

低損失の光・電気複合リジッドプリント配線板

Optical-Electrical Composite Rigid Printed Wiring Board

近藤 直幸* ・ 中芝 徹* ・ 橋本 眞治*
Naoyuki Kondo Toru Nakashiba Shinji Hashimoto

光・電気複合リジッドプリント配線板において、相溶性や表面平滑性に優れるキャリアフィルム上への均一な塗工性を実現する樹脂配合設計による光学特性と加工性に優れるドライフィルム状の光導波路用材料の開発、照射光の散乱を防止させてコア側面の平滑性を向上させることによる低損失な光導波路形成工法の開発、および機械加工面への樹脂コーティングによる量産性に優れる反射効率の高い埋込型マイクロミラー工法の開発によって、部品の表面実装が可能なりジッドタイプを実現した。この材料は、全長1mの光回路をもつ光・電気配線板で10 Gbpsのデータ伝送を可能とし、はんだリフロー試験、温湿度試験等においても特性変動が0.5 dB以下に抑えられており、実用可能な信頼性能を有している。

In the activities related to optical-electrical printed wiring boards, rigid type boards compatible with surface mounted circuit manufacturing processes have been developed through (1) the development of waveguide material in the form of dry film for easy processing and resin material design to obtain optimal compatibility for optical characteristics and achieving uniform coating on smooth surface carrier film, (2) the development of a forming process of low-loss waveguides by preventing diffusion of incident light beam with increased smoothness of the core side surfaces, and (3) development of an embedded micro-mirror process providing high reflection rate and productivity by applying resin coating on machined surfaces. The developed technology enables 10 Gbps data transmission on the optical-electrical wiring board supplied with 1 meter of total optical circuit, while the performance change is suppressed below 0.5 dB after a solder reflow test and temperature and humidity test, thereby proving its reliability in practical applications.

1. ま え が き

地上波デジタル放送の開始やデジタル家電の普及により、オフィスのみならず家庭に至るまでデジタル化の波が押し寄せてきている。また、FTTH（Fiber To The Home）の急速な普及、携帯電話の多機能化や無線LANスポットの出現、オンデマンド配信等によりさまざまな機器がネットワークにつながり、いつでも、どこでも、だれとでも、安全にコミュニケーションできるユビキタス社会実現のインフラストラクチャが整いつつある。デジタル端末機器の性能向上と通信インフラストラクチャの充実が両輪となって高精細写真や動画などの映像利用が進み、機器内で取り扱われるデータ量は飛躍的に増大している。これに対応するためには機器内部で情報を高速伝送する必要があるが、従来の電気回路では、電磁ノイズ干渉、インピー

ダンス不整合等の問題が顕在化し、伝送速度が限界に達しつつある¹⁾。

このため、従来のプリント基板内に光配線を導入した光・電気複合リジッドプリント配線板（以下、OE-PWBと記す）を採用することによって高速伝送を実現し、電磁ノイズ等の課題を解決して機器性能を飛躍的に高めることが期待される²⁾。

光配線を形成する手段としてスピコート法が一般的であるが、溶媒の使用、廃液の発生、サイズの大きい基板や多数個取りといった大面積化が困難、また従来のプリント配線板製造ラインを利用した製造ができない等の問題がある。

リジッドタイプのプリント配線板に光配線を導入する手段としては、光ファイバや光導波路フィルム単体をコネクタ接続で機器内に組み込む方法もあるが、サイズが大き

* 新規商品創出技術開発部 New Product Technologies Development Department

なったり配線が複雑となる。

筆者らはこのような問題を解決するには電気回路と光回路とを一体化する OE-PWB が最良の方策であると考え、以下の開発目標を掲げている。

- (1) 光素子も電気素子も表面実装が可能。
- (2) 従来のプリント配線板工法と同工法で作製が可能（積層成形、フォトリソグラフィーでの導波路形成等）。
- (3) 安全性が高く、環境負荷の少ない加工法の採用が可能。
- (4) 1 m の導波路長でも光伝送性を確保。
- (5) プリント配線板相当の信頼性を確保。
- (6) 実装余裕が広く作製が容易なマルチモード光導波路の採用が可能。
- (7) 低コスト VCSEL（Vertical Cavity Surface Emitting Laser, 面発光レーザ）の波長帯 850 nm で設計が可能。

