

# 全フッ素化ポリイミド光学材料とその光導波路への適用

(NTT) ○松浦 徹、栗原 隆、丸野 透、小林 潤也  
 (NTT-AT) 川田 久美子、川上 直美、工藤あや子、山本 二三男  
 ((株)日本触媒) 後藤 伸一、田尻 浩三、浅子 佳延

## 1. はじめに

光通信の普及に伴い、低コストで高性能な光部品のための高分子材料が求められている。NTTではポリイミドの分子内のC-H結合を全てC-F結合に置き換えた全フッ素化ポリイミド(10FEDA/4FMPD)を開発してきた[1]。これは近赤外の光通信波長で光吸収の要因となるC-H結合をなくし、同波長で優れた光透過性を有する耐熱性高分子材料である。本研究では上記材料に屈折率制御性を付与した全フッ素化ポリイミド光学材料 (FLUPI-PF) を用いて埋め込み型光導波路を作製し、その導波路材料としての特性を評価するとともに光導波路への適用性を検討した。

## 2. 全フッ素化ポリイミド材料

本研究に用いたFLUPI-PFの分子構造を図1に示す。図中左側の10FEDA/4FMPDを基本骨格とし、これに屈折率制御性を付与するために、屈折率の高い屈折率制御基Rfを添加した。

表1にRfを含まない最も屈折率の低いクラッド用全フッ素化ポリイミド (FLUPI-PF-

01)、Rfを50モル%添加した高屈折率ポリイミド(FLUPI-PF-55)、及び比較材料として、6FDAとTFDB(2,2'-bistrifluoromethyl-4,4'-diaminobiphenyl)から合成した既存の部分フッ素化ポリイミド (FLUPI-CB-01)の基本的特性を示す。全フッ素化ポリイミドは耐熱性(熱分解温度Td、ガラス転移温度Tg)が既存のFLUPI-CBと比べて若干低いもののポリイミド特有の300℃以上の優れた耐熱性を示している。また、熱膨張係数(CTE)、屈折率( $n_{TE}$ 、 $n_{TM}$ )、複屈折( $n_{TE} - n_{TM}$ )は既に光導波路材料として適用中のFLUPI-CBとほぼ同様の特性値を有する。図2にRfの添加量を変えたときのFLUPI-PFの屈折率と複屈折を示す。Rfの添加量を調節することで屈折率を精密に制御できることがわかる。また、FLUPI-PFの複屈折( $n_{TE} - n_{TM}$ )はRfの添加に寄らずほぼ一定であり、かつその値はポリイミド材料としては0.008と比較的小さく、光導波路用材料として適用し易い。

## 3. 光導波路の作製と特性

前記屈折率の異なる2種類の材料をコアとク

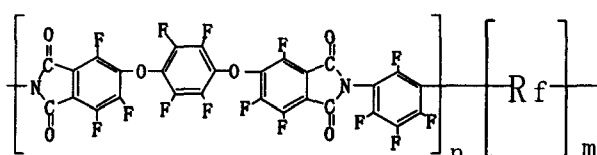


Fig. 1 Structure of perfluorinated polyimides (FLUPI-PF)

Table I Fundamental properties of FLUPI-PF

Polyimides	Rf content (mol%)	Td (°C)	Tg (°C)	CTE (ppm)	$n_{TE}$	$n_{TM}$	$n_{TE} - n_{TM}$
FLUPI-PF-01	0	501	301	56	1.521	1.513	0.008
FLUPI-PF-55	50	479	317	59	1.525	1.517	0.008
FLUPI-CB-01 (Partially fluorinated)		569	335	63	1.517	1.509	0.008

Td: Decomposition Temperature, 10% weight Loss in N<sub>2</sub> Atmosphere  
 Tg: Glass transition Temperature  
 CTE: Coefficient of thermal expansion, temperature range: 50 - 200°C  
 $n_{TE}$ : In-plane refractive index  $n_{TM}$ : Out-of-plane refractive index at 1550 nm  
 $n_{TE} - n_{TM}$ : Birefringence

