



微小光学技術の現状と将来

田 中 俊 一

東京大学工学部物理工学教室 〒113 東京都文京区本郷 7-3-1

(1986年11月26日受理)

Recent and Future Trends of Micro-Optics

Shun-ichi TANAKA

Department of Applied Physics, Faculty of Engineering, University of Tokyo,
7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

1. ま え が き

オプトエレクトロニクスの最近の発展には目をみはるものがある。この進歩を支えているのはいうまでもなく材料、素子、システムなどの個別技術とそれらを総合する技術である。これらのなかで、微小光学技術も大きな役割を荷っており、これには半導体技術の発展がその背景にある。オプトエレクトロニクスの主要部品である光源、検出器を取り上げてみても、タングステン電球、スペクトル光源、ガスレーザーなどが発光ダイオード、半導体レーザーに置き換えられ、また光電管、光電池などが半導体検出器に置き換えられたことに伴って、システム構成上他の光学素子にも微小化の要求が強まった。半導体光源、検出器と光ファイバーを用いる光通信が微小光学素子の急速な発展を促したことはよく知られている。微小化の流れは個別素子の小型化へ、さらに安定性、調整不要、高性能化を期待して複数素子の一体化へ、またさらに小型化、複合化、量産性を旨して導波路化へと進んでいる。

本稿では、この流れに沿って、まず各種微小光学素子(光源、検出器は除く)について概観し、その後でいくつかの応用例について紹介する。

2. 微小光学素子

2.1 レンズ

レンズは微小光学素子のなかで、もっとも広く用いられているものの一つで、1) 透明体の屈折端面での光の屈折を利用するもの、2) 内部の屈折率分布による光の

屈折を利用するもの、3) 周期的構造による光の回折を利用するものなどに分けられる。

1)の微小光学レンズに関連する話題は、複雑な研削、研磨工程を不要にするモールド法、プレス法による非球面レンズである。非球面を用いると、在来の複数個の球面レンズで構成される複合レンズの枚数を減らし、しかも明るく収差の少ないレンズを作ることが可能で、最初の実用化されたプレス加工の非球面ガラスレンズは、1982年コダック社のディスクカメラに組み込まれた低融点ガラスを用いるものであった。最近、爆発的な需要に応えてコンパクトディスク用レンズに耐環境性の問題を克服してまず単体で大開口数、低収差の非球面プラスチックレンズ¹⁾が、ついで非球面ガラスレンズが実用化された。なお球面レンズの表面に薄くプラスチックをかぶせた非球面レンズの作製も試みられている²⁾。

次数数は一つ減り1次元レンズになるが、平面光導波路上に厚さまたは屈折率を変化させて作った1)のタイプのレンズもいくつか報告されている³⁻⁵⁾。

2)の屈折率分布を利用するレンズとして現在もっとも広く用いられているのは、光軸に垂直な面内で放射状に屈折率分布をもつロッドレンズである⁶⁾。メリジオナル面内で正弦波状の光路をとるロッドレンズの屈折率分布は、ロッドの半径方向の座標を r としたとき

$$n^2 = \{1 - (gr)^2 + h_4(gr)^4 + h_6(gr)^6 + \dots\} n_0^2 \quad (1)$$

で与えられる。ここで n_0 (光軸上の屈折率)、 g, h_4, h_6, \dots は定数である。ふつう gr は1より十分小さいので

$$n = \left\{1 - \frac{1}{2}(gr)^2\right\} n_0 \quad (2)$$

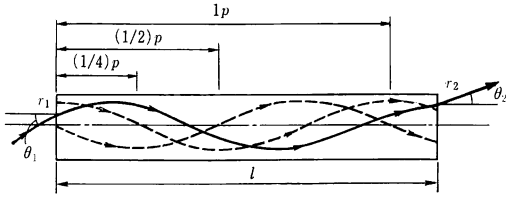


図1 屈折率分布型ロッドレンズ

と近似される。近軸領域で考え、空気中に置かれた長さ l のこのレンズの入射端面の光軸 (中心軸) から r_1 の位置に角度 θ_1 でメリジオナル光線が入射したとき、出射端面を光軸から r_2 , 角度 θ_2 で出る光線は、光線行列⁷⁾を使って

$$\begin{pmatrix} r_2 \\ \theta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(gl) & (1/n_0g) \sin(gl) \\ -n_0g \sin(gl) & \cos(gl) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_1 \\ \theta_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

で表わされ、光線はレンズ内で図1のように正弦波状に蛇行して進む。蛇行の周期 p は

$$p = 2\pi/g \quad (4)$$

このレンズの特徴は、端面が平面なので他の素子と密着結合できること、単一レンズで倍率が +1 の結像系が得られること、 l が $(1/2)p$ や $(1/4)p$ のものは、図1でわかるように、細い光線束の r, θ 変換素子として使用できることである。長さ l のロッドレンズの焦点距離 f は

$$f = (1/n_0g) \sin(gl) \quad (5)$$

で与えられ、 l を変えると、 $1/n_0g$ 以上の任意の焦点距離のレンズが得られる。収差補正のため、(1)式の h_a, h_b に適当な値を選んだり⁸⁾、出射端面を平面から球面に置き換えること⁹⁾が試みられている。

屈折率分布を与える方向が上記のロッドレンズでは光の進行方向に垂直であるが、他の方向のものもいろいろ考えられている。平板マイクロレンズは入射端面 (平面) 上の1点を中心に等屈折率面が半球状のレンズで、このレンズを向い合せれば球状のものも得られる¹⁰⁾。平板マイクロレンズの特徴の一つは2次元アレイ状のものが容易に作れることである。

屈折率分布の作製法はいろいろあるが、ガラスが素材のものでは溶融塩中から試料に所要のイオンを注入するのに熱拡散による方法¹¹⁾、電界による方法¹²⁾が多く用いられる。またプラスチックが素材のものでは拡散重合法、光共重合法など¹³⁾が用いられる。

分布屈折率型ロッドレンズの標準品の仕様は、直径が1~2mm, 開口数 (NA) が0.4~0.6, l が $0.15p \sim 0.29p$ 程度で、半球状の分布屈折率平板レンズ¹⁰⁾では直径1mm, 焦点距離2mm, NA 0.2~0.3程度のものが得られている。

平面導波路化した2)に属するレンズには、導波層の厚さを連続的に変えるなどの方法で屈折率分布を与えたモードインデックスレンズがある。その代表はルネブルグレンズで、回折限界に近い特性のものが得られている³⁾。

