

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems



植之原 裕行 (Hiroyuki UENOHARA, Dr. Eng.)

東京工業大学精密工学研究所教授

(Precision and Intelligence Laboratory, Professor, Tokyo Institute of Technology)

応用物理学会 電子情報通信学会 IEEE/IPS 会員

受賞：1991年 SSDM Young Researcher Award 1996年 電子情報通信学会学術奨励賞

研究専門分野：フォトニックネットワークシステム 光信号処理 光集積デバイス

**あらまし** 近年のインターネットの成長によるデータ増大に対して、高効率かつ低遅延で処理可能なルータ実現への要求に応えるため、電子回路の速度限界と消費電力増大の課題を解決するための光信号処理を導入した光パケットスイッチ実現が期待されている。光パケットスイッチの重要な機能の中でも最も重要でかつ技術的な課題が多い光バッファについては、光ファイバ遅延線・光ファイバループ・光双安定デバイス・スローライトデバイスなど取組まれているものの、要求されるパケット長以上の蓄積時間（数 10ns～ $\mu$ s）や数 10 以上の入出力に対応可能な技術が実現できず、光パケットスイッチ実現のさまたげとなってきた。

そこで本研究では、波長多重効果によるパケット競合の低下を期待できる構成を前提に、半導体光増幅器（SOA）と 1 ビット遅延干渉計（DISC）型波長変換器による性能向上を目指した。10Gbps 7 次 M 系列信号を対象として自由スペクトルレンジ（FSR）40.12GHz の MZDI を用いた DISC 出力信号のビット誤り率評価を行ったところ、遅延干渉計の位相バイアス 0rad、バンドパスフィルタ（BPF）の透過中心波長の離調 0nm の条件では波形が崩れる傾向が見られた。この原因は MZDI 分岐比が 1 : 1 であり、時間遅延成分のサブパルスの影響が顕著となった結果と考察された。そこで、

この問題解決のため MZDI 位相バイアスを短波長側に -0.12rad シフトした結果、ビット誤り率（BER）測定においてサブパルス抑制によるパワー・ペナルティ改善の傾向が見られた。また、同時に BPF 透過波長の短波長側への -0.15nm 離調条件において、伝送時の分散による波形劣化の主要因となる長波長成分を除去できるため、25km シングルモード・ファイバ（SMF）伝送時においてもパワー・ペナルティを改善可能である結果が得られた。

## 1. はじめに

近年のインターネットの成長と、IP 上にあらゆるアプリケーションを載せる傾向により、IP 系トラフィックは年率 1.3 倍程度で増大し、日本国内のトラフィック総量は 1.5Tbps を超えている（2011 年 9 月 30 日総務省公表データによる）。近い将来 10～100 倍に増加するデータを高効率かつ低遅延で処理可能なルータ実現への要求が高まっており、速度限界と消費電力増大の課題をかかえる電子回路に代わって光信号処理による解決のアプローチ（光パケットスイッチ（Optical Packet Switch, OPS））が積極的に取組まれてきた<sup>(1)-(5)</sup>。

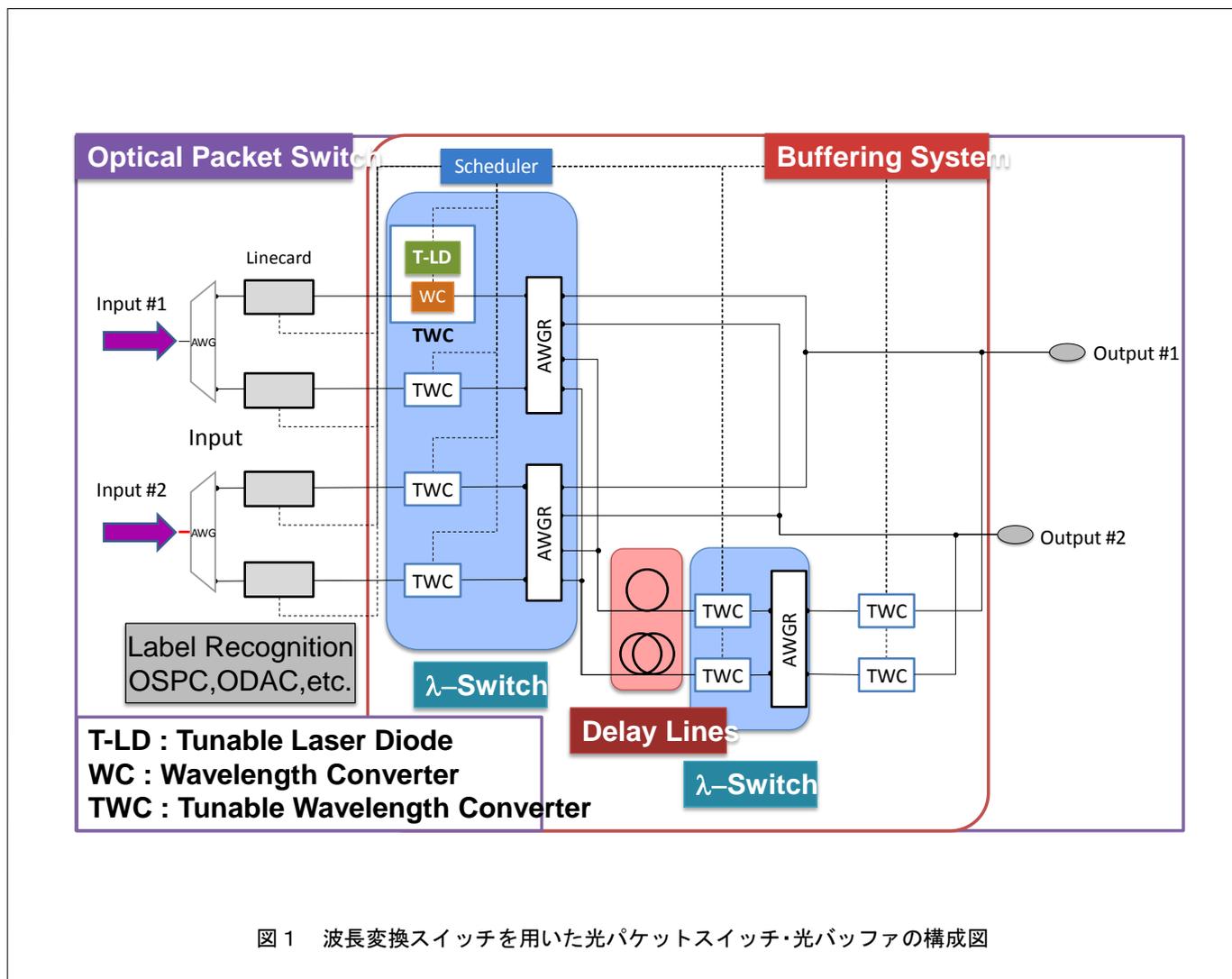
光パケットスイッチの重要な機能の中でも最も重要で、かつ技術的な課題が多い光バッファについては、光ファイバ遅延線<sup>(6),(7)</sup>・光ファイバループ<sup>(8)</sup>・分散制御型<sup>(9)</sup>・光双安定デバイス<sup>(10)</sup>・スローライトデバイス<sup>(11)-(14)</sup>など取組まれているものの、要求されるパケット長以上の蓄積時間（数 10ns～ $\mu$ s）や数 10 以上の入出力に対応可能な技術が実現できず、光パケットスイッチ実現のさまたげとなってきた。

