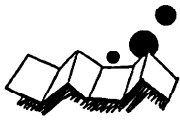


## 解説

## 2. 光の基本素子



### 2.1 光集積回路†

井筒雅之<sup>††</sup> 末田正<sup>††</sup>

#### 1. はじめに

光学材料の一部に、屈折率がまわりに比べてわずかに高い部分を線状に形成すると、これにそって光波が導かれる。このような原理にもとづいた光導波技術の飛躍的な進歩が、今日のオプトエレクトロニクス技術の華々しい発展の一翼を担ってきたといえる。

光導波技術によってこれまでに得られた最大の成果の一つは言うまでもなく光ファイバであろう。レーザーの出現だけでは実用化に至らなかった光通信システムが、光ファイバの導入によって急速に開花し、今日、実社会に取り入れられつつある。

光ファイバが、光波の伝送を目的としているのに対し、光集積回路は、特定の機能を果たす光素子や光回路の実現をめざした導波技術といえる。光学材料の表面に形成した光導波路によって種々の素子を構成し、さらに複数個の素子を単一基板上に一体に組み合わせる回路を実現する。

光波帯における伝送モードは Snitzer と Osterberg (1961) によって、最初に観測され、その後、同時期に発明されたレーザーの発展に伴って、種々の光デバイスあるいはシステムに光導波の概念が導入されるようになった。1968～1969年頃から光集積回路(光 IC)が提唱され徐々に研究が活発化してきた<sup>1)</sup>。ここ数年、着実な進歩を見せつつあり、今後の発展が大いに期待される分野である。

光集積回路は、名ばかりが先行しているきらいがあり、その実体にはいまだあいまいな部分も多いように見える。通常の集積回路、Si などの基板上にメモリ、ロジックなどの電子回路を構成するいわゆる IC、に比較すれば、けっして小形、高密度な回路が実現できるというわけではない。数 mm 角の Si チップ上に数

万個の素子が形成される通常の IC に対し、光集積回路では、数 mm から数 cm の大きさの基板上に数個の光回路素子を集積することが当面の目標と考えられる。

しかし、これによっても、従来の光回路が巨大な光学定盤の上にレンズ、反射鏡などを微細に調整して構成されてきたことに比べると、遥かにコンパクトであり、また、現在の光ファイバシステムを支える柱の一つである微小光学系(マイクロオプティクス)に比較しても高い安定性、再現性が期待できることは、容易に推察される。

光素子を導波路構成とすることからくるいま一つの重要な利点は、素子の高性能化が可能となることである。光波を数ミクロンの断面しかない導波路中にとじ込めるのであるから、外部から印加する制御信号も狭い領域に集中でき、少ない電力で効率よくかつ高速に導波光を制御することができる。

最近では、2.2 で詳説されるように、半導体レーザーに駆動用電子回路を一体化しようとする。あるいは将来、導波形光回路素子を FET などの電子回路素子と同一基板上に一体に構成しようという、光電子集積回路の研究も盛んとなりつつある。

本稿では、まず、光集積回路に用いられる光導波路を、つぎに、個々の回路要素である導波形光回路素子について述べ、さらに、現在考慮されつつある光集積回路技術応用の例をいくつか紹介する。光集積回路に関する解説も徐々に多く見られるようになり、屋上屋を重ねることになると思われるが、本文では、大要を概観することに重点を置き、詳細は他<sup>2)-7)</sup>を参照願うものとした。

#### 2. 光導波路

信号を導く手段として、電子回路ではプリント基板、集積回路ではウェファ上の電極パターン、マイクロ波集積回路ではマイクロストリップ線路が使用され

† Integrated Optics by Masayuki IZUTSU and Tadasi SUETA  
(Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering Science, Osaka University).

