

# フッ素化ポリイミド熱光学効果光スイッチ

光電子技術研究所 佐久間 健\*1・藤田 大吾\*1・小川 弘晋\*1  
関口 利貞\*2・細谷 英行\*3

## Fluorinated Polyimide Thermo-optic Optical Switch

K. Sakuma, D. Fujita, H. Ogawa, T. Sekiguchi & H. Hosoya

高密度波長多重 (DWDM) 通信システムにおける光アドドロップ装置あるいは小規模光クロスコネクタ装置への適用を目的に、基板導波路型 (PLC) 光スイッチを開発した。材料にフッ素化ポリイミド樹脂を採用し、熱光学効果により光信号の経路選択を行うものであり、制御の容易なデジタル応答特性が特徴である。本報では、試作した1×2型および2×2型光スイッチについて報告する。

PLC optical switches have been developed with the aim of being applied to Optical Add/Drop Multiplexing Equipment (OADM) and Optical Cross-Connect Equipment (OXC) in DWDM networks. These optical switches are composed of fluorinated polyimide on a silicon wafer. Thermo-optic effect is used to select the desired optical paths. The optical switching characteristics show the digital response which makes it easy to control the switch. In this paper, 1×2 type and 2×2 type fluorinated polyimide thermo-optic optical switches are reported with their optical characteristics.

### 1. ま え が き

近年急速に普及した高密度波長多重 (DWDM: Dense Wavelength Division Multiplexing) 通信システムでは、今後、光アドドロップ (OADM: Optical Add/Drop Multiplexing) 装置や光クロスコネクタ (OXC: Optical Cross-connect) 装置など、多くの光スイッチシステムの採用が見込まれている。(図1) これらの装置では、光信号を電気信号に変換することなく、光信号のまま経路切り換えを実施する。例えば図2に示すOADM装置では、DEMUXと呼ばれる波長分波器とMUXと呼ばれる波長合波器との間で波長チャンネル数と同数の2×2型光スイッチが用いられ、波長チャンネル単位での光信号の分岐/挿入を実現している。つまり、40波長多重のシステムでは、OADM装置1台ごとに2×2型光スイッチが40個必要となる。

光スイッチには、光ファイバ可動型、半導体型など、従来からさまざまな原理のものがあるが、それらの中でポリマ熱光学効果型PLC光スイッチが近年注目を集めている<sup>1)2)</sup>。PLCは機械式可動部分が無いので信頼性が高く、また高集積化も可能である。熱光学効果を用いた基板導

波路型 (PLC: Planar Lightwave Circuit) 光スイッチでは石英PLCのものが先行して開発されているが、これは光の干渉を利用したもので制御が難しいため、デジタル挙動を示し制御が容易なポリマPLC光スイッチの製品化が期待されている。素子自体の価格も成膜の容易なポリマPLCの方が廉価である。

