

ポリマー光導波路への期待とそれを支える材料技術

小林 壮一

Expectation for Polymer Optical Waveguides and Its Material

Soichi KOBAYASHI

As the demand for network bandwidth grows, there is a parallel need to improve data transmission inside network systems and equipment. Polymer optical waveguides are attractive as optical components in optical interconnects and optical communication systems because of the potential of easy low-temperature and low-cost fabrication. In this review optical printed-circuit boards (PCBs) are discussed with optical transmitter-receiver components, chip-to-chip, and board-to-board optical interconnects through optical backplane boards. Advances in polymer waveguide technologies developed at various companies and organizations are reported such as loss minimized by halogenation, low birefringence without stress, high thermal stability, refractive-index controllability, and good adhesion with silicon substrate. As a future technology, the photo-bleaching technologies with polysilane waveguides on tunable filters and tunable optical sources are discussed.

Key words: polymer waveguides, polysilane, PCB, optical backplane, optical interconnects

われわれの生活はパソコンを使い、インターネットを通して世界のニュースがいつでも手に入り、自分の家を空から見ることができたり、自分の要求に合った最適な病院を検索することも可能となった。ブラウン管テレビから液晶テレビへ、アンテナを使ったアナログ受信から外部アンテナなしでも画像が鮮明に見える地上デジタル受信へ、携帯電話も静止画から鮮明な動画を見られる時代になり、いよいよ家庭にもデジタル社会の風が吹いてきた、と実感する今日である。これに伴い、今後の成熟した社会においては“安心”、“安全”が基本であり、家庭内、病院、介護施設等公共機関における情報ハイウェイがデジタル的に整備されるようになると“どこでも”、“だれでも”が可能になる社会基盤が構築され、ユビキタス社会へと移行する構図がみえてくると同時に莫大な情報量の処理能力が要求される。日本では、NTT 主導で光ファイバー網を家庭まで引く FTTH (fiber to the home) の普及活動は目覚ましいものがあり、すでに 1000 万加入 (回線数) を超え 2007

年度中には ADSL (asymmetric digital subscriber line) 加入数を超える可能性もあり、世界の光通信のけん引役を演じている。光通信システムは加入者網、大都市網、長距離網に従って伝送速度が速くなり、最近では波長多重技術を用いるため、従来のデジタル信号容量に波長の数を掛けた Tbps 容量のトラフィックが増大している。以上の状況において、デジタル処理に必要な LSI 回路の処理能力が莫大に増えてきており、光信号と電気信号の変換技術も高度化している¹⁾。

光ファイバーへ高速デジタル信号を送り出すためには、広帯域な光変調器を用いて電気信号から光信号に変換し、光プリント板内の光導波路と結合する技術、光導波路内の光信号を電気信号に変換する技術、光プリント板と光バックプレーンを結ぶ高度な接続技術が望まれる。日本における光実装技術開発は ASET (超先端電子技術開発機構)²⁾ が主導で国内 40 社以上が参画して先導してきた。海外では、米国が DARPA (Defense Advanced Research

千歳科学技術大学光科学部 (〒066-8655 千歳市美々 758-65) E-mail: s-koba@photon.chitose.ac.jp

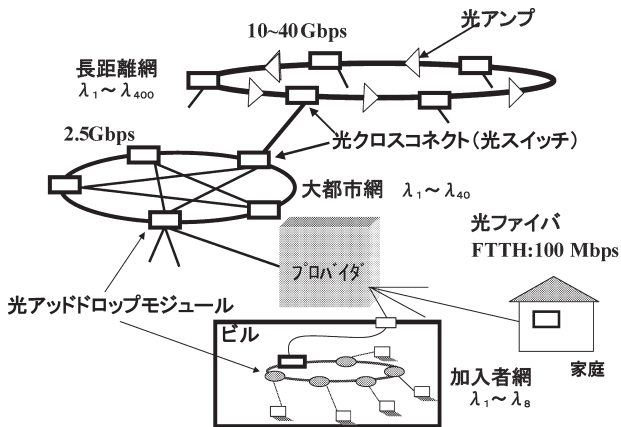


図1 高速で波長多重化した光通信システム。

Projects Agency) 主導で動いており、欧州では NEMO (Network of Excellence on Micro-Optics) など組織的プロジェクトが展開されている³⁾。最近、国内外の光実装関連の学会に参加した限りでは IBM のアクティビティが高く、データコム用の光インターコネクション技術開発が具体的に進められていると思われる⁴⁻⁶⁾。本稿では、以上の背景のもと、マルチモード光導波路を基本とした光配線実用化を目指した光インターコネクション技術についてポリマー光導波路への期待とそれを支える材料技術について述べ、ポリマー光導波路の最近の基盤技術と将来技術について解説する。

1. ポリマー光導波路への期待

図1は、高速で波長多重化した光通信システムの説明図である。長距離網では伝送速度が10~40 Gbps (ギガビット/秒) で波長数400波以上のため伝送装置はTbps (テラビット/秒) の情報処理能力が要求され、大都市網では2.5 Gbps, 40波以上のスループットが必要となる。一方、FTTHによりビルおよび家庭まで100 Mbpsの信号が来ており、いったんONU (optical network unit) で電気信号に変え、無線あるいは有線 (同軸ケーブルか光ファイバー) でさらに家電製品に接続される。最近では新築マンションの設備に光ファイバー配線が常設され、家庭内にも情報コンセントがみられる。個々の家電製品にアドレスを付与できれば家庭内でもGbpsの情報ハイウェイ (光ホームネットワーク) を構築でき、動画像を自由にやりとりすることが可能になる⁷⁾。今後は公共機関内のLAN (local area network), たとえば病院, 学校などでの高速LANは不可欠な設備になり、院内, 校内はもちろん遠隔治療や遠隔授業などへの応用も快適空間で可能になると予想できる。以上の高速・広帯域光通信システムのスループットを

