

石英系プレーナ光波回路を用いた差動四値位相変調 (DQPSK) 方式用変復調光デバイス

井上 靖之・高橋 浩

Modulator and Demodulator for Differential Quadrature Phase Shift Keying (DQPSK) Using Silica-Based Planar Lightwave Circuit

Yasuyuki INOUE and Hiroshi TAKAHASHI

This paper reviews 40 Gbit/s DQPSK optical modulators and demodulators, especially focusing on the devices applied with silica-based planar lightwave circuit (PLC) technologies. An integrated optical RZ-DQPSK modulator using silica-LN hybrid integration and a compact DQPSK PLC demodulator with interwoven double Mach-Zehnder interferometer are described with their fundamentals and features.

Key words: DQPSK, silica waveguide, PLC, LiNbO₃, modulator, delay interferometer

インターネットに代表される IT 革命により、情報通信システムは質的にも量的にも大きく変化している。例えば、従来の固定電話に代わりいつでもどこでも話ができる携帯電話が普及し、従来の音声通信に代わり電子メールやインターネット等のデータ通信が通信トラフィックの大半を占めるようになり、今ではインターネットを介して音楽から動画まであらゆる情報を容易に入手することができるようになった。この結果、通信トラフィックは年率 1.4 倍¹⁾ともいわれるような急速なスピードで増加している。今後、高精細動画の配信など、さらなる大容量通信の需要が高まることが予想される。

このような情報通信の爆発的な伸びを支えてきた技術のひとつが光通信技術である。図 1 に、長距離光伝送システムの大容量化の進展を示す。光通信は、1980 年代に幹線網に光ファイバーが敷設されて以降、1990 年代中ごろにかけて時分割多重 (TDM: time division multiplexing) 技術により 32 Mbit/s から 2.5 Gbit/s へと高速化が進められ、1990 年代後半には 10 Gbit/s まで進んだ。その後、インターネットの普及による急速な通信トラフィック需要に対応するため、波長多重 (WDM: wavelength division multiplexing) 技術が導入され、1 本の光ファイバーで波

長の異なる複数の信号を同時に伝送することにより飛躍的に伝送容量が増大された。現在では、10 Gbit/s の信号を 50 GHz 間隔で 80 チャンネル多重する 800 Gbit/s の大容量システムが商用システムで採用されている。

これまで通信容量の大容量化には、1 チャンネル当たりの高速化と波長チャンネル数の増大が行われてきたが、前者は光ファイバーの偏波モード分散 (PMD: polarization mode dispersion) 等により長距離伝送においては 40 Gbit/s 以上の高速化が困難になりつつある。後者は、光ファイバーアンプ (EDFA: erbium doped fiber amplifier) の帯域制限や四光波混合 (FWM: four wave mixing) 等の非線形現象により、これ以上の波長多重には限界がみえてきた。そこで、第三のアプローチとして 1 パルス中の情報を多値化する研究開発が進んでいる。多値化技術の中でも差動四値位相変調 (DQPSK: differential quadrature phase shift keying) 方式は、S/N 比劣化が少なく、40 Gbit/s 以上の変調方式として最も実用化が進んでいる²⁾。DQPSK 方式では、情報を光パルスの強度ではなく 4 つの光位相 ($\pi/4$, $3\pi/4$, $5\pi/4$, $7\pi/4$) に載せて伝送する。このため、1 パルスで 2 ビットの情報を伝達することが可能となる。また、位相変調信号を復調する際に基準位相となる光を用い

