

フィルム型光導波路材料とその応用

高橋 敦之・柴田 智章・高崎 俊彦

Optical Waveguide Film

Atsushi TAKAHASHI, Tomoaki SHIBATA and Toshihiko TAKASAKI

Next generation high performance electronics requires high-speed, high-density and low-power consumption signal transmission. Optical interconnection is one of the most promising solutions and the optical waveguide technology is a key driver. The paper introduces photosensitive polymer film materials with high optical transparency and thermal properties. The materials are designed to fabricate high-density multimode optical waveguides, which are suitable for optical interconnections, using lamination and exposure/development processes. The paper also reports on the design of the materials, process, and properties of optical waveguides, as well as future aspects of applications.

Key words: optical interconnection, optical waveguide film, propagation loss, reflow soldering, opto-electronics integration

1. 背 景

近年、高速かつ大容量情報伝送に対応した情報通信インフラの整備が進み、高速ブロードバンドの普及に拍車がかかっている。2006年6月末時点での光ファイバーを用いるFTTH (fiber to the home) サービス契約数の3か月単位での純増数は84万契約となり、今後さらに増加することが想定される¹⁾。また、光伝送装置や構成部品、部材市場全体は、世界規模では数兆円を数えており、ゆるやかながら成長を続けている²⁾。さらに、電話サービスだけでなく映像配信をはじめとする多様なサービスを提供する統一ネットワークであるNGN (next generation network) の動きが、これら情報通信市場をよりいっそう活性化することが期待されている³⁾。また、近年における情報技術の社会への進展、例えばFTTHや無線LANの普及、携帯電話の多機能化、地上波デジタル放送の開始に伴い、われわれが日常やり取りするデータ量は飛躍的に増えてきている。今後もデジタルコンテンツの充足やユビキタス社会の整備に伴い、扱うデータ量はますます増大すると予想される。

これに対応するため、ルーターやサーバーなどの情報処理機器や携帯端末機器の処理能力向上が必然的に望まれる。しかしながら、従来の電気配線による信号伝送では、プリント配線板内部や、配線板間での伝送高速化、大容量化が限界に近づきつつあるとされており、これをブレイクスルーする技術として、光配線による伝送技術に注目が集まっている⁴⁻⁸⁾。

光配線の手段にはおもに光ファイバーと光導波路がある。光ファイバーを数値制御により任意の配線パターン形状に布線した光ファイバー布線ボード⁹⁾が製品化されているが、機器の小型化には高密度、多層配線が可能なポリマー光導波路が有利とらえている⁵⁾。

本解説では、これらの背景に基づき、光配線の必要性や課題を述べた後、開発状況の例として、筆者らが開発を進めている、低光損失、高信頼性、かつ簡易なプロセスで製造可能な、光配線用のフィルム型光導波路材料と、応用検討例について紹介する。

日立化成工業(株)研究開発本部先端材料研究所 (〒300-4247 つくば市和台48) E-mail: a-takahashi@hitachi-chem.co.jp

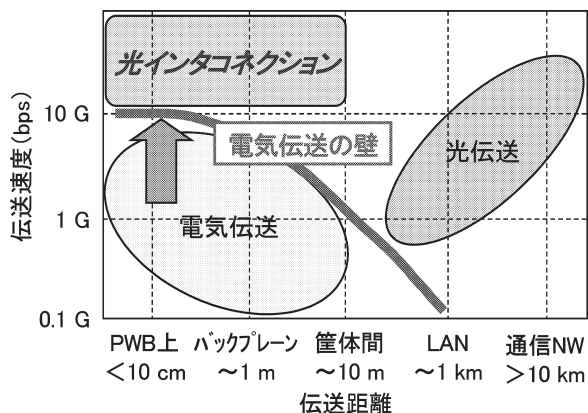


図1 信号伝送距離と伝送速度の関係。

2. 光配線の必要性と課題

2.1 光配線の必要性

図1には、信号の伝送距離と伝送速度の関係を示した。光伝送の特徴は、電気伝送に比べて高速・大容量であり、また長距離伝送が可能なのである。この特徴から、国際間をはじめ都市間などインフラ系情報通信ネットワーク幹線ではすでに光ファイバーを用いた光伝送が導入・実用化されて久しい。さらに最近では、FTTHの加入者数が急増しており¹⁰⁾、アクセス系においても光伝送が急速に普及している。

