

光集積回路とニューガラス

大阪大学工学部 栖原 敏明
西原 浩

Applications of new glass materials to optical integrated circuits

Toshiaki Suhara
Hiroshi Nishihara
Dept. Electron., Fac. Eng., Osaka University

1. はじめに

光集積回路(光 IC)は、光導波路を基本構造として種々の光学部品を構成・集積化することにより、特定の機能を果たす小型で安全な光デバイスを実現しようとするものである。光 ICにはこれまで実用例は殆んどないが、光通信用を中心として実用化に近いものもあり、最近では比較的大規模なデバイスや複雑な機能のデバイスも多数研究され、応用分野・用途も拡大されつつある。

代表的な光学材料であるガラスは光 IC の材料としても重要であることは言うまでもない。光 IC は、光波長程度の微細構造をもち、少数の材料からなるモノリシック構造で複雑な機能を得ようとするものである。材料の特性と加工技術への要求は厳しい。しかし、微小デバイスであるので、一般光学ガラスだけでなく、広く各種機能性ガラスや非晶質薄膜の多様な応用可能性がある。すなわち、光 IC はニューガラスの多くの応用が期待される分野のひとつである。

本稿では、ニューガラスの光集積回路への応用について概観したい。

2. 各種ガラス導波路

光 IC のための導波路は、Fig. 1 のように、光ファイバと同様に、周囲よりわずかに屈折率の高い領域(コア、導波層)に光波を全反射により閉じ

込めてガイドする。導波路は伝搬可能な導波モードの数により単一モード型と多モード型に分類される。また平面導波路とチャンネル導波路、拡散型と薄膜型に分類することもでき、目的に応じて使い分けられている。以下に各種ガラス導波路の

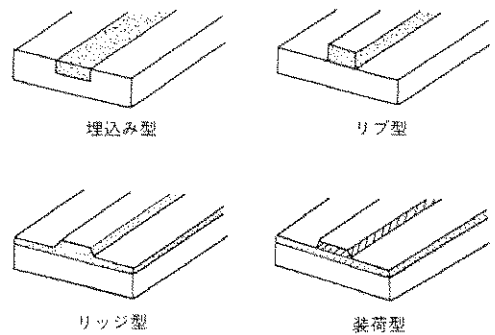
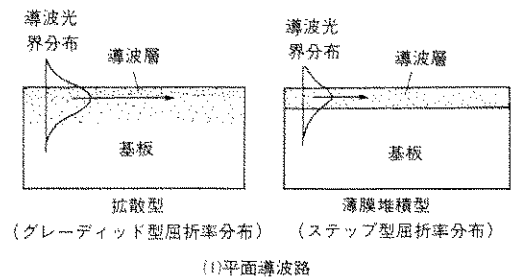


Fig. 1 光集積回路用導波路の構造

Table 1 各種イオン交換ガラス導波路

方法 交換イオン	イオン源 (塩)	融点 (°C)	電界 印加	屈折率 変化 (Δn)	導波路伝播 損失 (dB/cm)	特 徴
溶融塩法						
Li ⁺	LiNO ₃	264	無	~0.01		拡散速い
	LiSO ₃ +K ₂ SO ₄	524	無	~0.015	≥*	
Na ⁺	NaNO ₃	307	無	減少		屈折率減少
K ⁺	KNO ₃	334	無(有)	0.006 ~0.009	≥ 0.2 < 0.2*	低損失 Δn 小
Rb ⁺	RbNO ₃	310	無	~0.015	?	拡散遅い, 有毒
Cs ⁺	CsNO ₃	414	無	~0.03	~1	拡散遅い, 有毒
Tl ⁺	TlNO ₃	206	有	≥ 0.1	≥ 0.1*	Δn 大, 拡散遅い
Ag ⁺	AgNO ₃	212	無(有)	0.1~0.2	≥ 2*	Δn 大, 損失大 低損失
	NaNO ₃ +Ag		電解法	~0.005	~0.2	
固相法(乾式法)						
Ag ⁺	Ag 蒸着膜交換温度 230~400°C		無	0.001	≥ 0.2*	低損失
			有	0.08	~1*	Δn 大

