

超高速光回線交換機 “光ルータコアサブシステム”

Optical Router Core Subsystem — An Ultra-High Speed Optical Line Exchange Equipment

末 広 雅 幸*1 中 島 眞 一*1
SUEHIRO Masayuki NAKAJIMA Shinichi浅 野 義 之*2 石 井 貴 之*1
ASANO Yoshiyuki ISHII Takayuki

自社開発の超高速光スイッチ素子を搭載した“光ルータコアサブシステム”と名付けた新しいタイプの超高速光回線交換機を開発した。本装置は、双方向で超高速に光回線交換を行う機能を備えており、光信号のフォーマットやビットレートに依存しないで動作することができる。高速大容量通信方式に使われる 43 Gbps DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) 信号, DPSK (Differential Phase Shift Keying) 信号, 更に高速の 160 Gbps RZ (Return to Zero) 信号を劣化させることなく通すことを実証した。GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching) での高速光回線切替え, 光バーストスイッチングネットワーク, スーパーコンピュータのノード間通信などへの適用が考えられる。

We have developed a new type of ultra-high-speed optical line exchange equipment called the optical router core subsystem, which incorporates ultra-high-speed optical switching devices. This equipment offers ultra-high-speed bidirectional line exchange, enabling independent operation of optical modulation formats and bit rates. We have successfully demonstrated operation of this equipment in 43-Gbps DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying), DPSK (Differential Phase Shift Keying), and 160-Gbps RZ (Return to Zero) modulation formats without signal deterioration. This optical router core subsystem is expected to be applied to high-speed line switching in GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching), burst switches in optical networks, and interconnections of supercomputer nodes networks.

1. はじめに

光スイッチングは、次世代フォトニックネットワークのコアとなる技術である。次世代光ルータの回線交換部においてキーとなるデバイスは光スイッチ素子であり、それには次のような性能が要求される。

- (1) ナノ秒オーダーでの超高速光経路切り替え。
- (2) 使用する WDM (Wavelength Division Multiplexing) バンド内で波長に依存しない。
- (3) 光変調方式や光通信速度に依存しない。

現在既に広く使用されている光スイッチとしては MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の可動ミラーを用いるものがあり、これは上記(2), (3)の性能は満足するが、切り替え時間が数ミリ秒程度と遅い⁽¹⁾。また他に、SOA (Semiconductor Optical Amplifier) ゲートスイッチ

や、PLZT (Lanthanum-modified Lead Zirconate Titanate) などの光学結晶を用いたものが発表されており、これらはナノ秒オーダーの高速性を特長としている⁽²⁾⁽³⁾。しかしながら、これらには波長や変調方式に制限がある。

当社は、上記の全ての性能を同時に満足する半導体の光スイッチを開発してきた。そして、これまでこのスイッチが2ナノ秒以下での切り替えが可能であること、Cバンド全域内で波長依存性が無いことを実証した⁽⁴⁾。この素子



図1 光スイッチ素子導波路交差部 (SEM 像)

(導波路幅は 4 μm, 交差角は 5°)

*1 フォトニクス事業部 第4技術部

*2 フォトニクス事業部 第1技術部

表1 導波路の交差角とそれを臨界角とする屈折率変化

$2\theta (^{\circ})$	$\Delta n(\%)$
2	-0.02
4	-0.04
6	-0.14
8	-0.24

は増幅等の能動的な動作は行っておらず、原理的に(3)の性能も満足する。

当社は、上記スイッチ素子を搭載した新しいタイプの超高速光回線交換機を開発し、光ルータコアサブシステムと名付けた。作製したプロトタイプは4入力4出力で、光スイッチ素子の制御は外部から行う。次世代の高速大容量通信方式に使われる43 Gbps DQPSK (Differential Quadrature Phase Shift Keying) 信号、DPSK (Differential Phase Shift Keying) 信号、160 Gbps RZ (Return to Zero) 信号を劣化させずに通すことを実証した。

この報告では、前半で自社開発の超高速光スイッチ素子について述べた後、後半で光ルータコアサブシステムについて構成、評価結果等を詳述する。

2. 光スイッチ素子

図1に、光スイッチ素子の構造を示す。InP (Indium Phosphide) 基板上に2つの平面導波路がX字型にクロスした形をしたものであり、その交差部に電極が設けられている。断面方向には、ダブルヘテロ構造を採用している。

