

3次元ポリマー光導波路の形成

Formation of 3D Polymer Optical Waveguides

矢加部 祥*
Sho Yakabe

真鍋 賢
Ken Manabe

佐々木 大
Dai Sasaki

石樽 崇明
Takaaki Ishigure

慶應義塾大学の石樽教授が発明されたポリマー光導波路の製法の一つであるモスキート法は、市販のマイクロディスペンサーと多軸シリンジ走査ロボットを用いたコアパターンを3次元的に形成可能な技術である。本作製方法を用いることでマルチコアファイバ(MCF)の導入に不可欠なファンイン・ファンアウト(FIFO)デバイスの実現などが期待できる。一方で、先行研究は主にマルチモードの導波路の検討であり、シングルモード化にはいくつかの課題を有している。特に、クラッド中のニードル走査によるモノマー流動のため、コア形状が円形から悪化する傾向があり、光ファイバとの接続損失を増加させる要因となっている。本論文では、モスキート法によるシングルモード導波路の作製およびシングルモード光ファイバとの接続損失を低減するために、モスキート法を用いて円形コアを形成する方法を理論的および実験的に検討した内容について紹介する。

The Mosquito method, a polymer optical waveguide fabrication method invented by Professor Ishigure at Keio University, enables three-dimensional (3D) formation of core patterns in cladding using a commercially available micro dispenser and a multi-axis syringe scanning robot. This fabrication method is expected to be used to realize devices required for 3D waveguide such as Fan-in/Fan-out (FIFO) devices, which are essential for the introduction of multi-core fibers (MCF). On the other hand, prior studies have mainly examined multimode waveguide, and there are several issues that need to be solved for making single-mode devices. In particular, the core shape tends to deform due to monomer flow caused by needle scanning in the cladding, which is a factor that increases the connection loss with the optical fiber. This paper presents a theoretical and experimental study on the fabrication of single-mode waveguides by the Mosquito method and the formation of circular cores using the method to reduce connection loss with single-mode optical fibers.

キーワード：ポリマー光導波路、モスキート法、低損失、シングルモード

1. 緒言

近年、クラウドサービスの急速な発展に伴い、北米を中心にハイパースケールデータセンターの建設が年々増加している。このような大規模データセンターでは、サーバーやスイッチの処理速度を向上させるとともに、消費電力を低減させることが非常に重要となっている。データセンターネットワークの成長を支えるキーテクノロジーのひとつが、光ファイバを信号伝送路として使用する光インターコネクトである。現在、フロントパネル上の光トランシーバーと光ファイバの接続には、複数の光ファイバを一括接続可能なマルチファイバ・プッシュオン(MPO^{※1})コネクタ付きのファイバケーブルが用いられている。近年では、より高い帯域密度を実現するために、MPOコネクタに整列させるファイバの本数が増加する傾向にある⁽¹⁾。さらに、1本の光ファイバに信号路であるコアを複数配列したMCFは、断面積あたりの光チャンネル数を飛躍的に向上させる有望な光ファイバである。既存のシングルコアファイバ(SCF)をMCFに置き換えることで、断面積あたり数倍以上のチャンネル数を可能にする光コネクタも報告されている⁽²⁾。しかし、データセンターのネットワークにMCFを導入するには、いくつかの重要な問題がある。例えば、MCFを送受信機に接続するためには、FIFOが必要であり、FIFOを用いて1次元配列と2次元円環配列の間でチャンネル

配置を変換する必要がある。これは、光トランシーバーにおいて、半導体レーザは一般的に1次元配列であるためである。そこで、FIFOを用いた様々な光接続方式が提案されている^{(3),(4)}。特に、3次元のコアパターンを有するガラスやポリマー光導波路は、接続損失の少ないコンパクトなFIFOデバイスの実現が期待されている⁽⁵⁾。この3次元導波路の作製手法の一つとして、慶應義塾大学の石樽教授が発明したマイクロディスペンサーと多軸シリンジ走査ロボットを用いたポリマー光導波路の作製手法である「モスキート法」^{(6)~(8)}が注目されている。本稿では石樽教授との共同研究であるモスキート法による3次元ポリマー光導波路の基礎研究内容について紹介する。

