

技術紹介

6 電界吸収型マトリクス光スイッチの開発

Development of Electroabsorption Matrix Optical Switch

須田 篤史	Atsushi Suda	中央研究所	研究開発部	主任	博士（材料科学）
浅見 栄一	Eiichi Asami	中央研究所	研究開発部	主任	
田中 琢	Taku Tanaka	中央研究所	研究開発部	主任	
白鳥 雅之	Masayuki Shiratori	中央研究所	研究開発部		
三津間 高志	Takashi Mitsuma	中央研究所	研究開発部	シニアマネージャー	

キーワード： 光スイッチ、電界吸収型光変調器、化合物半導体、ハイΔ導波路、モノリシック

Keywords : optical switch, electroabsorption optical modulator, compound semiconductor, high-delta waveguide, monolithic

要 旨

次世代の大容量・超高速光ネットワークを実現するキーデバイスの一つであるマトリクス光スイッチを開発しています。マトリクス光スイッチの基本構成である1入力-2出力(1×2)光スイッチは電界吸収型光変調素子と透明導波路の集積により構成しています。この基本構成をさらにモノリシックに集積し、2入力-2出力(2×2)マトリクス光スイッチ、および4入力-4出力(4×4)マトリクス光スイッチを作製し、モジュールとして応答速度0.3 nsと超高速なスイッチング動作を確認しましたので、その結果を報告します。

SUMMARY

We are developing a matrix optical switch, one of the key devices to realize the next-generation large-capacity, ultra high-speed optical networks. One-input/two-outputs (1x2) optical switch, a basic element of the matrix optical switch, consists of integration of an electroabsorption-type optical modulation element and transparent waveguide. By merging the basic elements into a monolithic, two-inputs/two-outputs (2x2) and four-inputs/four-outputs (4x4) matrix optical switches are fabricated. We verified that the switches realize ultra high-speed switching operation of 0.3ns response speed as a module. Here we present summary of the result.

1 まえがき

「2005 年までに世界最先端の IT 国家となる」ことを目指した e-Japan 戦略により、ブロードバンド化されたインターネット環境は近年急速に普及し、通信トラフィックは飛躍的に増加してきています。今後は、「いつでも、どこでも、何でも、誰でも」ネットワークにつながり、情報の自在なやりとりを行うことができるユビキタスネット社会を実現するという u-Japan 計画が推進されており、光基幹ネットワークのさらなる大容量化・高速化が望まれています。

光基幹ネットワークの大容量化・高速化のための既存技術としてビットレート的高速化、波長のさらなる多重化が挙げられます。しかし、光信号の経路切り替えを行うルータにおける、光信号を電気信号に変換し電気信号処理を行ってから光信号に戻すといった一連の処理が、今後の超高速化、多重化のボトルネックとなることが予想されています。このボトルネック解消のためには光のまま経路を切り替える全光型光通信システムへの移行、さらには、データの固まり（パケット）ごとにルーティングする光パケットルーティングによる波長の効率的な運用が考えられています。この効率的な全光型光通信システム実現のためのキーデバイスの一つがマトリクス光スイッチです。

2 マトリクス光スイッチ

マトリクス光スイッチは複数の光入力ポートと複数の光出力ポートを有するデバイスで、ある光入力ポートから入力された光信号を任意のタイミングで任意の光出力ポートに出力する、すなわち光信号の経路を任意に切り替える機能をもったデバイスです。現在までに以下に挙げる方式が主に知られています。

1. MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 技術を用いたもの (1)

MEMS 型マトリクス光スイッチはシリコン微細加工技術を用いて作製した微小ミラーを用いて光路を切り替えます。この微小ミラーの動かし方にはいくつかの方式がありますが、構造物を機械的に動かしているため、スイッチング時間はミリ秒のオーダーとなり高速化は困難といえます。

2. PLC (光平面回路 : Planer Light-wave Circuit) と SOA (半導体光アンプ : Semiconductor Optical Amplifier) をハイブリッド集積したもの (2)

光を分岐、あるいは合流させるための PLC と、光を ON/OFF するための光ゲートとしての SOA アレイをハイブリッドに集積した光スイッチです。SOA を光ゲートとして用いているため、光を透過させるときは光信号を増幅して結合損失などを補償することが可能です。ハイブリッド集積では、素子自体の歩留まりがあまり問題にならないという利点はあるのですが、組立のためのコストは問題となってしまいます。さらに PLC は高分子系あるいは石英系材料で作製されており、一般的に導波路コアとクラッドの屈折率差が小さく光の閉じ込め効率が低く、小さな曲率半径の曲げに対して放射損失が増大してしまうため、ハイブリッド素子自体やモジュールのサイズが大きくなるという問題があります。スイッチング時間は SOA の動作速度となり、数ナノ秒のオーダーです。