*付はマルチモード, 他はシングルモード

材料・製法と特性・特徴について述べる。

2.1 イオン交換ガラス導波路²⁾

多成分ガラスの表面を導波路化する代表的な方法はイオン交換法である。これはガラス中のNa, K等の成分は高温では移動可能なイオンとなるので、外部からの他イオンと相互拡散することにより組成を変化させ得ることに基づいている。屈折率増加は、ガラス中イオンを電子分極率の大きなK⁺, Rb⁺, Cs⁺, Tl⁺, Ag⁺やイオン半径の小さなLi⁺と交換することで得られる。

各種イオンを用いた導波路作製の比較をTable 1に示す。溶融塩法では、交換イオンを含む塩を溶融し、ガラス基板を一定時間浸すことにより作製する。チャンネル導波路はパターン化した金属膜マスクを基板上に設け、選択的にイオン交換して作製する。基板にはソーダ石灰ガラスが最もよく用いられるが、硼硅酸ガラス、アルミ硅酸ガラスも用いられる。非線形光学効果材料として注目されている半導体ドープガラスにおいても本法による導波路作製の報告がある³⁾。屈折率変化 Δn はイオン種とガラス組成に依存し、Na含有量の多いソーダ石灰ガラスは Δn が大きい。単一モード導波路作製はK⁺交換で最も良い結果が得られる。

多モード用の大きな Δn を与えるAg⁺, Tl⁺のうちAg⁺は不純物を介した還元で銀粒子を生じるので低損失を得ることは難しい。Tl⁺は拡散が遅い欠点があり、電界印加による加速が行なわれる。Na⁺は負の Δn を与えるので埋込み導波路の作製に利用される。固相法は基板上に真空蒸着したAg薄膜をイオン源として高温中で電界を加えて交換する。さらに追拡散を行えば比較的低損失な多モード導波路が作製できる。

2.2 スパッタガラス薄膜導波路

基板とは異なる材料の薄膜を堆積して形成する導波路は複数材料利用による機能拡大の利点がある。ガラス薄膜導波路にはTable 2のように多種のものがあるが、高周波スパッタリングで作製される導波路が最もよく用いられる。多成分ガラスでは硼硅酸ガラス(特にコーニング#7059)が最も良く利用される⁴⁾。チャンネル導波路は化学エッチングで作製できる。基板には一般の低屈折率ガラス(溶融石英やバイレックス)が多用されるが、Siウエハの熱酸化で作製されるSiO₂/Si基板が光検出器集積化の可能性と低損失の点で優れている。CO₂レーザーアニール処理による0.01 dB/cmの低損失化も報告されている⁵⁾。

Table 2 各種ガラス薄膜導波路

材 料	導 波 膜 作 製 法	屈 折 率	導波路伝播損失 (dB/cm)	特 徴
硼珪酸ガラス(BSG) Cornig # 7059	RF スパッタ	~1.55	0.2~1	低損失, 製膜容易
磷ドーパガラス(PSG) P-doped SiO ₂	CVD	~1.47	0.5~1 ~0.05 ^s	低損失, 加工容易
Ti ドープシリカ SiO ₂ (+TiO ₂)	火焰堆積法(CVD) +熱処理透明化	~1.47	~0.1*	低損失, 膜厚範囲大 RIE 加工容易
SiO ₂ +Ta ₂ O ₅	RF スパッタ	1.5~2.1	0.2~0.8	屈折率範囲大
SiO ₂	多層熱酸化	~1.46	0.6~3	光散乱小
SiO _x N _y	SiO ₂ 熱酸化 PECVD	~1.7 1.5~2.0	0.06~0.3 ≥1.5	低損失 屈折率範囲大
Si ₃ N ₄ Si _x N _y	LPCVD PECVD	1.9~ 2.0	≥0.1 ≥1	低損失, 高屈折率 RIE 加工容易
カルコゲナイドガラス* As-S, As-Se-Ge	真空蒸着 RF スパッタ	~2.4	0.4 ~2	音響光学特性良 屈折率可変
Ta ₂ O ₅ Nb ₂ O ₅	反応性スパッタ 金属熱酸化	1.9~2.2 2.1~2.3	0.5 ~2	高屈折率

注: &付は波長1μm帯用, 他は可視-赤外域用; *付はマルチモード, 他はシングルモード; \$付はチャンネル導波路, 他は平面導波路

他の導波用スパッタ膜には屈折率制御に適した (SiO₂)_x(Ta₂O₅)_y⁹³, (SiO₂)_x(BaO)_y⁷⁾ や高屈折率の Ta₂O₅⁹⁾, Nb₂O₅⁹⁾ 等があり, 後者は装荷膜として各種の受動素子を作製するのに利用される。

