

# 光配線を実現する自己形成光導波路技術

各 務 学

## Light-Induced Self-Written Optical Waveguide Technology for Optical Wiring

Manabu KAGAMI

Applications of the Light-Induced Self-Written (LISW) optical waveguide were considered as technology of optical wiring between chips and/or optical fibers. An LISW optical waveguide technology is a three-dimensional optical waveguide fabrication technique without an axial deviation automatically formed into photopolymerizing resin, and is expected as technology of reducing the packaging cost of optical components drastically. This paper describes the automatic compensation phenomenon of the axial deviation by the “optical solder” effect used as the principle of the LISW optical waveguide, and the positioning tolerance expansion at the components mounting processes.

**Key words:** light-induced, polymer optical waveguide, LISW, optical wiring, photopolymer

光ファイバー通信は多重化により1回線当たりの通信量を増加させ、ユーザーの負担するコストを低減することにより広く普及している。時分割多重と波長多重が主として併用されているが、後者は実装する光素子の数が多くなるので光素子をつなげる“光インターコネクション”技術は特性とコストを決める重要な技術となっている。この光インターコネクション技術はパッシブアライメントによる実装コストの低減を目指して1990年以降、さまざまな光通信部品間の接続を対象とし研究開発が活発化した<sup>1,2)</sup>。特に、受発光素子と光ファイバーの間を光導波路で結合する技術開発が中心であり、45°ミラーやグレーティング等の光路変換機能を有した光導波路が数多く提案されてきた<sup>3,4)</sup>。光導波路としては、プロセスコストおよび材料コストの小さいポリマー光導波路が民生用途で多く研究されている。図1にパッケージまで考慮した代表的なプロセスを示す。ホットエンボスや鋳型を用いた成型法は従来のフォトリソグラフィ法に比べて製造コストを大幅に低減するが、それでも、端面処理やフィルター挿入、パッケージングに関するプロセス軽減が課題として残っている。一

方、自己形成光導波路は、パッケージ内で自律的に光回路が形成されるため、途中の加工を一切省略できる理想的なプロセスである。ただし、コアの形成に関しては多くの研究機関で検討されているが、実用化に向けて必須のクラッド部の形成に関してはほとんど議論されていないのが現状である。本稿では、コアとクラッドの全固化を考慮した自己形成導波路技術、特に、各種光インターコネクションへの応用について紹介する。

### 1. 自己形成光導波路

光硬化性樹脂はモノマー/オリゴマーに光重合開始剤を添加した溶液であり、一般的に光重合開始剤が感度を有する波長帯の光を照射することにより連鎖反応により重合硬化するものである。この光硬化性樹脂中で重合体に閉じ込められながら連続的に重合領域を軸状に成長させて得られる透明な重合体を、自己形成光導波路<sup>5)</sup>とよんでいる。この現象に関する実験的報告は、1993年に発表されたFriskenの論文<sup>6)</sup>が最も早い。この研究で得られた光導波路はテーパー型であったが、その後、Kewitschらの数値シミ

