

## 第5章 デバイス特性

この章では、作製した DBR-MMI-BLD の特性について説明する。まずレーザーとしてみた時の注入電流—光出力の関係 (L-I 特性) について述べた後、発振スペクトルについて議論する。また、デバイスに両側から CW 光 (連続光) を入射し、デバイスを SET / RESET させた時の動作について述べ、その動作波長による依存性について説明する。

後半では、デバイスに光パルスを入射し、動的にフリップ・フロップ動作させた結果について示す。

### 5.1. 静特性の測定系

デバイスの静特性の測定系を Fig. 5-1 に示す。デバイスはペルチェ冷却素子の上に乗せてあり、測定中は温度コントローラで  $12^{\circ}\text{C}$  に保っている。2 つの波長可変レーザーからの光出力を、それぞれ光アッテネータを用いて調整する。偏波コントローラで TE モードに偏波を合わせた光を、サーキュレータを通してデバイスに両側からレンズファイバを通して入射する。偏波の調整は素子の SA 部に電流計を接続しわずかに逆バイアスをかけた状態で光を入射し、光吸収電流が最も大きく

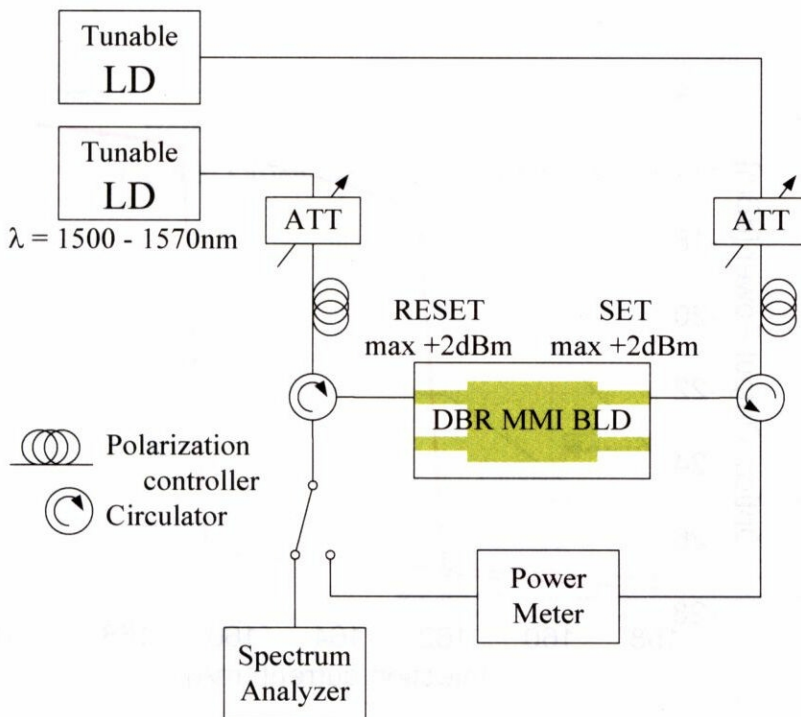


Fig. 5-1: Measurement setup for static characteristic.

なる状態で TE モードとしている。ここではデバイスの右側から SET 光を、左側から RESET 光を入射している。デバイスの入出力ポート間隔が 25  $\mu\text{m}$  となっており、片側から 2 つのレンズファイバを近づけることができないため、両側から入射する構成となっている。

デバイスにはプローバを用いて定電流源を接続してある。ワイヤーボンディングなどはしてなく、直接デバイス上の電極パッドに針を立てる構成となっている。デバイスからの出力光は、入力光と同じレンズファイバを通り、サーキュレータを用いて入力光と分離する。出力光は光スイッチを通した後、片方は光パワーメータに、もう一方は光スペクトラムアナライザへと接続し、光強度やそのスペクトルを観測できる構成となっている。

## 5.2. L-I 特性

デバイスに電流を注入し、デバイスからの光強度を測定した L-I 特性を Fig. 5-2 に示す。光強度の単位は dBm 単位でプロットしており、

$$[\text{dBm}] = 10 \times \log_{10} [\text{mW}] \quad [\text{mW}] = 10^{\frac{[\text{dbm}]}{10}}$$

である。デバイスは 167 mA の注入電流で発振を始めた。また、2.5 で示したように過飽和吸収体による非線形性により、幅約 5 mA のヒステリシスを得た。このヒステリシスの幅は、4.4 で述べたように過飽和吸収体の長さによっており、過飽和吸収体を長くすればするほどヒステリシスの幅が大きくなる。ただし、その分フリップ・フロップをセット・リセットするために必要な光強度も大きくなるため、

