

## 高速・高密度光インターコネクションのための 屈折率分布型ポリマー並列光導波路

石 樽 崇 明

### Graded-Index Type Polymer Parallel Optical Waveguide for High-Speed and High-Density Optical Interconnection

Takaaki ISHIGURE

We demonstrate the high performance of multi-channel graded-index type polymer parallel optical waveguide for high-speed and high-density optical interconnection. In the cores of GI type waveguides, the output optical field of the propagating modes is confined near the core center independent of the outer core shape, and thus, low propagation loss and low inter-channel crosstalk can be achieved. Due to the low inter-channel crosstalk property, we verified that a very small pitch-size (high-density) alignment was also realized in the GI polymer parallel optical waveguides.

**Key words:** high-speed and high-density optical interconnection, polymer parallel optical waveguide, inter-channel crosstalk

1970年代より、中央演算処理装置(CPU)の信号処理能力は、右肩上がりが増大を続け、かつてはメインフレームと称されていた、大型で高価であったコンピューターが、現在では、その性能を飛躍的に向上させながらも、個人レベルで所有する家電製品のひとつとなった。一方で、1990年代より広く普及したインターネット技術が、このコンピューターの汎用化に大きく貢献しているといえよう。この間、このパーソナルコンピューター(PC)には、大容量記憶装置を搭載してさまざまなアプリケーションソフトを保存し、必要に応じて各PC内で起動して利用する形態をとっていた。ところが、昨今では、光ファイバーネットワーク並びに高速無線LANなどの通信インフラ整備が進み、最大でGbpsもの伝送速度でインターネット接続が可能となってきたことから、アプリケーションソフトも含めた多くの機能をサーバーに委ね、PCは、ネットを介してそれらを利用する形態の、「クラウドコンピューティング」技術がトレンドとなっている。その結果、個人所有のPCが、ネットブックなどとよばれるようにさらに汎用化されてきている反面、各種サーバーやルーター、スイッチなどのネ

ットワーク機器に要求される信号処理速度は、ますます増加の一途をたどるといえる。しかしながら、上述したCPUの処理能力は、ほぼ飽和状態に近づき、今後はムーアの法則から外れ、成長の鈍化が予測されている。したがって、特にハイエンドサーバー等のさらなるコンピューティングパフォーマンスの向上に向けて、光インターコネクション技術が注目されてきている<sup>1,2)</sup>。この光インターコネクション技術は、電子デバイスを中心とした電気インターコネクションに代わる将来技術として、これまでも注目されていたが、光デバイスに付随するコストの問題から、目覚ましい普及には至っていない。しかしながら、この数年は、電子デバイスによる高速化対応では問題となりつつある消費電力の問題が、光インターコネクションにより解消されると期待され、改めてこの光インターコネクション技術が注目されてきている。特に、プリント基板上の電気配線を光導波路に置き換える、「ボードレベルの光インターコネクション」の実現が、当面の課題となっており、マルチモードポリマー光導波路に期待が寄せられている<sup>3)</sup>。プリント基板用途の場合、伝送距離は最大でも1m程度と



図1 GI型ポリマー並列光導波路プリフォームの写真。

考えられ、一般に、光インターコネクション用途としては、コア部の屈折率が均一のSI型ポリマー光導波路が主役であった。これに対してわれわれは、これまで、屈折率分布(GI)型ポリマー光導波路をボードレベルのインターコネクションに応用する検討を進めてきた<sup>4,5)</sup>。本稿では、高速・高密度光インターコネクションへの用途展開を想定して作製されたGI型ポリマー並列光導波路について紹介する。

