

モノリシック集積型高分子光デバイスの開発動向

戒能俊邦

Recent Development of Polymer Optical Devices toward Monolithic Integration

Toshikuni KAINO

Research and development of polymer optical circuits are discussed where optical waveguides and devices are monolithically integrated. These circuits are fabricated to have photonic functions for optical information transmission and processing. Monolithic structure is ideal to make use of optical circuits for optical network systems. For fabricating the structure, polymeric devices are promising because of their low temperature device fabrication condition and processability. To apply optical waveguides into home area network and office area network systems, waveguide fabrication technology development with simple process is critical issue. LIGA technology conjunction with molding process will have a potential for fabricating polymer waveguides with high dimensional accuracy and low cost.

Key words: polymer optical circuit, optical functions, reactive ion etching, LIGA technology, organic crystal

情報社会の進展に伴う情報量の増大に対応するため、光ネットワーク端末用光回路の重要性が高まっている。特に光導波路に高分子材料を採用し、光機能を分担する各種光デバイスを光導波路上に一体搭載したモノリシック集積型の光デバイス開発が望まれている。しかし実用的光材料・デバイスとして高分子材料の適用性、他材料に対する優位性、あるいはデバイス性能の限界は、新材料開発のみならず、部品構成技術、および加工技術に依存する。

高分子光デバイスは、屈折率や光透過率など光学性能を材料設計・合成的に制御しやすく、加工が容易、軽量、低コスト化が可能といったことから、家庭内、オフィス内用光部品として期待され、光の分岐・結合・選択、光の振幅(強度)や位相および周波数(波長)情報の活用、偏波制御などへの応用が検討されている¹⁾。また、非線形光学材料などの光機能性材料は、光信号処理技術の高度化に不可欠であり、高速情報検出、高速光スイッチあるいは波長変換応用など、情報社会の進展にブレイクスルーをもたらすと考えられる。すなわち高分子光デバイスは、種々の材料選択

によってさまざまな光集積部品や光インターコネクションの構築を可能とし、石英ガラス光導波路や無機誘電体光導波路では困難な、光信号伝送機能と光信号処理機能の複雑な構成を容易に実現できる²⁾。また、材料の光学特性を外部刺激で操作・制御することによる新しい機能・性能の発現が求められており、電気光学材料や有機非線形光学材料の導波路化も進展している³⁾。実用化にあたり前者では高効率材料の開発と熱的に安定した性能の確保が求められ、後者では高品質材料の作製、必要とする光路長が得られる光透過性にすぐれた薄膜の確保が重要である。

これら高分子光デバイスの開発にあたって、光システムとの適合性、情報端末部品として受け入れ可能な価格設定などが課題となる。このため最近では、精密成形加工による光導波路作製の取り組みが進展している。

本稿では、モノリシック集積化を目指す高分子光デバイス研究の最近の動向、新しい光デバイス作製への取り組み、電気光学材料を用いた光デバイス作製に関する研究動向について述べる。

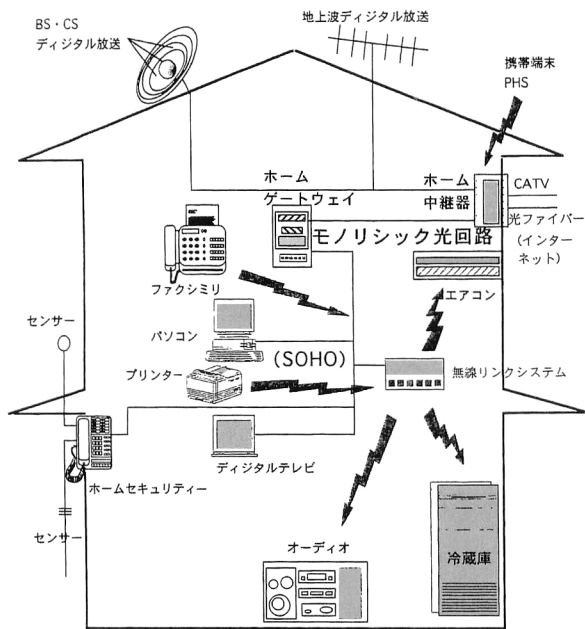


図1 フォトニクスインザホームのイメージ。

1. 高分子光デバイスの位置付け

大容量の信号を制御するには光導波路構造を用い、光源あるいは各種光デバイスとの接続をモノリシック集積して行うことが望ましい。また回線密度の増大に対処するため、装置のバックパネル間や装置中のボード間、あるいはボード内を接続する技術として、光導波路によるインターコネクションが求められている。図1に示すようなフォトニクスインザホーム (PITH) の実現には経済性にすぐれるホームゲートウェイなどのネットワーク端末光回路の開発が必須である。

このため高分子光デバイスの高性能化へ向け、わが国のレベルを明らかにし、課題を把握することによって、21世紀基幹技術として光ネットワーク端末用高分子光デバイスの早期実用化が求められる。

要求性能を満足する高分子材料の開発、あるいはモノリシック集積といえる光デバイス構築のためには、分子レベル、素材レベルの高性能材料開発のみならず、成形技術と融合させた実装技術の高度化、簡便化が必要である。これらの技術のブラッシュアップによって、わが国で開発する光ネットワーク端末用高分子光デバイスのユニバーサルスタンダード化をはかり、後述するような米国における高分子光デバイスにかかわるベンチャービジネスの台頭、欧州における高分子光デバイス開発のための企業間連携、大学-企業間の連携に対抗していく必要がある。