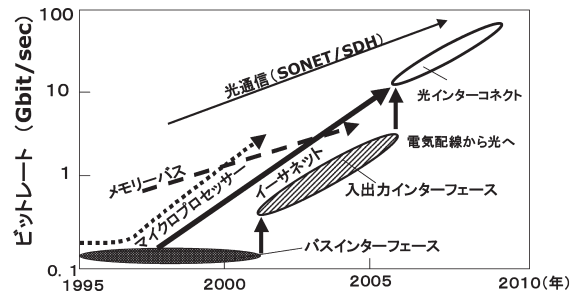


図2 電気配線から光配線へ。

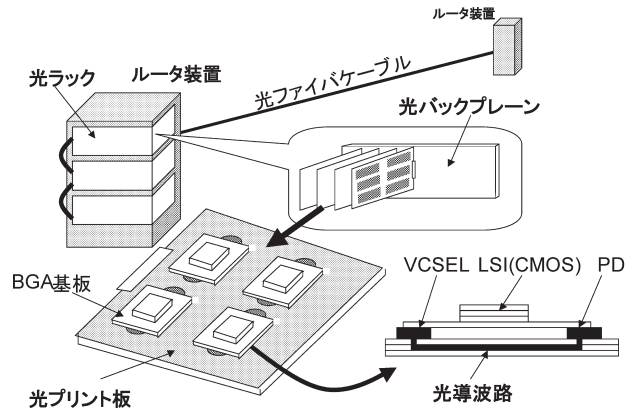


図3 光プリント板上の高速伝送と光インターコネクション。

年とともに図2に描いた。いままでLANとして電気信号で処理してきたイーサネットがギガビットイーサになると光ファイバー伝送技術が必要とし、通信はもとよりデータ通信 (コンピューター間通信) に光通信が不可欠となってきた。

このような背景のもと、図3のような伝送装置実装構成が考えられ、光配線技術が徐々に実用化されつつある⁸⁾。NTTの光通信システムは従来、電子交換機を用いて運用されてきたが近年のIP電話の普及により、ルーターが交換機の役割を演ずるようになった (図3の装置)。ルーター装置間を光ファイバーケーブルで接続し、10 Gbps以上の伝送を行っている。装置内には各段にラックが収納されており、各ラックは光バックプレーン (バックボードともいう) をもっており、各光プリント板 (ドータボードともいう) が接続されている。光プリント板上には、CMOS等のLSI集積回路と光I/O (入出力) であるVCSEL (面発光レーザー) とPD (フォトダイオード) が配置されたBGA (ball grid array) 基板が搭載されている。ラック間は光ファイバリーボンとMTコネクタで接続されている。ラック内の光バックプレーンは現在、光ファイバシートが採用されており、光ファイバー素線をパソコンで正確に引き回し、ポリイミドフィルムなどのフレキシブル光

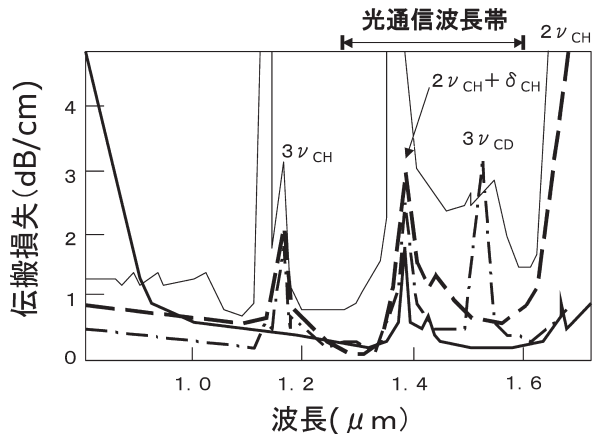


図4 フッ素添加によるC-H結合損失の低減化。—— 従来のポリマー，--- 重水素化ポリマー，- - - フッ素化ポリイミド，—— 全フッ素化ポリイミド。

ファイバーストックで両面からはさんだ形状であり，国内ではNEL社が開発している。ポリマー光導波路シートは海外では米国のオプティカルクロスリンク社がデュポン社の透明フィルムを用いて低損失光導波路を，ドイツのフラウンホーファー研究所がモールド法でフレキシブルシートを開発している⁹⁾。プリント配線板は現在，電気配線が埋め込まれ5~10層の構造をしており，層間接続はビヤホール（プリント基板の層間を接続するための穴：CO₂レーザー等で空ける）を空けて金属で埋める構造になっている。光プリント板の場合は光導波路が埋め込まれ，その上に光I/O回路が搭載され，LSI回路と接続される。電気プリント板は，高周波信号（数GHz以上）を伝送するうえでノイズ，誘導等を低減するため，配線間距離を短くする必要があり，多層構造となる課題がある。しかし，光プリント板の場合はスラブ光導波路空間で信号が交差してもクロストークはないため高密度に配線することが可能である。さらに消費電力を比較すると，光プリント板の場合は波形補償用付加回路が不要であるが，光-電気変換部における消費電力アップがあるため同等と考えられる。コスト的に，光プリント板は電気回路における高密度電気配線を除去し，電気プリント板の総数削減が期待できるため低価格で提供可能である⁸⁾。