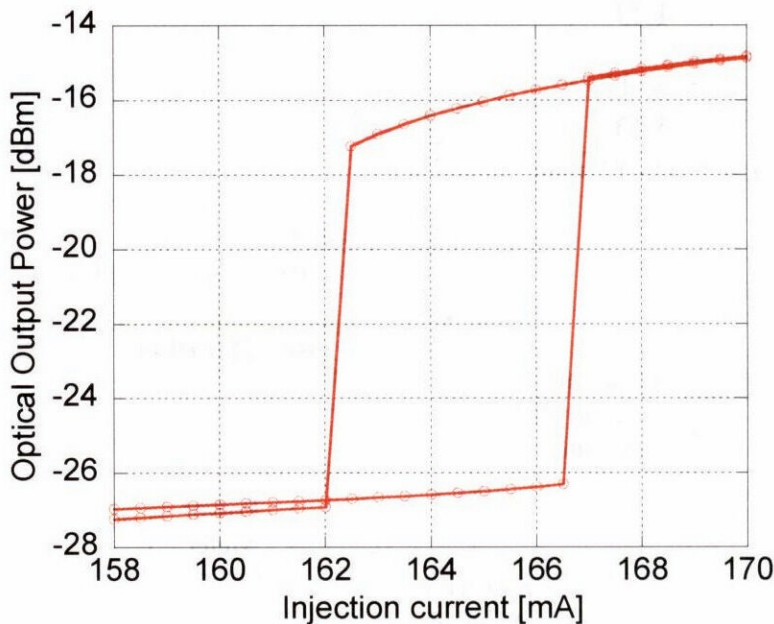


Fig. 5-2: L-I characteristic.

適正值を選ぶ必要がある。

### 5.3. 発振スペクトル

デバイスの発振スペクトルを Fig. 5-3 に示す。注入電流は 164.5 mA であり、L-I 特性の対応する点を右に示している。DBR を用いたことにより単一モード発振をし、発振波長は 1553.9 nm であった。ON/OFF 比は 26 dB であり、隣接ピーク間の強度比を表すサイドモード抑圧比(SMSR)は 23 dB であった。

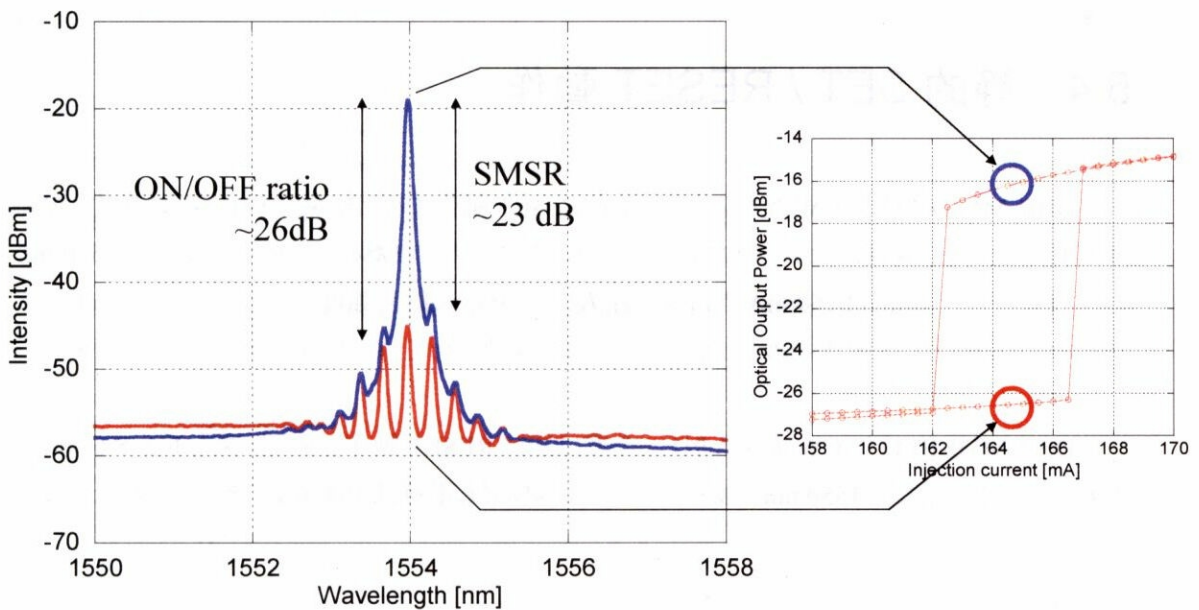


Fig. 5-3: Lasing spectrum of DBR-MMI-BLD.