## 1. GI型ポリマー並列光導波路の作製

これまでのポリマー光導波路は、SI型で矩形のコアを有する構造が一般的であり、フォトリソグラフィーやインプリント技術など、半導体プロセスを応用した作製法により得られていた。特に、高密度・高速光インターコネクションへの用途展開を目指す際には、コアサイズはより小さく、並列されるコア間距離(ピッチ)もそれに伴って縮小することが望まれてきた。一方で、光導波路や光源・受光器などの光デバイスを基板上へ実装する際のコストとの兼ね合いから、マルチモード導波路の注目度が高く、コアサイズは $50\mu\text{m}$ 、ピッチとしては $250\mu\text{m}$ とする例が多い。それでも、要求仕様の厳しいhigh performance computer用途になると、コアサイズは $35\mu\text{m}$ 、ピッチとしては $62.5\mu\text{m}$ と、より高密度化が進められている<sup>6)</sup>。さらなる高密度配線のために狭ピッチ化することは、隣接コア間のクロストークの増大に繋がる懸念される。これに対して、われわれは、GI型コアを有するポリマー光導波路

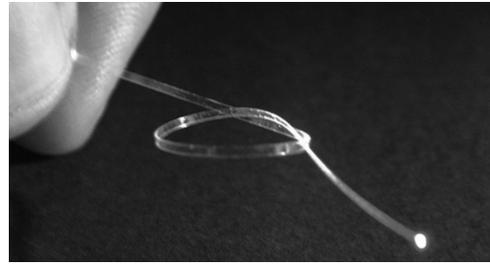


図2 プリフォームからの熱延伸により得られたGI型ポリマー並列光導波路の写真。

にて、このクロストークの低減が可能となることを実証し<sup>7)</sup>、さらなる高密度配線の可能性を示してきた。GI型のコアを有するポリマー光導波路は、80年代後半にいくつかの異なる作製法の提案とともに検討されていたが<sup>8,9)</sup>、当時得られている導波路のコアサイズは、 $500\mu\text{m}$ ~数mm程度であり、現在の一般的な光導波路に比べて1桁以上大きかった。そのため、高密度配列を要する光インターコネクション用途ではなく、光分岐素子やレンズアレイ用途などの、光学素子の色合いが強かったといえる。これに対して、われわれは、GI型プラスチック光ファイバー(POF)の作製工程に用いられているプリフォームの熱延伸工程<sup>10)</sup>を、光導波路作製プロセスに適用し、さまざまなコアサイズ、ピッチ、屈折率分布形状、コア形状を有するポリマー並列光導波路を実現した。以下にその作製法を簡単に紹介する。

GI型ポリマー並列光導波路の作製には、ポリメタクリル酸メチル(PMMA)を母材として用いた。並列される4~16(現状では最大)本の各コア部(チャンネル部)には、高屈折率ドーパントの濃度勾配を形成することにより、屈折率分布を付加する。実際に、一例として $5\text{cm}\times 25\text{cm}\times 1\text{cm}$ のサイズの板状のプリフォームを作製して、このプリフォームを熱延伸することで、薄い板状の導波路が100m以上得られている。作製時のコア形状、配列、ならびに加熱延伸する際の延伸比率を調整することで、導波路構造を自在に変えることができ、任意のコアサイズ、コア間ピッチを有する導波路を作製することが可能である。

図1に、得られたプリフォームの写真を、図2には、延伸された後のポリマー光導波路の写真を示す。ポリマー特有のフレキシビリティにより、小さい曲率の曲げを加えることが可能であることがわかる。

