

含フッ素ポリイミドの光学特性と導波路型光デバイスへの応用

NTTフォトニクス研究所

松浦 徹

要旨 含フッ素ポリイミドの光学特性と導波路型光デバイスへの応用について、フッ素化ポリイミド共重合体 (FLUPI) を中心に述べた。含フッ素ポリイミドを用いた光導波路の作製と特性、及び含フッ素ポリイミドの特徴を活かした光導波路の作製方法を紹介した。さらにその導波路型光デバイスとして、光通信の幹線系では光インターコネクションへの応用について、またアクセス系及び LAN 系では個別光部品への応用について紹介した。

1. 緒言

大容量の情報を高速で伝送する光通信技術の開発がめざましい。光ファイバ網は大都市間だけでなく、オフィスや家庭まで張り巡らされようとしている。通信の幹線系ではより高機能な部品が求められ、また今後近い将来実現するであろう LAN 系を含むアクセス系の光通信システムにおいては配線の容易な通信網の確立と低コストの各種光部品が必要となる。近年、高分子材料は、その低コスト性、加工容易性、柔軟性、耐衝撃安定性といった種々の特徴を活かして光通信用部品への応用が盛んに検討され始めた。そこで本発表では高分子材料の中でも耐熱性と優れた光透過性を兼ね備えた含フッ素ポリイミド材料の光学特性とその導波路型光デバイスへの応用について述べる。

2. 含フッ素ポリイミドの開発とその光学特光部品への適用性

初期の含フッ素ポリイミドは透明性を要求される航空宇宙用材料として検討された⁽¹⁾。ポリイミドの分子構造にフッ素を導入すると、分子内及び分子間相互作用が低減し、紫外から可視波長での光透過性が向上する。

その後、フッ素の効果により誘電率が低減できるため、半導体デバイスの普及とともに絶縁保護材料として、種々の含フッ素ポリイミドが開発された。また、デバイス化を図るために、熱膨張率等物性の制御技術、成形加工技術、微細加工技術等が進展した。一方、通信分野においては光ファイバ、レーザ、各種光学部品が開発され、現在もこれら要素技術の進展とそれらを統合した幹線から末端までの光通信システムの構築が盛んに行われている。上記含フッ素

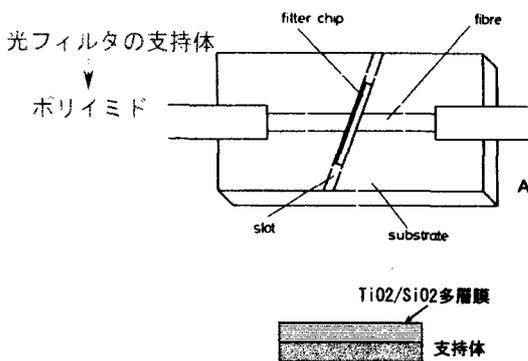


図1 薄膜光フィルタ

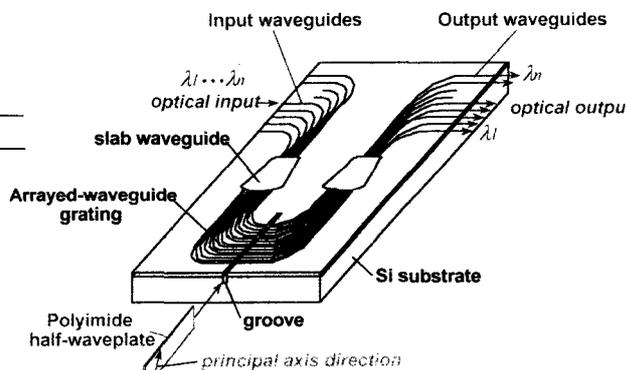


図2 光波長板の AWG への適用

ポライミドの特性は光通信分野へも応用されることとなった。

含フッ素ポライミドを用いた薄膜光フィルタ⁽²⁾(図1)や光波長板⁽³⁾(図2)は既に実用化されている薄膜部品の応用例である。光フィルタは耐熱性と光透過性を有する含フッ素ポライミドフィルムに誘電体多層膜を蒸着したもので、選択的な波長だけが透過するバンドパスフィルタや一定の波長を境に透過/反射が切り替わるエッジフィルタがある。光波長板はポライミドの複屈折性を利用した位相制御部品で、主に図2のようにアレイ導波路格子型波長合分波器の偏波依存性の解消に用いられている。

