

ポリマー光回路と応用

各務学, 渡辺修

Polymer Optical Circuits and Their Applications

Manabu Kagami, Osamu Watanabe

要 旨

高品質、高速性が急速に進んでいるマルチメディア環境を支えているのは光通信である。この光通信は、最先端の通信技術を順次取り入れることにより日々進展している。特に、光信号処理部には様々な光回路が導入されるようになってきた。ポリマー光回路は、加工性に優れ、大面積化が可能であるため、高価とされてきた光回路の極端な低価格化が実現できる。そのため、来るべき民生用光通信の主要回路となることが期待されている。また、ポリマー材料特有の物性を利用して従

来に無い光学特性も見出され、光デバイスに広く採用されるようになってきた。本解説では、ポリマーを用いた光回路を受動型と能動型とに分類し、それぞれの近年の開発状況と展望をまとめた。受動型光部品としては、光ネットワークを構成する上での要素回路である、光導波路、光インターコネクション、光分岐回路、合分波回路について記述する。同様に、能動型光部品として、ポッケルス効果、および、熱光学効果を利用した光スイッチング素子を中心に記述する。

Abstract

Optical networking has been supporting multimedia environment that rapidly increases the demands for high quality and high speed. This optical networking continues to make progress by adopting state-of-the-art networking technologies. Recently, great varieties of optical circuits have come to be applied to the optical signal-processing unit. Polymeric materials, excellent in processing, make it possible to make larger optical devices, this realizing low-cost optical circuits which would be one of the potential components for future personal optical networking systems. Furthermore,

several optical features were found in polymer's intrinsic properties, and they have been widely used for optical devices. In this paper, we review the recent developments and prospects of both passive and active optical components. We discuss several important passive components, such as optical waveguide, optical interconnection, optical branching circuits, and multiplexer/demultiplexer. As for active components, we mainly discuss novel switching devices using the Pockels effect and the thermo-optic effect.

キーワード

ポリマー光回路, 受動部品, 能動部品, 光導波路, 光インターコネクション, 有機非線形材料, 光スイッチ

1. まえがき

電線による電話網は過去100年間にわたって構築されてきたが、今後10年以内に各家庭の軒先までが光ファイバに置き換えられようとしている¹⁾。これは次世代通信網として位置づけられており、マルチメディアサービスを各家庭やオフィスに高速配信するためのインフラストラクチャである。光情報通信テクノロジーロードマップ策定委員会の調査によると、2010年代には、各家庭100Mbps、全国幹線網で5Tbpsの伝送容量が必要と見込まれており²⁾、高速な光ファイバ通信網の敷設が開始されている。このような時代になると、情報通信への依存度は高まり、家庭内や自動車内からでもマルチメディア社会へ接続する機会が増加する。家庭や自家用車内に施される民生用の光通信システムは、当然、ユーザーが負担しなくてはならないため、低価格化が強く望まれることになり、現行の光通信部品を更に低価格化しなければならない。このためには、材料とプロセス面での革新を必要とする。材料面では、現在主流のガラスに代えてポリマーを用い、プロセス面では、電子集積回路のように、光回路の集積化により大量一括生産を目指さなければならない。しかしながら、光回路は光波を誘電体材料によって微小領域に強く閉じ込めて伝送するため、電子回路とは違って急激に曲げたり出来ない上に、光軸調整もサブミクロンの精度が要求されている。そのため、回路を構成する上で、光の波動性等を利用して様々な工夫がなされている。光集積回路には、1枚の基板上に各種機能性部品を形成していくモノリシック集積回路と、別の工程で形成されたいくつもの微小素子を装着していくハイブリッド集積回路に大別できる。前者は、現状の成膜技術では成膜できる材料が下層材料によって制限されるなどのプロセス上の様々な制約により、搭載できる光部品が極端に少ないため、基礎研究段階にある。後者のハイブリッド集積回路は、各部品が高歩留まりで生産が可能となるため、素子の低コスト化が可能であり、現在盛んに実用化へ向けた研究がなされている。本解説では、これらのポリマーによる通信用光回路部品の集積化技術の開発状況を概観する。

2. 受動型光回路

受動型光回路とは外部信号による光波制御機能を持たない素子である。すなわち、外部からエネルギーを供給しなくても、光が通過するだけでその光に対して何らかの作用を起こさせる回路である。

Fig. 1は、ハイブリッド光集積回路の一例で、搭載部品を基板に容易に接続できるようにプラットフォーム（位置決め用の案内溝が精密に加工された基板）上に、表面装荷デバイスや、挿入型デバイス、光ファイバといったコンポーネントを無調芯で装着出来るようにしたものである。回路の寸法は、搭載部品にもよるが、数mm～数cm角程度であり、厚さは1mm以下である。こういった構造は、光軸を合わせながらの煩雑な組み立てコストを簡略化することが可能となるので、光集積回路の民生品用途への最有力候補となっている。