## 2. マルチチャネルGI型ポリマー光導波路の特性

### 2.1 屈折率分布形状と光閉じ込め

図3に、実際に作製されたGI型並列導波路の断面写真を示す。断面形状が長方形となっており、基板への実装性

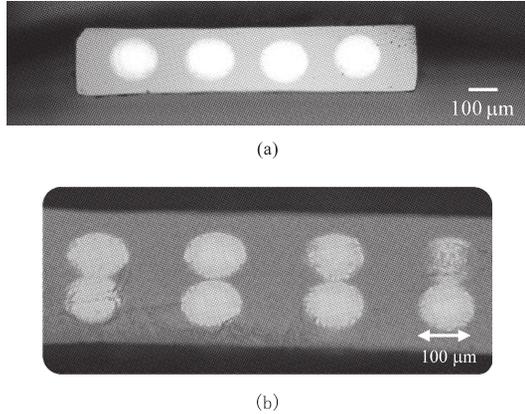


図3 GI型円形コアポリマー並列光導波路の断面写真。(a) 4チャンネル配列、(b) 8チャンネル配列。

にすぐれる形状の導波路が得られている。上述のように、これまでのポリマー光導波路は、フォトリソグラフィ法やインプリント法を用いて作製するため、一般に「矩形状」のコアを有していたが、本導波路は、プリフォーム法により作製されるため、コア形状を自在に設計可能である。実際に、円形状のコアが図3 (a) では4チャンネル、(b) では8チャンネル配列されており、8チャンネルの場合には、きわめて狭ピッチ化されていることが確認できる。さらには、プリフォームの延伸条件を調整することで、SI型ポリマー導波路と同じ50 μm径のコアを有するポリマー並列導波路の作製が可能となることが確認されている。この円形コア導波路は、rack間光インターコネクションの領域にすでに利用が進んでいるマルチモード光ファイバー(MMF)と同一のコア形状およびコア径を有しうる。そのため、バックプレーンなどに導波路を用い、ボード間、rack間とのインターフェースにて、ポリマー光導波路-MMFの接続を必要とするような場合には、SI型矩形コアの場合に比べて、円形コア導波路は、モードフィールドのミスマッチが少なく、接続損失の低減が可能となる。

一方、プリント基板への埋め込み型光導波路を目指すには、プリフォーム法により作製されるポリマー光導波路は、その耐熱性・信頼性が懸念される。本稿で示したPMMA系に代えて、高耐熱性樹脂を利用することも可能であるが、熱延伸を可能とするためには、三次元架橋をしていない線形ポリマーを利用する必要がある。プリント基板に実装された光導波路は、熱延伸温度に近い温度であるハンダリフロー工程が想定され、線形ポリマーを用いている以上、耐熱性・信頼性の大幅な改善は困難であると予想される。したがって、プリント基板実装を目指した光導波路には、三次元架橋が可能な樹脂の利用が望まれ、その場合には、フォトリソグラフィやインプリント法などを用

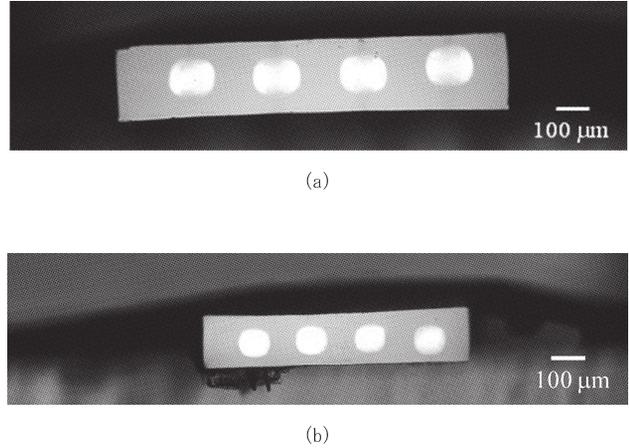


図4 矩形コアを有するGI型ポリマー並列光導波路の断面写真。(a) コアサイズ100 μm、(b) コアサイズ50 μm、となるようにそれぞれ熱延伸した。

いて矩形コアが形成されることとなる。そこで、「矩形コア」に屈折率分布が形成された際の導波路の特性を明らかにすることを目的として、われわれは、マルチチャンネルGI型矩形コアポリマー導波路の試作を行い、その特性評価を行った。上述の通り、三次元架橋性樹脂を用い、リソグラフィ法を用いることが望まれるが、ここでは、純粋にGI型円形コアとの特性の違いを明確にするために、同じPMMAを母材として用い、プリフォーム法により矩形コア導波路を作製した。図4に、得られた矩形コア導波路の断面写真を示す<sup>11)</sup>。

