

ポリマー光導波路の形成とそのデバイス特性

丸 野 透

Fabrication and Properties of Polymer Optical Waveguide Devices

Tohru MARUNO

Polymer waveguides have attracted much attention because they have a variety of optical functions and their fabrication process is simple and cost effective. This paper reports recent progress on polymer waveguide materials developed for optical interconnections and planar lightwave circuit (PLC) type devices. Moreover, we describe fabrication techniques and device properties for polymer based optical waveguide technologies.

Key words: polymer materials, waveguide fabrication, thermo-optic switch, tunable filter, optical interconnection

インターネットの普及による通信トラフィックの爆発的な増加に対応するため、光ファイバーで送られる信号を、電気信号に戻さずに光のままに処理するフォトニックネットワークの研究開発が急速に進んでいる。電話や動画の配信などの多種多様なアプリケーションを同時に処理するインターネットでは、高密度波長多重 (DWDM) システムを利用した高速・大容量のバックボーンネットワークが重要な役割を果たす。また、インターネットを一般家庭で十分に活用するためには光ファイバーが家庭に達する FTTH (fiber to the home) のアクセスネットワークを構築する必要があり、FTTH の先に繋がる私設ネットワーク (LAN, 家庭内ネットワーク) の光化も大きな流れとなってきた。フォトニックネットワークや光 LAN 構築のキー技術として、光導波路を用いた波長フィルター、光スイッチなどの新しい光デバイスや、各種装置間・内の光インターコネクションが挙げられる¹⁾。従来、これらの用途には性能・信頼性がすぐれる石英・半導体導波路や石英ファイバーなどが利用されていたが、さらに広範な普及を目指して作製方法が簡便で低コスト・高機能な光導波路の実現手段が望まれている。

ポリマー光導波路は、作製プロセスが簡単で熱光学 (TO) 効果が大きく、可撓性に富む等の特徴をもつため、低コスト・高機能の要望を満足できるとの期待が高い。ここでは、ポリマー光導波路を用いた平面光波回路 (PLC: planar lightwave circuit) デバイスや光インターコネクション・実装の最近の研究開発動向を紹介する。

1. ポリマー材料の設計と合成

ポリマー材料は要求性能に応じて幅広い材料設計が可能であり、種々の光導波路用材料が合成されている。光 LAN や光インターコネクションへの応用が可能な短波長領域 (0.5~1.0 μm) では多くのポリマー材料が低損失であり、なかでも重水素化 PMMA (ポリメチルメタクリレート) をコアに用いた光導波路が 0.011 dB/cm (波長 0.68 μm) の小さな値を示す²⁾。また、ポリマーの弱点であった耐熱性についても、200°C で 1 時間加熱後の損失増加が 0.02 dB/cm 以下でハンダ (Pb-Sn) 耐熱性を有する UV 硬化型エポキシ系光導波路材料が開発されている (図 1)。

