

高分子材料を利用した光電気複合実装技術

茨木 修・堀 彰弘・熊井 晃一・広瀬 直宏

Opto-Electronics Packaging Technology Using Polymer Optical Waveguides

Osamu IBARAGI, Akihiro HORI, Kouich KUMAI and Naohiro HIROSE

The progress of opto-electronics packaging technology in “Ultra High-Density Electronics System Integration R&D” that is supported by NEDO, is introduced. As regards the R&D of polymer optical waveguides technology, “Film Waveguide Laminated OE-MCM Technology” for economical production, “Photo-Breaching Method” for simple fabrication of waveguides, “Optical Fiber Board” for large optical boards and “Self-Written Waveguides” for fiber connection are reported.

Key words: opto-electronics packaging, electronics system integration, optical waveguide, self-written waveguide, optical fiber board

マイクロプロセッサのクロック周波数が2 GHzを超え、高速化はめざましいものがあるが、このようなLSI (large-scale integration) 内部のみの高速化だけでは、IT機器の高性能化が難しくなっている。

これらのLSIを相互接続し高性能な機能を発揮させるための総合実装技術、すなわち電子SI (system integration) 技術が必須になってきている。このため、ASET (Association of Super-advanced Electronics Technologies: 技術研究組合超先端電子技術開発機構) の超高密度電子SI技術開発プロジェクトでは、産官学のコンソシアム体制で、LSIチップの超高密度3次元積層実装技術、EMI (electro magnetic interference) 対策を主とした最適配線構造要素技術、および光電気複合実装技術の3つの研究テーマにより、電子SI技術開発を進めている¹⁾。

光電気複合実装技術については、超高速インターフェイスの切り札として多くの組織でも研究開発が進められている。特に、通信ネットワークの光ファイバー網の進展やインターネットなどのブロードバンド化に関する技術革新が進んでいる。400波長の波長多重 (WDM: wavelength

division multiplexing) 技術²⁾、40 Gbit/s以上の光変調デバイス³⁾、これらを用いた10 Tbit/sクラス高速大容量伝送装置⁴⁾の開発など通信系インフラネットワークでの進展はめざましいものがある。

今後はこの先につながる高速IT機器いわゆる情報家電の広範な普及が予想されている。このための光電気複合実装技術として、高速光素子を小型かつ経済的に光接続する光導波路技術が必須となっている。特に経済化の観点から、従来の石英ファイバー接続に変わる高分子導波路の応用が期待されている。そこで、ASETでの高分子導波路を用いた応用技術開発について紹介する。

1. 開発動向

光電気複合実装技術においては、光伝送の適合領域がどの範囲にあるかがひとつの課題である。電気伝送による高速伝送の研究開発も進められているが、電気伝送の本質的な課題である高周波減衰、クロストークなどから高速伝送が困難となる。ASETでは、1 GHz以上の速度領域においては、光伝送のほうがMCM (multi-chip module) レベル

技術研究組合超先端電子技術開発機構 (ASET) 電子SI技術研究部武蔵野研究センター (〒180-8585 武蔵野市緑町 3-9-11 NTT武蔵野研究開発センター内) E-mail: ibaragi@psi-aset-unet.ocn.ne.jp