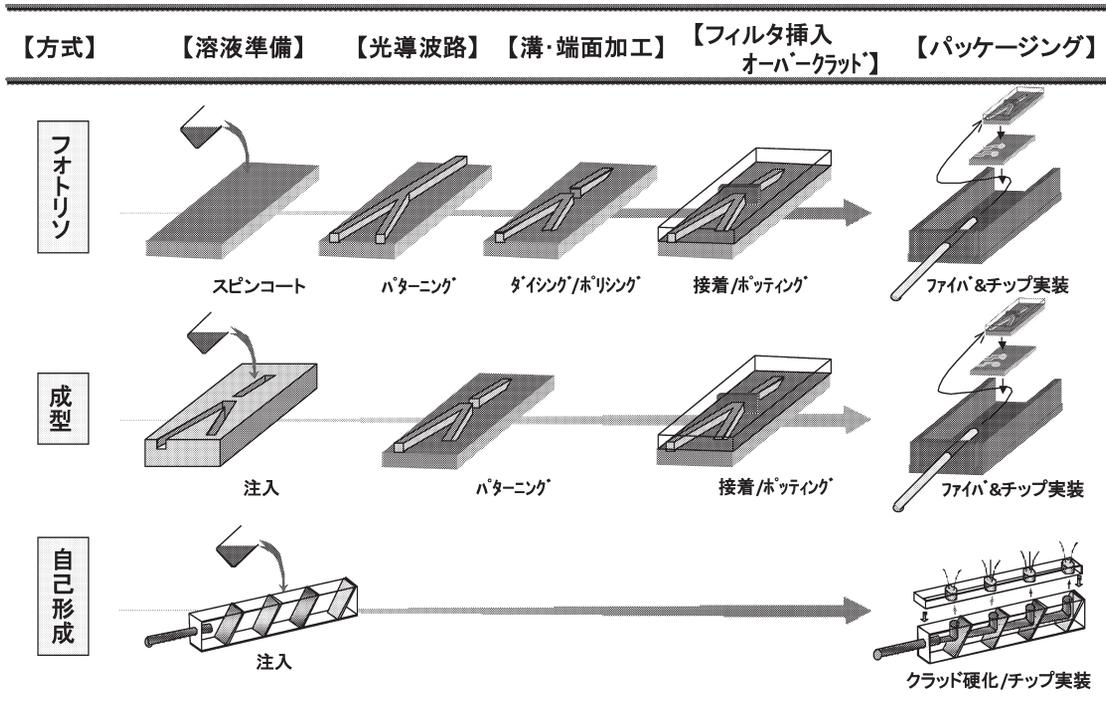


図1 ポリマー材料を用いた光通信モジュールの作製と実装比較例。

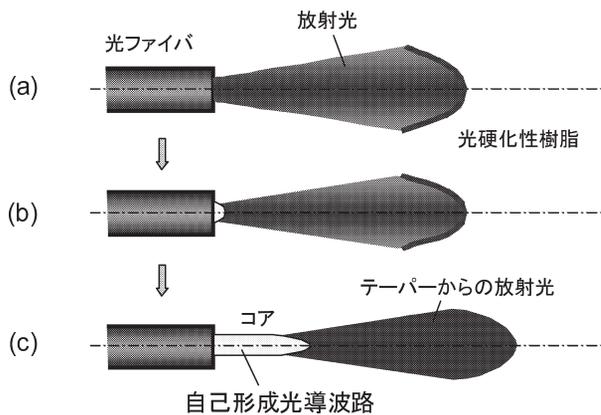
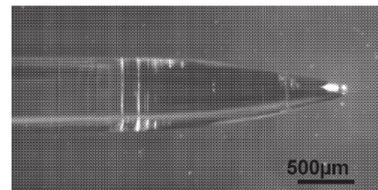


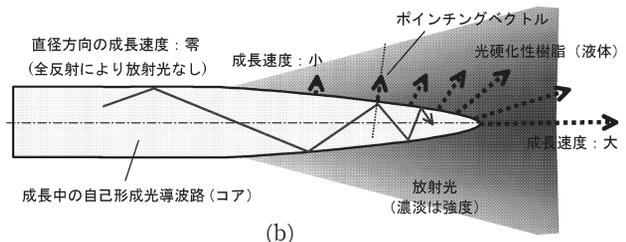
図2 自己形成光導波路の成長。

ュレーション<sup>7)</sup>により光導波路が連続的に形成可能であることが示唆された。当初は導波路形状の制御が不十分であること、クラッドが液体であることなどから、現象報告が主体であった。その後、光デバイス間の接続<sup>8-10)</sup>やクラッドの固形化技術<sup>9,11)</sup>等が発表され、多くの機関で研究されている。

光硬化性樹脂に光ファイバーからの出射光（レーザー直接光でも可）を照射すると（図2 (a)）、光強度の最も強い光ファイバーのコア中心部から重合（硬化）が始まる（図2 (b)）。硬化領域は分子密度上昇により屈折率が高くなり、重合体と樹脂液の界面に全反射により閉じ込められ、重合物が連続的に成長してコアとなる（図2 (c)）。こ



(a)



(b)