3)はフレネルのゾーンプレートを発展させたもので、平面波と球面波を用いホログラフィックに作られたものがまず出た。しかしこのタイプの平面、位相型では、回折効率の最大値が34%であるので、最近では体積型にしたり、リング状のゾーンをブレース (鋸歯状) にし、いわゆるキノフォーム¹⁴⁾型にして高効率化を図ったものが多く用いられている。現在これらはフレネルレンズと呼ばれている*1。ホログラフィックなもの^{15,16)}、電子線描画によるもの¹⁷⁻¹⁹⁾、精密研削した金属原盤にプラスチックをプレス加工したもの²⁰⁾などがあり、リングの形も円状のもののほか、楕円状のもの¹⁹⁾もある。

平面導波路でも1次元化された同様のフレネル、ブラッグレンズが作られている³⁾。

1)~3)に含まれないレンズに平面光導波路用のジオデシックレンズがある³⁾。これは元々はマイクロ波用に考えられたもので、フェルマの原理に従って曲面の測地線に沿う光の伝播によって集光するものである。製作が必ずしも容易でなく、大量生産には向かないが、導波路レンズのなかでは、もっとも効率のよいレンズの一つである。

2.2 反射鏡, 半透鏡 (ビームスプリッター)

在来の反射鏡, ビームスプリッターを小型化したものが用いられる。平面光導波路用の反射鏡には全反射

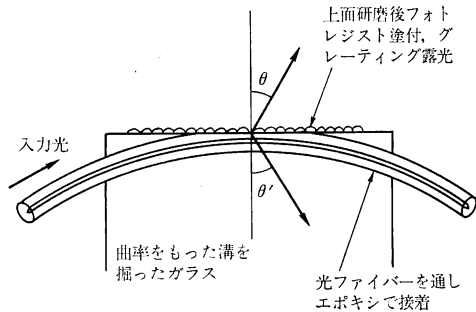
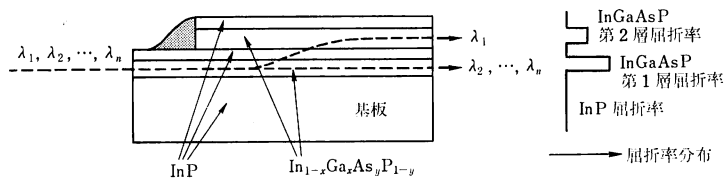


図2 グレーティングファイバーカプラ²⁴⁾

*1 元々のフレネルレンズは灯台やオーバーヘッドプロジェクターに用いられているもので、レンズ厚を減らすため考案された。ふつうインコヒーレント光で用いられ、幾何光学で取り扱え、各リングからの光は強度で加え合わされて集光する。これに対してここで述べるフレネルレンズは、ふつうコヒーレント光で使用され、波動光学的に取り扱われ、位相もそろって集光する。

図3 方向性結合器型波長フィルタ²⁶⁾

型^{21,22)}が、ビームスプリッターにはグレーティングがふつう用いられる^{21,23)}。光通信用の分岐結合器も一種のビームスプリッターとして作用するが、これについては後述する。

2.3 波長選択素子

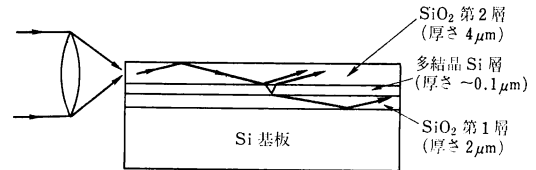
従来の回折格子(グレーティング)、プリズムや干渉フィルタが特定波長の光を取り出すのに用いられる。光ファイバー用の分光素子に図2に示すものがある²⁴⁾。原理は平面導波路用の格子結合器と同じで、光ファイバーを導波する光は、波長によって異なる θ (および θ')の方向に射出する。平面光導波路用としてはプリズムも考えられるが、多く用いられるのはグレーティングである^{21,23,25)}。

最近 III-V 族化合物半導体平面光導波路を用いる新しい原理の波長フィルタの報告がでた。その一つは図3に示すように、厚さ方向に配置した方向性結合器の結合の波長依存性を利用して分光を行なうものである²⁶⁾。もう一つはグレーティング構造をもつ薄膜導波路の中央部分に厚さが薄い平坦部分を設け、そこで希望の透過波長の光に対し $\pi/2$ の位相遅れを与えるものである。中央部を除く前後のグレーティング部分は、その周期と実効屈折率で決まる波長近傍で高い反射を示すが、この二つは中央の位相遅れ部分により厳密にその波長に対してだけ往復で π 位相がずれて反射が非常に小さくなる。 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ 用のもので、半値幅約 30 \AA の不透過帯(高反射率を示す波長帯)の中央に半値幅 1 \AA のシャープな透過帯をもつフィルタを得ている²⁷⁾。

なお GaAs, InP などの III-V 族化合物半導体を用いる平面光導波路の一般的な利点は、発光素子や受光素子をモノリシックに集積できることである。

2.4 偏光子

小型の偏光プリズム、偏光板、多層膜偏光フィルタなどが用いられる。光ファイバー型には偏波(偏光)保持ファイバーや、光ファイバーの側面をコア近傍まで研磨して適当な方位の複屈折板を圧着したり²⁸⁾、金属を蒸着したりして²⁹⁾、特定モードの光だけが低損失で導波するようにしたものが、また平面導波路型にも同様の原理

図4 導波路偏光子³¹⁾

のもの、その他がある^{21,30)}。

Duguay らは Si 基板上に図4に示す三層構造を作り、SiO₂ 第2層を導波層とし、モード閉込めの大きい0次モード導波光が上部境界層では全反射、下部境界層では厚さを制御した多結晶 Si 層、SiO₂ 第1層それぞれの干渉効果で最大反射率を示すようにした。このとき伝播損失は TE 波について 0.4 dB/cm, TM 波については多結晶 Si 層との境界でブルースター角に近い反射をするため 60 dB/cm 以上になり、良質な偏光子として作用した³¹⁾。

なお石英系の平面導波路の一般的な利点は、高度に発達した LSI 技術が利用できること、光ファイバーとの整合性がよいこと、Si 系の検出器がモノリシックに集積できることである。

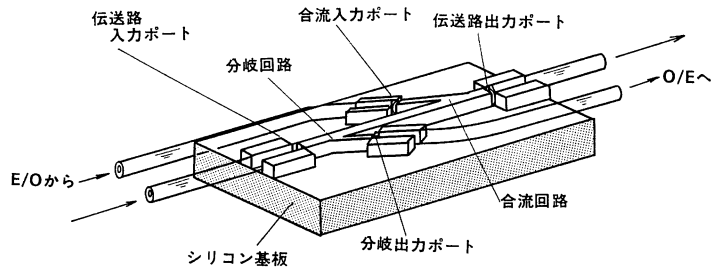
平面導波路用では、TE-TM モード変換素子³²⁻³⁴⁾も一種の偏光子として作用する。