ポリマー光導波路への期待は，光プリント板内光導波路，光バックプレーン光導波路，光インターコネクションにおける環境条件を満たす特性を有することにあり，現在解決すべき課題を明確にすることにある。伝送可能距離は光導波路の伝搬損失と結合損失（光インターコネクション損失）で決定される。結合損失はVCSEL（面発光レーザー）とポリマー光導波路間，PD（受光素子）とポリマー光

導波路間，光プリント板-バックプレーン間に存在する。10 Gbps伝送速度の場合，5 dBの結合損失で50 cm以上確保したい場合は0.1 dB/cm以下の伝搬損失が要求され，サイズ的には，LSIパッケージ用BGA（プリント）基板の大きさは接続パッド数とヒートシンクの大きさで決まり約数十mmである⁸⁾。図3は光プリント板上ではすべて光で伝送される形態を説明したが，光I/O技術が完成するまでは光プリント板上にフレキシブルなポリマー光導波路とVCSEL，PDを直接結合した“光配線素子”を搭載する技術も開発されている¹⁰⁾。ポリマー光導波路の機械的特徴として曲げに強い性質があるが，一方では複屈折性も存在するため光通信線路の観点からPDL（偏波依存損失）は0.5 dB以下が望ましい。光インターコネクション損失の低減は光プリント板採用の基本的課題であり，光I/Oにおいて45度ミラー¹¹⁻¹³⁾，光ピン¹⁴⁾の技術が提案されている。また，光プリント板と光バックプレーンの接続ではアレイ直角コネクタが開発されている¹⁵⁾。これら光インターコネクション技術は開発中であり，さらなる低損失化が期待される。光プリント板上のLSI電子回路や光回路素子（VCSEL，PD）の混載実装が必要となるため，ポリマー光導波路には耐熱性が要求される。Au/Snハンダの融点は280°Cであるため，ハンダ実装プロセスに耐えるためには300°C以上の耐熱性が必要になる^{16,17)}。

2. ポリマー光導波路の特徴

ポリマー光導波路の特徴を石英系光導波路と比較すると，物性的には，①C-Hの吸収損失が大きい，②熱膨張係数が2桁大きい，③屈折率が高い，④屈折率の温度特性が負であり大きい，⑤複屈折性が高いこと等が特徴である。作製プロセス的には，①成膜が簡単（スピニング），②低温プロセス，③スタンピングによる加工¹⁸⁾，④フォトリソによる加工（紫外線照射により屈折率が下がる）¹⁹⁾，⑤直接露光による加工（紫外線照射により屈折率が上がる）^{20,21)}等が代表的違いである。デバイスの観点からポリマー光導波路を石英系光導波路と比較すると，実装方法の違いと信頼性の問題がある。実装の最大の違いは，薄膜化によるフレキシブルで柔軟な素材の特徴を生かし，ボード上チップ間およびボード間配線が期待できる。信頼性では特に湿熱試験に対して定められた仕様をどれだけ満足するか，検討を要する²²⁾。図4はC-H結合による伝搬損失特性を示しており，シリコンの水素を重水素で置換して長波長帯を低減する方法，さらにフッ素で置き換えたフッ素化ポリイミドでは1.3 μm帯で低損失特性が得られている^{23,24)}。最近では全フッ素化ポリイミ

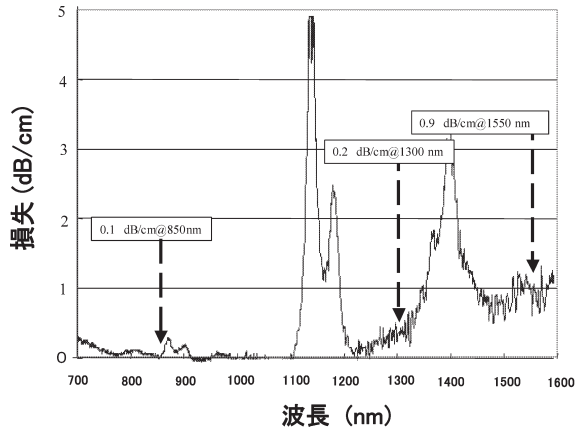


図5 ポリシランマルチモード光導波路損失.

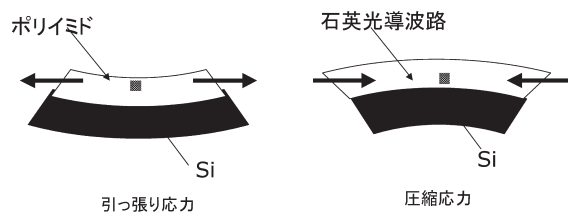


図6 基板-光導波路材料で決まるコアへの応力の影響.

ドにより、 $1.55\ \mu\text{m}$ で $0.2\ \text{dB/cm}$ の損失を実現しており、ポリマー光導波路でも光通信波長帯で低損失が期待できるようになった^{25,26}。図5はポリシランマルチモード光導波路損失を示しており、Si-O-SiとC-H結合による吸収特性を示している²⁷。 $1.55\ \mu\text{m}$ ではC-H結合による吸収が大きいが、 $0.85\ \mu\text{m}$ における吸収特性はきわめて小さいことを示している^{28,29}。熱膨張係数の相違は複屈折性と強く関係があり、図6に基板と光導波路材料で決まるコアへの応力の影響を示した。基板がSiやガラスの場合には石英系光導波路内部には圧縮応力が蓄積されるのに対し