2. モスキート法

一般的なポリマー光導波路の作製法としては、フォトマスクを用いたフォトリソグラフィ^{(9),(10)}、UVインプリント⁽¹¹⁾、レーザ描画^{(12),(13)}など、様々な方法が報告されており、フォトマスクを用いた上記方法において、1平面内(基板表面に対して水平)のコア間ピッチ変換を容易に形成することができる⁽¹⁴⁾。しかしながら、コアの配線パターンの自由度は1平面内に限定される。更には、コア形状が矩形であることから、シングルモードファイバ(SMF)との

接続に用いるとモードフィールド径 (MFD^{**2}) の不一致による接続損失の増加が懸念される。一方、モスキート法はディスペンサーと多軸ロボットを用いて光導波路を作製する方法である。モスキート法による導波路作製手順を図1に示す。未硬化のクラッド用UV硬化樹脂中にシリンジ先端のニードルを挿入し、ディスペンサーにてニードル先端から屈折率の高いコア用UV硬化樹脂を吐出しながら、多軸ロボットによりシリンジ (ニードル先端) を任意の方向に移動させる。その後、UV光を照射することによって樹脂が硬化され、プログラムされた軌跡通りのコア配列が形成される。

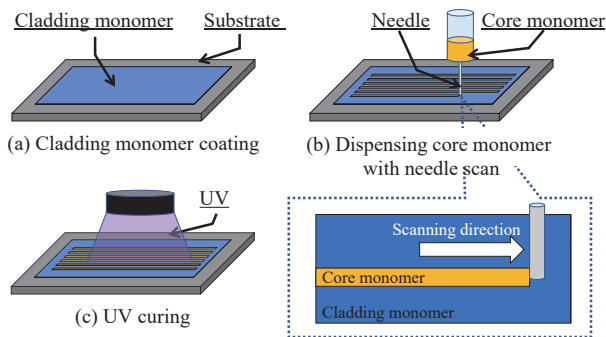


図1 モスキート法による導波路作製手順

このように、モスキート法ではロボットの移動方向を変化させることでコアの配列を3次元的に変化させることが可能である。このため、FIFO等の光通信デバイスの作製および小型化が期待される。

3. 低損失シングルモードポリマー光導波路

3-1 シングルモード光導波路の作製条件

モスキート法を用いてシングルモード導波路を作製するにあたり、作製条件の検討を行った。モスキート法により作製される導波路はコア形状が円形であることからシングルモード条件は光ファイバと同等の方法で計算が可能であると考えられる。光ファイバのモード数は式(1)により予測することが可能である。

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda} NA \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここでVは規格化周波数、aは導波路のコア半径、λは自由空間波長、NAは導波路の開口数を示す。また、開口数は導波路のコアおよびクラッドの屈折率から計算される。本稿では、ポリマー光導波路の材料として有機-無機ハイブリッド樹脂を利用した。波長1.31μmにおけるコアポリマーとクラッドポリマーの屈折率は、それぞれ1.577と1.568

であり、開口数 (NA) は0.168と算出される。

シングルモードが成立する規格化周波数は、2.405未満と定義される。開口数はコアおよびクラッドの屈折率から求められるため、本検討では規格化周波数はコア半径のみによって求められる。このため、本検討で用いるUV硬化樹脂では規格化周波数の計算値からコア半径3μm未満の時にシングルモードの条件を満たすことができる。

次に、シングルモード条件を満たすコア径の導波路を作製するため、ディスペンサーからのUV硬化樹脂の吐出条件について検討を行った。ニードル先端から吐出されるUV硬化樹脂の流量QはNavier Stokes equationより式(2)によって求まる。また、吐出されたUV硬化樹脂の初期コア径2aは式(3)によって求まり、コア径を予測することが可能となる。

$$Q = \frac{\pi d^4 p}{128 \eta L} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$2a = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi U}} = \sqrt{\frac{pd^4}{32L\eta U}} \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、pは圧力、Lはニードル長、dはニードル内径、ηは樹脂の粘度、Uはニードルの移動速度を示す。規格化周波数から計算されたシングルモード条件を満たす導波路を作製するため、コア径6μm未満 (シングルモード条件はコア半径3μm未満) となる表1の作製条件を用いて導波路の作製を行った。

