

接合型ポリマー光導波路とその簡易作製技術

杉原 興浩・小松 京嗣・戒能 俊邦

Serially-Grafted Polymer Optical Waveguides Fabricated by Simple Processes

Okihiro SUGIHARA, Kyoji KOMATSU and Toshikuni KAINO

Simple process for fabricating serially-grafted polymer optical waveguides are proposed and demonstrated. Two kinds of techniques based on softlithography with direct photopatterning and light-induced self-written waveguide are described. These techniques require much less process step and time in comparison with conventional photolithography with reactive ion etching technique.

Key words: serially-grafted waveguide, softlithography, light-induced self-written waveguide

大容量かつ高速通信への需要を満足するために光の重要性が増大している一方で、光通信・情報処理システムの経済化を目指して研究開発が活発に行われている。ポリマー光導波路は、低温加工性・量産性等の利点を有し低コスト化が期待できることから、次世代 FTTH (fiber-to-the-home)¹⁾ やホームネットワーク、あるいは装置間 (内) の光インターコネクションへの適用を目指した光回路が実用間近である。これらの領域で検討されているポリマー光導波路は、これまですべて透明ポリマーを用いた光回路であり、光信号の低損失伝送用途を目指して光配線板や光ネットワークユニット (ONU) に搭載される。さらに将来的には、透明性ポリマー光回路に加えて、変調/スイッチングや増幅等の機能を加えた機能性ポリマー光回路が要求されることとなり²⁾、広帯域光変調や電気→光変換素子、あるいは増幅素子として末端にまで拡大される光通信網でのメディアコンバーターへの適用やチップ間 (内) 光配線に展開されると期待できる。そして、小型化・集積化を目指して透明ポリマー光回路と機能性ポリマー光回路を同一基板上にモノリシック化した光回路が必要となる。しかしながら、機能性ポリマー光回路の作製に関しては未だ基礎研究フェーズであり、経済的な簡易プロセスが開発され実用化間近の透明ポリマー光回路との差異は大きく、モノリシッ

ク化への道筋についての研究はほぼ皆無である。

本研究では、次世代の高速光通信網や広帯域チップ間 (内) 光配線等の光伝送システムに必要な機能性ポリマー光回路について、特にモノリシック化を主眼においた接合型光導波路の簡易作製プロセスについて紹介する。簡易作製プロセスを用いることにより、時間・工程の大幅な短縮が可能となる。

1. 接合型光導波路とは

機能性を含む光回路の小型集積化のためには、透明光回路とのモノリシック化が必要不可欠である。また、一般に機能性有機材料は機能性色素を含有するため、光学的損失が大きくなる。そのため、光回路中の機能部位のみに使用し、それ以外の光伝送部位には透明性にすぐれるポリマーを利用すべきである。すなわち、光導波路の光機能性コアと透明性にすぐれるコアを低損失で接合する技術が必要となる。

従来、接合型光導波路は半導体プロセスと同様に、フォトリソグラフィと反応性イオンエッチングを繰り返す工程^{3,4)}によって作製されている。しかし、この方法は煩雑であり、またコア接合部の軸ずれやプロセス途中の光照射過程における機能性色素の分解などの問題がある。本研究