†† 大阪大学基礎工学部電気工学科

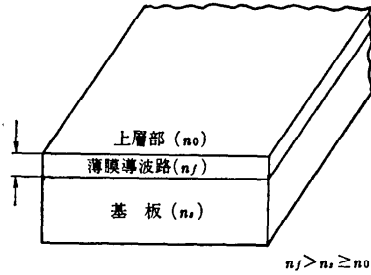


図-1 薄膜光導波路

のと同じように、光集積回路では光導波路を用いて回路を構成する。

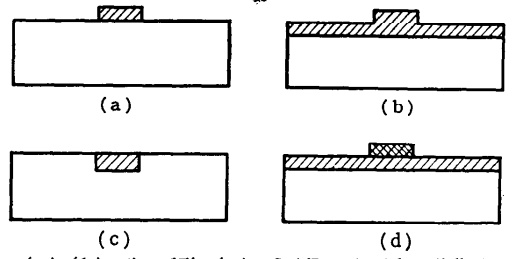
2.1 光導波路の構造

図-1は薄膜光導波路である。平面導波路、2次元導波路などとも呼ばれ、各種の光導波路の中の基本といえる。導波路基板に、それよりもわずかに高い屈折率を持つ薄膜を装荷したもので、薄膜の上部はふたたび低屈折率層である。上部層はそのまま自由空間とすることも多い。薄膜部分は、まわりより屈折率が高いので、一定の条件で薄膜部に入射された光は、上下の境界面で全反射を繰り返しながら、ジグザグに薄膜中を進行する。入射角によって全反射条件が満たされなくなると、光が基板あるいは上部層にもれ出す放射モードとなる。導波層と基板・上部層との界面で、導波モードの電界振幅は0でなく、外部にも電界のしみだし(エバネッセント波)のある、開放形導波路であり、通常の金属導波管と異なる点である。

光導波路の作成法によっては、導波路部が図のようにきっちりとした薄膜(ステップ形)になるのではなく、屈折率が表面近くで徐々に増大する(グレーデッド形)場合も多い。また、導波路材料として複屈折を示す異方性材料が使用されることも多い。光導波の様子にさらに複雑であり、注意が必要である。

薄膜導波路では、膜面方向にはとじ込め効果がない。これに対して、水平方向にも屈折率変化をつけ、光を細いストライプ状に導波する3次元導波路が、実際上有用なことが多い。

図-2に、いくつかの3次元光導波路の例を示す。(a),(b)は高屈折率部をストライプ化したリッジ形、(c)は導波部が基板中にあるうめ込み形、(d)は、2次元導波路上に導波層より



(a),(b);リッジ形, (c);うめ込み形, (d);装荷形  
図-2 3次元光導波路

は低屈折率のストライプをのせた装荷形である。実際には、さらに、製作の過程でリッジの側面が垂直ではなく斜めとなる。あるいは、うめ込み形導波路を拡散法で作成すると屈折率変化がなめらかなグレーデッド形になるなど変化が多い。