導波路の特性として、はじめに、GI型コア並列導波路の屈折率分布を、二光束干渉顕微鏡を用いて測定した。円形、矩形コア導波路をスライスして得られるスラブ状のサンプルについて、4チャンネル中の2つのコアにみられる干渉縞を、比較して図5 (a), (b) に示す。また、これらの干渉顕微鏡測定結果から算出した屈折率分布を図5 (c), (d) に示す。図5 (a) に示されるように、円形コア中には、同心円状の干渉縞パターンが観測され、コア部に放物線状屈折率分布が形成されていることがわかる。一方、矩形コア部に屈折率分布を形成させた場合、外周付近は、矩形形状の干渉縞がみられているが、コア中心付近には、同心円状に屈折率の勾配が形成されていることがわかる。すなわち、図5 (c), (d) からわかるように、コアの外形状が円形、矩形いづれであっても、特にコア中心付近では、屈折率分布の形状はほぼ同一になっていることがわかる。

GI型コアをポリマー光導波路に導入することの最大の利点は、伝搬光の閉じ込め効果である。放物線状の屈折率分布により、伝搬光はコア中心に強いピークを有する強度分布を示す。試作したGI型コアポリマー導波路中のひと

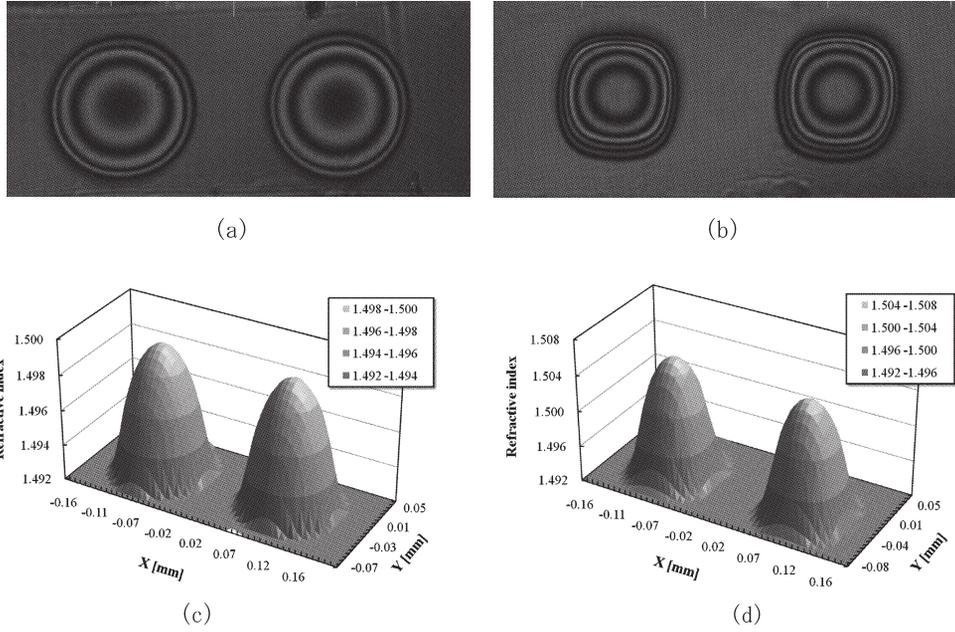


図5 4チャンネルGI型ポリマー並列光導波路の2チャンネルの屈折率分布測定結果。(a)円形コア部の干渉縞分布,(b)矩形コア部の干渉縞分布,(c)円形コア部の屈折率分布形状,(d)矩形コア部の屈折率分布形状。

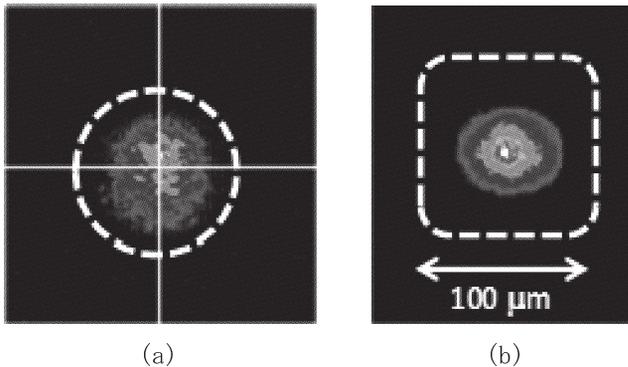


図6 GI型ポリマー並列導波路の1つのコアからの出射ニアフィールドパターン。(a)円形コア,(b)矩形コア。点線は、コア-クラッド界面を示しており、出射光強度の違いを異なる濃淡で示している。色の薄い部分ほど強度が強いことを示している。