ところが 2005 年頃に光パケットのバッファ性能としては 20 パケット程度の蓄積でスループット 80% 程度まで確保可能であるとの理論検討がなされ、現状の光デバイス技術での実現性が見直されてきた<sup>(15)</sup>。

本研究グループでは、パケット単位でのバッファ性能が実現可能な点から、遅延線、光スイッチ及びスケジューラを用いた構成を検討している。図 1 に OPS の構成図を示す<sup>(16)</sup>。波長多重された光パケットを入力後、波長分波器（Arrayed Waveguide Grating, AWG）により各波長に分離する。パケットのアドレス情報をラベル識別器で認識した後、アドレスに対応する出力への転

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems



送の可否・バッファが必要な場合の遅延時間をスケジューラで解析する。光バッファは異なる長さの光ファイバで構成される遅延線、入力部・出力部の光スイッチ、スケジューラで構成され、波長変換型光スイッチを所望の経路間で接続できるようにスケジューラにより制御する。更に波長変換型光スイッチは、高速波長可変レーザ（電流注入型などの ns オーダで波長切替の可能な SSG-DBR-LD, SG-DBR-LD など）・波長変換器・AWG ルータ（AWGR）で構成される。波長変換型光スイッチを用いることで波長分割多重（WDM）により、パケット棄却率低下が可能となる。したがって、波長変換器の性能向上が波長変換型光スイッチおよび OPS 実現のためには重要なポイントとなる。

速度 40Gbps 級の高速動作が可能で波長依存性・偏波依存性ともに低い波長変換器として、半導体光増幅器（Semiconductor Optical Amplifier, SOA）をマッハ・ツェンダー干渉計（Mach-Zehnder Interferometer, MZI）中に 2 個持つ SOA-MZI 型波長変換器の研究が精力的に行われてきた<sup>(17)</sup>。しかしながら、SOA の利得飽和領域で動作させるために必要なバイアス電流値として 200mA~500mA が一般的であり、消費電力が高くなる課題があった。本研究では、1 個の SOA により実現できることから低消費電力化が期待できるため、SOA と遅延干渉計を用いた波長変換器（SOA-based Delayed Interference Signal wavelength Converter, SOA-DISC）<sup>(18)</sup> の導入を検討している。

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

## A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems

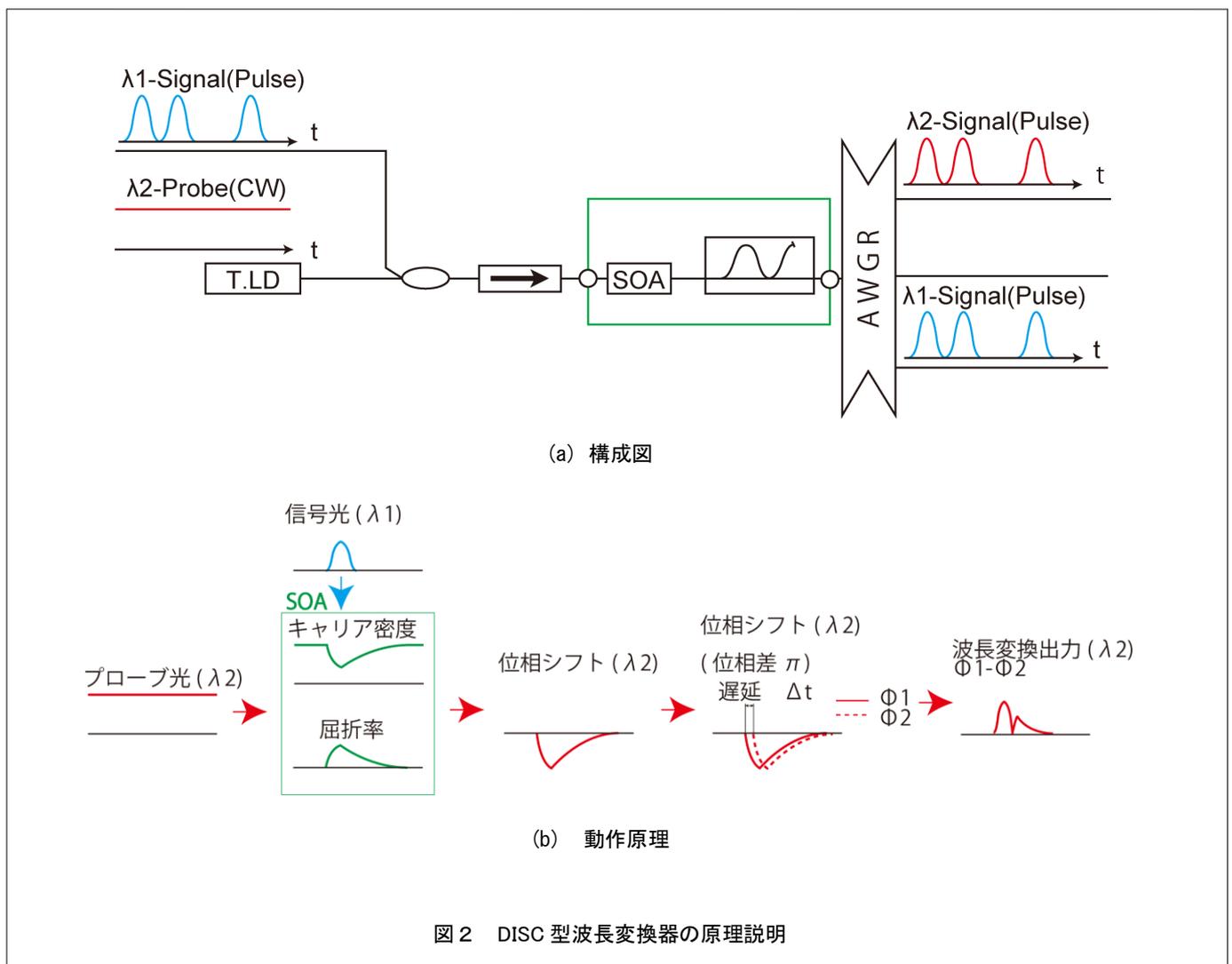
光スイッチとして DISC を用いるためには、波長変換による劣化を減らす等の波長変換特性の向上が必要となる。DISC の波長変換特性向上のための方法として、位相オフセットと BPF 離調による波形改善効果<sup>(19)</sup>、波形劣化の要因検討<sup>(20),(21)</sup>、BPF 離調による消光比改善効果<sup>(22)</sup>、パターン効果の性能予測<sup>(23)</sup> について報告されている。しかし、パワー・ペナルティによる評価は行われていなかった。また、光パケットスイッチに用いるためには伝送特性向上の検討を行うことも重要となる。