長距離の光通信に用いられる波長は可視波長より波長の長い近赤外領域の $1.3 \mu\text{m}$ や $1.55 \mu\text{m}$ である。一般に有機材料は分子内に多くの C-H 結合を有し、この結合の振動吸収の高調波が近赤外波長に位置するため、この波長領域での光透過性は低い。しかし芳香族ポライミドは脂肪族化合物と比較して C-H 結合の種類(メチル基、メチレン基、メチン基等)や数が少ないため、近赤外波長での光透過性に有利であるが、含フッ素ポライミドはこの数少ない C-H 結合の H がさらに部分的に F に置き換わるために、近赤外波長での光透過性がさらに向上する。光フィルタ、波長板、いずれの部品も通信光の通り道である光ファイバや光導波路の一部を切断して挿入されるため薄膜であること、細い溝への挿入が容易可能であるために柔軟で強靱であることが要求されるが、ポライミドはスピコート法により柔軟な薄膜フィルムを簡単に作製できる。

3. 光導波路用含フッ素ポライミド材料

光導波路の場合、上記薄膜部品と比較して導波距離が数mmから数cmと長いため、特に

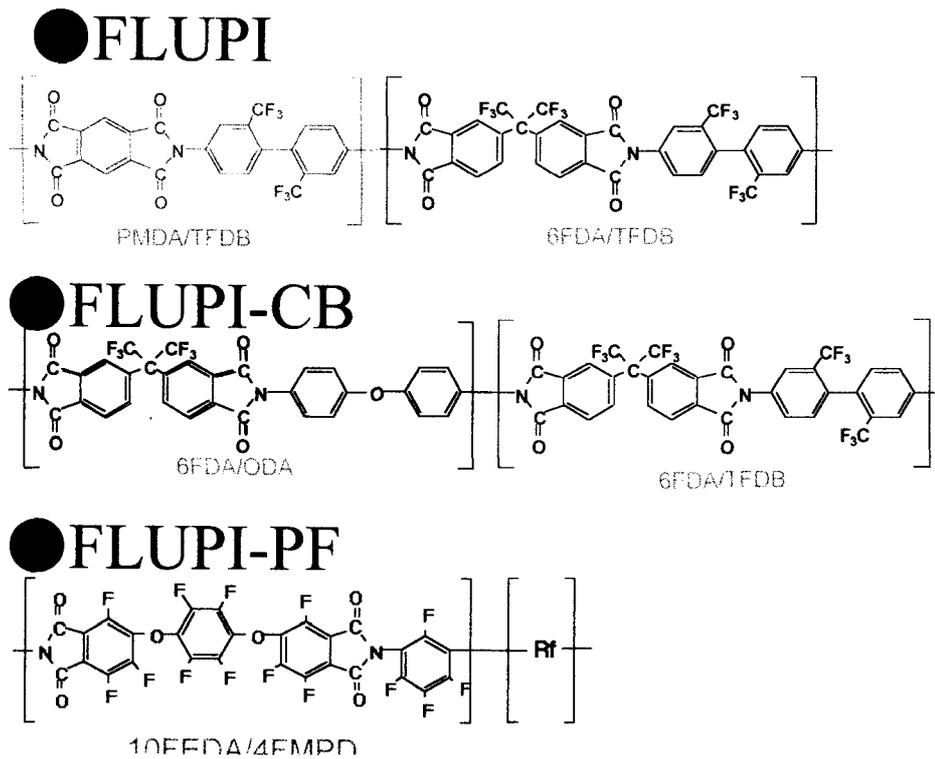


図3 含フッ素ポライミド共重合体(FLUPI)の構造式

使用波長での極めて優れた光透過性(低光損失)が要求される。また、コア/クラッドの屈折率差を調節するための精密な屈折率制御性、コアのパターン加工や埋め込み構造を実現するための精密加工性も要求される。

