

## イーサネットの高速化・長延化に向けた 石英系平面光波回路WDMフィルタ

NTT デバイスイノベーションセンタでは、光送信・受信モジュールに組み込み可能な WDM フィルタを石英系平面光波回路技術で開発している。光回路の設計技術により、400GHz 間隔で広帯域の合波フィルタを実現し、送信側の合波フィルタには4つの入力信号の偏波を直交する機能を搭載することで、伝送特性を改善した。

### イーサネットの高速化・長延化における課題

通信ネットワークのトラフィックの需要は年々増大している。イーサネットのロードマップでは通信速度は400 Gbps、800 Gbps と高速化し、2030 年頃には1Tbps に達すると予想されている<sup>[1]</sup>。このような高速イーサネットでは、伝送距離の仕様が2 km (FR)、10 km (LR) から40 km (ER) で規定され、長距離向けでは通信キャリアのオフィス間やハイパースケールのデータセンター間の相互接続への適用が想定される。また、低コスト化を視野に直接変調・直接検波伝送方式(IMDD)で800 GbE(ギガビットイーサネット)や400 GbEを実現するために、1.3  $\mu\text{m}$  帯で100 Gbaud または50 Gbaud のPAM4(4値パルス振幅変調)信号を4波長分割多重(WDM)することが議論されている<sup>[2]</sup>。

これまで200GBASE-FR4や100GBASE-LR4などのアプリケーションでは、WDMの波長配置間隔として20 nm (CWDM) や800 GHz (LAN-WDM) が用いられていた。

しかし、100 Gbaud や50 Gbaud のように信号が高ボーレート化すると、長距離伝送する場合に、シングルモードファイバの零分散波長に近いとはいえ、波長分散の影響による信号劣化が顕著になる。なお波長分散による信号劣化とは、ファイバ内での光の伝搬速度が波長によって異なるため長距離伝送後に波形がひずみ、光信号の品質が劣化する現象である。高ボーレート化して信号パルスが短くなるほど劣化の影響が顕著になり、許容される波長分散量は小さくなる。100 Gbaud や50 Gbaud のPAM4信号を40 km 伝送するに当たってはこの影響が無視できなくなっている。図1にイーサネットで用い



NTT デバイスイノベーションセンタ  
信号処理デバイスプロジェクト  
研究主任 柳原 藍氏

られる波長配置を示す。シングルモードファイバは1300 ~ 1324 nm の間で波長分散がゼロになるように標準化されており、公称中心は1312 nm である。従来の800 GHz 間隔の波長配置では、特に最短波長側のチャ

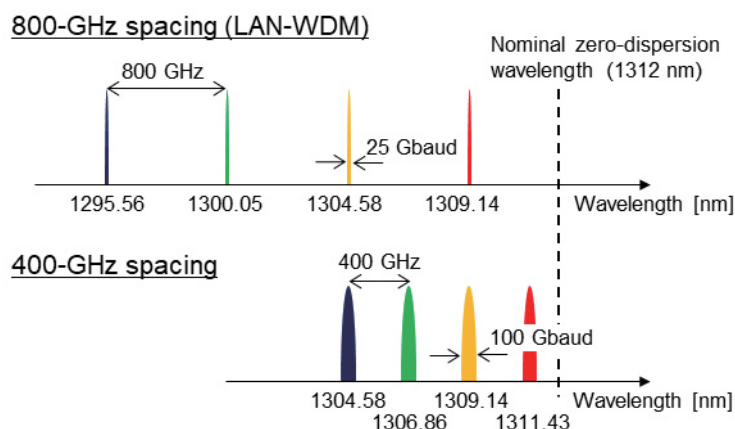


図1 イーサネットの波長配置

ネルで波長分散の影響が大きくなる。この解決策として、4つの信号のチャンネル間隔を800 GHzから400 GHzに狭めることが現在議論されている<sup>[3]</sup>。波長間隔が従来の半分になると、各信号に許容される波長の範囲は184 GHz (1 nm) と狭くなるため、光送信・受信モジュールに組み込まれているレーザやWDMフィルタには従来よりも高い波長安定性が求められる。特にWDMフィルタでは、この波長安定性に加えて、400 GHzという狭い周波数間隔内に、100 Gbaudの信号を通過させる広い透過帯域幅を確保する必要がある。

一方、このようにWDMの周波数間隔を狭くすると、新たに非線形効果である四光波混合も問題になる。四光波混合とは零分散波長付近で複数の波長の光がファイバを伝搬する際に非線形分極により新たな波長の光が発生する現象であり、これにより信号が劣化する。四光波混合の影響は、光信号の波長が零分散波長に近づくことや、伝送距離を伸ばすために送信側の信号を高出力化することで顕著になる。この問題に対する対策として、送信WDM信号間で偏波を直交させる手法が提案されている<sup>[4]</sup>。以下、説明のために偏波状態を2種類のXとYで表し、XとYは互いに直交しているとする。特段の工夫をせずに光源と合波器を配置すると、4波長のWDM信号の偏波はそろった状態(YYYY)となるのに対し、隣接する4波長の偏波を交互に直交させる(XYXY)、または中央2波長と両サイド2波長を直交させる(YXXY)ことで、四光波混合を抑制できると