一方、大容量光通信の波長域 (1.0~1.7 μm) では、通常のポリマー材料は炭素-水素 (C-H) 結合に起因する吸収

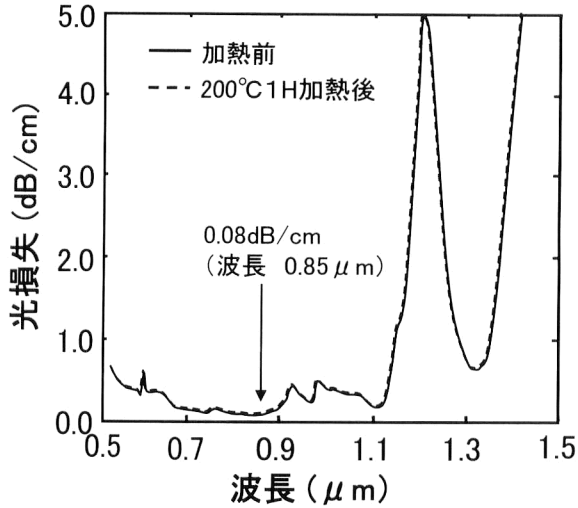


図1 UV硬化型エポキシ系光導波路の耐熱性。

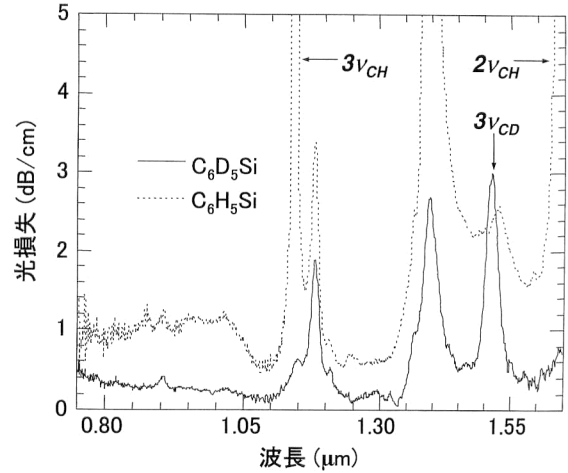


図3 シリコン樹脂の重水素化による吸収スペクトルの変化。

光通信波長帯

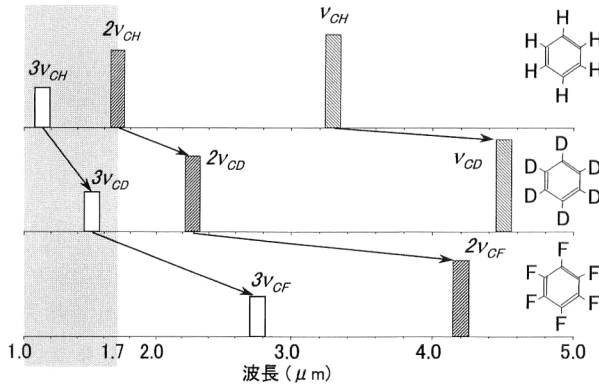


図2 重水素、フッ素置換による吸収ピーク波長のシフト。

により光損失が高い。この波長域の吸収を低減するには、Hを重水素(D)またはフッ素(F)で置換してC-Hの吸収波長をシフトさせるのが有効であり(図2)、これまでにDまたはF置換したPMMA、ポリアミドやシリコン樹脂等が合成されている。シリコン樹脂の重水素化による波長1.3および1.55 μmでの吸収低減の様子を一例として図3に示す³⁾。DまたはF置換した材料を用いると光導波路の損失は波長1.3 μmで0.2 dB/cm程度まで小さくなり、小規模の光デバイスには十分適用可能である。しかし、石英ガラス系光導波路と比較した場合には損失がなお1桁高い値に留まっているため⁴⁾、ポリマーのもつ大きなTO効果を利用して石英系と差異化したデバイスが開発されている。

光導波路ではコアとクラッドの屈折率を精密に制御する必要がある。F置換は吸収シフトと低屈折率化を同時に実現するため、屈折率制御にも有効な手段である。フッ素化ポリアミドにおける屈折率制御の様子を図4に示す⁵⁾。2種類のフッ素化ポリアミドの共重合比を変化させること

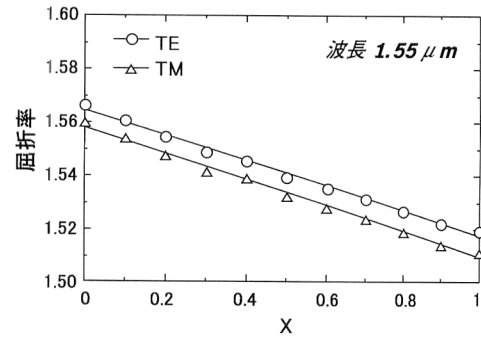
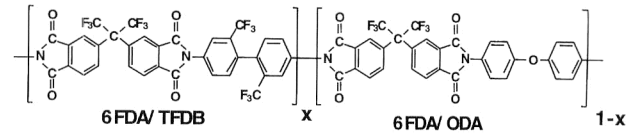