図3に光通信用ポリイミドとして開発された含フッ素ポリイミド共重合体⁽⁴⁾(FLUPI)の分子構造を示す。FLUPIは、半導体デバイスへの適用技術をベースに開発した、光通信用の光学材料であり、光通信波長(1.3、1.55 μm)での優れた光透過性と精密な屈折率制御性を有している。現在この材料は前記光フィルタや波長板の材料として用いられ実用化されている。また、各種光部品の要素技術となる光導波路用材料としては、導波路の偏波依存損失が少ない、一定複屈折ポリイミド共重合体⁽⁵⁾(FLUPI-CB)へと改良された。さらに大容量の光通信技術として複数の波長の光を多重化して伝送する光多重化技術(WDM)等ではより広い波長範囲での光透過性が必要となるため、近赤外の光通信波長で光吸収の少ない全フッ素化ポリイミド⁽⁶⁾(FLUPI-PF)が開発された。

図4に各材料の屈折率制御性を示す。FLUPI-CBはFLUPIと比較して組成に対する複屈折($n_{TE} - n_{TM}$)が一定であるため、光導波路のコアとクラッド材料に用いた時に光導波路の偏波依存損失を低減できる。また、FLUPI-PFは後述する近赤外の光通信波長の広い波長範囲で低損失な光導波路材料であり、屈折率制御基(-Rf)の導入により屈折率制御性を付与している⁽⁷⁾。

4. 含フッ素ポリイミド光導波路

4.1 ドライエッチング法を用いた光導波路の作製

ドライエッチング法は石英導波路の作製にも使われており、加工精度が高く、シングルモード光導波路の作製に適している。図5に作製工程の概要を示す。クラッド用及びコア用のポリイミド材料(ポリアミド酸溶液)を準備し、基板上に下部クラッド層、コア層をそれぞれ順にスピコートと熱処理行って多層化後コアパターンをフォトリソグラフィと反応性イオンエッチングにより形成し、最後に上部クラッドを形成する⁽⁸⁾。

4.2 FLUPI-CBを用いた光導波路の特性

図6は材料としてFLUPI-CBを用い、ドライエッチング法で作製した埋込型シングルモード光導波路の断面の顕微鏡写真である。Si基板上にコアとクラッドからなるポリイミド光導波路が形

