

自己形成光導波路を用いた通信用3次元光回路

各務 学, 山下達弥, 河崎朱里

Three-Dimensional Optical Waveguide Circuits Using a Light-Induced Self-Written Technology

Manabu Kagami, Tatsuya Yamashita, Akari Kawasaki

要 旨

車載通信等において高速性, 低コスト, 軽量性を同時に満足するためには光波長多重通信が有望と考えられる。我々は低コストの光通信モジュールを独自開発の自己形成光導波路技術により実現した。本技術は光硬化性樹脂の混合液中での高屈折率成分のみの選択重合と, 光ファイバ出射光によって誘起される屈折率上昇による自己集束効果を利用している。すなわち, 屈折率および硬化波長の異なる2種類の光硬化性樹脂 (それぞれ λ_1 , λ_2 とすると, $\lambda_1 > \lambda_2$ の関係) からなる混合液中に光ファイバを挿入し, 波長 λ_1 の光を照射することで

光ファイバ先端から均一直径の固形光導波路を成長させることが可能となる。自己形成により光ファイバの位置決め工程やパッケージ工程が省略されるため安価な光通信モジュールの作製が期待できる。特に, 光波長多重通信用の3次元光モジュール形成に必要な2種類の光要素部品 (波長選択フィルタ通過後の導波路の再成長, および45°ミラー表面での90°反射成長) の実現を確認した。最後に, これらの要素技術を利用した双方向通信モジュールおよび波長多重モジュールについて提案する。

キーワード

光導波路, 光ファイバ, 光硬化性樹脂, 光通信, 波長多重, 光集束効果, 選択重合

Abstract

In order to simultaneously realize high-speed data transmission, low-cost and a lightweight network in automotive applications, a wavelength division multiplexing (WDM) optical communication system has been considered to be a suitable solution. We developed a light-induced self-written (LISW) waveguide technology for a three-dimensional (3-D) optical module fabrication. This technology utilizes the selective polymerization of photo-polymerizing resin blends and the self-focusing phenomenon of the optical fiber's outgoing beam by a refractive index increase in the material hardening process. When an optical fiber is soaked in two kinds of photo-polymerizing resin blends in which the hardening

wavelength differs ($\lambda_1 > \lambda_2$), and then the resin is irradiated with λ_1 light through the fiber, a hardened polymer waveguide having a uniform diameter geometry would grow from the fiber tip. This method does not need any fiber alignment and packaging process; therefore, cost-effective module fabrication can be expected. We also confirmed two key component formations necessary for the 3-D WDM module: regrowth of the waveguide from the backside of a WDM filter after passing through it, and a 90° reflected waveguide using a 45° mirror. Finally, we proposed the module structures for a bi-directional and WDM application.

Keywords

Optical waveguide, Optical fiber, Photo-polymerizing resin, Optical communication, WDM, Self-focusing effect, Selective polymerization

1. はじめに

インターネットの急速な発展に伴い、ブロードバンド（高速通信）の各家庭への普及も急速に進んでいる。多くの家庭ではすでに電話、パソコン、CATV等が宅外のネットワークと接続している。今後、情報家電と呼ばれる通信機能を有したマルチメディア機器や白物家電が宅外ネットワークに接続することで、便利さを追求した多様なサービスが利用できるようになる¹⁾。宅内ネットワークは有線と無線に大別でき、それぞれ幾つかの規格が提案されていて激しいデファクト競争を始めている²⁾。宅内ネットワークのバックボーンおよび動画のような大容量データを扱うマルチメディア機器用の通信媒体としては、高速性、秘話性の点で最も優れた有線の光ファイバが有望である。

一方、自動車においても、住宅内同様の快適なマルチメディア環境を望むユーザーが増えてきており、マルチメディア系に光ファイバネットワークを搭載した車がすでに登場している³⁾。光ファイバ通信は高速性に優れるだけでなく、耐雑音（放射雑音、誘導雑音）にも優れているため、エアバックなどの安全系にも搭載されるようになった⁴⁾。