3. 化合物半導体によるモノリシック集積型

一つには、光導波路と SOA をモノリシックに集積したものが挙げられます (3)。化合物半導体を用いることにより、導波路コアとクラッドの屈折率差が数 % と大きい、いわゆるハイΔ導波路を形成することができ、導波路への光の閉じ込め効率が高いため、曲率半径の小さな曲げ導波路においても低いレベルの放射損失に抑えることが可能であり、上述の PLC - SOA ハイブリッド方式と比較すると、素子サイズを小さくすることができます。スイッチング時間は同様に SOA の動作速度となり数ナノ秒のオーダーです。

他の方式として、化合物半導体で形成した導波路の交差部の屈折率をキャリア注入により変化させて、透過あるいは全反射により光路を切り換える X バースイッチ方式が挙げられます (4)。この方式の場合、スイッチング時間としては 2 ns 以下という値が報告されています。

3 開発のコンセプト

今回、光ゲート機能として、われわれが開発してきました電界吸収型（EA：Electro absorption）光変調器（5）と同様の素子構造を用いることで、1ns 以下の高速応答と波形劣化の少ない高品質性を両立し、かつ多チャンネル化が容易な集積型マトリクス光スイッチを実現しました。EA 光変調器は、送信側に用いられるデバイスで、図 1 に示すように、素子の導波路の一端より入射した連続光を、電気信号の ON/OFF に対応して光が透過／吸収することにより、光の ON / OFF 信号に変換します。この構造は、InGaAsP／InP 系化合物半導体で構成しています。この構造に逆方向電圧を印加することによる吸収端の長波長側（低エネルギー側）へのシフト、すなわちフランツ・ケルディッシュ効果により、導波路中を伝搬する光を吸収し消光します。そのときの吸収スペクトル変化の概念図を図 2 に示します。この EA 光変調器の素子サイズは $200\ \mu\text{m} \times 300\ \mu\text{m}$ と小型でかつ低消費電力であるといった優れた特長を有しております。

また、InGaAsP／InP 系化合物半導体は格子定数を一定に保ったまま吸収端波長を一定の範囲で任意に変化させることが可能であり、EA 光変調器や半導体光アンプ（SOA:Semiconductor Optical Amplifier）、透明導波路を一つの基板上にモノリシックに集積することが可能です。今回は、この EA 光変調器素子を高速光ゲートスイッチ素子として用い、化合物半導体ハイΔ透明導波路と集積してモノリシック構造とした EA 型マトリクス光スイッチを構成しています。