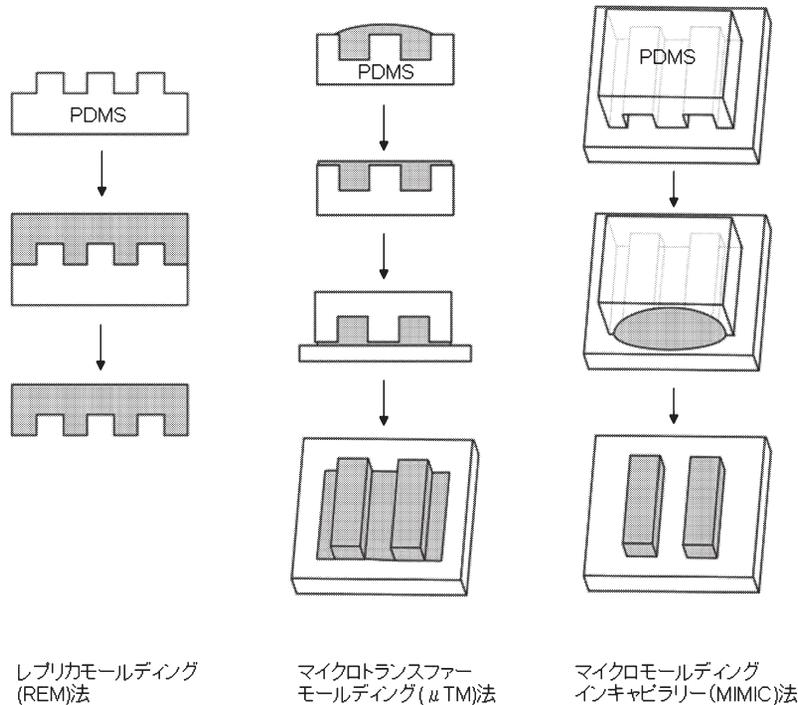


図1 代表的なソフトリソグラフィープロセス。

では、これらの問題点を解決し、高分子材料の特性を生かした簡易作製手法として、

- (1) ソフトリソグラフィープロセスと光架橋性高分子の直接露光法の組み合わせによる、新規な接合型光導波路作製プロセス
- (2) 自己形成光導波路技術⁵⁾を用いた接合型光導波路の一括形成

の提案、検討を行った。上記のプロセスはいずれも、透明ポリマー光回路作製において提案実証されている簡易プロセスであり、透明ポリマー光回路とのモノリシック化も効果的である。

2. 接合型光導波路簡易プロセス

2.1 ソフトリソグラフィープロセスとフォトリソグラフィープロセスを用いた接合型光導波路

ポリマー（プラスチック）材料を用いた製品は、今やわれわれの生活に欠くことのできないものとなっているが、これほど広く普及した要因のひとつは、ポリマーもしくはモノマー、オリゴマーが金型によって成型可能であり、安価に大量生産できるからである。また、ポリマー系材料の大きな特徴は、スピンコートによって均一な薄膜が作製できることである。ポリマー光回路の広範な普及には、これらのポリマー系材料のメリットを最大限生かせるかどうか鍵となる。ソフトリソグラフィープロセス⁶⁾は、ゴム弾性を示す

材料をスタンプやモールド（型）として用い、基板に、ポリマー材料などのナノメートルオーダーの微細パターンを形成する技術であり、いわば、マイクロの世界のプラスチック金型成型技術である。

ソフトリソグラフィープロセスの代表的なプロセスを図1に示す。ソフトリソグラフィープロセスでは、モールドとしてポリジメチルシロキサン（PDMS）を用いる。PDMSは350 nm付近に吸収をもつ⁷⁾以外、紫外、可視域で透明性が高く、モールドの位置合わせが容易であり、モールド中でのモノマーの光重合も可能である。このような特徴から、ソフトリソグラフィープロセスが光導波路コアの作製に適していることが理解できる。しかし、当然のことながら、このプロセスは1種類の材料に関するパターン形成であり、複数の材料の一括パターン形成は、モールドへの複数の材料の一括充填が必要なことから、通常困難である。つまり、光機能性と透明性の2種類の光導波路コアが、シリアルに接合したパターンは、一段階のソフトリソグラフィープロセスでは作製できない。本技術では、上記の問題を、ソフトリソグラフィープロセスによるクラッドの作製、光重合性モノマーのスピンコートと位置選択的重合と現象、光機能性材料のスピンコート、というプロセスを開発することにより解決した。以下に詳細を述べる。