2.1 光導波路

光導波路は、光集積回路に搭載したコンポーネント間の光伝送を行うための線路であり、最も基本的なコンポーネントである。光導波路材料としては、透明性、信頼性、加工性が要求されている。公衆回線用途では、透明性、信頼性が強く要求されるためガラス系材料が、民生用途では低コストにつながる加工性が強く要求されるためポリマー系材料が主として検討されている。ポリマー特有

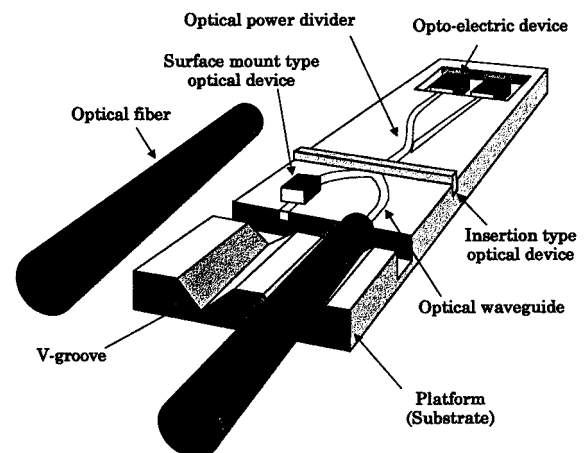


Fig. 1 An example of hybrid integrated optical circuit.

の長所としては、材料が安価、大面積化が可能、加工性に富む、成形技術による大量生産が可能といったことである³⁾。懸念される信頼性の面でも、自動車を例にとると、PMMA (Poly-methyl-methacrylate) を用いた光ファイバ通信路が既に採用されており⁴⁾、車室内などの比較的温床上昇が小さい場所での使用は問題ない。

導波路用ポリマー材料は広範囲に研究されてきたが、透明性の面でPMMAなどのアクリル系^{5~7)}、耐熱性の面でポリイミド系⁸⁾が主流となってきた。断面が矩形の光導波路の作製方法は選択重合⁵⁾、RIE (Reactive Ion Etching)^{6~8)}、電子⁹⁾やレーザー¹⁰⁾等のビームによる直接描画、射出成形¹¹⁾、フォトリソ¹²⁾等の方法が用いられている。伝送損失は、おおむね0.1-0.5dB/cm程度が達成されている。加工中にダメージを受け易いポリマー材料に対して、導波路の内部や表面をサブミクロン以下のオーダーで如何に平滑化するかといった技術がポイントとなる。Fig. 2は当所において作製された光導波路で、コアおよびクラッド材料としてPMMAと poly- (fluoroalkyl methacrylate) をそれぞれ用い、RIEによって作製した¹³⁾。波長670nmにおいて伝送損失0.1dB/cmを達成した。同じく当所において、ウレタン-ウレア共重合体を用いたフォトリソ法による屈折率変化の挙動を明らかにし¹⁴⁾、導波路型のTE (Transverse Electric) モードフィルタの作製に成功した¹⁵⁾。

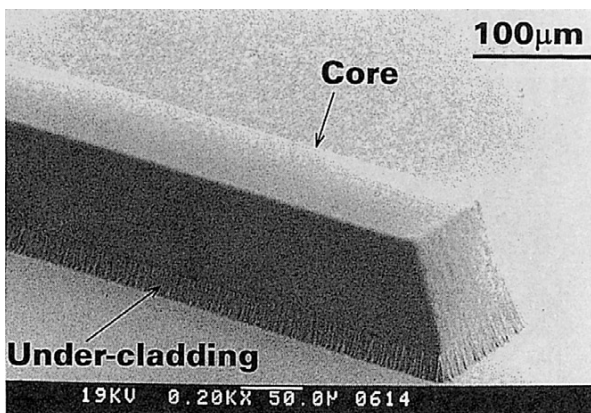


Fig. 2 Multimode optical waveguide.
(Core size 100 μ m $\times$ 100 μ m)

これは、本方法によってFig. 3の断面図のように、異方的な屈折率制御が可能であることを利用し、TE光を導波モードに、TM (Transverse Magnetic) 光に対して放射モードとなるように屈折率を制御している。このモードフィルタで消光比27dBを達成した。