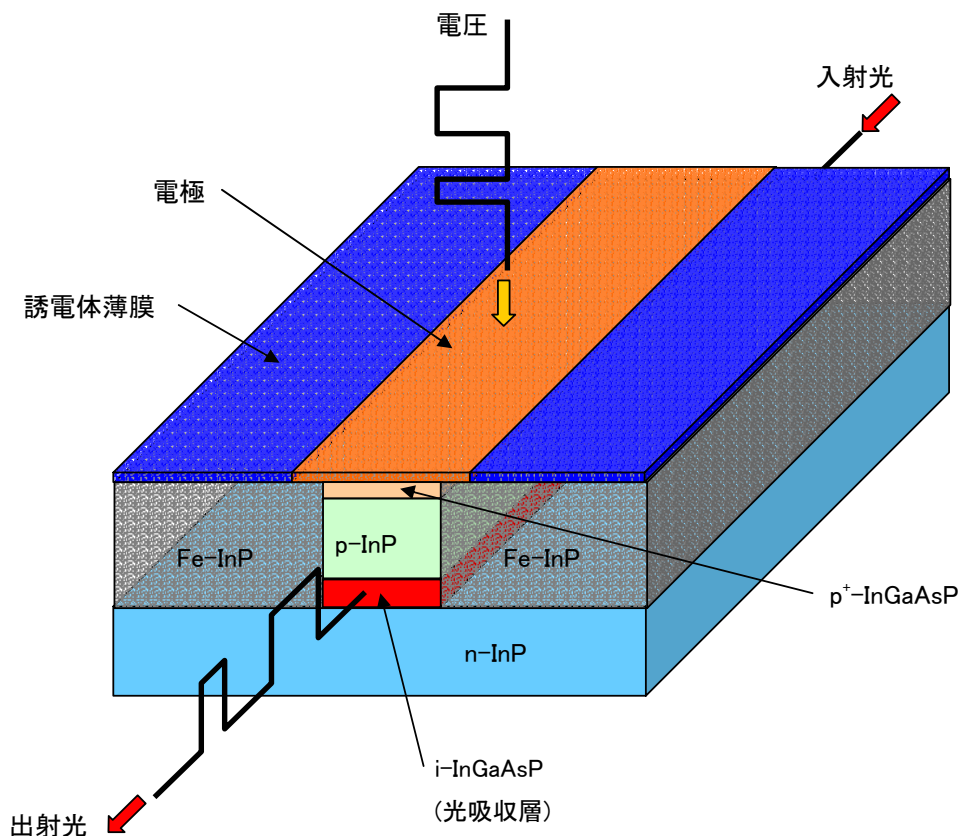


図 1 InGaAsP／InP 系電界吸収型光変調素子構造

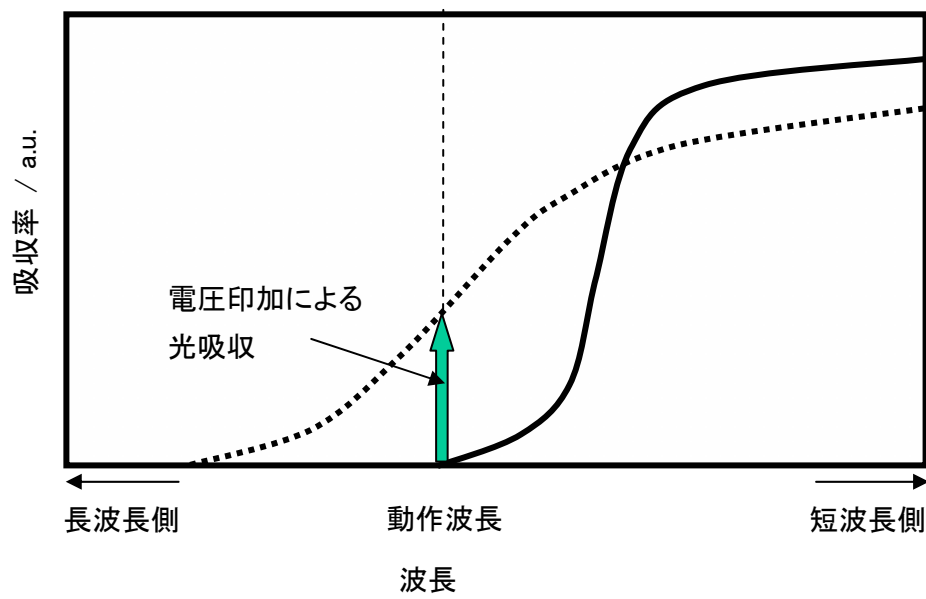


図2 フランツ・ケルディッシュ効果による光吸収の概念図

4 EA 型マトリクス光スイッチ素子の構成

今回開発した EA 型光スイッチの基本構成を図 3 に示します。この例は 1 入力 2 出力であり、2 つの EA 部の一方に電圧を印加することにより、入力光はどちらかの出力のみから出射されます。この基本構成を 2 つ集積し、出力側導波路を合流させると図 4 のようになり、 2×2 マトリクス光スイッチとなります。電圧を印加する EA 素子を選ぶことにより、入力光信号の光路が切り替わる構成となっています。基本構造をさらに集積した 4×4 マトリクス光スイッチの素子構成を図 5 に示します。このようにすべての光入力ポートはすべての光出力ポートと導波路で接続されており、適当な EA 素子に電圧を印加することにより、任意の光入力ポートからの入力光信号を任意の光出力ポートに出力することができます。