図4 フッ素化ポリアミドの屈折率の共重合比依存性。

で、光導波路の製造性や長期信頼性に影響を及ぼす熱・機械的特性などの変化を最小限に抑えながら屈折率を制御することが可能である。

代表的な光導波路用ポリマー材料と、それを用いて作製した光導波路の波長0.85, 1.3, 1.55 μmにおける光損失、耐熱性、光導波路モード特性を表1に示す。

2. 光導波路作製プロセス

ポリマー光導波路の作製方法として、選択重合⁶⁾、反応性イオンエッチング(RIE)とフォトリソグラフィを組み合わせる方法、直接露光法⁷⁾、射出成形をもとにした方法⁸⁾、フォトブリーチング法⁹⁾、電子線直接描画法¹⁰⁾等が挙げられる(図5参照)。このうちRIEを用いる方法は、現在光導波路として最もすぐれた性能を有する石英ガラス系光導波路の形成方法と同一の方法で、高い加工精度を要求す

表1 種々のポリマー材料で作製した光導波路の特性

材 料	チャンネル導波路の損失値 (dB/cm)			耐熱性 (°C)		光導波路モード	
	0.85 μm	1.3 μm	1.55 μm	材料	導波路	シングル	マルチ
フッ素化ポリイミド		0.2	0.4	400	350	○	—
ベンゾシクロブテン		0.3		420		○	—
重水素化シリコン		0.12	0.42	420	250	○	—
重水素化 PMMA	<0.02	0.1	1.5	150	80	○	○
UV エポキシ樹脂	<0.1	0.5	4		200	○	○
UV アクリレート樹脂	0.1	0.2	0.24	150	85	○	○

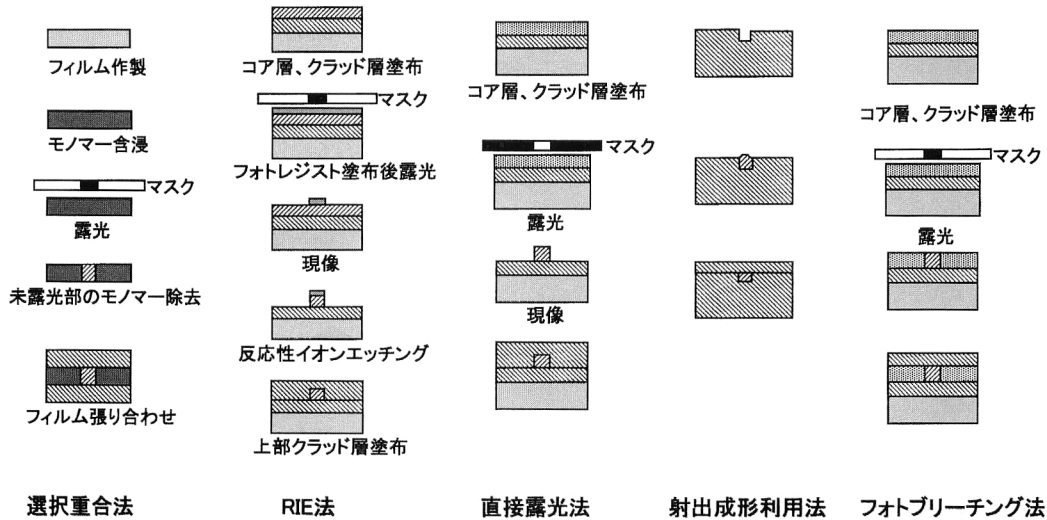


図5 ポリマー光導波路の作製方法.