2. 高分子光導波路の特徴

集積光デバイスの基盤となる光導波路の作製法として

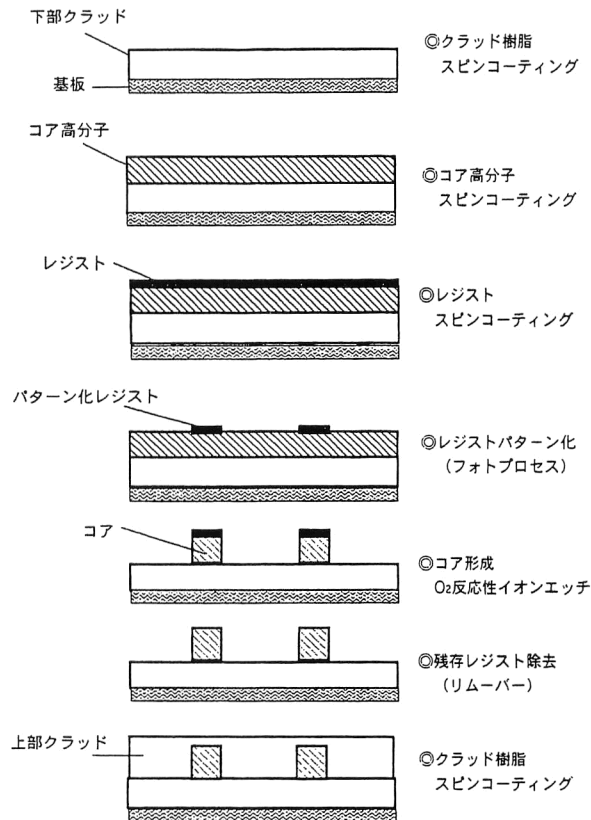


図2 光導波路作製プロセス。

種々の手法が提案されているが、一般的には図2に示すようなフォトリソとこれに引き続く反応性イオンエッチング (RIE) 技術で、光が透過するコアをこれより低屈折率なクラッドで埋め込んだ構造が形成される。光導波路として高分子材料を用いることによって、石英ガラス光導波路でも採用されている上記エッチング技術のほか、多様な作製方法の選択が可能である。すなわち光照射による材料の構造変化を活用したフォトリソあるいは光分解、反応性低分子を含有させた高分子に光を照射して低分子を結合させるフォトリソ、フォトリソ自体を光透過部に用いる方法、射出成形やプレス成形による精密加工法などが挙げられる。

石英ガラス光導波膜の作製は、酸化物微粒子の堆積と引きつづく高温でのガラス化工程 (1200°C 以上) が求められるのに対し、高分子光導波膜は高分子溶液のスピンコーティングと溶媒除去のための乾燥工程という低温プロセスで作製でき、300°C 以下の温度で光導波路化が可能である。したがって、各種光部品を搭載したまま異種材料を結合する光導波路作製手法を採用できるため、モノリシック集積光デバイスの形成が可能である。また、分子設計的に屈折率の制御が容易であるという特徴を活用することで、新しいデバイス構造の実現が期待される。

多層構造導波路を簡便な手法で実現できることも高分子材料の特徴であり、上下の光導波路間の信号のやり取りを簡便に行えるため、3次元光回路が容易に構成できる。上下の光導波路を結合する技術として、例えばグレイマスクあるいはシャドーマスクによる手法がある⁴⁾。フォトレジストに所望のパターンを転写するに際し、このようなマスクを用いると、レジスト材料へのUV照射強度に傾斜分布がつき、この結果レジストのエッチング耐性にも傾斜が生じる。このレジストを用いてRIE処理を行うと、コア材料にこの傾斜が転写され、その上にさらにコア材料をスピコートすることにより上下の光導波路が連結された構造ができる。光素子を多段に構成したデバイス作製も行われており、これらの結果は、光インターコネクションなどにおいて高密度実装を容易とするものである。

3. 高分子光デバイス材料

光の透過、分岐・結合などを行う高分子光導波路材料として、ポリメチルメタクリレート (PMMA) が最も一般的である。特に通信波長での適用のためには、分子を構成する炭素-水素 (C-H) 結合の水素原子を重水素あるいはフッ素で置換する必要がある。これは高分子の光損失をもたらす最大要因がC-H結合の赤外吸収高調波に由来するからである¹⁾。重水素およびフッ素置換したPMMAでは波長 $1.3\ \mu\text{m}$ で $0.1\ \text{dB/cm}$ の損失が実現されている⁵⁾。また、フッ素化したポリイミドやシリコン、エポキシ、あるいはポリシクロブテンなどが低損失光導波路材料として検討されており^{6,7)}、重水素化・フッ素化PMMAコア光導波路に近い光損失値が得られている。

高分子光導波路材料を性能および構造で考えるとパッシブ光導波路、アクティブ光導波路、およびハイブリッド光導波路に分類できる。パッシブ光導波路は透明性にすぐれる高分子で作製されるが、特に通信波長 $1.3\ \mu\text{m}$ 、 $1.55\ \mu\text{m}$ で透明性を確保するためには上記のように重水素化あるいはフッ素化が必要となる。アクティブ光導波路としては熱光学スイッチを除き、光機能材料を組み込んだ高分子材料が用いられる。熱光学スイッチがミリ秒レベルの光応答性であるのに対し、電気光学材料や3次非線形光学材料を高分子と組み合わせることで、ピコ秒応答光スイッチが可能となる。

ハイブリッド光導波路は構造によって分類され、光導波路を水平方向で使用するのみならず、垂直方向にも活用できる構造、すなわち上下方向で異なる材質を用いた垂直光導波路、あるいは異種材料をつなぎ合わせた接合構造など、高分子材料の加工容易性、低温プロセス性の活用によ

って、無機材料では困難な光導波路のハイブリッド化が可能である。この結果、限られた面積内に多くの光導波路あるいは光部品を集中させることができ、経済的かつコンパクトな光回路が作製できる。高分子材料を用いた光導波路が完成度の高い石英ガラス導波路にまさる最大の点は、このようなハイブリッド光回路構築性にある。

高分子光導波路に関する研究開発の課題は、高分子材料の光透過性を確保しつつ、光機能性材料との組み合わせをいかに効率よく行うかにある。それぞれの材料の加工容易性をどのように光導波路構造に反映させるかが重要である。また光導波路は一般に受発光素子などの光部品と組み合わせられて使用されることから、これら高分子材料に対し、光部品を搭載する温度、すなわちハンダ処理に耐える耐熱性が求められることが多い。

