

半導体光増幅器を用いた相互位相変調型波長変換モジュールとフォトリックネットワークへの応用

佐藤, 里江子

九州大学大学院システム情報科学府電気電子工学専攻 : 博士後期課程 | 日本電信電話株式会社NTTデバイスイノベーションセンタ

<https://doi.org/10.15017/1792157>

出版情報 : 九州大学大学院システム情報科学紀要. 22 (1), pp.9-16, 2017-01-25. 九州大学大学院システム情報科学研究所

バージョン :

権利関係 :



半導体光増幅器を用いた相互位相変調型波長変換モジュールと フォトニックネットワークへの応用

佐藤里江子*

Cross-phase Modulation Type Wavelength Converter Module Using Semiconductor Optical Amplifier and Its Application to Photonic Networks

Rieko SATO

(Received November 25, 2016)

Abstract: This paper describes the selective wavelength conversion of 2.5 G-b/s optical packets from the light of a Fabry-Perot laser-diode (FP-LD) to the light of an ITU-T grid wavelength. This is an example of application of the cross-phase modulation (XPM) type wavelength converter to future photonic networks in which optical signal sources without wavelength control is used at user-end terminals. We fabricated an XPM wavelength converter module by using hybrid integration technique. The module consists of a semiconductor optical amplifier (SOA) array and planar-lightwave-circuit (PLC) waveguide. We confirmed the good feasibility of the selective wavelength conversion and 80-km transmission on single-mode fiber (SMF) after the wavelength conversion without any signal degradation.

Keywords : Selective wavelength conversion, Cross-phase modulation, Hybrid integration, Semiconductor optical amplifier, Planar lightwave circuit, Optical packets

1. は じ め に

近年のデジタルデータ通信量は増加の一途をたどり、2020年には全世界で40ゼタバイトに達する見込みであり、これは2010年時の40倍に相当する¹⁾。このため基幹系だけでなくメトロ系、アクセス系やLAN系に至るまで通信容量が増大している。1本の光ファイバで大容量の光信号を送受信する波長分割多重化 (WDM : wavelength division multiplexing) 技術によって伝送容量は飛躍的に向上したが、このような大容量ネットワークを効率的且つ柔軟に運用するために、光の波長を効率的に使うフォトニックネットワーク技術が重要となる。フォトニックネットワークでは各ノードにおけるスループットを上げるため、光信号を電気信号へ変換することなく処理する機能が求められている。中でも信号光のビットレートやフォーマットに依存しない全光波長変換器はキーデバイスの1つである。

一方、光通信技術の適用領域はアクセス系やLAN系、WAN系にも拡大しており、将来的にはWDMネットワークを介して光パケット信号を送受信するFig. 1のようなフォトニックネットワークが考えられる。WDMネットワークで使用される信号光波長は、単一モード発振する分布帰還型レーザ (DFB-LD) の温度や駆動電流の調整によって厳密に制御されたITU-Tグリッド波長²⁾である。これに対し、ネットワークコスト低減の観点から、ユーザ端末で使用される光送信器はファブリ・ペローレーザ (FP-LD) や無温調DFB-LDのような波長制御不要 (温度調整機構な

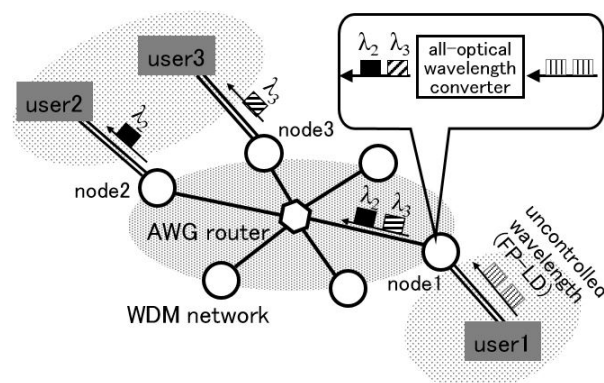


Fig. 1 An example of photonic network with all-optical wavelength conversion.

し)の光源であることが望ましい。このような非制御波長の光パケット信号は、WDMネットワークで使用できるように、各ノードにおいてITU-Tグリッド波長へ変換する必要がある。

Fig. 1で、user1からuser2とuser3へ光パケット信号を送信する場合を考える。まずuser1から異なる宛先の非制御波長の光パケット信号列がnode1に送信される。node1には全光波長変換デバイスがあり、パケット毎に異なるITU-Tグリッド波長 λ_2 および λ_3 に変換する。WDMネットワークとしてここではアレイ導波路回折格子 (AWG : arrayed-waveguide routing) -STARネットワーク³⁾を想定した。これは、波長ルーティング機能を有するAWGルータを中心に各ノードを配置したスター型のネットワーク構成で、伝送経路毎に固定波長が割り当てられている。例えば、node1からnode2への伝送経路には波長 λ_2 が、node1からnode3への伝送経路には波長 λ_3 が割り当てられている。AWGは石英系の平面光波回路 (PLC : Planar