光導波路は、その導波特性により、シングルモードとマルチモードに分類される。シングルモード系は、位相の揃った光波の伝送が可能であるため、高速通信や高感度センシング用途で用いられるが、コアサイズが数ミクロン角程度となるため、サブミクロンでの光軸合わせが要求される。この結果、システムが高価になるので、民生用途ではほとんど用いられない。これに対し、マルチモード系は比較的低速な通信や光波の位相情報を使用しないセンサ用途で用いられる。特に、コアサイズが数十 μ m~百 μ m角程度と大きいので、安価な光インターコネクション (光部品の光学的結合手段) が可能となり、最近、研究が活発になっている¹⁶⁾。口径が大きいと光導波路や光デバイスとの接続許容度が大きくなり、場合によってはプラスチック製コネクタ部品も使用可能になるので大幅な低価格化が望める。また、導波路の比屈折率差が大きくなると光源との結合効率が上昇するだけでなく、光ファイバとの接続における角度ずれの許容度増加や、光導波路の許容曲げ半径が小さくなるのでデバイスの高密度集積が可能となる。このような大口径・高屈折率差の導波構造を有した光導波路をLCHD (Large-core and High- Δ)⁷⁾

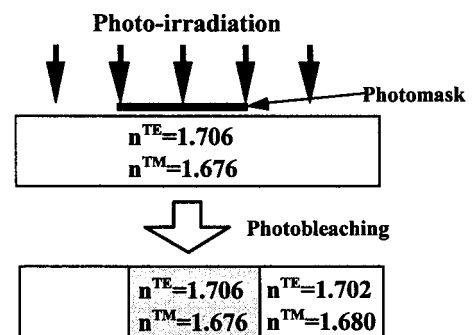


Fig. 3 The change of refractive index of urethane-urea copolymer by UV irradiation.

導波路と呼んでいる。

2.2 光インターコネクション

シリコン集積回路の微細化と高速化により電気配線の限界が近づいて来ているといわれている¹⁷⁾。打開策として、近年、マイクロチップモジュール (Multichip Modules ; MCM) 技術¹⁸⁾ に代表されるように、光導波路中に微小な45度ミラーを形成し、表面装荷デバイスとの光信号授受を行ったり (Fig. 1に示したハイブリッド集積), 光データベースを搭載してボード間での光インターコネクションを行おうという試みが多くなされている。このような技術は、低価格で光通信を供給するために必要な実装技術であり、1990年代になって研究が盛んに行われるようになった。この分野は、大面積、低温形成を特長とするポリマー系導波路の有効な応用として注目されている。コア自体が半導体結晶である場合、異方性エッチングにより良好な45度ミラーが形成できるが、一般的に用いられる有機、無機材料は非晶質であるためこの方法は使用できず、様々なツールを用いて後加工 (チャネル導波路形成後) により形成する。先端がV形90度のダイヤモンドソーや刃物による機械加工¹⁹⁾、反応性イオンエッチング (RIE) による加工^{13, 18)}、レーザーアブレーション^{20, 21)} 等、様々な試みがなされている。当所においては、温度制御と微小開口マスクを用いたRIEを提案し、光導波路と微小ミラーの一括形成法を開発した¹³⁾。Fig. 4にPMMA光導波路中に形成された面外分岐ミラーと、ミラーからの垂直分岐光の写真を示す。光導波路からの漏光はほとんど無く、ミラーからは輝度の高い放射が得られている様子が分かる。この他、当所においては、Fig. 1で示した光ファイバ挿入用のV溝も、菱形ビームによるレーザーアブレーションにより、基板材料に関わらず形成できる技術を開発した²¹⁾。これらの各研究機関が開発している材料加工技術が、ハイブリッド光集積回路を実用化させるための重要な要素技術となっていくことは間違い無い。

2.3 光分岐回路

膜面内での分岐は光集積回路において最も多用する要素部品ではあるが、意外とその形状は大きくなり、デバイスの小型化、低価格化を妨げる要

因にもなっている。デバイスの小型化は、1枚のウェハから得られるデバイスの個数を増加させ、低価格化に寄与するので光集積回路の実用化において重要である。小型化が制限されるのは導波路の閉じ込め係数が小さいことによるもので、解決策として、導波路の比屈折率差を大きくしたり、導波路中に低屈折率プリズムの埋込²²⁾ などが検討されている。前者はトレードオフとしてシングルモード条件が厳しくなるので、主としてマルチモード導波路に適用される。後者は、穴開け加工、低屈折率材料の選択、埋込加工等が必要となり、プロセスが複雑になる。

Fig. 5に現在までに報告されている代表的な分岐方式を示した。分岐回路は、分岐比が波長や偏光方向に無依存なY分岐方式 (Fig. 5(a)) が最も一般的であり、シングル／マルチモードのいずれに於いても多用されている。特に、シングルモード系においては、マッハツェンダー型変調デバイスや 1×2^N 分岐導波路等に於いて用いられている。同様に、低損失で分岐比が任意に選べる方向性結合器型の分岐方式 (Fig. 5(b)) も広く利用されている。この他、分岐部に多モードスラブ導波路領域を設け、そこでの干渉を利用した多モード干渉方式 (Multimode interference ; MMI) (Fig. 5(c)) が近年注目を集めている²³⁾。しかしながら、(b), (c)

