

自己形成導波路によるシングルモード光ファイバの接続

Single-mode Optical Fiber Interconnection by using Self-Written Waveguides

皇甫 俊 玉木研太郎 高瀬英明 江利山祐一 宇加地孝志
Fujun Huang Kentarou Tamaki Hideaki Takase Yuuichi Eriyama Takashi Ukachi

Formation of self-written waveguide between two single-mode fibers has been demonstrated by using an acrylic/epoxy hybrid resin. The core of the waveguide based on the photo polymerization of the acrylic component was formed with 405nm laser irradiation through the fibers. All solid type self-written waveguides were also fabricated by irradiating 365nm UV light on the resin after core formation. The self-written waveguide showed low connection loss at 1,550nm even in the presence of both gap and lateral off-set between two fibers.

1 緒言

光通信部品の製造において光ファイバと導波路とを効率的にかつ低コストで接続することは重要な技術課題である。これまで、低損失接続を達成する為、アクティブ調芯(自動調芯装置を用い、光強度をモニターしながら調芯、接着)の方法が行われてきた。アクティブ調芯における工程時間の短縮と高価な自動調芯機を用いない接続を行うことを目的に、ガイドピンやファイバ固定用V溝を利用するなど、幾つかのパッシブ調芯技術(光強度のモニターなしで接着する方法)が提案されている¹⁾。しかしながら、これらのパッシブ調芯技術は、ガイドピンやV溝の作製に高精度の加工が必要な為、コストアップとなり、さらにアクティブ調芯に匹敵する低接続損失が達成されてない為、実用化にはいたっていない。

このような背景より、特別の装置、加工を用いないパッシブ調芯技術として自己形成導波路を用いた方法が注目されている²⁻⁶⁾。吉村は2次元ビーム伝播法を用いた計算による自己形成導波路の形成機構と2本のシングルモード光ファイバでの接続に本技術が利用できる実験結果を報告しているが、詳細な検討はなされていない⁴⁾。

本論文においては、2本のシングルモード光ファイバの間で形成された全固体型の自己形成導波路を用い、この導

波路のファイバ同士の接続における自己調芯機能について詳細を検討したので報告する。

2 実験

2.1 材料

自己形成導波路の検討には、アクリル成分Aとエポキシ成分Bの混合物からなる光硬化樹脂を用いた。樹脂中に5重量%配合した成分Aは、高屈折率の芳香族ジアクリレートと400~430nmの光に対して感度を有する光ラジカル開始剤を含む。一方、樹脂中に95重量%配合した成分Bは、脂肪族ジエポキシドと400nm以下の紫外線に対して感度を有する光酸発生剤を含む。成分AとB其々の分光スペクトルを図1に示す。本光硬化樹脂は400nm以下の紫外線照射では成分A、Bともに重合するが、400nmを超える波長においてはアクリル成分のみが優先的に重合し、架橋構造を形成するように設計した。表1には各成分の光硬化前後の屈折率値を示す。

2.2 実験装置

本実験装置の配置は、図2(a)に示すように、自己形成導波路形成部と損失測定部の二つの部分から構成される。図2(a)の中心部に示される2本の光ファイバは図2(b)に示すように配置し、ファイバ間には光硬化樹脂を充填し

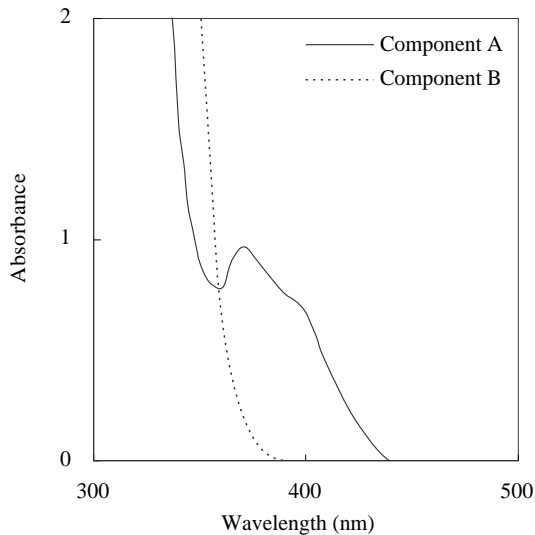


Fig. 1 UV absorption spectra of components A and B before photo curing.