3. 光通信への応用

現在微小光学素子をもっとも多く利用されているのは光通信の分野である。その例のいくつかを述べる。

3.1 発光素子, 光ファイバー結合回路^{35,36)}

発光素子から出射された光を効率よく光ファイバーと結合するためファイバーの先端を加工し、半球状にしたり、円錐レンズ状にしたものなどがあり、半導体レーザー、多モード光ファイバーの組合せで 1 dB の結合損失が達成されている。しかしこのタイプは一般に設置許容限度が厳しいので、ファイバーにはそのままのものを用い、第1のレンズ(球レンズが多い)で発光素子からの光の放射角を低減し、第2のレンズ(群)で光ファイバーに集光する構成のものが多く用いられる。半導体レー

図5 導波路型光アクセサリ³⁹⁾

ザーと多モード光ファイバー³⁷⁾および単一モード光ファイバー³⁸⁾の組合せで、それぞれ 2 dB, 3 dB 程度までの結合損失が達成されているが、収差を改善した大口径ロッドレンズを使用し単一モードファイバー用で結合損失 1.0 dB の報告もある³⁶⁾。発光素子と平面導波路との高効率結合も今後検討が進むであろう。

3.2 分岐結合器^{35, 36)}

分岐結合器は一つの光を複数に分割したり、複数の光を混合して一つにする素子である。基本的な 4 ポートの素子には、バルク型のものに半透鏡と 1/4 ピッチのロッドレンズを組み合わせたもの、光ファイバー型のものに 2 本のファイバーのコア部を熔着したり、コア部を近接し方向性結合器型にしたもの、平面導波路型のものに 2 本のチャンネル導波路を交差した X 分岐や方向性結合器型のものなどがある。

光ローカルエリアネットワーク (LAN) では入出力ポート数の多いスターカプラーや伝送路に光信号を送受するアクセサリが必要で、前者には 100×100 の平面導波路型³⁹⁾ や光ファイバー型⁴⁰⁾ などが、後者の平面導波路型には図 5 に示すような石英系や多成分ガラス系のものが報告されている³⁹⁾。また平面導波路と光ファイバーを精度よく高効率で接合するため、溝を用いたり⁴¹⁾、導波路 (コア) の形状、屈折率分布を工夫したりすること⁴²⁾が行なわれている。

3.3 分波合波器^{35, 36, 39)}

加入者系光システムの光波長多重伝送に用いられる素子で、波長の異なる複数の光に分けたり、この複数の光を一つにまとめるのに用いられる。分波には干渉フィルターなど波長選択フィルターによるもの、グレーティングなどの分散素子によるもの⁴³⁾、さらに音響光学素子を組み合わせたもの⁴⁴⁾ などが、分散素子を用いるものは多チャンネル用である。波長選択性が不要でない合波には、3.2 項の結合器も用いられる。平面導波路型にはグレーティングを用いるものや、図 5 と類似の構造の石英系導波路に干渉フィルターを挿入したものが³⁹⁾。

チャンネル間隔を GHz オーダーまで狭めた光周波数多重伝送方式用の分波合波器に光ファイバーで構成したマッハ・ツェンダー型のものがある。アームの長さの差が 1 cm、ファイバーの屈折率が 1.47 のとき、チャンネル間隔は 10.2 GHz になる³⁹⁾。

3.4 光スイッチ、変調器^{32, 35, 36, 39)}

光スイッチは光伝送路や発受光素子の障害時の切換えや将来の光交換に用いられ、機械式のものや電気光学、磁気光学、音響光学効果などを使用するものがある。光交換を目指すものに Ti 拡散 LiNbO₃ 平面導波路上に多数の方向性結合器型スイッチを配列したものが考えられており、8×8 までのマトリックススイッチが報告されている⁴⁵⁾。

LiNbO₃ 平面光導波路の一般的な利点は、Ti 拡散、プロトン交換などの方法で低損失の導波路が容易に得られること、大きな電気光学効果、音響光学効果が利用できることである。

最近 InP 系化合物半導体導波路を用いる作用長の短い (1 mm)、キャリアー注入による屈折率変化を利用する全反射型スイッチが発表された⁴⁶⁾。

コヒーレント光通信に用いられる半導体レーザーの外部変調素子として LiNbO₃ 導波路を用いる進行波型のもがいろいろ研究され⁴⁷⁾、15 GHz までの帯域幅が得られている⁴⁸⁾。また集積化受信デバイスとして図 6 のものが提案されている⁴⁹⁾。

3.5 光非相反回路^{35, 36)}

A, B の順方向には光を伝送するが逆方向には伝送しないアイソレーター、A, B, C, … の順方向には光を伝送するが、これ以外の方向には伝送しないサーキュレーターがあり、反射光を遮断する場合、その他に用いられる。基本的には磁場の中に置かれたファラデー素子 (1 μm 帯では Y₃Fe₅O₁₂(YIG), Gd₃Fe₅O₁₂ などを使用) と偏光子、検光子の組合せから成り、バルク型の各種のもが実用になっている。またファイバー用⁵⁰⁻⁵²⁾や平面導波路型^{53, 54)}についても研究が進められている。

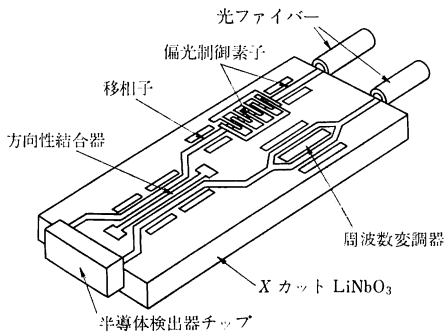


図6 コヒーレント光通信集積化受信デバイス⁴⁹⁾

4. 光情報処理への応用

4.1 情報処理機器

微小光学レンズの情報処理機器への応用例に複写機やファクシミリがある。屈折率分布型ロッドレンズでは前にも述べたように単体レンズで倍率+1の系ができるので、1列ないし2列に並べたレンズアレイを列に垂直方向に相対移動すれば、密着に近い状態で2次元画像を読み取ることが可能で、複写機に実用されている⁵⁵⁾。またロッドレンズの代わりに図7に示すようなモールド法で作られたレンズアレイと屋根型反射鏡アレイを組み合わせた倍率+1の系も報告されている⁵⁶⁾。これらのレンズアレイの特徴は、1点の結像に二つまたは三つのレンズを用い、一様な明るさで、しかも高解像力 (MTF 0.8で5本/mm程度)の像を得ていることである。

光ディスク用の光学ヘッドにはビームスプリッター、コリメーターレンズ、対物レンズ、さらに場合によってはグレーティング、偏光子、1/4波長板など多くの微小光学部品が用いられる。コンパクトディスクのピット長は0.9~3.3μm、トラック間隔は1.6μmであるので、ピットを正確に読み取るためには回折限界に近い、明るいレンズを必要とする。現在、波面収差がMaréchalの許容量0.07λ以下、開口数が0.45、焦点距離が4.5mm、