しかし、これらの目標をすべて満足する OE-PWB を実現させる材料や加工プロセスがこれまではなかったのが現実である。

そこで筆者らは、これらの開発目標に対応するエポキシ樹脂ベースの光導波路用フィルム材料と加工プロセスを開発することで、表面実装型の OE-PWB の作製に成功した。これにより、従来の 10 cm 程度の光導波路単独での伝送しか確認できていなかった 10 Gbps の信号を、ミラーを形成した全長 1 m の OE-PWB で伝送が可能であることを実証したので以下に報告する。

2. 要素技術

10 Gbps の伝送を全長 1 m の OE-PWB で実現するためには、材料およびプロセスの両面から複数の要素技術開発による低損失化が必要である。本稿では、フィルム材料作製、導波路形成、およびミラー形成の代表的な三つの要素技術について述べる。

2.1 光導波路用フィルム材料

光導波路の低損失化を実現するためには、①感光性樹脂の透明性、②キャリアフィルムの表面平滑性、③キャリアフィルム上での感光性樹脂の平坦性のおおのが優れていることが重要である。そこで、それぞれに対して、以下の方策を行う。

①に対しては、光を効率良くコア材料中を導波させるためには、コア材料を屈折率の低いクラッド材料で囲う必要があり、屈折率を調整することが重要となる。この調整には、それぞれ相溶性の異なる複数の原料を配合する必要がある、相溶しない場合は白濁し光の吸収や散乱が起こることになる。これを防止するために、相溶化剤として各原料の特有の構造を併せもつ材料を少量配合することで白濁がない感光性樹脂を調整している。

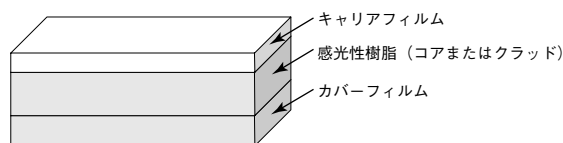
②に対しては、平均面粗さ Ra が 2.4 nm と優れるキャリ

アフィルムを選定することで、感光性樹脂への凹凸の転写を抑えている。これによって感光性樹脂硬化時のこの凹凸面での紫外線光散乱による光導波路の側面荒れの発生も低減できる。

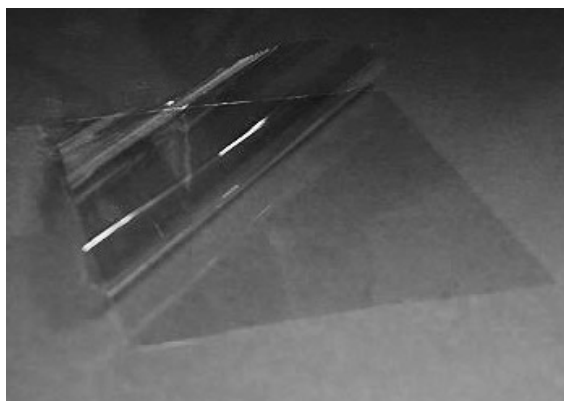
③に対しては、親水性基と親油性基の両方を有するレベリング剤を感光性樹脂に配合させることによって、キャリアフィルムへの塗工幅が 300 mm でねらいの膜厚に対してばらつき 0.5 μm 以下での高精度な塗工を実現することで、感光性樹脂の平坦性を確保している。

開発した感光性樹脂は、ドライフィルム状とすることで、一般的に採用されているスピンコート法に使用する材料のように溶媒を含まないことから、作業現場における安全性が高く、環境負荷も少ない。また、大型サイズ基板や多数個取りといった大面積化への対応や、従来のプリント配線板工法と同様な工法（積層成形、フォトリソグラフィーでの導波路形成等）の採用を可能とし、低コスト化の期待ができる。さらに、高い耐熱性を有することからリフローによる素子実装が可能である。

これらの特徴をすべて兼ね備えるフィルム材料の構成と外観を図 1 に示す。



(a) フィルム構成



(b) フィルム外観

図 1 フィルム構成と外観

このフィルム材料は、キャリアフィルム上に 10 ~ 100 μm の厚みに感光性樹脂を塗工し、カバーフィルムで保護した 3 層構造となっている。このため、ほこりやごみの付着を防止でき取扱性に優れている。

表 1 に開発したフィルム材料の特性例を示す。

表1 フィルム材料特性例

項目	コア用材料	クラッド用材料
材質	UV 硬化型 エポキシ樹脂	UV/熱硬化型 エポキシ樹脂
性状	ドライフィルム状	ドライフィルム状
屈折率	1.581	1.541
Tg (°C)	177	187
CTE (10 ⁻⁶ /°C)	70	70

