

石英系プレーナ光波回路

NTT 光エレクトロニクス研究所 中原 基博

Planar Lightwave Circuit

Motohiro Nakahara

Opto-electronics Laboratory, Nippon Telegraph and Telephone Corp.

1. はじめに

光ファイバ通信システムが世の中に出現して以来、既にかかなりの年月を経た。しかし、これまでのところそれは大容量・長距離・中継系への適用がほとんどであり、多くの結合点を含み面的な広がりを持つ光加入者やCATVなどへの利用は、世界的にみてもまだ十分でなく、これからの展開が期待されている状況にある。その理由は種々あるが、技術面で挙げると特に、一本の光ファイバを伝わってきた光信号を複数の加入者に分配したり、ループ状のネットワークに多くのユーザがアクセスできるようにするための小型・経済的・高信頼の光部品が実現していなかったことが大きな理由の一つと考えられる。表題の石英系プレーナ光波回路は、こうした部品サイドの課題を解決する有望候補の一つと位置づけられる。

本稿では、光部品の現状、石英系プレーナ光波回路(PLC: Planar Lightwave Circuit)の概略・特徴、将来への展望を述べる。

2. 光部品の現状と石英系プレーナ光波回路の概略

2.1 光部品の現状

光部品は、Fig. 1に示すように、一般的に、プリズム等の光学部品を利用して組み上げるバルク型、光ファイバの一部を微小加工したファイバ型、本稿で述べるプレーナ型に分類できる。これら3

種類の部品の特徴を、光部品としては最も単純な機能である、 $1 \times N$ 分岐、既ち、1本の光ファイバで来た光信号をN本に分岐する回路を例に比較してみる。

バルク型部品は、機能的には十分動作し、光学特性は優れるが、鏡やレンズを各家庭や電柱に取り付けることになり、信頼性、経済性に難点がある。更に、 1×4 、 1×8 …などへの規模拡大は実用上殆ど不可能である。

光ファイバ型部品では、 1×2 などの小規模部品では一応、性能、信頼性、経済性は満足し、一部実用にも供されている。しかしながら、これが 1×4 、 1×8 分岐へ規模拡大すれば幾何関数的にそのサイズ、価格が上昇し、また振動などの機械的信頼性を確保するととなると困難を極めることとなる。

2.2 PLC¹⁾の概略

簡単には、基板の上に石英ガラスで光導波回路を作ったものと言って良く、光ファイバを低損失に作製する技術とLSI分野の微細加工技術を厚膜領域に発展させた技術の融合の結果、生まれた技術と考えれば良い。

Fig. 2に示すように、PLCは光の通路を完全にガラスの中に埋め込み、平板状にしたものであり、機械的に高信頼であると共に、製法には半導体分野のリソグラフィー技術を取り入れているため、小型、規模拡大容易、量産による経済効果大など