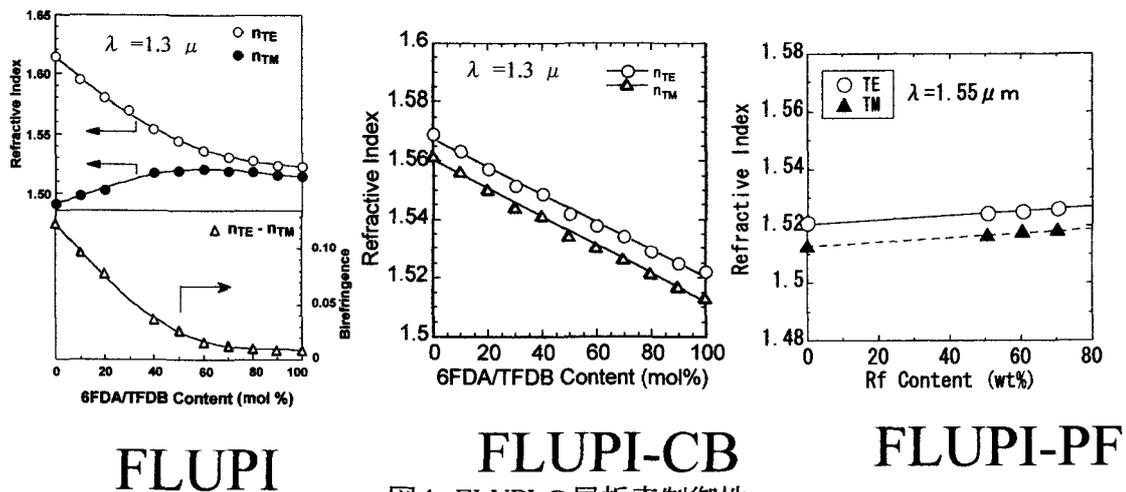


図4 FLUPIの屈折率制御性

成され、コア径約 $8\mu\text{m}$ のコアがクラッドに完全に埋め込まれていることがわかる。この光導波路は波長 $1.3\mu\text{m}$ 以上の波長でシングルモードである。また、図7(a)は作製した光導波路の損失の波長依存性を示したものである。各波長の損失は主に材料の光吸収に依存しており、波長 1.1 、 1.4 、 $1.65\mu\text{m}$ 付近は材料のC-H振動の高調波吸収のために損失ピークがあるが、通信波長の 1.3 及び $1.55\mu\text{m}$ では低損失となる。またこの光導波路は耐熱性、耐湿性に優れた含フッ素ポリイミドを用いているために、 380°C 迄の耐熱性と $85^\circ\text{C}85\%$ で200時間以上の耐熱耐湿性を有している⁽⁹⁾。

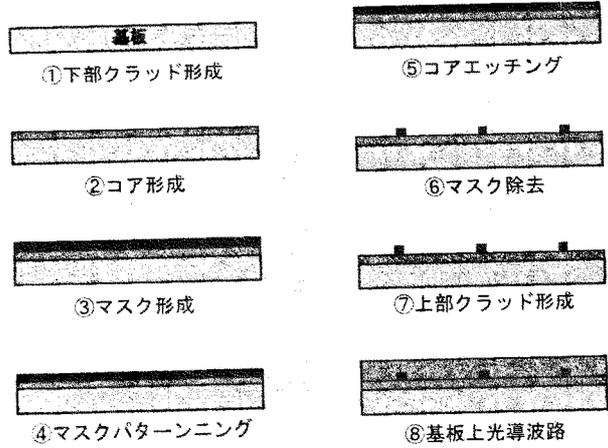


図5 ドライエッチング法による光導波路の作製行程

4.3 FLUPI-PFを用いた光導波路の特性

FLUPI-CBは波長 1.3 及び $1.55\mu\text{m}$ で低損失な光導波路材料であるが、WDMの進展等により使用波長の範囲が広がるに伴い近赤外の幅広い波長範囲で低損失な光導波路材料要求されつつある。そこで、FLUPIやFLUPI-CBの近赤外波長の吸収原因となるC-H結合を全てC-F結合に置き変えた全フッ素化ポリイミド(FLUPI-PF)が開発された。これを用いて作製した埋込型光導波路の損失の波長依存性を図7(b)に示す。

表1に単色のLD光源を用いて測定したFLUPI-CB及びFLUPI-PF光導波路の 1.3 及び $1.55\mu\text{m}$ の損失を示す。

FLUPI-PF光導波路では波長 1.3 及び $1.55\mu\text{m}$ でいずれも 0.1dB/cm 台の極めて低損失な導波特性が得られている⁽⁷⁾。

4.4 種々の方法を用いた光導波路の作製

含フッ素ポリイミドを用いた光導波路の作製はその材料特性を活かして種々の方法が検討されている。以下にドライエッチング法以外の作製方法を紹介する。

(1)転写型を用いる方法

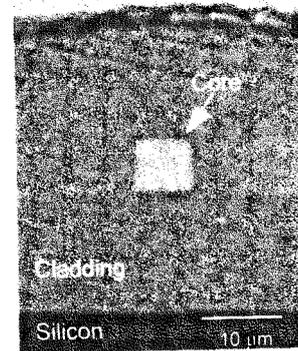


図6 埋込型ポリイミド光導波路の断面顕微鏡写真(ドライエッチング法)