### 2. 動作原理

図3および図4に基本となる1×2型光スイッチの模式図を示す。

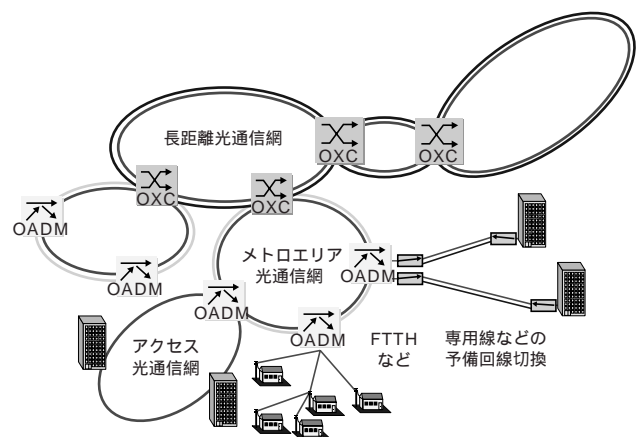


図1 DWDM通信網で使用される光スイッチ  
Optical switch systems in DWDM networks

\*1 光通信研究部  
\*2 光通信研究部主管部員  
\*3 光通信研究部グループ長

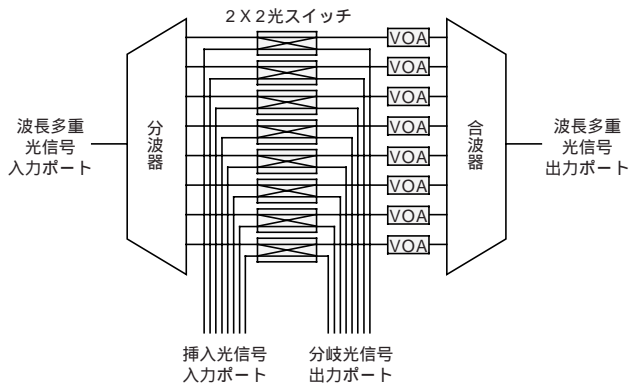


図2 光アドドロップ装置の構成  
Construction of optical add/drop multiplexer

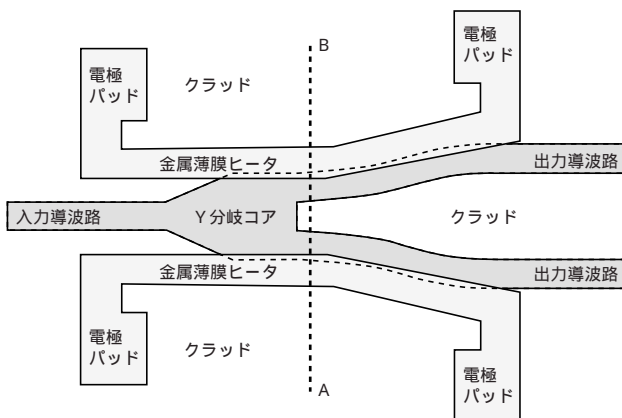


図3 1x2型光スイッチ模式図(平面図)  
Plan view of 1x2 thermo-optic switch

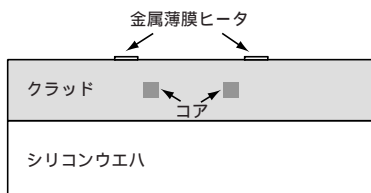


図4 1x2型光スイッチ模式図(断面図)  
Cross section view of 1x2 thermo-optic switch

製作手順であるが、まず光導波路を、Y分岐形状コアの埋め込み型光導波路としてシリコンウエハ上に形成する。下クラッド、コア各層の成膜では、水飴状のポリアミド酸溶液をスピコートし、オープンで高温にしてイミド化する。コアのパターン形成は、フォトリソ工程を用いし、フォトリソ工程とRIE (Reactive Ion Etching) 工程にて行う。上クラッドもスピコート後オープンでイミド化して形成し、最後にその表面にヒータや電極パッド、その間の配線を形成する。金属薄膜をスパッタ装置で成膜し、コアと同様にフォトリソ工程・RIE工程によってパターン形成する。

こうしてできた光スイッチは、ヒータに通電しない状態では光が半分ずつに分岐する3dBスプリッタである。ここで、ヒータの一方に通電し加熱すると、その周囲のポリイミドは温度上昇に応じて屈折率が低下して光を導波しなくなり、光はもう一方の出力導波路に集中する。コンピュータシミュレーションにより求めた、この時の屈折率分布の変化と、分岐した導波路コアの一方のみに光が集中している様子を図5に示す<sup>3)</sup>。

光の干渉を利用した光スイッチでは、供給電力を精密に制御しないと消光比が劣化するが、このY分岐型光スイッチでは、十分な電力を供給してやれば精密な制御無しにこのような安定した特性が得られる。これは、一般にポリマ材料の屈折率の温度依存性が石英ガラスよりも一桁大きいことに由来するものであり、フッ素化ポリイミドでは  $-1.3 \times 10^{-4}/K$  程度である。このことから、Y分岐型のポリマ熱光学効果型PLC光スイッチは、別名をデジタル光スイッチ (DOS : Digital Optical Switch) ともいう。

### 3. 1x2型光スイッチ

試作した光スイッチの外観を図6に、内部構造を図7に示す。長さ52mm、幅14mm、高さ6.5mmのDIP (Dual Inline Package) 型パッケージにコンパクトに収まってお

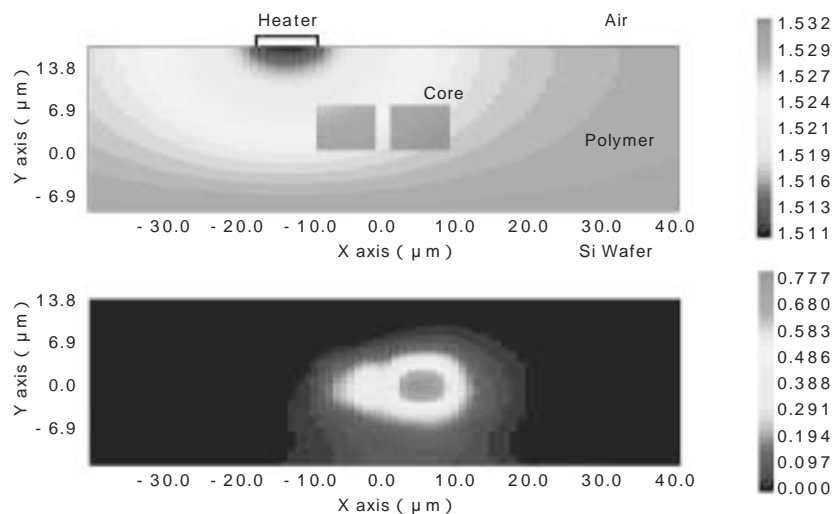


図5 切り換え時のA-B断面における屈折率分布と光強度  
Refractive index distribution and optical power distribution of cross section view at line A-B in switching state