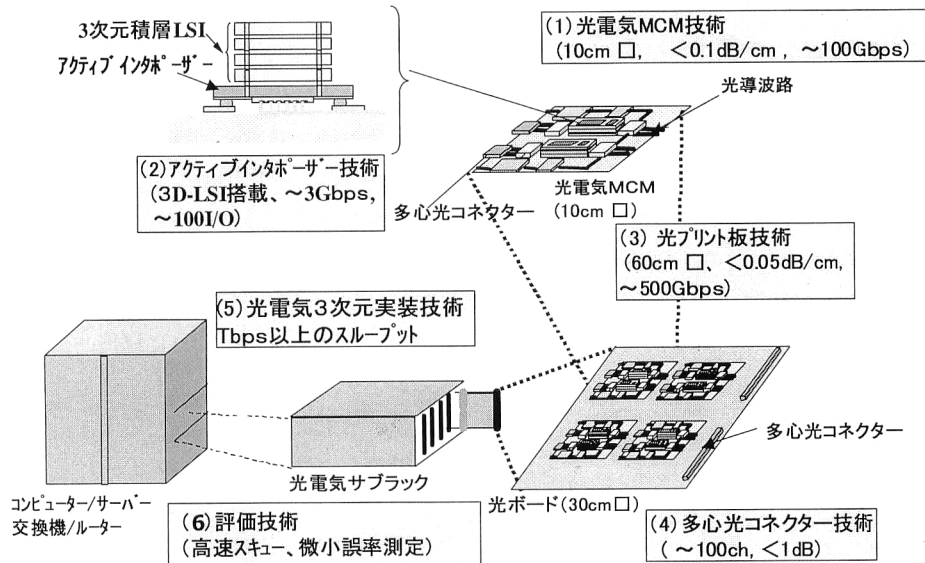


図1 ASETにおける光電気複合実装技術開発の目標。

の実装階層まで有効であるとの検討結果から、図1に示すようにMCMからサブラックまでを光実装の適用範囲対象とし、サブラック装置トータルでTbit/s以上のスループットの信号伝送ができる実装技術を開発することを目標として研究開発を進めている⁵⁾。光電気複合実装の要素技術においては、光の高速性を生かすために、いかに低損失でコンパクトに、かつ低コストで光インターフェイスを実現できるかが重要である。光インターフェイスは、電気インターフェイスにくらべ、高速性、無誘導性にすぐれている反面、マイクロメートル単位での正確な光軸位置合わせが必要であり、また光の直進性のため光路の曲げが難しいなどの課題がある。さらに現状では光だけで論理機能を果たすことが難しいため、電子LSI回路との併用が必須であり、この電子回路の電気信号と光信号間の変換をいかに高速にかつコンパクトに実現するかも課題となっている。

したがってサブラック内における光導波路技術においては、低損失な導波路損失はもちろんのこと、受発光素子と低損失で結合できること、および高速LSIの電気接続のための実装に影響（電気特性、搭載時の耐熱性）を与えないこと、高温使用環境においても安定な信頼性を保つことなどが要求され、光導波路の材料、構成、製造方法が開発課題となる。

光導波路材料については、すでに各種ポリマー材料が検討されている⁶⁾。一般にポリマー光導波路は長波帯ではC-H結合に起因する吸収のため損失が大きくなるが、700~900nmの短波領域では、アクリル系材料およびエポキシ系材料でも数十cm程度の光伝送路に適用できるレベルの損失0.05dB/cm以下となるものも報告されている⁷⁾。

しかし、光電気素子を混載するボードおよびMCMにおいては、はんだ付け工程(200~350°C)の耐熱性が要求されるため、耐熱性が高く、短波から長波まで比較的損失が低いフッ素化ポリイミドが現状ではもっとも実用的である。

光導波路の製造については、コア部はシングルモードで5~10μm角、マルチモードでは50~100μm角が一般的であり、低損失化にはこのコア部を正確にかつ均質に形成することが重要である。ポリマー導波路においても石英導波路と同様にコア部を形成する方法としては、RIE (reactive ion etching) によるエッチングが一般的であるが、製造工程に真空工程が含まれており、使用材料に制限があること、製造工程が長いことなどの問題がある。そこで、ポリマー材料の特性を利用して、金型形成方法 (LIGA: Lithographie Galvanoformung Abformung)⁸⁾ や感光性材料を用いたフォトリソグラフィーで形成する方法⁹⁾ も開発されている。

導波路構成については、LD (laser diode) およびPD (photo diode) との低損失結合がもっとも重要である。特にシングルモードの場合はわずか1μmの光軸ずれでも大きな結合損となる。LDとしては端面発光型と面発光型 (VCSEL¹⁰⁾: vertical cavity surface emitting laser diode) があり、このタイプにより導波路の結合構成も変わる。端面発光型では、できるだけ発光端面に近接できる構造または小型レンズにより集光する構造が必要となる。一方面発光型では、導波路先端に45°ミラーを形成またはミラー部品を用いて光を90°に曲げて結合 (直角結合) する構造が一般的である。発光径が大きいこと、低電力で動作すること、面受光型であるPDと同じ実装方法が適用できることから

