

光集積回路*

Optical Integrated Circuits

春名正光** 西原 浩**

Masamitsu HARUNA and Hiroshi NISHIHARA

Key words: optical integrated circuits, optical waveguides, optical modulators and switches, integrated-optic laser Doppler velocimeter, integrated-optic disk pickup device, Ti-diffused LiNbO₃ waveguides, glass waveguides

1. はじめに

基板の表面付近にわずかに屈折率の高い透明な薄膜層を設け、この中に光を閉じ込めて伝搬させることによって、光を効率良く制御することができる。このような薄膜光導波を基本として、一つの基板上去つかの光学素子を集積化し、全体としてある機能を果たす光回路を光集積回路（光 IC）という¹⁾。このような光 IC の概念が提唱されて丁度 20 年、この間さまざまな導波路材料、多種多様な導波路光デバイスの原理提案、基礎実験、およびこれに伴う微細加工技術が検討されてきた。そして、最近ようやく光通信、計測分野における実用的なニーズにこたえる光 IC の開発研究が盛んになってきた。

さて、光 IC の構成、機能、作製プロセスはその導波路材料に依存する。したがって、本稿ではまず代表的な光導波路材料について述べ、次に最近の光 IC のトピックスを紹介したい。また、これに先立って、光 IC の基本的な概念を理解いただくために、具体例を上げて光集積化の特長を説

明する。

2. 光集積化とその特長

ここでは光強度変調を取り上げ、個別光学部品を組み合わせたバルク光学系と、これを電気光学結晶の一つであるニオブ酸リチウム (LiNbO₃) 基板に集積化した導波路素子とを対比する。ミラー、ハーフミラーを組み合わせたマッハツェンダ干渉計の一方のアームにバルク位相変調器を挿入したものを図 1 (a) に示す。通常、このような干渉計は振動を避けるために重い光学ベンチ上に個別光学部品を配置して構成され、また消光比を高くするために各部品間の微妙な位置合わせ・光軸調整を必要とする。

光集積化においては、まず光の通路を導波路に置き換えることになる。LiNbO₃ の場合、結晶表面から Ti を選択的に熱拡散することによって容易に損失 1 dB 以下の単一モード導波路を作製できる¹⁾。光波長 0.633 μm のとき、導波路幅は 3 μm、厚さ 1.5 μm である。図 1 (b) は、Ti 拡散 Y 分岐導波路を二つ組み合わせて干渉計を構成した導波路光強度変調素子である。ここで、導波光の位相変調を行うために干渉計の二つのアーム

* 原稿受付 平成元年 11 月 30 日

** 大阪大学工学部 (吹田市山田丘 2-1)

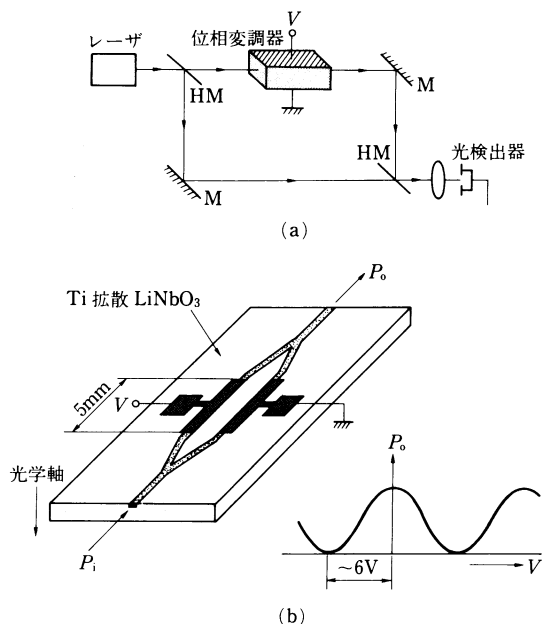


図1 個別光学部品を組み合わせたバルク光学系(a)と導波形光強度変調素子(b)の対比

上にプレーナ電極が装荷される。この電極長を5 mm, 間隔を20 μm とすると, 半波長電圧はわずか6 Vであり, 極めて低電圧で光強度変調が行える。素子サイズは約15 \times 5 mm²で, この中に図1(a)で示した干渉計がすべて集積化されている。