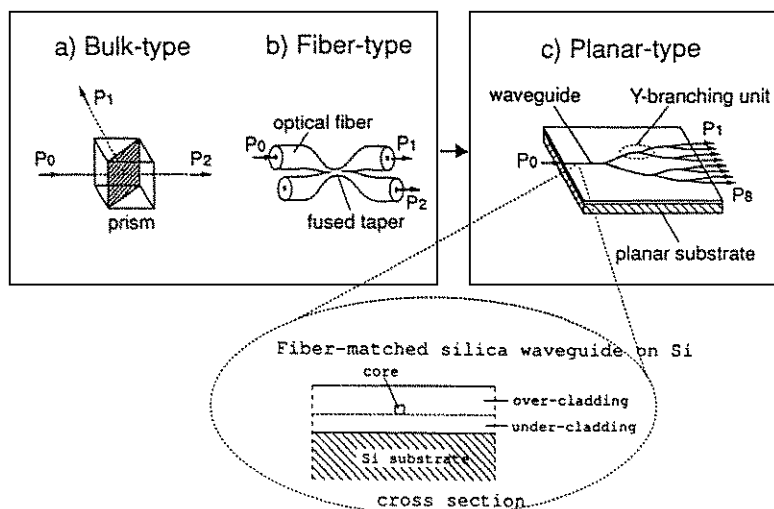


Fig. 1 Three configurations for passive devices

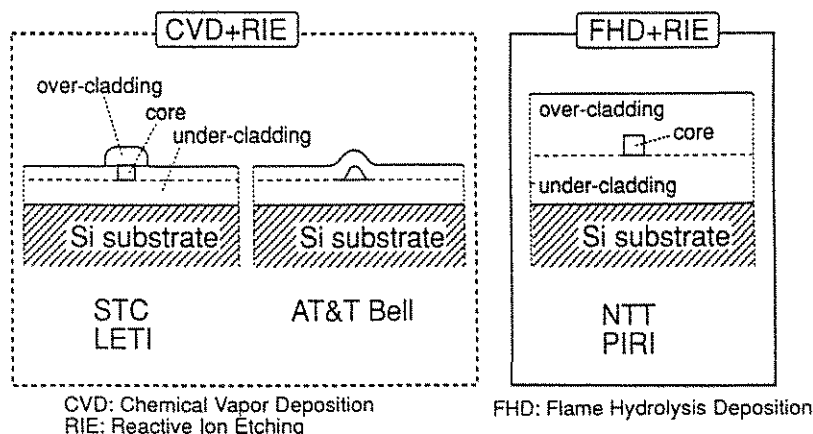


Fig. 2 Silica Waveguide Structure

多くの点で従来型部品に無い優れた特徴を持つ。エレクトロニクスの分野との対比で、バルク型部品を真空管、光ファイバ型部品をトランジスタに例えるならば、PLCはICまたはLSIに相当すると思われる。

また、PLCは後述するように、単に光強度を分岐するだけでなく、光の持つ波としての特性を積極的に利用する回路への適用も得意とすることから光波回路とも呼ばれている。

3. PLC 作製技術

3.1 PLC 用材料

これまで研究開発されてきたガラス系 PLC 材料を Table 1 に示す。通常 PLC には基板が必要であり、基板上に形成されたガラス膜を加工して光回路を形成する。基板として透明なガラスを使用する場合には基板内に直接光回路を形成することも可能である。Si の結晶基板は、将来、電子回路/光回路を同一基板上に形成する可能性を秘めているため最も魅力的であると思われる。石英ガ

Table 1 Materials for PLC

コアガラス組成	導波路	作製方法
$\text{SiO}_2 \cdot \text{GeO}_2$	単一モード	Plasma CVD
	//	FHD
	多モード	FHD
$\text{SiO}_2 \cdot \text{P}_2\text{O}_5$	単一モード	LPCVD
	//	Plasma CVD
$\text{SiO}_2 \cdot \text{TiO}_2$	単一モード	FHD
$\text{SiO}_2 \cdot \text{Ta}_2\text{O}_5$	単一モード	スパッタ
AsG	単一モード	PECVD
$\text{SiO}_2 \cdot \text{Si}_3\text{N}_4$	単一モード	
Al_2O_3	単一モード	スパッタ

ラスファイバと PLC との接続・材料的整合を考えれば、光回路そのものも石英ガラスで形成することが適していると考えられる。但し、将来の光プリントボード、インターコネクションなど他の技術分野の進展状況によっては、Si 基板-石英ガラスの組合せ以外にもプラスチック材料も含めて多くのものが使われることも考えられる。

石英ガラスの中に導波構造を形成するためのドーパントとしては、Ge, Ti, As 等が使われる。

3.2 Si 基板上の PLC の製法

PLC は半導体 LSI と概念的に類似なものであるため、それを実現するプロセスも似通ったものとなる。設計から具体的部品実現までの流れを Fig. 3 に示す。PLC 部品の光回路がマスク上に描かれた後の工程が通常の部品作製工程である。