図3 自己形成光導波路の先端部からの光放射。(a) アクリル系光硬化性樹脂で作製した導波路先端部の写真、(b) 均一径の導波路が形成されるメカニズム説明図。

で、光ビームの広がり角、光硬化性樹脂の硬化前後の屈折率差と透明性、重合反応速度等の整合性が得られると（擬似ソリトン<sup>12)</sup>ともよばれる）、直径が一樣な自己形成光導波路が高速形成される<sup>11)</sup>。この現象を図3で示すと、先鋭の自己形成光導波路を伝送する光線は、ダウンテーパにおいて徐々にコア/液体クラッド界面への入射角が小さくなるとともに、界面に垂直方向のエネルギーの流れ（ポインティングベクトル）が増し、先端部周辺から強く放射することになる。このため、エネルギーの放射が大きい軸方

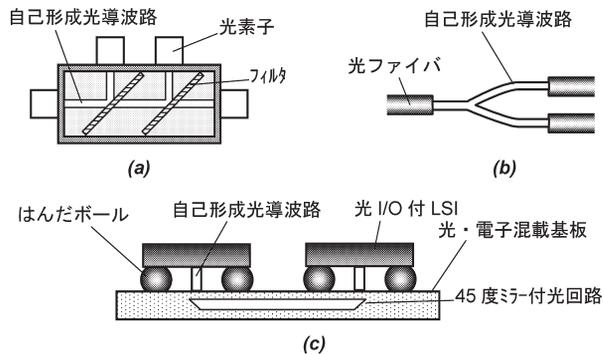


図4 自己形成光導波路によるチップ間光インターコネクションの例。(a) 複数の光素子（受発光素子や光ファイバー、等）間をフィルターを介して接続、(b) フィルターを用いず自己形成光導波路の特性を利用した分岐接続、(c) VCSELやPDを搭載したLSIと光・電子混載基板間のインターコネクション。

向の成長が最も早くなる。一方、テーパ側面からの放射光は相対的に強度が低いためゆっくりと成長する。ここで、テーパ角が $0^\circ$ （一様直径）になったとき、すべての伝搬モードが全反射するように条件を設定しておけば、直径方向の成長が停止して前記の擬似ソリトン現象が発現する。いいかえれば、直径が細い（先端部）ほど横方向の成長速度が速く、ちょうど平行になったときに成長が止まるように励振モード分布を与えればよいことになる。

## 2. 光インターコネクション

### 2.1 適用デバイス

自己形成光導波路は光の進行方向に沿って成長するので、成長経路中では原理的に光軸のずれが生じない。この特性を利用して、図4に示すようにさまざまなデバイスに光インターコネクションが適用検討されている。例えば、自己形成光導波路が成長する経路中にあらかじめ照射波長に対してハーフミラーとなるフィルターを挿入しておくと、二分岐導波路が得られる。このフィルターを通信波長においてWDMフィルターとして設計してあれば、図4(a)に示すような合分波モジュール<sup>13)</sup>が得られる。また、図4(b)に示すようなフィルターを用いないY分岐導波路作製方法として、①LP<sub>11</sub>モードを励振して、遠視野像に対応したシングルモードの分岐導波路を作製する方法<sup>14)</sup>と、②2本の光ファイバーからそれぞれ同時成長したマルチモードの自己形成導波路を合流させ、その後は1本のマルチモードの光導波路として成長させる方法<sup>15)</sup>が開発されている。また近年、光・電子混載基板の開発が盛んになり、図4(c)に示すようなVCSELと光導波路のインターコネクションを想定した自己形成光導波路も報告されている<sup>16)</sup>。

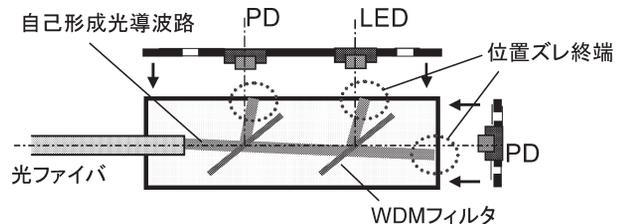


図5 光ファイバーまたはWDMフィルターの実装ミスによって生じる自己形成導波路の位置ずれ終端。

### 2.2 軸ずれ補正を伴う光インターコネクション

例えば、図4(a)に示した光インターコネクションにおいて、光導波路を成長させる光ファイバーや反射させるフィルターに軸ずれや角度ずれが生じていた場合、得られる自己形成光導波路の終端位置は本来パッシブ結合されるべきチップの搭載位置とずれてしまう（図5参照）。