2.2 材料と製法

目的によって、強誘電体結晶材料、ガラス材料、半導体材料、有機材料など種々の材料が使用される。こ

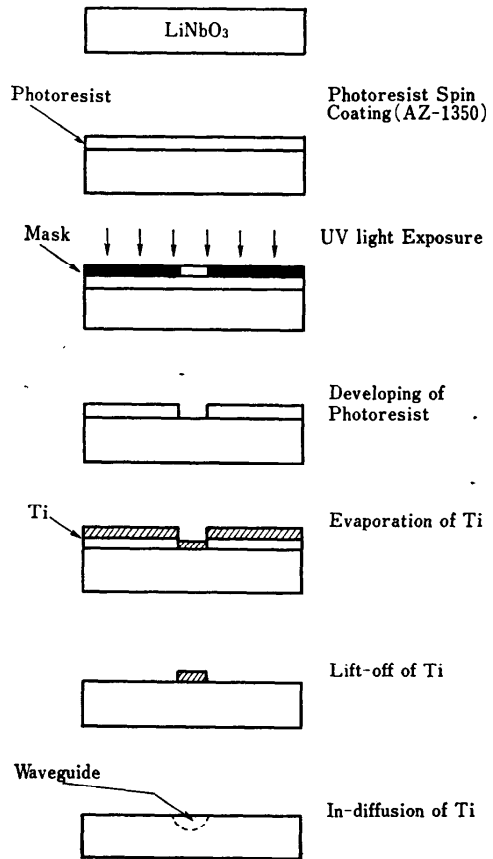


図-3 Ti 拡散 LiNbO<sub>3</sub> 光導波路の作成手順

れらにさまざまな加工を施して導波路を形成する。大別すると (a) 拡散, イオン交換, イオン注入などにより基板表面の屈折率を増大する, (b) 真空蒸着, スパッタリング, CVD, エピタキシャル成長法などにより基板上に高屈折膜を積層する, (c) 各種のドライ, ウェットエッチングあるいは機械加工により不用部を取り除くなどがあり使用する材料によって適当な方法が採られる。

#### (1) 強誘電体結晶材料

LiNbO<sub>3</sub>, LiTaO<sub>3</sub> を始めとする強誘電体材料は, 電気光学効果, 音響光学効果などの非線形な効果を持つものが多く導波路材料として有用である。

なかでも, LiNbO<sub>3</sub> は, 比較的容易に良好な導波路が得られるので多用されている。よく利用される導波路作成法に, 金属 Ti の熱拡散法がある。光学研磨された結晶表面にリフトオフ法により Ti の導波路パターンをつくり, これを 1,000°C 程度で 5 時間前後熱処理することにより導波路が得られる。図-3 にその手順の一例を示す。通常, Ti 膜の厚さが 30~50 nm 程度とすることにより, 単一モード導波路が得られる。最大屈折率変化は 1% 弱, 深さ 2~5 ミクロンのものが多い。導波路の幅は, 最初にする Ti の幅とほぼ同程度であるが, 単一モードの場合 8~3 ミクロン程度とする。

#### (2) 半導体材料

半導体材料を用いれば, 電子デバイスが一体に形成でき, また, レーザ, 検出器などとの一体化も可能となるので, 将来の光電子集積回路用材料として大いに期待される。これまでに蓄積された高度な半導体材料の処理技術, 素子作成技術を利用できる利点もある。次項に詳説されるのでここでは省略する。

#### (3) ガラス, 有機物材料

ガラスも導波路材料として有用である。高屈折率ガラスのスパッタ, CVD 形成, Ag などのイオン交換などの方法により導波路が作成できる。

エポキシ, PMMA なども導波路材料として使用される。有機材料には, 大きな電気光学効果, 非線形光学効果を示すものもあり, 将来性が期待される。

### 3. 導波形光素子

導波路構造を用いた光素子にも多くの種類があるが (1) 分岐, 結合器, フィルタなどの受動素子, (2) スイッチ, 変調, 偏光素子など外部から印加する信号により導波光をコントロールする制御素子, (3) 発光,