これら住宅や自動車の分野で問題となるのが通信システムの標準化、信頼性、コストである。標準化に関しては、現在、住宅、自動車ともこの標準化作業が進んでおり、2003年頃には策定される予定である。注目すべきは、これら両分野の少なくとも物理層レベルでは、互換性を有した規格が主として検討されており、将来、シームレスにマルチメディア機器を接続できるようになると考えられている⁵⁾。信頼性に関しては、すでに実車搭載されている高級車において実証されている。残された大きな課題は、性能、信頼性を維持したまま大衆車レベルまで搭載可能な価格で実現できるかということになる。

本稿においては、これら民生分野における光ファイバ通信システムを安価に実現するための光通信モジュール形成技術について報告する。光モジュールは光ファイバの両端に接続され、光電気信号変換を高効率で行うデバイスであり、従来レンズや光学フィルタを精密に組み付け調整して作製していた。近年、光導波路を用いてこれらの煩雑な作業を簡易化するのが一般的となって来ているが、依然として光導波路と受発光素子との結合（光インターコネクション）がボトルネックとなり、民生分野に普及可能なレベルまで低コスト化が進んでいない⁵⁾。ここで、光導波路とは光ファイバと同様の機能を有した

より微細な光伝送媒体であり、両者の違いは電気通信に例えると前者がプリント配線で、後者が電線に相当する。本報告で提案する光モジュールの低コスト化のアプローチとして、2章において、光ファイバと受発光素子との精密組込み調整を省くための自己形成光導波路技術、3章ではその光学特性と3次元光回路形成、4章においては、信号チャネル当たりの部品点数（光ファイバやコネクタ、等）を減らすことが可能な光波長多重モジュール技術について報告する。

2. 自己形成光導波路の原理

2.1 光硬化性樹脂中での選択重合

光照射によって屈折率が変化するフォトリフラクティブ材料中での光の自己集束現象は古くから知られている。自己形成光導波路⁶⁾は当社で開発された技術で、フォトリフラクティブ材料より1桁以上大きな屈折率変化する光硬化性樹脂混合液中に光ファイバを用いて光照射することにより、前記光集束現象と選択重合（混合液中の高屈折率成分のみを重合）を同時発現させるものである。光導波路を自己組織化し、光の進行方向に沿って長尺形成するものであり、軸ずれのない光導波路が容易に形成できる特徴がある⁶⁾。近年幾つかの機関で光硬化性樹脂中への光導波路形成が試みられたが⁷⁻⁹⁾、コア長が数mm程度と短尺、クラッドが液体という課題が残っていた。本技術でこれらの問題を克服することを目指している。

まず光集束現象を用いた光導波路形成について簡単に説明する。光硬化性樹脂中に屈折率分布型光ファイバを介して波長 λ_w の光を照射する（Fig. 1参照）。光ファイバ出射端からは軸対称の拡がりを持ったガウス形ビームが放射され（出射コーン）、その近視野像（NFP, Near Field Pattern）と呼ばれる端面内光強度分布に比例した屈折率上昇（硬化）により光が集光され出射コーンが小さくなる。これが光集束効果で、「軸対称の屈折率上昇によるレンズ効果 出射コーンの縮小 光エネルギー密度の上昇 軸対称の屈折率上昇によるレンズ効果」といった物理現象の繰り返しにより、出射ビームが光硬化性樹脂の硬化前後の屈折率差で閉じ込めが可能となるまでアップテーパー形の光導波路が形成される。その後、均一直径の光導波路が導波路内のエネルギー密度が硬化閾値を下回るまで直線的に形成される。ここで、円形断面の直線導波路を得るためには、光ファイバ出射光のNFPおよび遠視野像（FFP; Far Field Pattern）が理想的な中心対称性を有している必要があり、そのために

も屈折率分布型光ファイバは有用である。また、用いる光硬化性樹脂の γ 値（露光量と感光深さの関係曲線における勾配）が大きければ屈折率変化は二値化され、ステップ型の屈折率分布が得られる。説明は後述するが、Fig. 2に実際の導波路形成過程の写真を示す。

次に、ラジカル硬化型の樹脂Aとカチオン硬化型の樹脂Bの2種類からなる光硬化性樹脂混合液を用いた自己形成光導波路の作製手順を示す。それぞれの重合過程が異なるため、共重合を生じない組み合わせとなっている。硬化前（液体）の吸収損失をFig. 3