この問題を解決するために、“光はんだ”現象<sup>17)</sup>を用いる。例えば、対向する2本の光ファイバー端から同時に光照射しての光導波路の結合技術は、図6に示すように、軸ずれが生じていたとしても、両光導波路先端からの出射光が重畳された結果、重畳部の放射強度が最も高まり（図6(a)）、光導波路がこの強度の強い方向に湾曲成長して両光導波路が結合する（図6(b)）。図6(c)～(e)に、コア径約1mmのプラスチック光ファイバーを用いた光はんだの実験例を示す。コア径の約半分の軸ずれ量があるにもかかわらず、良好に接続されている様子がわかる。この“光はんだ”による接続技術は、“SOLNET<sup>18)</sup>”や“自己形成接続<sup>19)</sup>”ともよばれている。図7に、シングルモード光ファイバー間のインターコネクション<sup>20)</sup>と、図5において指摘した合分波光回路での軸ずれ補正に応用した例<sup>10)</sup>を示す。図7(b)に示すように、位置決めされた個所から光ファイバーを介して自己形成光導波路を成長させて、対向して成長してくる光導波路と接続させることにより、所定位置に光導波路が終端されているのでパッシブ実装される光素子との高精度位置決めができることになる。

## 3. クラッド形成方法

前章までの説明は、光硬化性樹脂中でのコア部形成法に関するものであり、クラッド部は液体（未反応モノマー）のみであった。この状態でクラッド部を重合反応させると、コアとの屈折率差がなくなり、導波路としての機能を失ってしまう。筆者のグループでは、コア径や屈折率差に応じて以下に示す3種類のコアとクラッドの一連の自己形成法を提案している。

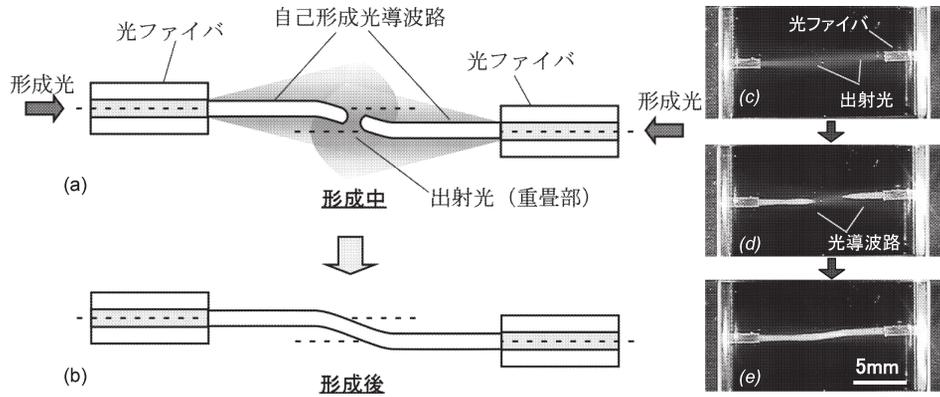


図6 光はんだによる光ファイバー間の光インターコネクション. (a), (b) 軸ずれ補正の説明図, (c)~(e) 軸ずれのある10mmの間隔で自己形成光導波路が接続される様子を示す時間分解写真.

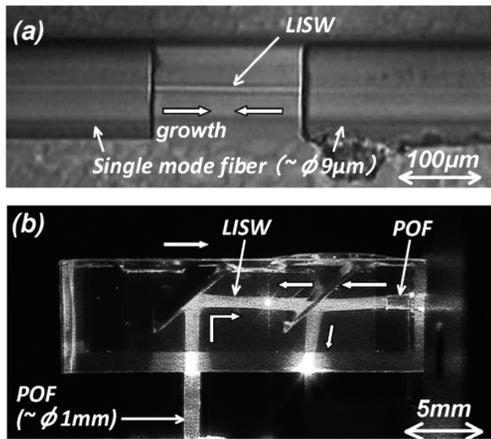


図7 自己形成光導波路 (LISW: light-induced self-written optical waveguide) による, (a) シングルモード光ファイバーの光はんだ接続, (b) 合分波光回路におけるフィルター角度ずれ補償光はんだ接続.