一方、電気配線は、機能集積化や低コストなどのメリットがあり、その中心的技術である半導体そのものから、半導体パッケージ基板、プリント配線板、バックプレーン間、筐体間など、あらゆる信号伝送の手段として用いられている。しかし、従来の電気伝送技術では、高速データ伝送の限界が近づきつつあり、これがボトルネックとなりシステム全体の性能を制限してしまうことが懸念されている⁵⁾。そこで、これらの課題を解決するために、これまで長距離伝送の領域で用いられてきた光伝送を、装置間または装置内に導入する検討が活発になっている。

光配線は、信号遅延や反射の問題が少ないため、10 Gbps以上の高速伝送が可能である。また、高速伝送化により配線数の大幅な低減が可能となり、機器の小型化も期待できる。さらに光配線は、電磁ノイズの影響を受けないことに加え、スケラビリティなど独自の魅力をもち、電磁ノイズ対策によるコスト高や設計制限がなくなることも大きな魅力である¹¹⁾。

このように、電気配線の限界の課題から、伝送距離が長いほど有利とされてきた光配線が、その適用距離を短くし、電気配線の領域に入り込もうとしている。

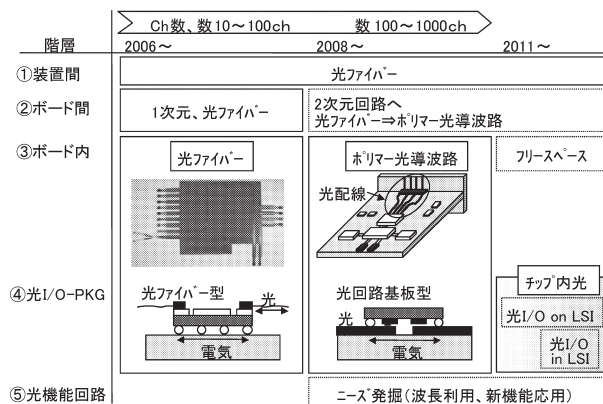


図2 光配線の導入形態。光回路実装技術ロードマップ(2005年度版)による¹²⁾。

2.2 光配線の課題

図2には、エレクトロニクス実装学会が提唱する光配線の導入形態の例を示した¹²⁾。光配線は、光ファイバーを伝送路に用いた構成でまず導入が進み、さらなる高密度化、大容量化の観点から、配線の高密度化や多数の配線を高精度に一括して形成することに有利なポリマー光導波路を、電気配線基板と一体化した、光回路基板型へ発展していくと予想される。

これまでも光回路基板の実現に向け、多くの研究、開発が行われ、種々の提案がなされてきた^{13,14)}。しかし、従来の電気配線と比べた場合の課題、すなわち消費電力やサイズ、集積性、コストなど、実用化に向けてクリアしなければならない課題が残されている¹¹⁾。光配線の導入に際し、光信号と電気信号を変換するための駆動回路や光源、受光素子が電気配線に付加されるが、これら部品の追加による消費電力の増加がネックのひとつと考えられている。消費電力の低減には、光配線の伝搬損失を低減し、光源の駆動電力やアンプの負担を少なくすることがキーポイントとなる¹²⁾。また、光配線は、これらの駆動回路や光素子を制御するための電気配線と共存する。そのため、電気配線と同等の信頼性や、表面実装に対応したはんだ耐熱性等が求められる。さらに、コスト低減のためには、光回路基板の作製方法が、既存のプリント配線板プロセスに適合することが必要と考える。