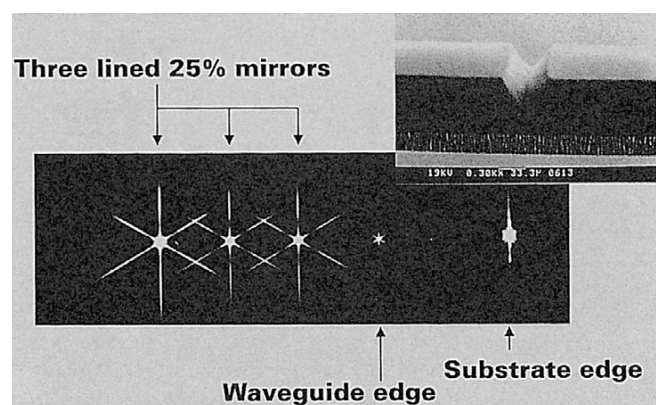


Fig. 4 SEM photograph of an out-of-plane branching mirror, and photograph of branching light reflected from the mirrors. The photograph was taken through a cross filter.

の方式は、シングルモード系でのみ利用できる方式である。

マルチモード用面内分岐方法として、Y分岐方式が光分岐回路として一般的だが、分岐角の増加に従って、過剰損失も急増する。この原因は、導波路の傾き角によって生ずる導波路からの放射である。最近、当所に於いてモード分割方式²⁴⁾と名付けた分岐方式を開発した (Fig. 5(d))。これは伝送光の高次モード成分を選択的に急激な曲がり導波路 (曲げ半径R, Fig. 6(a)) により一度放射させた後、再び分岐導波路に結合させるもので、見かけ上、大きな分岐角においても低損失であり、かつ、伝送モード分布も素子通過後も変化が小さいので多段接続にも適したものとなっている。同一条件で作製した一般的なY分岐方式と比較すると、分岐角25°、分岐比50/50 (0dB) における過剰損失は、Y分岐方式が9.4dBであるのに対して、モード分割方式はFig. 6に示すように、2.5dBを実現している。大きな分岐角が必要な場合、モード分割型が有利であることが分かる。

2. 4 合分波回路

一本の光ファイバによって複数の光信号をそれぞれ違う波長によって伝送する方式を波長多重通信方式と呼ぶ。一回線当たりのシステムコストが安価になるため、次世代の大容量通信技術として期待されており²⁵⁾、一部はすでに実用化されて

いる。この通信方式の主要部品となるのは合分波回路であり、複数の光ファイバから送られてきた光波を一本の光ファイバに合流させたり、一本の光ファイバから波長毎に複数の光ファイバに分波する機能を有する。合分波回路は、薄膜平板形の波長フィルタ (Fig. 1において挿入型デバイス) や導波路型のアレー導波路回折格子 (Arrayed-waveguide grating : AWG) 型²⁶⁾が現在盛んに研究されている。自動車などへの応用を考えると、100種以上のセンサ信号が用いられており、それらを数本の光ファイバで伝送できれば、ワイヤハーネスの煩雑さ、軽量化、電磁ノイズ耐性、高速性の点で理想的である。自動車などの民生機器での波長多重通信を実現するには、これらの合分波回路を低価格で供給しなければならず、ポリマー系デバイスへの期待は大きい。

3. 能動型光回路

能動型光回路とは外部の電場、熱、光の作用により導波路の光学的性質すなわち屈折率、吸収係数を変化させ、その結果として導波光の性質 (位相、強度等) を制御する光回路である。屈折率の変化を利用する場合が多く、得られた位相変化量を干渉、偏光の回転等に置き換えて強度変調とし

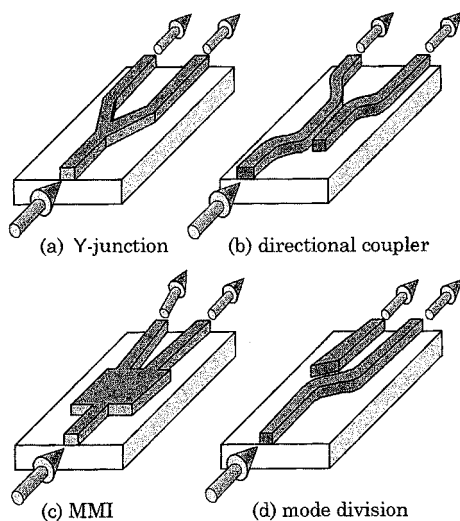


Fig. 5 Classification of optical branching circuits.

