

## 高速シリコンマッハツェンダ 光変調器の最新動向

Latest Developments in High-speed Silicon Mach-Zehnder Optical Modulators

小川憲介

### Abstract

10 Gbit/s を超えるビットレートで動作するシリコンマッハツェンダ光変調器の最新動向について解説する。基幹系光ファイバ通信における大容量・高速光通信システムへの応用という観点に立ち、高速シリコンマッハツェンダ光変調器の構成、高速性能及びビット誤り特性について紹介し、10 Gbit/s 商用システムにおいて普及しているニオブ酸リチウムマッハツェンダ光変調器との比較を行う。更に、基幹系光ファイバ通信デバイスでは重要な課題である光損失の低減について、現状と今後の展開を概観する。

キーワード：光変調器，シリコンフォトンクス，光導波路，光集積回路，光ファイバ通信

### 1. はじめに

基幹系光ファイバ通信のトラヒックは増加の一途であり、伝送容量の大きな高速光通信システムの普及が必要である<sup>(1)</sup>。大容量・高速光通信システムの普及には、小形で安価な装置の導入が必要であり、光デバイスの小形化・コスト低減が不可欠である。シリコン光導波路は、成熟したシリコンプロセスによる小形・集積化、大面積ウェーハでの量産によるコスト低減を可能とし、小形で安価な光デバイスに適する。よって、光送信のキーデバイスである光変調器を小形で安価に作製することが可能となる。光インタコネクタ系用途では、モノリシック光トランシーバとして集積化されたシリコン光変調器が実用段階にある<sup>(2)</sup>。基幹系用途で実用化されると、大容量・高速光通信システムの普及に弾みがつく。

基幹系光ファイバ通信では、長距離エラーフリー伝送のため高品質な光信号を必要とする。マッハツェンダ (Mach-Zehnder, MZ) 干渉計を構成する光導波路を用いると、コントラストの高い光変調が可能であり、強度変調 (OOK: On-Off Keying) の消光比及び位相変調 (PSK: Phase-Shift Keying) の Q 値が向上する。しかも、MZ 光変調器をプッシュプル駆動させると、波形ひ

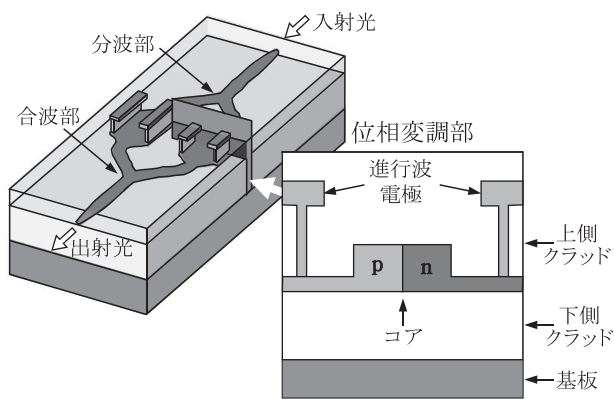
ずみを招く周波数チャープを抑制し、ゼロチャープ動作が可能である。そのため、基幹系デジタルコヒーレント伝送などで使用する多値位相変調器にも適する<sup>(3),(4)</sup>。

基幹系への応用に向けて、シリコン MZ 光変調器による 10 Gbit/s OOK 伝送実験が実施されている<sup>(5),(6)</sup>。多値位相変調器では、20 Gbit/s・50 Gbit/s 4 値位相変調及び 112 Gbit/s 偏波多重 4 値位相変調の報告がある<sup>(7)~(9)</sup>。本稿では、基幹系向け高速シリコン MZ 光変調器の研究開発の最新動向について、10 Gbit/s 商用システムで普及するニオブ酸リチウム (LN: Lithium Niobate) MZ 光変調器との比較を交えて紹介する。