1. 目的とする光導波路のクラッドを作製するためのPDMSモールドを作製する。PDMSとしては、

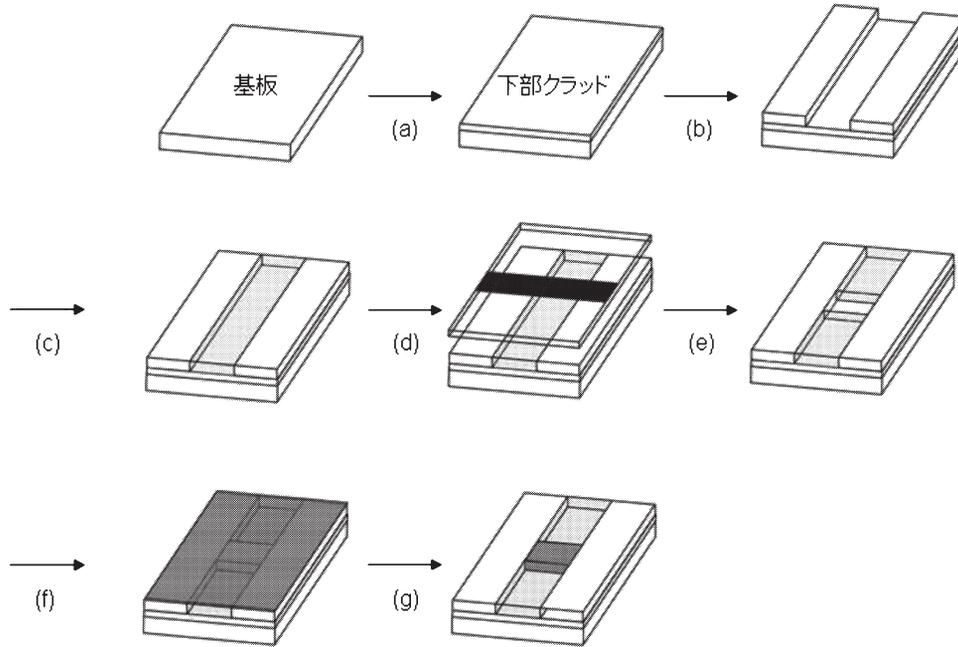


図2 ソフトリソグラフィと直接露光による接合型光導波路作製プロセス。

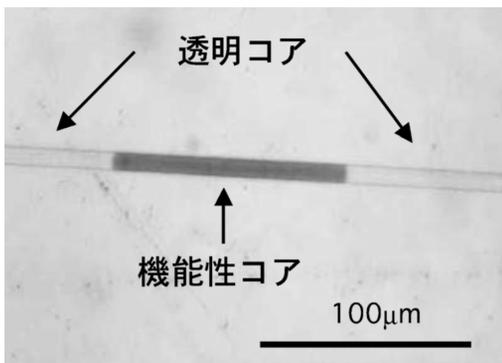


図3 接合型光導波路顕微鏡写真。

Sylpot184 (Dow Corning) を用いた。また、モールドの剝離を容易にするために、モールドにテフロン樹脂をコートしておく。

2. 紫外線硬化樹脂を基板の上にスピコートし、紫外線照射、ポストバーク、フルキュアする (図2 (a))。
3. クラッド作製用 PDMS モールドに紫外線硬化樹脂を充填し、基板の上に圧着、紫外線照射することによって重合後、PDMS モールドを剝離する (μ TM 法) (図2 (b))。
4. 紫外線硬化型透明性コア材料を、クラッドを作製した基板の上にスピコートする (図2 (c))。光機能性コアとなる部分をマスクした状態で紫外線照射し (図2 (d))、その後現像することにより、光機能性コアとなるべき部分が欠けた光導波路が得られる (図2 (e))。

5. 所定量の光機能性色素を含むポリマー溶液をスピコートし、透明性コアの欠けている部分に光機能性コアを充填する (図2 (f))。
6. 必要であれば、光導波路上部にある余分な材料を、反応性イオンエッチング (RIE) により除去する (図2 (g))。

スピコートにより、コアに相当する溝に試料を充填した場合、溝の上部が凹むことがある。このとき、RIE による余剰薄膜の除去の際、コア上部が除去されてしまう可能性がある。よって、スピコートの際、コアに相当する溝の上部も平坦になるように、試料濃度、スピコート条件を最適化することが重要である。

実際に本プロセスによって作製した、接合型光導波路の顕微鏡写真を図3に示す。

また、従来のプロセスである、フォトリソグラフィと反応性イオンエッチングによって作製された接合型光導波路の接合損失と、本プロセスによる接合型光導波路の接合損失を比較するため、本プロセスによって、コア1cm に対して、接合部を80か所もつ光導波路を作製し、カットバック法により、接合部1か所あたりの接合損失を算出した。用いた材料は、コアとしてSU-8 (Micro Chem)、接合するコアとして、Su-8と屈折率を整合したAT3925Mと#7200 (NTT-AT)の混合試料、クラッドとしてAT3925Mを用いた。このとき、接合部1か所あたりの接合損失は、0.007 dB/point であり、従来のプロセスによる接合損失と同等の値であった。

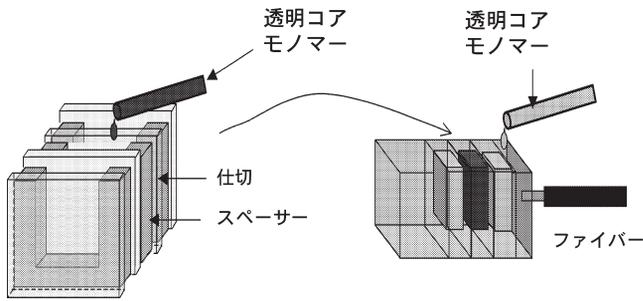


図4 自己形成接合型光導波路作製概要図。

以上のように、ソフトリソグラフィとフォトリソグラフィを用いた、新しい接合光導波路作製法は、今後高度に普及するであろう高分子系材料の特徴を十分に生かした合理的なプロセスであり、モノリシック化も容易である。