Table 1 Refractive indices of the resins and Components A and B.

	n_D^{25} /before photo curing	n_D^{25} /after photo curing
Resin (A/B=5/95wt/wt)	1.5155	1.5383
Component A	1.5410	1.5647
Component B	1.5133	1.5365

た。レーザダイオード (LD) 光源から出射した波長405nmの光は、光スイッチと光スプリッターを経て、出力1μWの等強度の二つの光ビームに分けられ、其々二本のコア径9.5μmのSM光ファイバを通して、ファイバの隙間に充填された光硬化樹脂に到達、そこで成分Aの硬化による自己形成導波路のコア部が形成される。照射時間は光スイッチの閉鎖時間により制御した。コア形成後、周囲のクラッド部は照度70mW/cm²の高圧水銀ランプで90秒照射することで硬化させた。

損失測定部において、LD光源から発せられた波長1.550nmの近赤外光は光スプリッターを経て片方の光ファイバからコア部を透過後、光ファイバ、光スプリッターを経て光ダイオード (PD) に到達、そこで光強度を測定することで接続損失を評価した。ファイバ間の距離と軸ずれを正確に制御、計測する為、本実験においては、CCDカメラ付きの6軸制御の自動調芯機を用いた。

実験の手順を説明する。はじめに二つの光ファイバを軸ずれなし、距離一定で配置し実験を行った。次に、ファイバ間の距離を一定とし、軸位置のみをずらした配置で実験を行った。各配置において、ファイバ間に樹脂を入れな

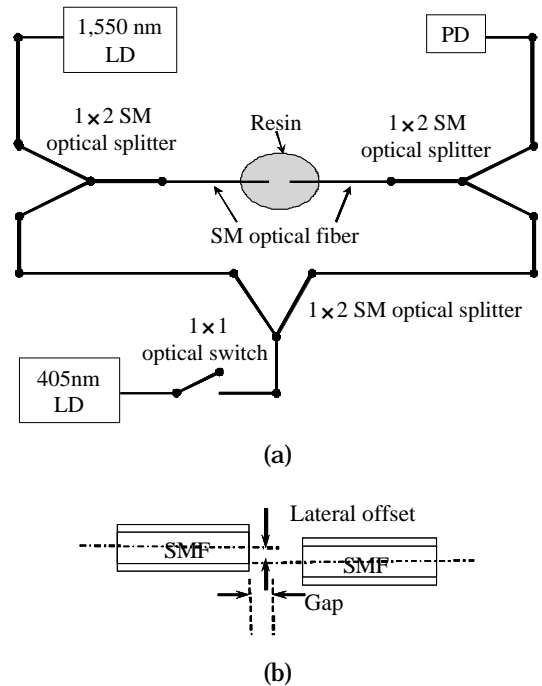


Fig. 2 (a) Experimental setup for self-written waveguides, (b) Illustration of two faced fibers at a gap and a lateral offset.

い場合、樹脂充填し光を照射しない場合、光照射でコア部を形成した場合、及び、さらにクラッド部を紫外線照射により硬化した場合の各4段階での接続損失を測定した。以上述べた本実験装置を用いることで従来評価ができていなかったリアルタイムでの導波路の形成と損失測定とをファイバの配置を変えることなく評価できるようになった。

3 結果と考察

3.1 シングルモードファイバにおける自己形成導波路

直径が50μmのマルチモードファイバを用いた自己形成導波路形成は幾つか報告されているが、直径が約10μmと細いシングルモードファイバを用いた例についての詳細な報告はない²⁻⁶⁾。図3と図4の写真は本実験装置を用いてLDより405nmのレーザ光を30秒間、片方の光ファイバから本光硬化樹脂に照射後、未硬化の樹脂をアセトンで洗浄することで得たコア部の形状である。