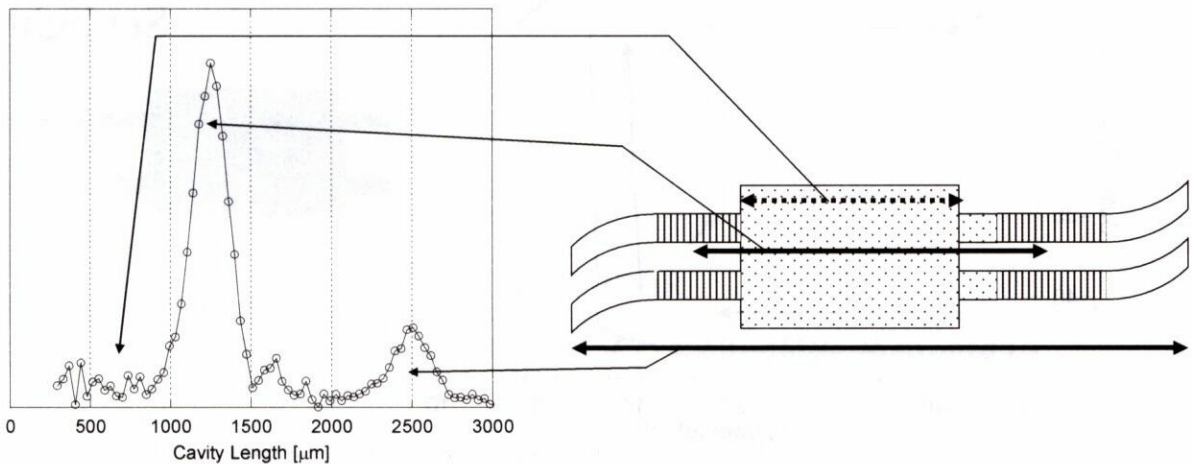


Fig. 5-4: FFT result of DBR-MMI-BLD.



第4章で行ったのと同様に、DBR-MMI-BLDのASEスペクトルをフーリエ変換し、横軸を共振器長に直したものをFig. 5-4に示す。1300  $\mu\text{m}$  付近にもっとも大きなピークが見られ、これは2つのDBR間の距離に対応している。また、もう1つ2500  $\mu\text{m}$  付近にも小さなピークが見られた。これはデバイスのへき開端面間の距離に対応しており、導波路をへき開端面に対して7°傾けるだけではへき開端面での反射を完全には無くすることができていなく、さらに反射を下げるにはARコートなどが必要である。ただしこのピークはDBR間のピークに比べて小さく、7°の傾きは単純な手法として有効であることが分かる。

また、これら2つ以外には共振器長のピークが見られないことから、Active/passive 界面が滑らかであること、またMMI端での反射が起きていないことが分かる。

## 5.4. 静的 SET / RESET 動作

DBR-MMI-BLDにCW光を入射し、静的にSET動作させた結果をFig. 5-5に示す。横軸には入射光強度を、縦軸にはデバイスからの光出力をプロットしてある。入射光の波長は1550 nmである。また、デバイスには164 mAの電流を注入している。入射光強度を上げていくと、-5 dBmでデバイスがセットされ、入射光を落としてもその出力が保持されているのが分かる。

DBR-MMI-BLDにCW光を入射し、今度は逆にRESET動作させた結果をFig. 5-6に示す。入射光の波長は同じく1550 nmであり、デバイスへの注入電流は164 mAである。入射光強度を上