表1 シングルモードポリマー光導波路の作製条件

Parameters	Values
Dispensing pressure : p	500kPa
Needle length : L	15mm
Needle I.D : d	100μm
Viscosity of core : η	71000cP
Scan Velocity : U	80mm/sec
Core diameter : 2a	4.1μm

写真1に作製したポリマー光導波路全体の断面写真、写真2および図2に各コアの拡大写真およびNear Field Pattern (NFP^{**3})を示す。尚、コアの作製はCh.1からCh.12の順に行っている。

写真2に示したコア断面から、コア径10μm以下の円形コアが形成されていることが確認できる。しかし、特に小さいチャンネル番号では、コアとクラッドの境界が明確でないことも確認された。したがって、断面の観察像から必ずしも正確にコア径を測定することはできない。次に、図2に示す波長1.31μmでのNFP測定により、全てのコアがシングルモード条件を満たしていることが確認された。

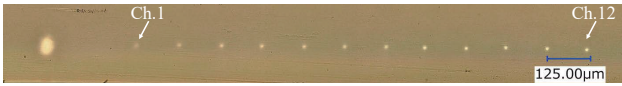


写真1 モスキート法で作製された光導波路の断面写真

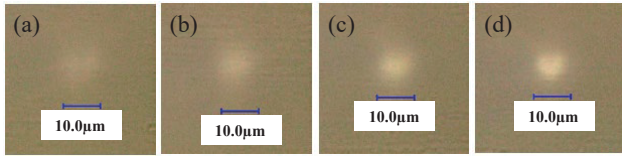


写真2 各コアの拡大断面写真
(a) Ch.2 (b) Ch.5 (c) Ch.8 (d) Ch.12

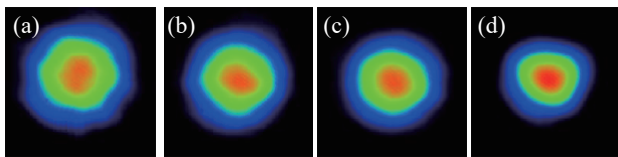


図2 各コアの光強度分布 (NFP)
(a) Ch.2 (b) Ch.5 (c) Ch.8 (d) Ch.12

観測された強度プロファイルは、 LP_{01} モードを特徴とするガウシアンプロファイルと一致する。シングルモード動作の確認には、SMFをコア中心から半径方向にわずかにずらし、高次モードを特徴とする他の強度ピークの存在を確認した。高次モードの強度ピークがないことは、対応するコアがシングルモードで動作していることを示している。このように、モスキート法では、理論的に導かれた作製条件を適用することで、シングルモード導波路を作製することが可能であることが示された。

一方、このシングルモード導波路をピッチ変換やSMFアレイとの接続機能を持つ光部品（例えば、MCF用FIFOデバイス）に適用するためには、いくつかの課題がある。一つは、モードフィールドの真円性である。図3に水平方向（X軸、MFD(X)）と垂直方向（Z軸、MFD(Z)）のMFDと待機時間（チャンネル番号）の関係を示す。また、図3には、円形度の指標として水平方向と垂直方向のMFD比率であるVHR（vertical to horizontal ratio）を示している。このように直交する2方向で測定したMFDが異なることは、モードフィールドが楕円形のプロファイルを持つことを意味する。もう一つの問題は、1つのクラッド内に配置された複数のコア間のMFDのばらつきである。モスキート法では、各コアを連続的に吐出し、全てのコアを吐出した後、コアとクラッドのモノマーを同時にUV照射して硬化させる。したがって、コアモノマーが1つだけ吐出されてからUV硬化が始まるまでの時間である「待機時間」は、チャンネルによって異なる。この間、液状のコアモノマー