3. フィルム型光導波路材料について

3.1 材料の設計

ここでは、上記に掲げた課題を見据え、光配線に適用する光導波路材料に必要な特性について考察する。

まず、光配線用のポリマー光導波路に求められる特性を、光通信用ポリマー光導波路材料として開発したフッ素

表1 光通信用光導波路と光配線用光導波路に求められる特性.

| 項目 | ポリマー光導波路 | |
|------------|-----------|--------|
| | 光通信用 | 光配線用 |
| 使用波長 (nm) | 1300~1550 | 850 |
| 導波モード | シングルモード | マルチモード |
| コアサイズ (μm) | 4~10 | 30~100 |

化ポリイミド¹⁵⁾と比較しながら表1に示した。まずは光学特性、すなわち使用波長での透明性である。光通信に用いる波長は1300~1550 nmであるのに対し、光配線に用いられる波長は、アレイ化が容易で低消費電力で駆動できるなどの特徴を有している面発光レーザー¹⁶⁾ (VCSEL; vertical cavity surface emitting laser) の発振波長である850 nmになると考えられている。また、光通信はシングルモード伝送が主流である。そのためコアサイズが4~10 μm程度となり、±0.5 μm以下の高精度な実装が要求される。一方、光配線は、実装精度を緩和して低コスト化を図るため、マルチモード伝送方式でコアサイズは30~100 μmを想定している。シングルモードに使われるフッ素化ポリイミドは、コア形成に真空条件下でのドライエッチング加工を用いているが、光配線用の数十 μm厚のコア加工には、長時間を有するため適さない。そのため光配線用ポリマー光導波路材は、プリント配線板製造プロセスであるラミネート、露光、現像のような簡易に加工できる方式に対応できることが必要と考えている。

以上に加え、電子機器内配線に適用するために重要なのは、既存の実装技術との互換性、ならびに半導体パッケージやプリント配線板など電子部品に求められる信頼性との互換性である。特に実装技術との互換性では、素子実装の主流となりつつある表面実装用リフロー工程で各種特性を維持することが重要であり、特に、近年の環境対応から、鉛フリーはんだに対応した耐リフロー性が必要である。

上記を踏まえ、材料開発にあたっては、透明性はもとより、耐熱性や感光性、マルチモードコアの成形性や、フィルム形成などを考慮した。本報では材料に関する詳細には

表2 開発材の特性.

| 項目 | 単位 | コア | クラッド | 備考 | |
|-------|---------|---------|---------------|-----------------------------------|----------------|
| 材料形態 | — | 感光性フィルム | | 光導波路層形成法：ラミネート コアパターン形成法：露光・現像 | |
| 光学特性 | 材料損失 | dB/cm | | プリズムカップラー法、830 nmでの値 | |
| | 屈折率 | — | 1.583 / 1.548 | | |
| | 比屈折率差 | % | 2.2 | | |
| 硬化物物性 | 熱重量減少温度 | °C | 350 | 350 | 5%質量減少時の温度、空气中 |
| | ガラス転移温度 | °C | 120~130 | ~150 | 動的粘弾性試験による |

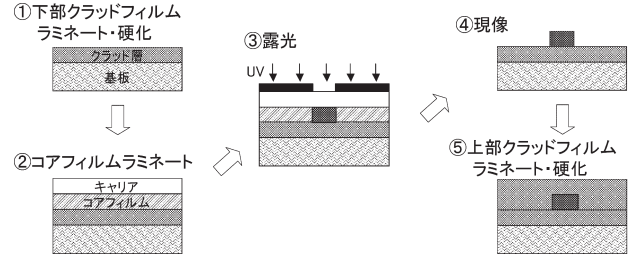


図3 光導波路作製プロセス.