平成28年11月25日受付

* 電気電子工学専攻博士後期課程

日本電信電話株式会社NTTデバイスイノベーション
センタ

Lightwave Circuit) ⁴⁾で構成された入力数ポート数 N 本×出力ポート数 N 本の波長合分波器であり、異なる波長の光が同じ導波路に入力すると波長毎に異なる導波路へ自動的に波長分離して出力する。こうして、AWG ルータに入力した波長 λ_2 の光パケット信号は node2 へ出力し user2 へ、波長 λ_3 の光パケット信号は node3 へ出力し usert3 へ送信することができる。

全光波長変換デバイスの中でも、半導体光増幅器 (SOA : Semiconductor Optical Amplifier) を用いた光スイッチ型のデバイスは、ファイバや SOA を用いたコヒーレント型デバイス (四光波混合等) と比較して、小型で高変換効率の特徴を有し、動作波長帯域も 30nm 程度と広帯域である。SOA を用いた光スイッチ型の波長変換デバイスはその動作原理から 2 つに分類される。1 つは相互利得変調型 (XGM : Cross-gain Modulation)、もう 1 つは相互位相変調型 (XPM : Cross-phase Modulation) である。Fig. 2(a) に XGM 型の構成を、Fig. 2(b) に XPM 型 (マッハ・ツェンダ干渉計)、Fig. 2(c) に XPM 型 (マイケルソン干渉計) の構成を各々示す。XGM 型、XPM 型ともに、SOA に波長 λ_s の信号光 (データが乗った光) と波長 λ_c の CW 光 (データが乗っていない光) を入力し、信号光の強度変化によって SOA の利得や屈折率 (位相) を変化させ、CW 光に信号光のビットパターンを転写する方式である。

Fig. 2 を用いて各々の動作原理について説明する。Fig. 2(a) の XGM 型では、入力信号光パワーの増加に伴い SOA 内の利得飽和により利得が減少し、波長 λ_c の CW 光に対する利得が減少し出力光が減る。SOA 内の利得が回復する

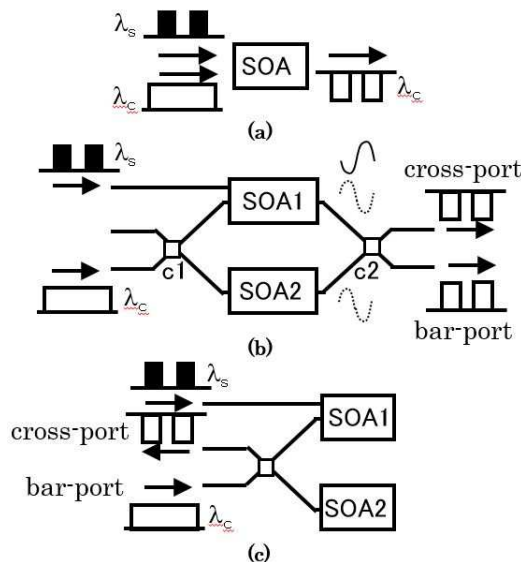


Fig. 2 Schematic structure of all-optical wavelength conversion using SOA.

- (a) XGM type
- (b) XPM type (Mach-Zehnder interferometer)
- (c) XPM type (Michelson interferometer)

と CW 光に対する利得も回復し出力光が増えるため、出力光は入力信号光のビットパターンに対して反転した形状になる。XPM 型の動作原理を図 2(b)のマッハ・ツェンダ干渉計を用いて説明する。マッハ・ツェンダ干渉計に入力した CW 光は、光 3-dB カプラ c1 によって 2 分岐され、SOA1 と SOA2 を各々通過し、光 3-dB カプラ c2 で合波される。このとき 2 経路の位相差が 0 であれば (図中点線波形)、強めあった光はクロスポートに出力する。この状態で波長 λ_s の信号光を SOA1 のみに入力すると、SOA1 内で利得減少によってキャリア密度が減少し、屈折率は増加し、SOA1 内を通過する CW 光の位相 $\phi = n \times k \times L$ (n : 屈折率, $k=2\pi/\lambda$: 波数, L : SOA 長) が変化する。その位相変化量が π になると (図中実線波形)、c2 で合波されるとき 2 経路の位相差も π となり、弱めあった光がクロスポートから出力する。つまりクロスポートからは反転信号光、もう一方のバーポートからは非反転信号光が出力する。SOA の電流調整によって信号光未入力時の干渉条件を位相差 π に設定すれば、クロスポートから非反転信号光が、バーポートから反転信号光が出力する。Fig. 2 (c) のマイケルソン干渉計の構成はマッハ・ツェンダ干渉計を半分に折り返した構成であるが動作原理は同じである。

次に XGM 型と XPM 型の伝送時の変調特性について比較する。Fig. 3 に SOA 飽和光出力特性の概略図を示す。横軸は出力光パワー (dBm) を示し、縦軸は信号利得 (dB) を示す。横軸が入力光パワーでないのは、SOA の基本的な評価指標に飽和出力光パワー P_{3dB} (利得が未飽和時から 3dB 低下するときの出力光パワー) があるためである。信号利得には線形領域と非線形領域があり、XGM 型も XPM 型も利得が変化する非線形領域で動作する。Fig. 3 に示すように XGM 型は高消光比を得るために利得を大きく変化 (約 10dB) させる必要があるのに対し、XPM 型では位相変化 π を生じさせるために必要な利得変化は 3-4dB 程度である。このように XGM 型では大きな利得変動が必要となるため、キャリア密度、屈折率の時間的変化量が大きくなり、チャ