VCSEL が有効であり，これを用いた光導波路との接続構成が研究されている^{11,12)}．ただし，VCSEL は導波路との直角結合だけでなく，PD と対向させた空間伝送の実装構成やファイバー端面に直接光結合する実装構成¹³⁾なども研究開発されている．さらに光導波路は単に光素子間の伝送だけでなく，光信号の分配（分岐）および結合をするカップラーや波長フィルター（代表的なのが AWG: arrayed waveguide gratings¹⁴⁾）などの機能部品を平面光回路として形成できるため，これらの機能と光素子間接続を同一基板内で形成することも可能である．

2. ASET の研究開発状況

ASET では前記のように広い範囲にわたって光電気複合実装技術の研究開発を進めているが，このうち光導波路技術のいくつかについて紹介する．

2.1 導波路フィルム積層技術

OE-MCM (opto-electronic multi-chip module) では，10 cm 角程度の大きさで高速電気配線と光導波路を形成した光電気複合基板を経済的に実現することが求められている．そこで，ポリマー光導波路を形成したフィルムを一般的に用いられている有機材料基板，例えばガラスエポキシ基板に転写積層した OE-MCM (フィルム積層 OE-MCM) の開発を進めている^{15,16)}．図 2 に示すようにこの製作および部品搭載プロセスは，光導波路作製と電気配線板とを独立して製造できるため安価な電気配線基板が使用できること，光電気デバイスの搭載時のはんだ付けの高温工程後に導波路を積層できるため耐熱性が低いものの安価な低損失導波路材の使用が可能であること，必要な部分のみに光平面回路を形成できること等のメリットを有する．

このフィルム積層 OE-MCM の技術課題は，ポリマー光

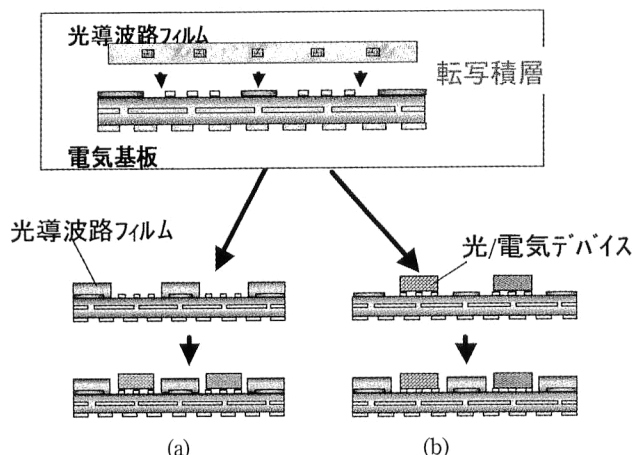


図 2 フィルム導波路積層 OE-MCM. (a) フィルム導波路積層後に素子搭載，(b) 素子搭載後にフィルム導波路積層．

導波路の光伝送損失を増加させないでかつマイクロメートル単位の高精度な位置合わせをして積層するところにある．これまでに，フィルム積層工程の工夫，接着剤の検討などを行い，積層前のフィルム導波路とほぼ同じ伝送損失 (0.5 dB/cm, @1.3 μ m) を維持して積層できることおよび導波路の位置合わせ精度は 3.7 μ m 程度であり，マルチモードに適用できるレベルまで達成した．

2.2 フォトブリーチングによる光導波路技術

光導波路をさらに簡易に経済的に形成する方法としてフォトブリーチング法の検討を進めている¹⁷⁾．この方法は，図 3 に示すように光が当たると屈折率がわずかに低下する性質をもつ材料（フォトブリーチング材）をコア層に用い，コアとすべきパターンのみ光を遮光するマスクで露光し，コアの周囲を低屈折率に変化させてクラッドとする方法である．今回検討に用いたフォトブリーチング材料は，ポリシラン化合物である．この材料は，UV 光が照射されることにより化合物構造中の -Si-Si- 結合の一部が酸化され -Si-O-Si- 結合となり，屈折率が低下するという特性を有する．