とクラッドモノマーは相互に拡散し、MFDを拡大させる。また、待機時間が短い（チャンネル番号が大きい）ほど、モードフィールドは水平方向に長い楕円形になっていることがわかる。しかし、待機時間を長くする（チャンネル数を小さくすると、VHRは1に近づき、真円を示すようになる。このようなMFDの変動は、コア間で待機時間が異なることによって引き起こされる。

これらの課題は光ファイバとの接続損失を増加させる要因となり、ポリマー光導波路実用化の妨げとなる。

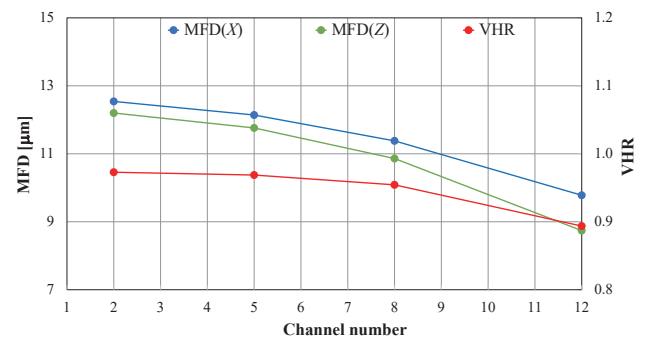


図3 各コアのMFDおよびVHR

3-2 コア間のMFD安定化

初めに、導波路内の各コアのMFDばらつきを抑制する方法の検討を行った。コア端面の観察画像からコアおよびクラッドモノマー間の相互拡散が原因と考えられるため、相互拡散を抑制する方法としてUV硬化樹脂の温度制御を行った。UV硬化樹脂温度を制御することによる相互拡散の影響を確認するため、表1の作製条件を元にクラッドの樹脂温度が設定値で安定した後にコアの作製を行い、各温度で作製された導波路の各コアをSMFによって励振し、波長 $1.31\mu\text{m}$ におけるMFDを測定した。図4に各温度における待機時間とMFDの関係を示す。ここで待機時間とはコアとなるUV硬化樹脂が吐出されてからUV照射による硬化を行うまでの時間を示す。

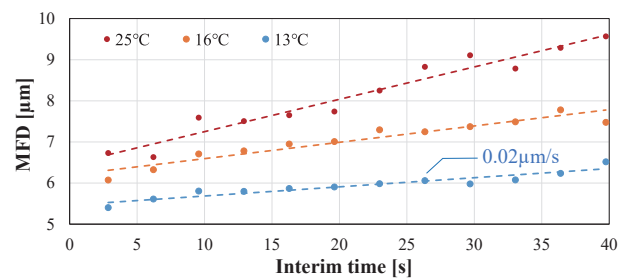


図4 各モノマー温度における待機時間とMFDの関係

この結果から、UV 硬化樹脂が高温になるほど時間経過による MFD の変化が大きくなる傾向が確認された。特に UV 硬化樹脂の温度が 13℃ において、MFD の変化は約 0.02μm/s となり、全 12 心のコアを作製する際の最大待機時間が約 40 秒になることから、MFD の最大差を 1μm 以内まで抑えることが可能である。

3-3 コア形状の円形化

一般的な SMF のコア形状やモードフィールドは円形である。したがって、作製したポリマー導波路が楕円状のモードフィールドを示すと、SMF との接続時にモードフィールドの不整合による接続損失の増大が懸念される。そこで、円形コアを形成するために、ニードル先端から吐出されたコアモノマーがクラッドモノマーに流入する流れを、流動解析ソフトを用いて理論的に解析した。ここでは、汎用熱流体解析ソフトウェアである ANSYS Fluent^{※4}を用いて解析を行った。図5に、モスキート法の流体解析モデルを示す。このモデルは、吐出されたコアモノマーに加え、クラッドモノマーと空気の2層の流体で構成されている。モノマーの流動計算には、2つのモノマーの粘度、表面張力、密度の3つのパラメータが考慮される。