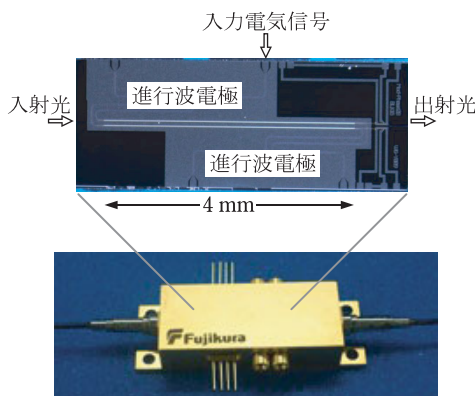
### 2. 高速光ファイバ通信用シリコン MZ 光変調器

シリコンの結晶構造はダイヤモンド形で反転対称を有し、一次の電気光学効果であるポッケルス効果は生じない。光変調には、自由キャリア吸収に伴う屈折率変化を利用する<sup>(10),(11)</sup>。本稿のシリコン MZ 光導波路では、図 1 のように MZ 光導波路の両アームの位相変調部に横形 pn 接合を形成し、光変調を行う。いずれかまたは両方の位相変調部に電気信号を入力し、キャリア密度変化により導波光の位相を変調して高速光変調を行う。干渉により、両アームの位相変調部を導波した光の位相が互いに同位相では出射光の強度は強められ、互いに反位相では弱められる。OOK では互いの位相を同位相・反位相間で変調し、PSK では同位相に保持して変調する<sup>(4)</sup>。

小川憲介 正員 (株)フジクラ光電子技術研究所  
E-mail kensuke.ogawa@jp.fujikura.com  
Kensuke OGAWA, Member (Optics and Electronics Laboratory, Fujikura Ltd., Sakura-shi, 285-8550 Japan).  
電子情報通信学会誌 Vol.96 No.3 pp.195-199 2013 年 3 月  
©電子情報通信学会 2013



(a) 俯瞰及び部分断面図



(b) 光変調器チップ及びパッケージ写真

図1 高速シリコン MZ 光変調器の構成

測定には図1(b)のチップを用い、装置に組み込むには図1(b)のようなパッケージに内蔵する。

位相変調部はコア中央に突起部、コア両端にスラブを有するリブ形光導波路で構成される。変調電気信号の入力と直流バイアス電圧印加のため、 $p \cdot n$  スラブ部がそれぞれ金属電極に接続される。位相変調部の入・出射端は方形光導波路につながる。リブ幅は  $500 \sim 600 \text{ nm}$ 、コア底面からリブ頂上及びスラブ頂上までの高さは  $220 \text{ nm}$  及び  $95 \text{ nm}$  である。方形光導波路の幅はリブ幅と同じである。光導波路の側壁荒れによる光損失と、抵抗・容量結合により変調速度の低下を招く電気抵抗とを低減するべく、寸法を決めている<sup>(12)</sup>。

素子の作製には、シリコン基板上に厚み  $2 \mu\text{m}$  の埋込酸化膜 (BOX: Buried Oxide) 層とその上にシリコン薄膜層が形成された直径 8 インチの Silicon On Insulator (SOI) ウェーハを使用する<sup>(13)</sup>。BOX 層が下側クラッドとなる。シリコン薄膜層に  $pn$  接合を形成してリブ形コアに加工する。次いで、コア上にシリカ膜を積層して上側クラッドとし、上側クラッド上にアルミニウム膜を積層して電極を形成する。

高速光変調器では、変調電気信号を入力する電極とし

て進行波形が採用される。シリコン MZ 光変調器も同様である。シリコン MZ 光変調器では、 $pn$  接合を分布キャパシタとする等価回路モデルで進行波電極を設計することができる<sup>(14)</sup>。図1(b)のチップでは、グレーの平板がコプレーナ形進行波電極であり、白い線状部が長さ  $4 \text{ mm}$  の位相変調部である。進行波電極は、 $pn$  接合に約  $5 \text{ V}$  の直流逆バイアスを印加した下でインピーダンス  $50 \Omega$  に整合するよう設計される。  $10 \text{ MHz} \sim 43.5 \text{ GHz}$  Sパラメータ測定での実測値は  $44 \sim 51 \Omega$  である。直流逆バイアスを印加するのは、空乏電界でのキャリア加速及び接合容量低減により高速化するためである<sup>(15), (16)</sup>。  $40 \text{ Gbit/s}$  に達する高速光変調が確認されている<sup>(17) \sim (19)</sup>。