このように, 光集積化によって光学系全体を小型・軽量化できると共に, 各部品間の光軸調整が

不要で安定な光学アライメントが得られる。さらに, 従来のバルク光学部品では実現しえない高速かつ低電圧駆動といった高性能な光素子が構成できることも大きな魅力である。

3. 光導波路材料

前述のTi拡散LiNbO₃を含めて, 光ICに用いられる導波路材料を表1に示す。低損失単一モード導波路の作製, 機能性, 微細加工技術の点から, 最も良く用いられる材料は, (1)Tiおよびプロトン交換LiNbO₃, (2)Si基板上に堆積したガラス薄膜, (3)III-V族半導体結晶薄膜である。LiNbO₃では光変調器/スイッチを始めとする高速の光機能素子が集積化でき, またガラス薄膜/Siにおいては受動素子に加えて光検出器も集積化できるのが特長である。これに対して, 光源も含めて光回路全体をモノリシック集積化できるのはGaAs, InPなどの半導体であり, 現在導波路の低損失化, 微細加工プロセスについて検討が進められている。

これら三つの導波路材料の中で, 簡単なプロセスで, しかも光ファイバとの整合性の良い低損失単一モード導波路が作製できるのはTi拡散LiNbO₃である。したがって, 光通信, 計測分野における光IC材料として主にLiNbO₃が用いら

表1 代表的な光導波路材料

| 分類 | 光導波路構造 | | 導波路作製法 | 導波形光素子/光ICデバイス |
|--------|---|----------------------|-------------------|---|
| | 導波層 | 基板 | | |
| 電気光学結晶 | Ti : LiNbO ₃ | LiNbO ₃ | Ti熱拡散 | 高速光変調素子/スイッチ, 計測用/信号処理用光IC SHG(第2高調波発生)素子 |
| | H ⁺ : LiNbO ₃ | LiNbO ₃ | プロトン交換 | |
| ガラス | K ⁺ , Tl ⁺ : ガラス Corning # 7059 石英系導波路 ガラス干渉薄膜 | 多成分系ガラス | イオン交換 | 光パワー分配素子 光集積ディスクビクアップデバイス 波長/周波数多重通信用デバイス ARROW(共振反射型光導波路) |
| | | SiO ₂ /Si | RFスパッタ | |
| | Si | 火炎堆積・RIE RFスパッタ | | |
| | K ⁺ : 半導体ドープガラス | | イオン交換 | 非線形光学導波路 |
| 半導体 | GaAs/GaAlAs | GaAs | LPE, VPE MOCVD | 光変調素子/スイッチ キャリア注入型光スイッチ, OEIC |
| | InGaAsP | InP | MBE | |
| 磁性薄膜 | La, Ga : YIG | GGG | LPE, VPE スパッタ | 表面静磁波光偏向 光アイソレータ |
| | Bi : YIG | | | |

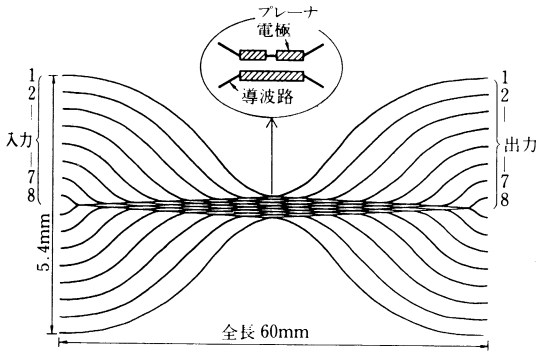


図2 8×8マトリクス光スイッチ

れている。また、光ファイバと同様の手法でSi基板上に堆積したガラス薄膜は極めて低損失であり(約0.1 dB/cm)、これを用いた実用的な光通信デバイスが開発が行われている²⁾。