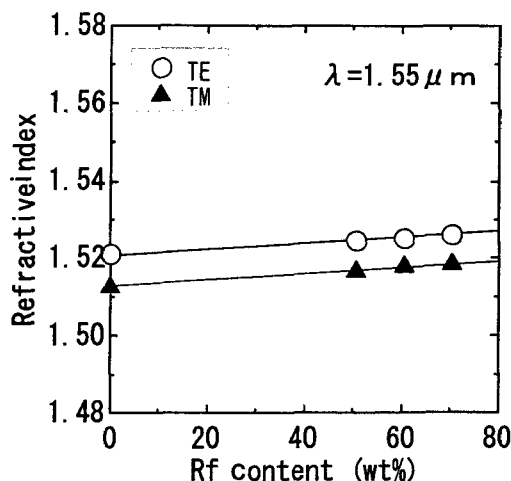


Fig. 2 Refractive index of FLUPI-PF

ラッドに用いてシリコン (Si) 基板上に埋込型直線光導波路を作製した。4 インチ Si 基板上にクラッド用及びコア用ポリアミド酸溶液を順次スピコートと熱処理することで下部クラッド層とコア層を形成した。コア層は既存のフォトリソグラフィと酸素の反応性イオンエッチングにより直線のリッジを形成した。最後に上部クラッド用ポリアミド酸溶液をスピコートし熱処理することで埋込型光導波路が作製できた。(図3)

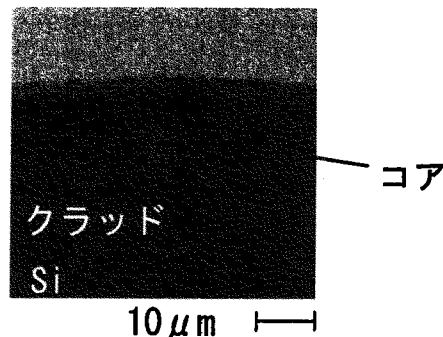


Fig. 3 Cross-sectional micrograph of buried waveguide

図4に作製した埋込型直線光導波路に波長の異なる光を入射したときの出射光のニアフィールドパターン(NFP)を示す。波長1.3及び1.55 μmでの出射光の強度分布はコア中心が最も強いガウス分布にはほぼ一致しており、本光導波路がシングルモードであることがわかる。一方、波長0.85 μmでは出射光が大きく分かれ、0次と1次モードが伝搬するマルチモード光導波路となっている。

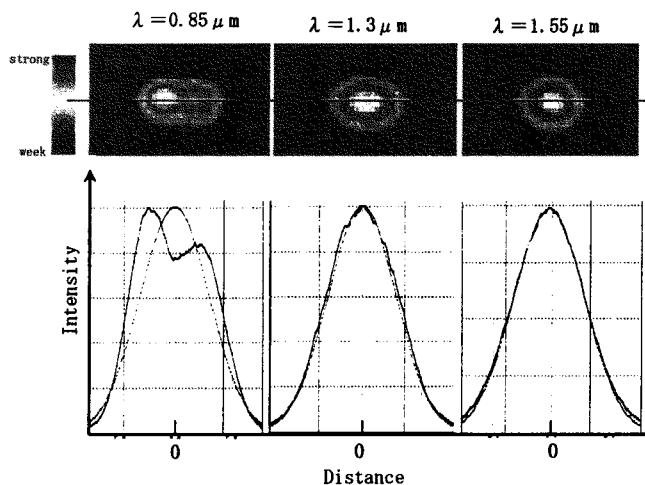


Fig. 4 Near-field mode patterns for 0.85, 1.3, and 1.55 μm wavelength regions

作製した埋込型直線光導波路の損失の波長依存性を図5に示す。FLUPI-PF材料では近赤外波長に明確な吸収はないが、作製した光導波路では波長1.4 μm付近に広幅で低い吸収、及び1.4と1.65 μm付近に狭幅の吸収が見られ、これは光が長い距離(5cm)を導波する過程で光導波路作製時に付着した水分や不純物、または微量の残留溶媒等によって吸収されたものと考えられる。しかし、材料にFLUPI-PFを採用することで、波長1.3から1.5 μm以上の領域では既存の部分フッ素化ポリイミド (FLUPI-CB) [2]を用いた場合と比較して、低損失であり、特に1.5 μm帯の幅広い波長範囲で低損失を有している。