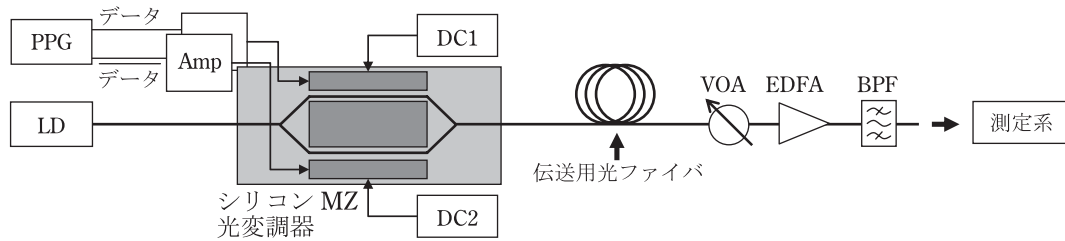
入射光源には、 $C \cdot L$  バンドの単一波長・連続発振レーザを使用する。入・出射光及び伝搬光の偏波は電界が基板面に平行な横電界 (TE: Transverse Electric) 状態にある。先端をレンズ状に加工した先球偏波保持光ファイバを用いて、光導波路の入・出射端との光結合を得る<sup>(12)</sup>。

横形  $pn$  接合に限らず、上・下の  $p \cdot n$  層間にゲート酸化膜が挟まれたキャパシタ構造を位相変調部に有する構成も報告がある<sup>(5), (20), (21)</sup>。この場合、ゲート酸化膜を介して順・逆バイアス下でキャリア蓄積・空乏を切り換え、光インタコネクタ機器で不可欠な低電圧動作が可能である。しかし、コア中央が高ドープ領域となること、及び上側シリコン層の成膜が必要であることから、光損失が増大し、製造プロセスが複雑化する。本稿では、光損失低減が重要となる基幹系への応用が主眼であり、横形  $pn$  接合を有するシリコン MZ 光変調器に注目する。

### 3. シリコン MZ 光変調器の高速性能

高速性能及び次章のビットエラー特性の測定には、図2の構成を用いる。図2では、プッシュプル駆動の例を示しており、パルスパターン発生器 (PPG: Pulse Pattern Generator) から両アームにデータ信号及び反転データ信号を増幅器 (Amp) を介して入力する。信号は  $2^{31}-1$  擬似ランダムビット列である。OOK ではアーム間の位相差が  $0$  または  $\pi$ 、PSK では両アームの位相が  $0$  または  $\pi$  となるよう、入力信号の振幅を調節する<sup>(4)</sup>。

現行システムで主流の OOK に限ると、プッシュプル駆動を行わず、一方のアームにのみ信号を入力してプリチャージ動作させることが多い。図3に、プリチャージ駆動での  $10 \sim 32 \text{ Gbit/s}$  OOK アイ波形を示す。伝送距離ゼロ、すなわち伝送用光ファイバを用いない back-to-back 測定での波形である。消光比は  $10 \text{ Gbit/s}$  で  $13.9 \text{ dB}$ 、 $20 \text{ Gbit/s}$  で  $11.5 \text{ dB}$ 、及び  $32 \text{ Gbit/s}$  で  $11.3 \text{ dB}$  である<sup>(12), (19)</sup>。LN 光変調器では、 $10 \text{ Gbit/s}$  OOK の消光比は  $13 \text{ dB}$  以上である<sup>(22)</sup>。シリコン MZ 光



PPG : パルスパターン発生器, LD : レーザ光源, Amp : 増幅器, DC1, DC2 : 直流バイアス電源, VOA : 可変光減衰器, EDFA : エルビウムドープ光ファイバ増幅器, BPF : 光帯域フィルタ