これを用い試作した光導波路の例を図 4 に示す．フォト

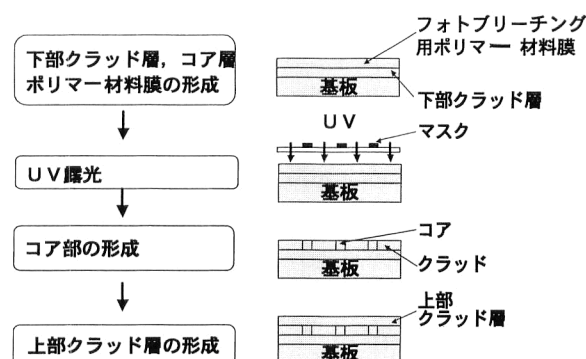
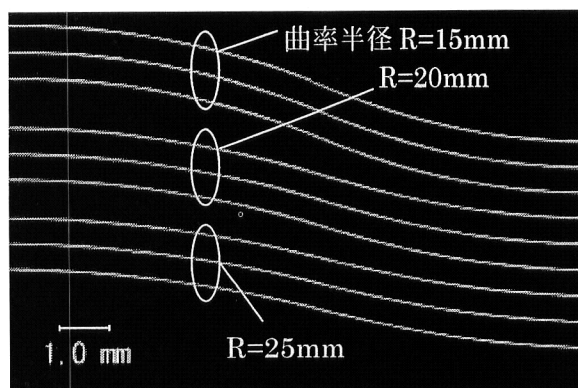


図 3 フォトブリーチング法を用いた光導波路の形成．



光導波路パターン（曲線部）

図 4 フォトブリーチング法で形成した光導波路．

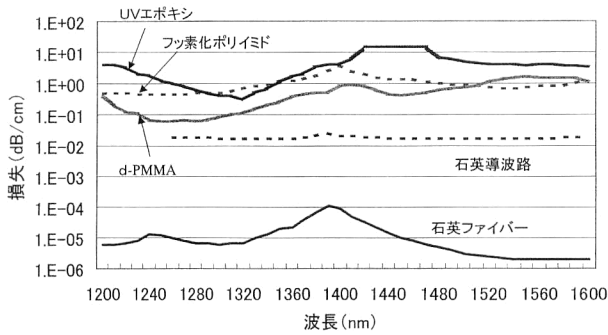


図5 各種光導波路の損失.

ブリーチングにより簡易な光導波路が作製できることを確認したが、損失が2.5 dB/cmと未だ大きく、フォトブリーチング材の改良、導波路プロセス条件の最適化など課題が残っている。

2.3 大型光プリント板

サブラック内のボードおよびバックプレーンの光導波路については、光の伝送距離が30 cm~1 mと長くなるため、MCMよりさらに低損失化が求められる。図5に代表的な材料の導波路の伝送損失を示す。これからも明らかなように現状の高分子導波路材料では長い距離を引き回す光導波路には不向きであり、また、石英導波路では大型化が難しいため、図6に示すように光ファイバー素線を基板上に接着固定して任意の光配線パターンを形成できるファイバーボードが実用的である。このため、ASETではサブラック内のボードおよびバックプレーンにこのファイバーボードを適用する検討を進めている¹⁸⁾。ファイバーボードは極低損失(10⁻⁵~10⁻⁶ dB/cm)の利点がある。しかし、他の光導波路と同様に急激な曲げには図7に示すように損失が大きくなるので、いかにコンパクトに光配線を設計するかが課題のひとつである。さらにファイバーボードは光コネクタでの結合は容易であるが、ボードおよびバックプレーンの光直角コネクタ接続および光部品との直接結合をいかに低損失で接合するかが大きな課題である。

ボードおよびバックプレーンの光直角コネクタ接続については、45°ミラーとレンズを用いた構成の提案⁷⁾があるが、筆者らは、ファイバーの曲げによる損失を0.1 dB以下にする曲率半径で直角に曲げ、コネクタ接続部は実績のあるMTフェルールで接続する構造の光直角コネクタの開発を進めている¹⁹⁾。