これは原理的には、光ファイバ製造方法の一種である VAD 法を利用して Si 基板上に形成した石英ガラス膜を、LSI の超微細加工技術で多用される反応性イオンエッチング (RIE: Reactive Ion Etching) の手法で加工し光回路とする工程から成る。コアの屈折率を高くするため、Ti, Ge などをドーパントとして用いる点や、堆積したスート (多孔質なガラス微粒子) を透明にする方法などは光ファイバ母材作製の場合と良く似ている。但し、PLC の場合ガラス膜を直接にファイバのコア寸法に加工するため光ファイバ作製よりも遙かに高精度加工技術が必要になる。Fig. 4 に導波路の

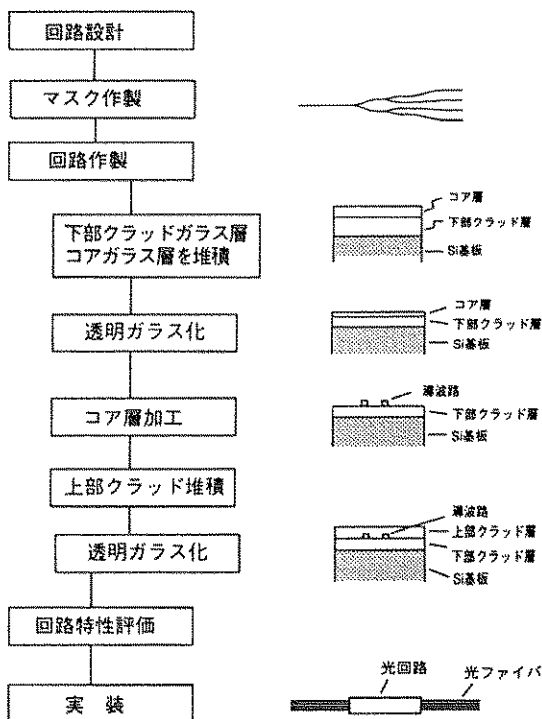


Fig. 3 Procedure for PLC fabrication

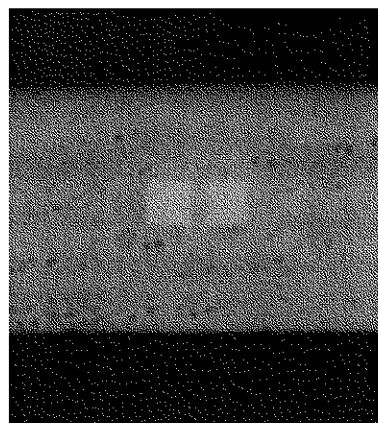


Fig. 4 Cross sectional view of the waveguide

断面写真を示す。コア形状が単純な矩形であることが特徴的であり、このことは光回路設計を容易にしてくれる。

Si 基板上に形成された PLC を回路規模で見ると、小さな同種回路を一枚のウエファに多数並べた場合と、フルウエファ全体で 1 回路という大規

模の場合がある。いずれの場合にも導波路端面を切断し、ファイバを接続しなければならない。PLCとファイバの接続固定には、接着剤固定、レーザ溶接など種々の手法がある。これらは実装と呼ばれる領域であるが、最終的に信頼性の高い実用的な光部品を作製する上では重要な工程である。

4. PLC 部品

PLC 型部品では光の強度のみを考えて、単純にその道筋を空間的に分岐、合波する回路から始まって、位相をフルに利用したトランスバーサルフィルタまで幅広い部品が開発されている。以下、いくつかの代表的な光回路について具体的に説明する。

4.1 基本回路

Fig.5にPLCの基本または要素と考えられるパターンを示す。実際の部品はこれらの組合せや集積、変形などにより実現される。

a) 1×N ツリー状スプリッタ

同じ光信号を複数の出力に分岐したい時に有効な回路であり、Y分岐をツリー状に多段に接続することによって作製される。Y分岐部では入力された光が半分、3dBに分けられる。段数1, 2, 3に対応して、2分岐、4分岐、8分岐の回路ができる。Fig.6に1×8カプラの特性例²⁾を示す。3dB×3=9dBは原理的な分岐損失として避けられない値である。この値を考慮すると平均分岐損失9.57dBは十分低いと言える。分岐バラツキが小さい