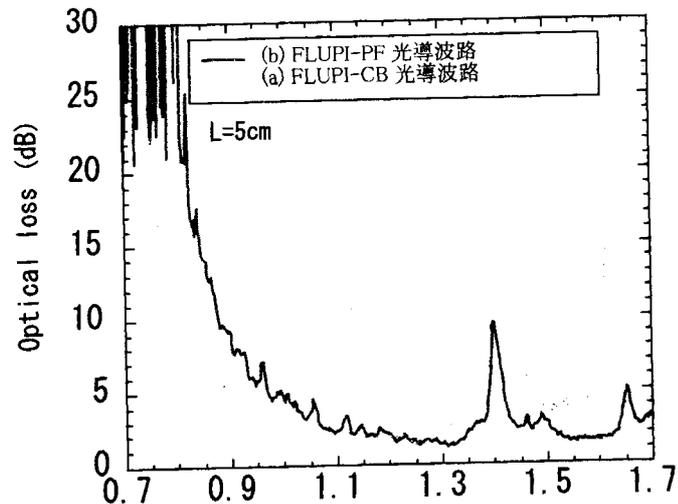


図7 ポリイミド光導波路の損失の波長依存性

表1 ポリイミド光導波路の光損失

波長	FLUPI-PF 光導波路		FLUPI-CB 光導波路	
	伝搬損失 (dB/cm)		伝搬損失 (dB/cm)	
	TE	TM	TE	TM
1.55 μ m	0.10	0.18	0.5	0.6
1.3 μ m	0.11	0.15	0.3	0.4

コアパターンを転写型を用いて行う方法であり、高分子の加工容易性を利用した低コストの光導波路形成方法である。図8、図9に具体例を示す。予めドライエッチング法により作成した転写型にクラッド用ポリイミドをコートした後、型から剥離し、溝付きクラッドを得る。これにコア用ポリイミドを流し込み、最後に上部クラッドを形成する⁽¹⁰⁾。

(2) 直接露光法

感光機能を有するポリイミド材料を用いることで、前項のドライエッチング法(図5)と比較してフォトリソグラフィにおけるマスクやレジストが不要であり、またコアのエッチングを露光と現像により行うため、作成行程が簡便である⁽¹¹⁾。

(3) 電子線描画法

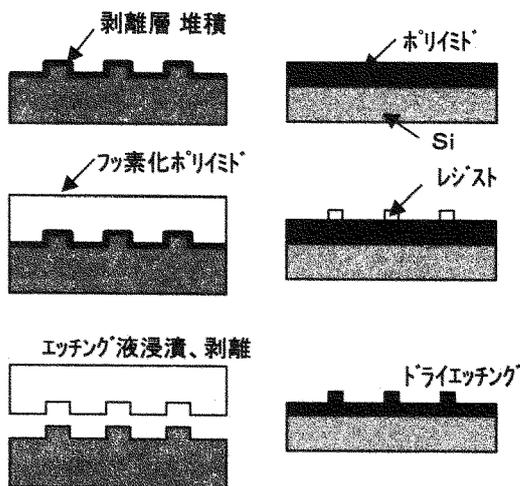
含フッ素ポリイミドは電子線を照射すると、Fが脱離し、屈折率が増加する。この性質を利用してコアパターンを細い電子線で描画し、上部クラッドを形成する。特殊な電子線照射装置が必要であるが、材料がクラッド材だけでよいことと、描画による任意のコアパターンを形成できることが特徴である⁽¹²⁾。

5. 導波路型光デバイスへの応用

高分子光導波路の光通信への適用先として、幹線系では交換機等でのアレイ光導波路を用いた高密度光配線やフィルム光導波路を用いた簡易配線による光インターコネクションへの適用が検討されている。また、アクセス系、LAN系では低コストの導波路型個別光部品への適用が検討されている。

5.1 光インターコネクションへの適用

幹線系の適用先の一例としては電気-光混載マルチチップモジュールでのポリイミド光導波路を用いた光配線が挙げられる。これはLSI等の信号処理チップ、電気配線、レーザダイオード、フォトディテクタ、電気/光変換器、光導波路、電源配線などが同一モジュール内に混載されたモジュールである(図10)⁽¹³⁾。