2.3 CVD (化学的気相堆積) ガラス導波路

低損失導波路の作製法として重要性が高まっている技術に以下のような各種の CVD 法がある。

1) 火焰堆積法: 光ファイバ製造技術の応用であり, SiCl₄, TiCl₄ の混合ガスの酸化反応による火焰中で生成するガラス微粒子を基板上に堆積させた後に 1250°C 程度の熱処理により透明な石英系導波膜とする方法である¹⁰⁾。ガス組成による屈折率制御が可能で, 広範囲の膜厚の導波路が作製できる特徴があり, 0.1 dB/cm 程度の低損失なものが得られている。チャンネル導波路は, 反応性イオンエッチングや CO₂ レーザ加工¹¹⁾ で作製できる。

2) 低圧 CVD, プラズマ CVD 法: Si₃N₄ 薄膜は SiH₄ と NH₃ を原料ガスとした CVD 法で作製でき, 比較的高い屈折率をもち低損失の導波路として用いられる。低圧 CVD では 800°C 程度の温度で製膜され, 0.1 dB/cm の低損失な導波路が得

られている¹²⁾。プラズマ CVD では 200~400°C の低温で製膜できる利点がある¹³⁾。原料ガスに N₂O を加えることにより SiO_xN_y の組成の膜を得ることも可能であり, 屈折率制御を行った導波路作製も報告されている¹⁴⁾。その他の CVD 膜では, Ge や P をドーピングした SiO₂ ガラスの導波路としての使用例が報告されている⁴⁾。

3) レーザ CVD 法: レーザ光掃引により基板上に薄膜を選択形成してチャンネル導波路を直接作製する新しい技術であり, CO₂ レーザによる SiON 導波路作製が試みられている¹⁵⁾。

2.4 その他のガラス導波路

拡散型では SiO₂ 基板へのイオン注入 (He⁺, Li⁺ 等) による導波路¹⁶⁾, SiO₂ 基板表面の熱窒化による SiON 導波路¹⁷⁾ などがある。As-S, As-Se-Ge 等のカルコゲナイドガラスは, 音響光学良度指数が大きい, 光・電子ビームで屈折率変化を誘起できるなどの特長があり¹⁸⁾, 大きな 3 次非線形光学効果を持つと考えられている¹⁹⁾。多孔質ガラスに Ar レーザでパターンを直接書込んで導波チャンネルを得る方法も開発されている²⁰⁾。また石英系導波路は有機シリコン溶液からゾル-ゲル法によ

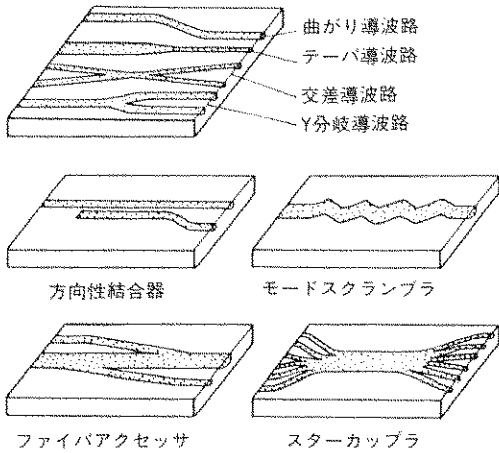


Fig. 2 各種のチャンネル導波路素子

り作製することも可能であり、ゲル状態での型押しによる微細加工ができる利点がある²¹⁾。

3. 導波型光素子

3.1 受動素子

導波型受動光素子には多くの種類があるが、その大部分はガラス材料で実現できる。以下には重要と思われる素子について述べる。

1) チャンネル導波素子： チャンネル導波路を変形して実現できる素子には、Fig. 2のように、曲がり、テーバ、交差、分岐などがある。方向性結合器は接近した2導波路の分布結合で導波光を分岐・合流させる。これらは光ICの内の素子間接続に用いられる。モードスクランブラは多モード導波路内の各モード成分を均等化して特性の安定化を図るのに使われる²²⁾。2組の非対称分岐からなる光アクセッサは光ファイバリンクの信号入出力部として有用である²³⁾。多数の入出力端と混合部をもつスターカップラは光ファイバ通信網の重要な要素である²⁴⁾。これらの素子の作製にはイオン交換法が最もよく適用される。また石英系導波路のイオンエッチングによっても作製されている。