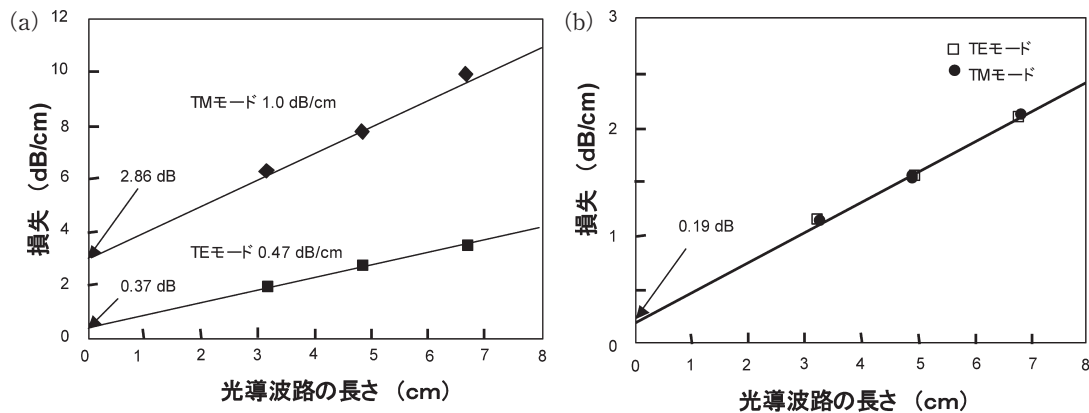


図7 ポリイミド光導波路損失の基板による影響。(a) Si基板上の光導波路損失、(b) ポリイミド基板上の光導波路損失.

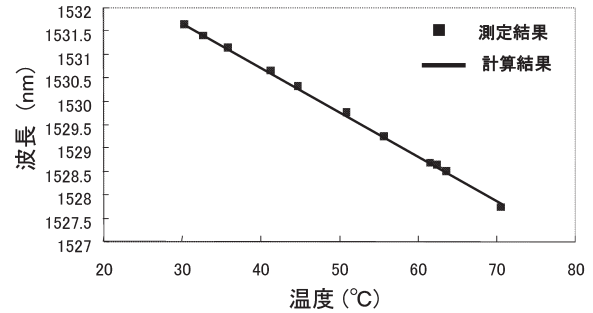


図8 回折格子反射スペクトルの温度依存性.

て、ポリマー光導波路の場合には逆に引っ張り応力が存在し、偏波特性に違いが現れることがわかり、機械強度的には圧縮応力のほうが引っ張り応力よりも外部からの刺激に対し強い。図7にカットバック法によるフッ素化ポリイミド光導波路の偏波特性の基板による影響を示した。Si基板上の場合にはコアに圧縮応力が横方向から加わるため、TEモードとTMモードの損失に大きな違いがみられるが、光導波路と同じポリイミド基板上では両モードの損失に大きな違いはみられない³⁰。ポリマー光導波路の屈折率の温度特性が負であることは、石英光導波路と逆特性を示すため、温度無依存光合・分波器デバイスを作製するうえで大いに役立っている³¹。図8の実線はSi基板上のポリシラン光導波路回折格子の反射スペクトルの温度依存性の計算結果を示している。反射波長の温度依存性の理論式は式(1)で表される。

$$\frac{d\lambda}{dT} = 2\Lambda \frac{dn}{dT} + 2n \frac{d\Lambda}{dT} = \lambda \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} + \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT} \right) \quad (1)$$

ここで λ は反射波長、 n は屈折率、 Λ は回折格子の周期、 T は温度である。ポリシラン光導波路の場合は dn/dT の屈折率変化のほうがSi基板の影響を受けた周期変化

表1 各種ポリマー光導波路製法と代表的機関。

材料系	工 法	導波損失 (dB/cm)			耐熱性	屈曲性	特 徴	国内開発機関
		850 nm	1300 nm	1550 nm				
アクリル	UV 硬化	<0.1	—	—	○	◎	低損失	日立化成, 関西ペイント
	モールド	0.2	0.3	0.5	×	◎	SM, MM 両対応	オムロン
	自己形成	1.0	1.0	4.0	×	—	大口径導波路作製	豊田中研
エポキシ	UV 硬化	<0.1	—	—	○	○	低損失	NTT, 日東電工, 日立電線, 松下電工ほか
	モールド	<0.1	—	—	○	○		富士ゼロックス, 東北大学
シロキサン	UV 硬化	—	0.2	0.3	◎	×	長波長低損失	NTT, JSR ほか
シリコーン	UV 硬化	<0.1	—	—	◎	◎	機械物性良好	東レダウコーニング, アデカ
ポリイミド	UV 硬化	0.1	—	—	◎	—	省工程	日東電工
	モールド				◎	◎	耐熱性良好	三井化学
	RIE	0.3~0.8	0.2~0.4	0.2~0.5	◎	◎		NTT, 日立化成, セントラル硝子, 日本触媒
ポリシラン	UV 変性	0.1	0.2	0.7	◎	○	省工程, 多層化容易	日本ペイント, 千歳科学技術大学
	モールド				◎	—	インプリント適性良好	理研
ポリノルボネン	UV 変性	<0.1	—	—	○	○	省工程, 多層化容易	住友ペークライト
フッ素樹脂	RIE	0.1	0.1	0.1	×	—	全波長低損失	旭硝子