つのコアからの出射ニアフィールドパターン (NFP) を図6に示す。図内の白色点線で示した形状は、コア-クラッド界面を示している。この結果から、円形状、矩形形状のいずれの場合にも、GI型屈折率分布により、出射光はコア中心に強く閉じ込められた形状となっており、コア-クラッド界面の影響が小さく、さらに、コア外形状にも依存していないことがわかる。これは、矩形形状コアであっても、屈折率分布形成を行えば、GI型円形コア導波路と同一の機能を発現できることを意味している。

## 2.2 伝送損失、伝送速度とチャンネル間クロストーク

2章1節に示した光閉じ込め効果により、伝送損失に対

するコア-クラッド界面の影響を低減でき、容易に低伝送損失化が可能となる。実際に、円形コアの場合、波長 850 nm において、0.028 dB/cm、980 nm では、0.061 dB/cm の伝送損失値が、また、矩形コアでも同様の損失値がそれぞれ得られており、これは、材料固有の伝送損失の理論限界に近い値である。

一方、光ファイバーの研究開発の歴史の中ですでによく知られているように、放物線状の屈折率分布によって、モード分散を低減し、均一屈折率のSI型導波路に比べて、高速通信が可能となる。光インターコネクションの領域では、光信号伝送距離が1m以下となる可能性が高く、これまで、ポリマー光導波路に関して、高速性(導波路のモード分散)は、それほど懸念事項ではなかった。これに対して、GI型コアを有するポリマー並列光導波路では、コア形状が円形・矩形にかかわらず、1チャンネル当たり、12.5 Gbps-3mの伝送が可能であることが確認された。実際に伝送実験を行った際のアイパターンを図7に示す。従来の矩形コアSI型光導波路の場合、作製工程上、3m長の導波路を得ることが困難だったことや、損失、帯域面などの制限から、これまででは、12.5 Gbpsの信号を1m伝送した例が報告されている<sup>12)</sup>。一方、GI型ポリマー光導波路は、20 Gbps以上の伝送も可能であると見積られる。上述の通り、光インターコネクション応用を考えると、ポリマー光導波路にて数mもの伝送が必要となる例は少ないが、GI型コアに基づく低伝送損失、広帯域性により、

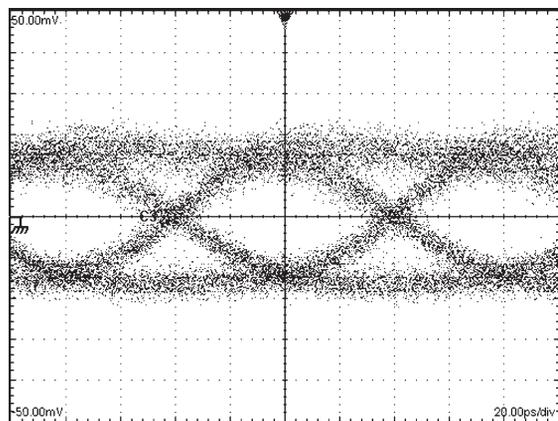
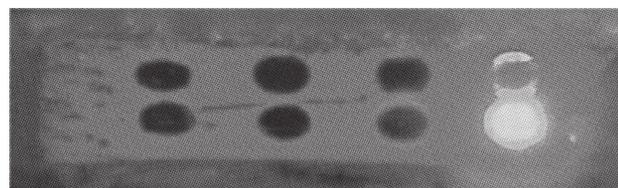


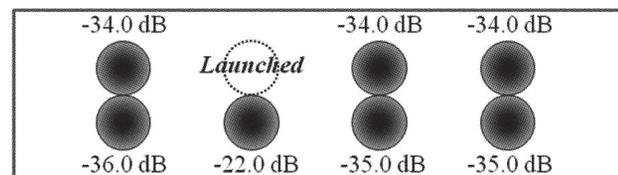
図7 GI型ポリマー並列光導波路の1チャンネルを用いて12.5 Gbps-3 mの伝送実験を行った際のアイパターン。信号波長は850 nm。