2.2 光導波路形成技術

光導波路パターンの表面平滑性は導波損失の特性に大きく影響する。光導波路はフォトリソグラフィーによって作製するが、露光・現像等の際にパターン表面が荒れてしまう問題がある。筆者らは、露光時のプロセスを工夫することで照射光の散乱を防止し、現像後の導波路側面における平滑性を大きく改善している。改善前後での導波路のSEM写真を図2に示す。側面荒れが大幅に改善していることがわかる。また、このときの損失をカットバック法にて測定したところ、改善前後でそれぞれ0.15 dB/cm、0.06 dB/cmとなり損失が低減していることがわかる。後者の場合のカットバック結果を図3に示す。

さらに、プリント配線板と複合化する際にも工夫を施している。プリント配線板の材料にはガラスクロスが含まれるため、この上に光導波路をビルドアップしていく工法ではクロス目の影響を受けて光導波路にうねりが生じやすい。そこで筆者らは、より平滑性の高い基板に光導波路を形成した後、最後にプリント配線板に転写する工法を採用している。

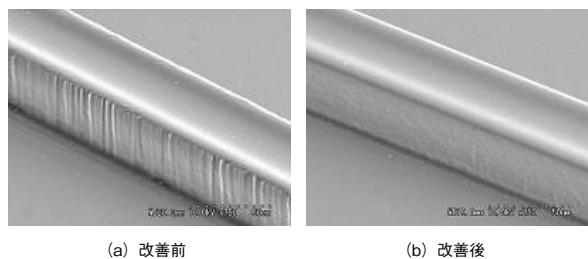


図2 導波路の側面荒れの改善

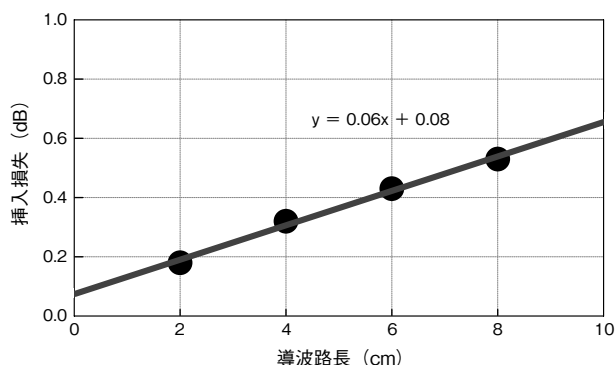


図3 挿入損失測定結果

2.3 ミラー形成技術

光素子の表面実装を行い、基板表面からの光の入出力を実現するため、導波路フィルム内に取付角45°のマイクロミラーを形成している。

マイクロミラーは回折格子等の他の方法と比較し、構造が単純で加工コストが低いうえに比較的高い光路変換効率を得やすく実装余裕も広いという特徴がある³⁾。このマイクロミラーを形成する方法としては、ダイシングブレードで切り込む方法⁴⁾とレーザアブレーションによる方法⁵⁾が代表的であるが、ともに加工痕によって表面平滑性が失われやすいことから、低損失化のためには別途平滑化処理が必要となる。

前報⁶⁾ではエキシマレーザで平滑化処理を実施していたが、プロセスコストを考慮するとより簡単な方法が必要である。そこで筆者らは、加工面に樹脂コーティングを施すことで平滑面を形成している。処理前後の加工面写真を図4に示す。これらの表面に金の反射膜を形成し、処理前後の平均面粗さと反射膜の損失量の関係を測定すると、平均面粗さRaがそれぞれ120 nm、40 nmであるのに対して損失は2.0 dB、0.5 dBとなり、樹脂コーティングによって伝送損失が大きく改善できている。

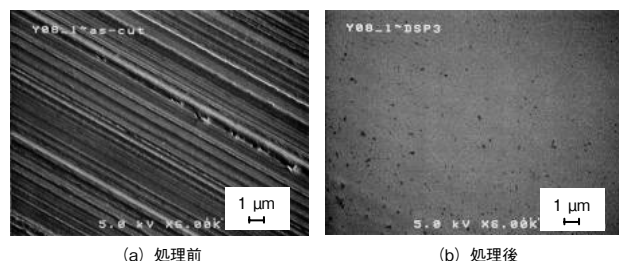


図4 樹脂コーティングによる平滑化処理の効果

3. OE-PWBの試作

3.1 作製プロセス

開発したフィルム材料を使用し、1 m長のOE-PWBを試作する。プロセスの概要を図5に示す。

プリント配線板工法と同様の、樹脂フィルムを順にラミネートするプロセスをベースとし、前述の低損失な光導波路やミラーを作り込む工法を組み合わせている。また、光素子を光出入口（ミラー部）に高精度かつ容易に搭載できる電極パッド形成技術にも特徴を有している。