そこで本報告では、Mach-Zehnder Delay Interferometer (MZDI) 位相オフセットと BPF 離調を行うことにより、SOA-DISC 型波長変換出力の波長変換特性及び伝送特性の向上について、BER 測定により検討を行ったので

報告する。

### 2. DISC 型波長変換器の動作原理

図 2 に DISC 型波長変換器の構成図 (a) ならびに動作原理 (b) を示す。DISC では SOA 1 個に対して波長  $\lambda_1$  の信号光と、異なる波長  $\lambda_2$  の CW プローブ光を合波した上で入力する。出力信号には信号光の増幅成分に加えて、信号光の誘導放出の際のキャリア密度変化にともなう位相変化 (いわゆる相互位相変調、Cross Phase modulation, XPM) の影響を受けたプローブ光が混ざる。後者について、時間遅延  $\Delta t$  の MZDI を通すことにより、主に XPM の時間変化を強度変化に変換することとなり、適切な時間遅延の MZDI、信号光・プローブ光パワーを選ぶことにより、波長  $\lambda_1$  の信号



# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

## A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems

光と同じビット系列の強度変調信号を波長 $\lambda_2$ に波長変換できることとなる。MZDIの後段(あるいは前段)に波長 $\lambda_2$ を選択する波長フィルタ(BPFやAWG)を接続することによって、所望の波長変換信号を得ることができる。

図2(b)に示すように、SOA内で生じる位相シフトをMZDIで強度変換する際に、一般的なMZDIのカプラ分岐比が1:1のため、時間遅延 $\Delta t$ より遅れた時間にサブパルスが発生する。このサブパルスが波形品質・伝送特性を劣化させる要因となるため、以下でその様子を観察すると共に、性能改善の手段を検討した。

### 3. DISC型波長変換器の特性測定系

DISC型波長変換器の特性測定系を図3に示す。信号光は波長1550nmの7段PRBS(Pseudo-Random Bit Sequence)符号RZ-OOK信号とした。波長可変レーザ(T-LD1)の出力CW光を初段の電界吸収型光変調器(Electroabsorption Modulator, EAM)でパルス・パターン発生器(Pulse Pattern Generator, PPG)の電気信号に従ってNRZ符号化した後、同じPPGの10GHzクロック信号で駆動された2段目のEAMによりRZ化した。OPSや光バッファの波長変換型光スライ

ッチ応用を意識し、転送には不要の入力信号光の出力への混入を避けられ、従って高速な波長可変BPFが不要にできることを狙って、入力信号光をSOAに対して後方から光サーキュレータを介して入力した。入力部での平均光パワーは-6dBmとした。CWプローブ光は、もう1台の波長可変レーザ(T-LD2)からの出射光を光アイソレータを介してSOAの前方から入力した。波長1540nm、光パワーは+3dBmとした。SOAとしてはCIP社(現Huawei社)のSOA-NL-OEC-1550(仕様上の特性は、波長1550nmでの飽和光出力+9.1dBm、利得31.5Db、利得飽和時のPDG0.4dB)を用いた。バイアス電流は300mAに設定した。波長1540nm CW光入力時に波長1550nm、周期2ns、パルス幅100psのパルスをSOAに入力した際の波長1540nm出力光(いわゆる相互利得変調動作)の時間波形をサンプリングオシロスコープで観測し、パワーが10%~90%の範囲で変化する時間を測定した結果、キャリア回復時間92psの結果となった。SOA出力をMZDI(FSR=40.14GHz)に入力後、出力光のパワーを補償するためにエルビウム添加光増幅器(Erbium-doped Fiber Amplifier, EDFA)で増幅し、3dB帯域0.3nmのBPFを透過してSOAおよびEDFA