触れないが、以下、その特性、プロセスを紹介する。

3.2 フィルム型光導波路材料の特性とプロセス

上記の材料設計指針を踏まえ、光配線への適用を目指して感光性機能があるフィルム型のマルチモード用のポリマー光導波路材の開発を進めた^{17,18)}。表2には、材料の形態、光学物性、および硬化物の物性を示す。材料形態は感光性のフィルムであり、後述するようなフィルムラミネートによる光導波路層形成、露光現像法によるコアパターン形成を、光導波路作製プロセスとして採用している。

コア材は、おもに透明性および耐熱性を重視した。プリズムカップラー法により測定したコア材の材料光損失は830 nmにおいて0.1 dB/cm未満である。また、屈折率は、後述のフレキシブル光導波路の小径曲げおよびVCSELとの結合効率を考慮した。コア材の屈折率は $n_1=1.583$ 、クラッド材は $n_2=1.548$ で、これより算出される比屈折率差 $\Delta=(n_1-n_2)/n_1$ は2.2%である。一方、クラッド材は、おもに耐熱性とフレキシブル性を重視した。耐熱性の尺度として、熱重量測定により求めた5%質量減少温度は、コア、クラッドいずれも350°Cである。

図3には、本開発材を用いた光導波路の作製プロセスを示す¹⁹⁾。光導波路は、(1) 基材上への下部クラッドフィルムのラミネート、硬化、(2) コアフィルムラミネート、(3) マスク露光、(4) 現像によるコアパターン形成、(5) 上部クラッドフィルムラミネートによるコアパターン埋込み、硬化、によって形成される。

図4に、本プロセスによって、プリント配線板用基材で

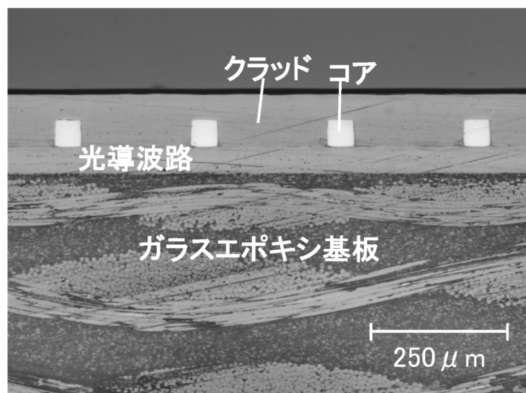


図4 光導波路の断面。

あるガラスエポキシ基板上に形成して作製した光導波路の断面写真を示す。コア幅 $50\ \mu\text{m}$ 、高さ $50\ \mu\text{m}$ 、ピッチ $250\ \mu\text{m}$ 、上下クラッド厚 $50\ \mu\text{m}$ のマルチモード光導波路が形成されている。また、断面写真から、矩形に形成されたコアパターンが、ボイド等の発生なくクラッドによって埋め込まれており、さらに上部クラッドの表層が高い平坦性を保っていることがわかる。

3.3 光伝搬損失

ガラスエポキシ基板上に作製した光導波路の伝搬損失を、波長 $850\ \text{nm}$ の VCSEL を光源に、カットバック法により測定した。結果を図5に示す。光伝搬損失は、 $0.05\ \text{dB/cm}$ と目標 ($<0.1\ \text{dB/cm}$) を満足する値を得た。また、前述の材料光損失とほぼ同等の値を得たことから、コア表面の構造不均一性等が少ない光導波路が形成されていると考えている。また、フレキシブルタイプの光導波路も、同様の損失値を示すことを確認している¹⁸⁾。