3.2 試作品の構成

回路長1 mにおける光と電気伝送特性を比較するための評価用基板として、うず巻状で全長1 m、断面40 μm角のコア両端にマイクロミラーを設けた光導波路と、これと同形状の電気回路を積層したOE-PWBを作製する。なお、電気回路には一般グレード材FR-4と低誘電グレード材である当社プリント配線板用材料「MEGTRON6^{*1)}」を使

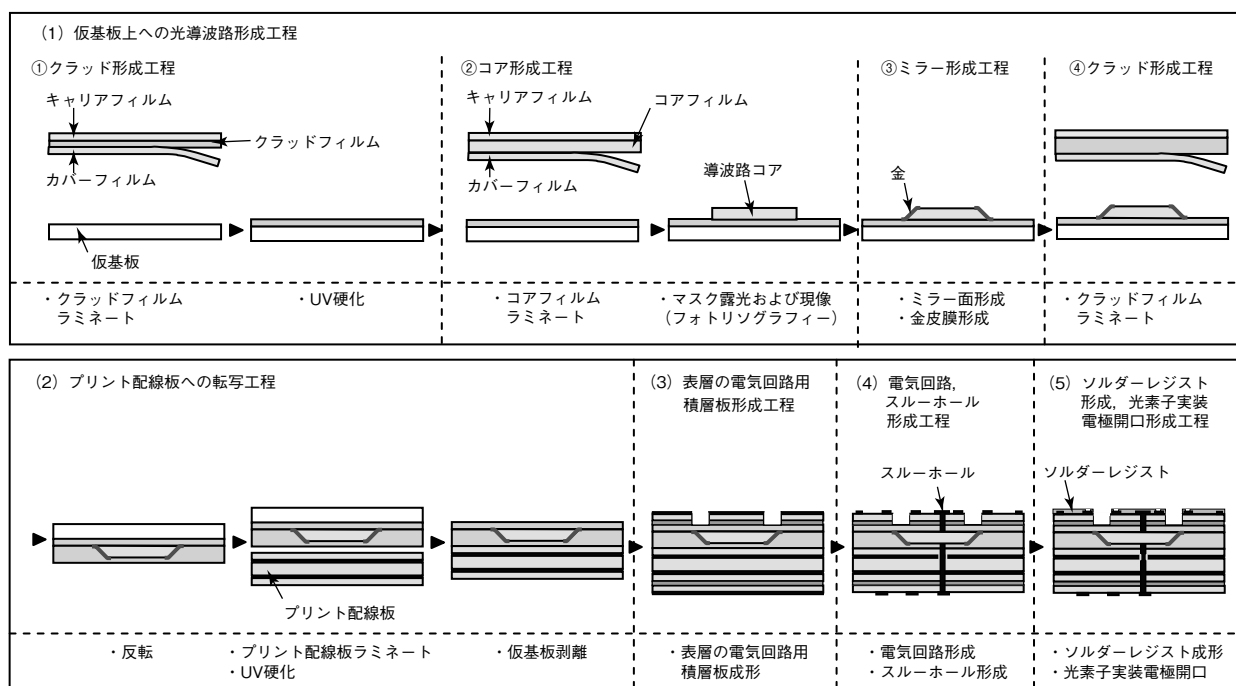


図5 OE-PWB作製プロセス例

用し、インピーダンスマッチングさせるためにストリップラインを $50\ \Omega$ に設定する。

うず巻状の回路パターンを図6に示す。また、作製したOE-PWBの試作品の外観を図7に示す。

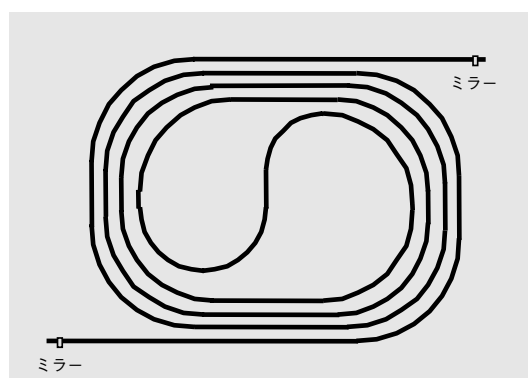


図6 うず巻状回路パターン

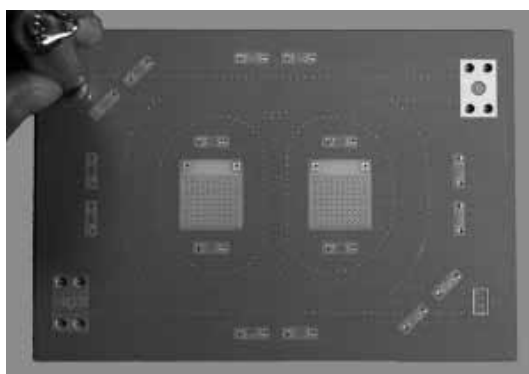


図7 OE-PWB試作品の外観

4. 試作品の評価

4.1 伝送特性

作製したOE-PWB内の光導波路に光ファイバを用い、マイクロミラーを介して波長 $850\ \text{nm}$ のマルチモード光を速度 $5\ \text{Gbps}$ および $10\ \text{Gbps}$ で伝送し、反対側のマイクロミラーから出る光信号を光ファイバで受光したときのアイパターンを表2に示す。また電気回路において、伝送速度 $5\ \text{Gbps}$ で測定したアイパターンも併せて表2に示す。光伝送では電気伝送と比較して伝送速度 $5\ \text{Gbps}$ において良好なアイ開口が得られており、さらに伝送速度 $10\ \text{Gbps}$ においても十分なアイ開口が得られている。