

## 最近の光デバイスと光設計

岡本勝就

石英系光波回路 (planar lightwave circuit: PLC) は、基板上に作製されるために安定性および量産性に優れており、さらに低損失かつ光ファイバーとの整合性が良い等の特徴を有しており、今後の光通信システムを構築するうえで重要な光部品である<sup>1)</sup>。また、PLC は理論設計との整合性が高く、光の位相や空間的・時間的な多光束干渉を利用した複雑で高度な機能を有する種々の光デバイスが研究開発されている。

ここでは、主に WDM (wavelength division multiplex) 用のアレイ導波路格子型合分波器、プログラマブル光周波数フィルターを用いた分散等化器およびハイブリッド集積デバイスを中心にして、PLC の最近の進展および将来の展望について述べる。

### 1. 光導波路作製技術

石英系光導波路はシリコンまたは石英基板の上に火炎堆積法 (flame hydrolysis deposition: FHD) を用いてクラッドおよびコアガラスを堆積し、マスクプロセスおよび反応性イオンエッチング (reactive ion etching: RIE) を用いて所望の導波路パターンを形成したものである。コアの比屈折率差は光ファイバーと同程度の  $\Delta = 0.3 \sim 0.75\%$  であり、コアサイズはモードフィールド径が光ファイバーと整合するように決められている。導波路の最小曲げ半径（曲げ損失が 0.1 dB 増加する値）は、 $\Delta = 0.3\%$  の場合 25 mm,  $\Delta = 0.75\%$  の場合 5 mm である。大規模な PLC 回路を作製するためには、曲げ

半径の小さい 0.75% $\cdot\Delta$  の導波路が適している。0.75% $\cdot\Delta$  導波路の損失は、3.5 dB/m 程度の値が得られている<sup>2)</sup>。

さらに低損失の導波路としては、 $\Delta = 0.45\%$  の導波路により 1.7 dB/m の値が得られている<sup>3)</sup>。図 1 は 0.45% $\cdot\Delta$  導波路の損失を評価するためのテスト回路であり、全長は 10 m、最小曲げ半径は 15 mm である。 $\lambda > 1.6 \mu\text{m}$  以上の長波長側において TM モードの損失が TE モードに比べて 0.2 dB/m 程度高い傾向がみられるが、これは RIE プロセスにおける導波路の側壁ゆらぎのためであると考えられる。10 m 全長における TE-TM モード間のモード変換量は -20 dB 以下であり、PLC が偏波や干渉を利用するデバイスとして非常に優れていることを示している。

### 2. $N \times N$ スターカプラー

$N \times N$  スターカプラーは、自由空間における信号分配のように、波長の異なる  $N$  個の光信号を  $N$  個の受信端（入出力の数は同一である必要はない）に均一に分配するデバイスである。特に单一モードの  $N \times N$  スターカプラーは、高速の WDM ネットワークにおいて重要である。入出力チャネル導波路の中間にスラブ領域を配置した PLC 型スターカプラーは、大規模化に適した構造である<sup>4,5)</sup>。図 2 に  $N \times N$  スターカプラーの構成を示す。 $N$  個の入力導波路のいずれかに入射した光信号はスラブ導波路領域に放射され、横方向に自由に広がりながら出力導波路アレイに達する。ここで、出力導波路アレイに均一に光を分配するためにはスラブと出力導波路アレイとの境界における光分布が ( $N$  個の導波路部分でのみ) 均一でなければならない。スラブと出力導波路ア

Recent advances in optical devices and their design (1996 年 7 月 30 日受理)

Katsunari OKAMOTO NTT 光エレクトロニクス研究所  
(〒319-11 茨城県那珂郡東海村 162)

レイとの境界における電界分布は、入力導波路とスラブとの境界における電界分布のFraunhofer回折パターン(フーリエ変換)であるから、均一な電界分布を得るためにには入力導波路から隣接導波路へのモード結合によって適切なサイドロープを生じさせることが必要である。モード結合を詳細に制御するためには、コア幅をテープ状にしたりコア間隔を最適化する必要がある。