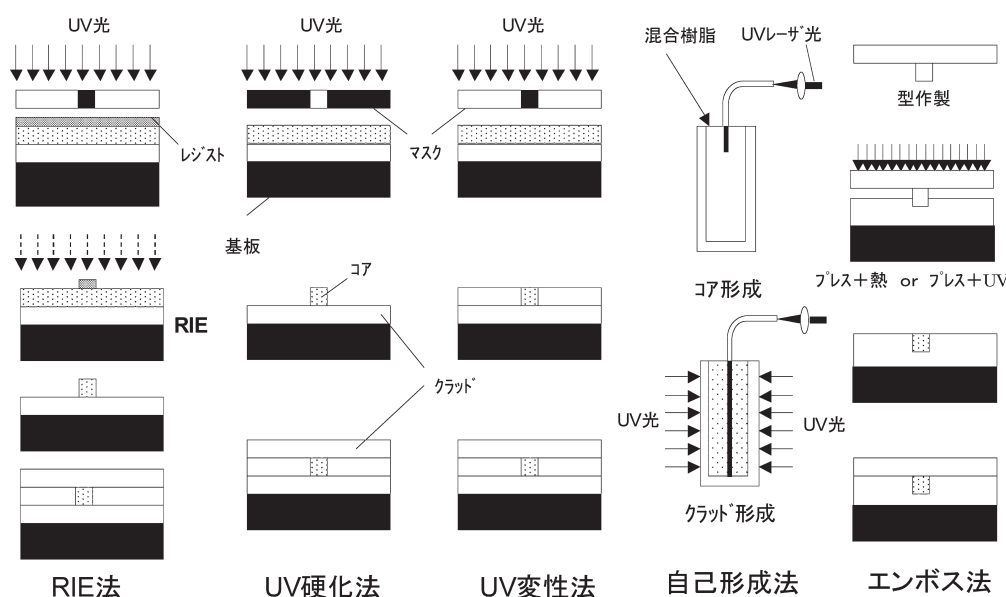


図9 ポリマー光導波路の各種製法。

$d\Delta/dT$ より1桁大きく, 図8の直線は $-0.094 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ で表され, ポリマー材料の屈折率は温度上昇に伴い, 減少することがわかる^{29,32}。

3. ポリマー光導波路デバイスの作製

ポリマー光導波路と石英系光導波路を作製技術の観点から比較してみると, 成膜工程において低温工程と高温工程の違いがあり, スピンコートによる成膜法はポリマー系にとって短時間で簡便に行える点で有利である。表1, 図9に各種ポリマー光導波路製法, 特性, 開発機関を示した。

コア形成については, 材料に依存して物理エッチング (RIE法)³³, スタンプング (モールド法)¹⁸, フォトブリーチング (UV変性法)³⁴, 光直接露光 (UV硬化法)^{20,35}等の技術が検討されている²⁹。物理エッチングは石英系と比較すると, フッ素系ガスの代わりに酸素プラズマでエッチング可能なため, メンテナンス面でクリーンな環境で作業できるメリットが大きい。加工精度も石英系光導波路と同等の精度を実現でき, 設計どおりのデバイスを作製可能である。一方, ポリマー光導波路デバイスの大きな特徴は, エッチング工程なしにコア形成が可能な加工プロセス

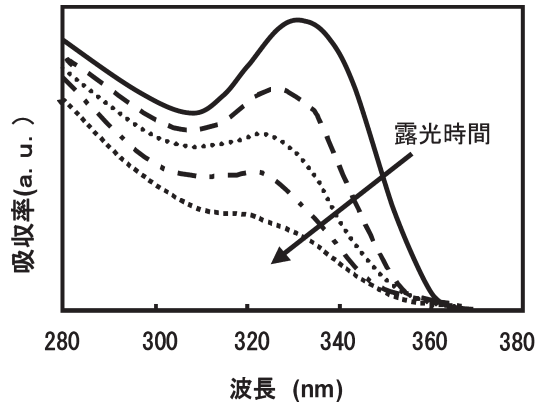


図10 ポリシラン材料の吸収特性.

が存在することである。スタンピングによるスプリッターデバイスは大量生産可能であり、FTTH用のきわめて低コストな石英系スプリッターに対抗できる技術として有望である。フォトリソ技術はおもにポリシラン系ポリマー材料に用いられ、紫外線を照射するとSi-Si結合が切れて酸素が間に挿入された構造となり、UV照射した場所の屈折率が減少することが特徴である²⁷⁾。この方法の利点はコア形成中に光導波路内に応力が蓄積されない点であり、偏波特性に良好な結果が得られている³⁶⁾。レーザー光直接露光をUV硬化法に用いた場合は、フォトリソと異なり、紫外線を照射した部分の屈折率が上昇するため、一筆書きで光回路を描くことが可能である²⁰⁾。光学特性の観点から比較してみると、0.85 μm帯で0.1 dB/cm以下の光導波路はアクリルUV硬化、エポキシ系、シリコンUV硬化、ポリイミドUV硬化、ポリノルボネン、フッ素樹脂である。そのうえ、耐熱性、屈曲性も考慮に入れるとシリコンUV硬化法が有力である。さらに実用的観点から価格が低い材料が望ましい。最近、新しい作製法として自己形成法が提案、開発されており、光ファイバーボードの補修技術として、折れた光ファイバーの端面を無処理で接続する技術としても検討されている²⁾。

4. ポリマー光導波路の基盤技術と将来技術

ブロードバンド情報通信産業が家庭まで入ってきて、われわれの生活を豊かにできれば、現在の電気プリント板の延長上にあるポリマー光プリント板は最大消費産業の基盤となることが大いに期待できる。問題はそれがいつか、どのような形態で導入されるか、に興味がある。しかし、従来ポリマー技術者が辛酸をなめたように、石英光導波路と同じパフォーマンスを期待することは無意味であり、ポリマーだからできる、ポリマーでないといけない技術を模索