これらから、開発したOE-PWBが $10\ \text{Gbps} \cdot \text{m}$ の伝送能力を有することがわかる。

4.2 信頼性

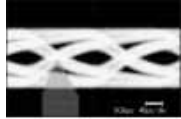
OE-PWBに要求される信頼性は、従来のプリント配線板と同等と想定し、以下の一般的な試験を実施する。

- (1) 鉛フリーはんだリフロー試験（ピーク温度 $260\ ^\circ\text{C}$ 、3 サイクル）
- (2) 高温高湿試験（ $85\ ^\circ\text{C}$ 、 $85\ \%\text{RH}$ 、 $1000\ \text{h}$ ）
- (3) ヒートサイクル試験（ $-40\ ^\circ\text{C} \Leftrightarrow 125\ ^\circ\text{C}$ 、 1000 サイクル）

試験前後でのミラー入出射における損失変動を測定し、結果をそれぞれ図8、図9、図10に示す。

試作品の特性変動は、すべての試験で $0.5\ \text{dB}$ 以下に抑えられており、十分な実用性があることが確認できる。

表2 光導波路と電気回路の伝送特性比較

項目		損失 (dB)		アイバターン	
		5 GHz	10 GHz	5 Gbps	10 Gbps
光導波路	コアサイズ: 40 μm 角	12			
電気回路	「MEGTRON6」 銅: VLP (35 μm 厚)	16	≤ 25 (推定値)		_____
	FR4 銅: VLP (35 μm 厚)	29	≤ 55 (推定値)		_____