図3はファイバ端面で形成されたコア径は9.2μmであり、コア長85μmにおいては9.8μmと僅かに太くなるが、光ファイバのコア径9.5μmとほぼ同じ径で自己形成導波路が形成されることを示す。また、図4はファイバ端面から400μm ~ 600μmの距離にある自己形成導波路のコア部の写真であり、この区間のコア径は9.8μmと一定であり、85μmから600μmの区間で一定の太さでコア部が成長しているこ

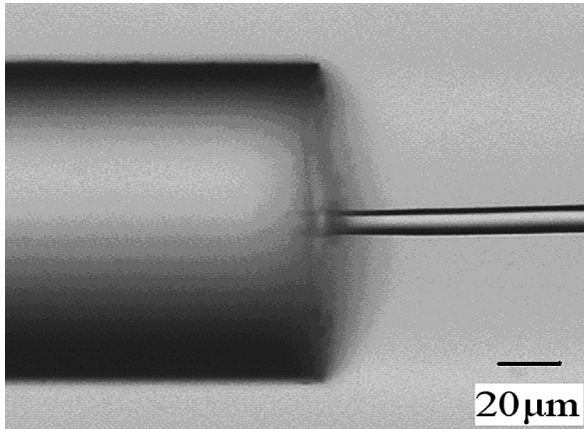


Fig. 3 A photograph of core portion formed by using single-mode fiber which showed a smooth up-tapering from fiber facet to the length of 85 μm.

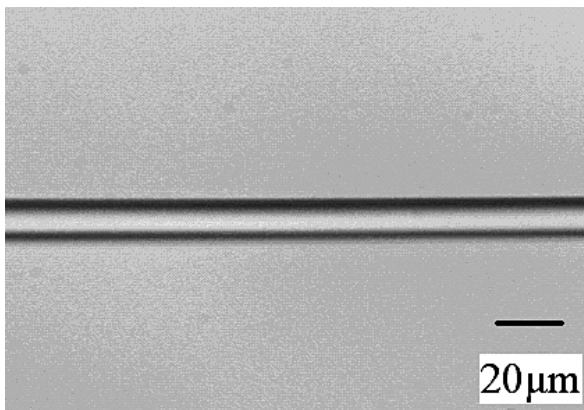


Fig. 4 A photograph of straight core portion after 400 μm from the fiber facet: the diameter is maintained at the constant value of 9.8 μm.

とを示した。

光硬化樹脂への照射時間を延ばした条件や照度を高めた条件では、コア径維持のまま、コアが生長することを確認しており、同様の生長は茨木、廣瀬によるマルチモード光ファイバを用いた検討において報告されている⁶⁾。Friskénはファイバ近傍でコア径が増大する現象は、ファイバから樹脂へ光が入射する部分でレーザー光の高次モードの光が低次モードに変換される過程でビーム幅が広がった結果と説明している。さらに、コア径が一定で生長する理由として、樹脂中ではレーザー光が低次モードで伝播することで一定のコア径になるものと説明している²⁾。

3.2 2本のファイバ間における自己形成導波路の形成

本実験では、対面した2本の光ファイバの間に光硬化樹脂を充填後、光ファイバの両端から405nmのレーザー光を30秒照射、その後、全体を高圧水銀ランプで照射し、ク

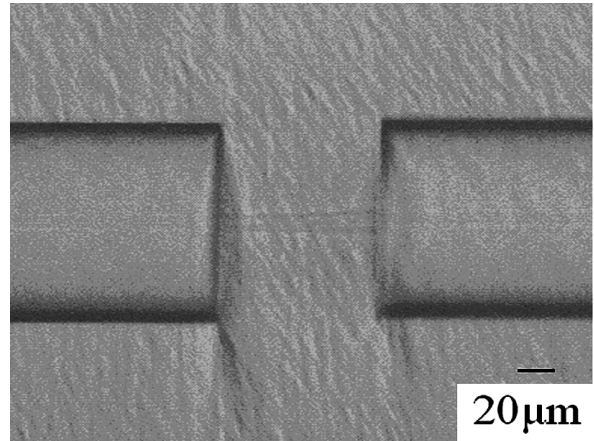


Fig. 5 Interconnection between two single-mode optical fibers was formed by self-alignment of self-written waveguide at 100 μm gap and 5 μm lateral offset.

