# 広帯域25段PLC-MZI型可変分散補償器

Wideband Tunable Dispersion Compensator Using a 25-Stage PLC-MZI

川島洋志\* Hiroshi Kawashima 奈良一孝\* Kazutaka Nara

概要 近年商用システムへの導入が進みつつある 40 Gbpsシステムなどの高速光通信においては, 伝送路の温度変化などに伴う分散変化を付加的に補償するために可変分散補償器 (TDC) が必要とさ れており,種々の方式に基づくTDC が報告されている。そのなかでも石英系の平面光波回路 (PLC) で形成した多段のマッハツェンダー干渉計 (MZI) からなるラティス型フィルタを用いた多段 PLC-MZI型TDC は簡易に制御でき,かつ大きな補償量を実現できる有望な方式である。しかしながら, これまでに報告された多段 PLC-MZI型 TDC は 40 Gbpsシステムでの実使用を考慮すると,帯域不足 となる可能性があった。そこで今回,40 Gbps伝送に十分な 60 GHz 以上の帯域幅と±300 ps/nm 以上の可変分散量を両立させた 25 段 MZI を用いた TDC を作製し,良好な特性を得たので報告する。

#### 1. はじめに

40 Gbpsシステムなどの高速光通信においては、温度変化な どに伴う伝送路の分散変化を付加的に補償するために可変分散 補償器(TDC)が必要とされており、種々の方式に基づくTDC が報告されている<sup>1)~7)</sup>。そのなかでも石英系の平面光波回路 (PLC)による多段マッハツェンダー干渉計(MZI)からなるラ ティス型フィルタを用いたTDCは、制御を簡易にでき、かつ 大きな補償量を実現できる有望な方式である<sup>5)~7)</sup>。



図1 多段 PLC-MZI型 TDC の基本構成図 Configuration of cascaded PLC-MZI type TDC

多段PLC-MZI型TDCの基本構成図を図1に示す。本TDC は基本的には可変カプラを介して複数のPLC型MZIを多段に 縦列接続したラティスフィルタ型の有限インパルス応答(FIR) フィルタであり、各遅延線の位相及び遅延線間の可変カプラの 結合率を調整することで、式(1)に示すようなフィルタ応答

\* 研究開発本部 ファイテルフォトニクス研究所

T(f)を得られる回路である。

$$T(f) = \sum_{i=1}^{n+1} a_i \left\{ \exp\left[j \; \frac{2\pi}{c} n_{eff} f \Delta L\right] \right\}^{i+1}$$
(1)

ここで, *a<sub>i</sub>*:フーリエ係数, *j*:虚数単位, *n<sub>eff</sub>*:等価屈折率, *f*: 光周波数, *c*:真空中の光速である。

本回路において、フィルタ特性の自由度はMZIの段数nで決 まり、nの値に応じた任意のフィルタ特性が得られる。また、 ALに応じた自由スペクトル領域の値(FSR)ごとに周期的な波 形が得られるので、波長多重(WDM)信号の同時補償やカラー レスデバイスとしての使用が可能となる。しかしながら、この ような一般的なFIRフィルタで所望のフィルタ特性を得るため には、すべての遅延線の位相及びすべての可変カプラの結合率 を調整する必要がある。このため実用性の観点では問題が多い。

これを解決するため1段目と最終段の遅延線の光路長差を *AL*,他の遅延線の光路長差を2*AL*とし,更に各可変カプラを 同一の電流源にて並列駆動する多段PLC-MZI型TDCが提案さ れている<sup>6),7)</sup>。

本方式のTDCの概略構成図を図2に示す。この方式では, 使用可能な帯域幅がFSRの約半分に制限されるものの,各遅 延線での光路長差が正確にAL,2ALとなるように事前にトリ ミングを施すことで,実使用時には各可変カプラを+または– 方向のそれぞれ単一の電源で並列駆動するという「シングルノ ブ」による簡易な制御を可能としている。そのため,制御性や 消費電力の面で実用性が高くなっている。また,1段目及び最 終段の可変カプラと,他の可変カプラとの駆動電力比率を調整 することで,群遅延スペクトル及び透過率スペクトルの直線性 と平坦性を制御できる。更には1/4波長板と反射ミラー,ある いはファラデーローテータミラーを用いて, 偏波依存性の補償 とダブルパス化による可変分散量の倍増を同時に行うことがで き,8段MZIで可変分散量が約±500 ps/nmのTDCが報告さ れている<sup>7)</sup>。