2.2 自己形成光導波路技術による接合型光導波路

本技術の概要は以下の通りである。光重合開始剤を含んだモノマー液中に、光ファイバーを挿入して光を照射すると、光強度の高いファイバー先端の中央部から重合が開始する。重合体の屈折率は未反応モノマーより高いため、「自己収束」効果によって光は重合体中を伝搬し、重合体が光の伝搬方向に成長する。重合反応は、重合体先端での光強度が、樹脂の硬化閾値を下回るまで続き、結果として光ファイバーと軸ずれなく、光導波路を形成することができる。さらにあらかじめ途中で部分反射ミラー等を挿入しておく、ミラーを貫通して光導波路コアが成長するため、ミラー前後でのコアの軸ずれがない⁵⁾。そこで、図4のように透明な仕切りでセルを三分割し、両外側に光硬化性透明樹脂モノマー、間のセルに機能性樹脂モノマーを注入し、光ファイバーからの出射光で透明樹脂および機能性樹脂を一括重合させることにより、軸ずれのない接合型自己形成光導波路が作製できる。本研究では、その実証実験を行った。

実験では、透明コア材料としてウレタンアクリレート系モノマー（モノマー A）、機能性コア材料として適量の機能性色素を溶解させたモノマー A、クラッド材料としてエポキシ系モノマー（モノマー B）を用いた。光ファイバーにはプラスチック光ファイバー（コア径 1 mm）あるいはガラス光ファイバー（コア径 100 μm ）、を使用した。仕切りを挿入したセルの両側に透明コア、間に機能性コアモノマーを注入し、ファイバーに Ar^+ レーザー（波長 488 nm）光を結合して、出射端から導波路コア部を自己形成させ、その後未反応モノマーを除去する。引き続きモノマー B をセルに注入し、周囲から波長 365 nm の紫外光を照射してクラッド部を硬化させた。

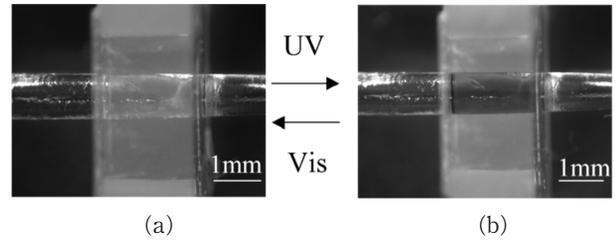


図5 自己形成接合型光導波路写真およびフォトクロミック光異性化。(a) Vis 光照射, (b) UV 光照射。

図5に、作製した接合型光導波路コア部の写真を示す。機能性色素としてジアリルエテンフォトクロミック色素⁸⁾を用いた。本色素は UV-Vis 光で異性化し、吸収スペクトルの変化を生じる。開環状態では無色であり、波長 488 nm の重合体形成光を吸収することはない。したがって、色素のブリーチングやモノマー A の重合阻害を回避することができ、機能性コアが成長する。図5からわかるように、形成されたコアの径はおよそ 1 mm と使用した光ファイバーのコア径とほぼ一致し、仕切り透過後もコアは形成され、透過前後のコア径はほぼ均一であった。また、機能性コア部分は UV-Vis 光で異性化されており、フォトクロミズム機能を有する接合型光導波路が作製できたことが明らかになった。同様に、波長 488 nm で吸収がきわめて小さい非線形色素やレーザー色素を用いても接合型自己形成光導波路を作製することができ、本技術は光機能性材料の導波路デバイス化、特に透明ポリマー光回路とのモノリシック化に有効であることが明らかとなった。

また、自己形成光導波路技術を用いたシングルモード機能性光導波路についても検討を行った。従来、シングルモード自己形成光導波路の作製には、2種類のモノマー樹脂を混合させた選択重合法が用いられてきたが⁹⁾、この方法では機能性光導波路作製には困難が伴う。そこで、コア樹脂として高粘度の（色素ドープ）エポキシ樹脂を用い、かつ双方向光照射（図6の挿入写真）によって端面を光ファイバーに固定することによって、細径コア形成後も直線導波路を維持できるようにした。図6に、コア形成後のシングルモード機能性自己形成光導波路の写真を示す。直線導波路が維持されていることより、シングルモードでもクラッド置換法が利用できる。一方、シングルモードだとアスペクト比が大きいため、長尺導波路の形成には付加的な試みが必要になるが、間にパーテーションを挿入した接合型を利用することによって、透明導波路、機能性導波路の導波路長を短くすることが可能であり、パーテーションが接着の役割を果たすことによって、シングルモードでも（マルチモードと同様に）クラッド置換法を利用することがで