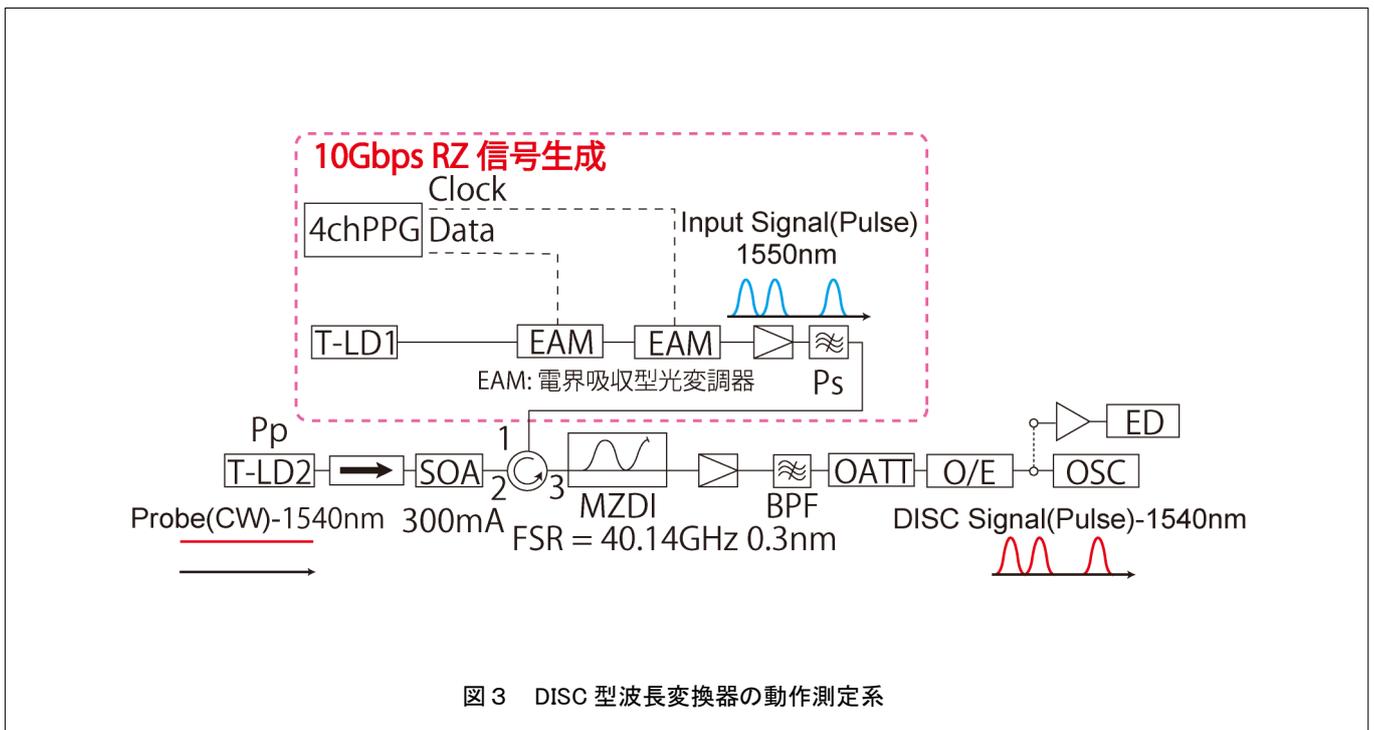


図3 DISC型波長変換器の動作測定系

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

## A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems

の増幅自然放出光 (Amplified Spontaneous Emission, ASE) を除去した。その後、フォトディテクタ (O/E) で電気信号に変換し、サンプリングオシロスコープ (OSC) で時間波形を観測した。ビット誤り率 (Bit Error Rate, BER) 測定時には、O/E 出力を電気増幅器で増幅後、エラー・ディテクタで BER を測定した。MZDI の FSR は、ビット・レート 10Gbps の信号に対して元のビット系列を再現でき、かつアイ開口が大きく維持可能な条件から選択した。

SOA の利得特性が波長・パワー依存性がある程度持ったため、DISC 型波長変換器の特性には入力信号光および CW プローブ光の波長・光パワーの条件が影響する。実際、波長 1535nm~1560nm の範囲で入力信号光・CW プローブ光の波長を変化させ、BER を測定した時の最適 BER 条件を求めた結果、上記波長の組み合わせにおいてはほぼ前述の光パワーで最適 (BER=10<sup>-9</sup>での受信感度をもとに、信号光の BER 測定結果と波長変換出力の BER 測定結果を比較したパワー・ペナルティの値が最小で 0.1dB) になることがわかっている。ただし、他の波長の組み合わせにおいても光パワーを適切に選ぶことによって、パワー・ペナルティは 0.5dB 以下の結果を得ている。したがって、以下ではパワー・ペナルティが最少となる前述の波長・光パワーの条件で、更に詳細な動作条件を検討した。

### 4. 波長変換特性の測定結果

#### 4. 1 MZDI 位相オフセットの効果

まず光ファイバを長距離伝送しない Back-to-Back 条件で、波長変換出力の波形を測定した。入力信号を図 4 (a)、MZDI 位相バイアスを 0rad に設定した際の波長変換出力を同図 (b) に示す。図 2 (b) で示したようなメインパルスに続く時間に位相の折り返しによるサブパルスが発生し、元の時間波形を再現できていない様子が見られた。そこで、MZDI の位相バイアスを調節し、波形整形することを試みた。図 5 にその原理を示す。SOA 内部の位相変化は、MZDI の分岐後の 2 信号間位相差に基づき強度変換される。MZDI の短い導波路を通った信号の出力部での位相を  $\phi_1$ 、長い導波路を通った信号の出力部での位相を  $\phi_2$ 、MZDI 位相オフ

セット量を  $\Delta\theta$  とおく。通常、入力信号のない初期状態において、CW プローブ光の出力がレベル 0 となるよう MZDI の位相を  $\pi$  に設定すると仮定する。このとき、MZDI で時間  $\Delta t$  遅延された 2 信号間の位相差は  $\phi_1 - \phi_2 + \pi$  となる。ここで、更に出力パルスの立下りに相当する時間範囲の位相差が 0 となるように、 $\Delta\theta = \phi_1 - \phi_2 + \pi$  に設定すると、サブパルスを抑制可能となる。なお位相オフセット量の定義として、MZDI の節の波長を  $\lambda_m$ 、信号光の搬送波長を  $\lambda_p$ 、MZDI の FSR を  $\lambda_{MZDI}$  としたとき、

$$\Delta\theta = [(\lambda_m - \lambda_p) / \lambda_{MZDI}] \times 2\pi \text{ [rad]}$$

とした。すなわち、 $\lambda_m$  より  $\lambda_p$  が短波長のときプラス、長波長のときマイナスとなる。

MZDI 位相バイアスを -0.2rad、-0.39rad に設定した測定結果をそれぞれ図 4 (c)、(d) に示す。位相バイアスの変化とともに、サブパルスの強度が下がっている様子が確認できた。一方、(d) が最も波形が明瞭にも見えるが、レベル 0 の強度が位相バイアスシフトの関係で増加してしまう結果となった。

信号品質を定量的に評価するため、BER の測定を行った。その結果を図 6 に示す。図に示すように位相バイアスシフト量には最適値が存在することがわかり、今回の検討では -0.2rad が最適値との結果となった。

#### 4. 2 BPF 離調の効果

更に波形整形を行い、シングルモードファイバ (SMF) を伝送した場合の品質改善条件を検討した。参考文献(22)で報告されているように、波長 1550nm において正の分散を持つ SMF を伝送する際には、伝送劣化を激しく引き起こす長波長成分の BPF 離調による除去が効果的であることが知られている。本研究でも同様の手法を用い、BER の測定 (Back-to-Back および SMF 25km 伝送の条件) により最適条件を検討した。以下では、離調量  $\lambda_{\text{offset}}$  の定義として、BPF の透過率最大波長  $\lambda_{\text{BPF}}$  と波長変換出力中心波長  $\lambda_p$  に対して、

$$\lambda_{\text{offset}} = \lambda_{\text{BPF}} - \lambda_p$$

と定義する。すなわち、 $\lambda_{\text{BPF}}$  より  $\lambda_p$  が短波長 (短波長成分を選択的に除去) の場合にプラス、 $\lambda_{\text{BPF}}$  より  $\lambda_p$  が長波長 (長波長成分を選択的に除去) の場合にマ