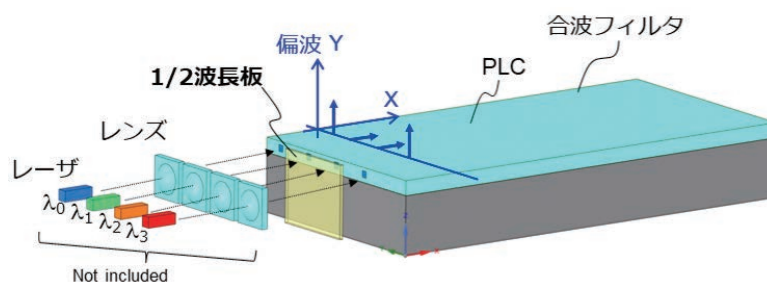


図2 偏波直交機能付き合波フィルタ

期待される<sup>[5,6]</sup>。

これらを踏まえると、イーサネットの高速化・長延化に向けては、波長分散を低減する観点から400 GHz間隔の4チャンネルWDMフィルタ（合波用・分波用）が必要であり、合波用WDMフィルタにおいて狭周波数間隔化に伴う四光波混合を抑制するために入力信号の偏波を直交させる機能が求められる。

### 石英系平面光波回路を用いた合波フィルタの設計

NTT デバイスイノベーションセンターでは、前述の課題を解決するために石英系平面光波回路を用いて小型の光送信・受信モジュールに組み込み可能な4チャンネルWDM合波フィルタを開発した<sup>[7]</sup>。分波フィルタには、広帯域かつ平坦な伝送通

過帯域を得られる光回路構成として、マルチモード出力を持つアレイ導波路（AWG）を採用した。受信側では、分波フィルタから出力された光を直接フォトダイオードに入射させるため、出力導波路がマルチモードであっても差し支えない。一方送信側では、シングルモードのレーザとフィルタを光結合することが不可欠であるため、分波フィルタで採用したマルチモードAWGの構成を使用することはできない。そこで合波フィルタにはマッハツェンダ干渉計回路を多段に配置したラティスフィルタ構成を採用した。ラティスフィルタはマルチモードAWGよりも伝送通過帯域が狭く、クロストーク性能も劣るが、シングルモード入力が可能で、AWGよりも低挿入損失という特徴を有する。よって

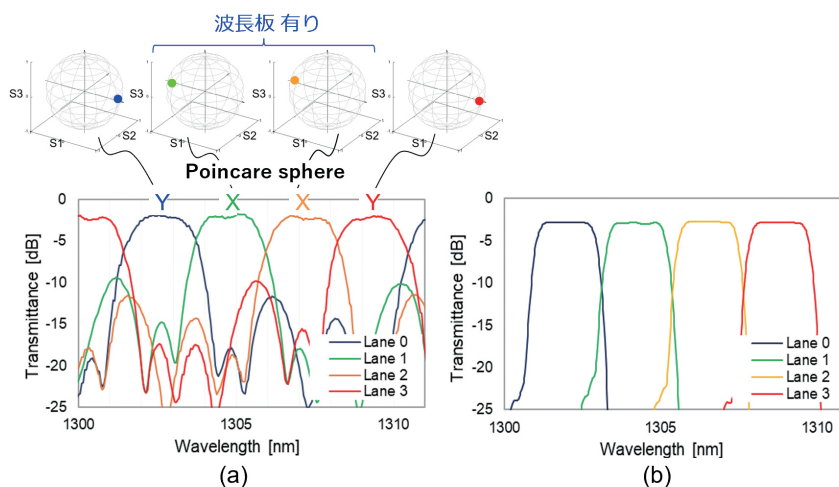


図3 (a) 合波フィルタ (b) 分波フィルタの光学特性

高いクロストーク性能を必要としない合波フィルタには好適な回路構成と言える。

さらに四光波混合を抑制するため、合波フィルタには入力信号の偏波を直交させる機能を組み込んだ。図2に示すように、4つのレーザからの光 ( $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ) はそれぞれ合波フィルタの端面から入射する。合波フィルタの入力側チップの任意の入力端面に薄膜の1/2波長板を貼り合わせると、波長板を透過した入力光の偏波が90°回転する。図2に中央2つのレーザ光 ( $\lambda_1, \lambda_2$ ) が波長板を透過し、4チャンネルWDM信号の偏波を(YXXY)に制御した構成を示す。