4. 光ICの実例

光ICの応用分野は光通信、計測、信号処理に大別でき、各分野において興味ある光ICが数多く報告されている。とくに、光通信の分野では、10 GHzを越える変調帯域をもつ高速光変調素子、波長多重/周波数多重およびコヒーレント光通信ICデバイスなどがある。誌面の都合上これらのデバイスをすべて網羅することはできないので、ここでは特長的な光ICデバイスを2,3紹介することにする。

1) マトリクス光スイッチ

薄膜光導波を利用した独特の光素子の一つに方向性結合形スイッチがある¹⁾。これは近接する2本の導波路間の分布結合をLiNbO₃の電気光学効果を用いて制御して光スイッチングを行うものである。図2にこの方向性結合器形スイッチを64個集積化した8×8マトリクス光スイッチを示す³⁾。動作光波長は1.3 μm、導波路幅5 μm、素子長2 mmで光ICの全長は60 mmである。各スイッチの駆動電圧は18~26

V、クロストーク約-30 dBである。

2) 光集積レーザドップラ速度計

速度・変位計測に利用されるヘテロダイン干渉計の光集積化が試みられている。その一つとして図3に光ファイバをプローブとする光集積レーザドップラ速度計を示す⁴⁾⁵⁾。幅4 μmのTi拡散導波路を用いてマッハ-ツェンダ干渉計が構成され、40×8 mm²のLiNbO₃基板上に物体の移動方向を弁別するための周波数シフタ、半波長板の役割を果たすTE/TMモード変換素子、モードスプリッタが集積化されている。この光ICの導波路パターンニングには、0.1 μm/ステップのX-Y微動ステージとHe-Cdレーザ集光光学系を組み合わせたレーザビーム直接描画装置が用いられている⁶⁾。光源には0.83 μmの半導体レーザ(LD)を用いており、LDおよび光検出器とLiNbO₃光ICは偏波保存ファイバを介して一体集積化されている。また、LDの可干渉距離はたかだか数十cmなので、導波路の参照光アームにプローブ用ファイバと同じ長さのファイバを接続し、その終端にアルミニウム蒸着ミラーを設けている。参照導波光に300 kHzの周波数シフトを与えて移動鏡の速度計測を行った結果、信号/雑音比20 dB以上でドップラシフト信号周波数が検出されている。さらに、二周波直交偏光干渉光学系もLiNbO₃基板上に集積化されており、±3 nmの