ここで、解析結果の一例を示す。図6の結果は、それぞれ吐出中のコアモノマーの側面図断面および3箇所（a）～（c）の断面方向に垂直な断面図である。ここで、図6（a）～（c）の断面の位置は、それぞれニードルの中心（Y=0mm）、ニードル

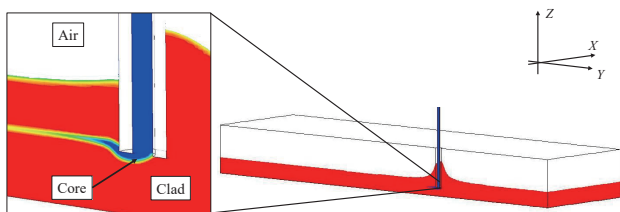


図5 モスキート法による導波路作製の流動解析モデル

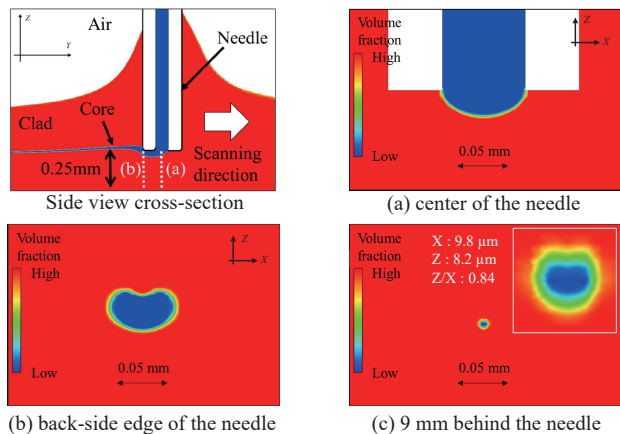


図6 ニードル走査方向に垂直な断面図
 (a) ニードル中心 (Y=0mm) (b) 裏面ニードル端 (Y=0.115mm)
 (c) 9mm 後方 (Y=9.115mm)⁽¹⁵⁾

の裏側端 (Y=0.115mm)、ニードルの裏側端から9mm 後方 (Y=9.115mm) である。この流動解析モデルでは、クラッドモノマーの厚さを0.5mmとし、基板表面からのニードル先端の高さを0.25mmとした。

次に、ニードル先端の高さとコア径の垂直方向 (Z) と水平方向 (X) の比 (VHR) の関係を計算し、図7にまとめた。クラッドモノマー中に挿入されるニードル先端形状が直線の場合、ニードル先端の高さを調整しても円形のコアを形成することは困難である。これに対し、ニードル先端形状がテーパ角10°の場合、ニードル先端高さが0.2mmを超えるとコア径のVHRは1.0に近い値を維持しており、テーパニードルを用いることで円形コアを作製することが可能になるが、一定のクラッド厚みが必要であることがわかる。図7では、ニードルのテーパ角が20°の場合のコア径のVHRも示している。テーパ角が20°の場合、ニードル高さが0.2mm未満でも1.0に近いVHRが得られている。したがって、ニードル先端形状によるクラッドモノマーの流動がコア形状に影響を与えており、円形形状を形成する手法の一つとして、テーパ形状のニードルを用いることが有効である。