図2 高性能及びビット誤り特性測定のプロック図 測定系は、アイパターン測定ではサンプリングオシロスコープ、コンスタレーション測定では光ホモダイン干渉計及びリアルタイムオシロスコープ、及びビット誤り測定ではビット誤り検出器である。

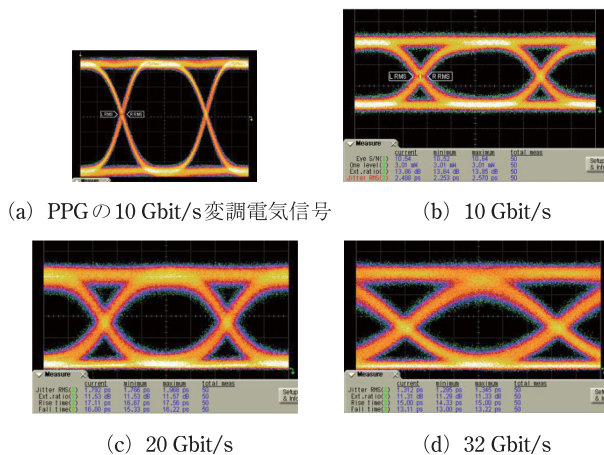


図3 10~32 Gbit/s OOK アイ波形 一方のアームのみに電気信号を入力したプリチャープ動作での back-to-back 波形。10 Gbit/s 変調電気信号も示す。

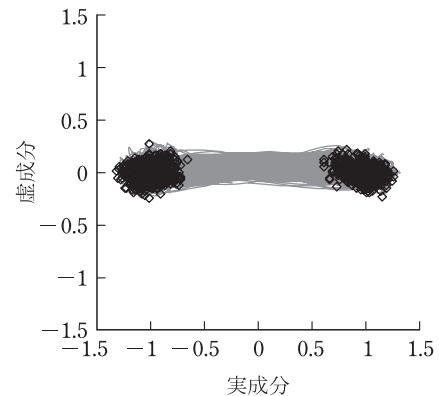


図4 20 Gbit/s 2 値位相変調のコンスタレーション 黒い点の群は各々 0 bit ( $X=1, Y=0$ ) 及び  $\pi$  bit ( $X=-1, Y=0$ ) を、灰色の線はビット遷移の軌跡を表す。

変調器で LN 同等の消光比を得ていることが分かる。

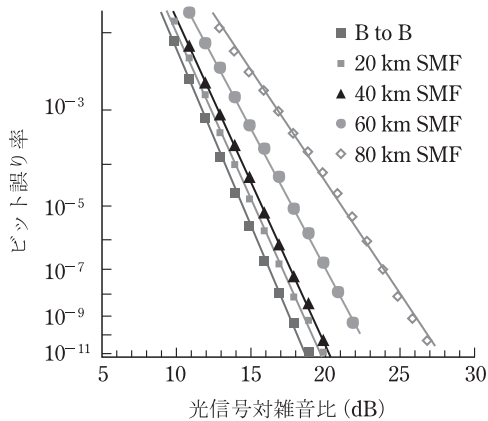
プッシュプル駆動させると、ゼロチャープ OOK 及び PSK 動作が可能である。20 Gbit/s 2 値 PSK でのコンスタレーションを図4に示す。実成分を X 軸、虚成分を Y 軸とし、0 bit ( $X=1, Y=0$ ) 及び  $\pi$  bit ( $X=-1, Y=0$ ) を黒い点、両ビット間遷移の軌跡を灰色の線で示す。軌跡は X 軸上に位置する直線となり、ゼロチャープ変調であることが分かる<sup>(23)</sup>。Q 値は 20 dB であり、LN MZ 光変調器と比較できるレベルである。