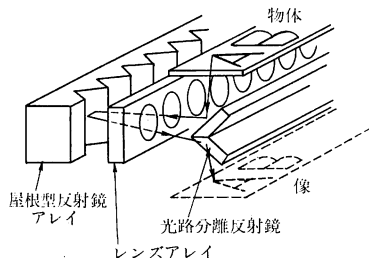


図7 屋根型反射鏡アレイとレンズアレイを組み合わせた系による結像⁵⁶⁾

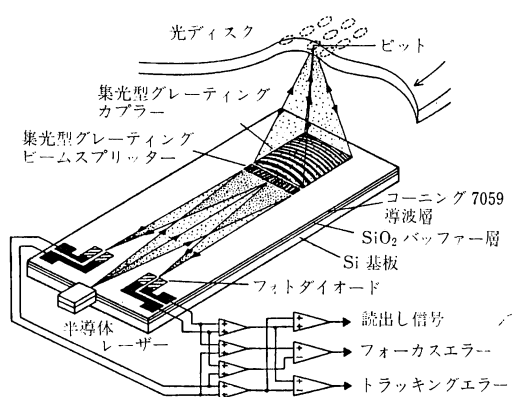


図8 集積光学型光ディスクピックアップ⁵⁷⁾

作動距離が1.9mmの両面非球面のプラスチック単体レンズが多用されている¹⁾。光学ヘッドを光集積回路化した図8に示すものも試作されている⁵⁷⁾。

4.2 光演算

光を用いる信号処理、数値演算の特徴は、よく知られているように、電磁誘導を受けず、相互干渉(クロストーク)も少なく、高速で、しかも並列処理・結像が可能なことである。微小光学素子を用いる信号処理で各国で積極的に研究が進められたものに、平面導波路型のラジオ波周波数分析器があった⁵⁸⁾。弾性表面波の形で伝播する信号のスペクトルをレンズのフーリエ変換作用を利用して測定するものである。弾性表面波を使うものには、二つの信号の各種相関器(コリレーター、コンボルバー)も報告されている⁵⁹⁾。

音響光学効果だけでなく、電気光学効果も光演算によく利用される。図9(a)に示す平面導波路光変調器では、導波路の結晶方位、光の伝播方向を適当にとると、電極に電圧 V_a, V_b を加えたとき、導波光に生ずる位相変化 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda)\Delta Nl = (2\pi/\lambda)k(V_a - V_b)l \quad (6)$$

で与えられる。ここで ΔN は導波路の実効屈折率の変化量、 k は電気光学係数に比例する定数である。したがってこの素子は、電圧差 $V_a - V_b$ ($V_b = 0$ のときは V_a)に比例する位相遅れを与える移相子として作用する。またこのような光変調器を二つのアーム1, 2に入れたマッハ・ツェンダー型干渉計では、両アームを伝播する光の強度が等しいとき出力 I は、2光束干渉の式を使って

$$I \propto \cos^2 \left(\frac{\Delta\phi_1 - \Delta\phi_2}{2} \right) = \cos^2 \left[\frac{\pi}{\lambda} k \{ (V_{a1} - V_{b1})l_1 - (V_{a2} - V_{b2})l_2 \} \right] \quad (7)$$

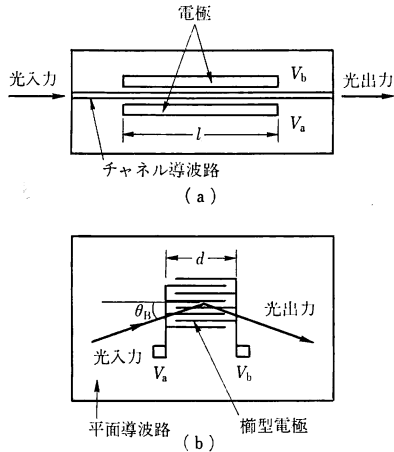


図 9 電気光学効果を用いる演算素子⁶⁰⁾

いま $\Delta\varphi_2 = \pm\pi$ になるように $V_{a2} - V_{b2}$ を選べば

$$I \propto \sin^2(\Delta\varphi_1/2) \quad (8)$$

とくに $\Delta\varphi_1$ が十分小さければ

$$I \propto \Delta\varphi_1^2 \propto (V_{a1} - V_{b1})^2 \quad (9)$$

この場合は電圧差の 2 乗に比例する出力を干渉計から取り出すことができる。

図 9 (b) の集積光学型空間変調器 (integrated optical spatial light modulator, 略して IOSLM)⁶⁰⁾ では、導波路の結晶方位を適当にとったとき、楕型電極に加える電圧 V_a, V_b によって生ずる位相格子の実効屈折率変化 ΔN は

$$\Delta N = k(V_a - V_b) \quad (10)$$

で与えられる。ここで k は電気光学係数に比例する定数である。この格子に入射する光の強度を I_0 とすれば、ブラッグ角 θ_B で回折する光の強度 I_1 は

$$I_1 = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi \Delta N d}{\lambda \cos \theta_B}\right) = I_0 \sin^2\left\{\frac{\pi d}{\lambda \cos \theta_B} k(V_a - V_b)\right\} \quad (11)$$

$\pi dk(V_a - V_b)/\lambda \cos \theta_B$ の $\pi/4$ 近傍を考えれば、このときの I_1 の変化 ΔI_1 は

$$\Delta I_1 \propto \Delta(V_a - V_b) \quad (12)$$

すなわち回折光強度の変化量は $\Delta(V_a - V_b)$ ($\Delta V_b = 0$ のときは ΔV_a) に比例する。

(9)式を利用するものに 16 組のマッハ・ツェンダー型干渉計を LiNbO_3 導波路上に集積した 16 チャンネルプロセッサがある⁶¹⁾。これは、たとえば人工衛星で地球上の海洋の汚染を海面からの反射光のスペクトル分布の変化で知るプロセッサとして用いられ、16 の異なった波長についての海面の反射率に比例する電圧 $V_{a,i}$ ($i = 1 \sim 16$) を汚染のない場合の基準の反射率に比例する

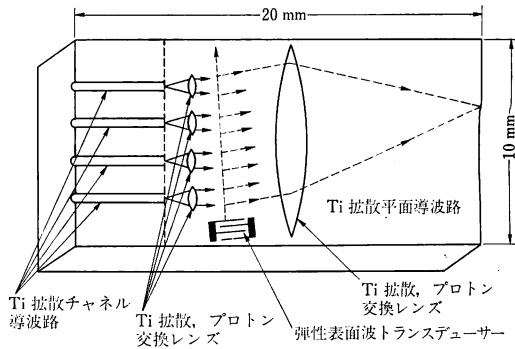


図 10 LiNbO_3 集積型音響光学ブラッグ変調モジュール⁴⁾

電圧 $V_{b,i}$ と比較し、 $I \propto \sum (V_{a,i} - V_{b,i})^2$ がゼロでなければ汚染ありと判定する。このほか、弾性表面波トランスデューサーと IOSLM を導波路上に配置したデジタル相関器も提案されている⁶⁰⁾。