NTT フォトニクス研究所複合光デバイス研究部 (〒243-0198 厚木市森の里若宮 3-1) E-mail: yinoue@aocl.ntt.co.jp

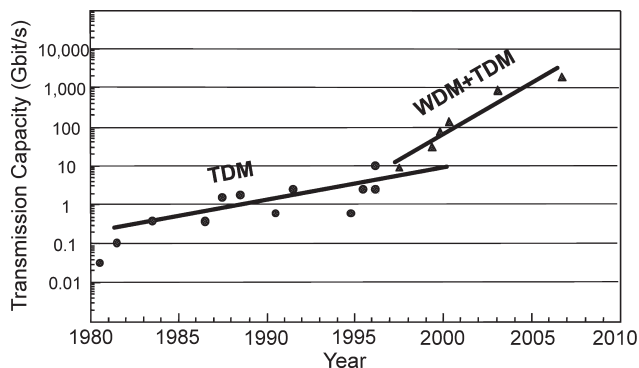


図1 光通信システムの大容量化。

ず、隣接するタイムスロットの位相を基準として差動受信するため、局発光源が不要である。このように DQPSK 方式は 40 Gbit/s 以上の変調方式としてすぐれているが、構成がシンプルな従来の強度変調・直接検波 (IMDD: intensity-modulation direct-detection) に比較すると光変調器と光復調器が複雑になる。そこで、われわれは石英系プレーナー光波回路 (PLC: planar lightwave circuit) 技術を用いて、DQPSK 光変調器および光復調器の小型集積化に取り組んできた。本稿では、40 Gbit/s 用 DQPSK 光変調器および光復調器について、その動作原理も含めて小型集積化の進展状況を解説する。

1. DQPSK 光変調器

図2に、40 Gbit/s DQPSK 光トランシーバーの送信部の構成を示す。40 Gbit/s の電気信号は、差動受信でデータが復元されるようにプリコーダーでデータ変換された後、極性が異なる2つの差動電気信号としてドライバーを介してニオブ酸リチウム (LN: LiNbO_3) 光変調器上の電極に供給される。一方、光源から出力された CW 光は、2つのマッハ・ツェンダー干渉計を 90° 直交並列配置した IQ (in-phase, quadrature-phase) 変調器で位相変調される。具体的には、ドライバーからの差動電気信号はマッハ・ツェンダー干渉計の2つの電極 A, B に供給され、そのときの光位相変化は、複素平面上の円周上 a と b の軌跡となり、a と b の合成で I チャネルの信号光は複素平面上の (1, 0) と (-1, 0) の2点を結ぶ直線上を移動する。Q チャネルも同様であるが、I チャネルに対して 90° の光位相シフトが与えられるため、その信号光は複素平面上の (0, 1) と (0, -1) の2点を結ぶ直線上を移動する。最終的に、I チャネルと Q チャネルの光が合成されて出力されるため、変調光の位相は $\pi/4, 3\pi/4, 5\pi/4, 7\pi/4$ のいずれかの値をとる。なお、信号と信号の間は、光周波数が変化してチャープが発生するため、その抑圧のために