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems

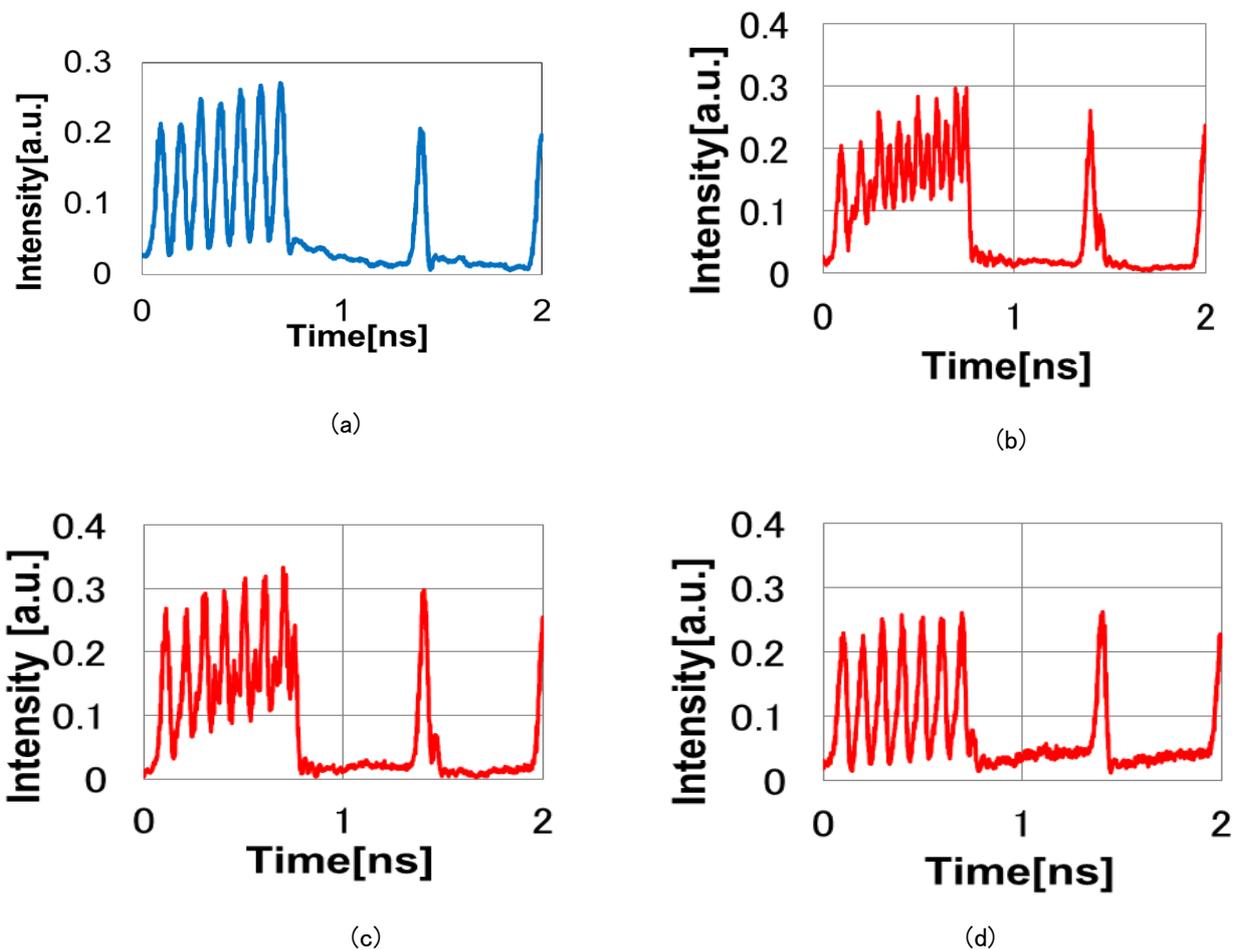


図4 波長変換器の入出力波形 (a) 入力信号 (b) 波長変換信号 (位相バイアス 0rad)  
 (c) 波長変換信号 (位相バイアス-0.2rad) (d) 波長変換信号 (位相バイアス-0.39rad)