2) 導波路レンズ： 平面導波路内の光波に対してレンズ機能を果たす導波路レンズにはFig. 3に示す各種がある。ルネブルグレンズは導波路上にドーム状の厚さ分布をもつ高屈折率膜を装荷するもので、シャドウマスクを用いてAs₂S₃、Ta₂O₅

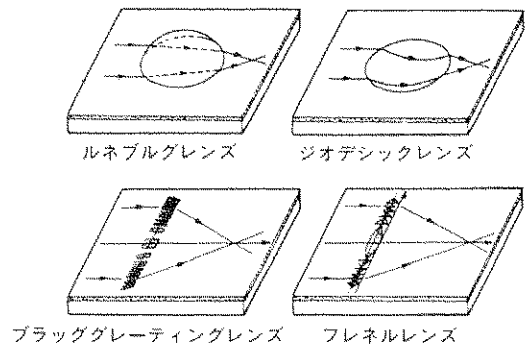


Fig. 3 各種の光導波路レンズ

等を堆積して作製される。ジオデシックレンズは導波面に凹みを設けたとき光線は測地線に沿って曲がることを利用したレンズで、基板の機械的切削・研磨や基板ガラスの熱軟化形成で作製される。グレーティングレンズ、フレネルレンズは周期構造における導波光の回折を利用してレンズ機能を実現するものである。

3) グレーティング素子²⁵⁾： 導波路内に設けられたグレーティング（周期構造）は、位相整合、波長分岐、波面変換など多くの機能を持ち、構造・作製法が集積化に適したものである。極めて重要な光IC素子である。グレーティング素子は、前項のレンズのほか、Fig. 4のような多くの用途に利用できる。これらの素子は、ホログラフィック干渉露光やコンピュータ制御電子ビーム描画によるパターン作製とエッチングや選択イオン交換などによる加工の組合せで作製される。

3.2 光制御素子

光ICの多くは、導波光を外部（電気）信号で制御する光スイッチ、変調器、空間変調器、偏向器などの素子を必要とする。結晶や半導体材料ではこれらの機能の実現のため電気光学効果が有力手段として利用できるのに対し、ガラス材料は同効果を示さないことが最大の欠点である。そこで制御素子の実現には次のような他材料との組合せによる方法が用いられる。

1) 音響光学素子： 導波路に表面弾性波(SAW)を伝搬させ、光弾性効果を通じて誘起される周期的屈折率変化で導波光を回折させて制御する。

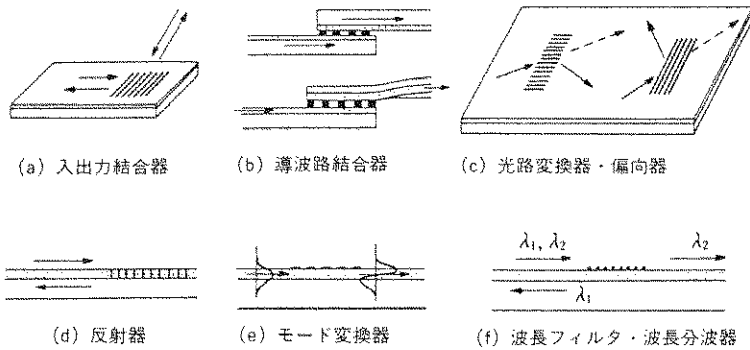


Fig. 4 各種の導波路グレーティング素子

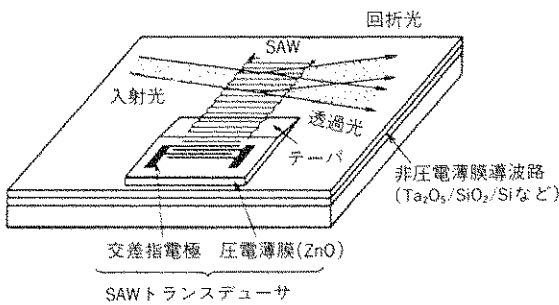


Fig. 5 導波路型音響光学ブラッグセル

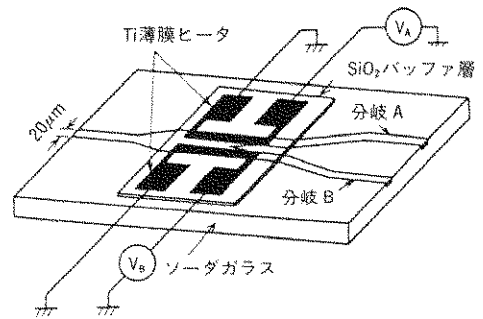


Fig. 6 Y分岐型熱光学スイッチ/変調器

Fig. 5はその例で、導波路型ブラッグセルと呼ばれ、光スイッチ/変調器や、可変偏角偏向器、空間変調器としての多くの応用がある。SAW励振のためには圧電性の基板(水晶、LiNbO₃)や薄膜(ZnO)と交差指電極を組合せたトランスデューサが用いられる。導波膜にはイオン交換、スパッタガラスやTa₂O₅、カルコゲナイドガラスなどが用いられる。