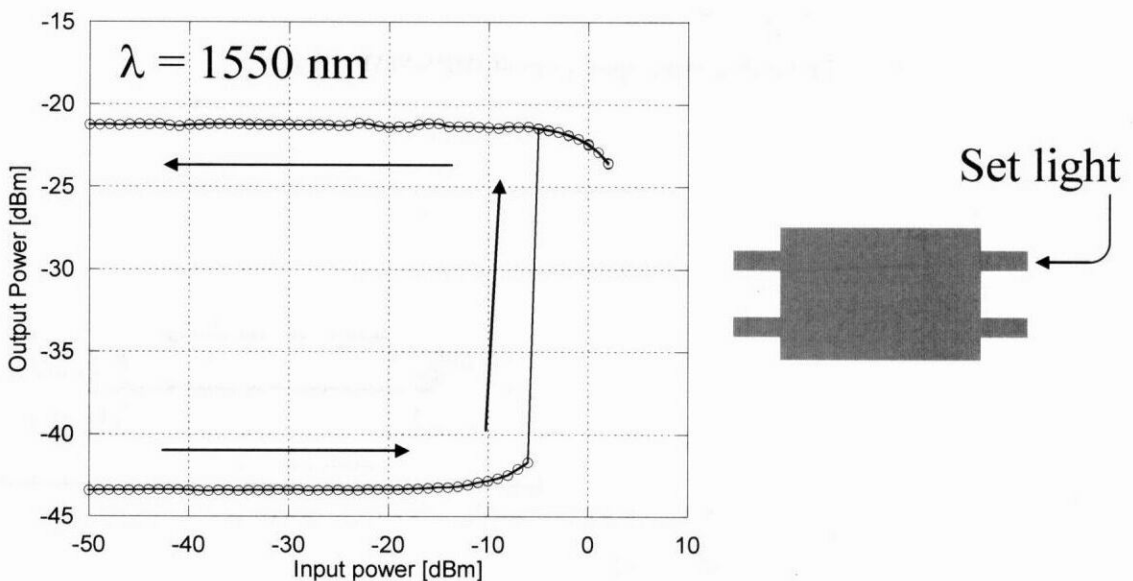


Fig. 5-5: Optical SET operation with CW light injection.

げていくと-4 dBm でデバイスがリセットされ、入射光を落としてもその出力が保持されているのが分かる。

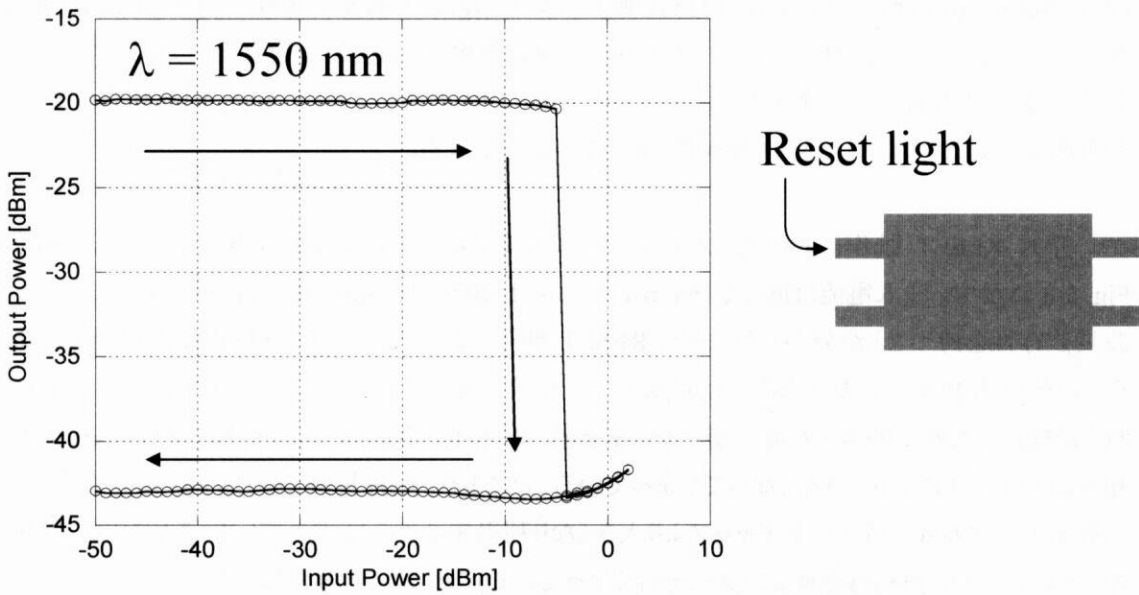


Fig. 5-6: Optical RESET operation with CW light injection.