4. 高分子光デバイス加工技術

RIEによる光導波路化プロセスでは、コアやクラッドの薄膜作製にスピコート技術が用いられるため、コア高分子とクラッド高分子との間で混ざりあい (インターミキシング) がなく、またレジスト溶媒に耐えられる材料の選択 (あるいは材料を溶かさないレジストの選択) が重要である。光導波路パターン形成後のレジスト除去用溶媒によるコア部の溶解がある場合は、リフトオフなどの手法を用いる必要がある。マスクパターンに種々の形状を用いることで、方向性結合器、カップラー、干渉計、共振器などが作製されている。

紫外線や電子ビームなどによる直接露光法を用いた光導波路も形成されており、この手法を用いた場合はレジストを使用する必要がないため、簡便に導波路形成ができる。紫外線硬化型エポキシ樹脂を用い、電子ビーム直接露光によってマルチモード導波路が作製され、波長 $850\ \text{nm}$ で $0.08\ \text{dB/cm}$ の損失値が得られている⁸⁾。

光導波路への光信号の簡便な結合は、実装の点からも重要である。特に高分子はガラスなどに比べ、光導波路端面の形成を研磨で行っても基板との硬度差の問題や研磨くずの残存などにより、光結合性に課題がある。また光導波路面内に角度を付けて分岐構造や合波構造を形成することで、光信号は形状に従った方向に伝搬することができるが、角度が急峻になると屈折の法則に従いコアから放射し、信号の伝搬ができなくなる。光信号を90度方向に曲げることが可能であれば、コンパクトに光部品を結合することができる。

このため、光導波路の端面に45度ミラーを形成し、ミラー一部で90度曲げが実現できている⁹⁾。ミラー形成には例え

ばシリコンチップなどの切断に用いるダイシングソーを活用する。ダイヤモンド刃の角度が90度の場合と45度の場合とで、光導波路に対し異なる方向への90度曲げが可能となる。ミラーを用いたことによる損失の増加は0.3 dB以下と報告されている。45度ミラーは面発光レーザーの結合を簡便に行う情報処理システムへの適用、光導波路の伝搬光を空間を介して別の光導波路に結合するインターコネクションへの応用が検討されている¹⁰⁾。

光ファイバーと光導波路の簡便かつ高精度の結合（ビッグテイル構造化）は、光実装技術の経済化にとって重要課題である。ファイバーガイド溝による結合は代表的手法であるが、高い光軸合わせ精度を得るためには、エッチングマスクの位置合わせ精度が求められる。この問題を解決する光導波路作製法として、光硬化性樹脂を溶解させた高分子溶液に光ファイバーを挿入し、ファイバー出射端からの光で樹脂を硬化させ光導波路とする技術（light induced self written法：LISW）が開発されている¹¹⁾。形成された光導波路を伝搬する光によって硬化領域がさらに長くなり、光ファイバーと直接結合した2 cm程度の光導波路が作製できている。光の伝搬方向にミラーを設置しておくことで、ミラー部で45度傾いた光導波路などが作製できる。

5. 高分子光デバイス研究の海外動向

高分子光デバイスの開発は、欧米を中心に実用化・企業化が活発化している。ドイツではFraunhofer Institute (FHI), Heinrich-Hertz Institute (HHI), Institute of Microtechnik Mainz (IMM)などの研究機関が内外の企業と共同で高分子光導波路を開発する動きが進んでいる。光デバイスのホームユース、オフィスユースにあたり、性能とともに経済性が特に重要であり、安価な光部品・材料の開発が求められている。すなわち光技術の展開に関し、光導波路加工プロセスの単純化による低価格光デバイスの実現が最重要課題といえる。このことから、高分子が得意とする成形加工技術、例えば射出成形や熱プレス成形による光導波路作製の報告が最近多くみられる。Siemens社やDortmund大学など産学ともに、精密成形加工技術の活用による光導波路作製に重点を置いている。成形によって光導波路の大量生産を可能とし、低価格化を実現しようとするものである。

成形光導波路の重要ポイントは金型の作製である。数 μm のリッジ構造を有する光導波路に求められる寸法精度は波長の1/20ともいわれる。この精度を実現する金型作製技術として、LIGA(ドイツ語でのリソグラフィ、電鍍型作製、樹脂埋め込み、の略号)技術が多く用いられてい

る¹²⁾。LIGAでは波長の短い放射光を用いたフォトリソプロセスによって微細なレジストパターンを形成し、パターンの間に電解メッキ(電鍍)によってニッケルなどの金属型を形成する。レジストを除去して取り出したニッケル型をプレス成形や射出成形の金型として用いることにより、レジストパターンと同形状の成形品が再現性よく作製される¹³⁾。この技術は成形品デザインの多様性、サブミクロンレベルの高精度性、および量産性などの点から多様な微細成形品作製に使用されているが、高分子光導波路作製のツールとしても有効である¹⁴⁾。特に光導波路側面の平滑性にすぐれた光導波路作製が可能であり、光散乱損失の低減が期待できる。

LIGAによるニッケル型は、光導波路作製用金型としてのみならず、作製した精密金型パターンを直接用いた光導波路作製にも用いられている¹⁵⁾。このプロセスでは、金型上に滴下したコア構成高分子溶液を平坦化したのち硬化させ、コアの上部にこれより屈折率の低いクラッド構成高分子溶液を滴下する。クラッド部を平坦化、硬化させたのち金型から引き離し、露出したコア部分にクラッド高分子を滴下、平坦化して、埋め込み構造の光導波路としている。

また、基板上のクラッド高分子薄膜をLIGA技術で作製した金型を用いてプレス成形したのちコアを塗布し、さらにクラッドを塗布して光導波路を形成する。これを多層に積み重ねることによって多段の光導波路が作製できる。この技術によって、上下の光導波路間の信号のやり取りなど、複雑な光導波路構成を簡単に形成できる。このような手法は、限られた面積内に多くの光導波路あるいは光部品を集中させることを可能とする。