光増幅, 受光などの能動素子, の 3 つに大別することが多い。能動素子は, 別項で述べられるので省略し, 本稿では受動素子および制御素子に焦点を合わせる。

#### 3.1 受動素子

図-4 にいくつかの例を示す。(a) は導波路曲がり

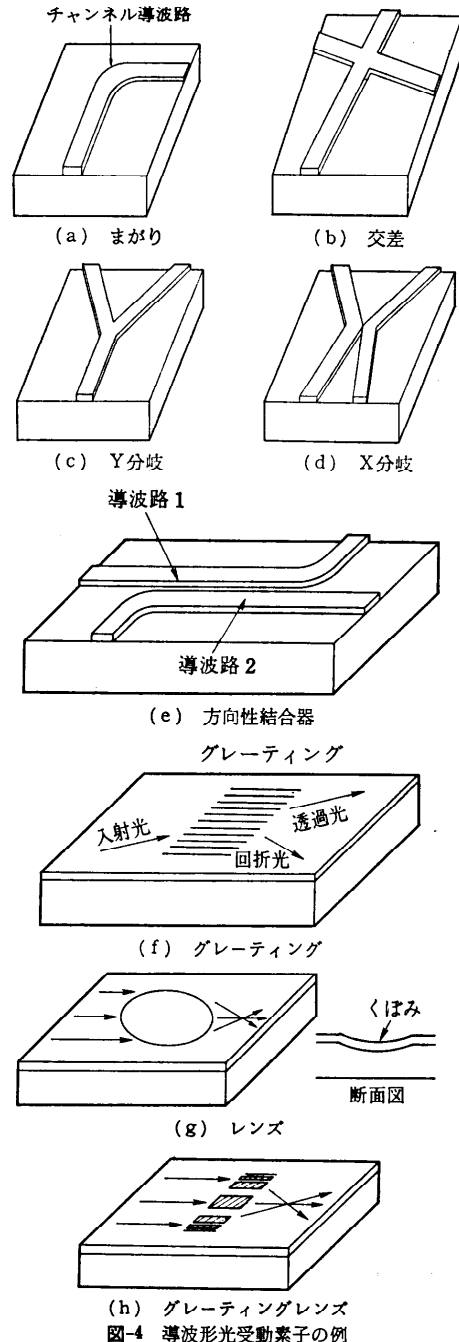


図-4 導波形光受動素子の例

ある。光導波路は開放形なので、急激な曲がりでは損失が増大する。導波路表面の段差や基板端部、後述のグレーティングなどにより導波光を反射させて方向を変えることもできる。(b)は導波路の交差、(c)はY分岐である。導波路が3本しかないにもかかわらず、放射モードを考慮に入れば4端子対回路素子と等価であることが示されている。(d)は非対称X分岐でY分岐では放射モードとなる出力が非対称側の細い分岐に得られる。(e)は方向性結合器で、光導波路が開放形であることから、2本の導波路を十分に近づけて結合させるものである。(f)はグレーティングである。屈折率の微小な変化を格子状に繰り返し導波光を回折するもので、光導波路では導波層と基板との屈折率差が小さく、必然的に一度には導波光に大きな屈折率変化を与えることが困難なので、グレーティングが有効となる。レンズにもいくつかの種類があるが(g)のジオデシックレンズでは、導波路表面にへこみ(あるいはふくらみ)をつけ、入射位置による光路長変化を与える。また、(h)のグレーティングレンズでは、屈折率変化の周期を変えて入射位置と回折角度とを調整しレンズ作用を持たせる。

ほかに、重要な技術として導波路と光ファイバとの接続あるいは光ビームの導波路への入出力結合法があるが、ここでは省略する。

### 3.2 制御素子

多種多様な導波形光制御素子が考案されている。以下に、典型と思われるいくつかの例を示す。

#### (1) 光変調素子/スイッチ素子

光信号の振幅(強度)あるいは位相を外部から加える制御信号に従って変化させるものとして、光変調素子およびスイッチ素子がある。動作原理もさまざまであるが、導波光の位相を変化させる、散乱・吸収させる、方向性結合の原理を用いる、モード変換する、導波光の進路を変える、などが挙げられる。

LiNbO<sub>3</sub>、GaAs など、電気光学効果を持つ材料によって光導波路を構成し、導波路部に電圧を加えると、印加電圧に比例して導波路の屈折率が変化し、出力光が位相変調される。さらに、適当な方法で位相変化を強度変化に変換できる。同じ変調電圧に対して、電極の間隔が狭いほど、また、電極が長いほど大きな位相変化が得られる。図-5(a)では、入力光をY分岐で分割しそれぞれを(互いに逆位相で)位相変調して再び合波し干渉させることにより強度変調出力を得ている。(b)は、方向性結合器形の光スイッチ素子であ