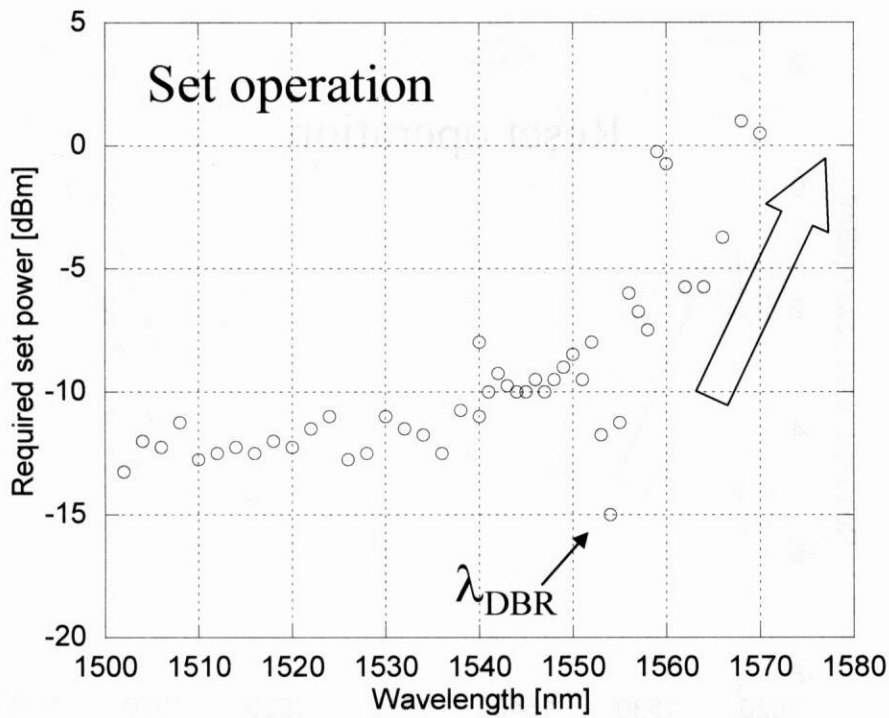


Fig. 5-7: Wavelength dependence of static SET operation.

静的 SET 動作において、入射光の波長を変えながら必要な光強度をプロットした結果を Fig. 5-7 に示す。注入電流は同じく 164 mA である。発振波長である 1554 nm 付近を除き、1500～1570 nm の波長帯域に渡って滑らかな波長依存性を持つことが分かった。これは 2 つの DBR が Bragg 波長を除き共振しないことによる。短波長側では安定し低い入射光で動作し、逆に長波長側では動作しづらくなっていく、すなわちセットするのに強い入射光が必要になることが分かった。これは長波長側では入射光のエネルギーがバンドギャップよりも小さくなってしまい、相互利得飽和や過飽和吸収を起こすことができなくなってしまうことによる。

静的 RESET 動作において、入射光の波長を変えながら必要な光強度をプロットした結果を Fig. 5-8 に示す。注入電流は同じく 164 mA である。1520～1570 nm の波長帯域に渡って滑らかな波長依存性を持つことが分かった。また、RESET 動作においては短波長・長波長両側でリセットするのに強い入射光が必要になることが分かった。長波長側でリセットしづらくなるのは、セット動作の時と同様に、入射光のエネルギーがバンドギャップよりも小さくなってしまい、相互利得飽和や過飽和吸収を起こすことができなくなってしまうことによる。短波長側でリセットしづらくなるのは、入射光のエネルギーがバンドギャップより大きくなり利得中心からはずれてしまうことにより、現在発振しているモードの利得を奪うことができなくなってしまうことによると考えられる。