ラッド部を硬化することで全固体型自己形成導波路を形成した。図5には、ファイバ間の距離100 μm、光軸ずれ5 μmの条件で形成されたコア部の形状を示す。前述の図3と同様にファイバ端からコアが連続的に生長、中心部のコア径は10 μmと若干大きい5 μmの光軸ずれがあるにもかかわらず両ファイバから生長したコアが中心部で結合していることを示した。図3に比べてファイバ径が若干大きい要因として、レーザー光が両端から照射された結果、硬化領域の光強度が強くなコア径が太った為と考えている。本実験により、ファイバ間の光軸ずれがあった場合でも本光硬化樹脂を用いた場合、光を伝播するコア部が連続的に形成されることを示した。

3.3 接続損失におけるファイバ間の距離の影響

自己形成導波路におけるファイバ間の距離が接続損失に対してどのように影響するかを調べた。伝送損失の測定は通信波長である1,550nmを用い、光軸ずれがない条件で実験を行った。図6にファイバ間に樹脂を入れない状態、樹脂を入れた状態、コア部を形成した状態、クラッド部を硬化した状態の其々における接続損失をファイバ間の距離100 μmまで測定した結果をプロットしたグラフを示す。

樹脂がない場合、ファイバ端からのレーザー光の拡散により、ファイバ間距離の増加とともに接続損失は大きく増加、測定したファイバ間距離100 μmにおいて2.8dBの大きな接続損失となった。ファイバ間に樹脂を充填することで接続損失は低下し、同じファイバ間距離100 μmで1.4dBまで低減した。この現象はファイバ/樹脂の屈折率差が減少した結果、回折による光の広がり⁹⁾と界面反射により損失が減少したと理解される。一方、樹脂を充填後405nmのレー

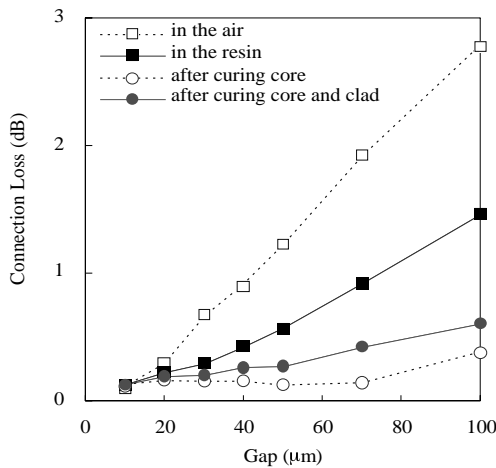


Fig. 6 Connection loss as a function of the gap: the lowest connection loss is observed in the case "after curing core".

ザ光を照射してコア部を形成した場合、接続損失は顕著に減少することが確認された。ファイバ間距離 $100\mu\text{m}$ での接続損失は、樹脂充填時の 1.4dB に対し、コア部硬化後 0.6dB まで低減した。さらにクラッド部位を紫外線照射で硬化させ全固体型自己形成導波路とした場合、接続損失は 0.6dB と低い値を維持しており、自己形成導波路の形成により長距離でも光の閉じ込めが効率的に起きていることを示した。観察されたクラッド部硬化後の接続損失増加は、クラッド部の硬化によりコア/クラッドの屈折率差が減少したことが一因と推定されるが、詳細の理解は今後の課題として残っている。

