

第6章 全光パケット・スイッチング

前章では DBR-MMI-BLD の全光フリップ・フロップ動作について、静特性と動特性に分けて説明した。本章ではその動特性を用いた応用として、DBR-MMI-BLD からの出力信号を全光スイッチに通すことによってパケット・スイッチングをした実験について説明する。実際のデータを擬似的に模したペイロードは数種類用意しており、まず 1 波長のみ 10 Gb/s で変調したものについて説明する。その後、DWDM を想定した 1、2、4、8 波長を MUX し 40 Gb/s で変調したペイロードを通し、この全光フリップ・フロップと全光スイッチの組み合わせの、データフォーマットに対する透明性 (Transparency) について述べる。

6.1. 1 波 10 Gb/s における測定系

10 Gb/s のペイロードをスイッチするための測定系を Fig. 6-1 に示す。フリップ・フロップの動作部分は、動特性の測定系 Fig. 5-9 と同じであり、10 ns 幅の光パルスを用い 320 ns 周期でフリップ・フロップ動作させている。デバイスからの出力光をサーキュレータで分離し、発振波長のみ BPF で切り出した後 EDFA で増幅し、再度発振波長のみ BPF で切り出し余分な ASE を取り除く。そうして得られたフリップ・フロップの信号を、アイソレータを通してから全光スイッチのコントロールポートへ

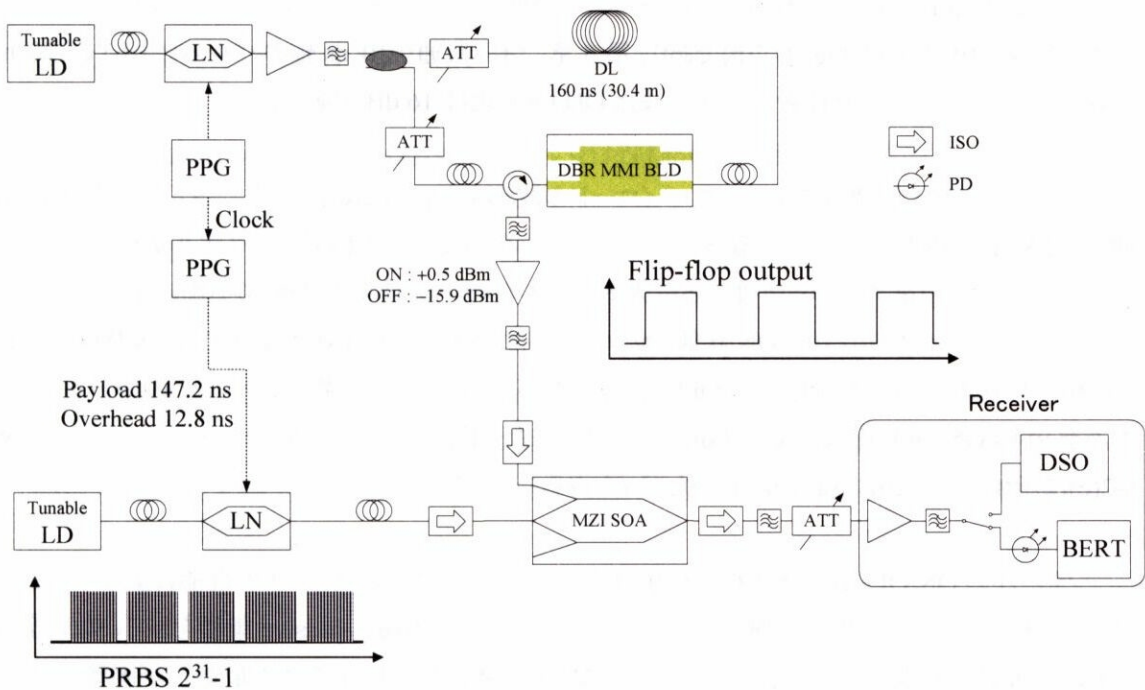


Fig. 6-1: Measurement setup for all-optical packet switching with 10 Gb/s payload.

入射する。全光スイッチは Mach-Zehnder 型の構成をしており、位相は SOA の XPM を用いて制御する。

ペイロード部分は別の PPG を用いて生成する。2 台の PPG は 10 GHz のクロックを同期させて用いる。信号は 31 段の PRBS であり、ただし 160 ns 周期で 12.8 ns の空白が入っている。この隙間でフリップ・フロップの状態が切り替わるようにする。この信号を LN 変調器へ入れ、別の波長可変レーザーからの出力光をパケット状に変調する。そうして得られたペイロードを偏波コントローラとアイソレータを通して全光スイッチのシグナルポートへ入射する。全光スイッチではコントロール光が入射されている間はシグナル光が遮断されるような構成となっている。そうしてスイッチされたペイロードを、アイソレータを通した後 BPF でペイロードの波長のみ取り出す。その後、伝搬損失を仮定したアッテネータを通して受信部へと入射させる。

受信部では一度一定値まで EDFA で増幅し、BPF で余分な ASE を取り除く。その後光スイッチを通して DSO で波形を観測する。また、もう一方では PD で電気信号へ変換しエラーレートを測定できるようにしてある。

6.2. 1 波 10 Gb/s でのパケット・スイッチング動作

全光パケット・スイッチング動作の結果を Fig. 6-2 に示す。まずフリップ・フロップへのラベルパルスを図 6-2(a)に示す。これはフリップ・フロップ動作でのセットパルスに対応している。フリップ・フロップからの出力光は Fig. 6-2(b)であり、第 5 章で示した通り 10 ns 幅のパルスを用いて 320 ns 周期でフリップ・フロップ動作をしている。また ON/OFF 比は 16 dB である。