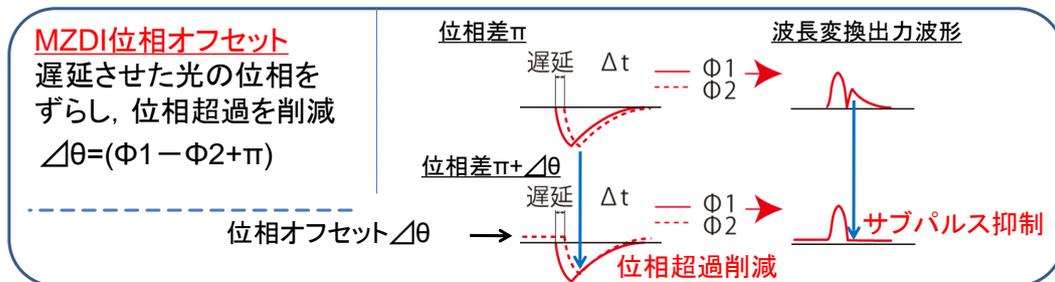


図5 DISC型波長変換器出力のMZDI位相オフセットによるサブパルス抑制原理

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems

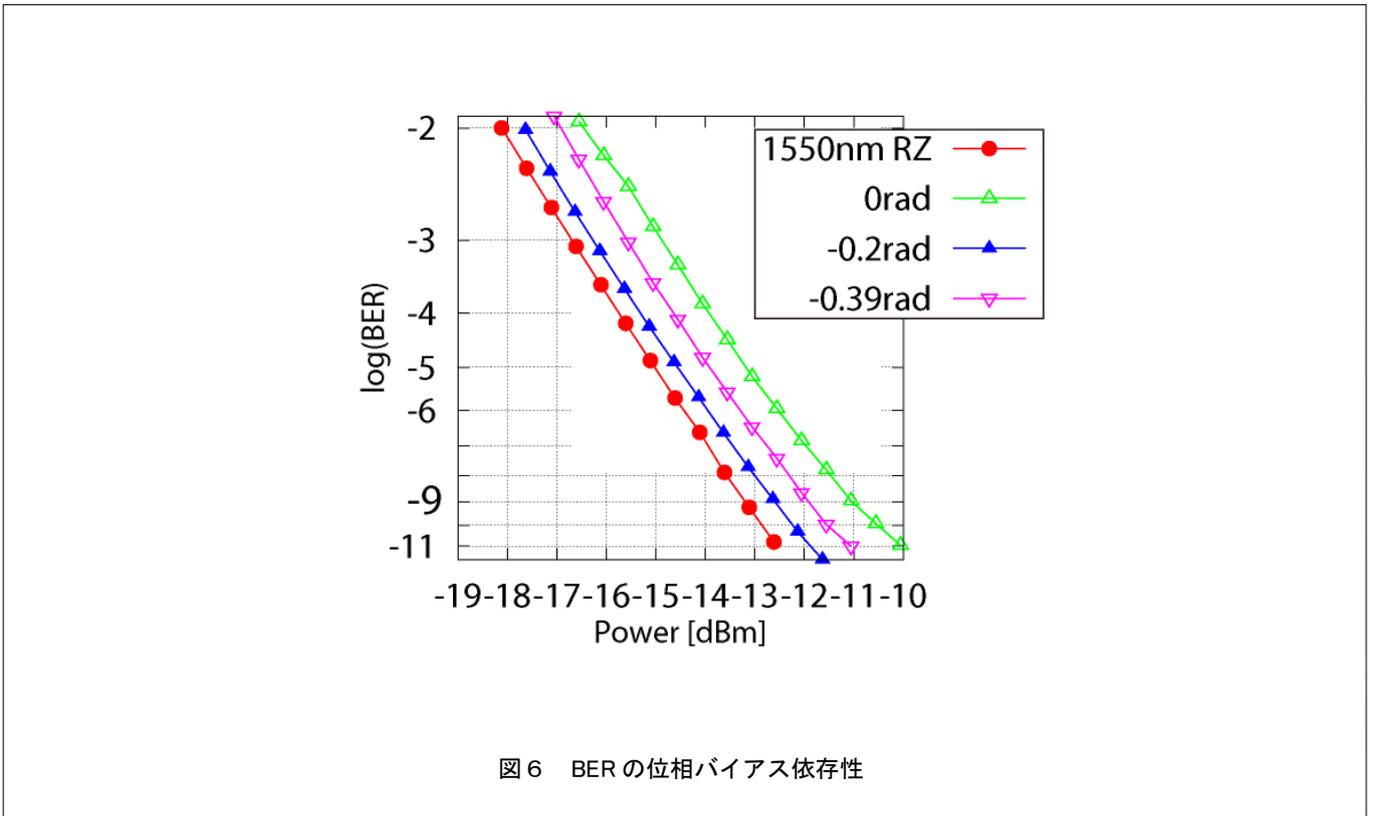


図6 BERの位相バイアス依存性

イナスとなる。

図7に測定結果を示す。(a) Back-to-Back (位相バイアス 0rad) (b) SMF 25km 伝送 (位相バイアス 0rad) (c) Back-to-Back (位相バイアス-0.2rad) (d) SMF 25km 伝送 (位相バイアス-0.2rad) の条件の結果となっている。いずれの条件においても、入力信号光を基準にしたパワー・ペナルティを最少とする条件が存在することがわかると同時に、伝送距離・位相バイアス値によって最適条件が異なる様子もわかる。図8に、図7(a)~(d)に対して横軸にBPF離調量、縦軸にパワー・ペナルティをとり、位相バイアス値・伝送距離ごとに結果をプロットした。まず、位相バイアス値 0rad のパワー・ペナルティはBPFのマイナス離調条件において、位相バイアス値-0.2rad よりも伝送距離にかかわらず大きい結果であることがわかる。また、位相バイアス値 0rad ではBack-to-Backにおいてプラス離調、25km 伝送においてマイナス離調で最小のパワー・ペナルティとなった。一方、位相バイアス値-0.12rad においては、Back-to-Back、SMF25km 伝送ともに-0.2nm 離調付近で最小値をとった。この結果

は、ある程度の伝送距離の範囲においては一定のBPF離調によって信号品質が維持可能であることを意味し、OPS応用にとって重要な特性であると考えられる。

## 5. まとめ

波長変換型光スイッチを用いたOPSおよび光バッファ実現を目的として、その中に用いる波長変換器に着目して研究を行った。具体的にはSOAとMZDIの組み合わせからなるDISC型波長変換器を対象として、その性能向上のための動作条件を検討した。

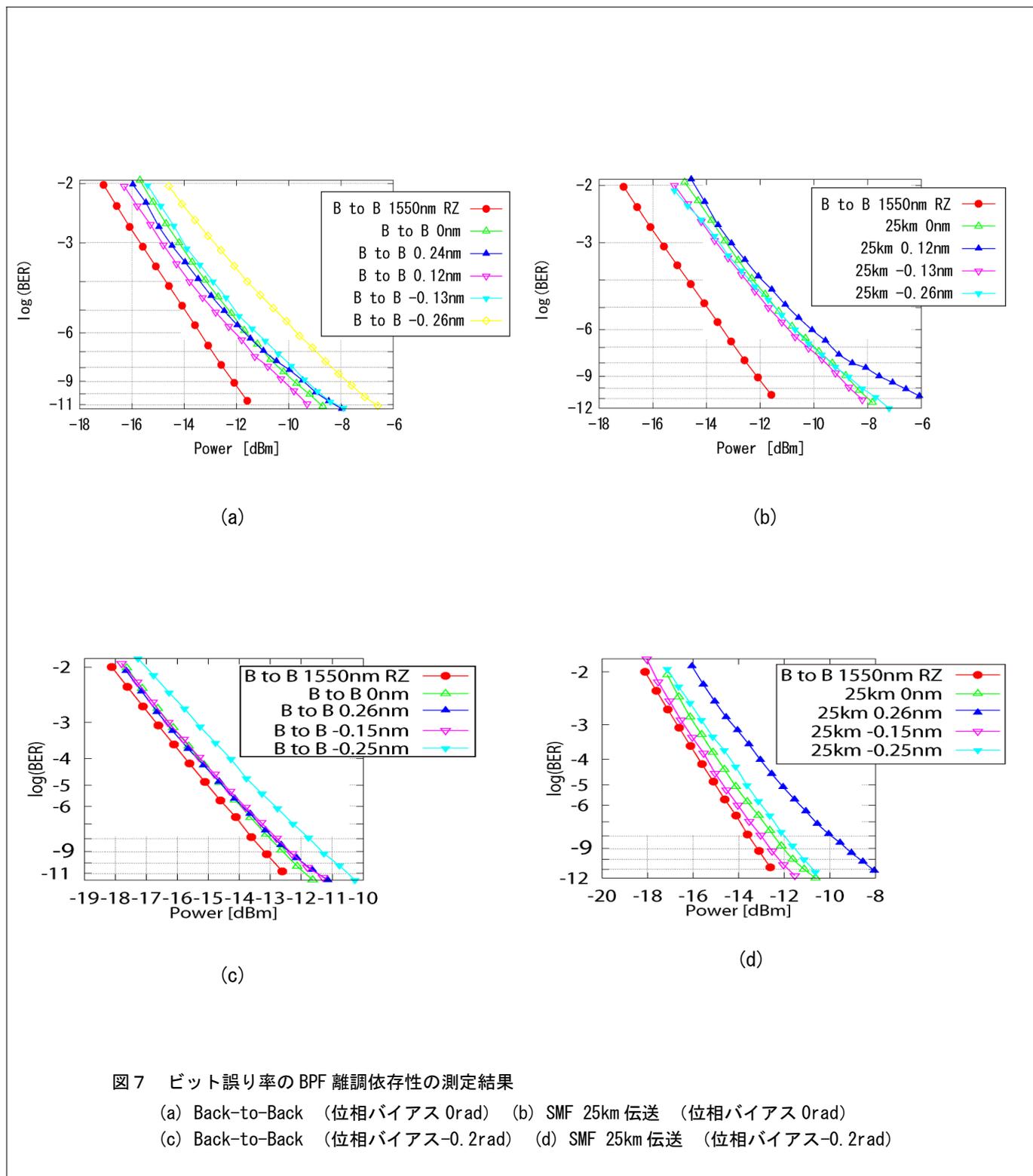
10.72Gbps 7次M系列信号を対象として自由スペクトルレンジ(FSR)40.12GHzのMZDIを用いたDISC出力信号のビット誤り率評価を行ったところ、遅延干渉計の位相バイアス0rad、バンドパスフィルタ(BPF)の透過波長の離調0nmの条件では波形が崩れる傾向が見られた。この原因はMZDI分岐比が1:1であり、時間遅延成分のサブパルスの影響が顕著となった結果と考察された。そこで、この問題解決のためMZDI位相バイアスを短波長側に-0.12radシフトした結果、サブパルス抑制によるパワー・ペナルティ改