Y 結合器を用いる“和”，(12)式を利用する“差”，杉綾型に IOSLM を二つ並べて配置し，(12)式 (ただし $\Delta V_b = 0$) を 2 回適用する“積”の基本演算のほか，各種の演算を平面導波路で実現する提案がある⁶²⁾。Tsai らは図 10 に示すような光集積回路を用い，チャンネル導波路に加える信号と弾性表面波トランスデューサーに加える信号の積を表面波格子による光の回折で，それらの和をレンズの集光作用でとり，行列とベクトルの積の演算を行なった⁴⁾。X 分岐の交点に配置した IOSLM と移相子を組合せ使用し，座標変換に相当する行列演算を行なう報告もある⁶³⁾。

これまで述べたものを含めて，光コンピューター⁶⁴⁾を志向する研究が最近活発に行なわれている。そのなかには平面導波路干渉型変調器を用いる高速の A-D 変換器⁶⁵⁾ や干渉型変調器，IOSLM を用いる D-A 変換器^{66,67)} がある。光コンピューターの演算に適した方式である光剰余演算⁶⁸⁾には，方向性結合器型スイッチ⁶⁹⁾ や全反射型スイッチ⁷⁰⁾を集積したものが提案されている。また光ストリック演算⁶⁸⁾には，上で述べた図 10 の配置が適用できる⁴⁾。

閾値型の非線形入出力特性をもつ素子が論理演算には必要で，光双安定素子はその代表の一つである。光双安定素子にはいろいろなタイプのものが考えられているが^{71,72)}ここでは Gibbs らが研究を進めている励起子吸収の飽和に基づく屈折率変化を利用する GaAs エタロン双安定素子についてだけ紹介する。元々の構造は図 11 に示すようなもので，GaAs の励起子吸収線 (波長 818 nm) に接近した波長の光を入射して，120 K 以下の低

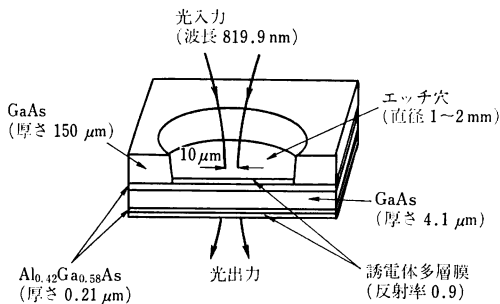


図 11 GaAs エタロン双安定素子⁷⁴⁾

温で双安定ヒステリシスを観測した⁷³⁾。その後バルクの GaAs を GaAs と AlGaAs の超格子構造で置き換えて室温動作が可能になった⁷⁴⁾。

GaAs エタロンは論理ゲートとしても用いられる。図 12 (a) に原理を示す配置を考える。入力が入らないときのエタロンの透過率 T の波長 λ 依存性が (b) の 0 の曲線で、入力パルスが一つまたは二つ入ると屈折率が減少して透過率曲線が (b) の 1 または 2 のように移動する。論理ゲート動作をみるプローブパルスの波長を (b) 図の a, b, c, d, e の位置に選べば、(a) の回路はそれぞれ NOR, NAND, XOR, OR, AND ゲートとして動作することが容易に理解される⁷⁵⁾。実際に図 11 の上下の AlGaAs 層を取り除いた GaAs 層の厚さ $0.5 \mu\text{m}$ の素子で、スポットサイズ $10 \mu\text{m}$ 、入力エネルギー 16 pJ の光パルスを用い、スイッチ時間 1 ps 、回復時間 150 ps の NOR ゲート動作を確認している⁷⁶⁾。この GaAs エタロンを 2 次元アレイ状にすれば高速の空

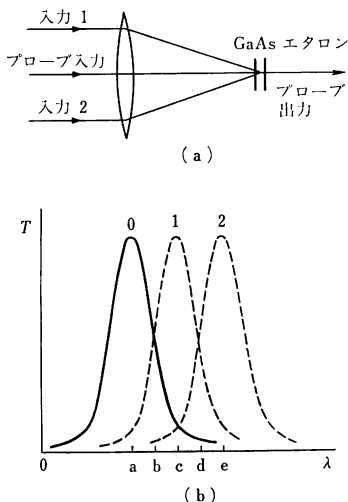


図 12 GaAs エタロンを用いる論理ゲート⁷⁷⁾

間変調器になり、実際に 2×4 のアレイで実験が行なわれている⁷⁷⁾。なお LiNbO_3 の平面導波路を用いた AND, XOR ゲートの報告もある⁷⁸⁾。

5. 光計測への応用

光計測、とくに光ファイバー計測にはたくさんの微小光学素子が用いられている。光ファイバー計測については、1983年ロンドンの第1回から、1986年東京の第4回までの光ファイバーセンサーの国際会議の Technical Digest が出版されており、また最近いくつかの解説論文⁷⁹⁻⁸⁴⁾も出ているので、ここでは平面導波路を用いるものだけについて紹介する⁸⁵⁾。この関係の報告では、これまでのところほとんどすべて LiNbO_3 導波路が用いられている。対象別に分けると、導波路上に二つのアームの長さが異なるマッハ・ツェンダー型またはマイケルソン型⁸⁶⁾干渉計を配置し温度による光路差の変化を測定する温度センサー、マイケルソン型干渉計のアームの一部に圧力を加えたとき生ずる光弾性効果を利用する圧力センサー、マッハ・ツェンダー型干渉計のアームの一部につけた黒体からの熱放射損失が湿度によって異なることを利用する湿度センサー⁸⁶⁾、導波路上に WO_3 および Pt 層をつけ水素吸着による H_2WO_3 への変化に伴うエレクトロクロミック効果による導波光の吸収変化を測定する H_2 ガスセンサー、ジメタクリレート系低重合体のアルゴンレーザー照射による光重合でスライドガラス上に作られたストリップ光導波路の透過率がトルエンやアンモニアの存在によって変化することを利用するガスセンサー⁸⁷⁾、波面上の各点の位相差を微小な間隔をもった多数のマッハ・ツェンダー型干渉計で、また振幅をチャンネル光導波路で測定する波面計測センサー⁸⁸⁾などがある⁸⁵⁾。