もう一方の LN 変調器で生成したペイロードの波形を図 6-2(c)に示す。このように 160 ns 周期で 12.8 ns の隙間があいているパケットとなっている。そしてこの信号をシグナルポートに、フリップ・フロップの出力をコントロールポートに入射してスイッチした結果を図 6-2(d)に示す。このように、フリップ・フロップの出力が ON 状態でのパケットは全光スイッチ(MZI-SOA)での XPM により抑えられ、フリップ・フロップの出力が OFF 状態でのパケットのみが通過してきているのが分かる。出力パケットの ON/OFF 比はおおよそ 8 dB であった。また、通過してきたパケットのアイパターンを図 6-2(e)に示す。このようにきれいに開いたアイを得ることができた。

パケットの ON/OFF 比が 8 dB という値は小さいが、これは主にスイッチの性能によっている。このスイッチは、もともとは波長変換器として設計されており、Active / passive 集積をしていない全面 Active 導波路で作製されている。また、位相シフト部が無いため動作条件の最適化が困難である。Active / passive 集積をし位相シフト部を設けたスイッチを用いることにより、この値は改善が可能で

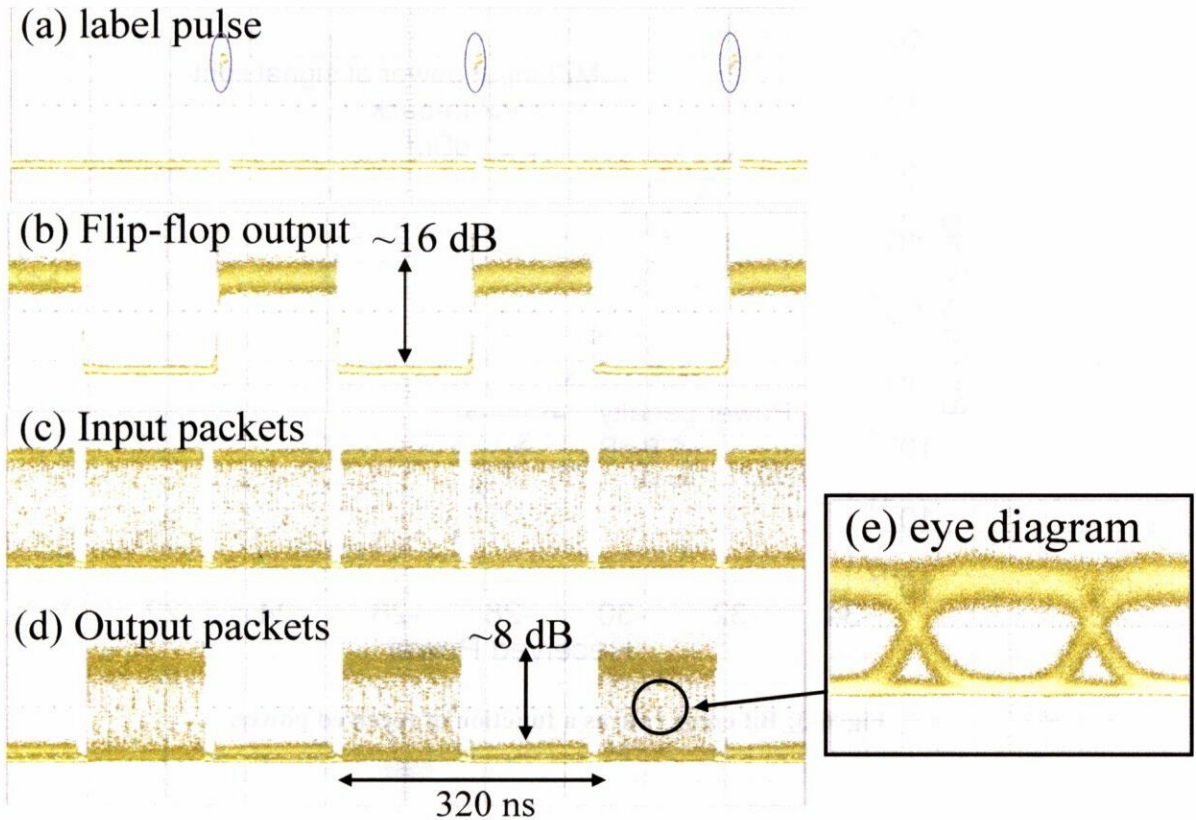


Fig. 6-2: All-optical packet switching. (a) label pulse, (b) output light from AOFF, (c) input packets for MZI-SOA, (d) output light from MZI-SOA.