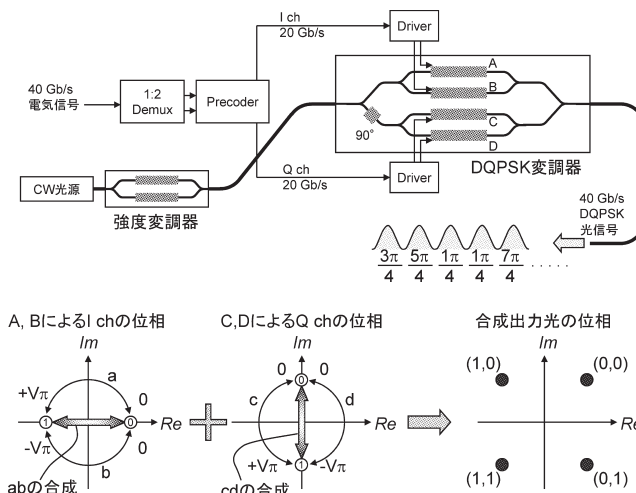


図2 40 Gbit/s DQPSK 光トランシーバーの送信部構成と変調光の位相。

RZ (return to zero) 強度光変調器を縦列に接続して光強度をゼロにしている。

通常、光変調器は LN 単体で構成される。RZ-DQPSK 方式用に IQ 変調器と RZ 変調器を1体集積した LN 変調器が報告されている³⁾。通常の Ti 拡散 LN 導波路では曲げ半径が大きいため、曲げ部にリッジ構造を採用することで曲げ半径 1 mm の折り返し導波路を実現し、大幅な小型化を実現している。別のアプローチとして、位相変調器アレイを Ti 拡散 LN 導波路で、カップラーや位相シフター、折り返し曲げ導波路を石英系 PLC でそれぞれ実現し、両者を導波路端面接続することにより小型集積化を図った報告もなされている⁴⁾。この技術は、将来のより大規模な光変調器に対しても有効なアプローチであるため以下に詳しく紹介する。また、RZ 変調器の集積化はなされていないものの、InP 半導体導波路を用いた小型低駆動電圧の IQ 変調器が報告されており、将来の展開が期待される⁵⁾。

図3に、石英-LN ハイブリッド集積光変調器の基本構成を示す。LN 位相変調器アレイの両側に合分岐機能等を有する PLC を接続し、3基板全体としてマッハ・ツェンダー干渉計を形成している。Ti 拡散 LN 導波路と石英系 PLC 導波路は、アクティブアライメントで調芯した後、UV 硬化接着剤で接着固定されている。端面接続であるため、LN や PLC のサイズによらず集積することが可能であり、PLC の回路設計の柔軟性を生かした遅延線やタップポートを付加することも可能である。LN 導波路は Ti 熱拡散で形成され、そのモードフィールドはやや扁平な形状になっている。そこで PLC のモードフィールドを LN 導波路のモードフィールドに一致させることで、両者の接

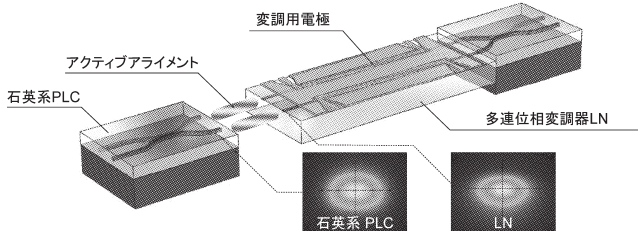


図3 石英-LNハイブリッド集積光変調器の基本構成。

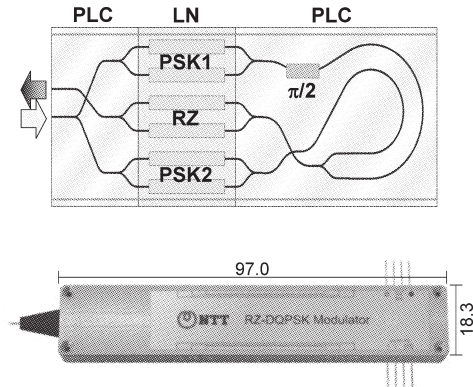


図4 石英-LNハイブリッド集積技術を適用したRZ-DQPSK光変調器の回路構成とモジュール写真。

続損失を0.2 dBにまで低減している。石英ガラスの屈折率1.45とLNの屈折率2.2との差により生じる反射は、LN接続端面にAR (anti-reflection) コートを施すとともに、接続端面に対して両基板とも斜め導波路構造を採用することで-50 dB程度に抑圧している。図4に、ハイブリッド集積したRZ-DQPSK光変調器を示す。IQ変調器とRZ変調器を折り返し導波路で接続した構造になっており、ファイバー接続部がモジュールの片端に配置されるためボード上での光ファイバー余長処理に必要なスペースも節約できる。モジュールサイズは $L: 97.0 \times W: 18.3 \times H: 7.8$ mmであり、市販のIQ変調器と同等の大きさである。IQ変調器およびRZ変調器の消光比は25 dB以上であり、すべての変調器をオン状態にした場合の光挿入損失は約6 dBであった。その内訳は、結合損失1.8 dB (PLC-LN接続: $0.2 \text{ dB} \times 4$, PLC-ファイバー接続: $0.5 \text{ dB} \times 2$), Y分岐過剰損失1.2 dB ($0.2 \text{ dB} \times 6$), LN導波路伝搬損失2.4 dBである。図5に、各変調器のEO周波数応答を示す。3変調器ともに均一な特性が得られており、約30 GHzの3 dB帯域が確保できている。