スラブ領域の半径や上記のコア間隔、テープ比等のパラメーターの最適化はビーム伝搬法(beam propagation method: BPM)を用いて行いマスクを作製した。図3は作製した $64 \times 64$ スターカプラーモジュールの波長 $1.55\mu\text{m}$ における光分配ヒストグラムである。光が

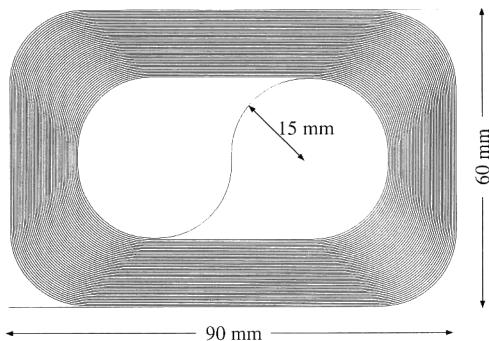


図1 10 m長導波路のレイアウト。

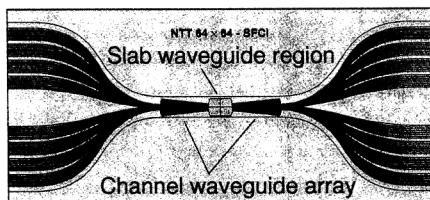


図2  $64 \times 64$ スターカプラー。

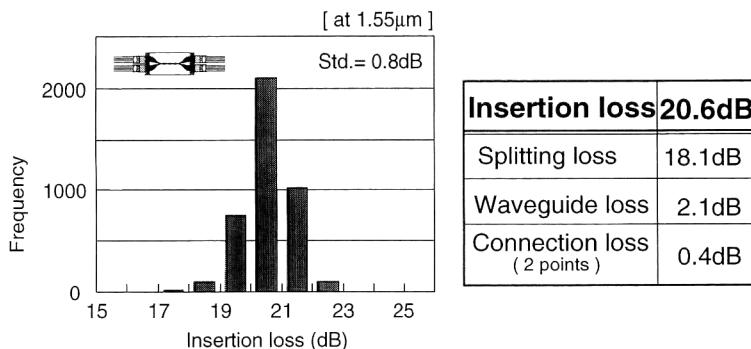


図3  $64 \times 64$ スターカプラーモジュールの光分配ヒストグラム。

64の出力導波路に均一に分岐された場合の基本的損失は $18.1(-10\log(1/64))\text{dB}$ である。したがって、各ポートの平均過剰損は $2.5\text{dB}$ 、分散は $0.8\text{dB}$ である。PLCチップへのファイバー接続は8芯テープファイバーを用いて行い、接続による過剰損は約 $0.4\text{dB}$ である<sup>6)</sup>。

### 3. アレイ導波路格子合分波器

$N \times N$ アレイ導波路格子(arrayed waveguide grating: AWG)は $N$ 個の波長の信号光を合分波するのみでなく、 $N$ 個の入出力導波路が光の波長を介して一对一に対応するために、WDMにおけるルーティング用デバイスとしても重要である<sup>7,8)</sup>。アレイ導波路格子は、図4に示すように $N$ 個の入出力チャネル導波路、2つのスラブ領域、およびそれらを結ぶアレイ導波路となる。アレイ導波路の導波路長は外側ほど順次 $\Delta L$ ずつ長くなっている。波長に依存して等位相面の傾きが異なるように設計されている。第二スラブと出力導波路境界における光の焦点位置の中心からの距離を $x$ とすると、焦点位置の分散は

$$\frac{dx}{d\lambda} = \frac{fm}{nsd} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $f$ はスラブの曲率半径、 $ns$ はスラブの等価屈折率、 $d$ は第二スラブと出力導波路境界における導波路間隔である。式(1)において $m$ は回折次数であり、 $m = n_c \Delta L / \lambda$ で与えられる。ここで、 $n_c$ はアレイ導波路の等価屈折率である。WDM信号のチャネル間隔を $\Delta \lambda$ とすると、式(1)より各信号光の焦点位置間隔 $\Delta x$ (出力導波路の間隔)が決定される。さらに、導波路の間隔 $d$ および $\Delta x$ を一定にした場合には、 $\Delta \lambda \propto 1/f \Delta L$ となりチャネル間隔 $\Delta \lambda$ は光路長差 $\Delta L$ に逆比例することがわかる。図5、6は $15\text{nm}$ 間隔-8ch