2.4 自己形成導波路を用いた光接続技術

前記ファイバーボードの課題の光部品との直接結合を低損失で接合することについては、ファイバーボードの先端を45°に切断してここをミラーとしてVCSELやPDなど

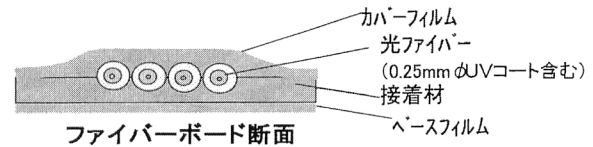
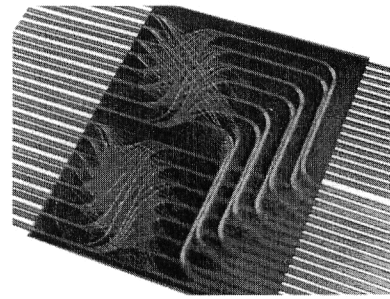


図6 ファイバーボード.

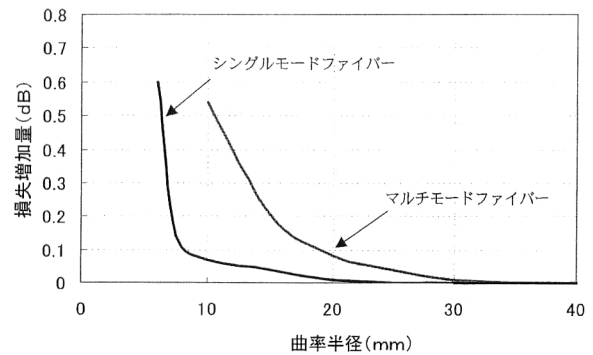


図7 光ファイバーの曲げによる損失の増加.

と光接続する構造もあるが、このような45°ミラー光結合部は、高分子導波路で構成するほうが素子搭載時の正確な位置合わせの面から有利である。このため、光ボード上では長い光配線部をファイバー、光素子結合近傍を高分子導波路として接続する複合構成が考えられる。これには、高分子導波路と光ファイバーの接続が必要になる。また、光コネクタやフィルター部品などファイバーピグテイル部品をファイバーボードにコンパクトに実装するために、ファイバーどうしの直接接続が必要になる。このような接続部に有効な技術として、自己形成導波路を用いた光接続技術の開発を進めている²⁰⁻²²⁾。

自己形成導波路を用いた光接続の原理を図8に示す。接続する導波路またはファイバー間にUV硬化樹脂を充填して、接続する端面からUV光を照射する。この樹脂が硬化するとわずかに屈折率が高くなることからUV光が集中することを利用して、細いコア部を成長させて相互接続するものであり、多少光軸がずれていても両端から出射された光が重なったところの光量が多いことから先に硬化するため相互接続できるという利点をもつ。このため各種

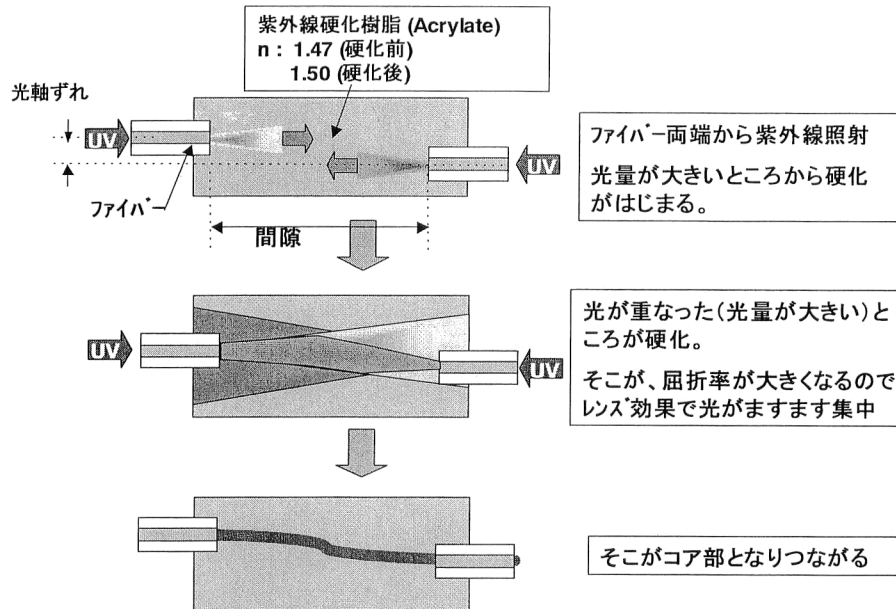


図8 自己形成導波路による接続原理.