るシングルモードポリマー光導波路素子の作製に用いられる。ポリマーの光硬化性を利用してフォトリソグラフィのみでコアリッジを形成する直接露光法は、真空のプロセスを経ずに光導波路を作製できるポリマー特有の方法である。近年の光硬化材料の組成改良により、50 μm 程度の大口径コアを有するマルチモード光導波路を短時間（1~2時間）で簡便に作製できるようになった。射出成形をもとにした方法は、大量生産に適し、かつファイバー実装が簡便に行えるとの期待が高い。

3. 光インターコネクションと光実装応用

情報処理容量の増大に対応する光インターコネクションの実現に向けて、ボード間、ボード内、チップ間、チップ内の配線部分の光化が重要な課題となっている¹¹⁾。光導波路は、光ファイバーに比べて配線自由度が高く、電子部品との接続まで含めた多様な光接続が可能であるため、光インターコネクション用光部品の一要素として注目をあつめている。

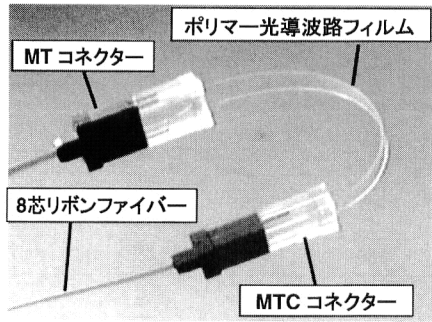
ポリマー光導波路を光インターコネクションに適用した場合、

- (a) 作製プロセスが低温であるため電子デバイスのプロセスと互換性をもてる
- (b) 材料および作製プロセスが大量生産に適しており低コストが期待できる
- (c) フィルム化により自由度の高い光配線の可能性がある

などのメリットをもつ。以下に、光インターコネクションや光実装に関連したポリマー光導波路デバイスの応用例を示す。

3.1 光導波路フィルム素子

ポリマー光導波路は、フィルム化が容易で柔軟性に富むという特徴を利用してボード間接続が検討されている¹²⁾。現状ではボード間接続には光ファイバーが利用されているが、急激な曲がりが必要とする隣接ボード間などでは光ファイバーの機械的な劣化や損失増加が考えられる。ポリマー光導波路フィルムではこれを解決できる上、分岐や合流回路を簡単に導入できるため光配線の自由度が向上する。MT (mechanically transferable) コネクターを利用したマルチモード系多芯接続光導波路フィルムの例を図6に示す。適用波長は0.85 μm 帯を想定しており、曲げ半径を5



MTコネクタを利用

図6 MTコネクタを利用したマルチモード系多芯接続光導波路フィルム。

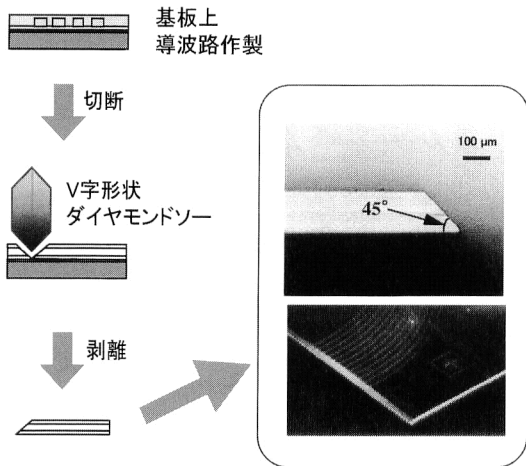
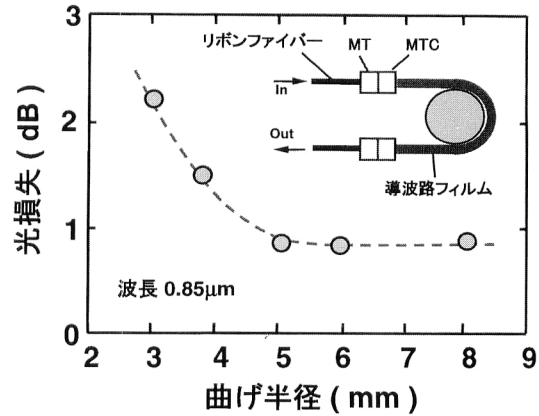