光ファイバーセンサーシステムの構成要素の一部を平面導波路化、さらには集積化したものも考えられている。マッハ・ツェンダー型光ファイバー干渉計の分岐、結合器を電気光学的な移相子とともに集積化したもの⁸⁹⁾、ファイバージャイロの周波数変調器として弾性表面波素子とジオデシックレンズを組み合わせたもの⁹⁰⁾、ファイバーレーザードップラー速度計の分岐結合器、周波数変調器その他を集積したものなどがある⁸⁵⁾。

光ファイバーセンサーでは最近共振器型のものが注目されているが⁷⁹⁾、これを平面導波路化したものに図 13 のようなキャビティ型⁹¹⁾とリング型⁹²⁾がある。高フィネスの干渉出力が得られ、また被測定量を光導波路の物理量に変換するトランスデューサーの配置が楽になる

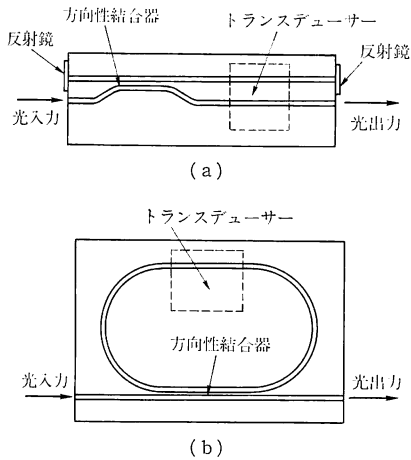


図 13 共振器型光平面導波路センサー⁹¹⁾

ことを特徴としており、キャビティー型で温度測定の例が報告されている⁹¹⁾。

6. 微小光学技術の将来

まえがきでも述べたように、光学素子の微小化の流れは個別素子の小型化、複数素子の一体化、さらに導波路化へと進んでいる。現在実用化段階にあるのは、大体複数素子の一体化までで、導波路化へ向けて着実に研究が進められている。しかし、今後実際に導波路化素子、さらに集積回路が実用化されるためには、一般論としてなお一つのブレークスルーが必要のように思われる。

分野は違うが、1948年 Gabor によって発明されたホログラフィーは、1962~64年 Leith, Upatnieks による新しい原理の2光束法とレーザーの採用により画期的な発展をみせ、その後の発表論文数は、6,000~7,000に達し、今でも1日か2日に1篇の割合で世界のどこかで論文が出版されているほどである。このように多くの研究者の興味を惹くテーマであるものの、ホログラフィーで実用化されたものは意外に少なく、広告・芸術などの分野で用いられるディスプレイを除けば、ホログラフィック干渉法とホログラフィック光学素子程度である。これらが実用化された理由は、他の方法ではほとんど不可能な測定が、また素子製作が可能になったからである。

この例でもわかるように、導波路化が単なる代替にすぎないならば、よほどの高性能化、低価格化、軽量化、多量生産性などが図られない限り、実用化は難しいと思われる。新しいアイデアによって、在来素子では実現できなかったような機能をもつ素子、回路、さらにはシステムの開発を期待する。

7. あとがき

微小光学技術について総合的に解説した。なにぶんにも広範囲なので、不適切な選択に基づく記述や、重要事項の見落としがあることを恐れている。なお参考文献には、新しい論文を除いて、できるだけ解説的な論文をあげ、各項目の詳しい内容はそれらに引用された文献を見ていただくことにした。この結果、オリジナルな研究の著者名が引用されない例も増えたが、これについてはご容赦いただきたい。また光学懇話会の微小光学研究グループでは、機関誌として Microoptics News を年4回発行しているので、いくつかは引用文献にあげたが、これも参考にさせていただければ幸いである。

1987年10月、微小光学研究グループが運営に当たり、応用物理学会主催で第1回微小光学会議(1st Microoptics Conference, MOC '87, 論文発表は英語)が東京で開催されることになっている。この分野に関心のある多くの方々が、論文投稿、また出席されることを期待している。

文 献

- 1) 小島 忠: "CD 用非球面プラスチックレンズの開発と評価", Microopt. News, **3** (1985) 20-27.
- 2) J. J. M. Braat, A. Smid and M. M. B. Wijnaker: "Design and production technology of replicated aspheric objective lenses for optical disk systems," Appl. Opt., **24** (1985) 1853-1855.
- 3) 波多腰玄一: "導波路形レンズ", 光学, **11** (1982) 338-345.
- 4) D. Y. Zang and C. S. Tsai: "Titanium-indiffused proton-exchanged waveguide lenses in LiNbO₃ for optical information processing," Appl. Opt., **25** (1986) 2264-2271.
- 5) P. J. R. Laybourn and G. C. Righini: "New design of thin-film lens," Electron. Lett., **22** (1986) 343-345.
- 6) 西沢敏一: "屈折率分布型レンズの光学", レーザー研究, **8** (1980) 748-758.
- 7) H. Kogelnik and T. Li: "Laser beams and resonators," Proc. IEEE, **54** (1966) 1312-1329.
- 8) T. Sakamoto: "Estimation of the fourth-order index coefficient of GRIN-rod lenses," Appl. Opt., **25** (1986) 2613-2619.
- 9) 西 壽巳, 市川裕之, 遠山 実: "光ディスク用屈折率分布型対物レンズ", 光学, **15** (1986) 303-308.
- 10) 伊賀健一: "微小光学", 応用物理, **55** (1986) 661-669.
- 11) 北野一郎: "屈折率分布型レンズの製造法", 光学, **10** (1981) 96-104.
- 12) M. Oikawa, K. Iga and T. Sanada: "Distributed-index planar microlens array prepared from deep electromigration," Electron. Lett., **17** (1981) 452-453.
- 13) 大塚保治: "屈折率分布型有機材料", 応用物理, **54**(1985) 123-130.
- 14) J. A. Jordan, Jr., P. M. Hirsch, L. B. Lesem and D. L. Van Rooy: "Kinoform lenses," Appl. Opt., **9** (1970)