図2 簡易制御式多段 PLC-MZI型 TDC の基本構成図 Configuration of cascaded PLC-MZI type TDC with single knob control

しかしながら、これらの報告においては40 Gbpsシステムで 必要とされる約 ± 300 ps/nm以上の可変分散量を得るために は、FSRを100 GHzに、使用可能な帯域幅を約40 GHzに、そ れぞれ設定せざるを得ず、40 Gbpsシステムでの実使用を考慮 すると、帯域不足となる可能性があった。

本方式のTDCの帯域幅を拡大するためにはFSRを拡大すれ ば良いが、帯域幅はFSRに比例し、可変分散量はFSRの2乗に 反比例するといったトレードオフの関係となるため、両者の両 立が難しい。一方で、到達可能な最大可変分散量は段数にほぼ 比例するという関係となるため、FSRの拡大とともに段数を増 加させることにより、帯域幅と可変分散量を高レベルで両立で きる可能性がある。

そこで今回,40 Gbps伝送に十分な60 GHz以上の帯域幅と ± 300 ps/nm以上の可変分散量を両立させる設計を検討し,更 にそれを適用した簡易制御型多段PLC-MZI型TDCを作製し て,40 Gbps-Return to Zero (RZ) - On Off Keying (OOK) 信号 の分散補償実験を行った。

#### 2. 構成

今回TDCを設計するにあたっては、前述のとおり40 Gbps 伝送に十分な60 GHz以上の帯域幅と±300 ps/nm以上の可変 分散量を確保することを目標とした。そこで、まず60 GHz以 上の帯域幅を確保しつつ、国際電気通信連合(ITU)が規定す るグリッド光のWDM伝送にも対応できるようにFSRを200 GHzに設定した。次に、シミュレーションにより、FSRが200 GHzの時の段数と可変分散量の関係を求めた。各段数で最大 分散量に設定した時の群遅延スペクトルの計算結果から求めた 最大分散量と段数との関係を図3に示す。なお、計算にあたっ ては、1番目及びn番目の可変カプラと他の可変カプラの駆動 電力比率を1:1.8とした。

図3より,可変分散量は段数にほぼ比例して増加し,25段で ± 300 ps/nmの可変分散量を得られることが分かる。



図3 段数と最大可変分散量(計算値)の関係 Calculated maximum dispersion v.s. stage number

次に、25段とした際の正負両方向の最大分散時及びゼロ分 散時の群遅延及び透過率の計算スペクトルを図4に示す。

図4より,いずれの条件においても分散可変帯域は60 GHz (0.48 nm)以上が得られていることが分かる。以上の結果から, 段数として25段を選択した。



Calculated spectra of 25 stage TDC

次に、25段MZI-TDCの構成模式図を図5に示す。本回路は 基本的には図2に示した簡易制御式多段PLC-MZI型TDCと同 様の構成であり、両端にFSRが200 GHzのMZIを、中間に FSRが100 GHzの23段MZIを配してカスケード接続した25段 MZIで構成されている。各MZI間は位相差πのMZIの遅延線 上に薄膜ヒータを架して構成した可変カプラ(初期結合率 =0%)で接続されている。両端のMZIと入出力導波路間は2x2 のカプラではなく、1x2のY分岐で接続し、確実に1:1の分岐・ 結合が成されるようにしている。また、偏波依存性を低減する ため、偏波保持ファイバ(PMF)を介して偏波ビームスプリッ タ(PBS)サーキュレータと接続することで偏波ダイバーシティ を構成している。

本TDCでは、各可変カプラのヒータを正分散用または負分 散用いずれかの駆動電力を並列に与えて各可変カプラの結合率 を0% ~+/-50%の間で変化させることにより所望の分散可変



図5 偏波ダイバーシティ付き25段 MZI-TDC の構成模式図 Schematic of 25-stage MZI-TDC with polarization diversity

特性を得ることができる。

また,各MZIの遅延線部分には薄膜ヒータを配し,局所加 熱位相トリミング<sup>8)</sup>によって作製誤差による位相誤差を恒久補 正できるようにしてある。