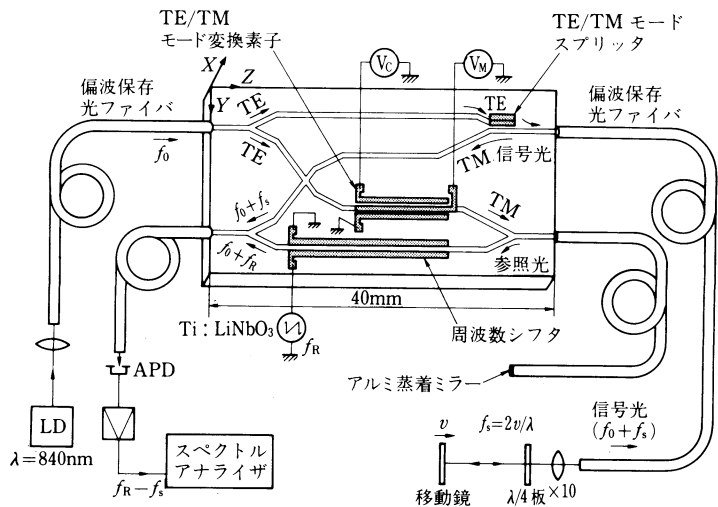


図3 光集積レーザドップラ速度計

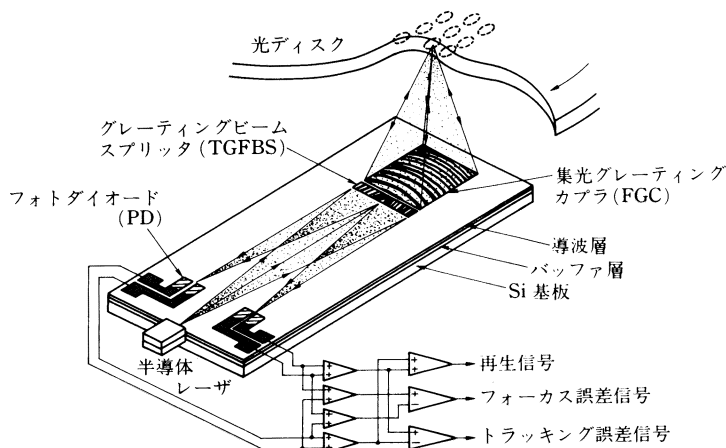


図4 光集積ディスクピックアップデバイス

変位測定精度が得られている⁷⁾。

3) 光集積ディスクピックアップデバイス

図4に光ICデバイスの構成を示す⁸⁾。Si基板上のガラス薄膜導波路に、導波光を光ディスク上に集光するための特殊なグレーティング群と光検出器アレイが集積化され、これに $0.79\ \mu\text{m}$ -LDが接続されている。この特殊グレーティングは電子ビーム描画法で作製されたもので、平均周期 $0.6\ \mu\text{m}$ 、焦点距離 $2\ \text{mm}$ 、開口 $1\times 1\ \text{mm}^2$ で回折効率 60% である。試作したデバイスを用いて、反射光の検出、フォーカス誤差およびトラッキング誤差検出の基本的動作が確認されており、完成度の高い光ICといえる。さらに、最近集光と偏波面回転検出機能を合わせもつグレーティングを主体とした光磁気ディスク用ICデバイスも報告されている⁹⁾。

5. まとめ

以上、Ti拡散 LiNbO_3 を中心として、光集積化の特長について述べ、代表的な導波路材料を含めて具体的な光ICを紹介した。これによって、光ICの基礎的な概念と最近の研究動向の一端がご理解いただければ幸いである。

現状は、ようやく実用的なニーズにこたえる光ICが試作される段階に達したところであり、実際のシステムサイドの要求を満足するには、なお

光ICの実装技術を含めて検討すべき問題が残されている。しかし、今や薄膜光導波を基礎とする光IC技術は光エレクトロニクス分野において不可欠なキーテクノロジーである。今後は、非線形光学効果を用いた光-光制御素子¹⁰⁾を始めとして、新しい機能をもつ導波形素子、光ICの開発に向けてのなお一層の研究の進展が期待される。

参考文献

- 1) 西原 浩, 春名正光, 栖原敏明: 光集積回路, オーム社 (1985).
- 2) T. Miyashita and M. Nakahara: Silica Waveguide Integrated Circuit Technology, IOOC '89, 18 D 1-1, Kobe, July 1989.
- 3) L. Thylen: Integrated Optics in LiNbO_3 : Recent Developments in Devices for Telecommunication, J. Lightwave Technol., **6**, 6, (1988) 847.
- 4) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara: Doppler Integrated Circuit for a Fiber Laser Doppler Velocimeter, J. Lightwave Technol., **LT-5**, 7, (1987) 901.
- 5) 春名正光, 西原 浩: ヘテロダイナミク干涉光学系の集積化, 光学, **17**, 6 (1988) 285.
- 6) M. Haruna, S. Yoshida, H. Toda and H. Nishihara: Laser-beam Writing System for Optical Integrated Circuits, Appl. Opt., **26**, 21, (1987) 4587.
- 7) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara: Integrated-optic Heterodyne Interferometer for Accurate Displacement Measurement, IOOC '89, 19 D 3-5, Kobe, July 1989.
- 8) S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: An Integrated-optic Disk Pickup Device, J. Lightwave Technol., **LT-4**, 7, (1987) 913.
- 9) T. Suhara, H. Ishimaru, S. Ura and H. Nishihara: Integration of Detection Optics for Magneto-optical Disk Pickup, IOOC '89, 21 D 1-2, Kobe, July 1989.
- 10) 例えば, T. Taniuchi and K. Yamamoto: Miniaturized Light Source of Coherent Blue Radiation, CLEO '87, WP 6, Baltimore, Apr. 1987.