直線光導波路の導波損失と接続損失を詳細に調べるためにカットバック法により損失を評価した。図6に波長1.55 μm、TEモードでの測定結果を示す。図のプロットの傾きよりこの直線光導波路の導波損失は0.10dB/cm、接続接続損失は0.54dBと求められた。同様の手法によりTMモード、及び波長1.3 μmでの評価結果、さらに比較として既存のFLUPI-CBから作製した光導波路の導波損失の評価結果を表2にまとめた。ポリイミドの分子構造の全ての水素(H)を除去することで、波長1.55

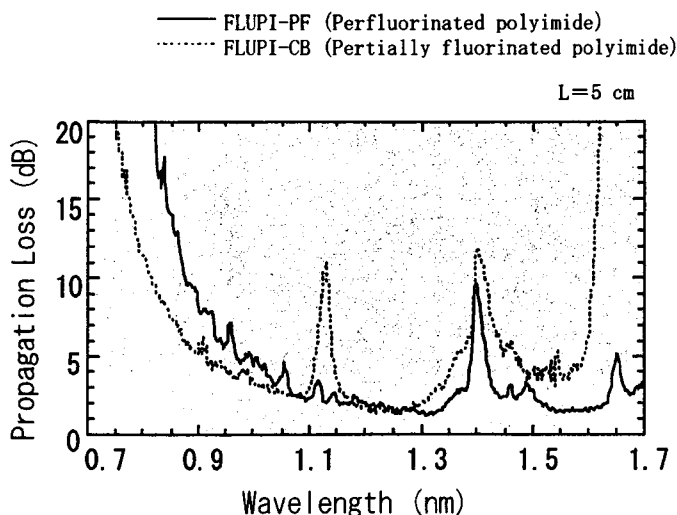


Fig. 5 Loss spectra for waveguides of FLUPI-PF and FLUPI-CB

$\mu\text{m}$ において特に顕著に導波損失を低減できた。また、1.3と1.55  $\mu\text{m}$ の両波長で0.1dB/cm台の極めて低い導波損失を示し、その偏波依存損失(TEとTMモードの損失の差)も0.1dB/cm未満であった。本材料は導波路長が長く複雑な光回路を有する部品や、より低損失性を要求される光導波路部品に用いる材料として有用と考えられる。

次に本光導波路を実用的な光回路に適用するために、曲率の異なる種々の90度の曲線光導波路を作製した。図7に曲線導波路の曲率半径と曲げ損失の増加の関係を示す。この結果より波長1.55  $\mu\text{m}$ で使用する場合には光回路の曲率を約10mm以上に設定すれば、曲げ損失は生じない(最小曲げ半径は約10mmである)ことがわかった。この結果は同等のコア/クラッド屈折率差を有する既存のFLUPI-CB光導波路や石英光導波路の特性とほぼ一致した。

#### 4. 光導波路部品への適用

前記FLUPI-PF光導波路は近赤外、特に1.5  $\mu\text{m}$ 帯の幅広い波長範囲で低損失を有することから、波長間隔の広いCoarse Wavelength Division Multiplexer (CWDM)への適用を検討した。

作製したCWDMは波長間隔40nmの4チャンネルCWDM(4ch-CWDM)である。使用波長は1.55  $\mu\text{m}$ 帯においてITU-T規格で標準化された20nm間隔の各波長の中で、FLUPI-PF光導波路の低損失領域に入り、かつ1波長飛びの1470、1510、1550、1590nmに設定した。概略とCWDMチップ部の写真を図8に示す。Si基板上にY分岐光導波路を作製して3カ所の分岐部に対応する3枚の誘電体多層膜フィルタを挿入し、光導波路の入出射端面にSCコネクタ付光ファイバアレイを光学接着剤を用いて接続した。これをプラスチックパッケージに実装することで4ch-CWDMモジュールを作製した。