に示す。樹脂A（アクリル系）に用いた光重合開始剤は、 $\lambda_w=488\text{nm}$ に対して若干の吸収感度を有しているが（波長600nm以下で光重合開始剤の吸収端が観測されている）、樹脂B（エポキシ系）に用いた光重合開始剤はこの波長ではほとんど感度がない。また、両樹脂の露光量対屈折率変化（ピーク波長385nmの高圧水銀灯使用）をプロットした結果をFig. 4に示した。樹脂Aは、屈折率がBより大きく、硬化閾値が小さく、 γ 値が大きいことがわかる。A:B=7:3の混合液についても同図中に示した。これらの硬化前後の屈折率値をTable 1にまとめた。混

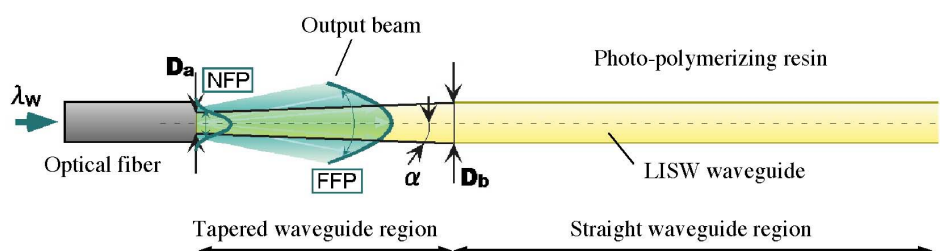


Fig. 1 Growth of light-induced self-written (LISW) waveguide.

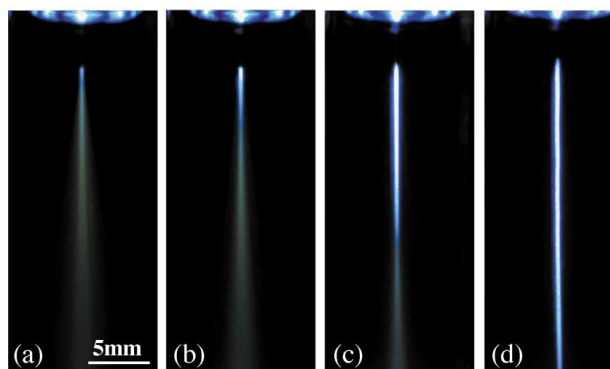


Fig. 2 The growth process of the LISW optical waveguide. A blue laser with a wavelength of 488nm irradiated the resin via an optical fiber, from top to bottom in the picture. (a) Initial stage of irradiation. (b,c) As the waveguide grows, scattering from the cured core became dominant (blue color portion in the picture). (d) A straight LISW waveguide (white color portion) about 40 mm long formed at the fiber tip.

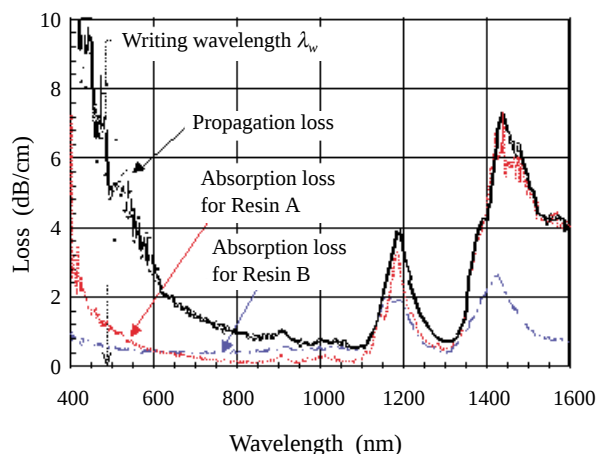


Fig. 3 Absorption spectra of the photo-polymerizing resins used, (before hardening), and propagation loss spectra of the fabricated LISW optical waveguide.