LIGA技術で作製した精密金型を用いたエンボス(熱プレス成形)技術でも45度ミラーが作製され、プリント基板と光導波路を集積したデバイスによって、光源あるいは受光器との光結合が行われている¹⁶⁾。

LIGA技術の変形としてシリコンの異方性エッチング特性を活用し、シリコン上に電鍍型を形成して射出成形用金型とするSIGA技術(ドイツ語でSilizium Mikrostruktur, Galvanik und Apformung)も検討されている¹⁷⁾。光導波路パターンや光ファイバーのガイド溝を形成し、光ファイバーアレイを光導波路と組み合わせた1×8の光カップラーが作製されている。

金型を用いた高分子光導波路量産化に関する技術として、米国コーニング社などで行われているポリエステルフィルム上への連続的光導波路形成がある¹⁸⁾。これはホログラムフィルム作製工程で用いられているインプリンティング技術であり、図3に示すようにロール上を移動するフィ

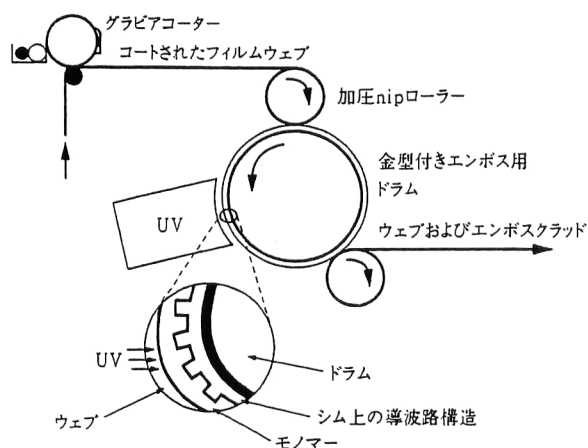


図3 フォトエンボス技術による光導波路連続作製プロセス¹⁸⁾。

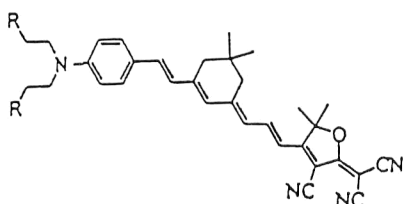
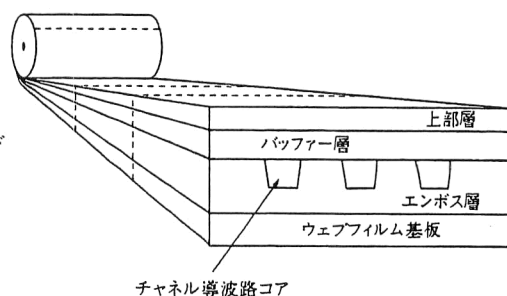


図4 半波長電圧1V以下のEO高分子用色素¹⁹⁾。R=OTBDMS：テトラブチルジメチルシロキサン。

ルムに光導波路を形成する技術である。クラッド膜を張り合わせた基板フィルム上に、エンボス金型を押し付け、紫外光を照射しながらコア用の溝を形成する。これにコア高分子を埋め込み、さらに上部クラッド層を張り付け、導波路構造を完成する。このような手法で作製された導波路の損失は波長770 nmにおいて0.20 dB/cmであり、直接描画による光導波路の損失と遜色のない値となっている。

新しい機能光導波路に関し米国では、ベンチャービジネス設立が目立っている。電気光学機能や光増幅機能を有する高分子の光デバイス化を狙うものである。このような動きは高分子光デバイス研究開発の今後の方向を示すものといえる。例えば、図4に示す色素分子をPMMAに分散した材料を用いた、半波長電圧1V以下のEO高分子光変調器の開発が報告されている¹⁹⁾。これは高い光非線形性を有する色素分子の開発と、これを分散した高分子の分極処理の工夫(～1 μm程度の薄膜を分極処理し、効率的に分子配向を行う)、光導波路構造の改良(光を結合する光導波路部分を厚くし、薄い電気化学(EO)導波路部分に向けテーパ構造化する)、および変調手法の工夫(マッハ・ツェンダー構造の両アームに双極子の方向が互いに逆向きとなる分極処理を行う)などによって実現したものである。1Vでの駆動はTTLレベルの光部品と組み合わせた光機能デバイス実現を可能とするものであり、EO高分子の高い

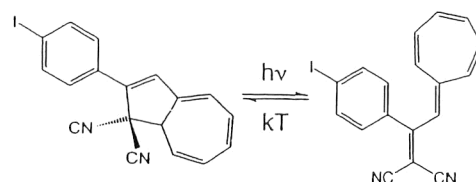


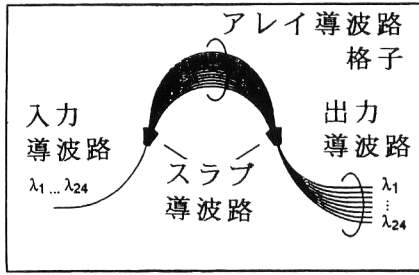
図5 光導波路に用いられたフォトクロミック分子²⁰⁾。

ポテンシャルを示している。

屈折率変化を用いる光機能導波路として、フォトクロミック分子を高分子中に導入する方法も盛んに検討されている。例えば図5に示すような分子を用い、波長1.55 μmにおいて0.01に近い屈折率変化を与える高分子光導波路が報告されている²⁰⁾。大きな屈折率変化を有する高分子は回線切り替えなどに用いる光導波路材料として期待される。このように、光機能分子と透明高分子の多様な組み合わせによって、新しい機能性光導波路作製が可能となり、接合構造の光導波路作製技術が有用性を発揮すると期待される。

光情報通信に用いられる1.3 μmや1.55 μmの波長ばかりでなく、光情報処理では650～850 nmの可視～近赤外光が用いられる。骨格となる高分子としてポリシクロブテン系高分子をコアとした場合、波長397～1550 nmの範囲で光導波路として使用が可能と報告されている²¹⁾。