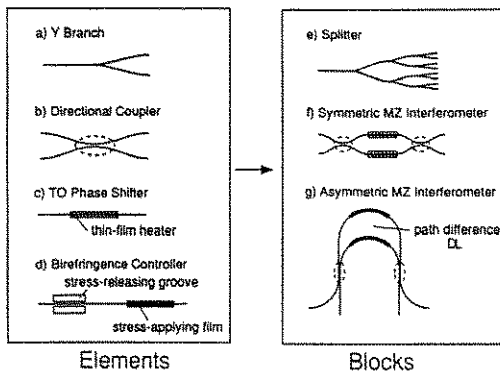


Fig. 5 Fundamental circuits

ことも望まれるが、この報告では最大バラツキが0.46dBである。

b) N×N スターカプラ

N本のいずれの入力ポートから入射した場合にも、出力側のいずれのポートからも同じ光信号が出てくるような機能を持つ回路である。Fig. 7には導波路のレイアウトと光伝搬法(BPM: Beam Propagation Method)でシミュレートした結果を示した。全体は複数の導波路群、光を均一に分布させるためのスラブ状導波路領域から成る複数名形をしているが、作製に先だって回路特性を計算しておくことによって効率的な回路設計・作製ができる。これには、前述したように、コア形状がきれいな矩形であることが反映している。16×16カプラでは平均損失14.4dB程度の分岐損失が得られている。規模拡大は、方式要求、実装技術等とも関連するが、これまでに、128×128スターカプラまでの報告³⁾がある。