2) 熱光学素子：導波路上に金属薄膜ヒータを設けて電流を流し、発熱による温度変化で屈折率変化を誘起して光を制御する。多くのガラスの屈折率温度係数は10⁻⁵/degのオーダーであり、100°C程度の温度上昇で光制御が可能となる。素子構成にはY分岐型、分岐干渉型、カットオフ型など、電気光学素子の電極を薄膜ヒータに置換えたものが考えられている。Fig. 6にY分岐型の光スイッチ/変調器を示す²⁶⁾。

3) 液晶素子：ネマチック液晶セルに電界を印加すれば液晶の分子軸回転により屈折率が大きく

変化するので、ガラス/液晶境界での光の全反射を制御してスイッチングができる。多段光スイッチ²⁷⁾やマトリクススイッチ²⁸⁾が作製されている。

4) 半導体素子：半導体レーザダイオードは、注入電流の大小により光の透過をON/OFF制御する光ゲートとして利用できる。このような光ゲートを石英系導波路と組合せたマトリクス光スイッチが作製されている²⁹⁾。

4. 光集積回路の例

光ICには同種の素子を複数集積したものと、複数種の素子を組合せ集積したものがある。以下には後者の例を紹介する。

1) 多重光通信用波長分波器：光ファイバ通信の伝送容量増大のための波長多重(WDM)法の受信端末に必要な波長分波器は、波長分散素子としてのグレーティングとレンズ機能の集積化で実現でき、レンズ機能の実現法により種々の構成が考えられている。サンドイッチガラス板導波器と凹

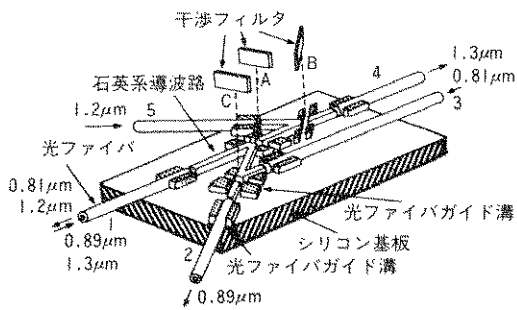


Fig. 7 石英系ガラス導波路を用いた光波長合分波器

面グレーティング³⁰⁾、パターン化イオン交換導波路とチャープグレーティング³¹⁾、ジオデシックレンズとブラックグレーティングを組合せたもの³²⁾などが作製されている。As₂S₃/SiO₂/Si 導波路を用いてグレーティングアレイ分波器とフォトダイオードをモノリシック集積化したデバイスも作製されている³³⁾。分波素子として上記のようなグレーティングの他に干渉フィルタを用いることもできる。Fig. 7は、火焰堆積法と反応性イオンエッチング加工で作製した石英系導波路に干渉フィルタ