合液を用いた場合でもFig. 2と全く同じ導波路形成過程が観察できる。(a) 光ファイバからの出射光に沿って黄色い蛍光が観測される。(b) 照射を続けると、光ファイバ先端から樹脂Aのみが選択重合により硬化し(樹脂Bのモノマは導波路外に排除)、長尺で均一直径の導波路コアが形成される。硬化が進むにつれて散乱光強度が増加し、青色(ゲル状態)から白色(実際の散乱色は青色だが、硬化部からの強い散乱光により白く観測される)に変化する。(c) 照射光強度と樹脂の透過率にもよるが、40mm以上の固体の光導波路が液体クラッド中に20秒程度(コア径

Table 1 Optical properties of used photo-polymerizing resins.

	Material	Refractive index		Hardening wavelength (nm)
		Liquid	Solid	
Resin A	Radical type acrylic	1.482	1.511	< 550
Resin B	Cationic type epoxy	1.453	1.477	< 400

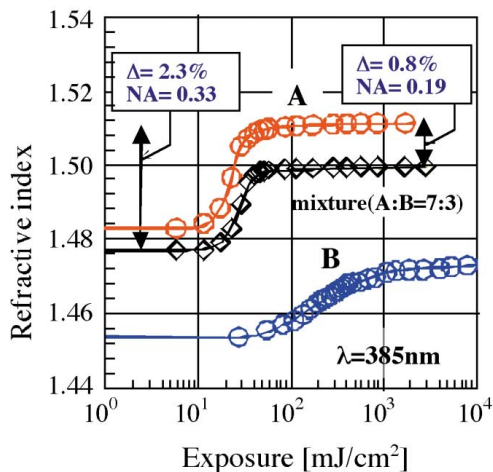


Fig. 4 Refractive index variations against light exposure for two different kinds of photo-polymerizing resins and for a mixture of the two. Relative index differences before and after curing of the cladding material are 2.3% (NA=0.33) and 0.79% (NA=0.19), respectively.

100 μ mの光ファイバ使用時)で形成される。Fig. 4に示したように、この時点での導波路の開口数 (NA) は0.33である。(d) 最後に、セル周囲から波長 λ_c (< 400nm) のランプ光を照射することによりクラッド部を硬化させる。クラッドの屈折率は前記樹脂の混合比によって決定される。この場合、最終的な NAは0.19となる。このようにして、光集束効果と選択重合を同時発現させることにより、光ファイバ先端から無調心で長尺の光導波路が形成でき、さらに、クラッド形成やパッケージングまでの一連の工程が簡便に実現できる。実際に混合液中で形成された自己形成光導波路の伝送損失スペクトルをFig. 3中に併記した。波長0.8-1.1 μ mの範囲で液体と同等の1.0dB/cm以下を達成している。短波長領域での損失増は不完全な選択重合によるミクロ相分離に起因した散乱損失と考えられる。

2.2 導波路形状制御

Fig. 2(d) で得られた自己形成光導波路を溶液クラッド中から取り出し、未硬化部を溶剤で洗浄した後の電子顕微鏡写真をFig. 5に示す。光導波路の直径は

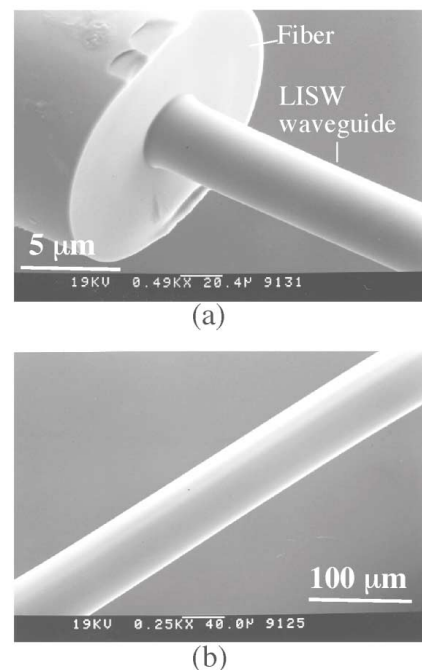


Fig. 5 Example of the formation of an LISW optical waveguide. (a) Growth starting point for the LISW optical waveguide. (b) Waveguide surface close-up photograph.