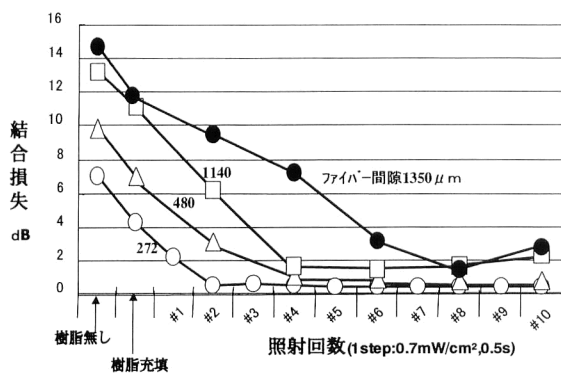


図9 自己形成導波路による接続。照射回数と結合損失。

製作方法や他への適用についての検討がされている^{23,24)}。ASETではまずファイバー間接続に適用する目的で基礎実験を進めている。図9に接続間隙をパラメータとして、照射回数と接続損失の関係を示す。0.5 mm以下の間隙では1 dB以下の接続損失が得られる見通しが得られている。

ASETの光導波路の研究開発に関して、経済的なOE-MCMとして導波路フィルム積層法、さらに製作工程が簡易なフォトブリーチングによる光導波路形成方法、大型光配線板用としてファイバーボードおよび自己形成導波路によるファイバー接続技術の開発状況について報告した。今後は、これらの光導波路技術を用いて、高速LSIを光電気変換して光導波路と接続するアクティブインターポージャーおよびTbit/s以上のスループットを有する光電気3次元実装サブラックを具体化する予定である。

本研究成果はNEDO(新エネルギー・産業技術総合開発機構)からの委託業務にもとづくものです。関係各位の皆様へ深謝いたします。

文 献

- 1) 茨木 修, 伊藤正隆, 三川 孝, 盆子原学: “電子SIプロジェクトにおける光電気実装技術”, 第14回エレクトロニクス実装学術講演大会資料(2000) p. 209.
- 2) Y. Hida, Y. Hibino, T. Kitoh, Y. Inoue, M. Itoh, T. Shibata, A. Sugata and A. Himeno: “400-channel 25-GHz spacing arrayed-waveguide grating covering a full range of C- and L-bands,” *Proc. OFC 2001*, WB2-1, Anaheim (2001).
- 3) 石川丈二: “40 Gbit/s 光伝送技術の現状と将来”, *O plus E*, **23** (2001) 1046-1052.
- 4) K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara and T. Ono: “10.92-Tb/s (273×40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeated transmission experiment,” *Proc. OFC 2001*, PD24-1, Anaheim (2001).
- 5) 茨木 修, 熊井晃一, 岡部 豊, 市村 顕, 三川 孝: “キャビネット内光電気複合実装技術の検討”, 電子情報通信学会論文誌C, **J84-C** (2001) 717-735.
- 6) 丸野 透: “ポリマ導波路デバイス”, 電子情報通信学会技術研究報告, EDM99-13, CPM99-55, LQE99-39 (1999) pp. 1-6.
- 7) J. Guttman, H. P. Huber, O. Krumpplz, J. Moisel, M. Rode, R. Bogenberger and K. P. Kuhn: “19 in. polymer optical backplane,” *Proc. ECOC '99*, Niece (1999) p. I-354.
- 8) M. Popp, H. D. Bauer, A. Gaudron, B. Jobst, Th. Klotz-Bucher, Th. Paatzsch, I. Smaglinski, S. Stadler and W. Ehrfeld: “Polymer star couplers for datacom application,” *Proc. ECOC '99*, Niece (1999) p. I-298.
- 9) 圓佛晃次, 疋田 真, 吉村了行, 都丸 暁, 今村三郎: “UVエポキシ樹脂を用いたポリマー光導波路(2)”, 1998電子情報通信学会総合全国大会講演論文集, C-13-6 (1998) p. 226.
- 10) 伊賀健一: “面発光レーザーその誕生と発展”, 電子情報通信学会誌, **84** (2001) 462-466.