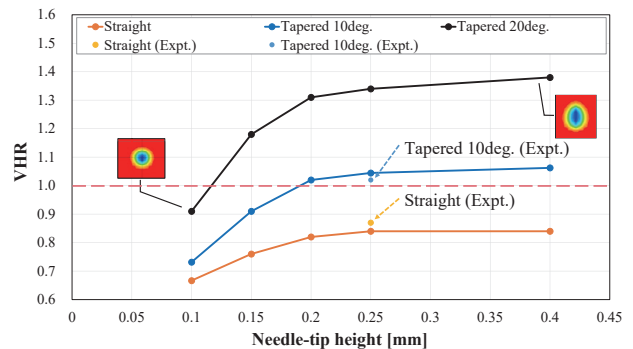


図7 ニードル先端高さとおコア径のVHRの関係⁽¹⁶⁾

4. 円形コアを有する低損失ポリマー光導波路

前節で行ったモノマー流動解析の結果、テーパニードルはニードル先端の高さを適切に調整することで、円形コアの形成が可能であることが示された。実験と理論計算の結果を比較するために、テーパニードルを用いてポリマー導波路を作製した。作製条件は、表1と同じである（ただし、ニードルの寸法は除く）。写真3に、作製したポリマー導波路の断面写真を示す。写真4は、一部のコアの拡大写真である。写真2に示した直線状のニードルで形成されたコアと比較すると、これらの断面写真は、すべてのコアが均一な直径を持つ円形状であることがわかる。

写真3および写真4に示した導波路の全てのコアのNFPを波長1.31μmで測定した結果を図8に示す。これより全てのコアがシングルモード条件を満たしていることが確認さ

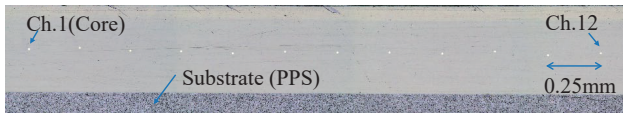


写真3 モスキート法で作製された光導波路の断面写真

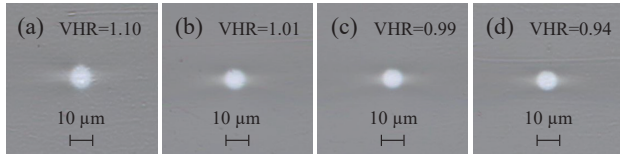


写真4 各コアの拡大断面写真
(a) Ch.1 (b) Ch.4 (c) Ch.8 (d) Ch.12

れた。図8 (a) より、直交する2方向 (XとZ軸) のMFDは良い一致を示している。次に、全コアのNFPからコア径のVHRを推定する。図8 (b) に示すように、コア径のVHRの測定値は平均1.02であり、実測値と解析値の間に若干の不一致が見られ、実際のコア形状は解析値よりも良好であることがわかる。観察されたコア形状の改善の理由の一つは、クラッドモノマー中に吐出されたコアモノマーは表面張力により時間経過に伴い円形に近づくためである。図8 (a) では、チャンネル数に対するMFDの変動が、特にZ方向でわずかに振動していることが確認された。図1 (b) のコアモノマー吐出のステップでは、ニードルはジグザグの軌道で走査し、奇数チャンネルは+Y方向の走査、偶数チャンネルは-Y方向の走査を行う。このように走査方向が異なるため、特にZ方向でMFDのばらつきが発生する可能性がある。

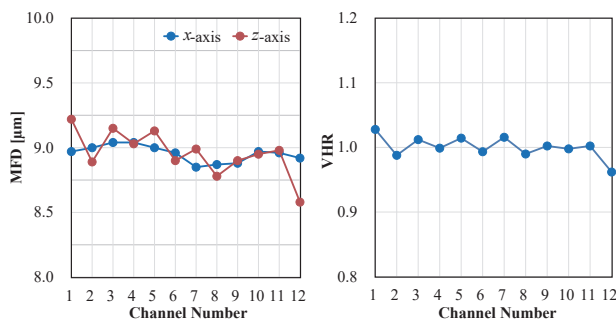


図8 波長1.31μmでのNFP測定結果
(a) X方向とZ方向のMFD (b) 各コアのVHR

次に、2つのSMF間に作製したポリマー導波路を挿入し、NFP測定と同じ波長1.31μmで挿入損失を測定した。この挿入損失には、ポリマー導波路とSMFとの2カ所の接続損