成長開始直後が約 $50\mu\text{m}$ であり (Fig. 5(a)), 1mm程度のアップテーパ形成後, 20mm以上に渡って直径約 $D_b=70\mu\text{m}$ の均一な光導波路が形成される (Fig. 5(b))。このように良好な均一径導波路が実現できるのは, 後述するテーパ部での伝搬モードの低次化が寄与している。導波路長は光ファイバ出射パワー, 材料の透過率, 粘度等に依存する。また, テーパ長, 光導波路直径は, 前述のNFP, FFPで制御可能である¹⁰⁾。

3. 光学特性

3.1 3次元光回路

自己形成光導波路技術のもう一つの特長である光学フィルタとの相互作用について紹介する。自己形成光導波路の成長進路内に波長 λ_w に対して高反射率または高透過率のフィルタを挿入することで3次元の光回路が容易に得られる。Fig. 6(a) に厚さ $150\mu\text{m}$ の高透過率フィルタ (屈折率1.46) を経路内に入射角 45° となるように5枚挿入後, 光照射により自己形成導波路を作製した様子を示す。導波路径に比べ十分に厚いフィルタ通過後でも, 導波路径はほぼ同一の直径を保ち, 次々にフィルタ裏面から再成長を繰り返している。Fig. 6(b), (c) は, それぞれ自己形成導波路のフィルタ表面への入射部, フィルタ裏面から

の再成長開始部を拡大したものである。密着性, 円形断面性等が良好に得られている様子がわかる。光導波路中へのフィルタの挿入は, 一般的には, 導波路中へ機械加工¹¹⁾やエッチング¹²⁾により溝を形成して行われているが, この技術により光導波路中へのフィルタ挿入が簡便で低損失となる。

また, 表面にアルミニウムを蒸着した高反射率膜へ 45° の入射角で導波路を形成させた場合では, Fig. 7(a) に示したように, 屈折部でエバネッセントや漏光の重なりによる硬化領域が観測されるが, 導波路径がほぼ一定の 90° 光路変換導波路が形成されている様子がわかる。また, 裏面にアルミニウム蒸着した $150\mu\text{m}$ 厚の透明ガラス板にも同じく 45° 入射させた場合の導波路写真をFig. 7(b) に示す。反射を含む光路長約 $420\mu\text{m}$ ($=2 \times 150\mu\text{m} / \sin 45^\circ$) の伝搬により導波路径が約2倍となったが, ガラス表面から自己形成導波路の再伸長が確認できた。光路変換ミラーも機械加工¹³⁾やエッチング¹⁴⁻¹⁶⁾により形成されるのが一般的であるが, 本技術では予めのミラー配置のみで簡便に自己形成される。

これらの実例で示したフィルタとの相互作用では, 光の進行方向に沿って導波路が形成されるので, 接続損失の少ない経路が自動的に選択されている。

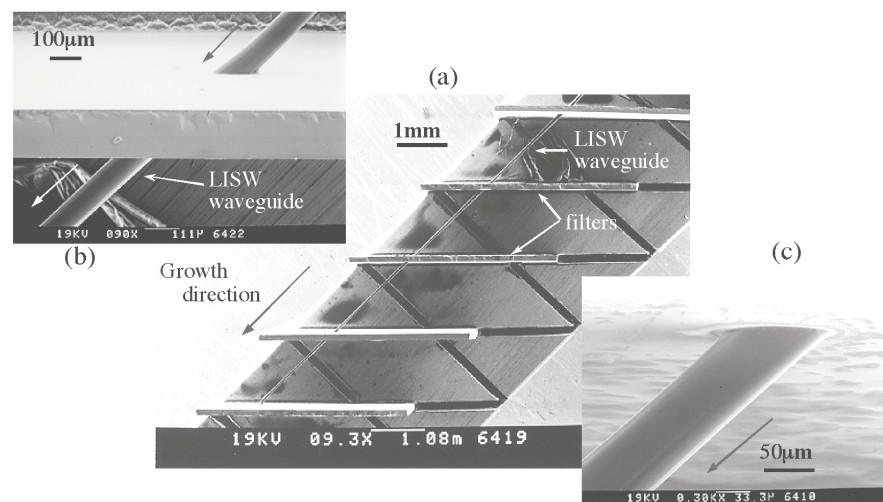


Fig. 6 LISW optical waveguides formed before and after transparent filters in continuity at a 45° incidence angle. (a) A LISW optical waveguide grown by penetrating four transparent glass filters of $150\mu\text{m}$ thickness. (b) Enlarged photograph of the incidence portion to the filter. The optical axis shift caused by the refraction can be observed. (c) Enlarged photograph of the regrowth starting point at the filter back surface.