り、端子間隔2.54mmの電気基板にはんだ付けでそのまま搭載可能である。光スイッチ素子は長さ12mm、幅3mmで、両側に石英V溝基板をもちいて光ファイバを接着固定している。

測定光波長1,550nmで評価した光学特性を表1に示す。挿入損失は1.5~1.8dBであった。内訳としては、材料に由来する伝搬損失が0.6dB/cm、光ファイバとの接続損失が0.05~0.2dB程度で2点、Y分岐部周辺での光の漏洩が0.8dB程度であると考えられる。消光比はこの基本型では23dB程度である。次章で詳述する。反射減衰量は50dB以上と良好な値であり、接続部、コアの分岐部ともに反射がほとんど無いことがわかる。偏波依存損失（PDL：Polarization Dependent Loss）は若干大きめの0.4dBであり、これは材料の有する複屈折性に由来するものと推測される。これらの特性を得るのに必要な電力は150mWと少なく、またスイッチング時間は10ms以下と十分高速であった。

図8に、光スイッチに供給した電力と、ONポート・OFFポートそれぞれの光透過率との関係を示す。光路選択自体ではあまり電力を必要とせず、わずか数十mWでONポートの挿入損失を2dB程度にできる。OFFポートの損失は供給電力に応じて増大し、十分な消光比を得るには100mW以上必要となる。

#### 4. 1×2高消光比型光スイッチ

20dB以上の消光比はY分岐型光スイッチの特性としては良好なものといえるが、適用用途によっては30dBあるいは40dB以上の消光比が必要である。一般にこの種のデジタル光スイッチでは、供給電力を増加させることで消



図6 外観  
External view



図7 内部構造  
Internal structure

表1 1×2型の光学特性  
Optical characteristics of 1×2 switch

項目	挿入損失	消光比	反射減衰量	PDL	供給電力	応答速度
典型値	1.8dB	23dB	51dB	0.4dB	150mW	< 10ms
最良値	1.5dB	> 25dB	> 55dB	0.3dB		

光比を大きくすることができる。しかしながら、実際に供給電力の増加をこころみたところ、ONポートの挿入損失の増大という問題が発生した。図8では、供給電力が200mW程度になると、挿入損失が急激に増加している。

そこで、ヒータの構造を工夫することによりこの問題の解決をはかった<sup>4)</sup>。図9に、対策を施した1×2高消光比型光スイッチの模式図を示す。中間電極Bをそれぞれのヒータに配置することにより、ヒータを二つの領域に分割した。前半の光路切換用ヒータ領域は、導波路コアが分割したところまでであり、この領域には挿入損失が最小となる電力を供給する。後半の減衰用ヒータ領域は、OFFポート側導波路に漏れた信号光を減衰させるための