(2) フィルタ

a) 波長分離多重フィルタ⁴⁾

フィルタを構成する上でFig. 5(b)に示す方向性結合器は重要な基本要素である。2本の導波路が近づき合うとお互いに干渉しあうようになる。

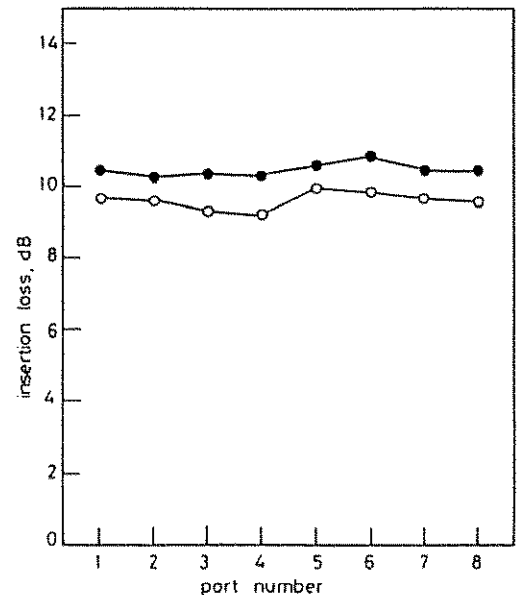


Fig. 6 Characteristics for a 1×8 splitter

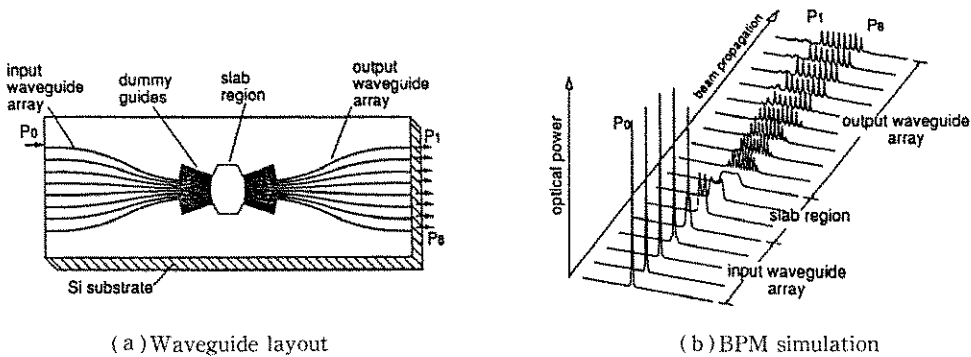


Fig. 7 8×8 star coupler design

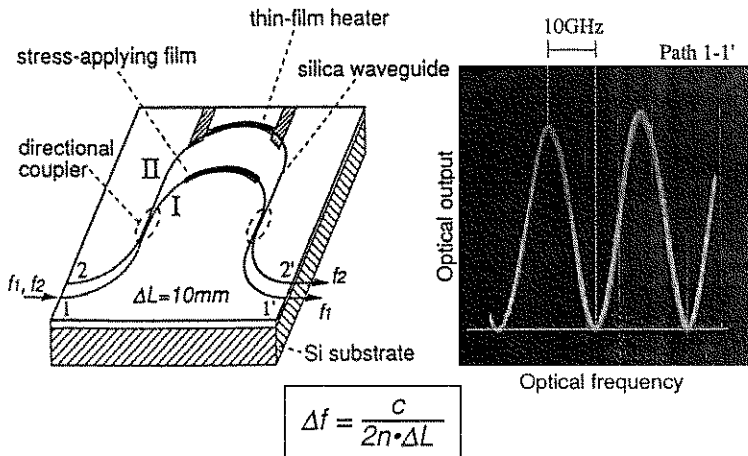


Fig. 8 Frequency response of a Mach-Zehnder filter

即ち、一方の導波路を伝搬する光の一部が他方に移るようになる。その移る割合は結合係数と呼ばれ、導波路自身のパラメータ、2本の導波路の間隔、伝搬する光の波長によって変わる。波長に対する正弦関数的な振る舞いを利用することによって波長分離フィルタが実現できる。あるいは、次項で述べるマッハツェンダ干渉計を利用しても良い。

b) 周波数分離多重フィルタ¹⁾

上述の方向性結合器を2つを光路長差 ΔL で繋いだ回路がマッハツェンダ干渉計と呼ばれる回路

である。方向性結合器の結合係数を50%にしておくと、光路長差に応じたフィルタ特性を得ることができる。Fig. 8に、光路長差 ΔL が10mmで周波数間隔10GHzの周波数分離フィルタ例を示す。100波周波数多重光伝送実験で基本的な特性、動作が確認されている。

c) アレー回折格子⁵⁾

Fig. 9に示すように両端のスラブ状導波路とアレー状の導波路群から成り、隣合う導波路間には一定の光路長差を設けてある。アレー導波路で生じる位相差のため、出力側スラブ導波路入口では