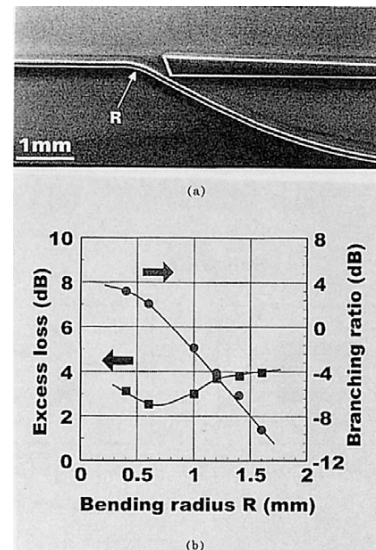


Fig. 6 Mode division type power divider (a)SEM photograph of actually fabricated circuit with curvature R, (b)optical properties.

て検出する場合が多い。

Fig. 7にはよく使われる変調器、スイッチの構造例を示した。**Fig. 7(a)**は最もシンプルな直線型導波路での変調器構造を示したもので、入射した光の偏光の回転を偏光子で強度変調に置き換える。**Fig. 7(b)**はマッハツェンダー型の変調器で位相差による干渉により強度変調する。**Fig. 7(c)**は方向性結合器に電極を配置した構成で屈折率の変化により導波路間のモード結合定数を変化させスイッチとして機能できる。**Fig. 7(d)**はY分岐導波路に電極を配置した構成で、屈折率の変化で光路を切り替え、スイッチとして機能できる。

能動型光回路は外部から加えた変化に対して、光学特性が変化することが必要であり、素子化技術の開発とともに材料の開発が重要な鍵を握る。ポリマーを用いた時には低コストあるいは易加工性等のメリットのみならず、機能の向上への期待も高いといえる。

ポリマー能動型光回路は電場により屈折率が比例して変化するポッケルス効果を示すいわゆる電場配向ポリマーを利用する場合と熱により屈折率が増加するいわゆる熱光学効果を利用する場合での検討例が多く、これに加えて新しい機能、概念

を利用した方法も提案されている。以下、順に概観する。

3. 1 ポッケルス効果の利用

電場配向ポリマーは2次の光学的非線形性を示す分子を何らかの方法で一方向に配向させ、ポッケルス効果を発現できる様にした材料である。電場配向ポリマーを無機材料と比較した時、非線形応答として高いポッケルス効果が期待できる点、低屈折率（低誘電率）であることからファイバーとの整合性に優れる点、あるいは変調においてマイクロ波との位相整合が取りやすい点が機能上のメリットと考えられる。

材料に関しては、多くの研究者が検討を重ね、有望な材料も数多く見つかった^{27~29)}。当所でも材料探索を検討しており、ウレタン-ウレア共重合体を中心として開発を行ってきた^{30, 31)}。**Fig. 8(a)**に当所で開発した材料の一例を示す。縮

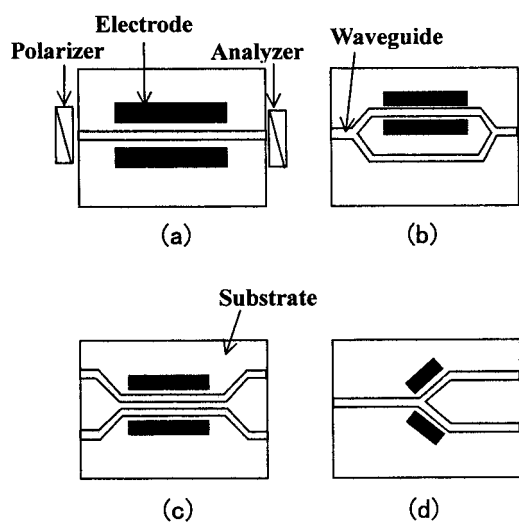


Fig. 7 Typical active polymer-waveguides, (a)linear-type modulator; (b)Mach-Zehnder-type modulator; (c)directional-coupler-type switch; (d)Y-branch-type switch.

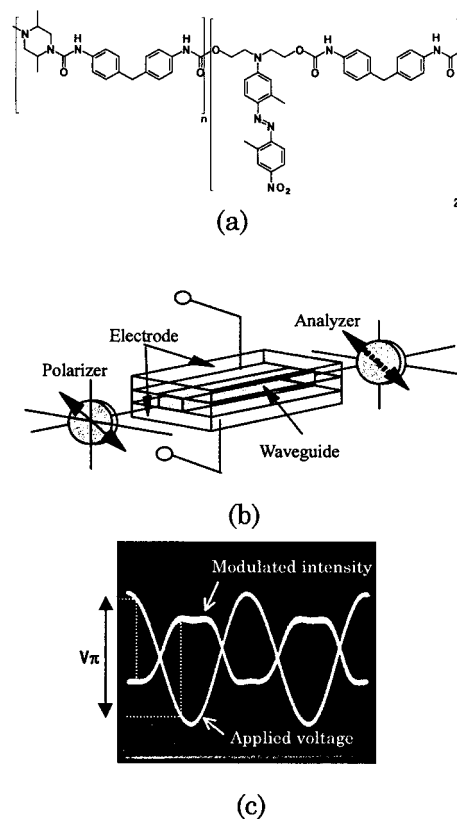


Fig. 8 (a)Chemical structure of urethane-urea copolymer, (b)schematic device structure, (c)the oscilloscope trace of modulated signal.