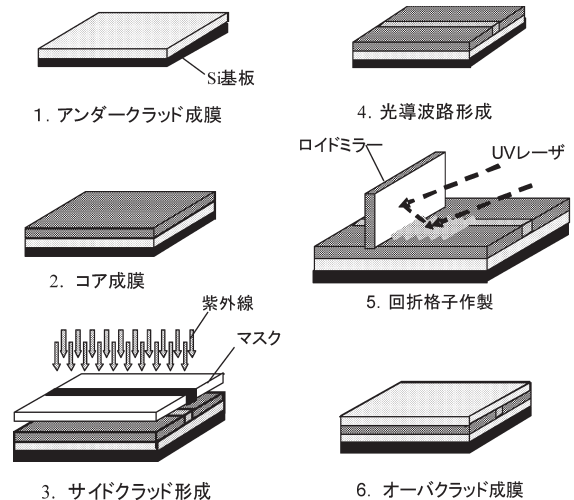


図11 ポリシラン光導波路上に回折格子を形成.

することが重要である。

本特集では、最近のポリマー光導波路技術に注目して、鉛フリーハンダリフロー実装を可能とするフィルム型光導波路材料とポリフィルム光導波路を用いた光モジュール実装技術およびその性能評価結果について、実用的な見地から紹介される¹⁶⁾。シングルモード光導波路と異なってマルチモード光導波路は全モード励起された状態で光導波路の評価を行う必要があるため、その重要なパラメーターの吟味および標準的な評価方法についても解説される³⁷⁾。さらに、将来技術として注目されている光硬化性樹脂による光導波路の自己形成技術について、光配線用光インターコネクション技術として軸ずれが多少あっても三次元的に低損失に接続可能であること³⁸⁾、シングルモード分岐光導波路形成の可能性、自己形成光導波路に機能性材料を添加した光増幅や光スイッチング機能を有するポリマー光回路の可能性について解説される^{39,40)}。

ここでは、将来技術として石英光導波路では不可能なUV変成法であるフォトリソ技術によるポリマー光導波路の作製技術と、狭帯域フィルター、チューナブルレーザーの可能性について紹介する。ポリシラン材料はSi-Si結合の側鎖構造を有しており、紫外線照射によりSi-Siの側鎖が切れ酸素とSi-O-Siの形で結合する。図10に示すように300~350 nmに吸収ピークをもっており、He-Cdレーザー（発信波長：325 nm）光を照射することにより屈折率を下げることができる³⁴⁾。図11に、ポリシラン光導波路上に回折格子を形成する工程を示した。ポリシラン光導波路はフォトリソによりクラッド部を形成するため、次工程で回折格子をコア上に作製することが可能である。図12は、ポリシラン光導波路回折格子の

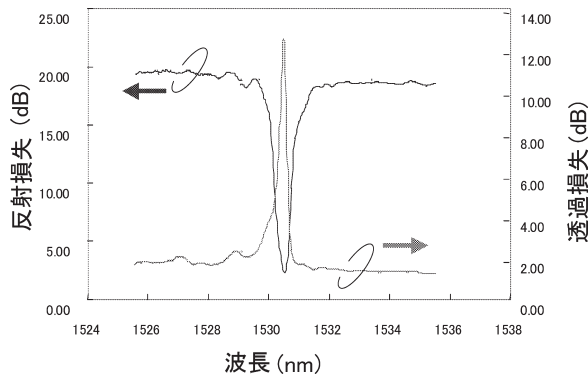


図12 レーザー干渉露光法によるブラッググレーティング透過/反射損失スペクトル。

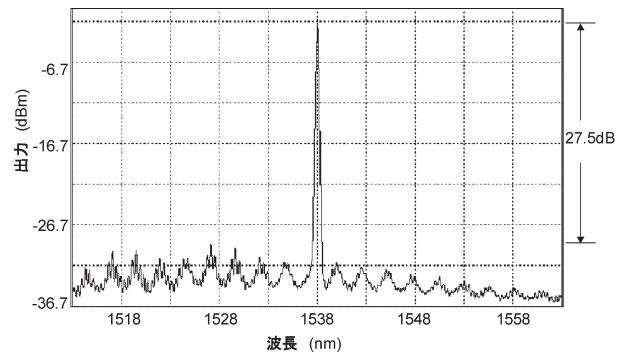


図13 ポリシラン回折格子外部共振回路によるLD発信スペクトル。

反射および透過損失スペクトルを示している。透過、反射半値全幅は0.4 nm以下であり、DWDM（高密度波長分割光合・分波システム）用チューナブルフィルターの可能性を示している。図8中の四角印は、ポリシラン光導波路回折格子の温度変化による波長シフト量の測定結果を示しており、式(1)で計算された直線とよい一致を示している³²⁾。図13は、片端面に無反射膜コートしたファブリー・ペロー型半導体レーザー（発信波長：1.55 μm）に光導波路回折格子をシングルモードファイバーを介して接続した結果、得られた縦モードである⁴¹⁾。ポリシラン光導波路回折格子の温度変化により発振波長シフトすることが可能であり、回折格子を並べて光スイッチで切り替えれば広帯域で低コストなチューナブル光源を提供可能であり、DWDM用光合・分波器の価格が下がっている状況から、将来LANへの適用が期待できる。