図7 光導波路フィルム端面の45°ミラーとその作製方法。

mmまで小さくしても挿入損失は接続損失を含めて1 dB以下(6 cm長)と小さい。

3.2 送受信モジュール

装置間の光インターコネクションでは送受信モジュールが重要な構成部品のひとつである。当面の課題となる高速化、低価格化を実現する手段として、面発光レーザーアレイ (VCSELアレイ) と垂直光路変換機能をもつポリマー光導波路を用いる並列光インターコネクションモジュールが開発されている。垂直光路変換のために必要な光導波路フィルム端面ミラーの作製方法を図7に示す。90° V字形の断面構造を有するダイシングソーで光導波路を切断するだけの簡単な操作で作製でき¹³⁾、損失は0.7 dB (ミラー部) と小さな値を示す。作製したミラー付光導波路フィルムを使用した並列光インターコネクションモジュール (Para BIT (NTT))¹⁴⁾ の模式図を図8に示す。コアのみ重水素化PMMAまたはコア、クラッドともにUV硬化エポキシ樹脂を用いた多モード光導波路で、光導波路部分の挿入損失は接続部も含めて2.2 dB程度である。このモジュールは40チャンネルの並列処理が可能で、1チャンネルあたりの伝送

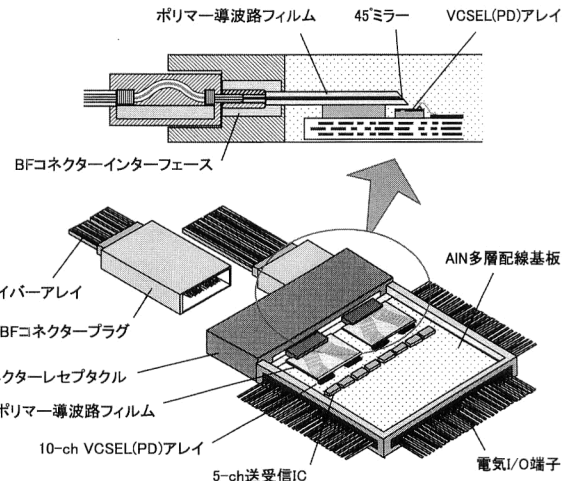


図8 並列光インターコネクションモジュール (Para BIT (NTT)) の模式図。

容量が700 Mb/sあることから、トータルの伝送容量としては25 Gb/s級のインターコネクションが可能である。

4. PLC デバイス

4.1 熱光学 (TO) 効果光スイッチ

通信網の高速化・低コスト化には、現在はエレクトロニクス系で行っている回線切替操作 (クロスコネク (XC) システム) の光化が必須である¹⁾。光XCのキーデバイスである光路切替スイッチに望まれる特性は、高いスイッチ特性 (消光比)、数ms以下のスイッチ速度、低動作電力、1.3/1.55 μm両波長帯において低損失、等である。ポリマーのTO効果が石英に比べて1桁以上大きいことを利用すると、石英系では実現困難なY分岐型TOスイッチが作製でき、波長無依存の光スイッチとなる。1×2のY分岐型TOスイッチの構造と動作状態の計算結果を図9に示す。金属薄膜電極のヒーターでY分岐導波路の一方のアームを加熱することにより屈折率を低下させ、他方のアームのみに光出力が現れるスイッチング動作を可能

とする。

シリコン系ポリマー材料を用いて作製した1×8のY分岐型TOスイッチの構造、外観、スイッチング特性を図10に示す。消費電力360~450 mW, ON/OFF比40 dB, 挿入損失3 dB, 偏波依存損失0.3 dBが達成されている¹⁵⁾。パルス応答特性より求めたスイッチング時間は、90%立ち上がりが6.0 ms, 立ち下がりが3.4 msで、10⁷回の切替動作後も特性劣化はなかった。

4.2 アレイ導波路格子型可変波長フィルター (AWG-TF)