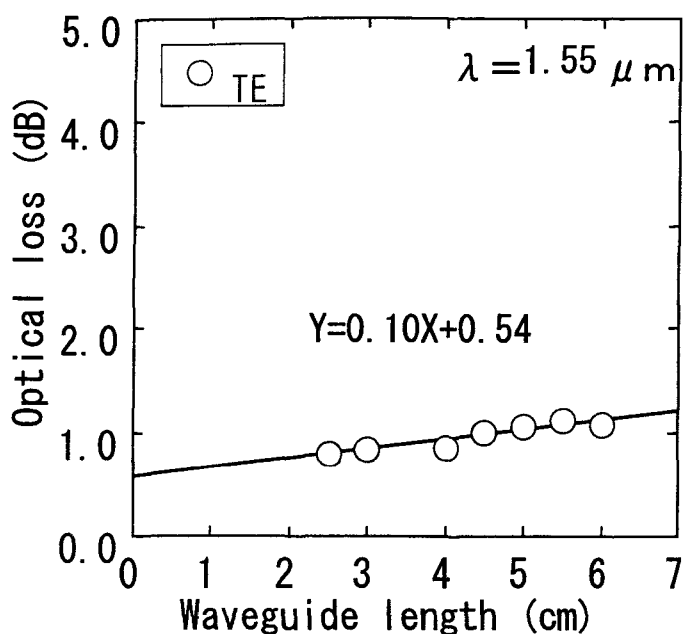


Fig. 6 Transmission losses of buried waveguide at 1.55  $\mu\text{m}$  for TE polarization

Table II Transmission losses for waveguide of FLUPI-PF and FLUPI-CB

Wave length ( $\mu\text{m}$ )	Polarization	Loss (dB/cm)	
		FLUPI-PF	FLUPI-CB
1.55	TE	0.1	0.5
	TM	0.18	0.6
1.3	TE	0.11	0.3
	TM	0.15	0.4

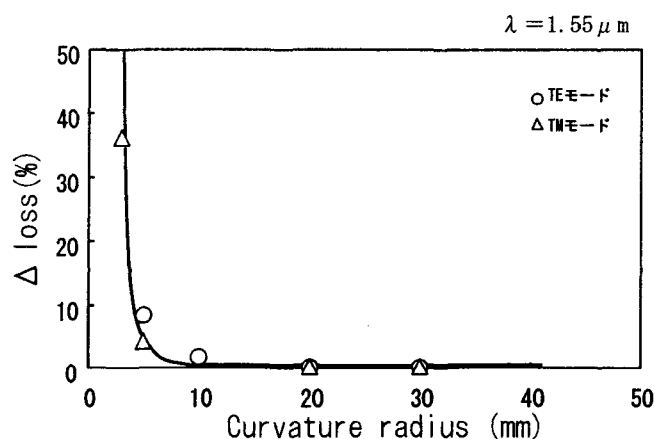


Fig. 7 Transmission losses of buried waveguide at 1.55  $\mu\text{m}$  for TE polarization