一方、特に光情報通信において波長多重方式(WDM)を用いた光伝送システムの構築が欧米を中心に活発化している。このためすぐれた波長分波器や波長フィルターが求められ、光導波路型の素子、アレイ導波路グレーティング(AWG)が脚光をあびている。すでに石英ガラスを用いたAWGが実用化されており、光デバイスとして大きな市場を獲得している。AWGの構造例を図6に示す。光ファイバーを伝送してきた多波長の信号は、AWGのスラブ光導



1x24 アレイ導波路格子(MUX/DEMUX)
チャンネル間隔：100GHz

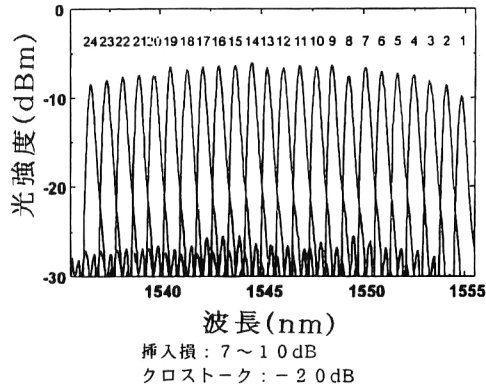


図6 アレイ導波路格子 (AWG) と特性の一例。

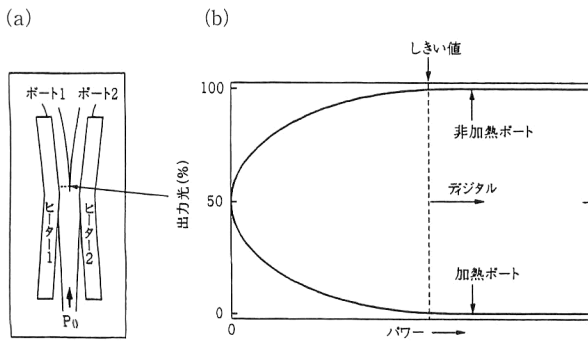


図7 Y分岐デジタル型光スイッチ²³⁾。(a)模式図と、(b)特性。

波路を介して AWG で分波される。高分子光導波路による AWG は、石英ガラス AWG に比べクロストーク特性にやや劣るが、屈折率の温度依存性の活用によって波長可変性が得られるなどの特長を有し、加工の容易性とあいまって、実用化が期待される²²⁾。石英ガラス AWG に関して日本に遅れをとった諸外国では、高分子 AWG に期待をかけている向きもある。高分子光導波路を用いることによって、多段構造の AWG 構築が可能であり、1つの AWG の多重度を上げずにすむこと、あるいは限られたスペースの中で光情報処理を行うことができるため、光システムの経済化、コンパクト化が実現できる。

6. 高分子熱光学デバイス

材料の屈折率の温度依存性を利用することで熱光学 (TO) スイッチ導波路の作製が可能である。高分子材料の屈折率温度依存性は材料の密度変化によってもたらされ、その変化は石英ガラスに比べ2桁も大きい。このため、ガラス光導波路と比較し大きな屈折率変化を得ることができ、低電力で駆動する TO スイッチが作製できる。熱光学効果を用いる光導波路素子の1例として図7に示すようなデジタル光スイッチがある²³⁾。この光スイッチは、マッハ・ツェンダー型干渉計構造の光スイッチに比べ、スイッ

表1 ハイブリッド型熱光学光導波路の特性比較。

	シリカ	ハイブリッド	高分子
スイッチのタイプ	MZI	VCS	MZI
挿入損失 (dB)	<1	1	2
スイッチパワー (mW)	500	<80	5
クロストーク (dB)	<-30	<-30	<-30

MZI：マッハ・ツェンダー干渉計，VCS：垂直結合スイッチ

チパワーに対する安定性の点でまさり、実用化も近いと期待される。TO 光導波路材料には、代表的な多くの高分子光導波路材料が検討されている。使われている材料はいずれも耐熱性の不足あるいは偏波依存性が大きいといった問題も抱えており、これを解決するため新たな光導波路材料の設計開発が求められる。

TO 効果活用の新しい展開として、ガラス光導波路と高分子光導波路の長所を取り込んだハイブリッド TO 光導波路が提案されている²⁴⁾。下部光導波路にガラスを、上部光導波路に高分子を用いた垂直結合構造をとることによって、光ファイバーとの結合を屈折率が同一であるガラス部分で行い、屈折率の温度依存性が大きな高分子部分を活用して、表1に示すように低電力で熱光学光スイッチを機能させている。このようなハイブリッド構造は、高分子の加工容易性と、ガラスの熱安定性、光結合性を組み合わせる上で有効な技術といえる。

7. 高分子電気光学デバイス

光の伝搬を電場で変調制御し、位相変化、方向性結合、モード変換、導波光の進路変換などを行うデバイスとして、実用レベルにあるニオブ酸リチウム LiNbO_3 は EO 定数が大きく損失が小さいという特長を有し、時分割、空間分割光スイッチへの適用が検討されている。しかし LiNbO_3 は処理しうる信号速度、あるいは印加電圧(半波長電圧)低減に限界がある。位相変調を行うにあたり、 LiNbO_3 よりも低誘電率の材料を用いることで広帯域化が

表 2 各種電気光学材料の比較.

	EO 定数 r (pm/V)	誘導率 ϵ	屈折率 n	性能指数 $n^3 r$	性能指数 $n^3 r / \epsilon$
LiNbO ₃	31	28	2.2	330	11.8
KTP	35	15.4	1.86	225	14.6
KNbO ₃	25	37	2.17	255	6.9
GaAs	1.5	12	3.5	64	5.4
EO 高分子	>40	3.0	1.65	180	60
DAST	55	5.2	2.465	824	157

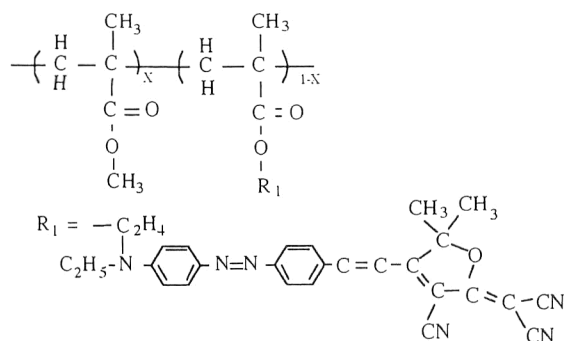


図 8 新規アクセプター結合アゾベンゼン色素²⁷⁾.