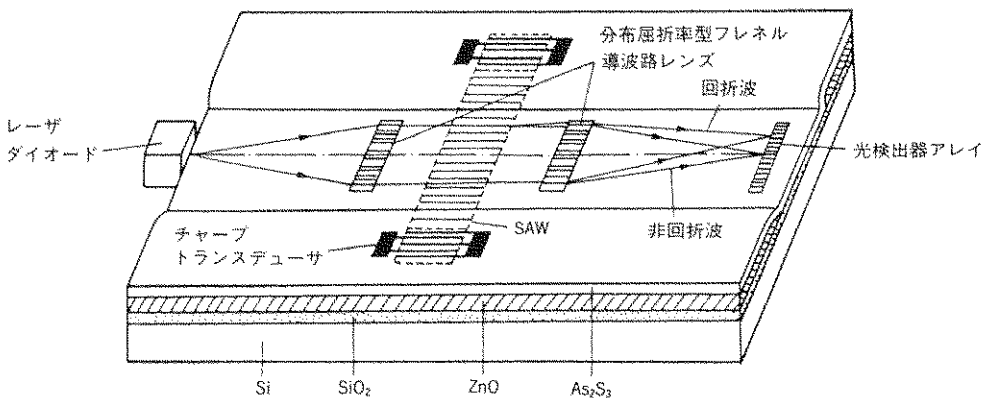


Fig. 8 カルコゲナイドガラス導波路を用いた光集積高周波スペクトルアナライザ

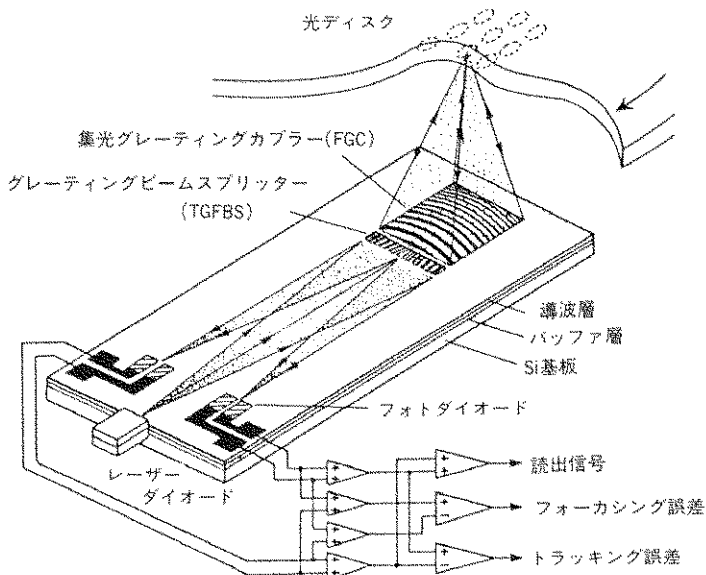


Fig. 9 ガラス/SiO₂/Si 導波路を用いた光集積ディスクピックアップ

を組み込んで構成した多モード用4波光波長合分波器を示す³⁴⁾。

2) 高周波スペクトルアナライザ： 導波型音響光学グラグセルと導波光コリメート用、フーリエ変換用の2個の導波路レンズを集積化することにより、高周波信号のスペクトルを実時間で高速分析するデバイスが実現できる。スペクトル信号はフーリエ変換レンズの焦点面に光強度分布の形で得られ、光検出器アレイで読み出される。Fig. 8はAs₂S₃/SiO₂/Si導波路にグラグセルとフレネルレンズを集積化したスペクトルアナライザを示す³⁵⁾。As₂S₃ガラスは大きな音響光学良度指数をもつので低駆動電力、高効率のブラックセルを実現できる利点があり、集積化に必要なレンズも電子ビーム直接書込み法により作製できる。Si₃N₄/SiO₂/Si導波路を用いた同種のデバイスも作製されている³⁶⁾。

3) 光ディスクピックアップ： Fig. 9は、光ディスクからの情報読出しと、フォーカシング誤差・トラッキング誤差検出の機能をもつ光集積ディスクピックアップを示す³⁷⁾。デバイスは#7059/SiO₂/Si導波路上に集光グレーティングカップラ(FGC)、グレーティングビームスプリッタ(TGFBS)およびフォトダイオード(PD)を集積化して構成されている。FGCは周期変化をもつ曲線グレーティングであり、端面結合したレーザダイオードからの発散導波光をディスク上に集光する。ディスクからの反射光はFGCにより再び導波路内に結合され、TGFBSにより波面分割・光軸分離(偏向)されて2つの検出点に集光される。4個のPDからの光電流を和差演算することにより、読出し信号、誤差信号が得られる。また同デバイスの変形により、磁気光学ディスク用ピックアップ³⁸⁾や干渉型位置センサ³⁹⁾も作製されている。

5. むすび

ガラス材料の光集積回路への応用を概観した。本文で述べたように、ガラス材料は受動素子を中心として多くの重要な応用がなされているが、現状では能動素子や光制御素子の実現が困難なことが制限要因となっている。今後、レーザーガラス