合系ポリマーにすることにより光学的非線形性成分を大量にポリマー内に導入することができた。同時に、ウレア結合の導入により水素結合を利用した経時的安定性、分子量増大による成膜性の向上を達成した。

電場配向ポリマーとして、アクリル系ポリマーを中心にこれまで開発が行われ、これを用いた変調素子の作製も数多くなされてきた。アクリル系ポリマーを用いた位相変調器では波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯で 34pm/V のポッケルス定数が報告されており、定数としてはトップクラスの値である³²⁾。当所でも上述のウレタン-ウレアポリマーを使って、Fig. 8(b)に示した様な素子構成で変調器を作製し、ポッケルス定数 12pm/V を波長 830nm で得ている³³⁾。変調の様子をFig. 8(c)に示した。素子の上下方向から導波路内に印加した交流電圧に対応して、導波光の光強度が変調されているのがわかる。

ポリマー系の特徴を生かした高速変調素子の作製も試みられており、マッハツェンダー型の変調器では 40GHz の変調が確認されている³⁴⁾。最近では、南カリフォルニア大学のグループがポリウレタンを用いての素子化を積極的に展開しており³⁵⁾、進行波型電極の改良で 110GHz を達成した³⁶⁾。また、実用化研究も旺盛で、コネクタが接続されたパッケージまでの実装もすでに行われている³⁷⁾。

一方、変調のみならず光スイッチの素子作製も積極的に展開されている。マッハツェンダー干渉型光回路と方向性結合器を組み合わせた素子が試作され、スイッチングの消光比 20dB を実現している³²⁾。Y分岐でも同様に素子が試作されている³⁸⁾。さらにTE-TMモード変換素子も作製されており応用が広がっていることがわかる³⁹⁾。

ポリマー系の特徴を生かした素子として、上下に導波路を積層した光回路も作製されている。方向性結合器による上下導波路でのスイッチ⁴⁰⁾、マッハツェンダー素子の積層化⁴¹⁾等が報告されており、集積化の点でポリマー系の特徴を生かした提案である。

電場配向ポリマーを用いた素子でも導波損失は波長 $1.3\mu\text{m}$ 帯で 1dB/cm 以下まで実現されている。実用域の性能ではあるが、集積化等を考えればさらに低損失化、あるいは受動型導波路との結合の

低損失化が必要である。そこで、透明性に優れるポリマーと電場配向ポリマーを接続した導波路を作製することが試みられた。両ポリマー間での結合損失 0.005dB が示され、実用的にも問題ないことが示された⁴²⁾。

3.2 熱光学効果の利用

ポリマーの熱光学効果を利用した素子の研究が近年活発になってきた^{43), 44)}。熱光学効果はポッケルス効果に比べると遥かに大きな屈折率変化を誘起する事ができ、さらにポリマー系は石英ガラス等の無機系材料に比べても1桁以上変化率が大いなので、低消費電力で操作できるメリットがある。反面、熱的応答なので応答速度は遅く、ms程度で、高速変調器としての使用は困難である。むしろ低速度の切り替えスイッチとして、光インターコネクションなどへの応用が期待されている。

波長に依存しないデジタル光スイッチとして、Y分岐型での検討が進んでいる⁴⁵⁾。また方向性結合器型での提案もなされている⁴⁶⁾。熱光学効果はポッケルス効果の利用に比べると素子構成も簡単で、商品化の検討も精力的に行われ既に上市もされている。Y分岐をベースとした 2×2 スイッチでは、挿入損失 2.5dB 以下で、消光比も 30dB 以上、波長 $1.3\mu\text{m}$ で導波損失 0.1dB/cm が達成されている⁴⁷⁾。

3.3 その他

現在、電場による応答を利用した素子開発が盛んであるが、将来的には電極不要で、光で光を制御するような全光素子への期待もある。そのための光回路の提案もいくつかなされている。例えば、光によって分子の状態を制御できるいわゆるフォトクロミック分子を用いた光変調素子⁴⁸⁾、あるいは3次の非線形光学材料を用いた光変調器⁴⁹⁾等の提案である。この他にも、特徴ある素子の提案がされており今後の展開が期待される。