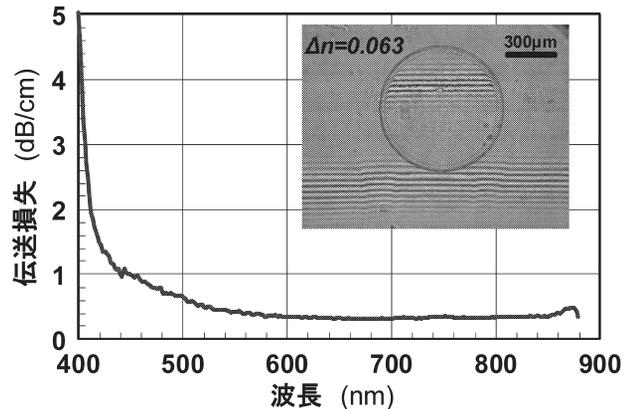


図8 コア径730 $\mu\text{m}$ のPOFで形成したクラッド置換型自己形成光導波路の伝送損失スペクトルと導波路断面の二光束干渉顕微鏡写真.

### 3.1 クラッド置換型<sup>13)</sup>

クラッド置換型の自己形成光導波路は、コア成長後に未反応の光硬化性樹脂を除去して低屈折率の光硬化性樹脂で置き換えるものであり、コアが太くて剛直である場合に有効である。図8に、大口径POF (plastic optical fiber) によって作製された自己形成光導波路の損失スペクトルと断面の屈折率分布を示す。可視光領域において低損失であり、断面が真円で、かつ良好なステップインデックス型の高屈折率差光導波路が得られている。屈折率差は、用いる2種類の光硬化性樹脂の組み合わせによって広く選択できる。

### 3.2 コア選択重合型<sup>11)</sup>

コア径の小さい光導波路や図4(c)で示した狭空間での光導波路形成は、未反応モノマーの除去が応力的に耐えられないか、空間的に不可能であるため、簡便なクラッド置

換型の作製方法を用いることが難しい。このような場合は、置換工程がない一液で屈折率のコントラストを与える選択重合法を用いる。図9に示すように、コア選択重合型自己形成光導波路は、硬化後の屈折率が相対的に高いモノマーAと低いモノマーBの混合液を用いる。例えば、Aをラジカル重合型のアクリル系モノマーとし、Bをカチオン重合型のエポキシ系モノマーとする。コア形成用波長( $\lambda_w$ )に対して感度を有するラジカル用の重合開始剤と、感度を有しないカチオン用重合開始剤をおのおの所定量配合しておく(図9(a))。波長 $\lambda_w$ の光を光ファイバーから混合液に照射すると、混合液中のモノマーAが選択的に重合し、前述の現象で自己形成光導波路が成長する(図9(b))。この際、成長している導波路先端では重合領域からモノマーBを拡散により排除しながら成長している。導波路の先端が密着固定された時点で周囲より紫外線照射を行い、クラッドを形成する(図9(c))。この場合、両開