AWG ( $\Delta L = 12.8 \mu\text{m}$ ), および  $0.4 \text{ nm}$  (50 GHz) 間隔-64 ch AWG ( $\Delta L = 63 \mu\text{m}$ ) の分波特性の測定結果である<sup>9)</sup>。また、表1は各種AWGの導波路パラメーターおよび特性をまとめたものである。これらの図表より作製したAWGの他チャネルへのクロストークは-27 dB以下、チップ損失は2.1~3.1 dB程度であることが示される。表1の括弧内の数字は中心波長  $\lambda_0$  の設定値お

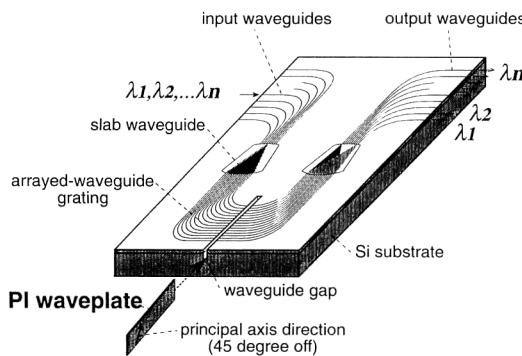


図4 アレイ導波路格子合分波器。

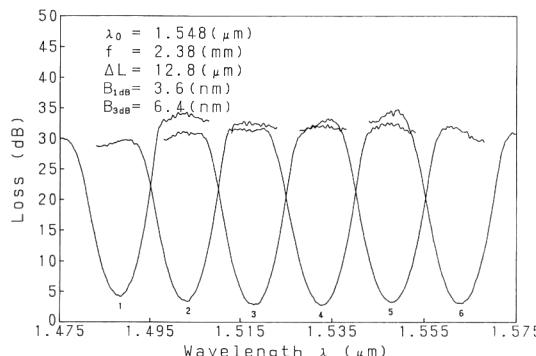


図5 15 nm 間隔-8 ch AWG の分波特性。

より3 dB 帯域幅の計算値であり、作製された素子の特性はこれらとよく一致していることが確認される。したがって、中心波長  $\lambda_0$ 、チャネル間隔  $\Delta\lambda$ 、および3 dB 帯域幅等が指定された場合、数値解析によってかなり精度良く AWG の回路設計を行うことが可能であることがわかる。

基板にシリコンを用いるPLCにおいては、アレイ導波路の等価屈折率  $n_c$  は応力誘起複屈折のためにTEとTMモードで異なる値となる。この複屈折性はAWGの通過特性に偏波依存性をもたらすため好ましくない。我々は図4に示すように偏波依存性を取り除くために薄い(14.5 μm)ポリイミドのλ/2板<sup>10)</sup>をアレイ導波路の中間に挿入している<sup>11)</sup>。λ/2板によってTEとTMモードが入れ替えられるためにアレイ導波路全体では偏波無依存化が図られる。λ/2板の挿入による損失増加は約0.4 dB程度である。