3.4 耐熱性と信頼性

前述のように、光配線用の光導波路材料は、実装性や信頼性が重要と考えている。ここでは、これら特性の評価を概説する。

評価には、前述のガラスエポキシ基板付き光導波路を用い、以下のように測定した。耐リフロー性は、半導体デバイスの実装ではんだ付けに用いられるリフロー工程前後で

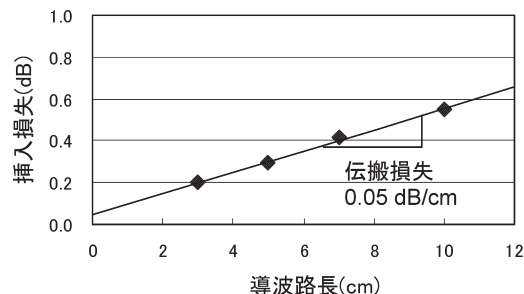


図5 光伝搬損失。

の光損失変化を測定し評価した。リフロー条件は、窒素雰囲気下、最高温度 265°C 、 260°C 以上保持時間 20 秒で、半導体デバイスの信頼性に関する ICP/JEDEC 規格に準じた鉛フリーはんだのリフロー工程を想定したものである。また、プリント配線板の規格に準拠し $-55^\circ\text{C} \Leftrightarrow 125^\circ\text{C}$ の温度サイクル試験、 $85^\circ\text{C}/85\% \text{RH}$ の条件で恒温恒湿試験を行い、光損失変化を測定した。

結果を図6の(a)~(c)に示す。リフロー試験3回後、温度サイクル試験1000サイクル後、恒温恒湿試験1000時間後、いずれも光損失変化は $0.03\ \text{dB/cm}$ 未満である。なお、フレキシブルタイプの光導波路も、同様の信頼性を有することを確認している。

4. 応用検討例

ここでは、上記のフィルム型光導波路材料を、さまざまな電子機器の光配線に適用することを想定した、応用検討例について紹介する。

4.1 光信号伝送特性の評価

光導波路の高速光伝送特性を検証するため、上記開発材料を用いてガラスエポキシ基板上に長さ $10\ \text{cm}$ の光導波路を作製し、マルチモード光ファイバーを介して波長 $850\ \text{nm}$ 、伝送速度 $10\ \text{Gbps}$ の高速光信号を送信し、光導波路を伝搬した後の信号挙動を観測した。図7に示すように、信号波形(アイパターン)は良好なアイ開口が得られ、本開発材料を用いた光導波路は、 $10\ \text{Gbps}$ の高速光信号伝送能

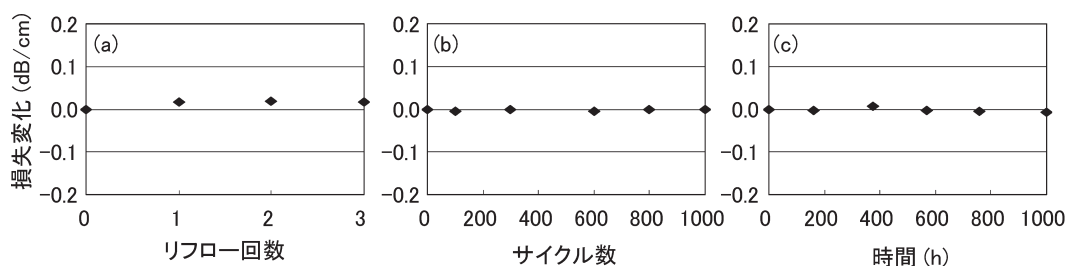


図6 耐リフロー性および信頼性試験結果。(a) リフロー試験、(b) 熱サイクル試験、(c) 恒温恒湿試験。

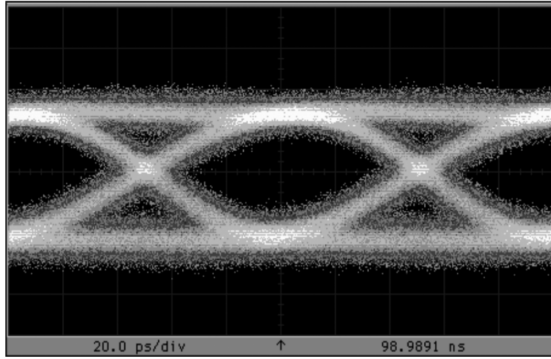


図7 10 Gbps 信号伝送波形.