2. DQPSK 光復調器

一般的なDQPSK受信部の構成を図6(a)に示す。伝送されてきたDQPSK光信号は2分岐された後、Iチャンネル

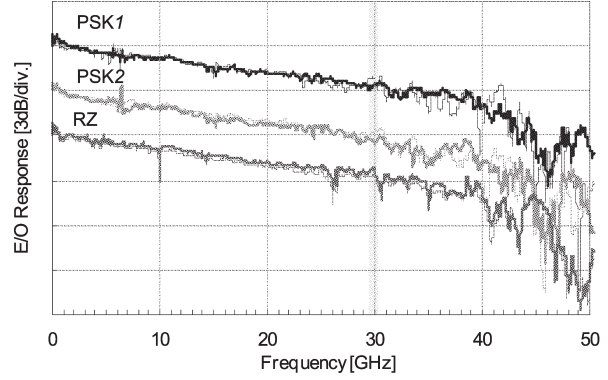


図5 石英-LNハイブリッド集積技術を適用した各変調器のEO周波数応答特性。

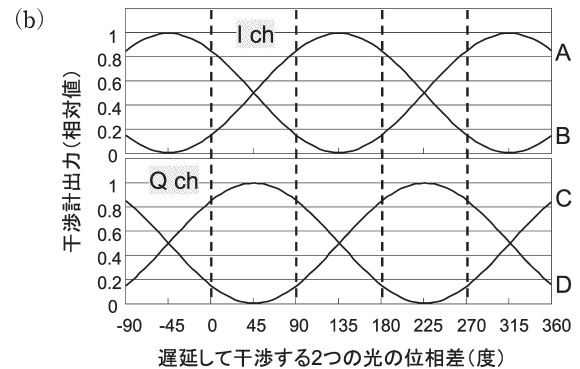
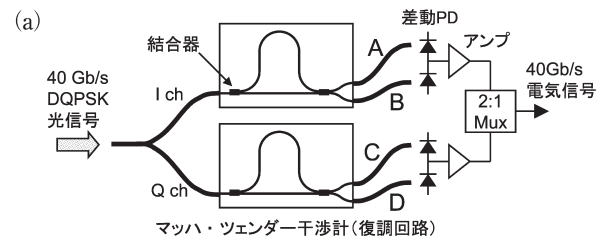


図6 (a) DQPSK受信部の構成、(b)隣接するタイムスロットの光位相差とI/Qチャンネル用遅延干渉計出力の関係。

用遅延干渉計とQチャンネル用遅延干渉計でそれぞれ光差動強度信号になり、最終的に差動光受信器で電気信号に変換される。遅延干渉計は遅延量が1タイムスロットに相当するマッハ・ツェンダー干渉計であり、変調速度が20 Gbit/sの場合、2本のアーム導波路の長さの差は約10 mmとなる。干渉計に入射した光は第一のカップラーで2分岐され、長いアーム導波路を伝搬した光は短いアーム導波路を伝搬してきた次のタイムスロットの光と第二のカップラーで干渉する。隣り合うタイムスロット間の光の位相関係により2つのマッハ・ツェンダー干渉計出力の光強度が決まる。なお、Iチャンネル用遅延干渉計とQチャンネル用遅延干渉計は、両者の遅延量が1/4光波長(位相に換算して90°)異なるように設計されている。図6(b)は、隣接