可能となる。表 2 に各種 EO 材料の比較を示す。

近年、低誘電率の高分子 EO 素子の実用化が米国を中心に進められている。高分子側鎖あるいは主鎖に π 電子共役分子をドナー-アクセプター置換したプッシュプル型の電子構造の色素を化学結合²⁵⁾、あるいは高分子中に色素を分散させ²⁶⁾、高分子のガラス転移温度以上の条件下で高電圧印加（分極処理）を行う。この結果、マトリックス高分子中の色素の双極子の方向が揃って（配向して）2 次の光非線形性が発現し、LiNbO₃ を超える EO 定数を有する材料とすることが可能である¹⁹⁾。用いる色素の π 電子共役系をポリエチレンあるいはスチルベン構造とした場合、長期的信頼性に懸念がある。そこで、安定なアゾベンゼンを π 共役系とした図 8 に示すような新規な色素が開発されている²⁷⁾。ここで用いたアクセプターは、すぐれた非線形性発現に有効なジシアノビニルアクセプターと比較し 2 倍以上の性能向上が可能であり、今後マトリックス高分子への高濃度結合の実現によってすぐれた EO 高分子の開発が期待できる。

分極処理された高分子中の色素は、時間とともに配向が緩和して性能が低下する恐れがある。このためガラス転移温度の高いマトリックス高分子を用いる必要がある。光導波路用高分子としてポリアイミドは、300°C を超えるガラス転移温度を有するため、EO 材料のマトリックスとして期待される。225°C で 1000 時間安定なポリアイミド系 EO 高分子が開発されている²⁸⁾、結合（あるいは分散）する色素がイミド化に耐えられる熱特性を有する必要があるため色

素構造が限定されること、あるいは色素を高濃度に導入することが難しいなどの問題がある。ポリウレタン系にウレアを結合したウレタン-ウレア共重合体をマトリックスとして、水素結合を活用して配向緩和の抑制が試みられ、100°C で安定な EO 高分子が作製されている²⁹⁾。最近では、ガラス転移温度が 165°C のポリメタクリルイミドをマトリックスとした熱安定性にすぐれる EO 高分子の作製³⁰⁾、あるいはガラス転移温度が 200°C 前後のフッ素化ポリアリルエーテルをマトリックスとする EO 高分子の開発が試みられている³¹⁾。これらのマトリックス高分子には、アゾベンゼン系非線形光学色素が 50 mol% 結合できることから、高性能 EO 高分子として期待される。EO 高分子導波路は将来の光デバイスとして、(1) 分子設計により化学修飾を行うことで高性能材料の開発が可能である、(2) 薄膜、導波路、光ファイバーなど種々の形態が容易である、などの利点を有しており、実用化への期待が大きい。

WDM による光情報システムで求められる波長分波器や波長フィルターなどとして、グレーティング構造を有する光導波路の開発が必要である。EO 高分子のグレーティング構造化については、色素化合物としてアゾベンゼン系材料を用い、これを高分子側鎖に結合したのち、レーザー光の 2 光束干渉露光を行い、アゾベンゼン部位のトランス-シス-トランス異性化によるレリーフグレーティング³²⁾、あるいはフォトブリーチングによる屈折率変調型グレーティングの構築・評価が進められている³³⁾。

EO 高分子は色素を含有していることから光導波路の損失が一般に 1 dB/cm 以上と大きい。損失値が ~ 0.1 dB/cm の光透過性にすぐれた高分子と組み合わせた接合光導波路の作製が行われている。ビスアゾベンゼン系 EO 高分子を、これとインターミキシングがなく屈折率が同一の UV 硬化エポキシ樹脂と、EO 高分子のコヒーレント長ごとに交互に組み合わせた接合化によって、疑似位相整合光導波路が作製されている³⁴⁾。このようにアクティブな光機能を有する部分とパッシブな光伝搬を担う部分とを任意に組み合わせた接合型光導波路形成技術により、新規な機能性光デバイスが容易に作製できる。

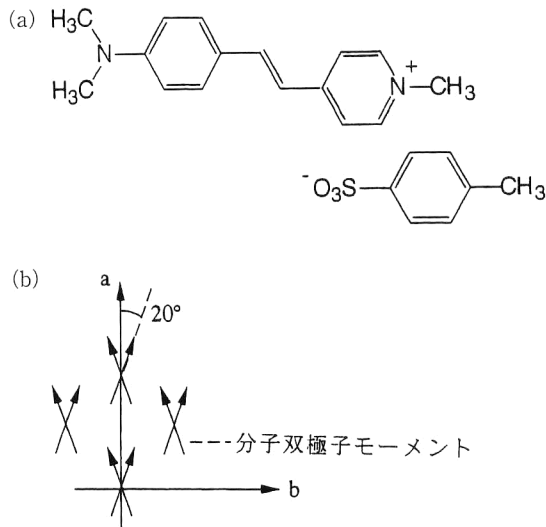


図9 有機電気光学結晶 DAST の化学構造。(a) DAST の化学構造、(b) DAST の分子配向。

8. 透明高分子と有機結晶の接合光導波路化

材料の有する EO 効果を活用することによって前述のように高速光スイッチや光変調器が実現できる。すぐれた EO 材料として、図9に示す有機イオン性結晶 4-ジメチルアミノ-N-メチルスチルバジリウムトシレート (DAST) が注目されている³⁵⁾。DAST の EO 定数 (r 定数) は、波長 $1.31 \mu\text{m}$ で 55 pm/V であり、この値は無機結晶の 2 倍近い³⁶⁾。このため多くの研究機関で結晶作製、素子化が検討されている³⁷⁾。EO 効果の性能指数は $n^3 r$ (n は屈折率) で表せるため、一般に屈折率の大きい無機結晶が有利であるが、DAST は無機結晶に比べ性能指数は約 3 倍である。波長 $1.55 \mu\text{m}$ の高速半導体レーザー光による電界センサー材料に DAST 結晶を用いた場合、現状では最高性能といわれる無機結晶 KTP と比較し 4 倍の感度で信号が検出できる³⁸⁾。