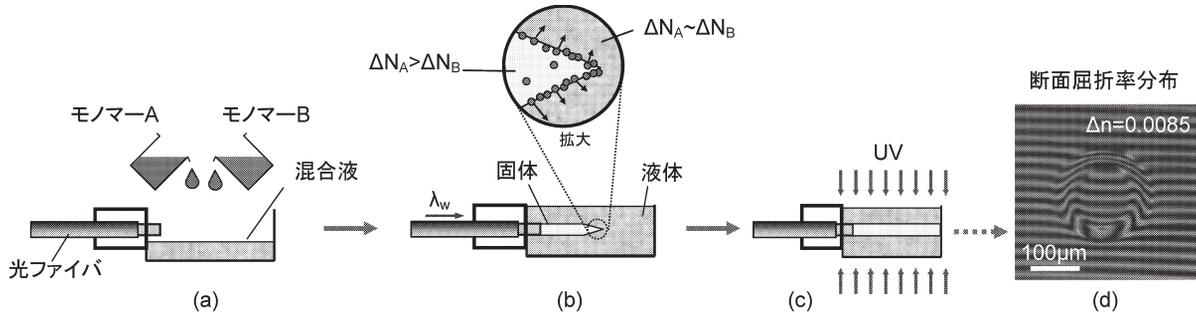


図9 コア選択重合型自己形成光導波路の作製ステップ。

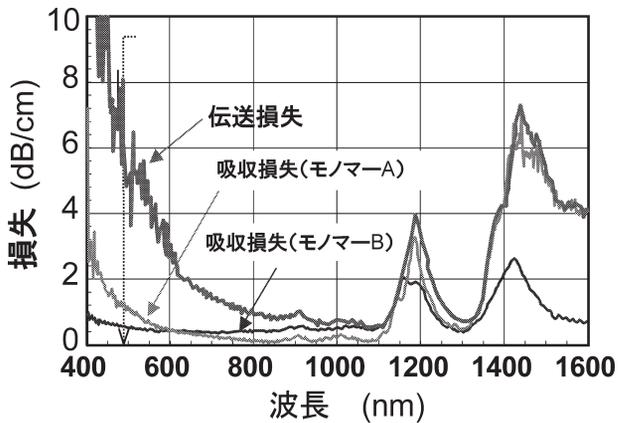


図10 コア選択重合型自己形成光導波路の伝送損失スペクトル。

始剤は紫外線で反応する必要がある。例えば、初期の混合液中における A および B の各成分（モノマーとポリマーを含む）濃度に対する変化量をそれぞれ、 $\Delta N_A$ 、 $\Delta N_B$  とした場合、コア内の濃度は  $\Delta N_A > \Delta N_B$  となり、全硬化後においてもクラッドに対する正の屈折率差  $\Delta n$  が形成される。GI100/140 の石英光ファイバーを用いて、 $\lambda_w = 488$  nm（出力約 200 mW）の光を照射して得られた全固化後の自己形成光導波路断面の屈折率分布像を二光束干渉顕微鏡で調べた（図 9 (d)）。コア/クラッドの境界面においてモノマーの濃度勾配がみられるが、コア中心部はほぼ均一なステップ型の屈折率分布を呈している。

GI100/140 の光ファイバーで作製された、自己形成光導波路の伝送損失スペクトルを図 10 に示す。低屈折率ガラスキャピラリー中で測定した両モノマー（溶液状態）固有の伝送損失に比して、混合液中から得られた自己形成光導波路の伝送損失が波長 800 nm 以下で急激に大きくなっている。これは 2 種類のモノマー間の相分離、または、反応速度差による海島構造によるレイリー散乱に起因するものと考えられる。これらの散乱サイズは材料や作製条件に大きく依存するとともに、影響を及ぼす波長帯が変動するので注意が必要である。

### 3.3 クラッド選択重合型<sup>21)</sup>

モノマーの拡散速度に律速されるスループットや屈折率差の確保の点で、コア選択重合型の適用が難しい大口径光ファイバーに対しても、生産性を高める方法を検討している。図 11 に作製手順を示す。クラッド選択重合型の自己形成光導波路は、波長  $\lambda_w$  に対してモノマー A のみが重合反応し、かつ、硬化後の屈折率が  $A < B$  となる 2 種類のモノマーで混合液を作製する（図 11 (a)）。同様の原理で、混合液中のモノマー A のみを選択重合する（図 11 (b)）。この際、コア領域中の高屈折率モノマー B がコア領域外へ拡散しないよう、極力高速で成長させる。この結果、硬化したコア領域中には混合液中と同程度の濃度（ $\Delta N_A \sim \Delta N_B \approx 0$ ）で B 成分が未反応モノマーとして分散している（図 11 (b')）。この状態で、光を照射し続けると、コア内