通信機器筐体内光リンクの設計の自由度が増すといえる。さらに、これまでに得られた最大並列チャンネルの全16チャンネルに対して12.5 Gb/s 並列伝送を行うことで、 $12.5 \times 16 = 200$  Gb/sのスループットが得られることになる。昨今の850 nm帯の光源、受光器は、20 Gb/sの送受信を可能にしつつあり、16チャンネルで300 Gb/s、64チャンネルの並列化を実現すれば、Tb/sのスループットが十分可能になり、光インターコネクション分野に与えるインパクトはきわめて大きい。

次に、隣接チャンネルへの信号光遷移（クロストーク）の検討結果について示す。クロストークに関して、NFPならびに実際の強度測定により定性的、定量的に評価を行った。一例として、8チャンネルGI型円形コア導波路（コア径 $50 \mu\text{m}$ ）の1チャンネル（下段、右端）のみを励振した際の、断面の出射光写真を図8 (a)に、また1チャンネル（上段、左から2番目）のみを励振した際の、他チャンネルへのクロストークの測定結果を図8 (b)に示す。図8 (b)に示す測定には、コア径 $50 \mu\text{m}$ 、横方向ピッチ $120 \mu\text{m}$ 、縦方向ピッチ $80 \mu\text{m}$ のポリマー並列導波路を用いた。波長は850 nmであり、 $9 \mu\text{m}$ コアシングルモードファイバー（VCSELからのスポット径に近いコア径）で励振、 $50 \mu\text{m}$ コアマルチモードファイバーを受光用途のプロープを用いた。図3 (b)からもわかるとおり、この導波路は、2段配列された上下方向のコアがほぼ接している構造を有している。このため、1チャンネル励振時であっても、上下方向の隣接コアにのみ若干のクロストークがみられているが、その他のチャンネルへのクロストークは $-30$  dBを下回る。この低クロストーク性は、上述したようにGI型屈折率分布による、コア部への光信号の強い閉じ込め効果に起因している。

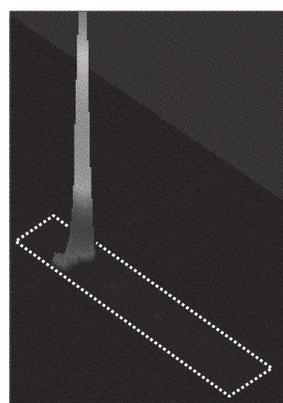


(a)

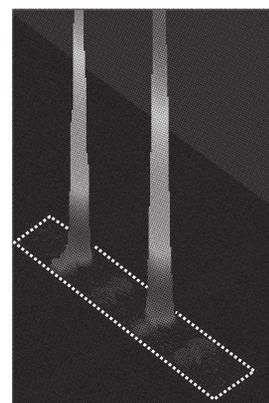


(b)

図8 (a) 1チャンネルを励振した際の屈折率分布型コアポリマー並列光導波路断面写真と (b) クロストーク測定結果。



(a)



(b)

図9 多チャンネル同時励振時のクロストーク特性のNFP評価結果。(a) 1チャンネルのみ励振、(b) 2チャンネルを同時に励振。出射光強度の違いを異なる濃淡で示している。

一方、実際の並列導波路を用いたパラレル光インターコネクションを考えた場合、全チャンネルが異なる信号光を伝送することとなる。そこで、2チャンネルを同時に励振した際のクロストークについて検討した。その際のNFP測定結果を図9に示す。1チャンネルのみ励振時には、最近接チャンネルに若干のクロストークがみられるものの、その他のチャンネルからの出射光は観測されない。これに対して、1番目と3番目のチャンネルを同時に励振した際には、2番目のチャンネルのクロストーク光は、理論通り、3 dBの増大がみられた。しかしながら、定量的な測定結果から、8つの全チャンネルを同時に励振している場合のクロストークは $-26$  dBと見積もられ、十分に低クロストークを維持できていることがわかる。