DAST 結晶も光導波路構造とすることによって用途拡大をはかりうる。フォトプロセスによる導波路化技術を用いる場合、一般に有機結晶はレジスト用溶媒に可溶であるため、高分子材料に比べ加工プロセスに工夫が必要である。DAST は多くの有機溶剤のほか水にも溶解するため、水溶性レジストも使用できず、したがって光導波路加工にはリフトオフ技術が有効と考えられる。DAST 結晶上にリフトオフ層をコーティングし、リフトオフ層をレジスト溶媒から保護するバッファ層を塗布し、最上層にレジスト層を塗布する。フォトプロセスによるレジストパターン形成後、酸素 RIE により結晶をエッチングし、最終的にリフトオフにより残存レジストを除去する。リフトオフ層として PMMA を用いることで、DAST 光導波路作製が可能とな

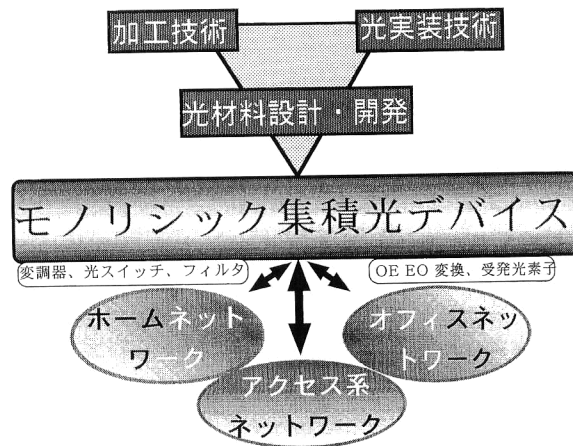


図10 高分子光デバイスの今後の展開。

る³⁹⁾。最近ではフォトブリーチングによる DAST の光導波路化が報告されている⁴⁰⁾。

DAST 光導波路は、結晶の不均一性に起因する散乱などのため、それ自体のみでは必要となる長さの光導波路構造は難しい。すなわち光透過性にすぐれる高分子光導波路と接合した導波路構造が必要であるため、DAST 結晶と UV 硬化樹脂を接合した光導波路が作製されている⁴¹⁾。UV 硬化樹脂は無溶剤タイプであり、マスクプロセスを繰り返して行っても DAST 結晶を溶解せず、接合構造光導波路作製が可能である。また構造中にフッ素を導入することで屈折率の微調整が可能であり、クラッド材料としても適用できる。DAST 光導波路の光損失は、波長 $1.3 \mu\text{m}$ で 10 dB/cm とまだ大きい。結晶の不均一による散乱損失が支配的と考えられる。DAST 結晶の高品質化、加工技術の向上、クラッド層の最適設計によって損失の低減が可能である。このような有機結晶/透明高分子の接合光導波路化は、新規な高機能光導波路デバイス作製技術として大きな可能性をもつ。接合光導波路はフォトニクスの展開において重要性が増すことは疑いなく、高分子光デバイスの適用領域の増大が期待できる。

情報社会の発展のための基盤技術を目指す高分子光デバイスは、各種光デバイスのモノリシック集積化の実現性、およびスイッチ機能や光フィルター機能などの可能性に鑑み、その重要性が高まっている。図10に高分子光デバイスの今後の展開を示す。光の伝搬を担うパッシブ高分子光回路、光変調機能などを担うアクティブ高分子光回路は、加工容易性、構造の多様性、分子設計による高機能実現の可能性、経済性などの点から、家庭内、オフィス内光化のキー材料、キーテクノロジーとして実用化へ向け研究展開している。

現状では石英ガラス光回路を追随している高分子光回路は、最近では世界的にも高分子材料ならではの長所を生かした新規光回路の開発へ展開しており、特にナノ加工技術とそれに対応できる材料開発をベースに、実用デバイスを実現する時期に至っている。このため、(1) すぐれた屈折率制御性、耐熱性を有する高透明性材料の開発、(2) 高機能性光導波路材料の開発とデバイス化、(3) 加工プロセスの単純化、(4) 低価格光導波路実装技術の構築、を早期に実現する必要がある。このためには産学官が一体となり、相補的かつ無駄のない研究開発体制を築くことが求められる。