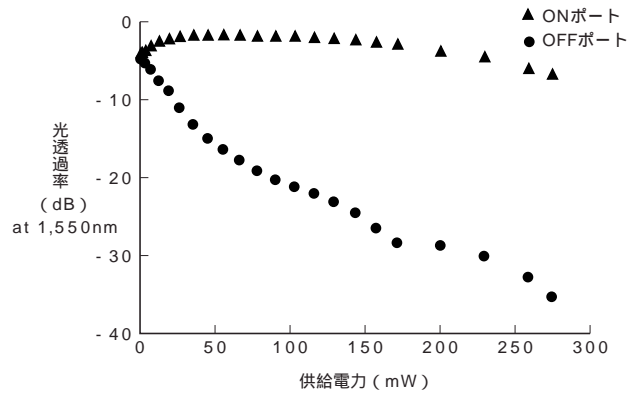


図8 1×2型のスイッチング特性  
Switching characteristics of 1×2 switch

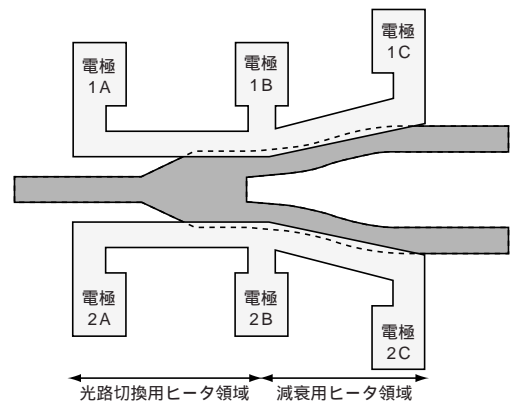


図9 1×2高消光比型模式図  
Isolation improvement type 1×2 switch

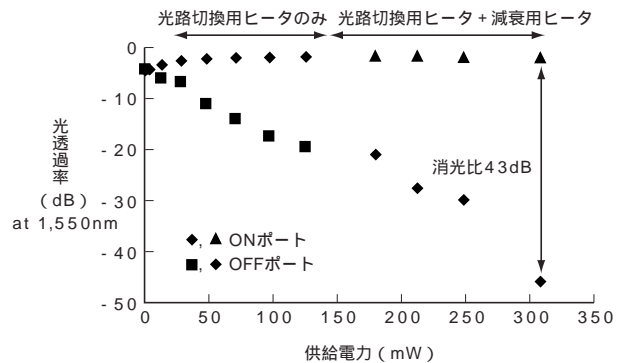


図10 1×2高消光比型スイッチング特性  
Switching characteristics of isolation improvement type 1×2 switch

アッテネータであり，必要な消光比を得るのに十分なだけの電力を供給する．

図10に，1×2高消光比型光スイッチのスイッチング特性を示す．分岐用ヒータへの供給電力を120mWまでで固定し，追加の電力供給を減衰用ヒータに限定してやることで，低挿入損失なままで高消光比を得ることに成功した．この例では，合計電力310mWで，1.8dBの低挿入損失と43dBの高消光比が得られた．

### 5. 2×2型光スイッチ

1×2型光スイッチを多段に構成することで，より複雑な動作をする光スイッチが簡単に実現可能である．ここでは，手始めにOADM装置で多用される2×2型光スイッチを試作した<sup>5)</sup>．図11にその模式図を示す．4個の1×2型光スイッチからなり，8個のヒータがある．このスイッチは，クロス状態とバー状態の二つの切換状態をもつ．外側の4個のヒータを同時に加熱すると，図12に示すようにクロス状態となり，入力1から入ってきた信号光は出力2に導波され，入力2からの信号光は出力1に導波される．一方，内側の4個のヒータを加熱すると図13に示すようにバー状態となり，入力1に入ってきた信号光は出力1へ，入力2に入ってきた信号は出力2に出力される．図14に2×2型光スイッチのスイッチング特性を，表2に各種光学特

性を示す．挿入損失2.7~2.8dB，消光比40dB以上の良好な特性が得られた．消費電力は1×2型のほぼ4倍である．

### 6. VOA集積化2×2型光スイッチ

図2のOADM装置では，2×2型光スイッチのほかに光減衰器（VOA：Variable Optical Attenuator）が各チャンネルに使用されている．これは，各チャンネルで光強度を一定にするためのものである．このVOAもまた，熱光学効果を利用しポリマPLCで実現可能である．図15に，2×2型光スイッチにVOA機能を集積化した場合の模式図を示す．VOA機能用に追加されたヒータに通電することで，出力1から合波器へと出力される信号光を任意に減衰させることが可能である．

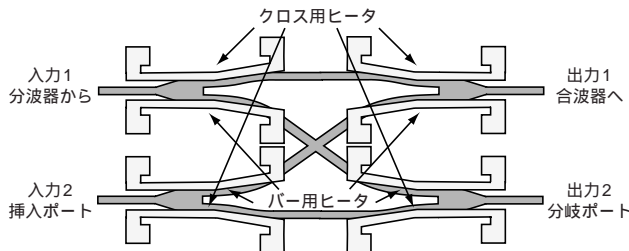


図11 2×2型模式図  
Illustration of 2×2 thermo-optic switch

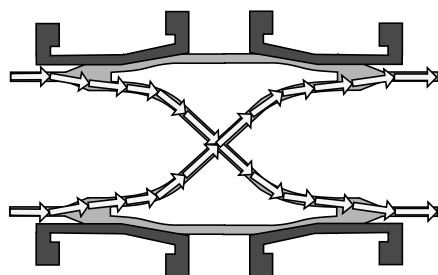


図12 クロス状態での使用ヒータと信号光伝搬  
Used heaters and signal light propagation in cross switching state