自由キャリア吸収を利用した位相変調では、強度変調が同時に生じて両アーム間で光強度が不均衡となり、ゼロチャープ動作が損なわれる恐れがある<sup>(24)</sup>。本稿のシリコン MZ 光変調器では、逆バイアスを印加しない状態で pn 接合のキャリア密度は  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  程度であり、キャリア密度は低い。低キャリア密度では、吸収変化より屈折率変化が優勢となる<sup>(11)</sup>。そのため、強度変調の影響は小さいと考えられる。

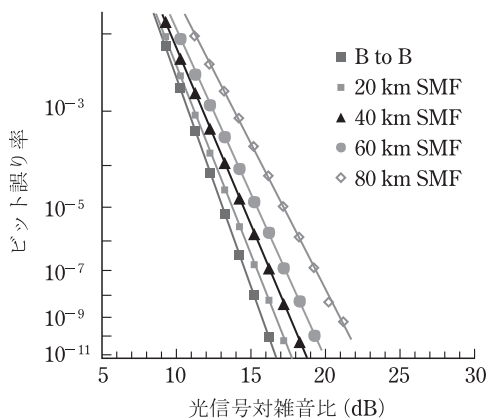
#### 4. シリコン MZ 光変調器のビット誤り特性

ゼロチャープ OOK 動作のシリコン MZ 光変調器に対し、単一モードファイバ (SMF: Single-Mode Fiber) 伝送または分散補償ファイバ (DCF: Dispersion-Compensation Fiber) 伝送におけるビット誤り率 (BER: Bit Error Rate) 測定について報告がある<sup>(6)</sup>。図5に SMF 伝送の BER 特性を示す。比較のため、LN MZ 光変調器の BER 特性も示す。横軸は光信号対雑音比 (OSNR: Optical Signal-to-Noise Ratio) である。VOA で光信号強度を調節し、OSNR を所望の値とする<sup>(25)</sup>。

各伝送距離の BER 特性からエラーフリー上限 ( $\text{BER}=10^{-3}$ ) での OSNR を読み取り、伝送距離に伴う OSNR の増分をパスペナルティとする。伝送距離を波長分散量に換算してパスペナルティをプロットすると、図6の特性を得る<sup>(6)</sup>。波長分散量の正符号は SMF 伝送、負符号は DCF 伝送に対応する。パスペナルティ 2 dB での波長分散量を分散耐性とする。フィッティング曲線よりシリコン MZ 光変調器及び LN MZ 光変調器の分散耐性はそれぞれ  $\pm 700 \text{ ps/nm}$  及び  $\pm 800 \text{ ps/nm}$  である。位相変調部及び進行波電極の改良により、LN



(a) Si



(b) LN

図5 ビット誤り率特性 シリコン MZ 光変調器 (Si) 及び LN MZ 光変調器 (LN) に対する back to back (B to B) から SMF 80 km 伝送までの結果を示す。

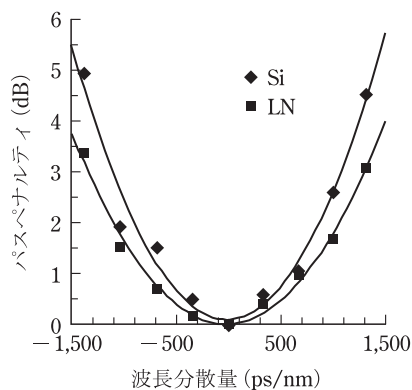


図6 パスペナルティ シリコン MZ 光変調器 (Si) と LN MZ 光変調器 (LN) との比較。実線は二次関数を用いたフィッティング曲線を示す。

MZ 光変調器の性能に更に迫ることが可能であろう。

シリコンリング形光導波路でも伝送特性の評価が行われている<sup>(26), (27)</sup>。リング形では、スペクトルの周期リップル及び周波数チャープの解消が必要となる。

## 5. シリコン MZ 光変調器の低光損失化

シリコン MZ 光変調器の全光損失は C・L バンドにおいて 10.5 dB 以下である<sup>(12)</sup>。LN MZ 光変調器と比較すると、更なる光損失の低減が望まれる。以下のように、各構成部に対して光損失を低減するための検討が進展している。その成果を参考として、全光損失を更に低減することが可能である。