通常、アレイ格子の通過帯域特性は放物線状であるためにレーザーの波長をアレイ格子の通過中心に正確に合わせる必要があり、厳しい波長制御や温度制御が要求さ

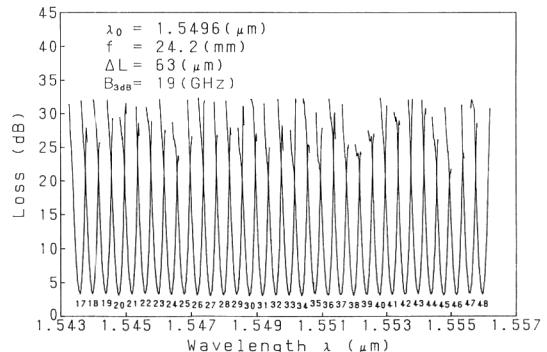


図6 0.4 nm (50 GHz) 間隔-64 ch AWG の分波特性。

表1 作製した各種 AWG の特性。

Parameters	Experimental & theoretical results			
	Number of channels $N$			
	8	16	32	64
Center wavelength $\lambda_0$ (Designed value) (μm)	1.5476 (1.548)	1.5521 (1.552)	1.5498 (1.550)	1.5467 (1.547)
Channel spacing $\Delta\lambda$ (nm)	15	2	0.8=100 GHz	0.8=100 GHz
Path difference $\Delta L$ (μm)	12.8	50.3	63	30.9
Slab arc length $f$ (mm)	2.38	5.68	11.35	18.5
Diffraction order $m$	12	47	59	29
Number of arrayed-waveguides	30	60	100	140
On chip loss for $\lambda_0$ (dB)	2.4	2.3	2.1	2.8
3-dB Bandwidth (BPM simulation)	6.3 nm (6.3 nm)	0.74 nm (0.75 nm)	40 GHz (37 GHz)	44 GHz (41 GHz)
Channel crosstalk (dB)	<-28	<-29	<-28	<-29
( ), Designed values by beam propagation method.				

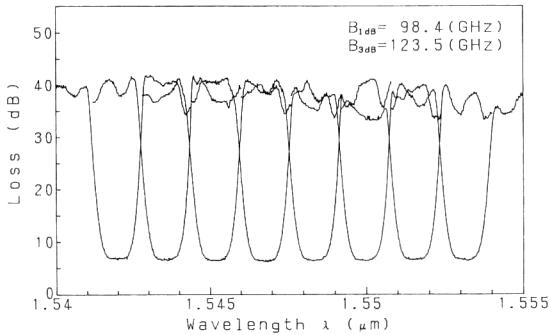


図7 200 GHz 間隔-8 ch フラット AWG の分波特性。

れる。また、AWG を多数回通過する WDM ネットワークでは、多段通過後の帯域幅が狭くなるという問題がある。したがって、AWG 単体の帯域特性を広帯域フラット化することが望まれる。AWG の広帯域フラット化の方法としては、各種の試みが報告されている<sup>12-15)</sup>。図7はAWGの入力導波路コア幅を放物線状にして光分布をフラット化することによりAWGの通過特性のフラット化を達成した例である<sup>14)</sup>。200 GHzのチャネル間隔に対して、1 dB 幅 98 GHz, 3 dB 幅 124 GHz のフラット特性が得られており、クロストークは -27 dB 以下である。チップ損失は 6.1~6.4 dB であり、通常の AWG に比べてやや高くなっている。現在までのところ、損失を犠牲にしないで広帯域フラット化する方法は報告されていない。

WDM システムにおいて分散シフトファイバーを用いる場合には、各波長の信号光がほぼ同じ速度で伝搬するため四光波混合 (four wave mixing: FWM) 等の非線形相互作用が顕著に現れる。特に、チャネル間隔が等間隔の WDM の場合には、FWM によるノイズが他のチャネルに重なるために大きな伝送特性の劣化をもたらす。この問題を回避するためにチャネル間隔を不等間隔にする WDM 方式が検討されている<sup>16,17)</sup>。

我々はこのような不等間隔 WDM に適合する不等チャネル間隔 AWG を作製している<sup>18)</sup>。図8に最小間隔 125 GHz で 8 ch の不等間隔 AWG の特性を示す。波長配置は設計どおりであり、クロストーク、損失とも良好な値が得られている。

WDM ネットワークにおいては、所望の信号を選択してこれを異なる通信路に分岐挿入する光 ADM (add/drop multiplexer) が必要となる。図9は AWG のループバック機能と熱光学スイッチ (thermo optic switch: TOSW) を組み合わせた 100 GHz 間隔-16 ch の光