本来ならばこのデバイスは対称な形をしており動作も全て対称に起こるため、セット動作とリセ

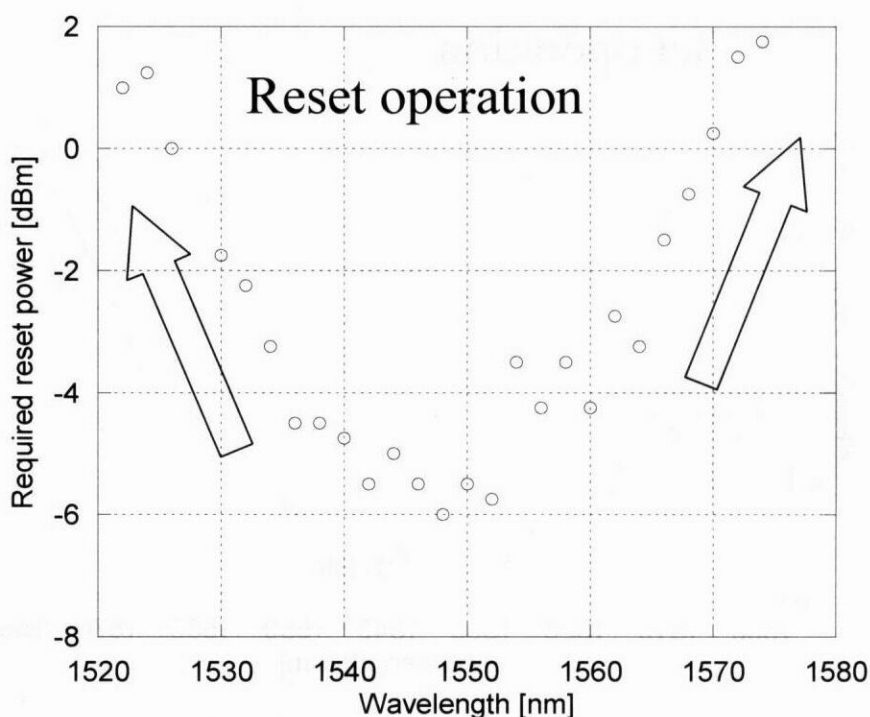


Fig. 5-8: Wavelength dependence of static RESET operation.

ット動作の波長依存性は全く同じ形となるはずであるが、ここでは異なる結果が得られた。また、発振モードについても本来ならば常にどちらかのモードは発振しているはずだが、このデバイスでは片方のモードしか発振しなかった。すなわち、1 つのモードが発振したり、発振を止めたりといった動作であった。これは作製の誤差と、MMI が完全なクロスカプラーとはなっていないことによると考えられる。

## 5.5. 動特性の測定系

これまで述べてきた静特性を元に、デバイスに光パルスを入射させ動的にフリップ・フロップさせた結果について説明する。

動的にフリップ・フロップ動作をさせるための測定系を Fig. 5-9 に示す。まず波長可変レーザーから波長 1550 nm、強度 +8 dBm の光を出し、偏波コントローラを通した後に LN 変調器へ入力する。LN 変調器は 10 GHz クロックの PPG で制御しており、PPG の出力は 10 ns 幅のパルスを 320 ns 間隔で出力するようになっている。そうして変調された光パルスを EDFA で増幅し、1 nm 幅の BPF で余分な ASE を除去する。その後、1:1 カプラーを用いてパルスを 2 つに分け、リセット用とし