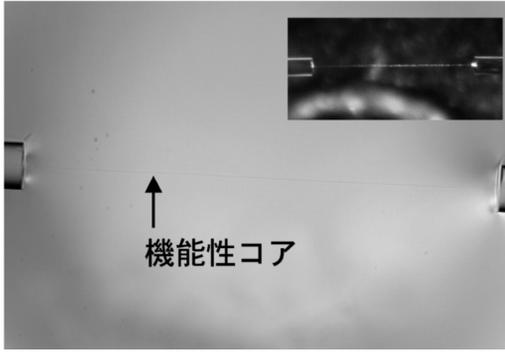


図6 シングルモード機能性自己形成光導波路コア写真。挿入写真は双方向光照射による自己形成光導波路作製工程。

き、特に機能性光導波路の形成に有効である。以上のごとく、本手法は透明ポリマー光導波路だけでなく、接合型光導波路の簡易作製法として利用が可能であり、またそのプロセス時間に関しても、表1に示すように、従来のフォトリソグラフィとエッチングの繰り返しプロセスに比べて、工程数および所要時間が大幅に少なくなっており、有用な技術であることが明らかになった。

ポリマーならではの特徴を生かした簡便な光回路作製プロセスを用いて、機能性ポリマー光回路、特に接合型光導波路の作製について、(1) ソフトリソグラフィと直接露光を組み合わせた作製プロセス、(2) 自己形成光導波路作製プロセスを紹介した。これらの技術は、透明ポリマー光導波路作製で実績のある簡易プロセスを適用していることから、簡便低コストにモノリシック化できる技術として期待できる。今後さまざまな課題を克服することにより、機能性ポリマー光回路の実用化に向けての展開が期待される。

本研究を遂行するにあたり、東北大学蔡斌氏、松井崇之氏、安田周平氏のサポートに感謝する。また、本研究の一

表1 各プロセス技術の工程数および時間の比較 (マルチモード光導波路作製の例)。

プロセス技術	プロセス工程数および時間
フォトリソグラフィ+エッチング (従来技術)	29 工程, 450 分
ソフトリソグラフィ+直接露光	12 工程, 115 分
自己形成光導波路	6 工程, 20 分

部は、NEDO「次世代 FTTH 構築用有機部材開発プロジェクト」の成果である。

文 献

- 1) 戒能俊邦監修：“次世代 FTTH 構築用有機部材”，情報・通信光有機材料の最新技術（シーエムシー出版，2007）pp. 243-307.
- 2) 蔵田和彦：“光データ伝送の基礎”，エレクトロニクス実装学会誌，**9** (2006) 66-70.
- 3) T. Watanabe, M. Amano, M. Hikita, Y. Shuto and S. Tomaru: “Novel “serially grafted” connection between functional and passive polymer waveguides,” *Appl. Phys. Lett.*, **65** (1994) 1205-1207.
- 4) Y. Suzuki, K. Komatsu, T. Kaino and Y. Honda: “Serially grafted optical waveguide fabrication of NLO polyimide and transparent polymers,” *Opt. Mater.*, **21** (2002) 521-524.
- 5) M. Kagami, T. Yamashita and H. Ito: “Light-induced self-written three-dimensional optical waveguide,” *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 1079-1081.
- 6) Y. Xia and G. M. Whitesides: “Soft lithography,” *Angew. Chem. Int. Ed.*, **37** (1998) 550-575.
- 7) N. Tanigaki, K. Yase and A. Kaito: “Oriented films of insoluble polymers by the friction technique,” *Thin Solid Films*, **273** (1996) 263-266.
- 8) M. Irie: “Diarylethenes for memories and switches,” *Chem. Rev.*, **100** (2000) 1685-1716.
- 9) O. Sugihara, H. Tsuchie, H. Endo, N. Okamoto, T. Yamashita, M. Kagami and T. Kaino: “Light-induced self-written polymeric optical waveguides for single-mode propagation and for optical interconnections,” *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **16** (2004) 804-806.

(2007年9月27日受理)