- 1883-1887.
- 15) 池田弘之, 加藤雅之, 長谷川信也, 山岸文雄, 稲垣雄史: “半導体レーザ用ホログラムレンズ”, *Microopt. News*, **3** (1985) 272-277.
 - 16) 河合 滋, 窪田恵一, 西田信夫: “ホログラム画像スキャナ用ホログラムレンズ”, *Microopt. News*, **3** (1985) 278-284.
 - 17) 塩野照弘, 瀬恒謙太郎, 山崎 攻: “電子ビーム描画作製によるマイクロフレネルレンズ”, *Microopt. News*, **3** (1985) 285-291.
 - 18) 田草川幸次, 二里木孝, 末光尚志, 西尾 隆, 鈴木進一: “マイクロフレネルレンズによるCD用対物レンズ”, *Microopt. News*, **4** (1986) 98-102.
 - 19) 塩野照弘, 瀬恒謙太郎, 山崎 攻, 和住清孝: “楕円形マイクロフレネルレンズの集光特性”, *光学*, **15** (1986) 324.
 - 20) 森 一成, 高橋俊介, 樋口義則, 後藤顕也: “高回折効率グレーティングレンズ”, *Microopt. News*, **3** (1985) 292-298.
 - 21) 田中俊一: “平面光導波路用光学素子”, 薄膜ハンドブック, 日本学術振興会薄膜委員会編(オーム社, 東京, 1983) pp. 830-837.
 - 22) P. Buckmann and H. Kaufmann: “GaAs single-mode rib waveguides with reactive ion-etched totally reflecting corner mirrors,” *J. Lightwave Technol.*, **LT-3** (1985) 785-788.
 - 23) T. Suhara and H. Nishihara: “Integrated optics components and devices using periodic structures,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22** (1986) 845-867.
 - 24) P. St. J. Russel and R. Ulrich: “Grating-fiber couplers as a high-resolution spectrometer,” *Opt. Lett.*, **10** (1985) 291-293.
 - 25) R. K. Tien and R. J. Capik: “Use of concentric-arc grating as a thin-film spectrograph for guided waves,” *Appl. Phys. Lett.*, **37** (1980) 524-526.
 - 26) B. Broberg, B.S. Lindgren, M.G. Öberg and H. Jiang: “A novel integrated optics waveguide filter in InGaAsP-InP,” *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 196-203.
 - 27) R. C. Alferness, C. H. Joyner, M. D. Divino, M. J. R. Martyak and L. L. Buhl: “Narrowband grating resonator filters in InGaAsP/InP waveguides,” *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1986) 125-127.
 - 28) R. A. Bergh, H. C. Lefevre and H. J. Shaw: “Single-mode filter-optic polarizer,” *Opt. Lett.*, **5** (1980) 479-481.
 - 29) W. Eickhoff: “In-line fibre-optic polariser,” *Electron. Lett.*, **16** (1980) 762-764.
 - 30) J. Čtyroký and H. -J. Henning: “Thin-film polariser for Ti-LiNbO₃ waveguides at $\lambda=1.3 \mu\text{m}$,” *Electron. Lett.*, **22** (1986) 756-757.
 - 31) M. A. Duguay, Y. Kokubun and T. L. Koch: “Antiresonant reflecting optical waveguides in SiO₂-Si multilayer structures,” *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1986) 13-15.
 - 32) 野田壽一: “光変調・光スイッチ”, 薄膜ハンドブック, 日本学術振興会薄膜委員会編(オーム社, 東京, 1983) pp. 842-848.
 - 33) S. Thaniyavarn: “Wavelength independent, optical damage immune Z-propagation LiNbO₃ waveguide polarization converter,” *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985) 674-677.
 - 34) R. C. Alferness and L. L. Buhl: “Low loss, wavelength tunable waveguide electro-optic polarization controller for $\lambda=1.32 \mu\text{m}$,” *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985) 1137-1139.
 - 35) 杉元重時, 石川 朗, 小林功郎: “屈折率分布型レンズを用いた光通信用デバイス”, *光学*, **10** (1981) 128-134.
 - 36) 石川 朗: “微小光学素子”, オプトエレクトロニクス技術'86 研修会資料 II-9, 光学工業技術協会 (1986).
 - 37) K. Kawano and O. Mitomi: “Coupling characteristics of laser diode to multimode fiber using separate lens methods,” *Appl. Opt.*, **25** (1986) 136-141.
 - 38) K. Kawano, M. Saruwatari and O. Mitomi: “A new confocal combination lens method for a laser-diode module using a single-mode fiber,” *J. Lightwave Technol.*, **LT-3** (1985) 739-745.
 - 39) 小林盛男: “光通信用光部品”, *光学*, **15** (1986) 128-136.
 - 40) S. Ohshima, T. Ito, K. Donuma, H. Sugiyama and Y. Fujii: “Small loss-deviation tapered fiber star coupler for LAN,” *J. Lightwave Technol.*, **LT-3** (1985) 556-560.
 - 41) E. J. Murphy and T. C. Rice: “Self-alignment technique for fiber attachment to guided wave devices,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22** (1986) 928-932.
 - 42) 奥田栄次, 山崎哲也: “平板光導波路”, *光学*, **13** (1984) 49-51.
 - 43) D. J. McCartney, D. B. Payne and S. S. Duncan: “Position-tunable holographic filters in dichromated gelatin for use in single-mode-fiber demultiplexers,” *Opt. Lett.*, **10** (1985) 303-305.
 - 44) T. Kinoshita, K. Sano and E. Yoneda: “Tunable 8-channel wavelength demultiplexer using an acousto-optic light deflector,” *Electron. Lett.*, **22** (1986) 669-670.
 - 45) P. Granstrand, B. Stoltz, L. Thylen, K. Bergvall, W. Döldissen, H. Heinrich and D. Hoffmann: “Strictly nonblocking 8×8 integrated optical switch matrix,” *Electron. Lett.*, **22** (1986) 816-818.
 - 46) S. Sakano, H. Inoue, H. Nakamura, T. Katsuyama and H. Matsumura: “InGaAsP/InP monolithic integrated circuit with lasers and an optical switch,” *Electron. Lett.*, **22** (1986) 594-596.
 - 47) 末田 正: “ピコ秒光スイッチ技術”, 電子通信学会誌, **69** (1986) 141-144.
 - 48) H. Haga, M. Izutsu and T. Sueta: “LiNbO₃ traveling-wave light modulator/switch with an etched groove,” *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-22** (1986) 902-906.
 - 49) W. A. Stallard, A. R. Beaumont and R. C. Booth: “Integrated optic devices for coherent transmission,” *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 852-857.
 - 50) K. Shiraishi, S. Sugaya, K. Baba and S. Kawakami: “Microisolator,” *Appl. Opt.*, **25** (1986) 311-314.
 - 51) K. Okamoto, H. Miyagawa, J. Noda and M. Saruwatari: “Novel optical isolator consisting of a YIG spherical lens and PANDA-fibre polarisers,” *Electron. Lett.*, **21** (1985) 36-38.
 - 52) I. Yokohama, K. Okamoto and J. Noda: “Polarisation-independent optical circulator consisting of two fibre-optic polarising beam splitters and two YIG spherical lenses,” *Electron. Lett.*, **22** (1986) 370-372.
 - 53) T. Mizumoto, K. Oochi, T. Harada and Y. Naito: “Measurement of optical nonreciprocal phase shift in a Bi-substituted Gd₃Fe₅O₁₂ film and application to waveguide-type optical circulator,” *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 347-352.
 - 54) Y. Okamura, H. Inuzuka, T. Kikuchi and S. Yamamoto: “Nonreciprocal propagation in magneto-