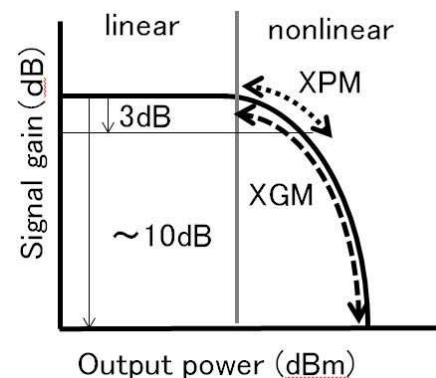


Fig. 3 Schematic of dependence of signal gain on output power of SOA.

ープ（波長変動）が増える。チャープは伝送波形を劣化させ変調速度や伝送距離の制限要因となるため、より低チャープの XPM 型のほうが長距離伝送に適している。また、XPM 型では光干渉計を利用しているため出力消光比が高いというメリットもある。

以上のように XGM 型と XPM 型を比較すると、XGM 型のほうが構成は簡単であるが、XPM 型のほうが低チャープ、高出力消光比等、波長変換デバイスとして優れた特徴を持つ。しかし、XPM 型は SOA と光干渉計の集積化が必要であり作製に手間がかかるため、集積化技術が重要である。今回我々は、光能動素子（SOA）と受動回路（光干渉計）を各々独立に最適化し、それらを組みあわせるハイブリッド集積を選択した。SOA 以外の光導波路部を低損失な石英系 PLC で構成することにより、複雑な回路構成でも全体の光挿入損失を低減することができる。PLC は半導体プロセス技術を応用してシリコン（Si）基板上に形成された石英系ガラス導波路構造であり、Si 基板をテラス形状に加工した PLC プラットフォーム上に SOA を搭載することによってハイブリッド集積回路を実現できる。また、Si テラスは熱伝導性に優れるため搭載した SOA のヒートシンクとしても機能する。

本論では、WDM ネットワークを介したユーザ間の光パケット信号の送受信を目指して、ハイブリッド集積技術により作製した XPM 型全波長変換モジュールの特性について論ずる。第 2 章では、SOA を PLC プラットフォーム上に搭載する方法と素子の搭載特性について述べる。第 3 章では作製した XPM 型波長変換モジュールを用いて、非制御波長から ITU-T グリッド波長へのパケット毎の波長変換動作について、フィージビリティを確認する実験を行う。非制御波長の信号光源として本論ではマルチモード発振光の FP-LD を用いている。また、波長変換前後の伝送特性からネットワーク規模についても検討する。

2. XPM 型波長変換モジュール

本章では、ハイブリッド集積技術を用いた XPM 型波長変換モジュールの作製方法について述べる。特に、SS-SOA を PLC プラットフォーム上に精度よく実装するために用いたパッシブアライメント技術について説明する。また、作製したモジュールの光結合特性について述べる。

2.1 SOA-PLC ハイブリッド集積技術

ハイブリッド集積における課題は、SOA と PLC 導波路の光結合効率の向上である。スポットサイズが約 $1\mu\text{m}$ の SOA と約 $4\mu\text{m}$ の PLC 導波路との光結合損失は 7.5dB にもなる。スポットサイズとは、ビーム径が一番細くなるビームウェスト位置で、光強度がピーク値の $1/e^2$ になるビーム半径 r (μm) であり、スポットサイズが小さいとビーム

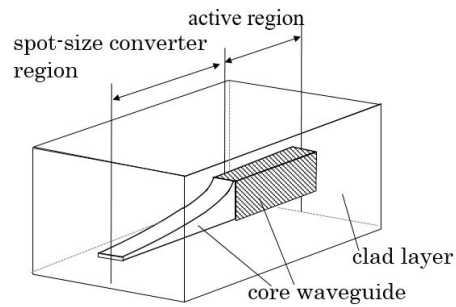


Fig. 4 Structure of SS-SOA.

の拡がり角が大きくなる。PLC 導波路との光結合効率を上げるため、SOA のスポットサイズを拡大した $1.55\mu\text{m}$ 帯スポットサイズ変換部付き半導体光増幅器（SS-SOA : spot-size converter integrated semiconductor optical amplifier）が開発された⁵⁾。Fig. 4 に SS-SOA の構造概略図を示す。スポットサイズ変換部は SOA 活性層部の出力端に形成された垂直方向テーパ形状のパッシブ光導波路である。コア導波路の断面積を徐々に小さくすると、コア導波路への光の閉じ込め効果は相対的に弱くなるため、スポットサイズを拡大することができる。活性層部の長さは $200\mu\text{m}$ 、スポットサイズ変換部の長さは $300\mu\text{m}$ 、前端面は CL 面（へき開面）に反射防止膜が施され、後端面は CL 面のままである。実際に PLC プラットフォーム上に搭載した素子は 2 連の SS-SOA である。使用した PLC 導波路はコアサイズ $6\mu\text{m}^2$ 、導波路の比屈折率差 $\Delta n \equiv (n_1 - n_2) / n_1$ (n_1 : コアの屈折率、 n_2 : クラッドの屈折率) は 0.75 である。