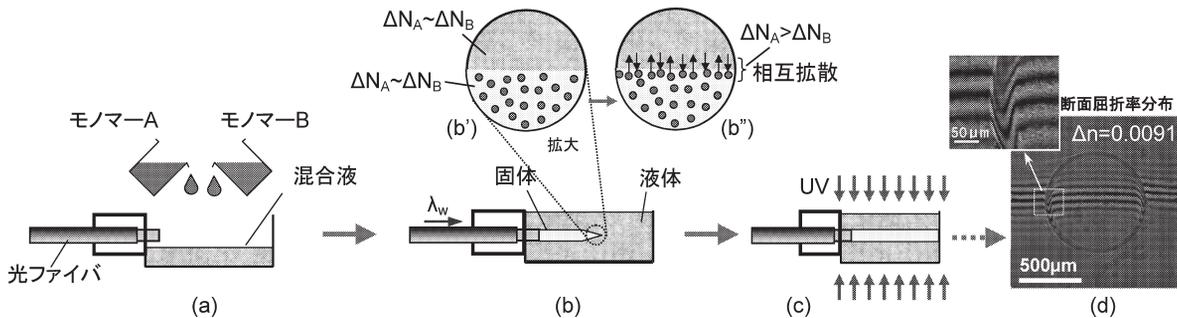


図11 クラッド選択重合型自己形成光導波路の作製手順。

部からの散乱光（波長  $\lambda_w$ ）により，コア/クラッドの境界面に低屈折率モノマー A が選択的に重合する．同時に，コア領域中では一方のモノマーのみが消費されて重合しているので，境界部では液体モノマーの濃度勾配が生じており，相互拡散が進行している．これら両者が同時に発現した結果，低屈折率成分が相対的に高くなる ( $\Delta N_A > \Delta N_B$ ) 領域が厚さ数十  $\mu\text{m}$  で形成されクラッドの機能を果たす (図 11 (b'))．最後に，デバイス全体を紫外線により照射することで，周囲の混合モノマー，および，コア中の未反応モノマーを一括で硬化させて全固形デバイスが得られる (図 11 (c))．一例として，得られた光導波路の断面屈折率分布を図 11 (d) に示す．低屈折領域の幅や  $\Delta n$  は材料や形成条件によって可変である．理想的には W 型屈折率分布が得られる．本方法により，成長速度がコア径に大きく依存しない導波路作製が可能になる．

本方法の課題として，現在までに得られている伝送損失が可視光領域において約 1.7 dB/cm と大きく，かつ，屈折率差が最大  $\Delta n = 0.009$  程度と小さいことにある．材料およびプロセスの改良が進められ，コア径 50~200  $\mu\text{m}$  の自己形成光導波路についていっそうの生産性向上が図られることを期待する．

自己形成光導波路技術を用いたチップ間配線について，筆者の研究室で開発された手法を中心にまとめた．自己形成光導波路はその形成原理より光導波路の成長経路内での光路ずれは生じないが，従来は終端位置が厳密に制御ができていなかった．本稿では，使用する光ファイバーや経路に挿入するフィルター等の実装ずれに伴う自己形成光導波路の終端位置を補正しながら光インターコネクションを行う“光はんだ”について適用例を示した．これらの成果は，光素子と光導波路回路などをパッケージ内で実装する光通信モジュール作製技術<sup>22)</sup>として精力的に検討されている．さらには，光・電子混載基板を用いた LSI と光配線層との多芯高密度実装<sup>19,23)</sup>の検討も開始されている．自己形成光導波路技術は，対象とする光ファイバーのサイズも直径 10~1000  $\mu\text{m}$  以上であり，ほぼすべての光ファイバーに対応可能である．自己形成光導波路技術の最大の特徴は，光導波路形成からパッケージまで無調芯で一括形成ができることである．きわめて低コスト化が期待できる技術であり，実用化に向けて，低損失性，耐熱性，高信頼性等，さまざまな検討がなされている．