ある。また、ここで用いている MZI-SOA はもともと波長変換器としてデザインされているもので、出力ポートが 1 つしか存在しない。そのため、光パケットをゲートして遮断しているような動作になっているが、出力ポートが 2 つある MZI-SOA を用いれば経路の切り替えが可能となる[54],[55]。

次に通過してきたパケットのビットエラーレートを測定した結果を Fig. 6-3 に示す。この実験ではパケットを交互に通過させたりするとデータの半分がエラーとしてカウントされてしまうため、パケットをスイッチせずに全て通過させて測定している。つまり、フリップ・フロップを常に OFF 状態にしておき、入射してきた光パケットは全て通過するようにしておく。この状態でエラーフリー動作(10^{-9})を実現し、全光スイッチへの入射パケットの強度が -5.51 dBm(時間平均値)の時に、BER 10^{-9} のパワーペナルティ 1.8 dB を得た。またエラーフロアは無く、 10^{-11} 程度の BER までは測定できた。

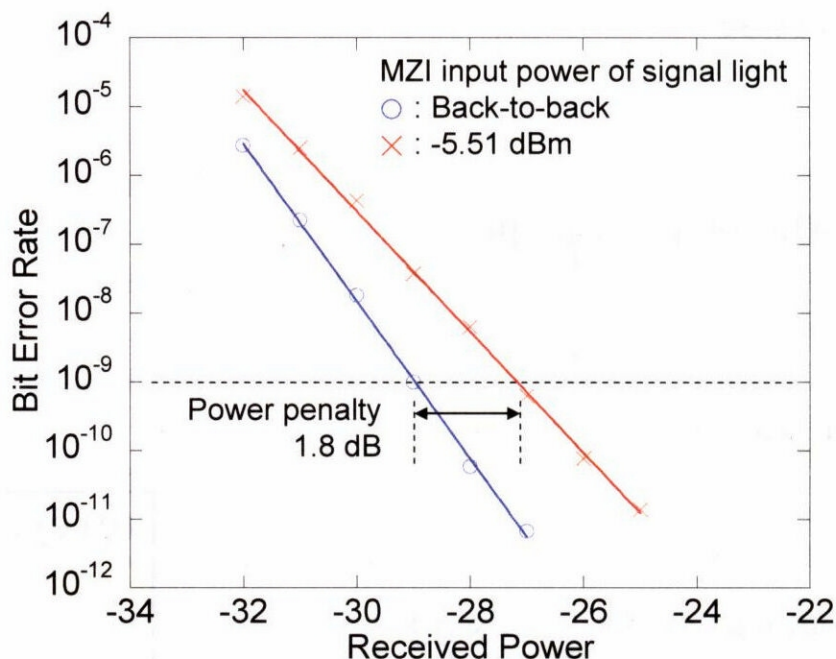


Fig. 6-3: Bit error rate as a function of received power.

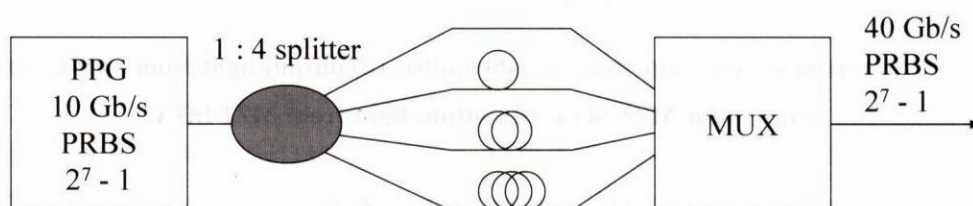


Fig. 6-4: 40 Gb/s PRBS generator.

6.3. 8 波 40 Gb/s における測定系 (ペイロード=40 ~320 Gb/s)

40 Gb/s の PRBS 信号を出すのは容易ではない。ここでは 10 Gb/s の PPG とスプリッタ、MUX を用いて 40 Gb/s の PRBS 信号を生成している(Fig. 6-4)。まず 10 Gb/s の PPG より $2^7 - 1$ PRBS 信号を出力する。それをスプリッタで 1 : 4 に分配し、それぞれのチャネルに遅延線を挿入し、再度 MUX することによって 40 Gb/s の $2^7 - 1$ PRBS 信号が生成される。今回はこれをペイロードとして用いる。なお、このような方法では 10 Gb/s の時のように 1 パケット毎に空白部で切り分けることができないため、PRBS 信号をそのままスイッチしている。