また、光回路の応用として通信分野以外でも、センサー応用への展開も感度が良好ということで着目されている。生体内の微量物質検出のためにイオノフォアを利用したセンサーが提案されている⁵⁰⁾。電場配向ポリマーは非常に早く応答することが知られている。有機材料でのTHz帯域の電場計測への応用も、特徴を生かした提案と言える⁵¹⁾。

一方、自動車周辺では、移動体通信、電気自動車等、車を取りまく電場が今後ますます増加、広帯域化すると考えられる。これら電磁ノイズによる各種電子機器の誤動作の低減は重要な課題である。現在、高帯域の小型電場計測機器として有用なものがなく、ポリマー光回路を使ったセンサーでの実現が期待される。

4. 展望とまとめ

光集積回路、特に、ポリマー材料により構成された光回路部品について当所の研究成果を織り交ぜて世の中の開発状況をまとめた。光集積回路の研究は30年以上の歴史があり、今なお多くの研究者が携わっているにもかかわらず、実用化に至ったのはほんの一部のシステムにとどまっていた。原因は価格であり、これを克服するための有望な解として、数多くの研究成果の中から生き残ってきたデバイス形態の一つとして、本解説で紹介したポリマー光集積回路がある。更なる低コスト化、高性能化、高信頼化など技術課題が残る応用分野もあるが、現在少しずつ世の中に認知され、使用されるようになってきた。公衆回線や民生分野での光通信用としてだけではなく、マイクロマシンへの応用^{5,2)}も検討されるに至り、今後この光集積回路がごく当たり前に身の回りで使用されるようになる日も近いと思われる。

参考文献

- 山下一郎, 岡安雅信 : NTT R&D, **46**-5(1997), 463
- 光産業の動向, 平成8年度光産業技術振興協会報告書, **9**-001 (1997)
- 今村三郎, 吉村了行, 中込弘, 肥田安弘 : NTT R&D, **42**-11(1993), 1431
- 矢田恒二 : 電子情報通信学会誌, **75**-1(1992), 42
- Booth, B. L. : IEEE J. Lightwave Technol., **7**-10(1989), 1445
- Usui, M., Hikita, M., Watanabe, T., Amano, M., Sugawara, S., Hayashida, S. and Imamura, S. : J. Lightwave Technol., **14**-10(1996), 2338
- Kagami, M., Ito, H., Ichikawa, T., Kato, S., Matsuda, M. and Takahashi, N. : Appl. Opt., **34**-6(1995), 1041
- Kobayashi, J., Matsuura, T., Hida, Y., Sasaki, S. and Maruno, T. : IEEE J. Lightwave Technol., **16**-6(1998), 1024
- Nakayama, H., Sugihara, O. and Okamoto, N. : Opt. Lett., **22**-20(1997), 1541
- Krchavek, R. R., Lalk, G. R. and Hartman, D. H. : J. Appl. Phys., **66**-11(1989), 5156
- Fischer, D. and Voges, E. : Electron. Lett., **33**-19(1997), 1626
- Diemeer, M. B. J., Suyten, F. M. M., Trommel, E. S., McDonach, A., Copeland, J. M., Jenneskens, L. W. and Horsthusis, W. H. G. : Electron. Lett., **26**-6(1990), 379
- Kagami, M., Hasegawa, K. and Ito, H. : Appl. Opt., **36**-30(1997), 7700
- Watanabe, O., Tsuchimori, M. and Okada, A. : J. Mater. Chem., **6**-9(1996), 1487
- Watanabe, O., Tsuchimori, M., Okada A. and Ito, H. : Appl. Phys. Lett., **71**-6(1997), 750
- 例えば, 和田修 : 応用物理, **62**-1(1993), 2
- 例えば, 林巖雄 : 応用物理, **65**-8(1996), 824
- Koike, S., Shimokawa, F., Matsuura, T. and Takahara, H. : IEEE Trans. Comp., Packag. and Manuf. Technol. -Part B, **19**-1(1996), 124
- Yoshimura, R., Hikita, M., Usui, M., Tomaru, S. and Imamura, S. : Electron. Lett., **33**-15(1997), 1311
- Booth, B. L. : Polym. for Lightwave and Integrated Opt., Ed. by Hornak, L. A., (1992), 231, Marcel Dekker, New York
- Ichikawa, T., Kagami, M. and Ito, H. : Opt. Lett., **23**-14(1998), 1138
- Hsu, J.-M., and Lee, C.-T. : IEEE J. of Quant. Electron., **34**-4 (1998), 673
- Besley, J. A., Love, J. D. and Langer, W. : IEEE J. Lightwave Technol., **16**-4(1998), 678
- Kagami, M. and Ito, H. : IEEE J. Lightwave Technol., **16**-11(1998), 2028
- 猿渡正俊 : 電子情報通信学会誌, **79**-11(1996), 1103
- Kobayashi, J., Inoue, Y., Matsuura, T. and Maruno, T. : IEICE Trans. Electron., **E81**-C-7(1998), 1020
- Burland, D. M., Miller, R. D. and Walsh, C. A. : Chem. Rev., **94**-1(1994), 31
- Dalton, L. R., Harper, A. W., Ghosn, R., Steier, W. H., Ziari, M., Fetterman, H., Shi, Y., Mustacich, R. V., Jen, A. K.-Y. and Shea, K. J. : Chem. Mater., **7**-6(1995), 1060
- 根本修克 : 高分子, **46**(1997), 132
- Tsuchimori, M., Watanabe, O., Ogata, S. and Okada, A. : Jpn. J. Appl. Phys., **35**-4(1996), L444
- Tsuchimori, M., Watanabe, O., Ogata, S. and Okada, A. : Jpn. J. Appl. Phys., **36**-9(1997), 5518
- Möhlmann, G. R. : Synth. Met., **67**(1994), 77
- Watanabe, O., Tsuchimori, M., Okada, A. and Ito, H. : Jpn. J. Appl. Phys., **37**-10(1998), 5588
- Teng, C. C. : Appl. Phys. Lett., **60**-3(1992), 1538
- Dalton, L. R., Harper, A. W., Wu, B., Ghosn, R., Laquindanum, J., Liang, Z., Hubbel, A. and Xu, C. : Adv. Mater., **7**-6(1995), 519