(a) 溝成形 (b) ポリイミド転写型作成
図8 転写型を用いたポリイミド光導波路の作製方法

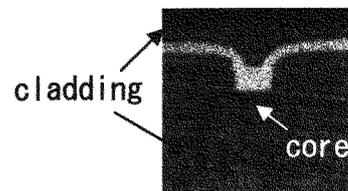


図9 転写型を用いたポリイミド光導波路の断面写真

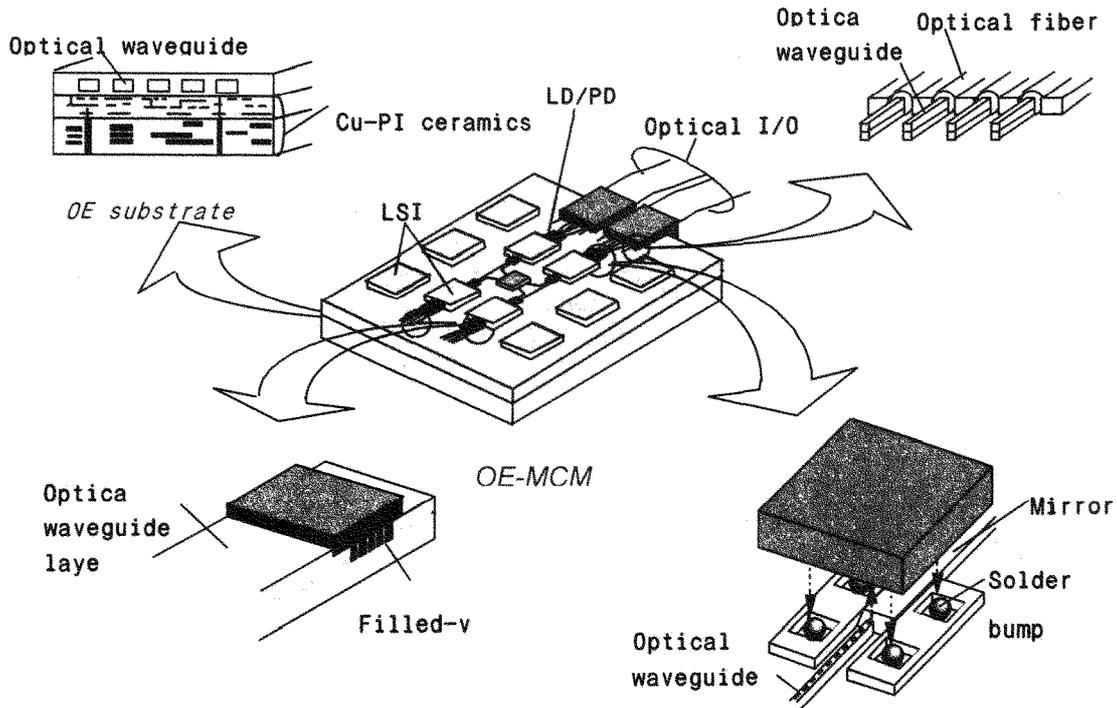


図10 電気—光混載マルチチップモジュールの概要

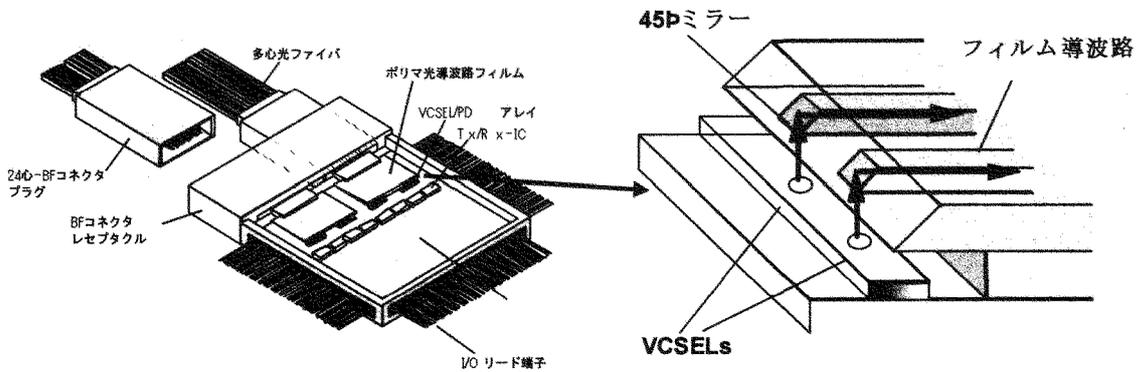


図11 45° ミラー付きフィルム光導波路の適用例

また光部品の集積化に伴い、高密度の光配線や微細なアレイ素子への簡易な光配線が必要となる。フィルム光導波路はフォトマスクの設計により高密度の光配線、ピッチ変換、ミラー形成による方向変換を簡易に行うことが可能である。図11は含フッ素ポリイミドではないが、光配線ボード上の面発光レーザアレイからの垂直光をミラー加工を施した高分子フィルム光導波路で受け、多芯光ファイバコネクタまで配線する45° ミラー付き高分子光導波路の例である⁽¹⁴⁾。またボード間光配線用コネクタ付きフィルム導波路等も報告されており、これらは含フッ素ポリイミド光導波路の今後の用途として期待できる。