4．光通信モジュールへの応用

4．1 単線双方向モジュール

前節で示したように，導波路初期部のテーパ構造がコリメートレンズの働きをしており，その結果，多少の空間伝搬を許してもビーム径が広がらないことを確認した。この特性を利用した，新規なモジュールを提案する。

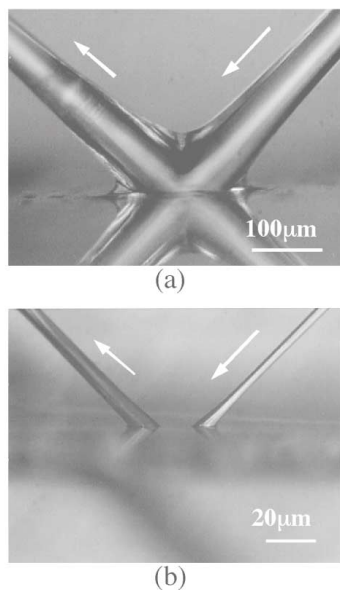


Fig. 7 Optical microscope photographs of 90° bend waveguides fabricated by using a mirror.
(a) The case of reflection at a substrate surface.
(b) The case of reflection at the back surface of 150μm thick transparent glass sheet.

ールを提案する。

Fig. 8に示すような単線双方向モジュールを考える。このモジュールからの送信波長を λ_t ，受信波長を λ_r とする。作製手順としては，光硬化性樹脂中に波長選択性ミラー（ λ_t, λ_w : 透過， λ_r : 反射）とミラーを光ファイバに対して45°平行配置した後に自己形成導波路を作製する。その結果，光ファイバ→受光素子の光結合は光導波路と自由空間伝搬で行われ，発光素子→光ファイバの結合は光導波路内伝搬（波長選択性ミラーは透過）で行われるモジュールが一括形成される¹⁷⁾。ここで，自由空間伝搬において放射光の広がりを受光面より小さいことが望ましい。この点でも自己形成されるテーパ部による伝送モード分布（伝搬光の伝搬角対強度分布で，低次モードほど伝搬角が小さい）の低次化が有用となる。

テーパ伝送路（テーパ角 α ）内では全反射する度に伝搬角 $|\theta| > \alpha$ の光線のみが 2α だけ伝搬角が低角化する（子午光線を想定）。ここで， θ_c は最大伝搬角であり，

$$\theta_c = \sin^{-1}(\sqrt{n_1^2 - n_2^2}/n_1) \quad (1)$$

で定義されている。テーパ光導波路に入射する子午光線の伝送モード分布をFig. 9(a)とした場合，この分布がテーパで伝搬角変換を受けた後（全反射数は1回）のモード分布の変化を同図(b)～(d)に示した。ここで， $\alpha = \theta_c/3$ の場合に変換後の伝搬角分布範囲が最も小さくなることがわかる。この場合，光伝送路内での広がり角は 2α となる。また，波長選択ミラーからの放射光の広がりを波長選択ミラーからの受光面の仰角（ θ_w ）に一致させれば，低損失なモジュールが実現できる。テーパ角は光ファイバ出射端におけ

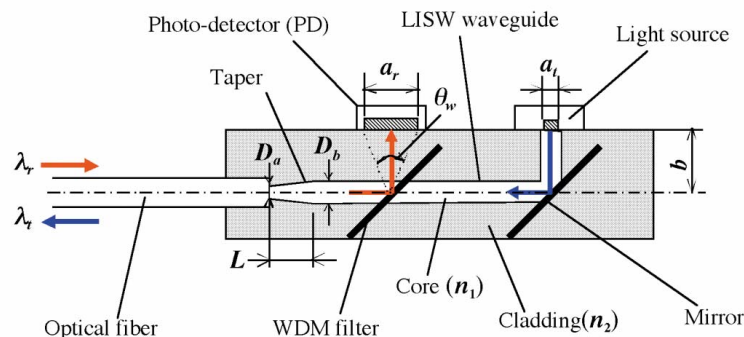


Fig. 8 Proposal of a WDM (Wavelength Division Multiplexing) two-way optical module using LISW waveguides.