次に XPM 型波長変換モジュールのハイブリッド集積技術、特に SS-SOA を PLC プラットフォーム上に搭載するパッシブアライメント技術について説明する。本技術では、光半導体素子を発光させずに、素子と実装基板上に作製した位置合わせ用のマークを利用して、機械的精度のみで SS-SOA と PLC 導波路の位置合わせを行う。Fig. 5 にパッシブアライメント装置の概略図を示す。SS-SOA のアノード電極面（コア導波路に近い面）と PLC プラットフォーム上の各々に位置合わせ用の金マークが形成されている。マークの形状は正方形であり、SS-SOA 側のマークに比べ PLC プラットフォーム上のマークのほうが大きい正方形となっている。

搭載手順を以下に説明する。まず SS-SOA 素子の裏面電極をコレットと呼ばれる真空ピンセットで吸着し PLC プラットフォーム上に移動させる。この状態で上部に設置されたビジコンカメラと同方向から赤外光を照射し、重なり合った金マークの反射像を観測する。このときマーク反射像の観測できるよう、SS-SOA の裏面電極はマーク領域には形成されない。Fig. 5 に実際にカメラで観測したマーク

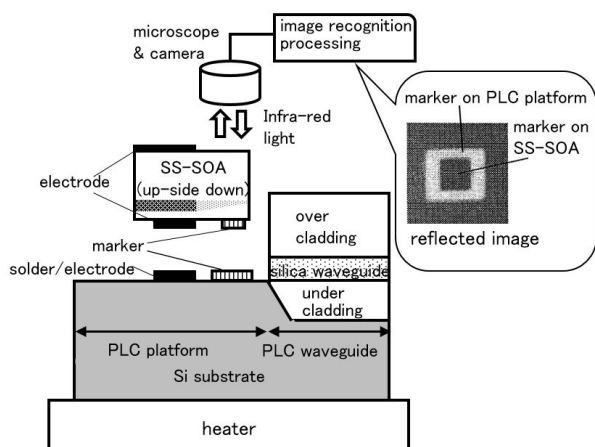
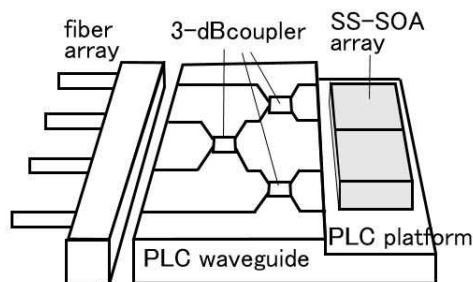


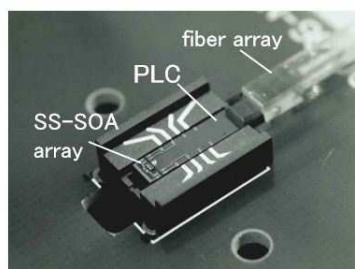
Fig. 5 Cross sectional view of passive alignment.

画像を示す。図中の白い四角が PLC プラットフォーム上のマーカであり、その内部に観測される黒い四角が SS-SOA 上のマーカである。次に、画像認識処理によって素子と基板各々のマーカ中心位置が検出され、素子マーカの中心位置が基板マーカの中心位置と一致するように素子の位置を調整する。本実装ではサブミクロンオーダーの位置合わせが可能であり、位置調整に要する時間は 1 秒以内である。位置決め後、素子を PLC プラットフォーム上に押しつけ、基板下側に設置されたヒータの昇温・冷却工程により AuSn 半田固定する。

本実装方法で行う位置調整は水平面（横軸方向 x 、光軸方向 z 、回転角 θ ）のみで、高さ方向の調整は不要である。素子の上部電極面からコア導波路までの高さは加工プロセスによって正確に制御できるため、素子の裏面を上側にして



(a) Structure of module



(b) Photograph of module

Fig. 6 Structure and photograph of module.

搭載することによって自動的に最適な高さとなる。

素子搭載完了後、素子電極から PLC プラットフォーム上の配線部へワイヤボンディングを行い、4 本のシングルモードファイバ (SMF) アレイを PLC 出力端に UV 硬化接着剤で接続し、最後にセラミックキャリアに固定した。

Fig. 6 (a) に作製したマイケルソン干渉計型の XPM 波長変換モジュールの構成概略図を、Fig. 6 (b) にモジュール写真を示す。PLC サイズは $13 \times 3 \times 1 \text{ mm}^3$ である。