しかしながら、このような構成の25段MZIを実際のPLC回 路として作製するに当たっては、図5のように各MZIの曲率を 交互に反転配置して小型化を図ったとしても、なお回路サイズ が非常に大きくなってしまい、実現が困難であるという問題が 発生した。そこで今回,回路サイズを更に小型化するため, 図6の回路配置図に示すような、折り返し構造を新規に採用し た。この構造では、25段のMZIのうち、中央にあたる13段目 の遅延線部分で回路を折り返し、13+n番目(1≤n<13の整 数)の遅延線を13-n番目の遅延線に沿って配置している。そ のため、図6の配置に比べて遅延線を高密度に配置することが でき、チップ面積を縮小することができた。更に、13段目の 遅延線を折り返す際、2本の遅延線を互いに交差させることで、 隣接する遅延線間の光学的な接続方法が図5と同一になるよう にしている。このことにより,折り返し構成を採用しても制御 方法は図5の回路配置の場合と同一にすることができた。なお, 交差に伴うロス増を抑制するため、交差角が90°となるよう に配置している。以上のようなレイアウトの工夫によって, 全 MZIを図5のように接続する場合と比較して、面積比で約20% の小型化を図ることができた。



図6 折り返し構成を用いた25段小型MZI-TDCの構成図 Waveguide layout of compact 25-stage MZI-TDC with folding arrangement

## 3. 作製

前記の設計に基づき,通常の石英系PLC作製技術を用いて MZI-TDCチップを作製した。次に,入出力導波路端に偏波保 持ファイバを接続後,PBSサーキュレータを接続し,偏波ダイ バーシティを構成した。その後,温調されたステージ上で各遅 延線の干渉特性を評価しながら,遅延線上の薄膜ヒータを用い て位相トリミングを行った。

作製した MZI-TDC チップ及び光モジュールの写真を**図7**及 び**図8**にそれぞれ示す。図7に示すように25段という多段にも 拘わらず、チップサイズは25 mm × 70 mm と小型になってお り、光モジュールサイズも130 mm × 100 mm × 16 mm と小 型になっている。



図7 25段 MZI-TDC のチップ写真 Photograph of 25-stage MZI-TDC chip



図8 25段MZI-TDCの光モジュール写真 Photograph of 25-stage MZI-TDC module

## 4. 光学特性評価結果

次に,可変カプラのヒータを単一の電源に接続して駆動し, 群遅延,透過率及び偏波モード分散(PMD)をそれぞれ測定し た。この際,可変カプラの駆動電力比率は1:1.8とした。

図9に制御電圧を変化させたときの群遅延及び透過率スペク トル、そして波長分散(CD)が+336 ps/nm時と-320 ps/nm 時の偏波依存損失特性(PDL)及びPMDの測定結果を示す。図 9より、±7.6 Vの電圧に対して、約60 GHz(0.48 nm)の分散 可変帯域幅にて±300 ps/nm以上の波長分散という目標どお りの特性が得られていることが確認できた。挿入損失は帯域中 心波長で約7 dBであり、損失変動は全駆動条件下の60 GHzの 帯域内で1.5 dB以内であった。損失の内訳は、回路損失が約4.8 dB、ファイバ接続損失が接続点2点で約1 dB、PBSサーキュ レータ及びコネクタ損失が約1.2 dBである。またPBSサーキュ レータを用いた偏波ダイバーシティ構成の効果により、PDL は帯域内全域で0.3 dB以下、PMDは0.3 ps以下と良好な値が 得られていることが確認できた。



図9 透過率·群遅延·PDL·PMD測定結果 Measured transmittance, group delay, PDL and PMD

### 5. 40 Gbps-RZ-OOK 信号での分散補償実験

次に、高速光通信システムにおける本TDCの有効性を検証 するため、作製した25段MZI-TDCモジュールを用いて、40 Gbps RZ-OOK 信号の分散補償実験を行った。実験系を図10に 示す。実験では、まず分布帰還型 (DFB) - レーザーダイオード (LD) アレイからの波長1561.0 nmのCW 光をLiNbO3変調器 (LN1) にて信号長107-1の40 Gbps Nonreturn to zero (NRZ) -Pseudorandom bit sequence 信号で変調後,次のLiNbO3変調 器 (LN2) にて40 Gbps RZパルスで変調し、40 Gbps RZ-OOK 信号を得た。その後エルビウムドープ光ファイバ増幅器 (EDFA)にて増幅し、-125、-250、及び-330 ps/nmの波 長分散を有する分散シフトファイバ(DCF)を伝送路として伝 搬させた後、TDCにて分散補償を行ってから受光し、アイパ ターン観察及びビットエラーレート (BER) 測定を行った。ま ず, back-to-back及び-330 ps/nmでの伝送後の信号スペクト ルを図11に示す。図11より、良好なRZ信号スペクトルが生 成できており、また広帯域なTDCのパスバンドにより、スペ クトルの狭窄化はほとんど起こっていないことが分かる。次に, 線路分散が0, - 250, 及び - 330 ps/nmにおける TDC 有り及 び無しの時のアイパターン比較を図12に示す。図12より、 TDC無しでは-250 ps/nmにおいてアイが全く開いていない のに対して、TDC有りでは-330 ps/nmまで大きな劣化が無 くアイが開いており、大幅な分散補償効果が確認できた。次に BER測定結果を図13に示す。図13より、数dBのパワーペナ ルティはあるものの本TDCを用いることで、ほぼ10-9のBER での伝送が可能であることが確認できた。以上のことから,