位相変調部を構成するリブ形光導波路では、光導波路の側壁荒れによる光損失と、抵抗・容量結合により変調速度の低下を招く電気抵抗の低減とを両立するよう、寸法を決めている<sup>(12)</sup>。横形 pn 接合を採用しているため、コア中央が高ドープ領域とならず、上側シリコン層の成膜も必要ないため、低損失化に適する構造となっている。更に最先端の加工プロセスを取り入れると、側壁荒れを一層低減することが可能となる。本稿で紹介したシリコン MZ 光変調器では、248 nm 露光プロセスにより光導波路を描画している。最先端の 193 nm 露光プロセスを適用すると、解像度が向上して側壁荒れが低減し、光損失の更なる低減につながる。

分波部・合波部では、Y 分岐に代わり多モード干渉計 (MMI: Multi-Mode Interferometer) を用いた小形の分岐構造が検討されている<sup>(28)-(30)</sup>。MMI では、分波・合波の過剰光損失をそれぞれ 0.3 dB 程度まで低減することが可能である。

入・出射端の光結合損低減のため、光導波路先端は逆テーパ形モードフィールド変換部に加工されている<sup>(28)</sup>。更に結合損を低減したモードフィールド変換部の提案と検討が幅広く進められている。光ファイバから入射した光を強く閉じ込めて逆テーパ形コアとの結合効率を増すため、逆テーパ形コアを取り巻くクラッドを横はりで空气中に保持した構造及びカンチレバー形クラッドとした構造が提案され、異なる偏波に対して 2 dB 以下の結合損が報告されている<sup>(31), (32)</sup>。また、リブ形断面を有するテーパ形クラッドを逆テーパ形コアの先端に設けることにより、異なる偏波に対して 3 dB 以下の結合損が報告されている<sup>(33)</sup>。

## 6. おわりに

基幹系光ファイバ通信への応用の観点から高速シリコン MZ 光変調器について解説した。伝送性能では、LN MZ 光変調器の性能に接近しており、更なる光損失の低減にも見通しが得られている。基幹系光デバイスとして、シリコン MZ 光変調器は実用化に近づいている。