文 献

- 1) T. Kaino: *Organic Molecular Solids*, ed. W. Jones (CRC Press, Boca Raton, FL, 1997) pp. 201-241.
- 2) 戒能俊邦: 電子情報通信学会論文誌, **J84-C** (2001) 744-755.
- 3) T. Kaino: *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.*, **2** (2000) R1-R7.
- 4) S. Garner, V. Chuyanov, A. Chen, S. Kalluri, F. I. N. Carrera, W. H. Steier and L. R. Dalton: *OSA/ACS Symposium, Technical Digest Series*, vol. 14 (1997) pp. WA4-1-WA4-3.
- 5) R. Yoshimura, M. Hikita, S. Tomaru and S. Imamura: *J. Lightwave Technol.*, **16** (1998) 1030-1037.
- 6) T. Maruno: *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **444** (1977) 27-38.
- 7) M. Usui, M. Hikita, T. Watanabe, M. Amano, S. Sugawara, S. Hayashida and S. Imamura: *J. Lightwave Technol.*, **14** (1996) 2338-2342.
- 8) K. Enbutsu, M. Hikita, R. Yoshimura, S. Tomaru and S. Imamura: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 3662-3664.
- 9) R. Yoshimura, M. Hikita, S. Tomaru and S. Imamura: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37** (1998) 3657-3661.
- 10) 高原秀行, 小池真司, 岡田 顕, 松井伸介: 応用物理, **64** (1995) 1032-1035.
- 11) M. Kagami, T. Yamashita and H. Itoh: *Proc. SPIE*, **4106** (2000) 11-20.
- 12) O. S. Rosch, W. Bernhald, R. Muller-Fiedler, P. Dannberg, A. Brauer, R. Buestrich and M. Popall: *Proc. SPIE*, **3799** (1999) 214-224.
- 13) H. -D. Bauer, M. Abraham, W. Ehrfeld, M. Gerner, A. Picard, H. Schift and L. Weber: *Conf. Europ. Fiber Commun. & Networks (EFOC & N)*, (Heidelberg, 1994) pp. 108-111.
- 14) T. Hanemann, H. Ulrich, R. Ruprecht and J. H. Hauselt: *Proc. SPIE*, **3799** (1999) 225-229.
- 15) K. Glukh, J. -H. Lipian, R. Mimna, P. S. Neal, R. Ravikiran, L. F. Rhodes, R. A. Shick and X. -M. Zhao: *Proc. SPIE*, **4106** (2000) 43-53.
- 16) R. Wiesmann, S. Kalveram, S. Rudolph, M. Johnek and A. Neyer: *Electron. Lett.*, **32** (1996) 2329-2330.
- 17) Th. Knoche, L. Muller, R. Klein and A. Neyer: *Electron. Lett.*, **32** (1996) 1284-1285.
- 18) P. M. Ferm and L. W. Shacklette: *Proc. SPIE*, **4106** (2000) 1-10.
- 19) Y. Shi, C. Zhang, H. Zhang, J. H. Bechtel, L. R. Dalton, B. H. Robinson and W. H. Steier: *Science*, **288** (2000) 119-122.
- 20) S. Lecomte, U. Gubler, M. Jaeger, Vh. Bosshard, G. Montemezzani, P. Guenter, L. Gobbi and F. Diederich: *Appl. Phys. Lett.*, **77** (2000) 921-923.
- 21) Y. -G. Zhao, W. -K. Lu, Y. Ma, S. -S. Kim, S. T. Ho and T. J. Marls: *Appl. Phys. Lett.*, **77** (2000) 2961-2963.
- 22) T. Watanabe, Y. Inoue, A. Kaneko, N. Ooba and T. Kurihara: *Electron. Lett.*, **33** (1997) 1547-1548.
- 23) J. Kobayashi, T. Matsuura, Y. Hida, S. Sasaki and T. Maruno: *IEEE J. Lightwave Technol.*, **16** (1998) 1024-1029.
- 24) N. Keil, C. Weinert, W. Wirges, H. H. Yao, S. Yilmaz, C. Zawadzki, J. Schneider, J. Bauer, M. Bauer, K. Losch, K. Satzke, W. Wishmann and J. V. Wirth: *Electron. Lett.*, **36** (2000) 430-431.
- 25) Y. Shuto, M. Amano and T. Kaino: *Proc. SPIE*, **1560** (1991) 184-195.
- 26) S. Girmour, R. A. Montgomery, S. R. Marder, L. -T. Chen, A. K. -Y. Jen, Y. Cai, J. W. Perry and L. R. Dalton: *Chem. Mater.*, **6** (1994) 1603-1604.
- 27) 金子明弘, 岡本悦哉, 戒能俊邦: 第50回高分子学会年次大会 (2001) III J22.
- 28) T. Verbiest, D. M. Burland, M. C. Jurich, V. Y. Lee, R. D. Miller and W. Volken: *Science*, **268** (1995) 1604-1606.
- 29) M. Tsuchimori, O. Watanabe, S. Ogata and A. Okada: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35** (1996) L444-L446.
- 30) T. Ushiwata, E. Okamoto, K. Komatsu and T. Kaino: *Proc. SPIE*, **4279** (2001) 17-24.
- 31) T. Ushiwata, E. Okamoto, K. Komatsu and T. Kaino: *Opt. Mater.* (2002) in press.
- 32) D. Y. Kim, X. L. Jiang, L. Li, J. Kumar and S. K. Tripathy: *Photonic and Optoelectronic Polymers*, eds. A. A. Jenekhe and K. J. Wynne, ACS Symposium Series, **672** (Washington DC, 1995) pp. 251-259.
- 33) T. Hattori, T. Shibata, S. Onodera and T. Kaino: *J. Appl. Phys.*, **87** (2000) 3240-3244.
- 34) S. Tomaru, T. Watanabe, M. Amano, M. Hikita, Y. Shuto, I. Yokohama, T. Kaino and M. Asobe: *Appl. Phys. Lett.*, **68** (1996) 1760-1762.
- 35) K. Sakai, N. Yoshikawa, T. Ohmi, T. Koike, S. Umegaki, S. Okada, A. Masaki, H. Matsuda and H. Nakanishi: *Proc. SPIE*, **1337** (1990) 307-313.
- 36) F. Pan, G. Knopfle, Ch. Bosshard, S. Follonier, R. Spreiter, M. S. Wong and P. Gunter: *Appl. Phys. Lett.*, **69** (1996) 13-15.
- 37) K. Kawase, M. Mizuno, S. Shoma, H. Takahashi, T. Taniuchi, Y. Urata, S. Wada, H. Tashiro and H. Ito: *Opt. Lett.*, **24** (1999) 1065-1067.
- 38) 永妻忠夫, 滝沢孝充, 横尾 篤, 戒能俊邦: 1996 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ大会 (1996) C-221.
- 39) K. Takayama, M. Yoshida, H. -H. Deng, K. Komatsu and T. Kaino: *Nonlinear Opt.*, **25** (2000) 423-428.
- 40) B. Cai, K. Komatsu and T. Kaino: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) L964-L966.
- 41) K. Takayama, K. Komatsu and T. Kaino: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **40** (2001) 5149-5150.

(2001年10月11日受理)