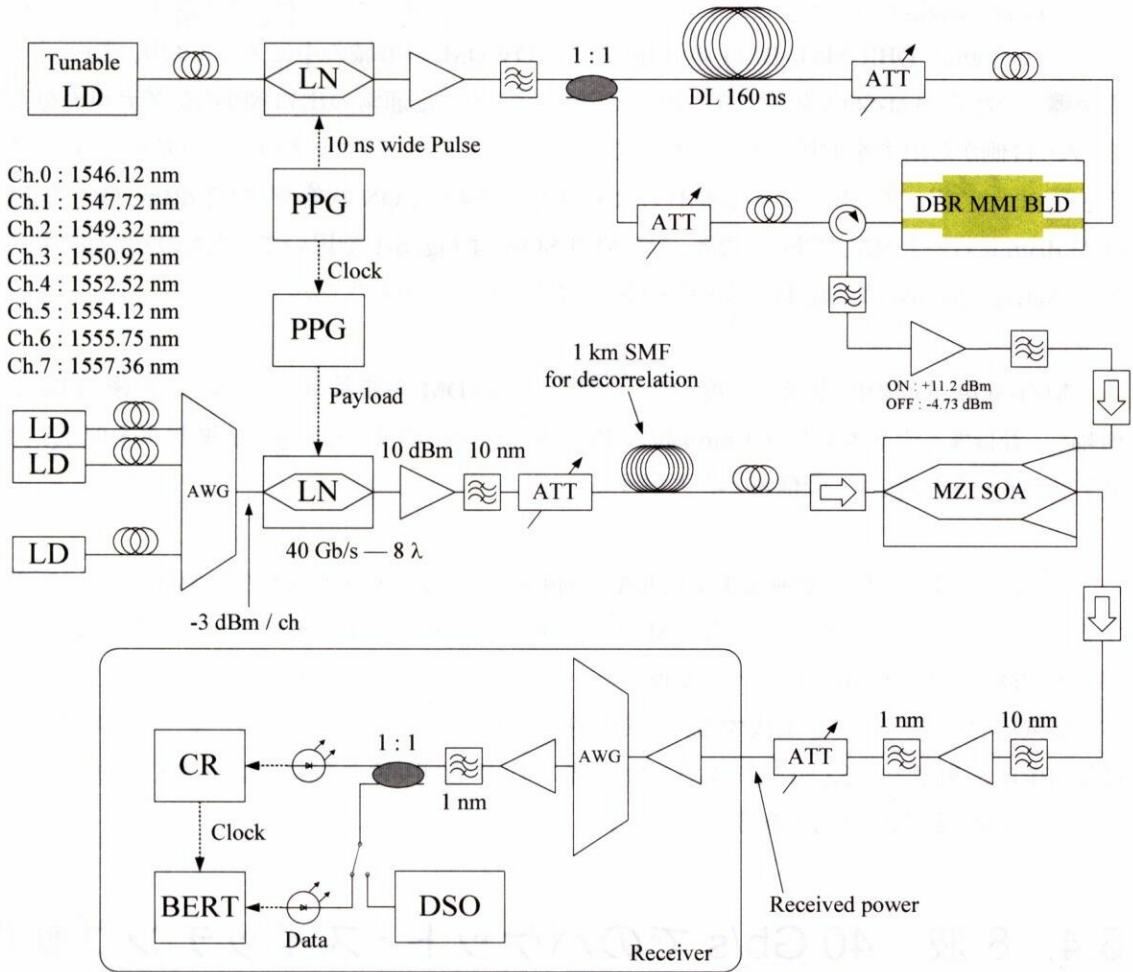


Fig. 6-5: Measurement setup for all-optical packet switching with 40 Gb/s DWDM payload.

40 Gb/s の PRBS 信号で変調した、1～8 波 DWDM 信号の全光パケット・スイッチングの測定系を Fig. 6-5 に示す。DBR-MMI-BLD の動的フリップ・フロップ動作部分の系はこれまでの物と同じである(Fig. 5-9, Fig. 6-1)。ペイロードの生成部分について述べる。

まず、用意した AWG は 8 チャンネルであり、波長は ITU のグリッド (200 GHz 間隔) に合っている。それに合うレーザーを 8 つ用いた。各レーザーの波長は Fig. 6-5 に示した通りである。その出力全てを偏波コントローラに通した後 AWG で MUX する。MUX 後の出力は、各チャンネルにつき -3 dBm になるよう調整されている。そうして得られた 8 波 DWDM 光を LN 変調器へ入射し、Fig. 6-4 で示した方法で生成された 40 Gb/s $2^7 - 1$ PRBS 信号で変調する。その信号を増幅し、BPF で余分な ASE を取り除いた後、1 km の長さの SMF に入射する。SMF には波長分散があるため、チャンネルごとに進む速度が違い、チャンネル間の相関を減らすことができる。これを挿入しておかないと非常に大きなパターン効果が出てしまう。

その後、偏波コントローラとアイソレータを通した後、全光スイッチのシグナルポートへ入射する。ただし今回は DBR-MMI-BLD の発振波長が DWDM の帯域の中に入っており、フィルタするのが難しいため MZI-SOA を逆向きに用いている。すなわち、通常の出口側からシグナル光を入射し、入り口側から出力を取り出す。こうすることによってフリップ・フロップからの光を分けることができる。また、フリップ・フロップからの出力は EDFA で増幅し、ON 状態で +11.2 dBm、OFF 状態で -4.73 dBm になるようにしてある。また、この MZI-SOA は Fig. 6-1 で用いていたものとは別のものであり、Active/passive 集積されており位相シフト部もついているものである。

MZI-SOA からの出力光は一度 BPF を用いて DWDM の波長帯でフィルタした後、EDFA で増幅し、着目するチャンネルのみ 1 nm 幅の BPF を用いて取り出す。その後、伝搬損失を仮定した可変アッテネータを通して、受信部へと入射する。

受信部では、一度一定強度まで EDFA で増幅した後、フィルタの代わりに AWG を用いて着目するチャンネルのみフィルタし、余分な ASE を取り除く。その後、1:1 のカプラーで 2 つに分波し、それぞれ PD で受信して電気信号へと変換する。そのうち片方はクロック・リカバリーへと入力し、受信した電気信号からクロックを生成する。そうして生成されたクロックをビットエラーレートテスターへ接続し、BER を測定できるようにしてある。また、光スイッチを切り替えることにより DSO で波形やアイパターンを見られるようにしてある。

6.4. 8 波 40 Gb/s でのパケット・スイッチング動作

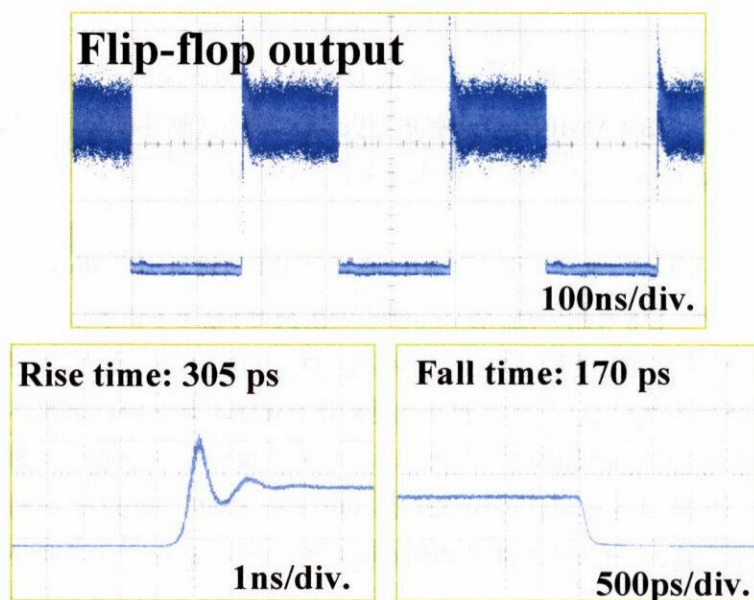


Fig. 6-6: Output light from DBR-MMI-BLD at rising and falling point.