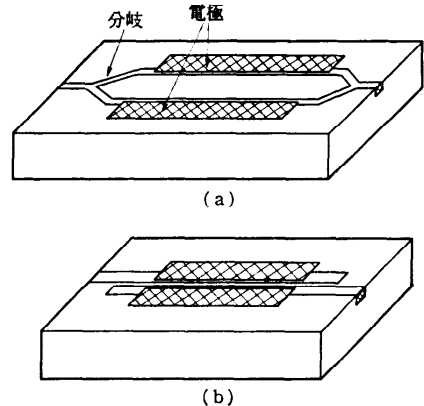


図-5 導波形光変調素子/スイッチ素子

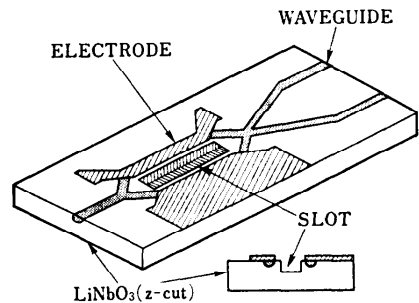


図-6 超高速変調素子の構成例

る。光結合の具合を印加電圧により調整し、出力光強度変化を得る。

図-6は、超高速変調素子<sup>8)</sup>の構成例である。高速度性を得るため、変調波も光波と同方向に進行させている。動作確認した帯域幅はd. c.から18 GHz、3 dB帯域幅は12 GHz、駆動電力は48 mWである。

#### (2) 光偏向素子

印加制御信号により、導波光の進行方向を変えるものとして、偏向素子がある。偏向されずに透過した光あるいは偏向された光の強度に着目すると光変調素子、スイッチ素子として用いることもできる。偏向の方法は、屈折率の不均質変化を誘起して一種のプリズムを形成するものと、グレーティングにより光を回折するものとに大別できる。

図-7は弾性表面波を用いた導波形光偏向素子である。音響光学効果を持つ材料では、弾性表面波の振動により、導波路表面の屈折率が変化する。表面波の進行に伴い屈折率変化も進行波として伝搬する。すなわち、弾性波の波長と等しい屈折率の周期変化が進行し、進行波形のグレーティングが発生することになる。

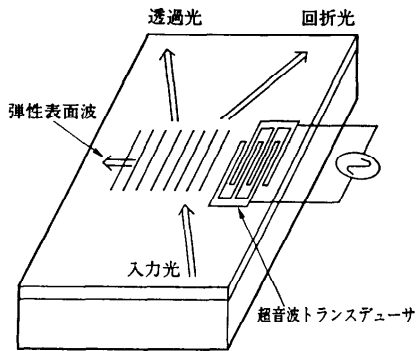


図-7 導波形光偏向素子

弾性表面波の励振には櫛状電極がしばしば利用されるが、電極のピッチと対数によって中心周波数、帯域幅、能率などが決まる。中心周波数の異なるいくつかのトランスデューサを少しづつ傾けて配置することなどにより 1 GHz 以上の広帯域動作が得られた例もある。

### (3) 磁気光学素子、非線形光学素子

通信、信号処理システムを構成する場合に欠くことのできない重要な素子としてアイソレータ、サーキュレータなどの非相反素子があり、磁気光学効果を利用した素子が研究されている。たとえば、GGG 基板上に YIG 薄膜を形成し導波路とし、これに磁界を印加してファラデー効果によるモード変換を利用する。

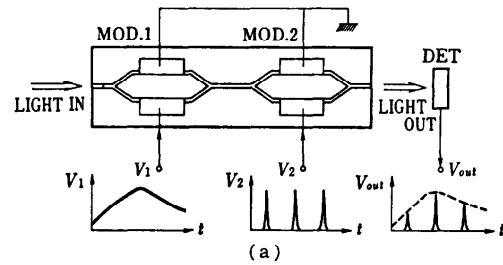
光導波路を用いて、光高調波発生、周波数変換、パラメトリック発振などの非線形光学効果を利用した素子を実現しようとする研究も続けられている。この種の素子は、光波自身で光波を制御しようとするものといえ、将来の発展が期待される。