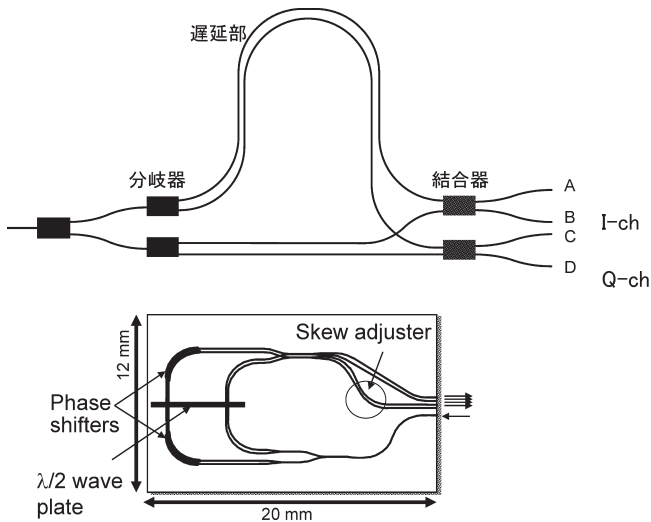


図7 小型DQPSK遅延干渉計の原理構成および回路レイアウト。

するタイムスロットの光位相差とIチャネル用遅延干渉計出力およびQチャネル用遅延干渉計出力の関係を示す。例えば、隣接するタイムスロットの相対光位相差が 0° の場合、Iチャネル用遅延干渉計はA, Bにそれぞれ0.85, 0.15の信号を出力し、差動受信器で+0.7の電圧に変換される。一方、相対光位相差が 180° の場合は、A, Bにそれぞれ0.15, 0.85の信号を出力し、差動受信器で-0.7の電圧に変換される。すなわち、相対光位相差が 0° と 180° の光信号は、Iチャネル用遅延干渉計と差動受信器により ± 0.7 の電気信号に復調される。しかし、相対光位相差が 90° と 180° のとき、Iチャネル用遅延干渉計と差動受信器は同じ-0.7の電気信号を出力し、両者を判別することはできない。そこで両者を区別するため、Qチャネル用遅延干渉計はIチャネル用遅延干渉計に対して 90° 位相をシフトさせている。相対光位相差が 90° のときQチャネル用遅延干渉計はC, Dに0.85, 0.15の信号を出力し、相対光位相差が 180° のときC, Dに0.15, 0.85の信号を出力する。そのときの差動受信器出力はそれぞれ+0.7, -0.7となり、両者を判別することが可能となる。このように相対的に 90° 位相をシフトした2つの遅延干渉計を組み合わせることで、四値の位相信号を復調することが可能になる。

遅延干渉計としては、ハーフミラーを使用した空間光学系型⁹⁾、ファイバーカップラーを用いたファイバー型⁷⁾、導波路を用いたPLC型⁸⁾が研究開発されている。その中でもPLC型は量産性にすぐれており、2つの干渉計を集積可能であるため小型化にも適している。また、応答速度数msの熱光学シフターを用いているため、装置立ち上げ