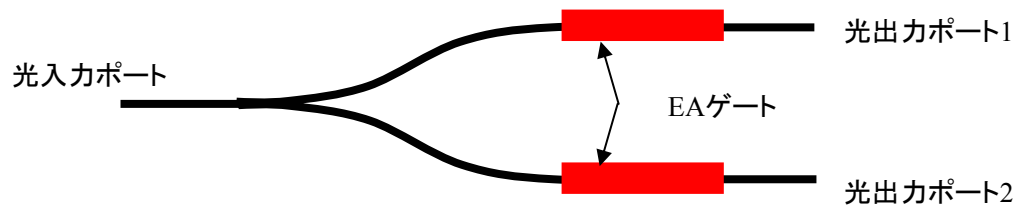


図 3 EA 型光スイッチの 1×2 基本構成

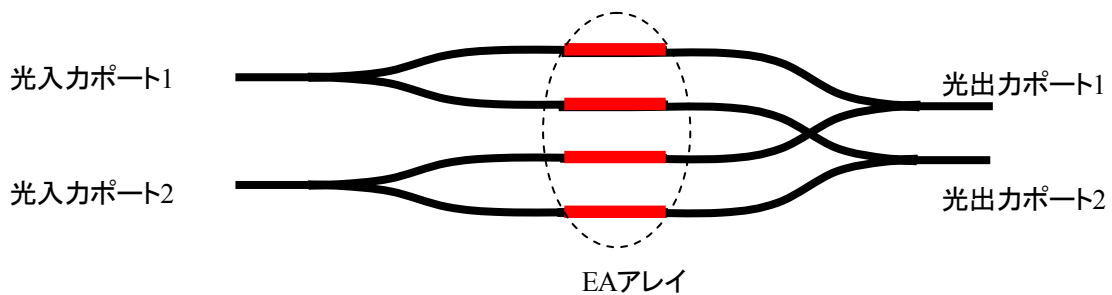


図 4 2×2 EA 型マトリクス光スイッチ素子構成

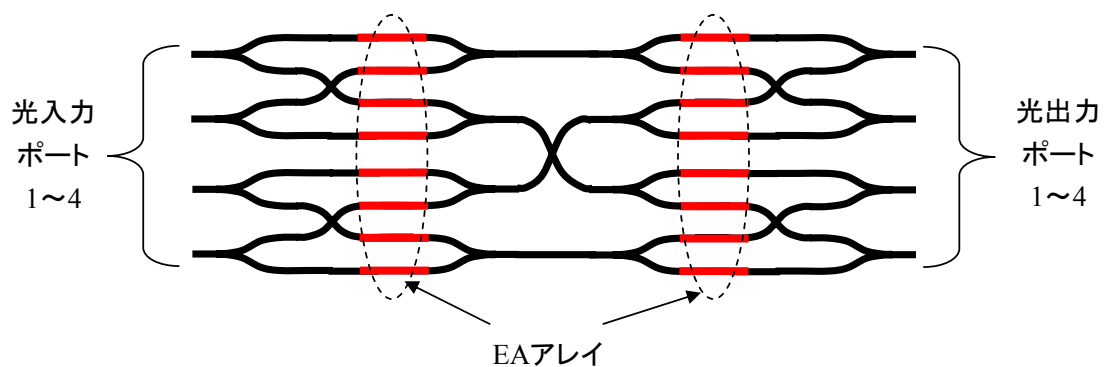


図 5 4×4 EA 型マトリクス光スイッチ素子構成

ところで、多チャンネル化の方策として、EA アレイのシリアル接続を考えた場合には、アレイの EA 間隔を大きくすると EA アレイと EA アレイの間を接続する透明導波路部分を長く設定する必要があります。これは、導波路からの放射損失を抑えるためには、導波路の曲率半径をある程度大きくしておく必要があるためです。すなわち、小型化のためにはアレイの EA 間隔を小さくするほうが有利と言えます。今回は電気干渉（クロストーク）のシミュレーション結果と製作の容易さから、アレイの EA 間隔は $50\ \mu\text{m}$ としました。またファイバとの接続部の導波路間隔は一般的な光ファイバアレイの間隔である $250\ \mu\text{m}$ としました。このように設計した素子の大きさは、 4×4 マトリクス光スイッチの場合で、 $1.5\ \text{mm} \times 7.5\ \text{mm}$ となります。