## 4. 光集積回路技術の応用

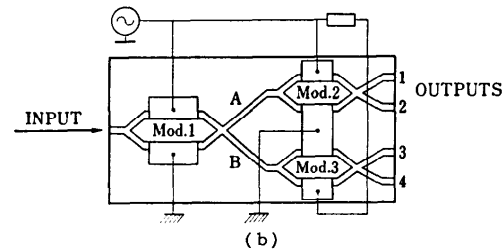
近年では、導波形光素子を組合せ、応用することによって、特定の機能を実現することを目的とした研究が盛んとなりつつある。ここでは、光集積回路技術の利用例、応用例を紹介する。

### 4.1 光集積回路形機能素子

導波路構造を用いたさまざまな機能素子が考案されている。制御信号により特性を可変できるチューナブルフィルタ<sup>9)</sup>、導波光により読み出すことのできる導波路ホログラム<sup>10)</sup>、グレーティングフィルタを組み合わせた波長分波回路<sup>11)</sup>、導波路構成を用いた光双安定素子<sup>12)</sup>あるいはゲート回路<sup>13)</sup>などを挙げることができるが、詳細は文献に譲る。



(a)



(b)

図-8 (a)信号掛け算回路、(b)スイッチアレイ

## 4.2 変調素子/スイッチ素子アレイ

導波形電気光学変調素子あるいは方向性結合器形光スイッチなどを基礎とした集積光回路が活発に研究されている。図-8(a)はふたつの光強度変調器を直列接続した掛け算器<sup>14)</sup>で、一方の素子に 50 ps パルス電圧を加えることにより 4 GHz 信号の相関波形が得られている。また、(b)は 3つの光スイッチを組み合わせたタイムディマルチプレクサ<sup>15)</sup>では 4 GHz から 1 GHz 4チャンネルへのディマルチプレクスの基本動作が確かめられている。強度変調素子を並列に配置して 1 GHz 繰り返し AD 変換<sup>16)</sup>を行った例もある。一方、1つの干渉形変調素子に数組の電極を設け、信号演算させるものがある。論理ゲート、DA 変換、パリティチェック回路などが構成されている。

## 4.3 光偏向・回折素子の利用

図-9 はスペクトラムアナライザの例<sup>17)</sup>である。導波形超音波光偏向器と導波路レンズを組合せ、高周波信号の周波数スペクトルを実時間で並列に分析する。電子回路では大きなフィルタバンクが必要であるのに対して小形で高速な回路が構成できる。帯域幅 1 GHz 程度で分解能 2~3 MHz、ダイナミックレンジ 20~40 dB が得られている。このほか、弾性表面波を用いた、アナログあるいはデジタル信号相関回路<sup>18)</sup>、並列-直列信号変換比較回路<sup>19)</sup>なども試作されている。

## 4.4 光通信用外部変調器

図-10 は、外部変調素子を用いた光通信システムの構成である。光通信では、光源として用いる半導体

レーザに加える電流を直接変調して光強度を変化し信号を乗せるのが一般的である。これに対して、最近、レーザは光源として安定に動作させ、変調には別に導波形変調素子を用いるシステムが試され、4 Gbps 以上の超高速で 117 km の長距離通信実験<sup>20)</sup>が行われ、優秀な特性が報告された。導波形素子の有用性を示すものとして注目される。

このほか、半導体レーザ発振器の共振器内部に導波形変調素子を組み込み、モード同期パルスを発生する実験<sup>21)</sup>も報告されている。

4.5 光集積回路センサ

センサあるいは計測用光回路は新しい光集積回路応用分野として興味深い。光利用センサのトランスデューサを導波路化する、光利用のための周辺光回路を個体化する、の2面がある。特に光の可干渉性を用いる高感度センサにおいて、回路の小形化、安定化を図る上で重要と言える。

