-IQ光変調器パッケージを $2 V_{ppd}$ 以下の低電圧で駆動し、16/32 QAMを含む高速変調への対応と、128 Gb/s DP-QPSKでの2000 kmの伝送を動作実証した。

光変調器の低電圧駆動はDSP-LSIからの直接駆動による省スペース化、省電力化の可能性を示唆する。シリコ

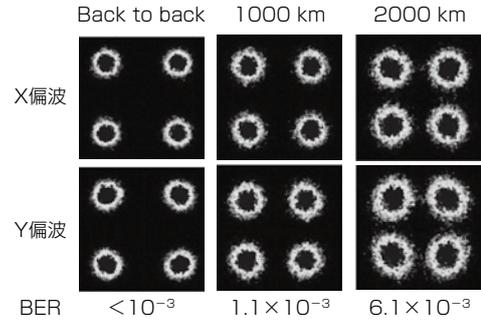


図11 128 Gb/s DP-QPSK変調のコンステレーション図
Fig. 11. Constellation diagrams of 128-Gb/s DP-QPSK format.

ンDP-IQ光変調器により、多様な光通信へ広範に適用できる超小型デジタルコヒーレント通信用送受信器の実現が期待される。

参 考 文 献

- 金子：「次世代デジタルコヒーレント伝送用光デバイスの技術動向」, 電子情報通信学会誌, Vol.99, No.11, pp.1072-1076, 2016
- Optical Networking Forum: <http://www.oiforum.com/>
- 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, W11.2, 2014
- 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126号, pp.31-38, 2014
- N. Ishikura et al.: "Transmission characteristics of 32-Gbaud PDM IQ monolithic silicon modulator operating with 2-Vppd drive voltage," in 42nd European Conference and Exhibition on Optical Communication, W.2.E.4, 2016
- G. T. Reed et al.: "Silicon optical modulators," Nature Photonics, Vol.4, No.8, pp.518-526, 2010
- R. A. Soref and B. R. Bennett: "Electrooptical effects in silicon," IEEE J. Quantum Electron., Vol.23, No.1, pp.123-129, 1987
- K. Goi et al.: "Low-loss partial rib polarization rotator consisting only of silicon core and silica cladding," Optics Letters, Vol.40, No.7, pp.1410-1413, 2015
- A. Oka, et al.: "Low-loss all-adiabatic silicon-waveguide polarization-division multiplexer in C and L bands," in OptoElectronics and Communication Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology 2014, WE7E-1, 2014
- G. Tzimpragos, et al.: "A survey on FEC codes for 100G and beyond optical networks," IEEE Communication Surveys & Tutorials, Vol.18, No.1, pp.209-221, 2016