失と導波路 (長さ3cm) 内での伝搬損失が含まれている。挿入損失測定では、導波路とSMFのコアを自動ステージでアライメントしている。ここで、フレネルロスを低減するために、両者の間に屈折率整合剤を塗布した。図9に、作製した12個のコアを有する導波路の挿入損失を示す。先行研究⁽¹⁷⁾から、このポリマー材料固有の伝搬損失は、1.31μmで0.30dB/cmと見積もられる。導波路長が3cmであることから、導波路全体における伝搬損失は0.90dBと見積もられる。また、モードフィールドから計算されるSMFとポリマー光導波路の接続損失は平均0.15dBと、十分小さいことが確認された。

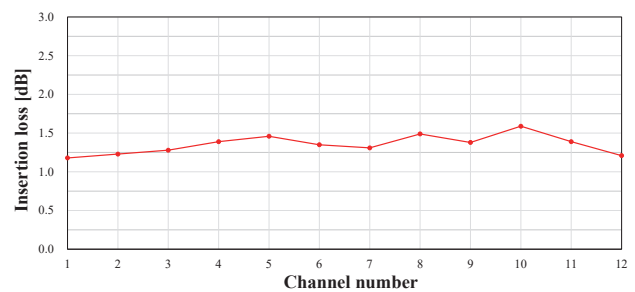


図9 SMF接続間におけるポリマー導波路の挿入損失

5. 結 言

MCF用FIFOデバイスなどの光接続部品に適用するため、シングルモード条件を満たすモスキート法で作製した円形コアを有するポリマー光導波路を設計し、複数のコア間の光学特性のばらつきを低減する方法を理論・実験の両面から検討した。

初めに、モノマー温度を低く抑えてコアとクラッド間のモノマー拡散を制御することで、コア間のMFDのばらつきの抑制が可能であることを確認した。

次に、真円のコアを作製するためには、理論流体解析から、吐出直後のニードル先端近傍のコアモノマーの流れが重要であり、コア形状に影響を与えることが判明した。この問題を解決するためには、基板表面とニードル先端の高さ、およびニードル先端形状を最適化することにより円形のコアを形成することが可能であることを見出した。

シングルモードコアの光接続部品に要求される、複数のコア間の光学特性の均一性を維持しながら、いかにしてモスキート法でシングルモード導波路を作製するかが課題であった。本検討では、理論的および実験的に作製条件を最適化することで、これらの課題を解決した。

今後、モスキート法で作製したシングルモード導波路を用いた光導波路型接続デバイスの創出が期待される。

用語集

※1 MPO コネクタ

Multi-fiber Push-on コネクタの略称で、光ファイバを PC 接続技術により結合する多心光ファイバコネクタ。

※2 MFD

Mode Field Diameter の略称で、シングルモード光ファイバまたは光導波路内を伝搬する光の断面方向の電界分布の広がりを表す指標。コア内に閉じ込められた光は僅かにクラッドに漏れ出すためコア径と MFD は必ずしも一致しない。