3.4 接続損失におけるファイバ間の光軸ずれの影響

光通信部品の接合時の損失増加の大きな要因は光軸ずれである。先に図5に示したように、自己形成導波路においては光軸ずれがあっても一本に繋がった導波路を形成することが明らかになった為、以下の検討においては光軸ずれと接続損失の関係を評価した。ファイバ間の距離を $100\mu\text{m}$ に固定し、光軸ずれが $0\sim 4\mu\text{m}$ の範囲で、ファイバ間に樹脂を入れない状態、樹脂を入れた状態、コア部を形成した状態、クラッド部を硬化した状態のそれぞれにおける接続損失をプロットしたグラフを図7に示す。

ファイバ間に樹脂充填、硬化の有無によらず、光軸ずれの増加とともに受光側の光ファイバコアに対する伝播効率が低下する為、接続損失は増加する。ファイバの光軸ずれ $4\mu\text{m}$ の条件では、樹脂充填時に 2.7dB であった損失はコア部硬化後に 1.5dB まで低減、クラッド部硬化後においても 2.2dB の低い接続損失値が得られた。ファイバ間に充填した樹脂が未硬化の場合に比べ、明らかに自己形

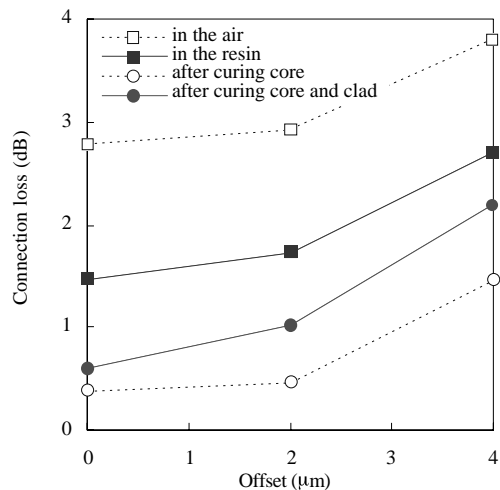


Fig. 7 Connection loss as a function of lateral offset at $100\mu\text{m}$ gap: after core formation, the connection loss is decreased even in the presence of lateral offset.

成導波路形成により接続損失が低減する結果を得た。また、前述と同様にクラッド部硬化前後で接続損失の増加が観察されており、この現象の解明は今後の課題であるが、前述した屈折率差の減少による光閉じ込め効率の低下が主要因と推定される。

以上の結果より、光軸ずれを変化させた全範囲において、樹脂充填及び未充填に対し全固体型自己形成導波路を形成した場合の接続損失は常に低い値を維持しており、シングルモードファイバのコア径 $10\mu\text{m}$ に対して $4\mu\text{m}$ と、大きな光軸ずれがあった場合でも、自己調芯機能が発現することを明らかにした。

4 結論

アクリル/エポキシハイブリッド樹脂を用い、2段階の光硬化手法を用いることでシングルモードファイバ間における全固体型自己形成導波路の形成を確認した。自己形成導波路は自己調芯機能を示し、調芯なしで低損失の光通信部品を接続する方法として有望であることを明らかにした。

発表誌

Proc. 12th Int. POF. Conf. Seattle, U.S.A., 199, 2003.

参考文献

- 1) 特開平 05-257040.
- 2) S. J. Frisken, *Opt. Lett.*, **18**, 1035(1993).
- 3) T. M. Monro, C. M. de Sterke and L. Poladian,

J. Opt. Soc.16, 1680 (1999).

4) T. Yoshimura, J. Roman, Y. Takahashi, W. C. V. Wang and M. Inao, **IEEE TRANSACTIONS ON COMPONENT AND PACKAGING TECHNOLOGIES** , 24 (3), 500 (2001).

5) M. Kagami, T. Yamashita and H. Ito, **Appl. Phys. Lett**79, 1079 (2001).

6) 広瀬直宏、茨木修、信学技報、CPM-123, 12, 9 (2001).