5.2 個別光部品への適用

一方、アクセス系やLAN系では高分子の特徴を活かした、低コスト、柔軟性、耐衝撃性を有する光導波路部品への適用が検討されている。図12はポリイミド光導波路と薄膜光フィルタを

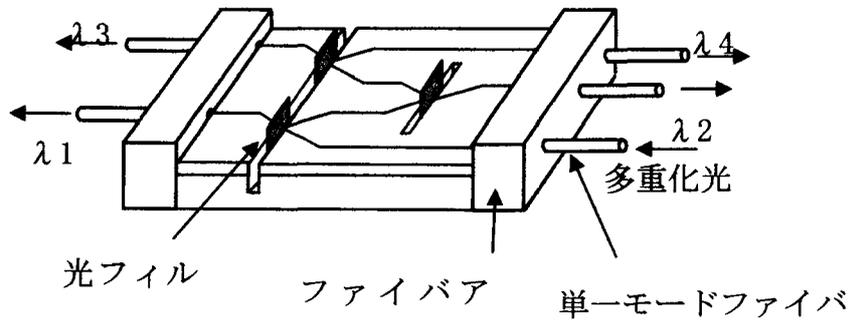


図12 ポリイミド光導波路とポリイミド光フィルタを用いた4波長の波長合成分波器

(a) N x N マトリクススイッチ

(b) 1 x N マトリクススイッチ

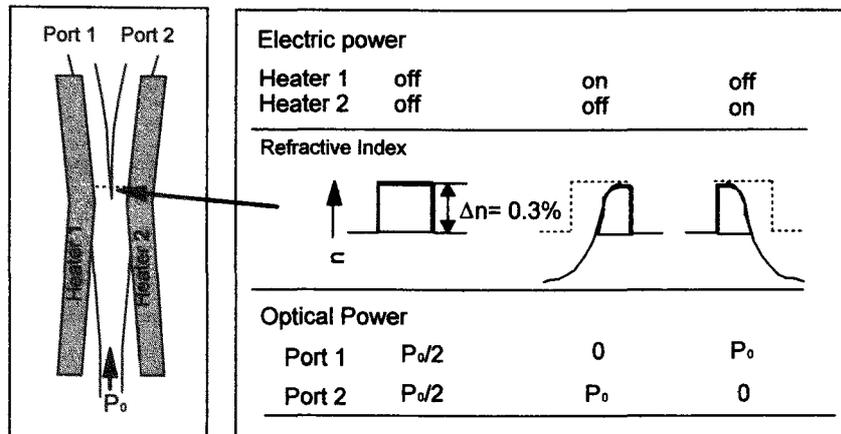
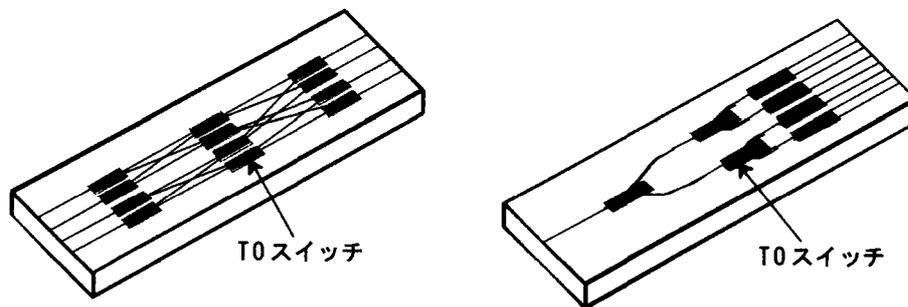