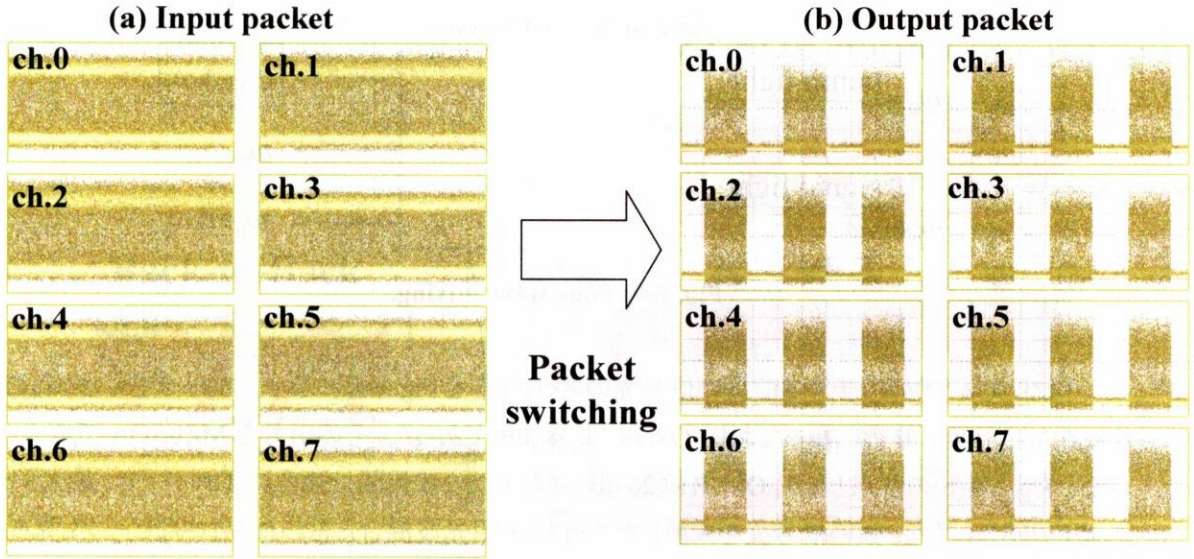
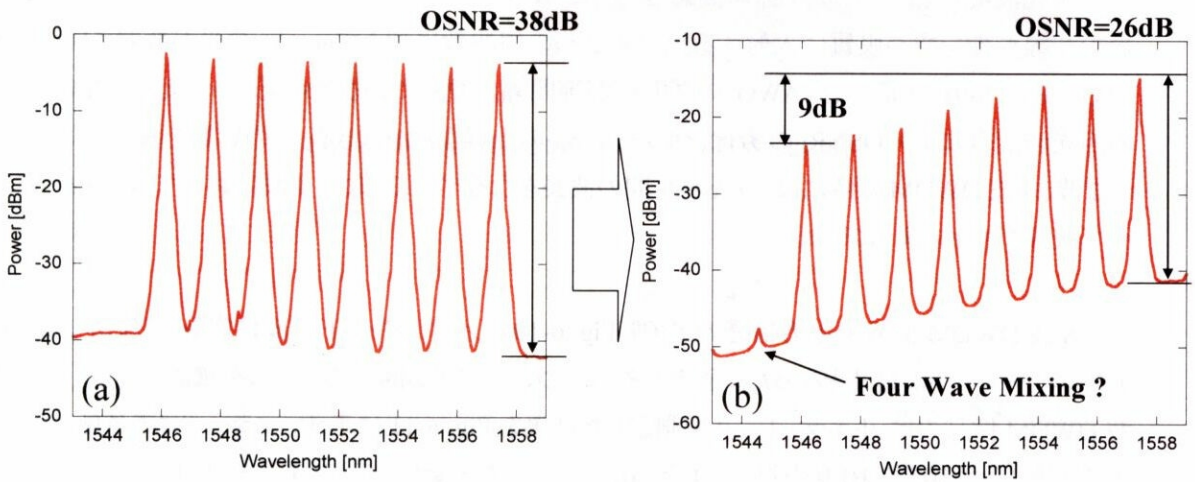
Fig. 6-7: Packet switching of 8 λ DWDM payload.

Fig. 6-8: Spectrum of DWDM light (a) before MZI-SOA, (b) after switching.