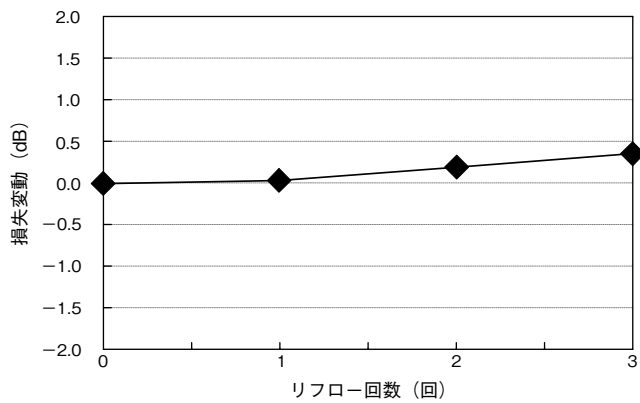


図8 リフロー試験結果

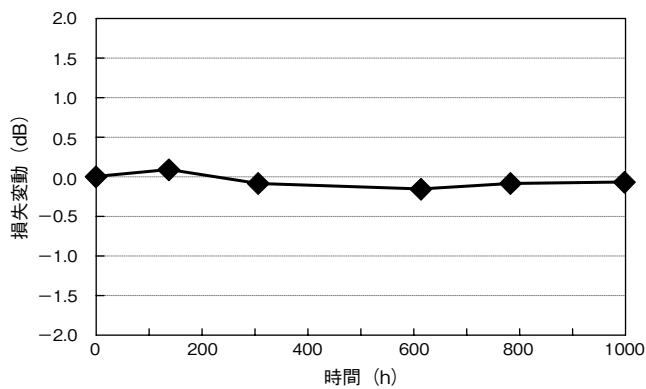


図9 高温高湿試験結果

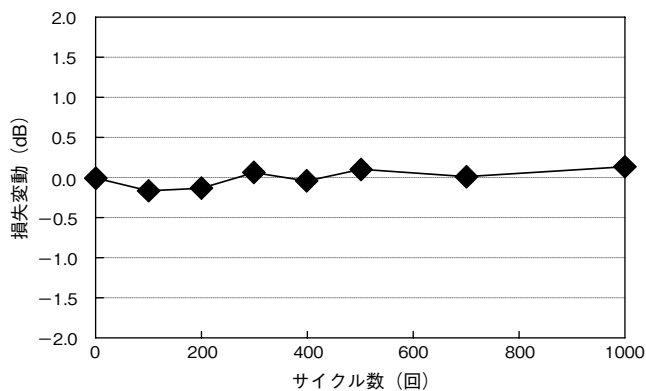


図10 ヒートサイクル試験結果

5. あとがき

光・電複合リジッドプリント配線板において、相溶性や表面平滑性に優れるキャリアフィルム上への均一な塗工性を実現する樹脂配合設計による光学特性と加工プロセス性に優れるドライフィルム状の光導波路用材料の開発、コア側面の平滑性に影響する照射光の散乱を防止することによる低損失な光導波路形成工法および機械加工面への樹脂コーティングによる量産性に優れる反射効率の高い埋込型マイクロミラー工法の開発によって、部品の表面実装が可能なりジッドタイプを実現した。これらによって、光導波路の低損失化を実現することで、全長1 mの光回路をもつ光・電配線板で10 Gbpsでのデータ伝送を可能とし、はんだリフロー試験、温湿度試験等を実施した結果、特性変動が0.5 dB以下に抑えられており実用可能な信頼性能を有することが確認できた。

本開発成果であるOE-PWBは、現在、一辺が30 cmを超える大型のプリント配線板が使用されている情報機器内の高速伝送、電磁ノイズ干渉やインピーダンス整合等の問題に対し、きわめて有望な解決策であり、サーバ、ルータ、スーパーコンピュータ、高速プリンタ等の情報機器での高速・大容量データ処理に貢献できるものと考えている。

●注

* 1) MEGTRON：パナソニック電工（株）の登録商標

*参考文献

- 1) Leading Trends／筐体内に浸透し始める光伝送，ルータや携帯電話機が先行，日経エレクトロニクス，2005年6月6日号，p. 61（2005）
- 2) 光回路実装技術委員会：光配線技術，光回路実装ロードマップ（2005年度版），p. 37（2006）
- 3) T. Nakashiba, H. Yagyu, S. Hashimoto, T. Matsushima, and K. Kotera：Investigations on optical coupler by embedded micro-mirrors on optical wiring boards, Electronic Circuits World Convention 10（Anaheim）, IPC（2005）
- 4) R. Yoshimura, M. Hikita, M. Usui, S. Tomaru, and S. Imamura：Polymeric optical waveguide films with 45° mirrors formed with a 90° V-shaped diamond blade, Electron. Lett. Vol. 33, No. 15, p. 1311-1312（1997）
- 5) 塩田 剛史，鈴木 健司：エキシマレーザ加工により高分子光導波路に形成された45度マイクロミラー，エレクトロニクス実装学会誌，Vol. 7, No. 7, p. 607-612（2004）
- 6) 中芝 徹，柳生 博之，橋本 眞治：光・電気複合フレキシブルプリント配線板，松下電工技報，No. 54, No. 3, p. 38-43（2006）

◆執筆者紹介



近藤 直幸

新規商品創出技術開発部



中芝 徹

新規商品創出技術開発部



橋本 眞治

新規商品創出技術開発部