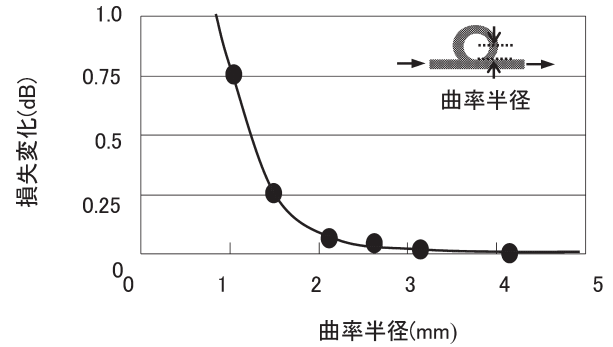


図9 曲げ試験.

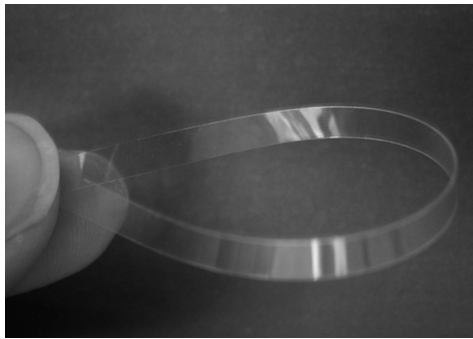


図8 フレキシブル光導波路の外観.

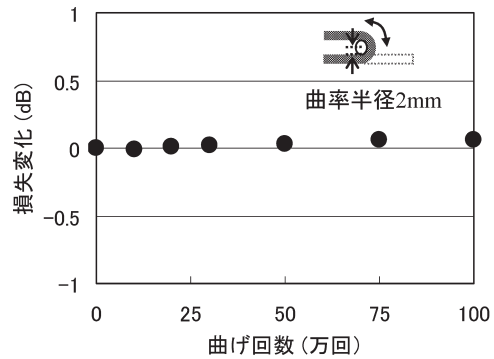


図10 繰り返し折り曲げ試験.

力を有することが確認できた^{20,21)}.

4.2 フレキシブル光導波路の検討

ここまでは、開発材料をリジッド基板に複合化した光導波路を紹介してきた。一方、電子機器内では、さまざまな形態の電気回路板が用いられている。一例を挙げれば、おもにガラスエポキシ積層板を主体にしたリジッド基板や、ポリイミドなどのフィルムキャリアに配線を形成したフレキシブルプリント配線板、さらにはフレキシブルな回路を有するリジッド基板、リジッドフレックス基板などである。光配線も、アプリケーションや実装形態に応じてリジッド型やフレキシブルタイプ、さらには電気基板とのハイブリッドタイプなどさまざまな形状に適用できることが重要と考えている。ここでは、開発したフィルム型光導波路材料を用いて作製したフレキシブル光導波路、さらにはこれを電気のフレキシブルプリント配線板 (flexible printed circuit; FPC) と複合化した光電気 FPC を紹介する。

図8は、開発材を用い、上述と同様のラミネート、露光現像プロセスでフィルム状に作製したフレキシブルタイプの光導波路の写真である。内部には、50 μm 角、250 μm ピッチで12チャンネルの光導波路が形成されている。このフレキシブル光導波路を用い、屈曲時の光損失評価を行っ

た。図9に、光導波路を360°に曲げ、光損失の曲げ径の影響を測定した結果を示す。曲げ半径2 mmまで光損失増加は0.1 dB以下に抑えられており、良好な曲げ特性を示すことがわかる。

図10には、繰り返し折り曲げ試験の結果を示す。折り曲げ半径 $r=2$ mm から5 mmの各試験を行った結果、100万回折り曲げ後の光損失変化は、0.1 dB以下であった。