2.2 モジュール光結合特性

モジュールの光結合損失は以下のように算出する。先に SS-SOA チップの注入電流に対する全出力光パワーを測定しておき、これを基準値とする。ファイバ実装後に、SOA に電流注入して 4 本のファイバから出力した光パワーを加算する。これを基準値と比較することによって光結合損失を見積もる。Table 1 に SOA 注入電流 80mA のときに算出した光結合損失を示す。SOA1 と SOA2 の全出力光パワーは共に 4.6mW で、ファイバ実装後の出力光パワーの合計は SOA1, SOA2 共に 2.3mW であったため、光結合損失は 3dB となる。これには SS-SOA と PLC 導波路の結合損失の他に、光カプラ 2 段とファイバアレイ実装時の過剰損失が含まれているためそれらを考慮すると、SS-SOA と PLC 導波路の結合損失は 2dB 程度と見積ることができる。スポットサイズ変換部なしの SOA と比較すると高効率な光結合が実現できていることが分かる。

Table. 1 Optical coupling loss of module.

	(mW)	current (mA)	port1	port2	port3	port4	total fiber output	total output power	optical coupling loss (dB)
SOA1		80	1.30	0.46	0.53		2.3	4.6	3.0
SOA2		80		0.54	0.43	1.30	2.3	4.6	3.0

3. パケット毎の XPM 波長変換と伝送特性

本章では、XPM 波長変換モジュールと AWG ルータを用いて、非制御波長の光信号パケットを異なる ITU-T グリッド波長へ各々変換する実験を行い、Fig. 1 に示したネットワーク形態について、①フィージビリティの確認、② SMF 伝送特性評価によるネットワーク規模の検討、を行う。①では、i) 光クロストーク、ii) 入出力信号波形、iii) パケット毎の波長変換動作、について評価する。②では、光パケット信号の符号誤り率 (ビット・エラー・レート: BER) 評価を行い、i) 波長変換前の SMF 伝送距離、ii) 波長変換による BER 特性の変化、iii) 波長変換後の SMF 伝送距離、について検討を行う。

3.1 実験系

①の実験系を Fig. 7 に示す。入力信号光源には FP-LD を用いた。FP-LD はマルチモード発振光であるが、単一モ

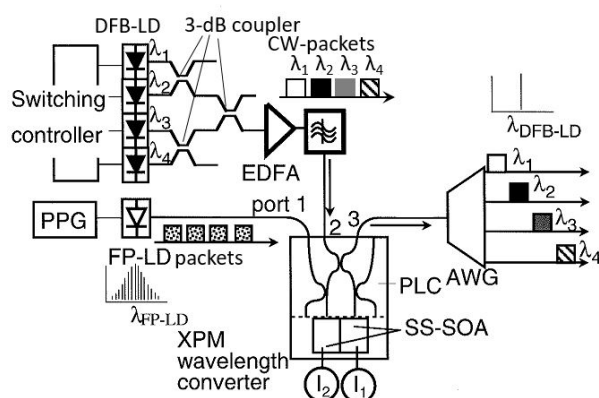


Fig. 7 Experimental setup.

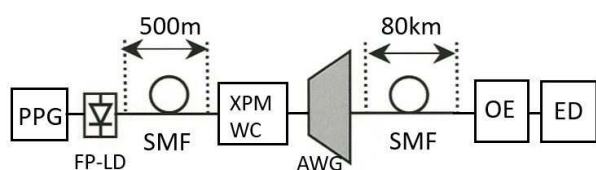


Fig. 8 Experimental setup for transmission characteristics.

ード発振光の DFB-LD と同様に SOA への入力光パワー変化によって SOA 内の屈折率を変化させることができる。大きく異なる特性は、マルチモード発振光は複数の波長が重なっているため、SMF 伝送時の波長分散の影響を大きく受ける。そのため波形劣化が生じ易く長距離伝送が困難になる。

入力光パケット信号は、パルス・パターン・ジェネレータ (pulse-pattern generator : PPG) を用いて $1.55\mu\text{m}$ 帯 FP-LD を直接変調して生成した。変調速度は 2.5Gb/s (1 ビット間隔が 0.4nsec)、パケット長は 60 バイト、ガードタイムは 4 バイト (12.8ns) である。生成した光パケット信号を XPM 波長変換モジュールのポート 1 へ入力した。次に、CW 光パケット信号を生成するために、4 つの DFB-LD の出力を光カプラでまとめて 1 本の入力ファイバとした。波長は $\lambda_1 = 1552.6\text{nm}$, $\lambda_2 = 1553.4\text{nm}$, $\lambda_3 = 1554.2\text{nm}$, $\lambda_4 = 1555.0\text{nm}$ であり波長間隔は 0.8nm (100GHz) であり、スイッチングコントローラによって 4 つの波長のいずれか 1 つを選択することができる。パケット波形は低速の PPG を用いて生成した。生成した CW 光パケット信号は光ファイバ増幅器 (EDFA : erbium doped fiber amplifier) と広帯域光フィルタを通り、XPM 波長変換モジュールのポート 2 に入力する。波長変換後の光パケット信号はポート 3 から出力し、波長に応じて AWG の異なるポートに出力する。ここで AWG は、波長ルーティング機能と共に、XPM 波長変換モジュールから出力する SOA の自然放光 (ASE : amplified spontaneous emission)