光通信用光部品は、テルコディア規格（GR-1209, GR-1221）を満足しなければ採用されないことが常識とされている。1990年代、当時のベルコアの光パッシブデバイスの規格作成にアドバイスしたことがあったが、この規格は光通信用光部品の世界規格を先導しており、意義は非常に大きい（筆者が米国PIRI社勤務時代^{42,43)}。しかし、光通信も世代を変え、使用環境も変わったいま、LAN用規格、ホームネットワーク用屋内規格化、標準化等を決めていくことも重要であると考え⁴⁴⁾。他方、光スプリッター、AWGと主要な光通信用部品の価格低下が止まらないため、LANに波長多重方式を採用した広帯域で安価なシステムが導入される可能性もあり、シングルモード光導波路の世界でもさらに低価格なポリマー光導波路の出番を期待するとともに、高速な光ホームネットワークの導入に期待したい。

本稿作成にあたり資料提供等でご支援いただいた日本ペ

イントの津島宏様、セントラル硝子の七井秀寿様に感謝いたします。

文 献

- 1) 末松安晴：“発想の実現”，電子情報通信学会誌，1000号記念特集「夢・創・想・感」，**90**（2007）727-729。
- 2) 茨木 修，三川 孝，木下雅夫，比留間健之，菊地秀雄，松井輝仁，堀 彰弘，石塚 剛，平松星紀，佐々木純一，広瀬直広，熊井晃一，伊東克通，土屋政季：“超高密度電子SIプロジェクトにおける光電気複合実装技術開発”，電子情報通信学会総合大会シンポジウム予稿集，SC-14-2（2004）pp. S-104-105。
- 3) 三川 孝：“海外の光回路実装技術の開発動向”，2007年エレクトロニクス実装学界最先端実装技術シンポジウム予稿集，（5月31日，2007）pp. 67-85。
- 4) Y. Taira, H. Numata, M. Hasegawa, F. Yamada, Y. Katayama and B. Offrein: “Optical interconnect technology for server applications,” *International Symposium on Advanced Organic Photonics (ISOAP6)*, Chitose (CIST), Hokkaido (October 20, 2006) pp. 22-25.
- 5) 中川 茂：“コンピュータへの光インターコネクションの適用”，2007年エレクトロニクス実装学界最先端実装技術シンポジウム予稿集（5月31日，2007）pp. 87-98。
- 6) J. Weiss, C. Berger, M. Witzig, T. Morf, R. Daniel, F. Horst and M. Schmatz: “Low-cost electro-optical package for use with PCB-embedded waveguides,” *Proc. SPIE*, **6775**（2007）677507。
- 7) “光ホームネットワークの現状,” *OPTCOM*, 8月号（2005）20-27。
- 8) 蔵田和彦，畠山意知郎，三好一徳，清水隆徳，佐々木純一：“光インターコネクション技術の動向と展望”，電子情報通信学会総合大会シンポジウム予稿集，SC-14-1（2004）pp. S-102-103。
- 9) 橋本眞治，柳生博之，小寺孝平，中芝 徹：“光・電気複合配線板の技術動向”，*松下電工技報*，**52**, No. 1（2004）53-59。
- 10) 塩田剛史，鈴木健司：“光導波路を用いたボードレベル光インターコネクション”，電子情報通信学会総合大会予稿集，SC-14-4（2004）pp. S-108-109。
- 11) T. Tanaka, H. Sakamoto and H. Nanai: “Application of parallel optical axis converting waveguide optoelectronic-PWB,” *International Symposium on Advanced Organic Photonics (ISOAP6)*, Chitose (CIST), Hokkaido (October 20, 2006) pp. 26-29。
- 12) 丸野 透：“ポリマー光導波路デバイスの新展開”，電子情報