や非線形光学効果ガラスなどのニューガラス材料の発展と光集積回路への新しい応用の展開が期待される。

参考文献

- 1) 西原, 春名, 栖原, “光集積回路”, オーム社 1985.
- 2) T. Findakly, Opt. Eng., **24**(1985)244.
- 3) T. J. Cullen, et al., Appl. Phys. Lett., **49** (1986)1403.
- 4) J. T. Boyd, et al., Opt. Eng., **24**(1985)230.
- 5) S. Dutta, et al., J. Appl. Phys., **52**(1981)3873.
- 6) M. Kobayashi, et al., Appl. Opt., **22**(1983) 3121
- 7) J. E. Goell, et al., Appl. Opt., **12**(1973)737.
- 8) S. J. Ingle, et al., Appl. Opt., **14**(1975)2194.
- 9) R. L. Aagard, Appl. Phys. Lett., **27**(1975) 605.
- 10) M. Kawachi, et al., Jpn. J. Appl. Phys., **22** (1983)1932.
- 11) Y. Yamada, et. al., Appl. Opt., **24**(1985) 454.
- 12) W. Staius, et al., Appl. Opt., **16**(1977)3218.
- 13) S. Sriram, et al., Appl. Opt., **22**(1983)3664.
- 14) D. K. W. Lam, Appl. Opt., **23**(1984)2744.
- 15) 福田ほか, 昭63春応物連合講演会, 28p-ZH-9.
- 16) R. D. Standley, et al., Appl. Opt., **11**(1972) 1313.
- 17) D. E. Zelmen, et al., Appl. Phys. Lett., (1985)353.
- 18) 栖原ほか, 応用物理, **52**(1983)234.
- 19) H. Nasu, et al., Opt. Eng. **26**(1987)102.
- 20) N. F. Borrelli, et al., IEEE J. Quantum Electron, **QE-22**, (1986)896.
- 21) K. Henberger, et al., Appl. Opt., **25**(1986) 1499.
- 22) Y. Kokubun, et al., Appl. Opt., **24**(1985) 4408.
- 23) Y. Yamada, et al., Appl. Opt., **20**(1984)589.
- 24) E. Okuda, et al., Appl. Opt., **23**(1984)1745.
- 25) T. Suhara, et al., IEEE J. Quantum Elec-

tron., **QE-22**(1986)845.

- 26) M. Haruna, et al., Appl. Opt., **21**(1982) 3461.
- 27) 沢田ほか, 信学技報, OQE81-116(1982).
- 28) M. Kobayashi, et al., IEEE J. Quantum Electron., **QE-18**(1982)1603.
- 29) M. Kobayashi, et al., IOOC/ECOC'85 (1985)73.
- 30) R. Watanabe, et al., Appl. Opt., **11**(1980) 3588.
- 31) T. Suhara, et al, Appl. Opt., **21**(1982)2159.
- 32) 高見ほか, 昭 61 信学総合全大(1986)1050.
- 33) T. Suhara, et al., Appl. Phys. Lett., **40** (1982)120.
- 34) M. Kawachi, et al., Electron. Lett., **21** (1985)314.
- 35) T. Suhara, et al., IEEE J. Lightwave Tech., **LT-1**(1983)624.
- 36) S. Valette, et al., Electron. Lett., **19**(1983) 883.
- 37) S. Ura, et al., J. Lightwave Tech., **LT-4** (1986)913.
- 38) H. Sunagawa, et al., Int. Symp. Opt. Memory, (1987)FA7.
- 39) T. Suhara, et al., CLEO'87(1987)FQ3.

〔筆者紹介〕



栖原 敏明 (すはら としあき)
昭和 48 年 大阪大学工学部電子
工学科卒業,
昭和 53 年 同大学大学院博士課
程修了 (工学博士),
現在, 大阪大学工学部電子工学科
助手

〔筆者紹介〕



西原 浩 (にしはら ひろし)
昭和 35 年 大阪大学工学部通信
工学科卒業,
昭和 40 年 同大学大学院博士課
程修了 (工学博士),
現在, 大阪大学工学部電子工学科
教授

Abstract

Applications of new glasses to optical integrated circuits are reviewed from the viewpoint of material and fabrication technology. At first fabrications and optical features of various glass waveguides (ion-exchanged waveguides, sputtered-glass waveguides, and CVD-glass waveguides, as well as amorphous thin-film waveguides) are discussed. Then passive components (channel guides, waveguide lenses, grating components) and devices for optical-wave control (acoustooptic and thermooptic devices) are outlined. Finally, examples of optical integrated circuits based on glass materials, i.e., wavelength demultiplexers for optical-fiber transmission system, radio-frequency spectrum analyzers, optical-disc pickups, etc., are described.