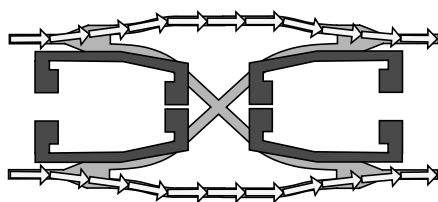


図13 バー状態での使用ヒータと信号光伝搬  
Used heaters and signal light propagation in bar switching state

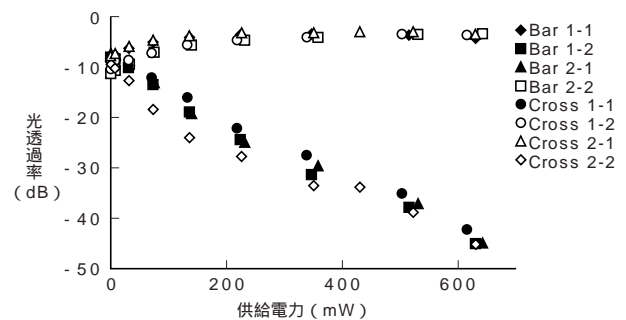


図14 2×2型のスイッチング特性  
Switching characteristics of 2×2 switch

表2 2×2型の光学特性  
Optical characteristics of 2×2 switch

項目	挿入損失	消光比	反射減衰量	PDL	供給電力	応答速度
2×2型	< 3dB	> 40dB	> 50dB	0.4dB	650mW	< 10ms

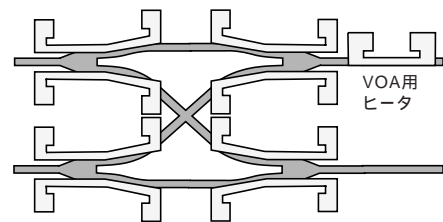


図15 2×2型へのVOA機能の集積化  
VOA function integration with 2×2 switch

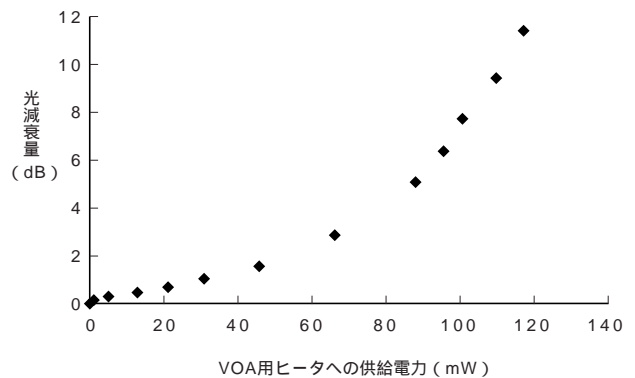


図16 VOA用ヒータによる減衰特性  
Attenuation characteristics of VOA heater

図16に試作したVOA集積化2×2型光スイッチのVOA用ヒータによる減衰特性を示す．10dB以上の十分な減衰が得られている．

## 7. む す び

光アドドロップ装置などへの適用を目標に，フッ素化ポリイミド熱光学効果光スイッチを開発した．1×2型と2×2型の光スイッチを試作し，低挿入損失・高消光比である良好な光学特性を得た．また，OADM装置への適用を考慮しVOA機能の集積化をはかり，十分な減衰特性を得た．

## 参 考 文 献

1) J.Kobayashi, T.Matsuura, Y.Hida, S.Sasaki and T.Maruno : Fluorinated Polyimide Waveguides with Low Polarization-Dependent Loss and Their Applications to Thermo-optic Switches, J. Lightwave Technol., Vol.16, No.6, pp.1024-1029,

1998

2) 佐々木重邦, 松浦徹, 沢田孝 : 光通信用ポリイミド, NTT R&D, Vol.47, No.9, pp.937-942, 1998

3) K.Sakuma, D.Fujita, T.Sekiguchi and H.Hosoya : Numerical Analysis of Polymeric Thermo-optic Switch, Fifth Optoelectronics and Communications Conference ( OECC2000 ) Technical Digest, Makuhari Japan, pp.264-265, 2000

4) K.Sakuma, D.Fujita, S.Ishikawa, T.Sekiguchi and H.Hosoya : Low Insertion-loss and High Isolation Polymeric Y-branching Thermo-optic Switch with Partitioned Heater, OFC 2001 Technical Digest, Anaheim, WR3, 2001

5) K.Sakuma, H.Ogawa, D.Fujita and H.Hosoya : Polymer Y-branching Thermo-optic Switch for Optical Fiber Communication Systems, The Eighth Microoptics Conference ( MOC'01 ) Technical Digest, Osaka Japan, L3, pp.360-363, 2001