- 通信学会誌, **84** (2001) 656-662.
- 13) A. Fujii, T. Suzuki, K. Shimizu, K. Yatsuda, M. Igusa, S. Ohtsu and E. Akutsu: "A novel fabrication technology of a polymer optical waveguide and its application," Proc. SPIE, **6775** (2007) 677506.
 - 14) 三上 修: "光表面実装技術における光配線接続用光ピンの高機能化", 電子情報通信学会総合大会予稿集, SC-14-5 (2004) pp. S-110-111.
 - 15) S. Hiramitsu, T. Mikawa, O. Ibaragi, K. miura and K. Hirao: "Laser-written optical-path redirected waveguide device for optical back-plane interconnects," IEEE Photonics Technol. Lett., **16** (2004) 2075-2077.
 - 16) 牧野竜也: "ドライフィルム型マルチモード光導波路材の開発状況", 電子情報通信学会第6回ポリマー光回路(POC)研究会資料(9月8日, 2006) pp. 7-16.
 - 17) 牛渡剛真, 安田祐紀, 平野光樹, 阿部富也, 伊藤雄三: "電気光実装用高耐熱性ポリマー光導波路", 電子情報通信学会総合大会予稿集, C-3-37 (2004) p. 210.
 - 18) 細川速美: "光インプリント技術の光導波路デバイスへの応用", 電子情報通信学会材料デバイスサマーミーティング, ポリマー光回路(POC)研究会資料, 2-3 (6月24日, 2005).
 - 19) T. Suda, M. Sawada, T. Miyakawa, Y. Sugai, K. Ogura, H. Tsushima and S. Kobayashi: "Low loss polysilane single-mode $1 \times N$ splitters with spot-size conversion circuits," *The 11th Opto-Electronics and Communications Conference 2006 (OECC 2006)*, Taiwan, 5B2-3 (July 3-7, 2006).
 - 20) K. Hara, Y. Ishikawa and Y. Shoji: "Preparation and properties of novel silicone-based flexible optical waveguide," Proc. SPIE, **6376** (2006) 63760k.
 - 21) L. Eldada, C. Xu, M. T. Stengel, L. W. Shacklette and J. T. Yardley: "Laser-fabricated low-loss single-mode raised-rib waveguiding devices in polymers," J. Lightwave Technol., **14** (1996) 1704-1713.
 - 22) 板垣洋一: "ポリマー導波路を用いた光配線モジュール", 電子情報通信学会第7回ポリマー光回路(POC)研究会資料(12月1日, 2006) pp. 29-41.
 - 23) R. Yoshimura, M. Hikita, S. Tomaru and S. Imamura: "Low-loss polymeric optical waveguides fabricated with deuterated polyfluoromethacrylate," J. Lightwave Technol., **16** (1998) 1030-1037.
 - 24) 野口具信: "シリコン系光導波路の特性", 電子情報通信学会第6回ポリマー光回路(POC)研究会資料(9月8日, 2006) pp. 1-6.
 - 25) 松浦 徹, 栗原 隆, 工藤あや子, 池田元昭, 川上直美, 山本二三男: "全フッ素化ポリイミド光導波路の特性 [I]", 電子情報通信学会総合大会予稿集, C-3-58 (2004) p. 228.
 - 26) 武信省太郎, 桑名保宏, 高山公介, 横塚俊亮, 森澤義富: "広帯域低損失・低PDL 1×32 スプリッターポリマー光導波路", 電子情報通信学会総合大会予稿集, C-13-8 (2006) p. 116.
 - 27) 津島 宏: "ポリシラン系フォトブリーチング材料のマルチモード光導波路への応用", 電子情報通信学会材料デバイスサマーミーティング, ポリマー光回路(POC)研究会資料, 1-2 (6月24日, 2005).
 - 28) 戒能俊邦: "ポリマー回路", 特集—進展する有機デバイス, O plus E, 5月号(2007) 454-459.
 - 29) L. Eldada and L. W. Shacklette: "Advances in polymer integrated optics," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **6** (2000) 54-68.
 - 30) 小林壯一: "ポリマー光導波路デバイス", 電子情報通信学会ソサイエティ大会シンポジウム予稿集, SC-8-8 (9月22日, 2005).
 - 31) Y. Inoue, A. Kaneko, F. Hanawa, H. Takahashi, K. Hattori and S. Sumida: "Athermal silica-based arrayed-waveguide grating (AWG) multiplexer," IEEE Electron. Lett., **33** (1997) 1945-1947.
 - 32) S. Kobayashi, M. Sawada, T. Suda, K. Ogura and H. Tsushima: "Narrow tunable polysilane optical waveguide Bragg grating filters," IEEE Photonics Technol. Lett., **19** (2007) 363-365.
 - 33) 鈴木かおり, 小原芳彦, 諸井長広, 七井秀寿, 山本雄二, 坂口茂樹: "フッ素化ポリイミドを用いた導波路型 WDM モジュール", 電子情報通信学会総合大会予稿集, C-3-56 (2004) p. 229.
 - 34) S. Kobayashi, T. Suda, Y. Masuko, K. Ogura and H. Tsushima: "Polysilane $1 \times N$ optical splitters fabricated by UV laser direct drawing," *SPIE Photonic Devices 2007 Conf.*, San Diego (August 26-28, 2007) 6654-07.
 - 35) K. Yamashita, T. Hashimoto, K. Oe, K. Mune, R. Naitou and A. Mochizuki: "Self-written waveguides structure in photosensitive thermosetting process," IEEE Photonics Technol. Lett., **16** (2004) 801-803.
 - 36) 小倉広平, 松田 拓, 小林壯一, 高橋寛明: "Y分岐ポリシラン光導波路の損失特性", 電子情報通信学会ソサイエティ大会予稿集, C-3-2 (2003) p. 135.
 - 37) 八木生剛, 柴田慎弥, 高山一也, 森本政仁: "マルチモードポリマー導波路の測定評価法の規格化に向けた取り組み", 電子情報通信学会第7回ポリマー光回路研究会資料(12月1日, 2006) pp. 17-28.
 - 38) M. Kagami, T. Yamashita, M. Yonemura, A. Kawasaki, M. Tsuchimori and T. Matsui: "Light-induced self-written three-dimensional polymer optical waveguide for module fabrication and interconnection," *Optical Fiber Conference (OFC)*, Anaheim, OThH4 (2007).
 - 39) O. Sugihara, S. Yasuda and T. Kaino: "Monolithic polymer optical waveguides fabricated by light-induced self-written waveguide technique," *ICONO'9/ICOPE 2006*, POF-P-4 (2006) pp. 59-60.
 - 40) 富木政宏, 新川健太, 伯川弘昭, 岡本尚道, 米村正寿, 山下達哉, 各務 学: "自己形成技術による4分岐導波路", 電子情報通信学会有機エレクトロニクス研究会予稿集, OME2006-143 (3月13日, 2007). pp. 19-22.
 - 41) S. Kobayashi, T. Suda, T. Ishiguro, T. Saitoh and Y. Yamabayashi: "Laser oscillation with polysilane waveguide tunable external resonator," Proc. SPIE, **6775** (2007) 67750H.
 - 42) "Generic requirements for fiber optic branching components," Bellcore Technical Advisory, TA-NWT-001209 (1993).
 - 43) "Generic reliability assurance requirements for fiber optic branching components," Bellcore Technical Advisory, TA-NWT-001221 (1993).
 - 44) 塩田剛史: "ポリマー光導波路の標準化動向", 電子情報通信学会第7回ポリマー光回路(POC)研究会資料(12月1日, 2006) pp. 1-3.

(2007年9月19日受理)