## 合分波フィルタの光学特性

図3(a)と(b)は、WDM合分波フィルタの光学特性である。いずれも400 GHz間隔の4chフィルタの特性を示している。帯域幅はそれぞれ342 GHz(合波)、369 GHz(分波)で、十分な帯域幅が得られた。チップサイズはそれぞれ  $6.9 \times 3.8 \text{ mm}^2$  と  $4.5 \times 7.3 \text{ mm}^2$  で、光送信・受信モジュールに組み込める程度の小型サイズである。

1/2波長板を貼り付けた合波フィルタについては、同じ入力偏波に対する出力偏波を、偏波アナライザを用いて評価した。図3(a)の挿入図のポアンカレ球で示す通り、 $\lambda_0, \lambda_3$  に対して  $\lambda_1, \lambda_2$  の偏波は直交している。よって任意の入力端面に波長板を貼り付けるといったシンプルな構成で偏波を直交する機能を組み込んだ。

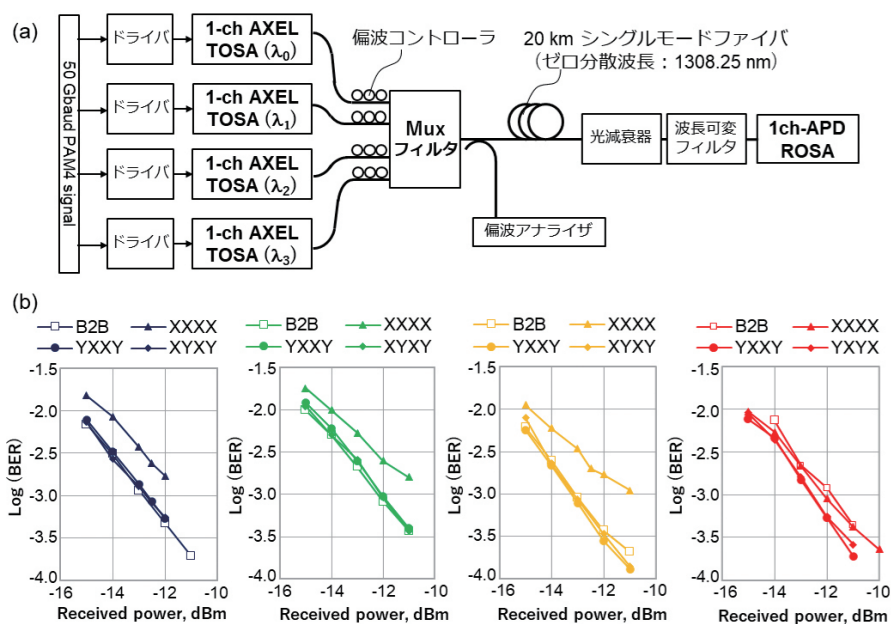


図4 (a) 評価系 (b) 伝送特性

## 伝送特性

合波フィルタに偏波を直交させる機能を導入することによる四光波混合抑制効果を確認するため、伝送特性を評価した。図4(a)に評価系を示す。4つの入力信号を合波する合波フィルタには開発したフィルタを適用したが、波長板の実装に代えて偏波コントローラを用いて入力信号の偏波を制御した。信号源と受信器には1ch-AXEL-TOSA<sup>[8]</sup>と1ch-APD-ROSA<sup>[9]</sup>を用いた。図4(b)に $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ それぞれについて偏波を制御しない(YYYY)と2つの偏波直交状態(YXXY)(XYYX)での伝送特性結果を示す。すべての波長について、入力信号の偏波を制御しない場合と比較して、波長間での偏波を制御することで、明確な伝送特性の改善効果を得られることを確認した。

## まとめ

小型の光送信・受信モジュールに組み込み可能な偏波直交機能付きWDM合分波フィルタについて紹介した。波長分散の影響を低減するための狭間隔WDMフィルタを、光回路の設計技術により実現した。また狭間隔化に伴う四光波混合を抑制するための偏波制御を、波長板を合波フィルタに貼り合わせることで実現し、その効果を伝送実験で確認した。本技術は今後イーサネットの高速化・長延化に貢献できると考える。

### 参考文献

- [1] <https://ethernetalliance.org/technology/ethernet-roadmap/>
- [2] <https://100glambda.com/>
- [3] <https://www.ieee802.org/3/df/index.html>
- [4] K. Inoue, J. Quantum Electron., 28(4), 883-894, 1992.
- [5] [https://www.ieee802.org/3/df/public/22\\_03/3df\\_01a\\_220329.pdf](https://www.ieee802.org/3/df/public/22_03/3df_01a_220329.pdf)
- [6] [https://www.ieee802.org/3/df/public/22\\_07/3df\\_01b\\_2207.pdf](https://www.ieee802.org/3/df/public/22_07/3df_01b_2207.pdf)
- [7] A. Yanagihara et al., OFC2023, Th1E.7, 2023
- [8] S. Kanazawa et al., J. Lightw. Technol., 39(4), 1089-1095, 2021.
- [9] A. Kanda et al., OECC20, pp. 1-3, 2020