この4ch-CWDMの多重光ポートから白色光を入射し、各波長ポートからの出射光をスペクトルアナライザで受光した時の各ポートの波長スペクトルを図9に示す。

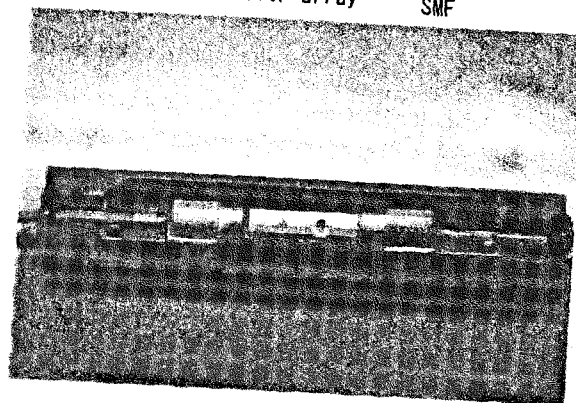
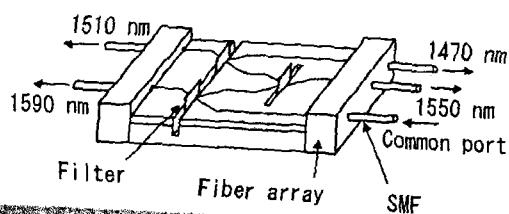
この図より多重化光の合波ポートから入射した白色光が設計した4波を中心としてほぼ設計通りに分波され、各出力ポートより出射していることがわかる。さらに各設計(使用)波長において、LDとパワーメータを用いて測定した入出射コネクタ間の挿入損失は波長1470 nmで4.8dB、波長1510 nmで5.0dB、波長1550 nmで4.8dB、波長1590 nmで2.6dBであり、隣接チャンネル間のクロストークは-17 dB以下であった。これらの損失は既存のFLUPI-CBを用いた同仕様の4ch-CWDMの損失6.8 dB以下[3]と比較して約2 dB程度低い値を示した。特に波長1590 nmでは挿入損失2.6 dBと極めて低い値を示したが、これはFLUPI-PF光導波路の波長1590 nmでの導波損失が他の波長より低いことと本4ch-CWDMにおいて波長1590 nmの光の導波長が最も短いことの相乗効果による。従って、今後各波長での導波損失とCWDMチップ内での導波路長の組み合わせを最適化し、光回路を再設計することで、損失ばらつきを抑制し、より平均化することも可能と考えられる。

#### 4. まとめ

近赤外の光通信波長の幅広い波長領域で優れた光透過性と屈折率制御性を有する全フッ素化ポリイミド (FLUPI-PF) を合成した。この材料を用いた埋込型光導波路は波長1.3及び1.55  $\mu\text{m}$ でシングルモードであり、0.1dB/cm台の低損失性を示した。またこの光導波路の1.5  $\mu\text{m}$ 帯での幅広い範囲での低損失性を利用して波長間隔40nmの4ch-CWDMを作製した。このCWDMは既存の部分フッ素化ポリイミド (FLUPI-CB) を用いたCWDMより低挿入損失であり、FLUPI-PFの光通信部品への適用性を示す結果と考えられる。

#### 文献

- [1] S. Ando, T. Matsuura, and S. Sasaki, *Macromolecules*, **25**(21), 5858(1992)
- [2] T. Matsuura, S. Ando, S. Sasaki, and F. Yamamoto, *Macromolecules*, **27** (22), 6665 (1994)
- [3] 川上, 小林, 工藤, 景井, 疋田, 今村郎, 山本, 電子情報通信学会総合大会, C-3-149, 2002



Size : 50 mm × 10 mm × 8 mm

Fig. 8 Configuration and photograph of 4ch-CWDM using FLUPI-PF

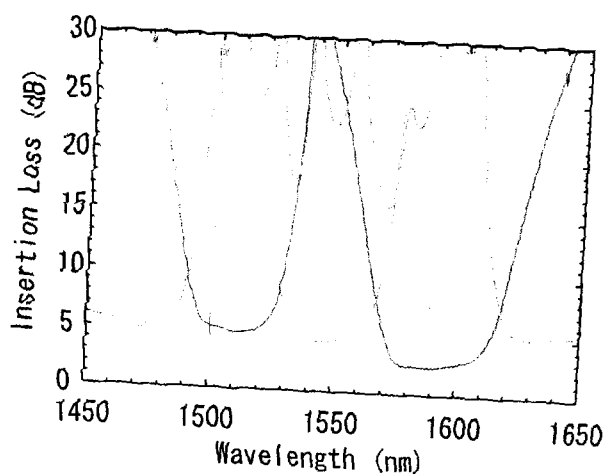


Fig. 9 Spectral response of 4ch-CWDM