

# デジタルコヒーレント受信器を実現する 石英ガラス系平面光導波路技術

古河電気工業（株）

八木 健

## Silica-Based Planar Lightwave Circuit Technology for Digital Coherent Receiver

Takeshi Yagi

FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD. FITEL PHOTONICS LABORATORY

### 1. はじめに

#### 一位相変調方式による大容量伝送

光通信システムに求められる情報量の増大は留まるところを知らず、商用の波長分割多重システムにおける一波長あたりの伝送速度（ビットレート）は、10 Gbit/s から 40 Gbit/s へ、さらには 100 Gbit/s も視野に入ってきた。それに伴い、光に信号を載せるための変調方式は、強度変調方式から、位相変調と呼ばれる方式が主流となっている。代表的な位相変調方式が、四値位相変調方式（Quadrature Phase-Shift Keying; QPSK）式である。

### 2. 位相変調方式と受信デバイス

位相変調方式においては、信号光を PD に入力する前の段階で「光干渉回路」に入力し、光

の可干渉性を利用して位相情報を強度情報に変換する必要がある。詳細な説明は他に譲るが、干渉方法には二分岐した信号光の一方に遅延を加えて元の信号光と干渉させる遅延干渉方式と、局所発振光（Local Oscillator; LO）と信号光と干渉させる方式（コヒーレント受信方式）がある。コヒーレント受信方式は、「偏波多重」の技術と、信号光と局所発振光の位相差制御や偏波多重分離、各種分散補償などを受光後の「デジタル信号処理」により実施する技術が組み合わされ、「偏波多重デジタルコヒーレント通信方式」としてチャンネルあたりのビットレートが 100 Gbit/s 以上の次世代伝送システムを実現する手段として導入が進められている。特に QPSK 変調方式にこの技術を適用した偏波多重四値位相変調（Dual Polarization-Quadrature Phase-Shift Keying; DP-QPSK）方式は、100-Gbit/s Ethernet に関する標準の変調方式とされ、OIF（Optical Networking Forum）[1] で送信機と受信機の規格が標準化されている。

この受信器の中で、偏波多重位相変調信号の偏波を分離して復調し、電気信号に変換する役割を担う「受信フロントエンド」は、偏波ビームスプリッタ (Polarization-Beam Splitter; PBS)、光干渉回路である 90 度ハイブリッドミキサー (以下ミキサー)、バランスドフォトディテクタ (Balanced Photo Detector; BPD)、トランスインピーダンス増幅器から構成される。受信フロントエンド内で受信信号を光のままに処理する光学回路である PBS とミキサーには、低損失・高精度・安定動作という光学特性に加え、小型・低価格であることが求められる。これらの要求を満たす製品を実現するために、石英系ガラス材料を主体とした平面光導波路 (Planar Lightwave Circuit; PLC) 技術が有効である。

以下では、100 Gbit/s DP-QPSK 信号の受信フロントエンド用 PLC について当社での開発状況を元に紹介する [2-4]。

### 3. 石英ガラス系平面光導波路

石英ガラス系 PLC は、基板上に形成されたガラス (クラッド) 内に屈折率の高いコアを所定のパターンで形成し埋め込んだ構造を持っている。火炎堆積法 (FHD: Flame Hydrolysis Deposition) 等で成膜された石英系ガラスを、半導体製造で用いられる微細加工プロセスにて所定の回路パターンとしている。これまでも PLC 技術を用いて、波長分割多重 (WDM:

Wavelength Division Multiplexing) 用合分波器用のアレイ導波路格子 (AWG: Arrayed Waveguide Grating) やアクセス系 PON で使用されている光スプリッタなどの光通信に欠かせない高機能デバイスが実現されている。

図 1 (a) は、PLC により PBS とミキサーを 1 チップに集積した回路構成の一例である。以下にこの構成を元に回路の働きを説明する。PBS はマッハツェンダー干渉計 (Mach-Zehnder Interferometer; MZI) で構成されており、入力された偏波多重信号は、一段目の PBS によって TE および TM の両偏波成分に分離され、二段目の PBS で偏波消光比が高められる。PBS から出力され、ミキサーへとつながる導波路のうち、信号光の TE 偏波成分が伝搬する導波路には、主軸が 45 度傾いた半波長板 (Half-Wave Plate; HWP) が挿入されており、信号光の TE 偏波成分が TM 偏波に変換され、チップ上部のミキサーに入力される。なお信号光の TM 偏波成分は、PBS を出力後に TM 偏波のまま、チップ下部のミキサーに入力される。一方、局所発振光は TM 偏波状態で PLC に入力され、パワースプリッタで二分岐された後、上下二つのミキサーにそれぞれ入力される。ミキサー内で信号光と局所発振光が干渉し、位相情報が強度情報として 8 つの出力ポートより出力される。PLC から出力された光は、空間光学系もしくは光ファイバを通じて、4 つの BPD に入力される。