※3 NFP

Near Field Pattern の略称で、発光面上（本稿ではポリマー光導波路端面）における光強度分布。

※4 ANSYS Fluent

ANSYS、ANSYS Fluent は、米国 ANSYS、Inc. またはその子会社の米国およびその他の国における商標または登録商標です。

参考文献

- (1) M. Ohmura, "Highly precise MT ferrule enabling single-mode 32-fiber MPO connector," in Proceeding of International Wire and Cable Symposium, pp. 567-561 (2016)
- (2) T. Morishima, "MCF-enabled ultra-high-density 256-core MT connector and 96-core physical-contact MPO connector," in Optical Fiber Communication Conference and Exhibition, Paper Th5D.4 (2017)
- (3) O. Shimakawa, M. Shiozaki, T. Sano, and A. Inoue, "Pluggable fan-out realizing physical contact and low coupling loss for multi-core fiber," in Optical Fiber Communication Conference and Exhibition, Paper OM31.2 (2013)
- (4) H. Arao, O. Shimakawa, M. Harumoto, T. Sano, and A. Inoue, "Compact multi-core fiber fan-in/out using GRIN lens and microlens array" in Proceeding of OptoElectronics and Communications Conference and Australian Conference on Optical Fibre Technology, Paper Mo1E-1(2014)
- (5) R. R. Thomson, H. T. Bookey, N. D. Psaila, A. Fender, S. Campbell, W. N. Macpherson, J. S. Barton, D. T. Reid, and A. K. Kar, "Ultrafast laser inscription of a three dimensional fan-out device for multicore fiber coupling applications," in Proceeding of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), (OSA, 2008), Paper JWA622008 (2008)
- (6) K. Soma and T. Ishigure, "Fabrication of a graded-index circular-core polymer parallel optical waveguide using a microdispenser for a high-density optical printed circuit board," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 19(2), 3600310 (2013)
- (7) R. Kinoshita, D. Suganuma, and T. Ishigure, "Accurate interchannel pitch control in graded-index circular-core polymer parallel optical waveguide using the Mosquito method," Opt. Express, 22(7), 8426-8437 (2014)
- (8) T. Ishigure, D. Suganuma, and K. Soma, "Three-dimensional high density channel integration of polymer optical waveguide using the Mosquito method," in Proceedings of 64th IEEE Electronic Components and Technology Conference, (IEEE, 2014), pp. 1042-1047 (2014)
- (9) J. Kobayashi, T. Matsuura, S. Sasaki, and T. Maruno, "Single-mode optical waveguides fabricated from fluorinated polyimides," Appl. Opt. 37(6), pp. 1032-1037 (1998)

- (10) M. Nordstrom, D. A. Zauner, A. Boisen, and J. Hubner, "Single-mode waveguides with SU-8 polymer core and cladding for MOEMS applications," J. Lightwave Technol., 25(5), 1284-1289, May (2007)
- (11) M. U. Khan, J. Justice, J. Petaja, T. Korhonen, A. Boersma, S. Wiegersma, M. Karppinen, and B. Corbett, "Multi-level single mode 2D polymer waveguide optical interconnects using nano-imprint lithography," Opt. Express, 23(11), 14630-14639 (2015)
- (12) E. Zraggen, I. M. Soganci, F. Horst, A. La Porta, R. Dangel, B. J. Offrein, S. A. Snow, J. K. Young, B. W. Swatowski, C. M. Amb, O. Scholder, R. Broennimann, U. Sennhauser, and G.-L. Bona, "Laser direct writing of single-mode polysiloxane optical waveguides and devices," J. Lightwave Technol. 32(17), 3016-3042, Sep. (2014)
- (13) H. H. Duc Nguyen, U. Hollenbach, U. Ostrzinski, K. Pfeiffer, S. Hengsbach, and J. Mohr, "Freeform three dimensional embedded polymer waveguides enabled by external-diffusion assisted two-photon lithography," Appl. Opt. 55(8), 1906-1912 (2016)
- (14) T. Watanabe, M. Hikita, and Y. Kokubun, "Laminated polymer waveguide fan-out device for uncoupled multi-core fibers," Opt. Express 20(24), 26317-26325 (2012)
- (15) S. Yakabe, H. Matsui, Y. Kobayashi, Y. Saito, K. Manabe, and T. Ishigure, "Multi-channel single-mode polymer waveguide fabricated using the Mosquito method," J. Lightwave Technol., 39(2), 547-556, Jan. (2021)
- (16) S. Yakabe, Y. Kobayashi, H. Matsui, Y. Saito, K. Manabe, and T. Ishigure, "Low-loss single-mode polymer optical waveguide with circular cores," OSA Continuum Vol. 4, No. 3, pp. 1070-1085, (2021)
- (17) K. Yasuhara, F. Yu, and T. Ishigure, "Circular core single-mode polymer optical waveguide fabricated using the Mosquito method with low loss at 1310/1550 nm," Opt. Express, 25(8), 8524-8533 (2017)

執筆者

矢加部 祥* : 光通信研究所 主査
博士 (工学)



真鍋 賢 : 解析技術研究センター 主席



佐々木 大 : 光通信研究所 グループ長



石樽 崇明 : 慶應義塾大学 教授



*主執筆者