まずフリップ・フロップの出力光を Fig. 6-6 に示す。動作条件を最適化することにより第 5 章の時よりも高速に立ち下がることのできた。立ち上がり時間は 305 ps、立ち下がり時間は 170 ps であった。

8 波 DWDM 信号の全光パケット・スイッチングの波形を Fig. 6-7 に示す。MZI-SOA への入射波形が Fig. 6-7(a)であり、スイッチされた出力光が Fig. 6-7(b)である。先述の通り 40 Gb/s の実験系の問題で空白部を入れることができないためやや見づらくなっているが、フリップ・フロップの出力光に合わせて 160 ns 間隔でスイッチが ON/OFF されているのが分かる。

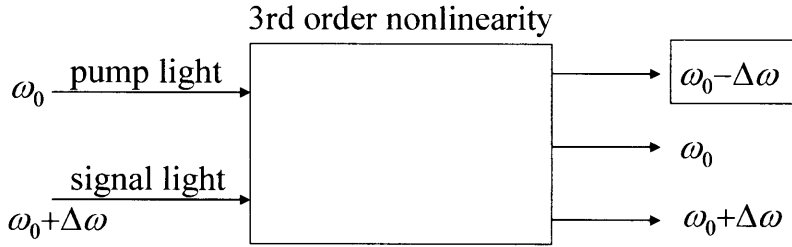


Fig. 6-9: Four wave mixing.

MZI-SOA でスイッチする前後の信号光のスペクトルを Fig. 6-8 に示す。スイッチ前の状態(Fig. 6-8(a))では強度も非常に揃っており、OSNR は 38 dB であった。その信号を MZI-SOA でスイッチすると Fig. 6-8(b)の結果となり、OSNR は 26 dB、また 8 つの波長間で強度にずれができ、最大 9 dB の差ができた。また、強い信号光を入射したことによる四光波混合と思われる小さなピークも見られる。

四光波混合とは、周波数 ω_0 の高輝度でコヒーレントなポンプ光と、周波数 $\omega_0 + \Delta\omega$ の信号光を 3 次の非線形性を持つ媒質に入射すると、この 2 つの周波数に加えて $\omega_0 - \Delta\omega$ の光が放射される現象である(Fig. 6-9)。実際には AWG のグリッドが等間隔に並んでいるため端しか見えていないが、この四光波混合により OSNR の劣化、エラーレートの上昇などが起きる。この影響を減らすため、後の 2 波、4 波 DWDM の時には、チャンネル間の波長をなるべく広く取り、4 波においては不均一に並べて波長がずれるようにした。

8 波 DWDM 信号の出力信号のアイを Fig. 6-10 に示す。やや下方向に寄っているが、この状態でエラーレートが最小となった。全チャンネルについてアイが開いているのを確認できた。また、8 波 DWDM 信号のビットエラーレートを測定した結果を Fig. 6-11 に示す。エラーフロアが見えるが、全チャンネルとも 10^{-9} の BER を得た。また、 10^{-9} でのパワーペナルティはおおよそ 7 dB であった。

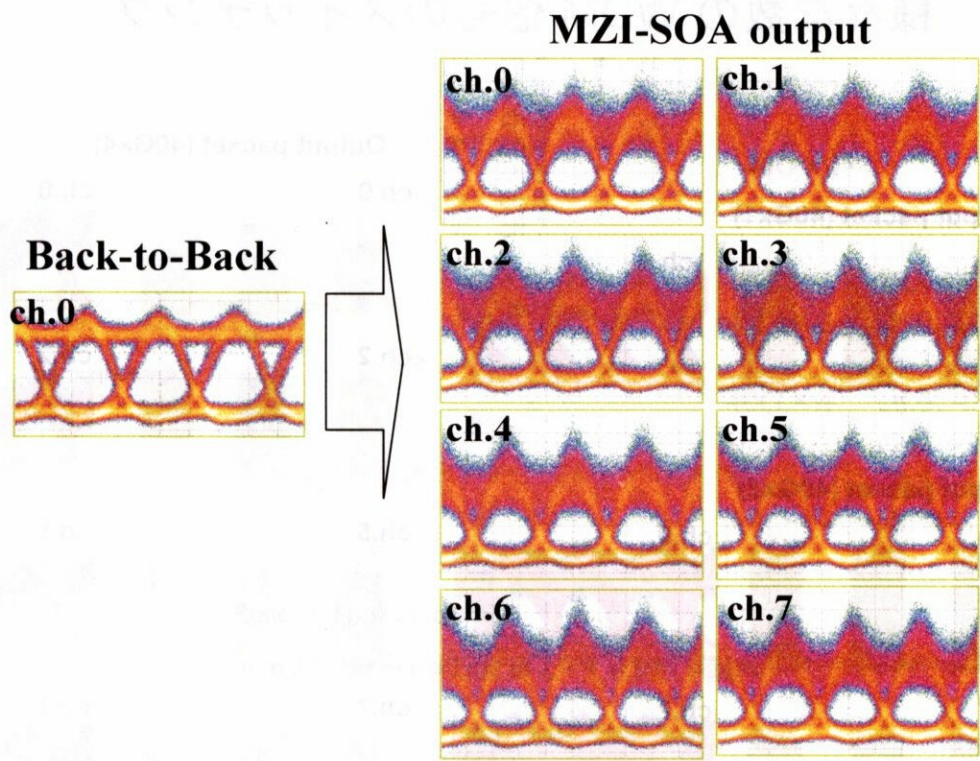


Fig. 6-10: Eye diagram of 8 λ DWDM signal.