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

## A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems

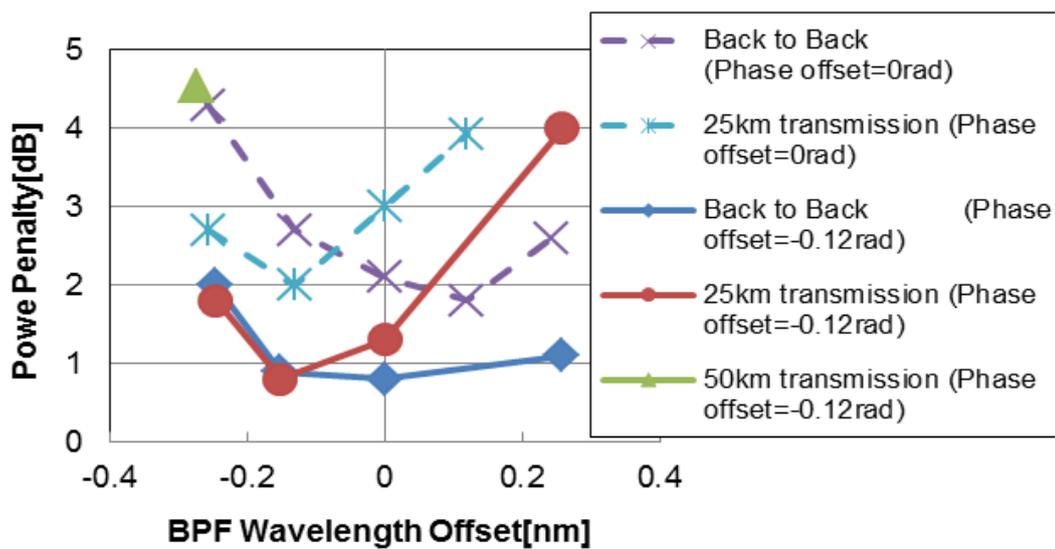
善の傾向が見られた。また、同時に BPF 透過波長の短波長側への-0.15nm 離調条件において、伝送時の分散による波形劣化の主要因となる長波長成分を除去で

きるため、25km シングルモード・ファイバ (SMF) 伝送時においてもパワー・ペナルティを改善可能である結果が得られた。

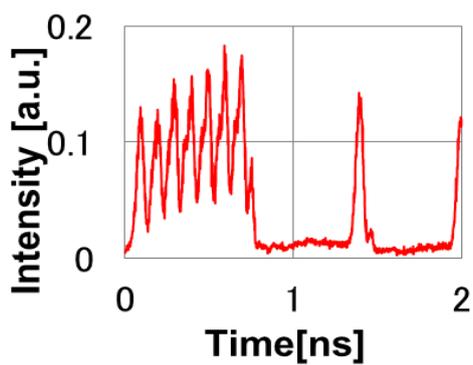


# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems



(a)

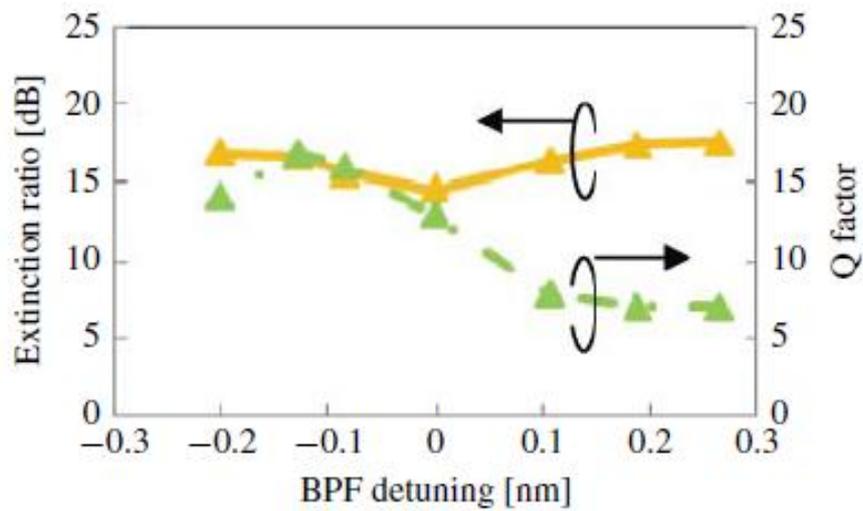


(b)

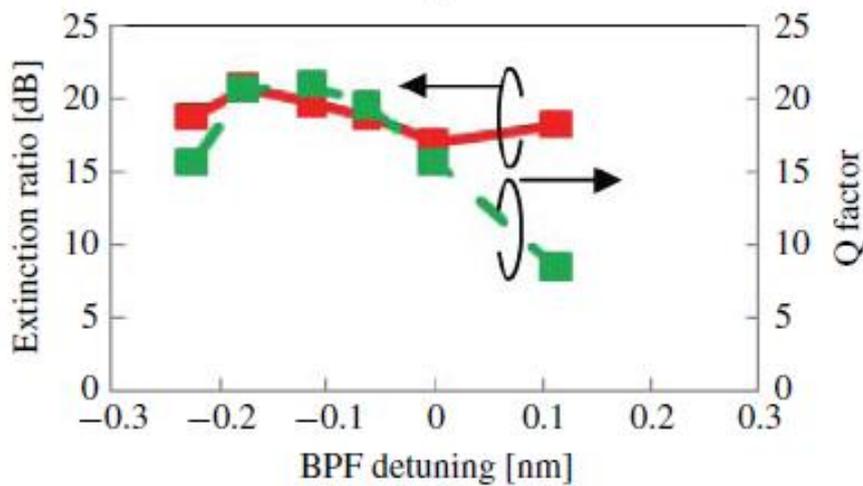
図8 パワーペナルティのBPF 離調依存性

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems



(a)



(b)

図9 波長変換出力の消光比・Q値のBPF離調依存性

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

## A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems

善の傾向が見られた。また、同時に BPF 透過波長の短波長側への-0.15nm 離調条件において、伝送時の分散による波形劣化の主要因となる長波長成分を除去できるため、25km シングルモード・ファイバ (SMF) 伝送時においてもパワー・ペナルティを改善可能である結果が得られた。