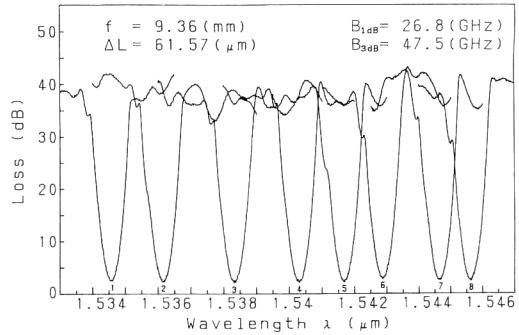


図8 8 ch 不等間隔 AWG の分波特性。

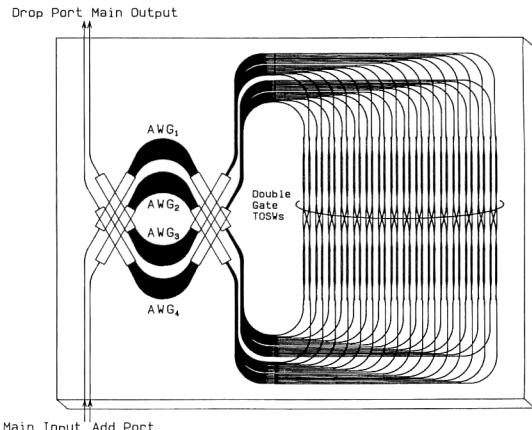


図9 100 GHz 間隔-16 ch 光 ADM の構成。

ADM である<sup>19)</sup>。 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{16}$  の WDM 信号光は、まず AWG<sub>1</sub>によって分波され各々の TOSW の左側ポートに入る。スイッチが“オフ”的場合には信号光は TOSW のクロスマームに進み、AWG<sub>3</sub>によって合波されて主出力ポートに出射する。

これに対して、選択すべき波長に対応するスイッチを“オン”にした場合には光は TOSW のスルーアームに進み、AWG<sub>4</sub>によって合波されて drop ポートに出射する。また、処理された信号光は add ポートから主出力、あるいは drop ポートのいずれかに光を挿入することができる。図10は全スイッチ“オフ”的場合について主入力ポートから主出力ポートへの伝達特性を示したものである。挿入損失は 8~10 dB であり、消光比は 33 dB 以上である。図11は no. 2, 4, 6, 7, 9, 12, 13, 15 の TOSW が“オン”的場合についての伝達特性を示したものであり、消光比は 28 dB 以上である。図10, 11 により光 ADM の基本的機能が実現されていることが確認される。