5 結果 — スイッチング動作

作製しました EA 型マトリクス光スイッチモジュールの外観を図 6 に示します。このモジュールは光入出力ポート数として 4×4 に対応し、光路切り替え制御用の高周波入力用端子とスイッチ素子の温度を制御するためのペルチェ素子を備えています。高周波入力端子からの電気信号はマイクロストリップラインを介して素子に供給され、終端抵抗を内蔵しております。素子の光入出力端面と光結合させるファイバアレイ ($250 \mu\text{m}$ 間隔) は、結合損失が極力小さくなるように調芯固定しています。

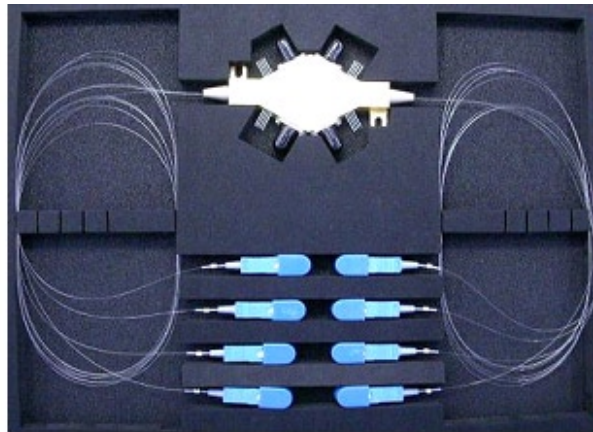


図 6 EA 型マトリクス光スイッチモジュール外観

図 7 は 2×2 マトリクス光スイッチモジュールを 1 Gbit/s の電圧信号により駆動した場合のアイ波形を示しています。入力電気信号は 4 Vp-p 、擬似ランダム信号 2^7-1 段、入射光の波長は 1555 nm 、光ファイバへの入力光パワーは、 12.3 dBm です。このアイ波形から、光路切り替えに要するスイッチング時間は 0.1 ns という結果が得られました。

次いで、経路切り替え動作について説明します。図 8 (a) は一つの光入力ポートに連続光を挿入し、4 つの光出力ポートに順に出力されるように EA アレイを駆動した場合の各光出力ポートの波形を示しています。図 8 (b) にその一部拡大を示します。入力電気信号は 4 Vp-p 、入射光の波長は 1570 nm 、光ファイバへの入力光パワーは 20 dBm 、光路切り替えのための EA 駆動電圧の切り替えは 3 ns 間隔です。 4×4 マトリクス光スイッチモジュールのスイッチング速度は立ち上がり時間 $\sim 0.3 \text{ ns}$ 、立ち下がり時間 $\sim 0.15 \text{ ns}$ であり、前述した他の光スイッチ方式に比べて高速であることが実証できました。光信号をパケットごとに光路の切り替えを行う光パケットルータ用に適用可能な高速応答特性であるといえます。