4.3 フレキシブル光電気複合配線板

最後に、上記のフレキシブル光導波路を、FPCに一体複合化したフレキシブル光電気複合配線板の検討例を紹介する。

図11に、フレキシブル光電気複合配線板の基本的な構造を示す。ポリイミド基材のFPCに、接着層を介してフレキシブル光導波路が複合化されている。接着剤は、表3に示すように、リフロー前後で接着性および透過率の劣化がなく、耐屈曲性を有するものを用いている。光導波路は、光結合に有利なマルチモード型で、コアサイズは50 μm 角である。また、光素子と光路変換ミラーの距離を近づけるため、ポリイミド基材を25 μm 、接着剤厚さを10 μm の薄型構造とした。

図12には、上記フレキシブル光電気複合配線板に

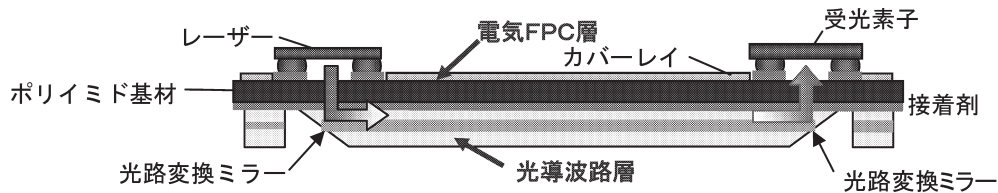


図 11 フレキシブル光電気複合配線板。

表 3 接着剤の特性。

| 項目 | 内容 | 条件 | |
|-------|---------|-------------------|----------------------|
| 接着性* | リフロー前 | 0/100 | 基盤目テープ法による 剥離マス目数 |
| | リフロー後 | 0/100 | |
| 透過率 | リフロー前 | 98% | 波長 850 nm |
| | リフロー後 | 97% | |
| 耐屈曲性* | 30 万回以上 | R=2 mm, 0~180° 曲げ | |

*ポリイミド/接着剤/フレキシブル光導波路接着サンプルで評価。

VCSEL および PD を搭載し、速度 10 Gbps/ch にて 4 チャンネルの VCSEL を駆動させ、PD での受信信号波形（アイパターン）を観測した結果を示す。4 チャンネルすべてにおいて、アイ開口を観測し、本構成の光電気複合配線板が、高速光信号を伝送する能力を有することを確認した²²⁾。

本解説では、電気配線に替わる高速伝送技術として注目される光配線について概論し、各種適用を目指し開発を進めている、フィルム型光導波路材料とその応用検討例について述べた。開発材は、ラミネート、露光、現像により光導波路を形成することが可能で、低光損失かつ高信頼性の光導波路を作製することが可能である。また、フレキシブルタイプの光導波路や、光電気複合配線板としても適用可能と考えている。

光配線の実用化のためには今後、光導波路材料のみならず、配線板材料や実装材料、さらには複合化までも含めたソリューションが必要と考える。引き続き、これらの分野についても検討し、光配線の実用化に貢献できるよう開発を進めていきたいと考えている。

高速光信号の伝送実験にご協力いただいた、(株)日立製作所中央研究所 宍倉正人氏ならびに松岡康信氏に感謝致します。

文 献

- 1) 総務省：“第一章 ユビキタスエコノミーの進展とグローバル展開”，情報通信白書平成 19 年版（総務省，2007）pp. 151-155.
- 2) 光産業予測便覧，Vol. 1（富士カメラ総研，2005）.
- 3) NGN 市場総覧 2007-2008，日経マーケット・アクセス，国際通信経済研究所編（日経 BP コンサルティング，2007）.