- 11) Y. S. Lui, R. J. Wojnarowski, W. A. Hennessy, P. A. Piacente, J. Rowltte, Jr., M. Kadar-Kallen, J. Stack, Y. Liu, A. Peczalski, A. Nahata and J. Yardley: "Plastic VCSEL array packaging and high density polymer waveguides," *Proc. 48th ECTC* (1998) pp. 999-1005.
- 12) Y. Ishii, S. Koike, Y. Arai and Y. Ando: "SMT-compatible optical-I/O chip packaging for chip-level optical interconnects," *Proc. 51st ECTC*, Orland (2001) pp. 870-875.
- 13) L. Vanwassenhove, R. Bockstaele, R. Baets, M. Brunfaut, W. Meeus, J. Van Campenhout, J. Hall, H. Melchior, A. Neyer, J. Van Koetsem, R. King, K. Ebeling and P. Heremans: "Demonstration of 2-D plastic optical fibre based optical interconnect between CMOSIC's," *Proc. OFC 2001*, WDD74, Anaheim (2001).
- 14) A. Kaneko, A. Sugita and K. Okamoto: "Recent progress on arrayed waveguide gratings for DWDM applications," *IEICE Trans. Electron.*, **E83-C** (2000) 860-868.
- 15) 熊井晃一, 石崎 守, 塚本健人: "転写方式を用いた光電気基板の作成", 第 61 回応用物理学学会講演会予稿集 No. 3, 3a-Q-8 (2000) p. 1018.
- 16) 熊井晃一, 三川 孝, 石崎 守, 塚本健人: "転写方式を用いた光電気基板の作成 (II)", 第 62 回応用物理学学会講演会予稿集 No. 3, 11a-Y-5 (2001) p. 888.
- 17) 堀 彰弘, 井本克之: "フォトリソングポリマ材料を用いたポリマ光導波路形成方法の検討", 第 48 回応用物理学関連講演予稿集 No. 3, 30P-H-11 (2001) p. 1181.
- 18) 市村 顕, 辛島靖治, 茨木 修: "基板実装用光ファイバポードの開発", 第 10 回マイクロエレクトロニクス論文集 (2000) pp. 111-114.
- 19) 市村 顕, 辛島靖治, 広瀬直宏, 岡部 豊, 茨木 修: "直角光多心コネクタの検討", 2001 電子情報通信学会総合全国大会講演論文集, B-10-5 (2001) p. 438.
- 20) N. Hirose, T. Yoshimura and O. Ibaragi: "Optical solder effects of self-written waveguides in optical circuit devices coupling," *Proc. 51st ECTC*, Orland (2001) pp. 223-228.
- 21) 広瀬直宏, 吉村徹三, 茨木 修: "自己形成導波路を用いた光接続における光ハンダ効果", 第 48 回応用物理学関連講演予稿集 No. 3, 30P-H-12 (2001) p. 1182.
- 22) N. Hirose, T. Yoshimura and O. Ibaragi: "Optical component coupling using self-written waveguides," *Proc. ECOC '01*, Tu. L. 1.5, Amsterdam (2001) pp. 140-141.
- 23) M. Kagami, T. Yamashita and H. Ito: "Light induced self-written three-dimensional optical waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, **79** (2001) 1079-1801.
- 24) T. Yoshimura, J. Roman, Y. Takahashi, W. -C. V. Wang, M. Inao, T. Ishitsuka, K. Tsukamoto, S. Aoki, K. Motoyoshi and W. Sotoyama: "Self-organizing waveguide coupling method "SOLNET" and its application to film optical circuits substrates," *Proc. 50th ECTC*, Las Vegas (2000) pp. 962-969.

(2001 年 9 月 28 日受理)