- 36) Chen, D., Fettermann, H. R., Chen, A., Steir, W. H., Dalton, L. R., Wang, W. and Shi, Y. : Appl. Phys. Lett., **70**-25(1997), 3335
- 37) Shi, Y., Wang, W., Olson, D. J., Lin, W. and Bechtel, J. H. : Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **2852**(1996), 258
- 38) Lee, S.-S., Ahn, S.-W. and Shin, S.-Y : Opt. Commun., **138**(1997), 298
- 39) Yue, Z. Z., Cao, G., Taboada, J. M., Maki, J. J., Tang, S. and Chen, R. T. : Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **3005**(1997), 170
- 40) 疋田真, 小沢口治樹 : 応用物理 **63**(1994), 49
- 41) Tumolillo, T. A. Jr. and Ashley, P. R. : Appl. Phys. Lett., **62**-24(1993), 3068
- 42) Watanabe, T., Hikita, M., Amano, M. and Shuto, Y. : J. Appl. Phys., **83**-2(1998), 639
- 43) Hida, Y., Onose, H. and Imamura, S. : IEEE Photonics Technol. Lett., **5**(1993), 782
- 44) 大庭直樹, 渡辺俊夫, 栗原隆 : 電子情報通信学会技術研究報告, **97**-233(1997), 13
- 45) Lee, S.-S and Shin, S.-Y : Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng., **2997**(1997), 126
- 46) Keil, N., Yao, H. H., Zawadzki, C. and Strebel, B. : Electron. Lett., **30**-8(1994), 639
- 47) Akzo Nobel カタログ : BeamBox™ Reliability Assurance Technical Note
- 48) 海老澤文博, 助川健, 吉田卓史, 有島功一, 星野光利 : 電子情報通信学会技術研究報告, **96**-285(1997), 31
- 49) Kaino, T., Yokohama, I., Tomaru, S., Amano, M. and Hikita, M. : ACS Symp. Ser., (1997), 30
- 50) Hisamoto, H., Kim, K.-H., Manabe, Y., Sasaki, K., Minamitani, H. and Suzuki, K. : Anal. Chim. Acta., **342**(1997), 31
- 51) Zhang, X. C., Ma, X. F., Jin, Y., Lu, T.-M., Boden, E. P., Phelp, P. D., Stewart, K. R. and Yakymshyn, C. P. : Appl. Phys. Lett. **61**-28(1992), 3080
- 52) Kawano, T., Irida, K., Nogimori, W. and Naruse, Y. : Tech. Dig. of Int. Conf. Opt. MEMS and Their Appl., Nara, IEEE, (1997), 259

著者紹介



各務学 Manabu Kagami

生年：1959年。
 所属：光応用研究室。
 分野：パッシブ光回路部品の開発。
 学会等：応用物理学会，電子情報通信学会，米国光学会（OSA）会員。



渡辺修 Osamu Watanabe

生年：1956年。
 所属：光材料研究室。
 分野：有機光材料の開発。
 学会等：応用物理学会，日本化学会，高分子学会会員。
 工学博士。