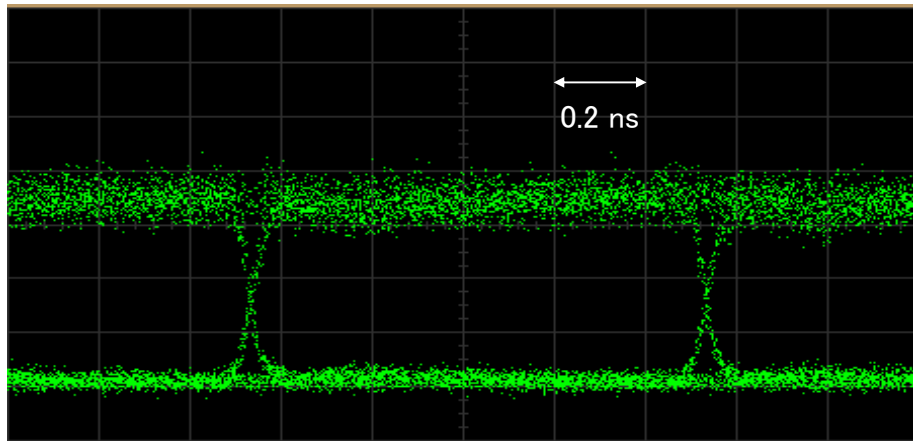


図7 2×2マトリクス光スイッチモジュールの1Gbit/s 駆動時のアイ波形

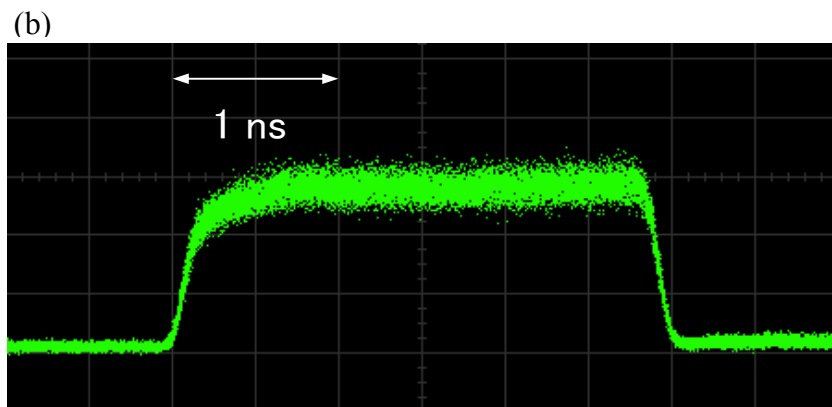
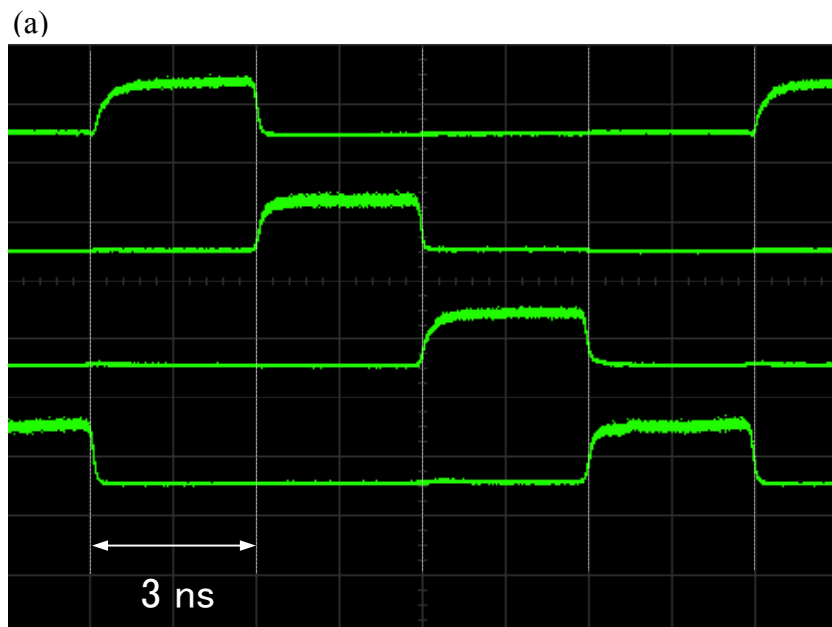


図8 4×4 EA 型マトリクス光スイッチモジュールの各光出力ポートの光波形

6 今後の指針

EA 型マトリクス光スイッチを光パケットルータの構成要素として用いるためには、モジュールとしての損失をほぼ 0 にすることが求められますので、損失補償のために SOA を集積することが必要と考えています。その場合、SOA は光ゲートスイッチ素子として機能しないので、スイッチング速度の劣化は無いと予測されます。

7 むすび

EA 型光変調素子と透明導波路をモノリシック集積した、EA 型 4×4 マトリクス光スイッチを開発し、スイッチングの基本動作を実証しました。スイッチング速度は 0.3 ns 以下の高速応答特性を実現しました。今後は、モジュールとしての損失低減、さらなる多チャンネル化が課題となります。

【参考文献】

- 1) 例えば、U. S. Patent US 5,960,132
- 2) T. Kato *et. al.*, "10Gb/s photonic cell switching with hybrid 4×4 optical matrix switch module on planar waveguide platform," Optical Fiber Communication (OFC), Post Deadline Paper PD3, San Jose (CA), USA (1998).
- 3) M. Gustavsson *et. al.*, "Monolithically integrated 4×4 InGaAsP/InP laser amplifier gate switch arrays," Electron. Lett. 28, 2223 (1992).
- 4) C. Sato *et. al.*, "High-speed Waveguide Switches for Optical Packet-switched Routers and Networks," Optical Fiber Communication (OFC), Paper MF53, Los Angeles (CA), USA (2004).
- 5) 藤井 隆之 ほか; "電気吸収型光変調器モジュール," 航空電子技報 23, 35 (2000).