### 用語説明

**波長変換**：入力信号と同じビット系列を持つ、異なる波長の信号を生成すること。

**パワー・ペナルティ**：所定のビット誤り率を得る受信信号の受信光感度を、基準信号と比較した差の値。

**自由スペクトルレンジ**：干渉計などの透過率の波長依存性が周期的に繰り返す場合、その周期を指す。物理的にはデバイス内の 2 光路間の位相差が  $2\pi$  異なる周波数差に相当する。

### 参考文献

- (1) D. Blumenthal, P. Prucnal, and J. Sauer, "Photonic packet switches: Architectures and experimental implementations," *Proc. IEEE*, **Vol. 82, No. 11**, pp. 1650-1667, (1994).
- (2) S.J.B. Yoo, H.J. Lee, Z. Pan, J. Cao, Y. Zhang, K. Okamoto, and S. Kamei, "Rapidly switching all-optical packet routing system with optical-label swapping incorporating tunable wavelength conversion and a uniform-loss cyclic frequency AWGR," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **Vol.14, No.8**, pp.1211-1213, (2002).
- (3) R. Takahashi, and H. Suzuki, "1-Tb/s 16-b all-optical serial-to-parallel conversion using a surface-reflection optical switch," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **Vol.5, No.2**, pp.287-289, (2003).
- (4) N. Wada, H. Harai, and F. Kubota, "Optical packet switching network based on ultra-fast optical code label processing," *IEICE Trans. Electron.*, **Vol.E87-C, No.7**, pp.1090-1096, (2004).
- (5) H. Uenohara, T. Seki, and K. Kobayashi, "Investigation of high-speed wavelength routing and bit-error-rate performance of an optical packet Switch With an

Optical Digital-to Analog Conversion-Based Header Processor", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **Vol.16, No.3**, pp.951-953, (2004).

- (6) K. Sasayama, Y. Yamada, K. Habara, and K. Yukimatsu, "FRONTIERNET: Frequency-routing-type time-division interconnection network", *IEEE J. Lightwave Technol.*, **Vol.15, No.3**, pp.417-429, (1997).
- (7) H. Furukawa, N. Wada, H. Harai, N. Takezawa, K. Nashimoto, and T. Miyazawki, "640Gbit/s/port optical packet switch prototype with optical buffer using 1×8 PLZT optical switch and parallel pipeline buffer manager", *33th European Conference on Optical Communication (ECOC2008)*, **Tu.3.D.7**, Brussels, (2008).
- (8) T. Sakamoto, K. Noguchi, R. Sato, A. Okada, Y. Sakai, and M. Matsuoka, "Variable optical delay circuit using wavelength converters", *Electron. Lett.*, **Vol.37, No.7**, pp.454-455, (2001).
- (9) O.F. Yilmaz, S.R. Nuccio, X. Wu, and A.E. Willner, "40-Gb/s optical packet buffer using conversion/dispersion-based delays", *J. Lightwave Technol.*, **Vol.28, No.4**, pp.616-623, (2010).
- (10) H. Kawaguchi, "Bistable laser diodes and their applications: state of the art", *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.* **Vol. 3, No.5**, pp.1254-1270, (1997).
- (11) C. J. Chang-Hasnain, P. C. Ku, J. Kim, and S. L. Chuang, "Variable optical buffer using slow light in semiconductor nanostructures," *Proc. IEEE*, **Vol. 91, No. 11**, pp. 1884-1897, (Nov. 2003).
- (12) T. Baba, D. Mori, K. Inoshita, and Y. Kuroki, "Light localization in photonic crystal line defect waveguides", *IEEE J. Selected Topics Quantum Electron.*, **Vol.10, No.13**, pp.484-491, (2004).
- (13) Y. A. Vlasov, M. O'Boyle, H. F. Hamann, and S. McNab, "Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides," *Nature*, **Vol. 438, No. 7065**, pp. 65-69, (2005).
- (14) R. W. Boyd, M. S. Bigelow, N. Lepeshkin, A. Schweinsberg, and P. Zerom, "Fundamentals and

# 高速光バッファ回路用波長変換器に関する研究

A study on a wavelength converter for high-speed optical buffering systems

- applications of slow light in room temperature solids,” in *Proc. Annu. Meeting IEEE Lasers and Electro-Opt. Soc.*, 2004, pp. 835-836.
- (15) N. McKeown, “Packet-switching with little or no buffers”, 31<sup>st</sup> European Conference on Optical Communication (ECOC2005), Plenary.
- (16) T. Mori, H. Uenohara, and K. Kobayashi, “Investigation of Improvement of Dynamic Switching Operation for Wavelength Switch with Super-Structure-Grating(SSG)-DBR-LD, Delayed-Interference Signal-Wavelength Converter (DISC), and Band Pass Filter”, *J. Lightwave Technol.*, **Vol. 28, No.23**, (2010) ,pp.3444-3453.
- (17) K. Tajima, “All-optical switch with switch-off time unrestricted by carrier recovery time”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **Vol.32, Part 2, No.12A**, pp.L1746-L1749, (1993).
- (18) J. Leuthold, B. Mikkelesen, G. Raybon, C.H. Joyner, J.L. Pleumeekers, B.I. Miller, K. Dreyer and R. Behringer, “All-optical wavelength conversion between 10 and 100 Gb/s with SOA delayed-interference configuration”, *Opt. Quantum Electron.* **33**, (2001), pp.939-952.
- (19) J. Leuthold, D.M. Marom, S. Cabot, J. J. Jaques, R. Ryf, and C.R. Giles, “All-optical wavelength conversion using a pulse reformatting optical filter”, *J. Lightwave Technol.*, **Vol.22, No.1**, (2004), pp.186-192.
- (20) J. Sakaguchi, M.L. Nielsen, T. Ohira, R. Suzuki, and Y. Ueno, “Observation of small sub-pulses out of the delayed-interference signal-wavelength converter”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **Vol.44, No.44**, (2005) pp.L1358-1360.
- (21) M.L. Nielsen, J. Mørk, R. Suzuki, J. Sakaguchi, and Y. Ueno, “Experimental and theoretical investigation of the impact of ultra-fast carrier dynamics on high-speed SOA-based all-optical switches”, *Opt. Express*, **Vol.14, No.1**, (2006), pp.331-347.
- (22) B. Zhang, S. Kumar, L.S. Yan and A.E. Willner, “Extinction ratio enhancement of SOA-based delayed-interference signal converter using detuned filtering”, *Opt. Commun.*, **280**, (2007) ,pp.202-205.
- (23) J. Xu, Y. Ding, W. Xue, C. Peucheret, J. Seoane, B. Zsig, P. Jeppesen, and J. Mørk, “Experimental validation of efficient methods for the prediction of patterning effects in SOA-based optical switches”, 36<sup>th</sup> European Conference on Optical Communications (ECOC2010), P2.22, (2010).

この研究は、平成19年度SCAT研究助成の対象として採用され、平成20年度～22年度に実施されたものです。