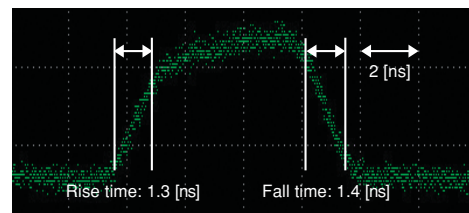
電極に電流が注入されると、電極直下にキャリア密度の高い層が形成される。このキャリア密度変動が、プラズマ分散効果により屈折率変化を誘発する。それが十分大きければ光の全反射が生じ、光信号の経路がスイッチングされる。屈折率の変化 Δn と電子の密度 N 、ホール密度 P の関係は、以下の式で表される⁽⁵⁾。

$$\Delta n = -\frac{e^2 \lambda^2}{8\pi^2 c^2 \epsilon_0 n} \left[\frac{N}{m_e} + \frac{P}{m_h} \right]$$

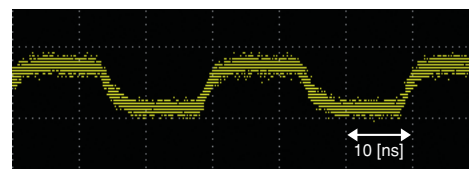
ここで、 e は電子の電荷、 m_e 、 m_h は電子とホールの有効質量、 λ 、 c は真空中の光信号の波長と速度、 ϵ_0 は真空中の誘電率である。 $N = 1.0 \times 10^{18}$ 個/cm³のオーダーのキャリア密度が得られた場合、0.1%オーダーの屈折率低下が見積もられる。



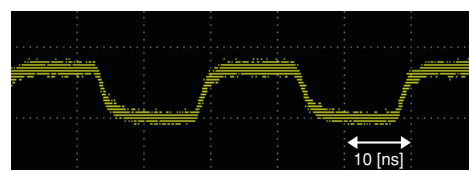
図2 光スイッチ素子実装形態



(a) $\lambda = 1550$ nm



(b) $\lambda = 1565$ nm



(c) $\lambda = 1530$ nm

図3 光スイッチ素子のスイッチング時間

一方、導波路の交差角 2θ に対する全反射に必要な屈折率変化はスネルの法則から、表1のように導出できる。設計では交差角 $4 - 8^{\circ}$ を採用したが、電流注入によりこの $N = 1.0 \times 10^{18}$ 個/cm³程度のキャリア密度が得られると、光の全反射が可能である。実際、本素子において、注入電流150 mAで消光比約15 dBのスイッチング動作を確認した。

図2に、光スイッチ素子の実装形態を示す。入出力ファイバと電気入力コネクタを備えている。高機能化のために 2×2 タイプスイッチのみならず、 4×4 (後述)、 6×6 スイッチの試作も行い動作を確認した。

スイッチング時間は、図3に示すように、1.3-1.4 nsである。このスイッチング速度は、Cバンド全域について波長依存性のないことを確認した。

光スイッチ素子による光信号の損失は約10 dBであるが、その大半は導波路と光ファイバとの結合に伴うものであり、導波路形状や実装方法の工夫によってその改善は可能である。導波路損失が1-2 dB/cmと小さいことを

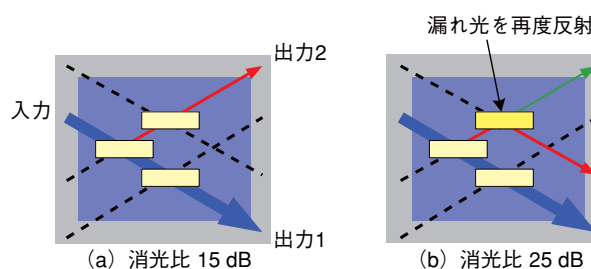


図4 4×4 スイッチを使用したスイッチ素子の改良

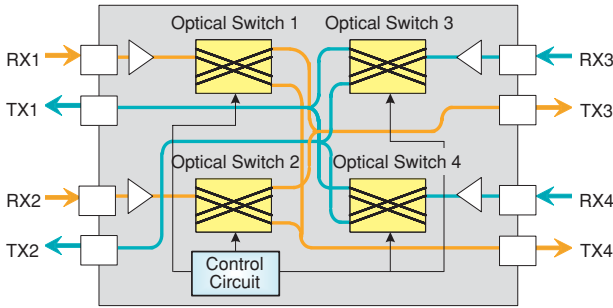


図5 光ルータコアサブシステムの構成

利用し、導波路を多段に集積化することで高機能化の実現を行った。例えば、4×4ポートスイッチに集積化し、漏れ信号を再度反射させて未使用ポートへ捨てることで、消光比を改善できた。図4に、その様子を示す。実際、2×2スイッチでは15 dBであった消光比を、この方法により25 dB以上に改善した。ここでは透過動作の例を示したが、反射動作でも同様に25 dB以上の消光比を得ている。本報告の光ルータコアサブシステムでは、この方式のスイッチを採用している。