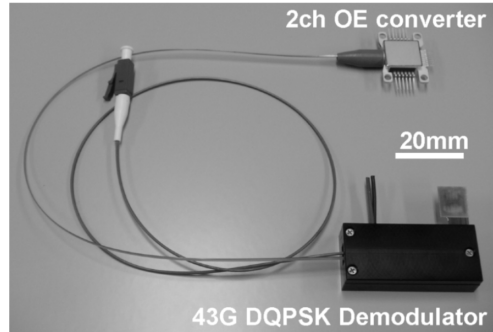


図8 40 Gbit/s DQPSK復調器の写真。

時に必要とされる遅延干渉計の位相チューニング時間が短いこともPLC型の特徴である。以下に、PLC型DQPSK遅延干渉計の研究開発状況を紹介する。

図7に、小型DQPSK遅延干渉計のレイアウトを示す。Iチャネル用とQチャネル用の遅延干渉計を編み込んで配置することにより、回路サイズを大幅に低減している⁹⁾。PLC型の課題は、基板と石英系ガラス層の熱膨張係数差で残留熱応力誘起の複屈折(偏波依存性)が生じることである。この課題に対して、遅延干渉計中央付近にポリイミド波長板を挿入し、偏波依存性を補償することで、PDF (polarization dependent frequency shift) とよばれる偏波依存性を干渉計の位相差で 3° (周波数特性のずれで150 MHzに相当)以下に抑制することに成功した¹⁰⁾。PLC回路サイズは 12×20 mmで、光ファイバーとの結合損失および回路損失を含む過剰損失は約2 dBとなっている。小型DQPSK遅延干渉計と、並行して開発した2チャネル集積光差動受信器¹¹⁾を4芯ファイバーで接続したDQPSK復調器を図8に示す。遅延干渉計と光差動受信器をそれぞれ2チャネル集積したことにより、両者を4芯テープファイバーで簡便に接続することが可能になり、スキュー調整の必要がなくなった。また、2チャネル集積光差動受信器出力は、同軸型のGPPOコネクタではなくフィードスルー技術が適用されており、経済化に配慮した構成となっている¹¹⁾。作製したDQPSK復調器の受信特性を図9に示す。Iチャネル、Qチャネルともに良好な受信特性が得られており、開発技術の有効性が確認できる。

PLC型遅延干渉計は、石英系ガラスの屈折率が温度に依存するため、PLCの温度制御が必要である。一方で、光トランシーバーの小型化要求およびグリーン化のために、低消費電力化が強く望まれている。この要求に応えるため、最近PLC遅延干渉計の温度制御を不要にする技術も開発されている。具体的には、負の屈折率温度係数を有するポリマー材料を遅延干渉計のアーム導波路に挿入する

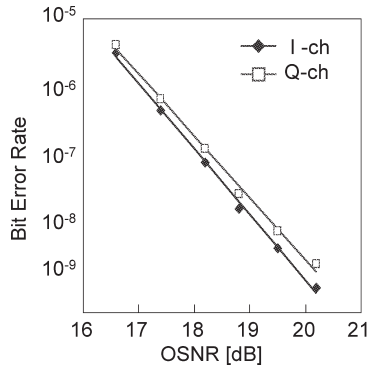


図9 40 Gbit/s DQPSK 復調器の受信特性.

ことで、 $-5\sim 70^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で PLC 温度制御フリー動作を実現している¹²⁾。

3. 今後の展開

本報告では、石英系 PLC 技術を用いた DQPSK 光変調器および光復調器について紹介した。40 Gbit/s の DQPSK システムは商用化が始まっており、今後のさらなる普及にむけて、これらの技術は小型低コスト化の観点で重要となるであろう。一方、さらなる高速化のターゲットとして 100 Gbit/s 伝送の研究開発がスタートしており、その実現手段として最も期待が高まっているのはデジタルコヒーレント受信を用いた DP-QPSK (dual polarization quadrature phase shift keying) 変調方式である。本報告で紹介した石英-LN 変調器技術や PLC 型遅延干渉計技術は、DP-QPSK 光変調器¹³⁾ や復調器用 90° ハイブリッド¹⁴⁾ にも適用可能であることが示されており、100 Gbit/s あるいはそれ以上の高速伝送を実現する技術として、いっそうの展開が期待される。

文 献

- 1) 総務省報道資料，“我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算”，平成 19 年 8 月 22 日。 http://www.soumu.go.jp/s-news/2007/070822_2.html
- 2) M. Yuki, T. Hoshida, T. Tanimura, S. Oda, K. Nakamura, O. Vassilieva, X. Wang, H. Nakashima, G. Ishikawa and J. C. Rasmussen: “Transmission characteristics of 43 Gb/s single-polarization and dual-polarization RZ-DQPSK signals with co-propagating 11.1 Gb/s NRZ channels over NZ-DSF,” *Proc. OFC 2008, OMQ2* (San Diego, 2008).