図-11 は微小変移センサ<sup>22)</sup>、圧力センサ<sup>23)</sup>の構成である。マイケルソン干渉計を固体化したもので、ほかにも、温度、湿度センサなどが実現されている。いま一つの利用法は、近年注目を集めている光ファイバジャイロ、ファイバソナなどに用いる光回路の固体化であり、これらについても熱心に研究が進められている。

5. むすび

光集積回路に関して現状を概観した。いまだ未完成の将来技術であり、今後の発展が期待される。従来の光回路に比べ、小形、高安定で再現性が高く、また高速、高能率と多くの利点が指摘されるが、同時にその構成には高度な素子設計あるいは作成技術が要求され、これを実用の段階にまで到達させるには、解決すべき問題点も山積している。

光エレクトロニクスはますます重要性を増しつつある。これに伴って近い将来、光集積回路・光電子集積

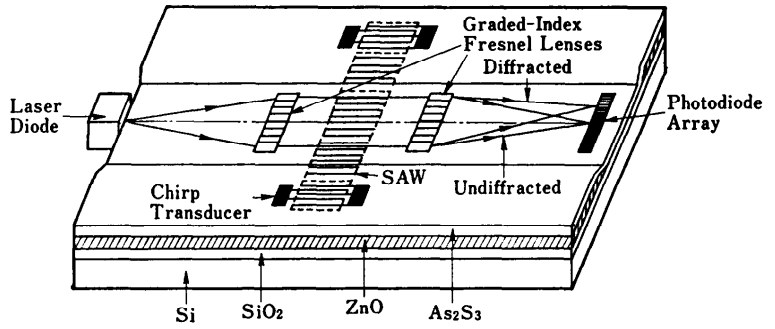


図-9 スペクトラムアナライザ

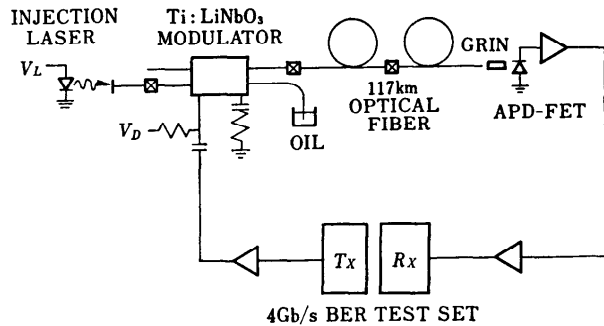


図-10 4 Gbps 光通信実験の構成

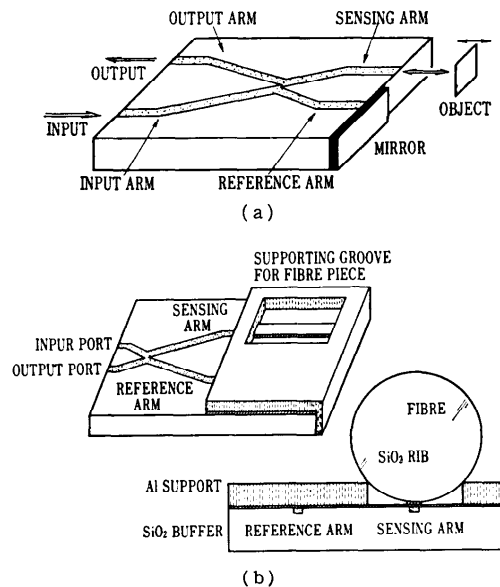


図-11 (a)微小変移および (b)圧力センサ

回路は新しい光技術として広く定着するものと確信される。

## 参考文献

- 1) 末田：光導波技術，応用物理，Vol.51, pp.427-430 (1982).
- 2) Miller, S. E. : Integrated Optics ; An Introduction, Bell Syst. Tech. J., Vol. 48, pp.2059-2068 (1969).
- 3) Tamir, T. : Integrated Optics, Springer-Verlag (1975).
- 4) 末田, 井筒：光集積回路，光通信システム資料集，日本工業技術センター，pp.171-197 (1980).
- 5) 柳井（編）：光通信ハンドブック，朝倉書店，pp. 255-357 (1982).
- 6) 西原, 春名, 栖原：光集積回路，オーム社(1985).
- 7) 末松（編）：半導体レーザと光集積回路，オーム社 (1985).
- 8) Izutsu, M., Haga, H. and Sueta, T. : Ultrafast Traveling-Wave Light Modulators with Reduced Velocity Mismatch, ThA 4, Top. Meet on Picosec. Electron. and Optoelectron. (1985).
- 9) Alferness, R. C. and Schmidt, R. V. : Tunable Optical Waveguide Directional Coupler Filter, Appl. Phys. Lett., Vol. 33, pp.161-163 (1978).
- 10) Suhara, T., Nishihara, H. and Koyama, J. : Waveguide Holograms: A New Approach to Hologram Integration, Opt. Commun., Vol. 19, pp.353 (1976).
- 11) Lianos, A. C., Katzir, A., Yariv, A. and Hong, C. S. : Chirped-Grating Demultiplexers in Dielectric Waveguides, Appl. Phys. Lett., Vol. 30, pp.519 (1977).
- 12) Ito, H., Ogawa, Y. and Inaba, H. : Analyses and Experiments on Integrated Optical Multivibrators Using Electrooptically Controlled Bistable Optical Devices, IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-17, pp.325-331 (1981).