出力をカットする光フィルタの役割も果たしている。

入出力光信号波形はサンプリングオシロスコープで観測し、出力光スペクトルは光スペクトラムアナライザ (OSA : optical spectrum analyzer) で観測した (Fig. 7 では表示していない)。信号波形観測のために PPG とスイッチングコントローラとサンプリングオシロスコープは全て同期を取っている。平均 FP-LD 入力信号光パワーは 0.7dBm , SOA 電流は $I_1 = 80.7\text{mA}$, $I_2 = 55.0\text{mA}$ で固定し、XPM 波長変換モジュールは非反転モードで動作させた。

②の伝送特性の評価系を Fig. 8 に示す (CW 光パケット入力部は表示していない)。FP-LD 光パケット信号を SMF で 500m 伝送し、XPM 波長変換モジュールへ入力し、波長変換後に SMF で 80km 伝送した後、受光器 (OE) で受信した信号をエラーディテクタ (ED) に入力して BER 評価を行った。ED として本実験では DC 結合の APD 受信器を用いた。FP-LD から XPM 波長変換モジュールまでの SMF 長はユーザ端末からノードまでの伝送距離に相当し、波長変換後から OE までの SMF 長はノード間の伝送距離に相当する。SMF での 80km 伝送は通常 WDM ネットワークで EDFA なしで伝送可能な距離である。また、BER 測定を行う際には全てのパケットを同一波長 (λ_2) に変換して評価を行った。

3.2 実験結果

Fig. 9 に入力 FP-LD 信号スペクトルと、波長変換後の出力信号光 (AWG 出力) の光スペクトル例を示す。FP-LD

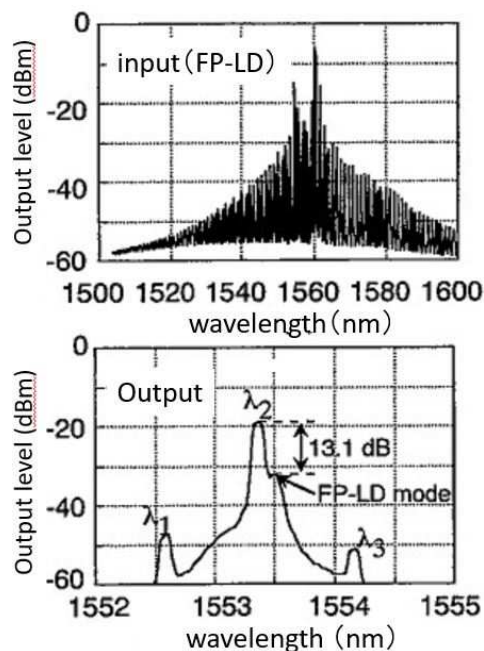


Fig. 9 Optical spectra of input and output signal.

の中心発振波長 1560nm のマルチモード発振光がシングルモード発振光へ変換されている. 本論の XPM 波長変換モジュールはマイケルソン干渉計型のため, 入力した FP-LD 信号光が SOA 後端から反射して戻りポート 3 から出力する. このため, 主信号に対するクロストーク (他信号の混線レベル)を確認する必要がある. 出力信号光のスペクトルを見ると, 波長 λ_2 の主信号に隣接して FP-LD モードが残存しているが, クロストークは-13dB と十分抑制されている. これは, DFB-LD 波長を FP-LD 中心発振波長から離して設定したためである. 他の出力信号光波長に対するクロストークは全て-13dB より小さいことを確認している.

Fig. 10 は入出力信号光のアイパタンを示す. 入力 FP-LD 信号光には緩和振動が見られ, 2.5Gb/s 以上の信号の長距離伝送は困難と思われる. 一方, この入力信号に対

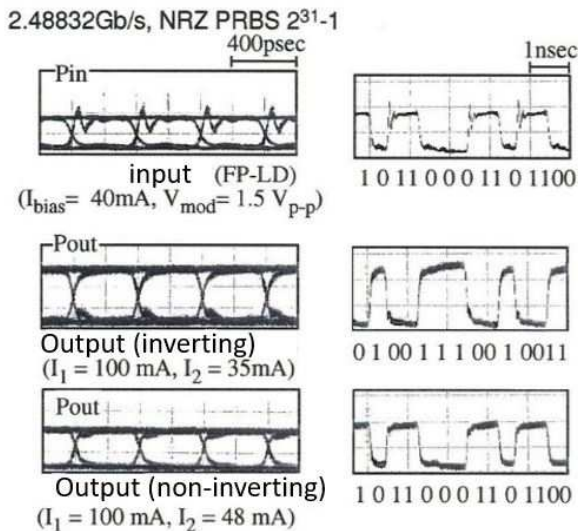


Fig. 10 Eye-patterns of input and output signal.