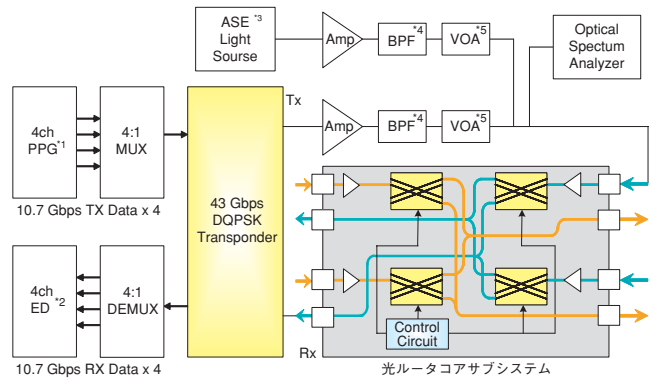
3. 光ルータコアサブシステム

3.1 光ルータコアサブシステムの構成

当社は、2章で説明した光スイッチ素子と光アンプや駆動回路を一つのパッケージに実装し、双方向で超高速に光回線交換を行う機能を備えた光ルータコアサブシステムを開発した。図5に回路構成を、図6に外観を示す。二重ライン双方向の光交換ができるよう、4入力4出力のポートを備えている。光スイッチ素子の損失は光アンプで補っており、信号の減衰は無い。



図6 光ルータコアサブシステム外観
(60×370×280 mm)



*1: Pulse Pattern Generator
*2: Error Detector
*3: Amplified Spontaneous Emission
*4: Band Pass Filter
*5: Variable Optical Attenuator

図7 43 Gbps 特性測定系

3.2 光ルータコアサブシステムの特性評価

特性評価として、43 Gbps DQPSK, DPSK 信号の透過特性測定および位相変調アナライザによる位相変化特性測定、160 Gbps RZ 信号透過特性測定を行った。

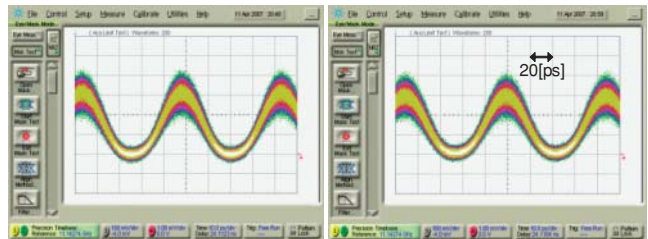
3.2.1 43 Gbps DQPSK および DPSK 信号透過特性測定

光ルータコアサブシステムに43 Gbps DQPSK 信号を透過させ、波形観測及び OSNR (Optical Signal-to-Noise Ratio) 耐性を測定した。測定系を図7に、結果を図8, 9に示す⁽⁶⁾⁽⁷⁾。測定の際、光スイッチ素子は動的に変化させず、出力ポートは透過側、または反射側に固定しておき、それぞれの状態について測定した。

評価結果では、波形の劣化はほとんど観測されず、また OSNR 耐性もほとんど変わらず、ペナルティは1 dB以下であった。43 Gbps DPSK 信号においても波形と OSNR 耐性の劣化はなく、DQPSK と同様の結果となった。

3.2.2 位相変調信号の変化特性測定

サブシステム透過前後における DQPSK 信号の位相の直交性を、1ビット遅延自己ホモダイン方式の位相変調アナライザ⁽⁸⁾を用いて I-Q 平面表示で確認した。その結果をコンスタレーションダイアグラムとして、図10に示す。



(a) 入力 (a) 出力

図8 43 Gbps DQPSK 信号透過特性

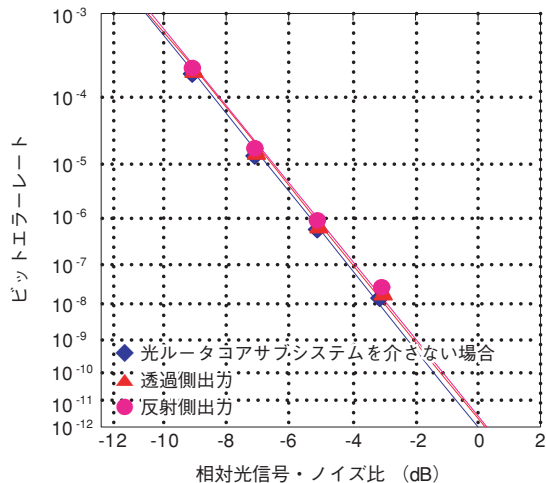


図9 ビットエラーレートと OSNR の関係

(図の横軸には、光ルータコアサブシステムを介さない場合の最小受信 OSNR を基準とした相対的 OSNR を採用した)