#### 4. 光分散等化器

Er ドープファイバーアンプによって光ファイバ伝送システムの損失制限が緩和された結果、伝送距離の制

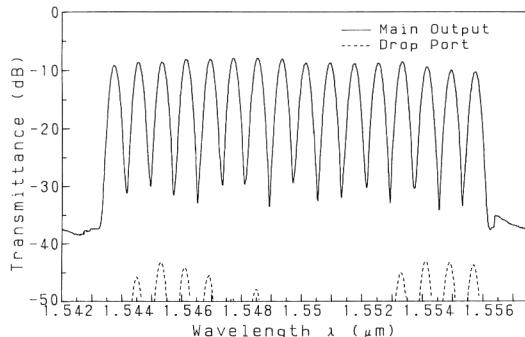


図10 全スイッチ“オフ”的場合の主入力ポートから主出力ポートへの伝達特性。

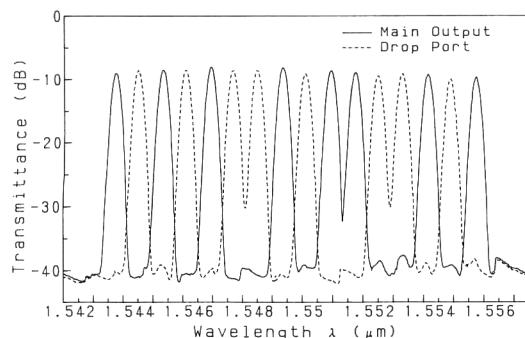


図11 no. 2, 4, 6, 7, 9, 12, 13, 15 の TOSW が“オン”的場合の主入力ポートから主出力ポートへの伝達特性。

限要因としてはファイバーの波長分散が主要なものとなっている。波長分散を補償する方法としては、ソリトン<sup>20)</sup>や位相共役<sup>21)</sup>等の非線形光学効果による方法や、線形の位相補償回路を用いる方法がある<sup>22,23)</sup>。PLC型の光分散等化器の特徴としては、(1)等化特性が周期的であるためにWDMにおける多波長等化が可能、(2)位相調整により正負の分散等化が可能という点が挙げられる。図12はPLC型光分散等化器の構成を示したものであり、基本的にはチューナブルカプラーと非対称Mach-Zehnder干渉計で構成されている。図12の格子型フィルターの伝達関数は次のようなフーリエ級数展開で与えられる。

$$H(z) = \sum_{k=0}^N a_k z^{-k+N/2} \quad (2)$$

ここで、 $z = \exp(j2\pi\nu\Delta t)$  であり、 $\nu$  は光周波数、 $\Delta t = n_c \Delta L / c$  は非対称 MZ 干渉計における単位遅延時間である。 $a_k$  はチューナブルカプラーの結合比  $\phi_k$  および非対称 MZ 干渉計の位相調整  $\theta_k$  によって複素数とすることができます。したがって、格子型フィルターの段数  $N$  を大きくとれば任意の周波数フィルターを実現することが可能となる。このため、このような光フィルターはプログラマブル光周波数フィルターと呼ばれている<sup>24)</sup>。光ファイバーの分散特性と逆の分散特性を有する光分散等化器を実現するためには、まず実現すべき周波数特性  $H(z)$  を式(2)に代入して展開係数  $a_k$  を求める。次に、フィルター合成手法<sup>24)</sup>に基づいて各段のチューナブルカプラーの結合比  $\phi_k$  および非対称 MZ 干渉計の位相調整量  $\theta_k$  が求められる。図13は作製した光分散等化器の相対遅延時間特性の測定結果を示したものである<sup>25)</sup>。複素係数  $a_k$  を変えることによって  $-923 \sim +653$  ps/nm