- optic YIG rib waveguides," *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 711-714.
- 55) 小椋行夫: "屈折率分布型レンズアレイの複写機への応用", *光学*, **10** (1981) 111-117.
- 56) M. Kawazu and T. Inokuchi: "Imaging device using a roof mirror lens array," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 4300-4306.
- 57) S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "Integrated-optic disk pickup device," *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 913-918.
- 58) 梶原敏明: "光集積フーリエ演算器", *光学*, **14** (1985) 48-50.
- 59) C. S. Tsai: "Guided-wave acoustic Bragg modulators for wide-band integrated optic communications and signal processing," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, **CAS-26** (1979) 1072-1098.
- 60) C. M. Verber: "Integrated-optical approaches to numerical optical processing," *Proc. IEEE*, **72** (1984) 942-953.
- 61) C. M. Verber and R. P. Kenan: "An integrated optical circuit for performing vector subtraction," *SPIE Proc. Vol. 218, Devices and Systems for Optical Signal Processing*, ed. T. C. Strand and A. R. Tanguay, Jr. (Soc. Photo-Opt. Instrum. Eng., Bellingham, 1980) pp. 23-26.
- 62) C. M. Verber: "Integrated optical architectures for matrix multiplication," *Opt. Eng.*, **24** (1985) 19-25.
- 63) M. M. Mirsalehi, T. K. Gaylord and E. I. Verriest: "Integrated-optical Givens rotation device," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 1608-1614.
- 64) T. B. Bell: "Optical computing: a field in flux," *IEEE Spectrum*, **23**, No. 8 (1986) 34-57.
- 65) R. A. Becker, C. E. Woodward, F. J. Leonberger and R. C. Williamson: "Wide-band electrooptic guided-wave analog-to-digital converters," *Proc. IEEE*, **72** (1984) 802-819.
- 66) M. Papuchon, C. Puech and A. Schnapper: "4-bits digitally driven integrated amplitude modulator for data processing," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 142-144.
- 67) C. M. Verber and B. T. Smith: "Integrated-optic digital-analog converter," *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3677-3678.
- 68) 石原 聰: "光コンピューター", *光工学ハンドブック*, 小瀬輝次, 斎藤弘義, 田中俊一, 辻内順平, 波岡 武編 (朝倉書店, 東京, 1986) pp. 255-262.
- 69) A. Tai, I. Cindrich, J. R. Fienup and C. C. Aleksoff: "Optical residue arithmetic computer with programmable computation modules," *Appl. Opt.*, **18** (1979) 2812-2823.
- 70) J. N. Polky and D. D. Miller: "Optical waveguide circuit design of an adaptive filter in the residue number system," *Appl. Opt.*, **21** (1982) 3539-3551.
- 71) P. W. Smith and W. J. Tomlinson: "Bistable optical devices promise subpicosecond switching," *IEEE Spectrum*, **18**, No. 6 (1981) 26-33.
- 72) N. Peyghambarian and H. M. Gibbs: "Optical bistability for optical signal processing and computing," *Opt. Eng.*, **24** (1985) 68-73.
- 73) H. M. Gibbs, S. L. McCall, T. N. C. Venkatesan, A. C. Gossard, A. Passner and W. Wiegmann: "Optical bistability in semiconductors," *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 451-453.
- 74) H. M. Gibbs, S. S. Tarng, J. L. Jewell, D. A. Weinberger and K. Tai: "Room-temperature excitonic optical bistability in a GaAs-GaAlAs superlattice etalon," *Appl. Phys. Lett.*, **41** (1982) 221-222.
- 75) J. L. Jewell, M. C. Rushford and H. M. Gibbs: "Use of a single nonlinear Fabry-Perot etalon as optical logic gates," *Appl. Phys. Lett.*, **44** (1984) 172-174.
- 76) Y. H. Lee, H. M. Gibbs, J. L. Jewell, J. F. Duffy, T. Venkatesan, A. C. Gossard, W. Wiegmann and J. H. English: "Speed and effectiveness of windowless GaAs étalons as optical logic gates," *Appl. Phys. Lett.*, **49** (1986) 486-488.
- 77) J. L. Jewell, Y. H. Lee, J. F. Duffy, A. C. Gossard and W. Wiegmann: "Parallel operation and crosstalk measurements in GaAs étalon optical logic devices," *Appl. Phys. Lett.*, **48** (1986) 1342-1344.
- 78) L. Goldberg and S. H. Lee: "Integrated optical half adder circuit," *Appl. Opt.*, **18** (1979) 2045-2051.
- 79) 今井正明, 大塚喜弘: "光ファイバ干渉計測", *光学*, **13** (1984) 153-162.
- 80) B. E. Jones: "Optical fibre sensors and systems for industry," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **18** (1985) 770-782.
- 81) D. A. Jackson: "Monomode optical fibre interferometers for precision measurement," *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, **18** (1985) 981-1001.
- 82) V. I. Busurin, A. S. Semenov and N. P. Udalov: "Optical and fiber-optic sensors," *Sov. J. Quantum Electron.*, **15** (1985) 595-621.
- 83) 南 茂夫: "光ファイバー化学センサー", *応用物理*, **55** (1986) 56-62.
- 84) 西沢敏一, 芳野俊彦, 稲田浩一, 藤井義正, 大津元一, 大塚喜弘, 春名正光, 西原 浩, 桑原 宏, 吉永 淳, 本田辰篤: "特集光ファイバセンサの基礎と応用", *光学技術コンタクト*, **24** (1986) 183-231.
- 85) 春名正光, 西原 浩: "光 IC センサ", *光学技術コンタクト*, **24** (1986) 212-216.
- 86) M. Izutsu, A. Enokihara and T. Sueta: "Integrated optic temperature and humidity sensors," *J. Lightwave Technol.*, **LT-4** (1986) 833-836.
- 87) J. F. Giuliani, K. H. Kim and J. E. Butler: "Fabrication of an integrated optical waveguide chemical vapor microsensor by photopolymerization of a bifunctional oligomer," *Appl. Phys. Lett.*, **48** (1986) 1311-1313.
- 88) R. H. Rediker, T. A. Lind and F. J. Leonberger: "Integrated optics wave front measurement sensor," *Appl. Phys. Lett.*, **42** (1983) 647-649.
- 89) P.-O. Andersson, A. Persson, L. Thylén and G. Edwall: "Fibre optic interferometer using integrated optics," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 245-246.
- 90) H. Shimizu, R. Ishikawa and K. Kaede: "Integrated optical frequency modulator for fibre-optic gyroscope using frequency modulation method," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 334-335.
- 91) R. R. A. Syms: "Resonant cavity sensor for integrated optics," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-21** (1985) 322-328.
- 92) A. Mahapatra and W. C. Robinson: "Integrated-optic ring resonators made by proton exchange in lithium niobate," *Appl. Opt.*, **24** (1985) 2285-2286.