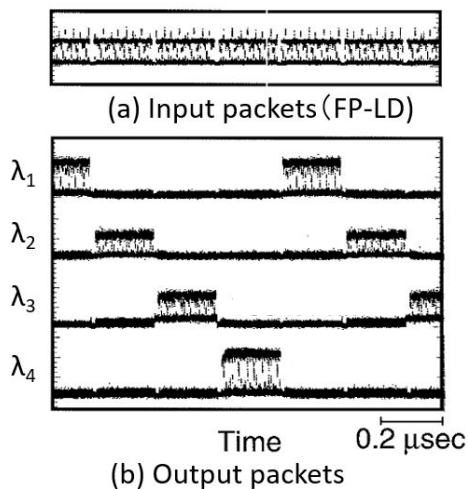


Fig. 11 Input and output optical packets.

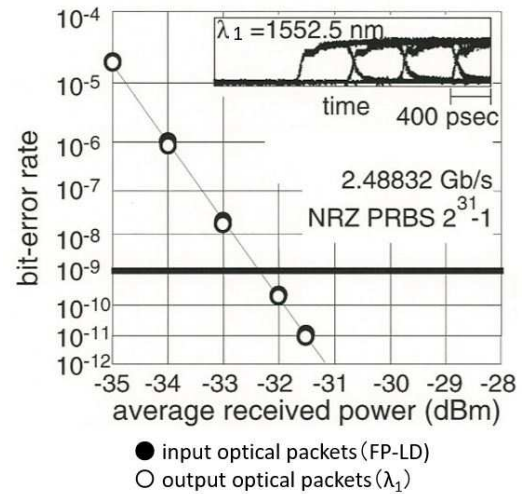


Fig. 12 BER characteristics (back-to-back).

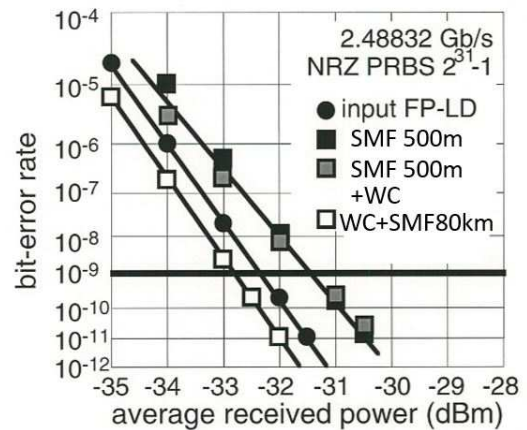


Fig. 13 BER characteristics (transmission).

して「反転」,「非反転」とともに良好なアイパタンを観測することができた.

Fig. 11 にサンプリングオシロスコープで観測した入出力光パケット信号を示す. **Fig. 11 (a)** は FP-LD の光パケット信号で, **Fig. 11 (b)** は波長変換後に AWG の異なるポートに出力した各々の光パケット信号を示す. パケット毎に異なる波長に切り替わっていることを確認することができた. **Fig. 11 (b)** で波長毎に出力光パワーが異なる理由は, XPM 波長変換モジュールの入力 CW パケット光に対する (入力 FP-LD 信号光ではなく) 偏波依存性のためであり, CW 光パケットの入力偏波が揃っていないことを示す. 入力偏波を揃えて入力するためには, 本実験のように個別の DFB-LD ではなく, 1 個の素子で複数の波長を切り替えることができる LD が必要になる.

Fig. 12 は波長変換前後の BER 特性を示す (back-to-back). 横軸は受光器に入力する平均受光パワー (dBm) を示し, 縦軸は BER を示す. BER は「符号を誤って受信したビット数/受信した総ビット数」で,

BER10⁻⁹は10億ビット送信して1ビットのエラー検出という意味である。BERが劣化するとBER特性が右にシフトし、最小受光パワー(BER10⁻⁹における平均受光パワー)が大きくなる。最小受光パワーのシフト量をパワーペナルティと呼び、パワーペナルティ1dB以内を許容範囲とする。

Fig. 12から波長変換前後でBER特性に変化はなく、波長変換による信号品質の劣化は生じないことを確認した。挿入図のアイボタンは出力光パケットの先頭ビットを拡大したもので、立ち上がりに欠けのない良好なアイ開口を確認した。

Fig. 13にBER伝送特性を示す。●は入力FP-LD光パケット信号を、■は波長変換前SMF500m伝送したFP-LD光パケット信号を、灰色の□はSMF500m伝送したFP-LD光パケット信号の波長変換後を、□はFP-LD光パケット信号を波長変換後にSMF80km伝送したときのBER特性を各々示す。

Fig. 12およびFig. 13の最小受光パワーの変化をTable 2にまとめた。Table 2の各行は、FP-LD光パケット信号の(1)SMF伝送なし、(2)SMF伝送500m、を示し、各列は(1)波長変換前、(2)-①波長変換後にSMF伝送なし、(2)-②波長変換後にSMF伝送80kmを示す。行(1)-列(1)の入力FP-LD光パケット信号の最小受光感度-32.3dBmを基準とする。行(2)-列(1)SMF500m伝送によってパワーペナルティ+0.9dBが生じた理由は、波長分散耐性が低いためである。また、行(1)-列(2)-①、および、行(2)-列(2)-①から、波長変換によってパワーペナルティは増加しないことがわかる。一方、行(1)-列(2)-②のFP-LD光パケット信号を波長変換後にSMF伝送80kmすると、伝送前に比べ最小受光感度が0.5dB向上した。光コネクタの接続損のばらつきによる測定誤差は0.2dB程度なので0.5dBの変化は有意差である。この現象は、XPM波長変換の非反転動作でのSMF伝送時に生じる波長分散抑制効果⁶⁾と考えられる。LDを直接変調した際の光信号の立ち上がり時にはキャリア密度が増加するため、チャープの向きはブルーシフト(短波側への広がり)となり、立ち下がり時にはレッドシフトと(長波側への広がり)となる。ブルーシフトではSMF中の伝搬速度が速くなりレッドシフトでは逆に遅くなるため、SMF伝送によって信号波形は元の形より広がってしまう。そうすると隣のビットに符号干渉してエラー