るNFPとFFPに強く依存するため、光ファイバへの励振条件を制御すれば良いことになる。自己形成されるテーパ部は実際には直線ではなく放物状になっており、さらに伝搬光の低次化作用が強いと思われる。

200Mbps程度の通信速度を想定すれば、受光素子として $a_r > 300\mu\text{m}$ のSi-pinフォトダイオードが利用できるので、自由空間伝搬長 b を大きく設定することができる。一方、発光素子と光ファイバ間は、Fig. 8(a)で示した90°光路変換導波路を用いればパットジョ

イントで行える。前述の実験例では、コア径 $100\mu\text{m}$ の光ファイバを用いた場合、導波路径が $D_b=70\mu\text{m}$ であり、市販の面発光素子（面発光レーザや共鳴構造発光ダイオード）は発光径が $a_t=10\text{--}50\mu\text{m}$ であるため、トレランスも大きく設定できる。

4.2 光波長多重モジュール

自己形成導波路の他の応用例として、Fig. 10に示すような波長多重用の合分波モジュールがある。複数のフィルタを介しても安定した導波路形成ができ

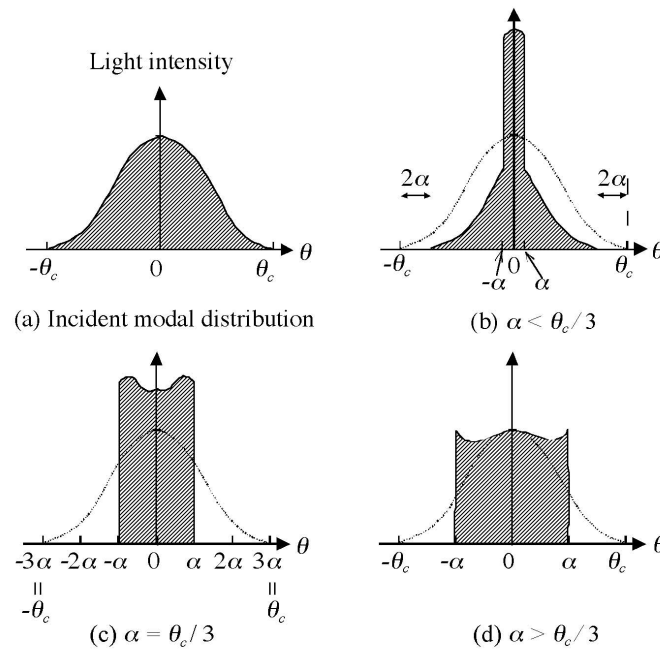


Fig. 9 Modal distribution transfer in a tapered region of LISW waveguide.

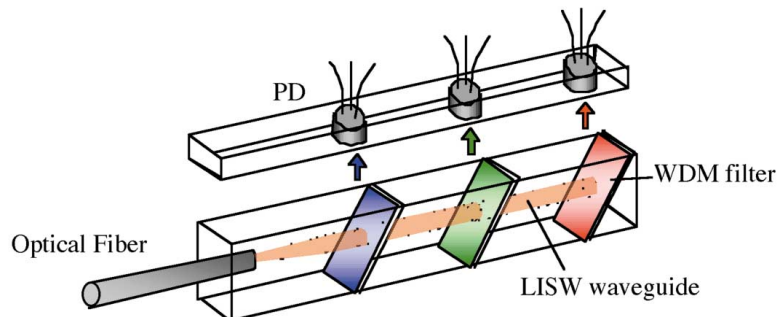


Fig. 10 Application for WDM module.