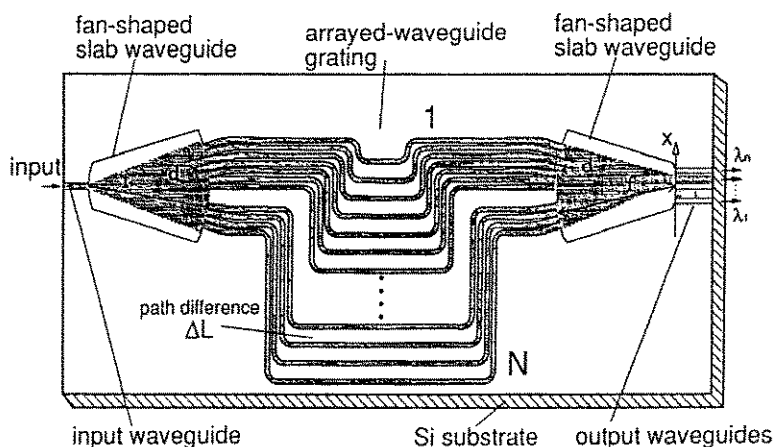


Fig. 9 Arrayed waveguide grating for a dense WDM

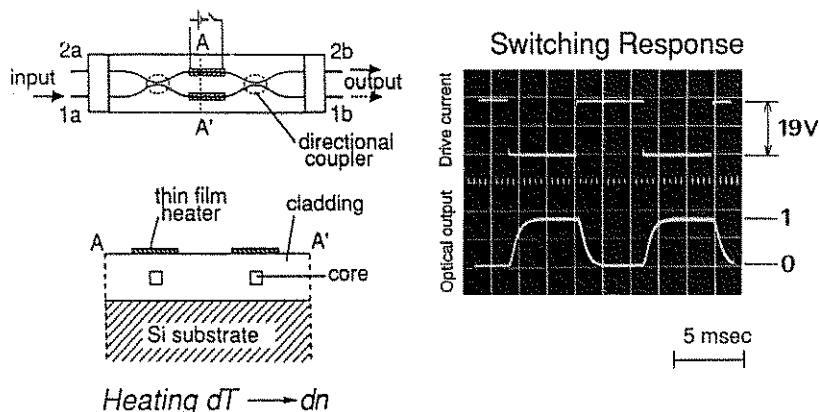


Fig. 10 2×2 Thermo-optic switch

波面が傾くことになるが、この傾き具合が波長によって異なるため、別々の出力導波路から取り出すことができる。波長 $1.3\ \mu\text{m}$ 帯で波長多重間隔 $1\ \text{nm}$ 、多重数 28 チャネルを隣接チャネル抑制比 $-15\ \text{dB}$ 以上で分波する回路が作製されている。

d) アクセッサ

PLC 回路はオフィスビルや工場での高速 LAN にも適用領域を見いだすことが出来る。概念的には、中心に位置するリング状導波路にアクセス端末の 2 倍の方向性結合器を付けたものが基本構成と思えば良い。ある端末に方向性結合器を通して入ってきた光信号を O/E 変換し、必要に応じて情報を処理した後、E/O 変換して隣の端末に送る。

中心のリング状導波路には3~9 dB 弱い光信号が流れており、ある端末が故障した場合にはこの微弱信号が使われる。

(3) 光路切り替えスイッチ

a) 2×2 熱光学スイッチ⁶⁾

石英ガラスは前述のように、いろいろな意味で安定な材料であり、変化させることは基本的には得意ではないが、熱光学効果を利用して、光スイッチング等の機能を持たせることができる。本スイッチは Fig. 10 に示すように、マッハツェンダ干渉計の片側のアームにヒーターを搭載した構造となっている。ヒータをオフの時に光路差が零、ヒータをオンにすると π となるように設計して

おくことにより、スイッチングが可能となる。スイッチング速度は1ms程度であり、時分割的な用途には不向きであるが、空間的なルート切り替えには十分な速度である。消費電力は0.5mW程度である。

b) 8×8 熱光学スイッチ⁷⁾

通信システムの全光化の実現には、光交換、光回線切り替え用の大規模光スイッチが必要不可欠である。本スイッチは入力8、出力8で互いに全く独立に切り替えが出来るタイプのスイッチである。前項2×2熱光学スイッチ64個、ヒータは搭載せず切り替え機能は持たない全体の損失バランス調整用類似回路48個から成り、ガラス系導波回路の集積度としては世界最大規模である。実際の回路はFig.11に示すように、限られた面積のウェファ内に入れる必要があることから、つづら折り状に配置している。波長1.3μmで動作し、挿入損失は11dB、消光比は20dB、スイッチ速度は1.3msである。将来の光交換を目指した方式研究の中で検討が進められている。

c) ゲートスイッチ⁸⁾

いくつかのタイプのスイッチが考えられているが、その中で、光をオンオフするゲートと光分岐・

合波回路によって構成される光ゲートマトリックススイッチは、情報同時分配機能を持つため、将来の広帯域画像通信には有望な回路である。ゲートに半導体レーザを、分岐・合波にはPLCを用いたゲートスイッチが研究されており、4×4の規模までの回路の報告がある。

6. 将来への展望

本稿では、Si基板上に石英ガラスを用いて作製するPLCについて、作製技術、基本回路、応用回路の現状を概説した。光ファイバと接続可能な状態にした光部品には、信頼性・コストからの検討も不可欠であり、今まさに研究が進展中であるが別の機会に譲りたい。