## 文 献

- 1) 岩田 穆：“超大規模集積回路における光インターコネクション—電気配線と光配線—”，光学，**25** (1996) 126-131.
- 2) 茨木 修，堀 彰弘，熊井晃一，広瀬直宏：“高分子材料を利用した光電気複合実装技術”，光学，**31** (2002) 88-93.
- 3) S. Hiramatsu and M. Kinoshita: “Three-dimensional waveguide arrays for coupling between fiber-optic connectors and surface-mounted optoelectronic devices,” J. Lightwave Technol., **23** (2005) 2733-2739.
- 4) K. Kintaka, J. Nishi, K. Shinoda and S. Ura: “WDM signal transmission in a thin-film waveguide for optical interconnection,” Photonics Technol. Lett., **18** (2006) 2299-2301.
- 5) 庄司 暁，河田 聡：“収束レーザービームによる光硬化性樹脂中のマイクロ・ファイバー構造の自己形成”，第 59 回応用物理学学会学術講演会予稿集，16a-ZP-5 (1998) p. 1120.
- 6) S. J. Frisken: “Light-induced optical waveguide tapers,” Opt. Lett., **18** (1993) 1035-1037.
- 7) A. S. Kewitsch and A. Yariv: “Self-focusing and self-trapping of optical beams upon photopolymerization,” Opt. Lett., **21** (1996) 24-26.
- 8) 畠山 巖，高塩健次，飛田耕一：“導波光によるモード結合導波路の直接作製”，第 45 回応用物理学関係連合講演会予稿集，28a-SG-10 (1998) p. 1104.
- 9) S. S. Sarkisov, M. J. Curley, D. E. Diggs, A. Wilkosz, V. V. Grimalsky and G. Adamovsky: “Dark spatial solitons in photopolymer films for optical interconnections,” Opt. Eng., **39** (2000) 616-623.
- 10) T. Matsui, T. Yamashita and M. Kagami: “Improvement in positioning accuracy of light-induced self-written polymeric optical waveguide using an “optical solder” effect,” Jpn. J. Appl. Phys., **45** (2006) L1033-L1035.
- 11) M. Kagami, T. Yamashita and H. Ito: “Light-induced self-written three-dimensional optical waveguide,” Appl. Phys. Lett., **79** (2001) 1079-1081.
- 12) K. Dorkenoo, O. Crégut, L. Mager, F. Gillot, C. Carre and A. Fort: “Quasi-solitonic behavior of self-written waveguides created by photopolymerization,” Opt. Lett., **27** (2002) 1782-1784.
- 13) M. Yonemura, A. Kawasaki, S. Kato, M. Kagami and Y. Inui: “Polymer waveguide module for visible wavelength division multiplexing plastic optical fiber communication,” Opt. Lett., **30** (2005) 2206-2208.
- 14) 富木政宏，伯川弘昭，岡本尚道，山下達弥，各務 学：“自己形成導波路における分岐導波路の作製”，電子情報通信学会技術報告，**OME2006**, 105 (2006) 27-30.
- 15) S. Shoji, S. Kawata, A. A. Sukhorukov and Y. S. Kivshar: “Self-written waveguides in photopolymerizable resins,” Opt. Lett., **27** (2002) 185-187.
- 16) Y. Obata, M. Kanda and O. Mikami: “Self-written waveguide on a VCSEL-emitting window using a photomask transfer method,” IEEE Photonics Technol. Lett., **18** (2006) 1308.
- 17) N. Hirose, T. Yoshimura and O. Ibaragi: “Optical solder effects of self-written waveguides in optical circuit devices coupling,” *Electronic Components and Technology Conference* (2001) pp. 223-228.
- 18) T. Yoshimura, M. Ojima, Y. Arai and K. Asama: “Three-dimensional self-organized microoptoelectronic systems for board-level reconfigurable optical interconnects—Performance modeling and simulation,” J. Sel. Top. Quantum Electron., **9** (2003) 492-511.
- 19) H. Hanajima, Y. Obata, H. Ozawa, M. Kanda and O.

- Mikami: "Self-written waveguide optical pin fabricated using photomask transfer method," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **18** (2006) 2020-2022.
- 20) 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.
- 21) T. Yamashita and M. Kagami: "Fabrication of light-induced self-written waveguides with a W-shaped refractive index profile," *J. Lightwave Technol.*, **23** (2005) 2542-2548.
- 22) M. Kagami, T. Yamashita, M. Yonemura and T. Matsui: "Light-induced self-written optical waveguides," *IEICE Trans. Electron.*, **E90-C** (2007) 1061-1070.
- 23) T. Yoshimura, T. Inoguchi, T. Yamamoto, S. Moriya, Y. Teramoto, Y. Arai, T. Namiki and K. Asama: "Self-organized lightwave network based on waveguide films for three-dimensional optical wiring within boxes," *J. Lightwave Technol.*, **22** (2004) 2091-2100.

(2007年10月11日受理)