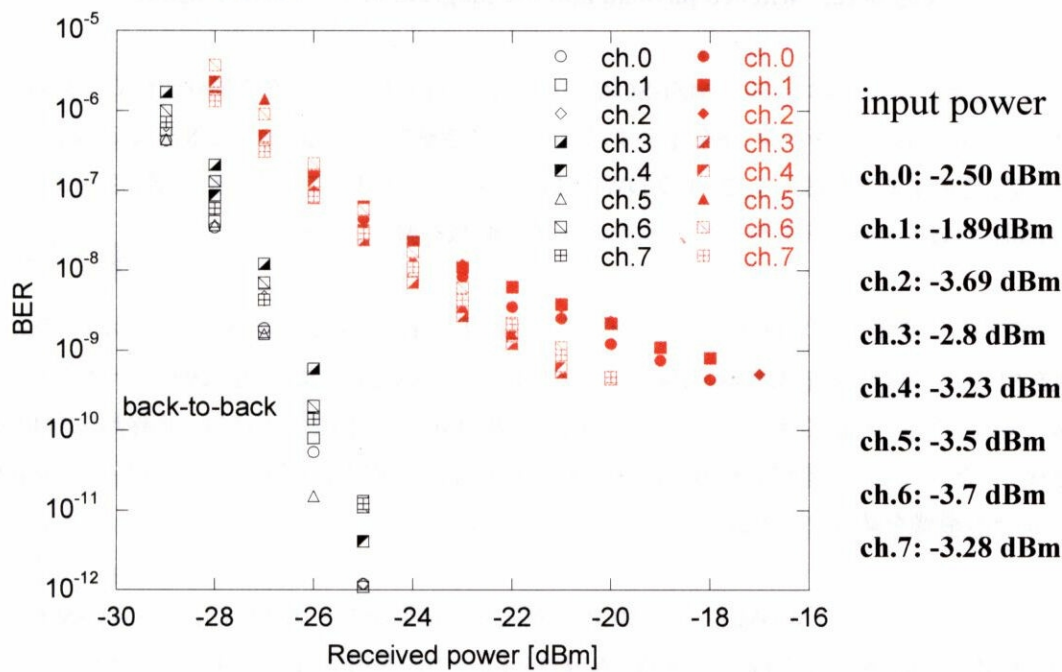


Fig. 6-11: Bit error rate of 8 λ DWDM signal.

6.5. 様々な数の WDM 信号のスイッチング

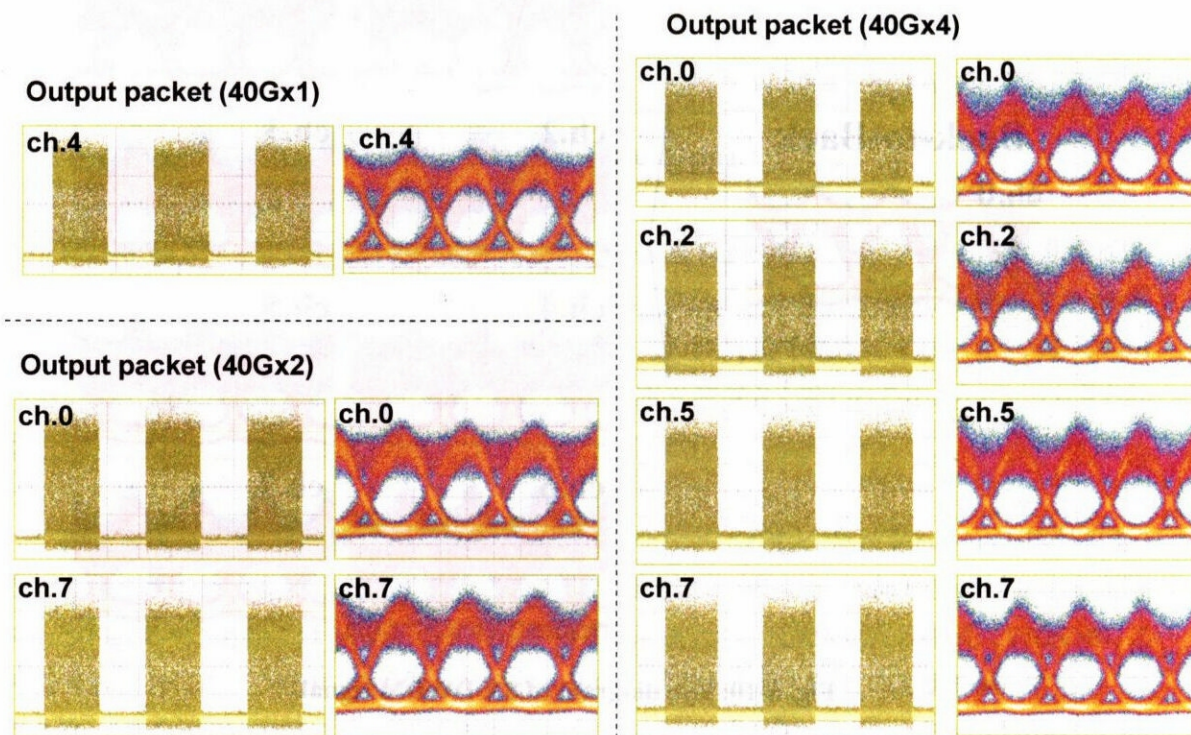


Fig. 6-12: Switched payload and eye diagram of 1 – 4 WDM signal.