が増加する。マルチモード発振のFP-LDではなおさら影響が大きい。これに対して、XPM波長変換の非反転モードの出力光信号の立ち上がり時は、信号光の入射によってSOA内のキャリア密度が減少するためレッドシフトとなる。つまり、光信号の立ち上がり時と立ち下り時のチャープの向きがLD直接変調時と逆であるため、SMF伝送時の信号波形の広がりを抑制することができる。

Table 2の結果を以下にまとめる。

- (a) 2.5Gb/sで変調したFP-LD光パケット信号の波長変換前の伝送許容距離は500m程度。
- (b) XPM波長変換前後でBER特性は変化しない。
- (c) 非反転出力で波長変換後にSMF80km伝送すると最小受光パワーが向上する。

Table 2で本来一番厳しい条件である、行(2)-列(2)-②「FP-LD光パケット信号をSMF500m伝送+波長変換後80km伝送」は未測定であったが、上記(a)-(c)の結果から、最小受光感度は-31.9dBmと推測できる。

波長変換前後のSMF伝送特性の結果から、提案したフォトニックネットワークの規模は、ユーザ端末からノードまでの伝送許容距離は500m以内、ノード間伝送距離は80kmを許容すると考えられる。想定するWDMネットワークはメトロ、LAN、WANであり、これらはSMF80km以内で構成されるため、今回得られた結果は伝送に十分な特性である。

4. まとめ

本論では、WDMネットワークを介したユーザ間の光パケット信号の送受信に必要なXPM型全光波長変換モジュールのハイブリッド集積技術による作製について述べた。SS-SOAとPLC導波路の光結合損失は2dB程度であった。作製したXPM波長変換モジュールとAWGルータを用いて、非制御波長から異なるITU-Tグリッド波長へのパケット毎の波長変換動作を実験的に確認した。非制御波長の光源にはFP-LDを用い、マルチモード発振光から単一モード発振光への波長変換が可能であることも確認した。また、SMF伝送特性からネットワーク規模の検討を行い、ユーザ端末からノードまでの伝送距離は500m以内、WDMネットワークのノード間距離は80kmを許容することを実験的に明らかにした。本論のXPM型波長変換技術は、将来のフォトニックネットワークの構築において有効な技術の1つと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 総務省平成26年版情報通信白書(IDC THE DIGITAL UNIVERSE in 2020)
- 2) 国際電気通信連合勧告 G.694.1 Spectral grids for WDM applications : DWDM frequency grid.

Table. 2 Change of minimum received optical power.

	before WC		after WC	
			w/o transmission	with SMF 80km
w/o transmission	● -32.3		○ -32.3	□ -32.8
with SMF 500m		■ -31.4	■ -31.4	推定 -31.9

- 3) K. Noguchi et al., "Field trial of Full-Mesh WDM network (AWG-STAR) in Metropolitan/Local Area," J. Lightwave Technol., vol. 22, pp. 329-336, Feb. (2000).
- 4) Y. Nakasuga, T. Hashimoto, Y. Yamada, M. Yanagisawa, K. Moriwaki, Y. Akahori, Y. Tohmori, K. Kato, S. ekine and M. Horiguchi, "Multi-chip hybrid integration on PLC platform using passive alignment technique," Proc. Electronic Components and Technology Conference, pp.20-25, Orland, FL, May, (1996).
- 5) N. Yoshimoto, K. Magari, T. Ito, Y. Kawaguchi, K. Kishi, Y. Kondo, Y. Kadota, O. Mitomi, Y. Yoshikuni, Y. Hasumi, Y. Tohmori, and O. Nakjima, "Spot-Size Converted Polarization-Insensitive SOA Gate with a Vertical Tapered Submicrometer Stripe Structure," IEEE Photon. Lett., vol. 10, no. 4, pp. 510-512, (1998).
- 6) W. Idler, M. Schilling, K. Daub, D. Baums, U. Korner, E. Lach, G. Laube, and K. Wunnel, "Signal Quality and BER Performance Improvement by Wavelength Conversion with an Integrated Three-Port Mach-Zehnder Interferometer," IEEE Electron. Lett., vol. 31, no. 1, pp. 454-455, (1995).

謝辞

本論文を執筆するにあたり、的確であたたかいご指導ご鞭撻をいただきました加藤和利教授に感謝いたします。