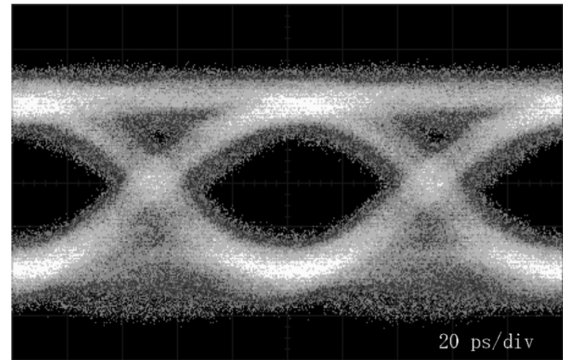


図 12 フレキシブル光電気複合配線板の 10 Gbps 信号伝送波形。

- 4) “光配線との遭遇”，日経エレクトロニクス，2001 年 12 月 3 日号（2001）109-127.
- 5) 蔵田和彦：“光データ伝送の基礎”，エレクトロニクス実装学会誌，9, No. 1（2006）66-70.
- 6) 竹内寛爾：“情報通信のエネルギー問題”，Science & Technology Trends, January 2006, 9（2006）1-11.
- 7) 小林功郎：“光インターコネクション技術の最新動向”，2006 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集，CS-4-1（2006）pp. S-47-S-48.
- 8) S. Uhlig and M. Robertsson：“Limitations to and solutions for optical loss in optical backplanes,” J. Lightwave Technol., 24（2006）1710-1724.
- 9) 有家茂晴，河添 宏，高橋 淳：“バックボード用光ファイバ配線板”，日立化成テクニカルレポート，No. 38（2002）pp. 19-22.
- 10) 総務省：情報通信白書平成 19 年版（総務省，2007）.
- 11) 光回路実装技術委員会：“光インターコネクション技術の進展と新たな可能性—光回路実装技術ロードマップに向けて—”，エレクトロニクス実装学会誌，10（2007）27-29.
- 12) エレクトロニクス実装学会：光回路実装技術ロードマップ（2005 年度版）（2006）.
- 13) A. Neyer, S. Kopetz, E. Rabe, W. Kang and S. Tombrink：“Electrical-optical circuit board using polysiloxane optical waveguide layer,” Proc. of 55th ECTC, Orlando, FL（2005）pp. 246-250.
- 14) J. A. Kash, F. E. Doany, L. Schares et al.：“Chip-to-chip optical interconnects,” Proc. of Optical Fiber Communication Conference (OFC) 2006, OFA3（2006）.
- 15) 宮寺信生ほか：日立化成テクニカルレポート，No. 37（2001）pp. 7-16.
- 16) 小山二三夫：“面発光レーザの最近の進展”，2005 年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集，CS-4-1（2005）pp. S-33-S-34.
- 17) 柴田智章ほか：第 19 回エレクトロニクス実装学術講演大会講演論文集，16C-08（2005）.
- 18) 牧野竜也，柴田智章，落合雅美，高崎俊彦，高橋敦之：“ド

- ライフィルム型マルチモードポリマ光導波路材料”, 2006年電子情報通信学会総合大会講演論文集, C-3-2 (2006) p. 137.
- 19) 高崎俊彦, 山口正利, 柴田智章, 牧野竜也, 落合雅美, 高橋敦之: “フィルム型光導波路材料”, 日立化成テクニカルレポート, No. 48 (2007) pp. 17-22.
- 20) 松岡康信, 宍倉正人, 柴田智章: “低損失光結合構造を適用した多層光配線ボード”, 2006年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, C-3-72 (2006) p. 194.
- 21) M. Shishikura, Y. Matsuoka, T. Ban, T. Shibata and A.

- Takahashi: “A high-coupling-efficiency multilayer optical printed wiring board with a cube-core structure for high-density optical interconnections,” *2007 Electronic Components and Technology Conference* (2007) pp. 1275-1280.
- 22) 柴田智章, 高橋敦之: “フレキシブル光電気複合配線板の光伝送特性”, 2007年電子情報通信学会ソサイエティ大会講演論文集, C-3-14 (2007).

(2007年10月19日受理)