この全光フリップ・フロップと MZI-SOA によるパケット・スイッチングの特徴として、様々なフォーマットの packets を、フォーマットを変えずにスイッチできることがある。今まで 8 波でのスイッチをしていたが、そのままの方法で 1、2、4 波 DWDM 信号をスイッチすることができる。測定系は Fig. 6-5 とほぼ同じであり、ペイロード生成のためのレーザー個数を減らしてある。

1 波から 4 波までの WDM 信号をスイッチした結果を Fig. 6-12 に示す。このように 8 波と同じ構成を用いてペイロードを 320 ns 周期でスイッチすることができた。また、全てのフォーマットのアイが開いていることを確認できた。また、2 波、4 波の WDM 信号生成の際には、非線形的な相互作用を減らすためなるべく周波数を離し、かつ 4 波の際には不均等に配置した。こうすることにより四光波混合の影響を減らしている。

1 波から 4 波までの WDM 信号の BER を測定した結果を Fig. 6-13 に示す。MZI-SOA への入射光強度も Fig. 6-13 に併記してある。入射する信号の波長数が 1 から 4 へと増えるにしたがってややエラーフロアが見えつつあるが、全フォーマット全チャネルについて 10^{-9} のエラーフリー動作を実現した。また、BER 10^{-9} のパワーペナルティは 40G×1 波の時に約 2.0 dB、40G×2 波の時に

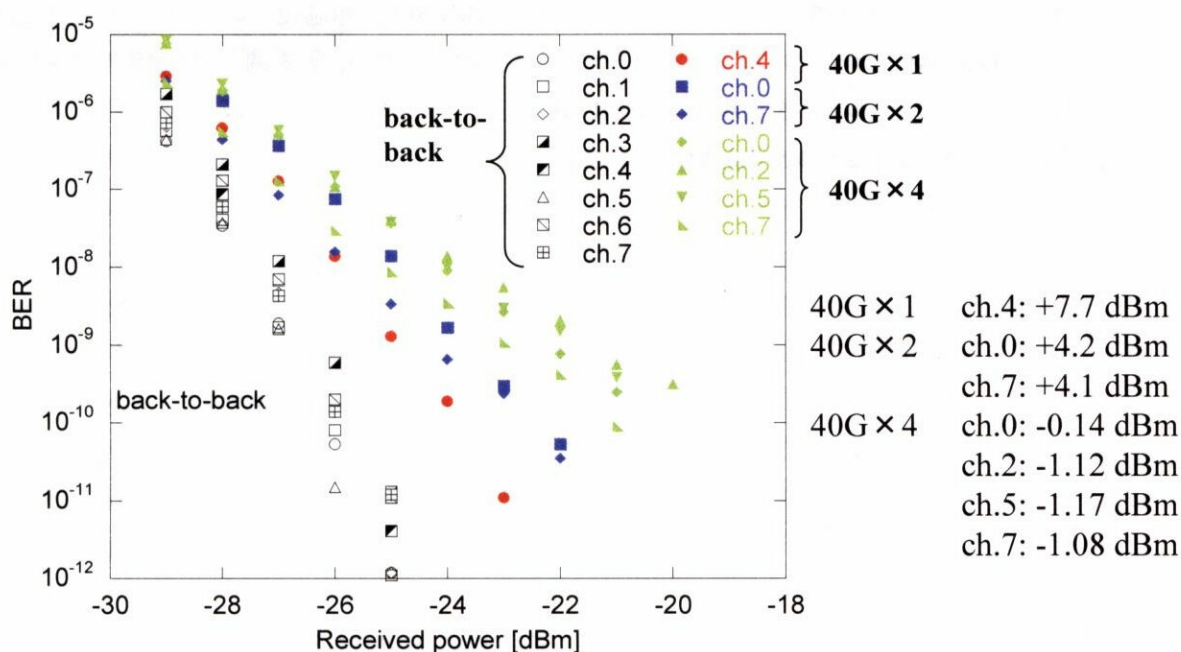


Fig. 6-13: Bit error rate of 1 – 4 WDM signal.

約 2.5 dB、40G×4 波の時に約 4.5 dB であった。

このように、40 Gb/s × 8 波 WDM 信号のスイッチの実験系を用いて、1 波、2 波、4 波の WDM 信号も同様にスイッチすることができた。WDM の波長数を増やすにつれてエラーフロアが出始めパワーペナルティが上がってきたが、1 波～8 波の全チャネルにおいて 10^{-9} の BER を実現した。このように、この全光フリップ・フロップと MZI-SOA による組み合わせが、ペイロードの変調方式に対し Transparent であることを示すことができた。

6.6. まとめ

本章では、DBR-MMI-BLD をもちいたパケット・スイッチング動作の実証を行った。まず、ペイロードを 10 Gb/s で 160 ns 単位のパケット状に変調し、それを全光フリップ・フロップの出力を元に MZI-SOA でスイッチングした。また、MZI-SOA を通った後のパケットのビットエラーレートを測定し、 10^{-11} 程度のエラーレートを得た。その際にエラーフロアは観測されず、BER 10^{-9} でのパワーペナルティは 1.8 dB であった。

また、さらにペイロードのビットレートを上げ、最大 8 波 DWDM 信号を 40 Gb/s で変調したペイロードを通した。これも全光フリップ・フロップの出力を用いて MZI-SOA でスイッチすることができた。これは 1 波、2 波、4 波の DWDM 信号でも同様のシステムでスイッチすることができ、このシステム

の変調方式に対する透明性を示すことができた。また、MZI-SOA 通過後のビットエラーレートを測定し、8 波 DWDM 信号においてはエラーフロアが見られたものの、全変調方式・全チャネルにおいて 10^{-9} のビットエラーレートを実現した。BER 10^{-9} のパワーペナルティは 1 波、2 波、4 波、8 波のそれぞれにおいて 2.0, 2.5, 4.5, 7.0 dB であった。