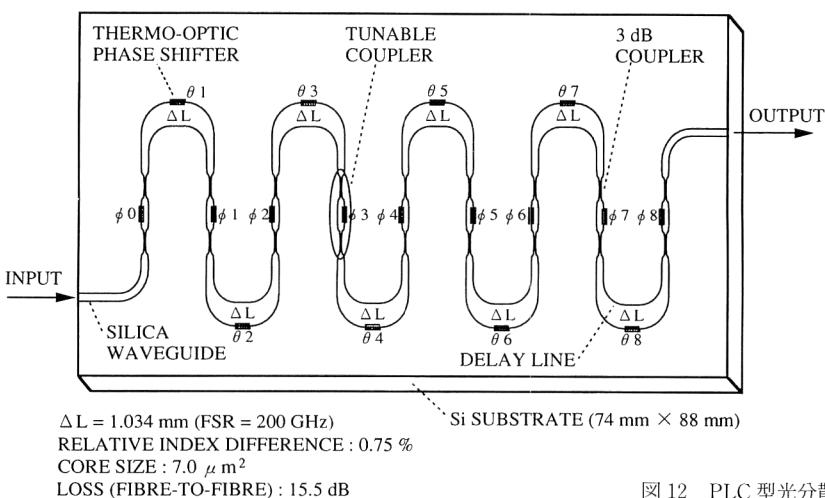


図12 PLC型光分散等化器。

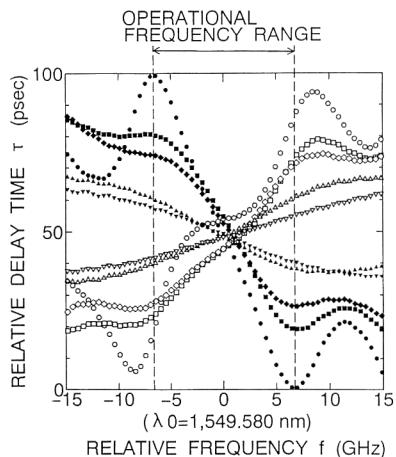


図 13 プログラムブル光分散等化器の相対遅延時間特性。●: -923 ps/nm, ○: 653 ps/nm。

の範囲で段階的に分散量が可変であることがわかる。このような適応型分散等化器を用いた異種ファイバーの分散等化実験も行われている<sup>26)</sup>。また、本フィルターを用いれば分散シフトファイバーの高次（3次）分散を補償する光等化器を実現することも可能であり<sup>27)</sup>、超高ビットレート光ファイバー通信<sup>28)</sup>における重要な光部品である。

## 5. ハイブリッド集積デバイス

これまで述べた PLC の種々の機能性に、高速変調や受発光等のアクティブな機能が加われば、PLC 単体あるいは半導体や  $\text{LiNbO}_3$  のみでは実現できない高度で信頼性の高い光信号処理機能が実現できると考えられる。

図 14 はハイブリッド光集積のための PLC プラットホーム作製プロセスを示す<sup>29)</sup>。Si 基板凸部はヒートシンクの役割を果たすと同時に、光導波路とアクティブ素子との位置決めのための高さ基準面として機能する。

さらに、電気配線は Si 基板凹部の石英クラッド上に形成される。Si 基板は高周波電気信号に対する誘電体損失が大きいために高周波電気配線基板に適さないが、このような構造とすることにより高速電気配線の形成が可能となる。図 15 はハイブリッド型  $\text{LiNbO}_3$  スイッチの素子構成を示す<sup>30)</sup>。ファイバー間損失は 6 dB であり、クロスポートおよびスルーポートの消光比は 30 dB および 21 dB である。図 16 は FTTH (fiber-to-the-home) の実現に向けて開発された WDM 光送受信モジュールの素子構成である<sup>31)</sup>。1.3  $\mu\text{m}$  の低速信号と 1.55  $\mu\text{m}$