## 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,” 信学誌, vol. 94, no. 2, pp. 72-78, Feb. 2011.
- (2) P.D. Dobbelaere, S. Abdalla, S. Gloeckner, M. Mack, G. Masini, A. Mekis, T. Pinguet, S. Sahni, D. Guckenberger, M. Harrison, and A. Narasimha, “Si photonics based high-speed optical transceivers,” in 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), no. We. 1. E. 5., Washington, DC, 2012.
- (3) F. Koyama and K. Iga, “Frequency chirping in external modulators,” J. Lightwave Technol., vol. 6, no. 1, pp. 87-93, Jan. 1988.
- (4) A.H. Gnauck and P.J. Winzer, “Optical phase-shift-keyed transmission,” J. Lightwave Technol., vol. 23, no. 1, pp. 115-130, Jan. 2005.
- (5) D.D’Andrea, “CMOS photonics today & tomorrow, enabling technology,” Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC) and The National Fiber Optic Engineers Conference (NFOEC), Market Watch Panel III, Washington, DC, 2009.
- (6) K. Goi, K. Oda, H. Kusaka, Y. Terada, K. Ogawa, T.-Y. Liow, X. Tu, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong, “11-Gbps 80-km transmission performance of zero-chirp silicon Mach-Zehnder modulator,” in 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), no. Tu. 1. E. 4, Washington, DC, 2012.
- (7) K. Ogawa, K. Goi, H. Kusaka, K. Oda, T.-Y. Liow, X. Tu, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong, “20-Gbps silicon photonic waveguide nested Mach-Zehnder QPSK modulator,” in Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), no. JTh2A. 20, Washington, DC, 2012.
- (8) P. Dong, L. Chen, C. Xie, L.L. Buhl, and Y.-K. Chen, “50-Gb/s silicon quadrature phase-shift keying modulator,” Opt. Express, vol. 20, no. 19, pp. 21181-21186, Sept. 2012.
- (9) P. Dong, C. Xie, L. Chen, L.L. Buhl, and Y.-K. Chen, “112-Gb/s monolithic PDM-QPSK modulator in silicon,” in 38th European Conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), no. Th. 3. B. 1, Amsterdam, 2012.
- (10) R.A. Soref and B.R. Bennett, “Electrooptical effects in silicon,” IEEE J. Quantum Electron., vol. 23, no. 1, pp. 123-129, Jan. 1987.
- (11) R.A. Soref and J.P. Lorenzo, “Silicon guided-wave optics,” Solid State Technol., vol. 31, pp. 95-98, Nov. 1988.
- (12) K. Ogawa, K. Goi, Y.T. Tan, T.-Y. Liow, X. Tu, Q. Fang, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong, “Silicon Mach-Zehnder modulator of extinction ratio beyond 10 dB at 10.0-12.5 Gbps,” Opt. Express, vol. 19, no. 26, pp. B26-B31, Dec. 2011.
- (13) T.-Y. Liow, K.-W. Ang, Q. Fang, J.-F. Song, Y.-Z. Xiong, M.-B. Yu, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong, “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, Jan. 2010.
- (14) H. Yu and W. Bogaerts, “An equivalent circuit model of the traveling wave electrode for carrier-depletion-based silicon optical modulators,” J. Lightwave Technol., vol. 30, no. 11, pp. 1602-1609, June 2012.
- (15) F.Y. Gardes, G.T. Reed, N.G. Emerson, and C.E. Png, “A sub-micron depletion-type photonic modulator in silicon on insulator,” Opt. Express, vol. 13, no. 22, pp. 8845-8854, Oct. 2005.
- (16) B. Analui, D. Guckenberger, D. Kucharski, and A. Narasimha, “A fully integrated 20-Gb/s optoelectronic transceiver implemented in a standard 0.13  $\mu\text{m}$  CMOS SOI technology,” IEEE J. Solid-State Circuits, vol. 41, no. 12, pp. 2945-2955, Dec. 2006.
- (17) A. Liu, L. Liao, D. Rubin, H. Nguyen, B. Ciftcioglu, Y. Chetrit, N. Izhaky, and M. Paniccia, “High-speed optical modulation based on carrier depletion in a silicon waveguide,” Opt. Express, vol. 15, no. 2, pp. 660-668, Jan. 2007.
- (18) D.J. Thomson, F.Y. Gardes, Y. Hu, G. Mashanovich, M. Fournier, P. Grosse, J.-M. Fedeli, and G.T. Reed, “High contrast 40Gbit/s optical modulation in silicon,” Opt. Express, vol. 19, no. 12, pp. 11507-11516, June 2011.