アレイ導波路格子 (AWG) をポリマーで作製し大きなTO効果を利用すると、広帯域で波長選択可能なAWG-

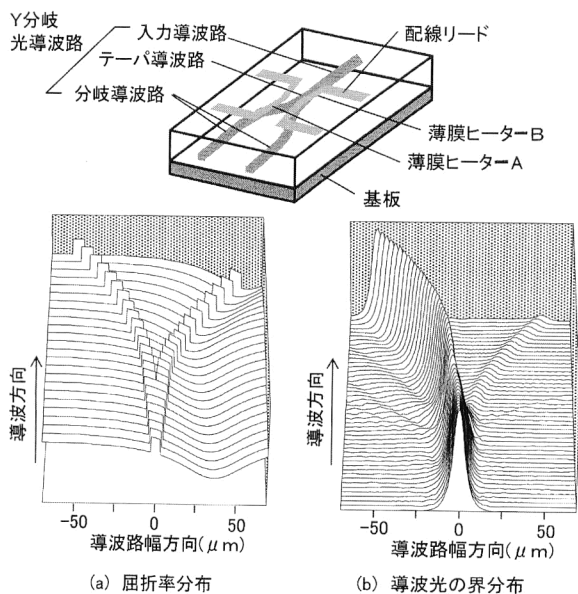


図9 1×2のY分岐型TOスイッチの構造と薄膜ヒーターAで加熱したときの動作 (計算)。

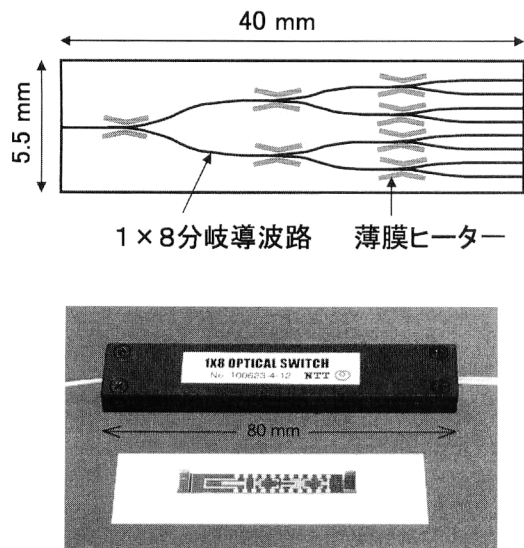


図10 Y分岐型1×8 TOスイッチモジュールの構造、外観と光透過特性。

TFを作製できる¹⁶⁾。三角形型熱光学位相シフターを有するAWG-TFの構造と可変フィルター特性を図11に示す。アレイ導波路部に設けた直線部に、光路長差を増加させる機能と減少させる機能を有する三角形のヒーターを対向させて設置した。使用したポリマーの dn/dT は負(-1.6×10^{-4})のため、ヒーターA点灯時に光路長差が減少してピーク波長は短波長シフトする一方で、ヒーターB点灯時には光路長差が増加して長波長シフトする。作製したAWG-TFでは、ヒーターA点灯時に1539.9~1555.0 nm, ヒーターB点灯時に1555.0~1570.2 nmの範囲でチューニングでき、両ヒーターを用いて最大で30 nm以上の可変範囲が得られた。これにより、100 GHz間隔のWDMシステムにおいて25チャンネルをカバーする波長チューニングが可能である。クロストークはどのヒーター電力においても-30 dB以下, 挿入損失は6.0~7.5 dB, 動作速度は昇温制御時2 ms, 降温制御時60 msであった。

4.3 衛星通信受光センサー

宇宙ステーションに搭載した光通信機と、そこから3600 km離れた地上局の間で2.5 Gbpsの大容量高速データ通信を行う衛星光通信システムが提案されている¹⁷⁾。ポリマー光導波路の特徴である加工の容易性を生かしてシングルモードとマルチモードの光導波路を積層することにより、衛星からのレーザー光を受光する光センサーに高精度の位置検出機能を付与できる。埋め込み型光導波路の作製工程を3回繰り返して積層した3層構造光導波路の位置センサー用光検出器の概要と断面図を図12に示す。中心にシングルモード光導波路, その周囲に4個のマルチモード光導波路が配置された構造で、衛星からのレーザー光がシング