**図11** 信号スペクトル測定結果 Measured optical spectra



図10 40 Gbps RZ信号の分散補償実験系 Experimental setup of dispersion compensation of 40 Gbps RZ signal



Time (10 ps/div)

図12 40 Gbps RZ信号の分散補償前後のアイパターン Eye opening of 40Gbps RZ signal with/without TDC



図13 BER 測定結果 BER measurement results

本TDCは40 Gbpsシステムでの可変分散補償に有効であることが確認できた。

## 6. おわりに

40 Gbpsの高速光伝送システム向けに,広帯域を有する PLC-MZI型可変分散補償器を開発した。

自由スペクトル領域(FSR)を200 GHzと広く取るとともに、 25段という多段のMZIを採用することで、40 Gbpsシステムに 求められる広い帯域と大きな可変分散量の両立を図るととも に、折り返し回路構成によって高密度に導波路を配置すること で、25段MZIという非常に大規模な回路を70 mm×25 mmと いうコンパクトなチップサイズに収めることに成功した。また、 偏波スプリッタとサーキュレータモジュールを用いて偏波ダイ バーシティを構成することで、偏波依存性の低減も図った。

その結果,作製したTDCは約7 dBの挿入損失,約60 GHz の帯域幅, ±300 ps/nm以上の可変分散量,0.3 dB以下の PDL,0.3 ps以下のPMDという良好な特性を示した。

更に、本TDCを用いて40 Gbps-RZ-On Off Keying信号の分

散補償実験を行って-330 ps/nmまでの分散補償が可能であ ることを示し、本TDCが40 Gbps伝送システムに適用可能で あることを確認した。

## 謝辞

伝送実験系の借用及びご助言・ご協力を頂きました東京大学 大学院 工学系研究科 電気系工学専攻 菊池・五十嵐研究室の皆 様に深く感謝いたします。

### 参考文献

- Y. Painchaud, M. Lapointe, and M. Guy: "Slope-Matched Tunable Dispersion Compensation over the Full C-Band Based on Fiber Bragg Gratings", ECOC2004, (2004), We3.3.4.
- 2) H. Ooi, K. Nakamura, Y. Akiyama, T. Takahara, T. Terahara, Y. Kawahara, H. Isono, and G. Ishikawa: "40-Gb/s WDM Transmission With Virtually Imaged Phased Array (VIPA) Variable Dispersion Compensator", J. Lightwave Technol., 20, (12), (2002), 2196.
- 3) D. J. Moss, M. Lamont, S. McLaughlin, G. Randall, P. Colbourne, S. Kiran, and C. A. Hulse: "Tunable dispersion and dispersion slope compensators for 10 Gb/s using all-pass multicavity etalons", IEEE Photon.Technol. Lett., 15, (5), (2003) 730.
- H. Kawashima, N. Matsubara, and K. Nara: "Tunable Dispersion Compensator using Optical Transversal Filter in 1.5%-delta silica-based PLC", Proc., OECC2005 (2005), 7E3-4.
- K. Takiguchi, K. Okamoto, and K. Moriwaki: "Planar Lightwave Circuit Dispersion Equalizer", J. Lightwave Technol., 14, (9), (1996), 2003.
- 6) C. R. Doerr, S. Chandrasekhar, M. A. Cappuzzo, A .Wong-Foy, E. Y. Chen, and L. T. Gomez: "Four-stage Mach-Zehnder-type tunable optical dispersion compensator with single-knob control", IEEE Photon. Tech. Lett., 17, (12), (2005), 2637.
- K. Takiguchi, H. Takahashi, and T. Shibata, "Tunable chromatic dispersion and dispersion slope compensator using a planar lightwave circuit lattice-form filter", Optics. Lett., 33, (11) (2008), 1243.
- M. Abe, Y. Inoue, M. Moriwaki, M. Okuno, and Y. Ohmori, "Optical. path length trimming technique using thin film heaters for silica-based. waveguides on Si", Electron. Lett., 32, (19), (1996), 1818.