- 3) M. Sugiyama, M. Doi, T. Hasegawa, T. Shiraishi and K. Tanaka: “Low-drive-voltage and compact RZ-DQPSK LiNbO₃ modulator,” *Proc. ECOC 2007*, 10.3.4, vol. 4 (Berlin, 2007) pp. 149–150.
- 4) T. Yamada, Y. Sakamaki, T. Shibata, A. Kaneko, A. Sano and Y. Miyamoto: “Compact 111-Gbit/s integrated RZ-DQPSK modulator using hybrid assembly technique with silica-based PLCs and LiNbO₃ devices,” *Proc. OFC 2008, OThC3* (San Diego, 2008).
- 5) N. Kikuchi, H. Sanjoh, Y. Shibata, K. Tsuzuki and T. Sato: “80-Gbit/s InP DQPSK modulator with an n-p-i-n structure,” *Proc. ECOC 2007*, 10.3.1, vol. 4 (Berlin, 2007) pp. 143–144.
- 6) J. Hsieh, C. Ai, V. Chien, X. Liu, A. H. Gnauck and X. Wei: “Athermal demodulator for 42.7-Gb/s DPSK signals,” *Proc. ECOC 2005*, Th 1.5.6, vol. 4 (Glasgow, 2005) pp. 827–828.
- 7) Y. K. Lize, M. Faucher, E. Jarry, P. Ouellette, E. Villeneuve, A. Wetter and F. Seguin: “Phase-tunable low-loss, S-, C-, and L-band DPSK and DQPSK demodulator,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **19** (2007) 1886–1888.
- 8) C. R. Doerr, D. M. Gill, A. H. Gnauck, L. L. Buhl, P. J. Winzer, M. A. Cappuzzo, A. Wong-Foy, E. Y. Chen and L. T. Gomez: “Monolithic demodulator for 40-Gb/s DQPSK using a star coupler,” *J. Lightwave Technol.*, **24** (2006) 171–174.
- 9) T. Hashimoto, Y. Nasu, Y. Sakamaki, K. Hattori, Y. Inoue, H. Takahashi, H. Kawakami and E. Yoshida: “Compact DQPSK demodulator with interwoven double Mach-Zehnder interferometer using planar lightwave circuit,” *Proc. ECOC 2008, Mo.3.C.2* (Brussels, 2008).
- 10) Y. Nasu, M. Oguma, H. Takahashi, Y. Inoue, H. Kawakami and E. Yoshida: “Polarization insensitive MZI-based DQPSK demodulator with asymmetric half-wave plate configuration,” *Proc. OFC 2008, OThE5* (San Diego, 2008).
- 11) T. Furuta, T. Itoh, H. Fukuyama, K. Yoshino, E. Yoshida, H. Kawakami, Y. Muramoto, F. Nakajima, K. Murata and R. Takahashi: “Single-package 2-channel balanced receiver module for 43-Gbit/s DQPSK,” *Proc. ECOC 2008, P.2.13* (Brussels, 2008).
- 12) Y. Sakamaki, K. Hattori, Y. Nasu, S. Kamei, T. Goh, T. Hashimoto, H. Takahashi and Y. Inoue: “Low power consumption DQPSK demodulator using silica-based planar lightwave circuit,” accepted to *IEEE Photonics Technol. Lett.*
- 13) H. Yamazaki, T. Yamada, K. Suzuki, T. Goh, A. Kaneko, A. Sano, E. Yamada and Y. Miyamoto: “Integrated 100-Gb/s PDM-QPSK modulator using a hybrid assembly technique with silica-based PLCs and LiNbO₃ phase modulators,” *Proc. ECOC 2008, Mo.3.C.1* (Brussels, 2008).
- 14) H. Tsunetsugu, M. Hosoya, S. Norimatsu, N. Takachio, Y. Inoue and S. Hata: “A packaging technique for an optical 90° -hybrid balanced receiver using a planar lightwave circuit,” *IEEE CPMT Trans., part B*, **19** (1996) 569–574.

(2009 年 1 月 21 日受理)