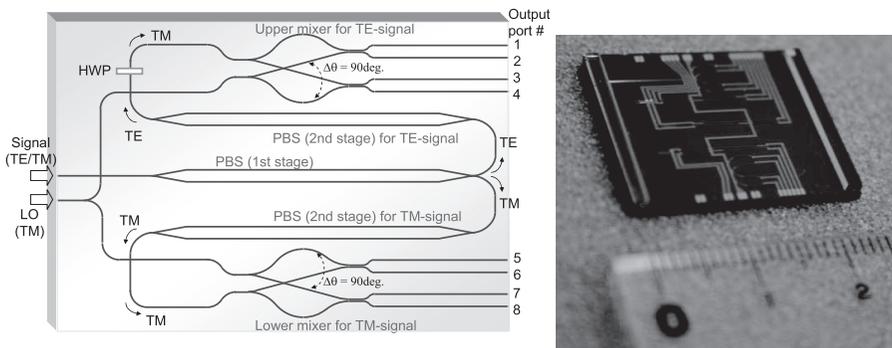


図 1. (a) PLC の回路模式図。(b) チップの外観写真

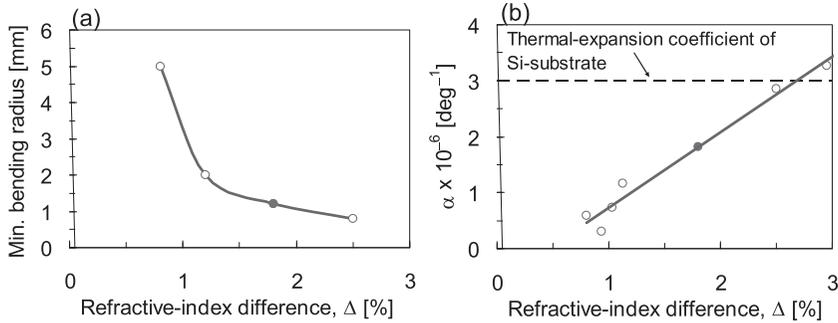


図2. 石英ガラス系 PLC の比屈折率差 $\Delta$ に対する、(a) 導波路の最小曲げ半径および (b) 熱膨張係数の変化

#### 4. 小型化のための石英ガラス材料の工夫

図1 (b) はチップの外観写真である。チップサイズは 25 mm x 21 mm であるが、OIF で規格化されている受信フロントエンドモジュール [11] に十分な余裕をもって収納するためには、さらに小型の 15 mm 角以下であることが望まれる。

一般に導波路の比屈折率差 $\Delta$ を大きくすると、導波モードの閉じ込めが強くなり、導波路の曲げ半径を小さくすることができる。図2 (a) は石英ガラス系 PLC の $\Delta$ に対する最小曲げ半径の計算結果を示している。 $\Delta$ を増大させることで、曲げ半径が一様に小さくなっていくことがわかる。一方、図6 (b) は $\Delta$ に対する、 $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$  ガラスの熱膨張係数 $\alpha$ を示している。 $\Delta$ とともに $\alpha$ が増加し、 $\Delta > 2.5\%$  の領域では  $\text{SiO}_2\text{-GeO}_2$  ガラスの $\alpha$ がシリコン基板のそれを上回り、ガラスに引っ張り応力が生じ、コアガラスの信頼性が著しく低下することになる。さらには、 $\Delta$ を高めるために高濃度でドーパされた  $\text{GeO}_2$  がコアガラスの融点を下げ、その結果コアの形状が歪みやすくなり、製造再現性の面で難が生じる。以上のバランスを考慮して $\Delta$ の最適値として 1.8% を採用した。このときの曲げ半径は 1200  $\mu\text{m}$  となり従来の約半分であるから、チップサイズの縮小が期待でき、同時に十分な信頼性・製造再現性も確保できる。

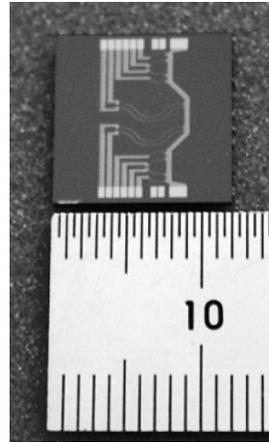


図3.  $\Delta 1.8\%$  導波路で作製したチップの外観写真

材料の最適化に加え回路レイアウトを最適化し作製したチップの外観写真を図3に示す。チップサイズは 12 mm x 12 mm であり、目標の 15 mm 角を下回る超小型チップを実現することに成功している。また、挿入損失、偏波消光比とも十分な特性を有しており、集積されたミキサも 90 度ハイブリッドとして機能している。

#### 5. まとめ

石英ガラス系 PLC を用い、デジタルコヒーレント方式の受信フロントエンドに用いられる PBS 集積コヒーレントミキサを実現する技術について紹介した。ガラス材料を工夫することで、12 mm x 12 mm の超小型 PBS 集積コヒーレントミキサチップが実現できている。

今後の大容量通信を支えるデバイスとして期待される技術である。

参考文献

- [1] <http://www.oiforum.com/>
- [2] T. Inoue et al., "Double-Pass PBS-Integrated Coherent Mixer Using Silica-based PLC," Proc. OFC 2010, paper OThB 2 (2010).
- [3] T. Inoue et al., "Ultra-small PBS-Integrated Coherent Mixer Using 1.8%-Delta Silica-Based Planar Lightwave Circuit," Proc. ECOC 2010, paper Mo. 2. F. 4 (2010).
- [4] [http://www.furukawa.co.jp/what/2010/comm\\_10318\\_1.htm](http://www.furukawa.co.jp/what/2010/comm_10318_1.htm)
- [5] [http://www.oiforum.com/public/documents/OIF\\_DPC\\_RX-01.0.pdf](http://www.oiforum.com/public/documents/OIF_DPC_RX-01.0.pdf)