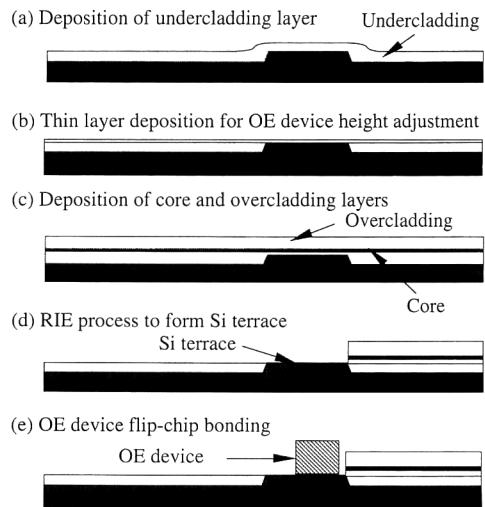


図 14 ハイブリッド光集積用 PLC プラットホーム作製プロセス。

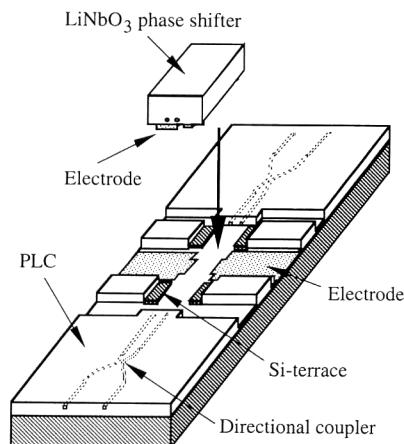


図 15 ハイブリッド型  $\text{LiNbO}_3$  スイッチ。

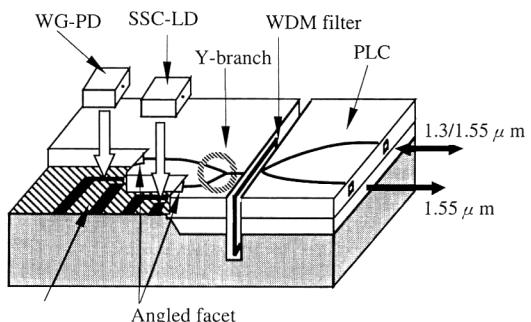


図 16 フィルター型 WDM 光送受信モジュール。

$\mu\text{m}$  の映像信号は WDM フィルターで分離される。1.3  $\mu\text{m}$  の信号送受信にはスポットサイズ変換 LD (SSC-LD)<sup>32)</sup> と導波型 PD (WG-PD)<sup>33)</sup> が用いられている。1.55  $\mu\text{m}$  の信号損失は 1.7 dB である。1.3  $\mu\text{m}$  の SS-LD と PLC の結合損は 5 dB, PLC と WG-PD の結合損は 0.7 dB 程度である。また、1.3  $\mu\text{m}$  と 1.55  $\mu\text{m}$  の分離度は 40 dB 以上である。

以上、石英系光波回路 (PLC) の最近の研究状況について紹介した。PLCにおいてはその高い導波路作製技術により、波長オーダーの光路長制御が可能であり、これを利用した各種の光デバイスが実現可能となっている。

PLC はそのよりいっそうの高度化、多様化によって、今後の FTTH 用の小規模集積低価格光部品から、次世代光波ネットワークや光交換を目指した大規模高機能光回路まで、幅広いシステムに適用されることが期待される。

日頃ご討論いただき宮部長、および部内各位に感謝します。

## 文 献

- 1) M. Kawachi: Opt. Quantum Electron., **22** (1990) 391.
- 2) Y. Hibino, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 1847.
- 3) Y. Hida, *et al.*: Integrated Photonics Research '95, Dana Point, CA (1995) IThC6.
- 4) C. Dragone, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **1** (1989) 241.
- 5) K. Okamoto, *et al.*: Electron. Lett., **27** (1991) 774.
- 6) K. Kato, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **4** (1993) 348.
- 7) H. Takahashi, *et al.*: Electron. Lett., **26** (1990) 87.
- 8) K. Okamoto, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 184.
- 9) K. Okamoto: ECOC '95, MoB 4.1 (1995) p. 75.
- 10) S. Ando, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 2143.
- 11) Y. Inoue, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **6** (1994) 626.
- 12) K. Okamoto, *et al.*: Opt. Lett., **20** (1995) 43.
- 13) T. L. Koch: ECOC '95, MoBT. 2 (1995) p. 37.
- 14) K. Okamoto, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 1661.
- 15) M. R. Amersfoort, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1996) 449.
- 16) F. Forghieri, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **6** (1994) 1374.
- 17) K. Oda, *et al.*: OFC '95 TuH 1 (1995).
- 18) K. Okamoto, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 1464.
- 19) K. Okamoto, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 723.
- 20) M. Nakazawa, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 729.
- 21) S. Watanabe, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **5** (1993) 92.
- 22) K. O. Hill, *et al.*: Opt. Lett., **19** (1994) 1314.
- 23) K. Takiguchi, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **6** (1994) 86.
- 24) K. Jinguiji, *et al.*: J. Lightwave Technol., **13** (1995) 73.
- 25) K. Takiguchi, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 1240.
- 26) K. Takiguchi, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 2192.
- 27) K. Takiguchi, *et al.*: Electron. Lett., **32** (1995) 755.
- 28) S. Kawanishi, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 816.
- 29) Y. Yamada, *et al.*: Electron. Lett., **29** (1993) 444.
- 30) Y. Yamada, *et al.*: IEEE Photonics Technol. Lett., **6** (1994) 822.
- 31) Y. Yamada, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 1366.
- 32) Y. Tohmori, *et al.*: Electron. Lett., **31** (1995) 1838.
- 33) K. Kato, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **28** (1992) 2728.