PLCは現時点では光通信、光交換の分野を中心に研究が進められているが、その特徴、潜在的なメリットから、通信・交換のみならず、将来的には、光情報処理、光計測、光センサなど多くの分野に展開することも可能である。本稿では触れなかったフォトリフレクティブ効果、光増幅等の非線形効果に関する研究も進展中であり、研究分野の新たな展開も期待される。

関連技術の進展と合わせて、着実な進展を図り、

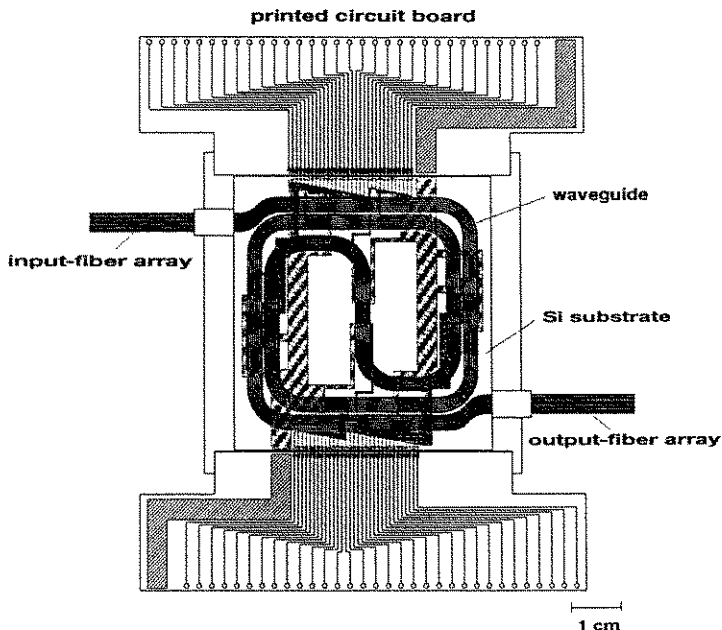


Fig. 11 8×8 Thermo-optic switch

21世紀の光社会実現に貢献できればと考えている。

参考文献

- 1) M. Kawachi; Optical and Quantum Electronics, 22, 391 (1990)
- 2) S. Kobayashi, T. Kitoh, Y. Hida, S. Suzuki and M. Yamaguchi, Electron. Lett., Vol. 26, No. 11, pp. 707-708 (1990)
- 3) K. Okamoto, H. Okazaki, Y. Ohmori and K. Kato, OEC' 92
- 4) N. Takato, T. Kominato, A. Sugita, K. Jinguji, H. Toba and M. Kawachi, IEEE, J. of Selected Areas in Comm., Vol. 8, No. 6, p. 1120 (1990)
- 5) H. Takahashi, I. Nishi and Y. Hibino, Electron. Lett., Vol. 28, No. 4, pp. 380-381 (1992)
- 6) N. Takato and A. Sugita, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 172, p. 253 (1990)
- 7) A. Sugita, M. Okuno, T. Matsunaga, M. Kawachi and Y. Ohmori, ECOC' 90, WeG41 (1990)
- 8) 照井, 山田, 大森, 姫野, NTT R & D, Vol. 38, No. 6, p. 641 (1989)

〔筆者紹介〕



中原 基博(なかはら もとひろ)
昭和44年 九州大学理学研究科修士課程終了
同年 日本電信電話公社入社
現在 日本電信電話株式会社, 光エレクトロニクス研究所
光複合部品研究部長
理学博士

〔連絡先〕

〒319-11 茨城県東海村白方白根162
NTT 光エレクトロニクス研究所
光複合部品研究部
TEL 0292-87-7400

Abstract

Planar Lightwave Circuit technology and some optical devices for optical communication systems are reviewed in the article. PLC technology is a successful result of a marriage of Flame Hydrolysis Deposition method for optical fiber fabrication and Reactive Ion Etching technique in the field of LSI patterning. PLC devices ranges from Y-branch type 1×8 splitters, 128×128 star couplers to 8×8 non-blocking thermo-optic switches. Further studies are hoped to be carried out for realization of the Fiber-to-the-home system in the next 21st century.