図13 Y分岐ポリイミド光導波路を用いたデジタル TO スイッチ

組み合わせた4波の波長合成分波器である。分岐光導波路を用いることで小型化が図れ、またフィルタの選択により多様仕様への適用が可能である⁽¹⁵⁾。

ポリイミド光導波路の別の特徴として、ポリマ材料に特有な大きな屈折率の温度依存性の利用が挙げられる。一般にポリマー材料の屈折率の温度依存性は無機材料の石英等と比較して1桁大きい。この性質を利用して、熱光学(TO)スイッチを作製できる。図13はY分岐ポリイミド光導波路にヒータを取り付けたデジタル TO スイッチである。

光導波路分岐部に配置されたヒータの片側が加熱されると加熱された光導波路は屈折率が低下して光が導波しなくなり、光は非加熱側の導波路へ導波する⁽¹⁶⁾。

その他、TO 効果を用いた光導波路部品としては波長可変フィルタや可変光減衰器等への適用が考えられる。

6. おわりに

Bフレッツを初め、光による大容量高速通信は今まさに家庭や職場内に迄、行き届きつつあり、低コストで簡易なシステムの実現が明日にも望まれている。期待される要素技術は既存の石英ファイバや石英光導波路、プラスチック光ファイバ、さらに無線システム等、数多く提案されている。含フッ素ポリイミドを用いた導波路デバイスはその性能が実証され、具体的な適用方法が確立されて実用化されることを強く望むところである。

7. 参考文献

1. A. K. St.Clair and T. L. St.Clair: *ACS Polym. Mater. Sci. Eng.*, **51**, 62-66 (1984).
2. T. Oguchi, J. Noda, H. Hanafusa and S. Nishi: *Electron. Lett.*, **27**, 706-707 (1991).
3. Y. Inoue, H. Takahashi, S. Ando, T. Sawada, A. Himeno, and M. Kawachi: *J. Lightwave Technol.*, **15**, 1947-1957 (1997).
4. T. Matsuura, S. Ando, S. Sasaki, and F. Yamamoto: *Macromolecules*, **27**, 6665-6670 (1994).
5. 松浦徹, 小勝負信建, 丸野透, 佐々木重邦: *高分子学会予稿集*, **46**(4), 662 (1997).
6. S. Ando, T. Matsuura, and S. Sasaki: in 'Polymers for Microelectronics, Resists and Dielectrics', L. F. Thompson, C. G. Willson, and S. Tagawa, eds., *ACS Symp. Ser.*, **537**, American Chemical Society, pp.304-322 (1994).
7. 景井絵美子, 山田典義, 川上直美, 小林潤也, 松浦徹, 山本二三男, 増田豪, 田尻浩三, 桑原正芳, 奥村康則, 浅子佳延, 八谷秀孝: *2002年電子情報通信学会総合大会*, C-3-152. (2002)
8. T. Matsuura, S. Ando, S. Matsui, S. Sasaki and F. Yamamoto: *Electron. Lett.*, **29**, 2107-2108 (1993).
9. 小林潤也, 松浦徹, 丸野透, 佐々木重邦: *信学技報*, OME95-52, OPE95-93, 37-42 (1995).
10. 塩田剛史, 高松信博: *第15回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集*, 23C-13, 337-338 (2000).
11. A. J. Beuhler, D. A. Wargowski, K. D. Singer, and T. Kowalczyk: *IEEE Transactions on Components Packaging & Manufacturing Technology Part B-Advanced Packaging.*, **18**, 232-234 (1995).
12. Y. Y. Maruo, S. Sasaki, and T. Tamamura: *J. Lightwave Technol.*, **13**, 1718-1723 (1995).
13. S. Koike, F. Shimokawa, T. Matsuura, and H. Takahara: *IEEE*, **19**, 124-130 (1996).
14. M. Usui, N. Matsuura, N. Sato, M. Nakamura, N. Tanaka, A. Ohki, M. Hikita, R. Yoshimura, K. Takeno, K. Katsura and Y. Ando: *10th LEOS'97*, 51 (1997).
15. 景井絵美子, 小林潤也, 川上直美, 工藤あや子, 疋田真, 都丸暁, 栗原健二, 松浦徹, 山本二三男: *第15回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集*, 23C-12, 335-336(2000).
16. J. Kobayashi, T. Matsuura, Y. Hida, S. Sasaki, and T. Maruno: *J. Lightwave Technol.*, **16**, 1024-1029 (1998).