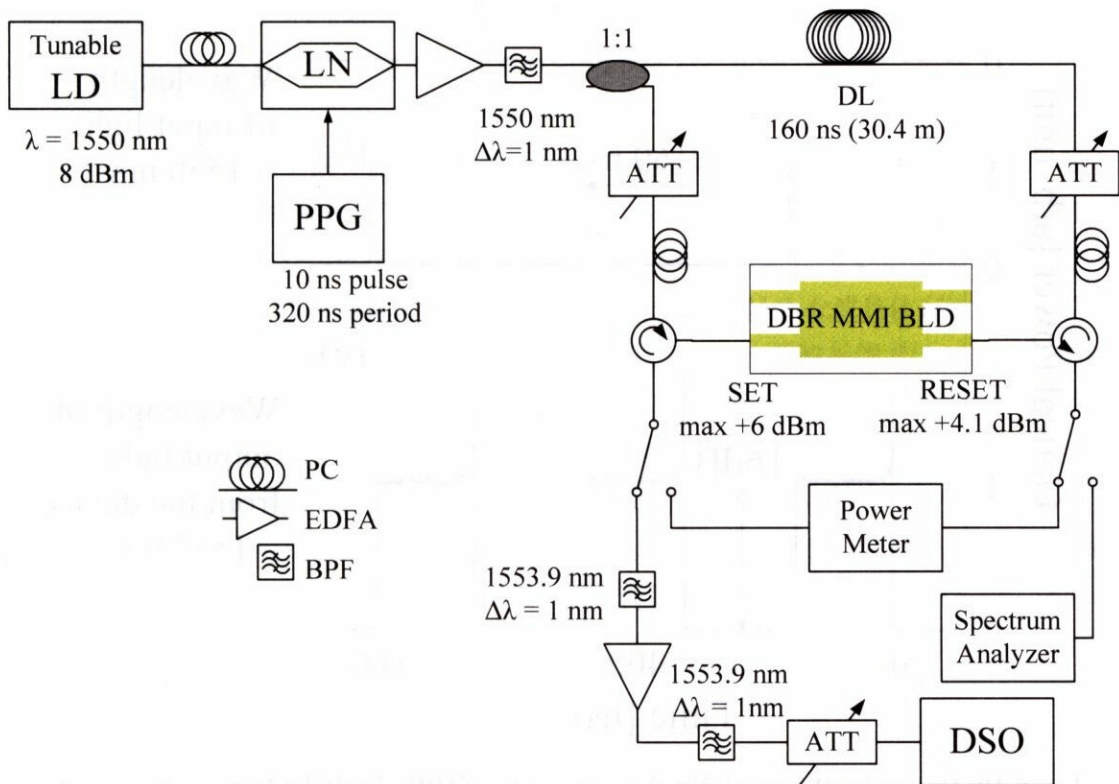


Fig. 5-9: Measurement setup for dynamic flip-flop operation.

て用いる方には 160 ns 分の遅延線を挿入しておく。アッテネータで強度を調節し偏波コントローラで TE モードに合わせたあと、サーキュレータを通してデバイスへ左右両側から入射する。こうすることによりセット・リセットパルスを 160 ns 間隔で交互にデバイスへ入射することができる。また、デバイスにはプローバを通じて 164 mA の電流を注入している。

デバイスからの出力光はサーキュレータで分離し、光スイッチを通して BPF で発振波長のみ切り出し、EDFA で増幅する。その後再度発振波長のみを BPF で切り出し余分な ASE を取り除いた後、光アッテネータで強度を調節し、サンプリングオシロスコープで波形を観測する。また、光スイッチを切り替えることによりパワーメータやスペクトラムアナライザで静特性を確認することができる。

## 5.6. 動的フリップ・フロップ動作

このようにして動的にフリップ・フロップ動作させた結果を Fig. 5-10 に示す。入力セットパルス

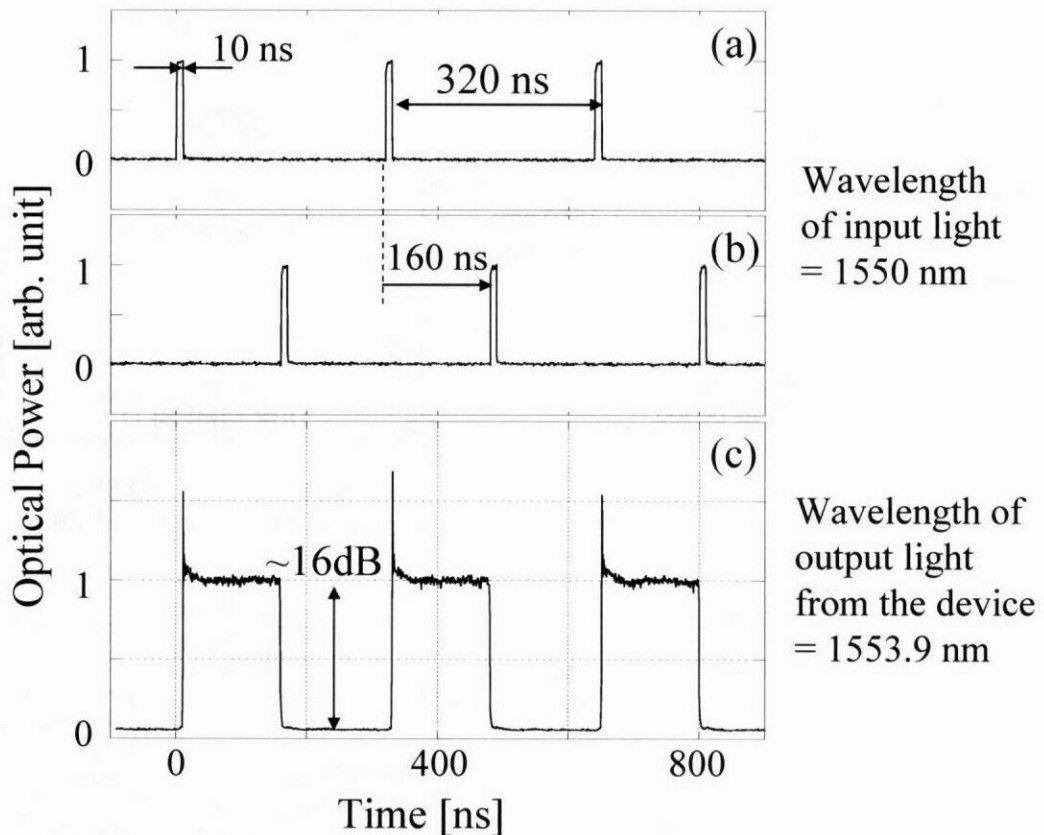


Fig. 5-10: Dynamic all-optical flip-flop operation of DBR-MMI-BLD. Each figures show waveforms of (a) SET pulse, (b) RESET pulse, (c) output light from device.