- (19) 小田研二, 日下裕幸, 五井一宏, 小川憲介, T.-Y. Liow, X. Tu, Q. Fang, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong, “20-32 Gbps 低損失 MZ シリコン変調器,” 2012 信学総大, no. C-3-41, p. 190, March 2012.
- (20) L. Liao, D.S.-Rubio, M. Morse, A. Liu, D. Hodge, D. Rubin, U.D. Keil, and T. Franck, “High speed silicon Mach-Zehnder modulator,” Opt. Express, vol. 13, no. 8, pp. 3129-3135, April 2005.
- (21) J. Fujikata, J. Ushida, M.-B. Yu, S.Y. Zhu, L. Ding, G.-Q.P. Lo, D.-L. Kwong, and T. Nakamura, “25 GHz operation of silicon optical modulator with projection MOS structure,” in Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), no. OMI3, Washington, DC, 2010.
- (22) E.L. Wooten, K.M. Kissa, A.Y.-Yan, E.J. Murphy, D.A. Lafaw, P.F. Hallemeier, D. Maack, D.V. Attanasio, D.J. Fritz, G.J. McBrien, and D.E. Bossi, “A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., vol. 6, no. 1, pp. 69-82, Jan. /Feb. 2000.
- (23) K. Goi, K. Oda, H. Kusaka, K. Ogawa, T.-Y. Liow, X. Tu, and G.-Q. Lo, “20-Gbps BPSK silicon Mach-Zehnder modulator with excellent chirp-free performance,” 2012 17th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC 2012), no. 4D3-5, pp. 238-239, Busan, Korea, July 2012.
- (24) Y. Wei, Y. Zhao, J. Yang, M. Wang, and X. Jiang, “Chirp characteristics of silicon Mach-Zehnder modulator under small-signal modulation,” J. Lightwave Technol., vol. 29, no. 7, pp. 1011-1017, April 2011.
- (25) T. Mizuochi, K. Ishida, T. Kobayashi, J. Abe, K. Kinjo, K. Motoshima, and K. Kasahara, “A comparative study of DPSK and OOK WDM transmission over transoceanic distances and their performance degradations due to nonlinear phase noise,” J. Lightwave Technol., vol. 21, no. 9, pp. 1933-1943, Sept. 2003.
- (26) W.A. Zortman, A.L. Lentine, M.R. Watts, and D.C. Trotter, “Power penalty measurement and frequency chirp extraction in silicon microdisk resonator modulators,” in Optical Fiber Communication Conference and Exposition (OFC), no. OMI7, Washington, DC, 2010.
- (27) A. Biberman, S. Manipatruni, N. Ophir, L. Chen, M. Lipson, and K. Bergman, “First demonstration of long-haul transmission using silicon microring modulators,” Opt. Express, vol. 18, no. 15, pp. 15544-15552, July 2010.
- (28) K. Yamada, T. Tsuchizawa, T. Watanabe, J. Takahashi, E. Tamechika, M. Takahashi, S. Uchiyama, H. Fukuda, T. Shoji, S. Itabashi, and H. Morita, “Microphotonics devices based on silicon wire waveguiding system,” IEICE Trans. Electron., vol. E87-C, no. 3, pp. 351-358, March 2004.
- (29) Q. Fang, Y. He, H. Xin, F. Li, and Y. Liu, “An efficient MMI SOI splitter with multimode input/output waveguides,” Chinese J. Semicond., vol. 26, no. 2, pp. 276-279, Feb. 2005.
- (30) D.J. Thomson, Y. Hu, G.T. Reed, and J.-M. Fedeli, “Low loss MMI couplers for high performance MZI modulators,” IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 22, no. 20, pp. 1485-1487, Oct. 2010.
- (31) Q. Fang, T.-Y. Liow, J.F. Song, C.W. Tan, M.B. Yu, G.-Q. Lo, and D.-L. Kwong, “Suspended optical fiber-to-waveguide mode size converter for silicon photonics,” Opt. Express, vol. 18, no. 8, pp. 7763-7769, April 2010.
- (32) L. Chen, C.R. Doerr, Y.-K. Chen, and T.-Y. Liow, “Low-loss and broadband cantilever couplers between standard cleaved fibers and high-index-contrast Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> or Si waveguides,” IEEE Photonics Technol. Lett., vol. 22, no. 23, pp. 1744-1746, Dec. 2010.
- (33) M. Tokushima, A. Kamei, and T. Horikawa, “Dual-tapered 10- $\mu\text{m}$ -spot-size converter with double core for coupling polarization-independent silicon rib waveguides to single-mode optical fibers,” Appl. Phys. Express, vol. 5, 022202, Feb. 2012.

(平成 24 年 10 月 31 日受付 平成 24 年 11 月 13 日最終受付)



小川 憲介 (正員)

昭 62 阪大大学院博士課程了。同年(株)日立製作所入社。三井物産系ナノテク研究所を経て、平 18(株)フジクラ入社。現在、同社光電子技術研究所応用電子技術研究部上席研究員。理博。OSA Senior Member。