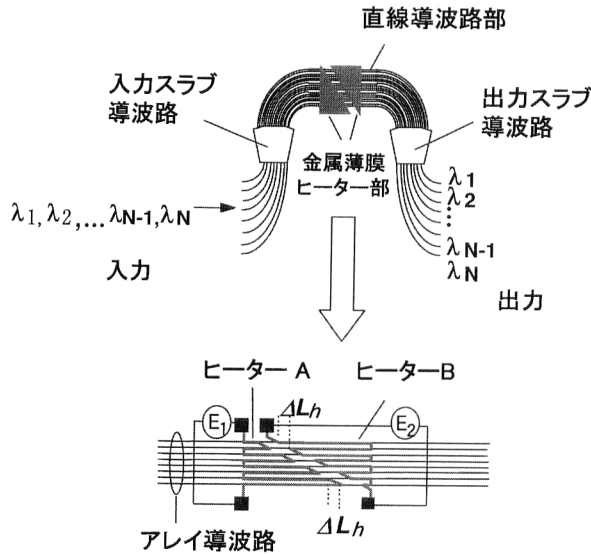


図11 AWG-TFの構造と可変フィルター特性。

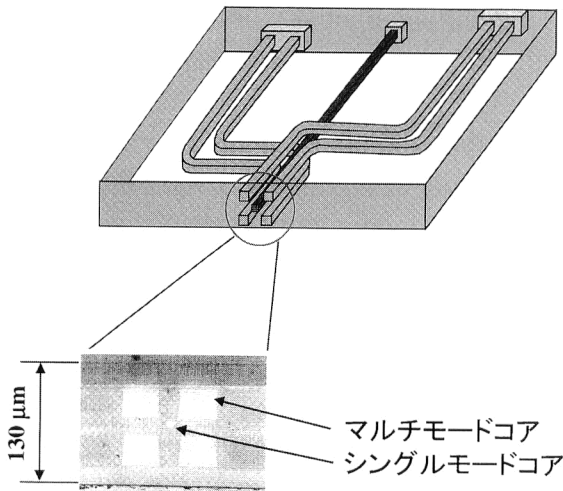
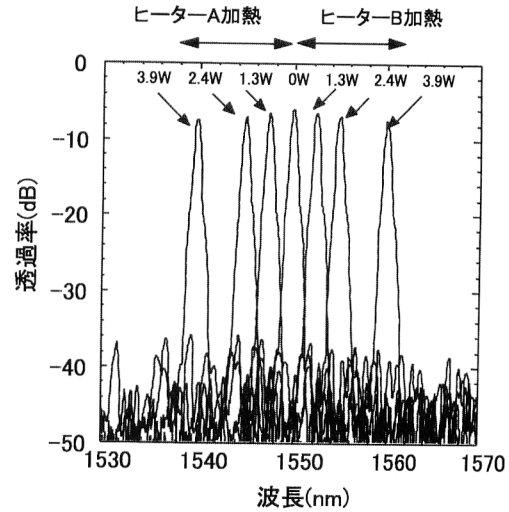


図12 3層構造の積層光導波路による位置センサー用光検出器。

マルチモード光導波路からはずれた場合には周辺のマルチモード光導波路で検出し、光の強度中心がシングルモード光導波路の中心と重なるようフィードバック系で位置補正を行う。位置検出を容易に行うためにはマルチモード光導波路とシングルモード光導波路が接近していることが望ましいが、信号取り出し面は5本の光導波路を個別に光ファイバーと接続するための空間が必要である。ここでは、中心のシングルモード光導波路を直線で、また周辺のマルチモード光導波路は曲がりを含む光導波路で構成することによりファイバー接続を可能にした。挿入損失は波長 $1.55 \mu\text{m}$ で $1\sim 2 \text{ dB}$ 程度である。

ポリマー光導波路による光インターコネクションと光導

波路デバイスなどの特性と適用例について報告した。ポリマー材料および作製した光導波路のもつ高い TO 効果、低温プロセス性や可撓性等の特徴を利用することにより、石英系や半導体等の無機材料では困難な新機能光導波路デバイスの展開が期待できる。実際の適用にあたっては、作製コスト、メンテナンスコストなどのトータルコストも含めて総合的観点から評価する必要があるものの、ポリマーのもつ種々の特徴は他の素材に比べても魅力的であり、信頼性の向上、機能化など今後も活発な研究が進むものと考えられる。