る本技術を利用すれば、様々なモジュール作製が可能になると考える。ただし、45°入射の波長選択フィルタはLED等から出射される無偏光の光線に対しての分波分解能が悪く、波長間隔として約50nmが必要となる。

4.3 多様な光ファイバへの展開

自己形成光導波路は様々な光ファイバで使用可能である。コア径が10 μ m程度のシングルモード光ファイバから、1mmのマルチモードプラスチック光ファイバまでの適用を確認している。細径ファイバの場合、導波路の成長速度は速いが、液中で自立して直線形状を維持する剛直性の点で問題がある。太径ファイバの場合は、逆に、低屈折率材料のモノマ拡散速度に律速され成長速度が遅い反面、剛直性に優れ大型回路の実現が可能である。今後、光学特性、生産性の点で光ファイバの直径に適した最適な材料系を選択することで、様々な光ファイバに対応した3次元光デバイスの開発と、車・住宅などの民生分野への安価な光通信システムの提案を行っていく予定である。

5. まとめ

自己形成光導波路技術について述べた。現在、混合光硬化性樹脂を用いてコアとクラッドの連続形成が可能となり、透過フィルタ通過後の再成長や反射フィルタによる光路変換を伴う伸長も可能であることを確認した。また、これらのフィルタが複数存在しても安定な導波路形成ができることも確認した。このような導波路形成技術は従来にはなく、細径ファイバへも適用可能な無調心、レンズレスの新たな光回路形成技術であり、新たな光モジュール実現の可能性を示唆している。一例としてこの導波路技術を用いた単線双方向モジュールや、光分波合波モジュールを提案した。

参考文献

- 1) "ブロードバンドは100Mビット/秒から", 日経エレクトロニクス, No.796(2001), 125-153
- 2) 平成12年度経済産業省予算事業「住宅分野の情報システム共通基盤整備事業」, 第2回成果発表会資料 - ホームネットワークと情報家電の未来を見つめて, (2001.11.1)
- 3) "光が開くクルマ市場", 日経エレクトロニクス, No.741(1999), 107-122
- 4) Hurt, H.: "車内LAN向け光リンクの開発動向", 第3回自動車LANセミナーテキスト, 日経エレクトロニクス主催, (2001.11.6)

- 5) "通信機器が家電機器へ, 光モジュール技術がカギ", 日経エレクトロニクス, No.720(1998), 85-93
- 6) Kagami, M., Yamashita, T., and Ito, H.: Appl. Phys. Lett., 79-8(2001), 1079
- 7) Frisken, S.: J. Opt. Lett., 18-13(1993), 1035
- 8) Kewitsch, A. S. and Yariv, A.: Opt. Lett., 21-1(1996), 24
- 9) Shoji, S. and Kawata, S.: Proc. of SPIE, 3740(1999), 376
- 10) 山下達弥, 各務学, 伊藤博: 電子情報通信学会技術報告, OME-99-94(1999), 31
- 11) Uehara, K. and Mizusawa, J.: Proc. of Int. POF Conf. '99, (1999), 52
- 12) Lemoff, B. E., Aronson, L. B. and Buckman, L. A.: Electron. Lett., 34-10(1998), 1014
- 13) Yoshimura, R., et al.: Electron. Lett., 33-15(1997), 1311
- 14) Uchida, T. and Mikami, O.: IEICE Trans. on Electron., E80-C(1997), 81
- 15) Kagami, M., Hasegawa, K. and Ito, H.: Appl. Opt., 36-30(1997), 7700
- 16) Sugihara, O., et al.: Proc. of POF Conf., '97(1997), 144
- 17) Kagami, M., Yamashita, T., and Ito, H.: Proc. SPIE, 4106(2000), 11

(2001年12月19日原稿受付)

著者紹介



各務 学 Manabu Kagami

生年: 1959年。

所属: 第24研究領域。

分野: ポリマ光通信デバイスの研究。
学会等: 応用物理学会, 電子情報通信学会, エレクトロニクス実装学会, 日本光学会, 米国光学会会員。
工学博士。



山下達弥 Tatsuya Yamashita

生年: 1972年。

所属: 第24研究領域。

分野: ポリマ光通信デバイスの研究。
学会等: 応用物理学会, 電子情報通信学会, 日本光学会, 米国光学会会員。



河崎朱里 Akari Kawasaki

生年: 1976年。

所属: 第24研究領域。

分野: 光通信デバイスの評価・解析。