透過前後において波形の変化は僅かであり、43 Gbps DQPSK 信号の In-phase と Quadrature-phase の直交性が保存されていることを確認した。

3.2.3 超高速信号(160 Gbps RZ)透過特性測定

さらに、この光スイッチ素子に 160 Gbps RZ 信号を透過させ、ビットレート依存性を確かめた。

Mode lock fibre laser を利用して発生させた狭幅サンプリングパルスを時分割多重により、160 Gbps RZ の PRBS (Pseudo-Random Bit Sequence)²⁷-1 信号とし、光ルータコアサブシステムを通して、出力された波形を光サンプリングオシロスコープで観測した⁹⁾。波形を、図11に示す。アイダイヤグラムの著しい劣化は見られず、このサブシステムは 160 Gbps RZ 信号も透過可能であることを確認した。

4. おわりに

自社開発の光スイッチ素子を用いた双方向で超高速に

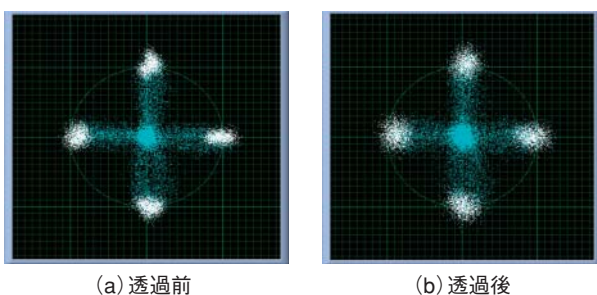


図10 コンスタレーションダイヤグラム

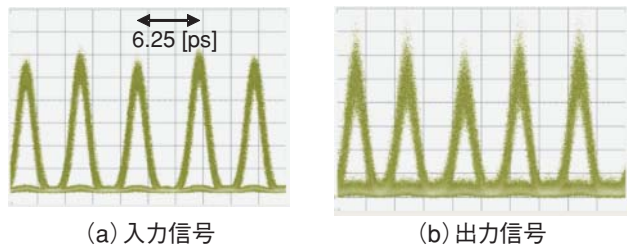


図11 160 Gbps RZ 信号透過特性

光回線交換を行う新しいタイプの回線交換機 “光ルータコアサブシステム”を開発した。光信号の変調方式やビットレートに依らず、有効であることを実証した。次世代ネットワークのコアとなる要素技術の一つとなる。本サブシステムは、高速のトリガー回路やスケジューリング回路を実装すれば、GMPLSでの高速光回線切り替え、光バーストスイッチングネットワーク、スーパーコンピュータのノード間通信などへの適用が考えられる。

今後は、このサブシステムを用いたネットワークへの応用へ展開して行く。

参考文献

- (1) O. Tsuboi, et al., “A Rotational Comb-Driven Micromirror with Large Deflection Angle and Low Drive Voltage,” Optical MEMS, 2002, pp. 532-535
- (2) J. P. Wang, et al., “A Performance Optimization Method for SOA-MZI Devices,” OFC2007, OthT4
- (3) K. Nashimoto, et al., “PLZT Electro-Optic Waveguides and Switches,” OFC2001, PD10
- (4) C. Sato, et al., “High-speed Waveguide Switches for Optical Packet-switched Routers and Networks,” OFC2004, MF53, 2004, pp. 158-160
- (5) B. R. Bennett, et al., “Carrier-Induced Change in Refractive Index of InP, GaAs, and InGaAsP,” IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 26, No. 1, January 1990, pp. 113-122
- (6) K. Ikezawa, et al., “InP Optical Switches Operating in 2 nanoseconds and their Application for Optical Packet Networks and Optical Routers,” IEICE-LQE-2007-82, pp. 11-14
- (7) K. Ikezawa, et al., “Demonstration of Modulation Format Free and Bit Rate Free Characteristics of 2ns Optical Switch for Optical Routers,” OFC2008, JWA31, 2008, pp. 1-3
- (8) K. Tanimura, et al., “Monitoring of DPSK/DQPSK Signals using 1-bit Delayed Self-Homodyne Detection with Optical Phase Diversity,” ECOC2007, P065
- (9) H. Ohta, et al., “Measuring eye diagram of 320 Gbit/s optical signal by optical sampling using passively modelocked fibre laser,” Electron Letters, Vol. 37 No. 25, 2001, pp. 1541-1542