- 13) Goldberg, L. and Lee, S. H. : Appl. Opt., Vol. 18, pp.2045 (1979).
- 14) Izutsu, M., Haga, H. and Sueta, T. : Picosecond Signal Sampling and Multiplication by Using Integrated Tandem Light Modulators, IEEE J. Lightwave Tech., Vol. LT-1, pp.285-289 (1983).
- 15) Haga, H., Izutsu, M. and Sueta, T. : An Integrated  $1 \times 4$  High-Speed Optical Switch and its Application to Time Demultiplexer, IEEE J. Lightwave Tech., Vol. LT-3, p.116-120 (1985).
- 16) Becker, R. A. and Leonberger, F. J. : 2-bit 1G Sample/s Guided-wave Analog-Todigital Converter, IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-18, pp.1411-1413 (1982).
- 17) Suhara, T., Shiono, T., Nishihara, H. and Koyama, J. : An Integrated Optic Fourier Processor Using an Acoustooptic Deflector and Fresnel Lenses in an  $As_2S_3$  Waveguide, IEEE J. Lightwave Tech., Vol. LT-1, p.624 (1983).
- 18) Verber, C. M., Kenan, R. P. and Busch, J. R. : Correlator Based on an Integrated Optical Spatial Light Modulator, Appl. Opt., Vol. 20, p.1626 (1981).
- 19) Yamashita, T., Matano, M., Inoue, N. and Katoh, M. : Guided-Wave Optical Multichannel Signal Comparator Using Pulse-Modulated Acousto-optic Deflector, CLEO'85, FL-4 (1985).
- 20) Korotky, S. K. et al. : 4 Gb/s transmission Experiment Over 117 km of Optical Fiber Using a Ti : LiNbO<sub>3</sub> External Modulator, OFC/OFS'85, PD1 (1985).
- 21) Korotky, S. K., Eisenstein, G., Kasper B. L., Alferness, R. C., Veselka, J. J. and Buhl, L. L. : Error-Free External Modulation of a Single-Frequency Injection Laser at 1.5 Gbit/s Using a Ti : LiNbO<sub>3</sub> Waveguide Switch, Electron. Lett., Vol. 20, p.878 (1984).
- 22) Izutsu, M., Enokihara, A. and Sueta, T. : Optical Waveguide Microdisplacement Sensor, Electron. Lett., Vol. 18, pp.867-868 (1982).
- 23) Izutsu, M., Enokihara, A., Mekada, N. and Sueta, T. : Optical-Waveguide Pressure Sensor, 144, 2nd-EC10 (1983).

(昭和60年5月13日受付)