このクロストークは、コア部の開口数を最適化することで、さらなる低減が可能であることがわかった。実験上で

は、コア径を 50~100  $\mu\text{m}$  程度とする場合、開口数が 0.17 以上であれば、クロストークは -30 dB 以下に低減できることがわかった。これは、コア内の伝搬モード間のモードカップリングの強度に起因することまでわかっているが、母材を PMMA とした場合の実験結果であり、他のポリマー材料を用いた場合や、コア径が異なる場合に、必ず同じ傾向を示すか否かは明らかにできていない。このクロストーク低減のための最適開口数については、理論的な考察が今後必要となってくると思われる。

高速・高密度光インターコネクションへの用途展開を目指した GI 型ポリマー並列光導波路を紹介した。今後、この、GI 型コアを有するポリマー光導波路がボードレベルの高密度・高速光インターコネクションのキーデバイスとなることを期待する。

## 文 献

- 1) A. F. Benner, M. Ignatowski, J. Lash, D. M. Kuchta and M. Ritter: "Exploitation of optical interconnects in future server architectures," *IBM J. Res. Dev.*, **49** (2005) 755-776.
- 2) C. Berger, B. J. Offrein and M. Schmatz: "Challenges for the introduction of board-level optical interconnect technology into product development roadmaps," *Proc. SPIE*, **6124** (2006) 61240J1-12.
- 3) K. Nakano, R. Kuribayashi, K. Maeda, A. Noda, J. Sakaki and H. Takahashi: "Development of alicyclic polymers for multimode waveguide array and its characteristics for use in optical interconnection," *Proceedings of IEEE Conference on Polymers and Adhesives in Microelectronics and Photonics*, Tokyo (2007) pp. 170-173.
- 4) T. Ishigure and Y. Takeyoshi: "Polymer waveguide with 4-channel graded-index circular cores for parallel optical interconnects," *Opt. Express*, **15** (2007) 5843-5850 (<http://www.opticsinfobase.org>).
- 5) Y. Takeyoshi, K. Matsumoto and T. Ishigure: "Low-loss 4x2 channels polymer optical waveguide with circular graded-index cores for high-density integration on printed circuit boards," *Proceedings of IEEE Conference on Electronic Components and Technology Conference*, Florida (2008) pp. 2111-2116.
- 6) R. Dangel, C. Berger, R. Beyeler, L. Dellmann, M. Gmür, R. Hamelin, F. Horst, T. Lamprecht, T. Morf, S. Oggioni, M. Spreafico and B. J. Offrein: "Polymer-waveguide-based board-level optical interconnect technology for datacom applications," *IEEE Trans. Adv. Pack.*, **31** (2008) 759-767.
- 7) Y. Takeyoshi and T. Ishigure: "Low inter-channel crosstalk property of 4-channel polymer parallel optical waveguide with circular GI cores," *IEEE Photonics Technol. Lett.*, **19** (2007) 1430-1432.
- 8) Y. Koike, Y. Takezawa and Y. Ohtsuka: "New interfacial copolymerization technique for steric GRIN polymer optical waveguides and lens arrays," *Appl. Opt.*, **27** (1988) 486-491.
- 9) S. Eguchi, H. Asano, A. Kannke and M. Ibamoto: "Gradient index polymer optical waveguide patterned by ultraviolet irradiation," *Jpn. J. Appl. Phys.*, **28** (1989) L2232-L2235.
- 10) T. Ishigure, E. Nihei and Y. Koike: "Graded-index polymer optical fiber for high speed data communication," *Appl. Opt.*, **33** (1994) 4261-4266.
- 11) T. Kosugi and T. Ishigure: "Polymer parallel optical waveguide with graded-index rectangular cores and its dispersion analysis," *Opt. Express*, **17** (2009) 15959-15968. (<http://www.opticsinfobase.org>)
- 12) G.-L. Bona, B. J. Offrein, U. Bapst, C. Berger, R. Beyeler, R. Budd, R. Dangel, L. Dellmann and F. Horst: "Characterization of parallel optical-interconnect waveguides integrated on a printed circuit board," *Proc. SPIE*, **5453** (2004) 134-141.

(2009年7月14日受理)