文 献

- 1) 青山友紀, 秋葉重幸, 江村克己, 遠藤 昇, 太田昌孝, 川原正人, 北山研一, 斎藤慧一, 佐藤健一, 田崎公郎, 中條 渉, 津田俊隆, 長谷川聡, 水澤純一, 米田悦吾: “フォトニックネットワークの展望と今後の技術課題”, O plus E, **22** (2000) 1322-1330.
- 2) R. Yoshimura, M. Hikita, S. Tomaru and S. Imamura: “Low-loss polymeric optical waveguides fabricated with deuterated polyfluoromethacrylate,” IEEE J. Lightwave Technol., **16** (1998) 1030-1037.
- 3) T. Watanabe, N. Ooba, S. Hayashida, T. Kurihara and S. Imamura: “Polymeric optical waveguide circuits formed using silicone resin,” IEEE J. Lightwave Technol., **16** (1998) 1049-1055.
- 4) 丸野 透: “平面光波回路デバイス”, O plus E, **22** (2000) 1276-1283.
- 5) J. Kobayashi, Y. Inoue, T. Matsuura and T. Maruno: IEICE Trans. Electron., **E81-C** (1998) 1020-1026.
- 6) T. Kurokawa, N. Takato, S. Oikawa, T. Okada: “Fiber optic sheet formation by selective photopolymerization,” Appl. Opt., **17** (1978) 646-650.
- 7) J. M. H. Trehwella, J. D. Gelorme, B. Fan, A. Speth, D. Flagello and M. M. Oprysko: “Polymeric optical waveguides,” Proc. SPIE, **1177** (1990) 379-386.

- 8) A. Neyer, T. Knoche and L. Muller: "Fabrication of low loss polymer waveguides using injection moulding technology," *Electron. Lett.*, **29** (1993) 399-401.
- 9) C. C. Teng: "Traveling-wave polymeric optical intensity modulator with more than 40 GHz of 3-dB electrical bandwidth," *Appl. Phys. Lett.*, **60** (1992) 1538-1540.
- 10) Y. Y. Maruo, S. Sasaki and T. Tamamura: "Embedded channel polyimide waveguide fabricated by direct electron beam writing method," *J. Lightwave Technol.*, **13** (1995) 1718-1723.
- 11) 安東泰博: "実用化を目指す光インターコネクション通信システムにおける光インターコネクション", *オプトロニクス*, **177** (1996) 137-143.
- 12) A. Kaneko, M. Hikita and S. Imamura: "Flexible singlemode polymer waveguides," *Proc. MOC '95*, Hiroshima, (1995) pp. 234-237.
- 13) R. Yoshimura, M. Hikita, M. Usui, S. Tomaru and S. Imamura: "Polymeric optical waveguide films with 45° mirrors formed with a 90° V-shaped diamond blade," *Electron. Lett.*, **33** (1997) 1311-1312.
- 14) M. Usui, N. Matsuura, N. Sato, M. Nakamura, N. Tanaka, A. Ohki, M. Hikita, R. Yoshimura, K. Tateno, K. Katsura and Y. Ando: "700-Mb/s X 40-channel parallel optical interconnection module using VCSEL arrays and bare fiber connectors," *Proceedings of 10th LEOS '97* (1997) pp. 51-53.
- 15) 大庭直樹, 豊田誠治, 栗原 隆: "ポリマー導波路を用いた小型低電力デジタル光スイッチの開発", *NTT R&D*, **49** (2000) 598-604.
- 16) S. Toyoda, N. Ooba, T. Kitoh, T. Kurihara and T. Maruno: "Thermo-optic switch and wavelength tunable filter using polymer waveguides," *Proc. SPIE*, **4532** (2001) 62-72.
- 17) 疋田 真, 大庭直樹, 今村三郎, クラウス クエディルカ, 有本好徳: "衛星通信受光センサー用積層型ポリマー光導波路の作製", *電子情報通信学会技術研究報告*, **OME-99-43** (1999) pp. 1-6.

(2001年11月1日受理)