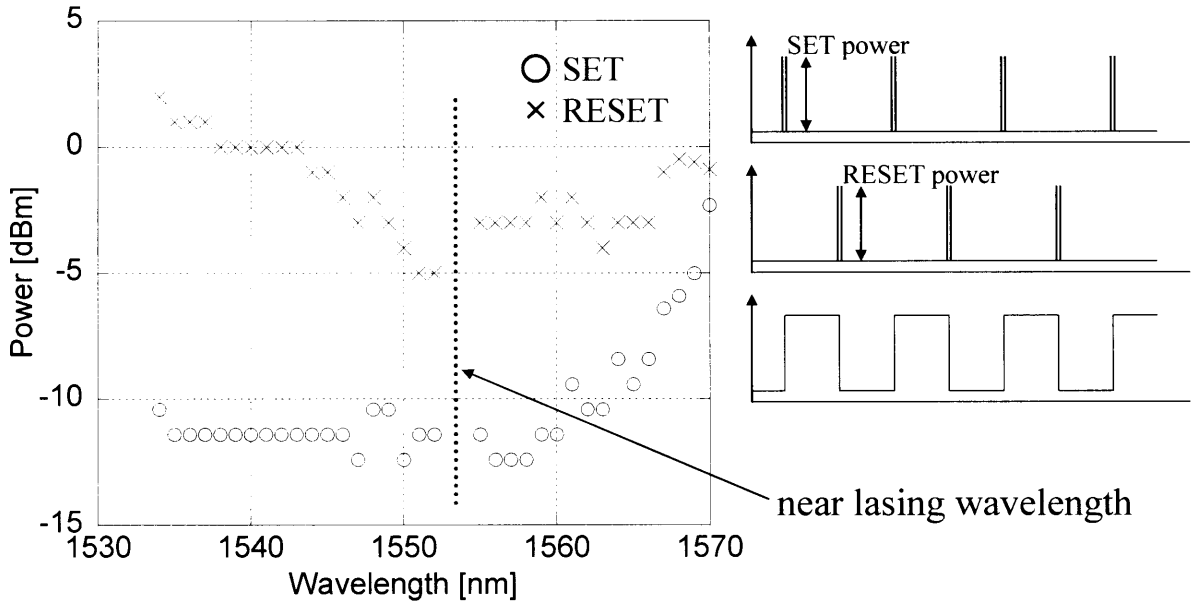


Fig. 5-11: Wavelength dependence of dynamic all-optical flip-flop operation.

を(a)に、リセットパルス(b)に、デバイスからの出力光を(c)に示す。このように、10 ns 幅の光パルスを用いて 320 ns 周期で動的にフリップ・フロップ動作させることに成功した。また、動的な ON/OFF 比は 16 dB であった。この値が静的な ON/OFF 比である 26 dB (Fig. 5-3)と異なっているのは、OFF 状態の光強度が EDFA の ASE レベルよりも低くなってしまっているため、EDFA で増幅した後に OFF 状態の光出力が上がってしまっているものと考えられる。

動的フリップ・フロップ動作をさせる光パルスの波長を変えながら、セット・リセットに必要なパルス強度を測定した結果を Fig. 5-11 に示す。ただしパルス強度は、パルスのピーク強度ではなく時間平均値を測定している。デバイスの発振波長付近ではうまく動作させることができなかったものの、それ以外の部分では反射鏡として DBR を用いたことにより滑らかな波長依存性を得ることができた。静的な SET/RESET 動作 (Fig. 5-7, Fig. 5-8 参照)と同様に、長波長側では SET、RESET ともに必要なパルス強度が大きくなり、動作しづらくなっているのが分かる。これは光パルスのエネルギーがバンドギャップよりも小さくなってしまい、相互利得飽和と過飽和吸収を起こすことができなくなっているものと考えられる。また、短波長側では RESET 動作がしづらくなっているのが分かる。これは光パルスのエネルギーがバンドギャップよりも大きくなって利得中心からはずれてしまうことにより、相互利得飽和で現在発振しているモードの利得を抑えることができなくなっているためだと考えられる。

## 5.7. 動作速度に関する考察

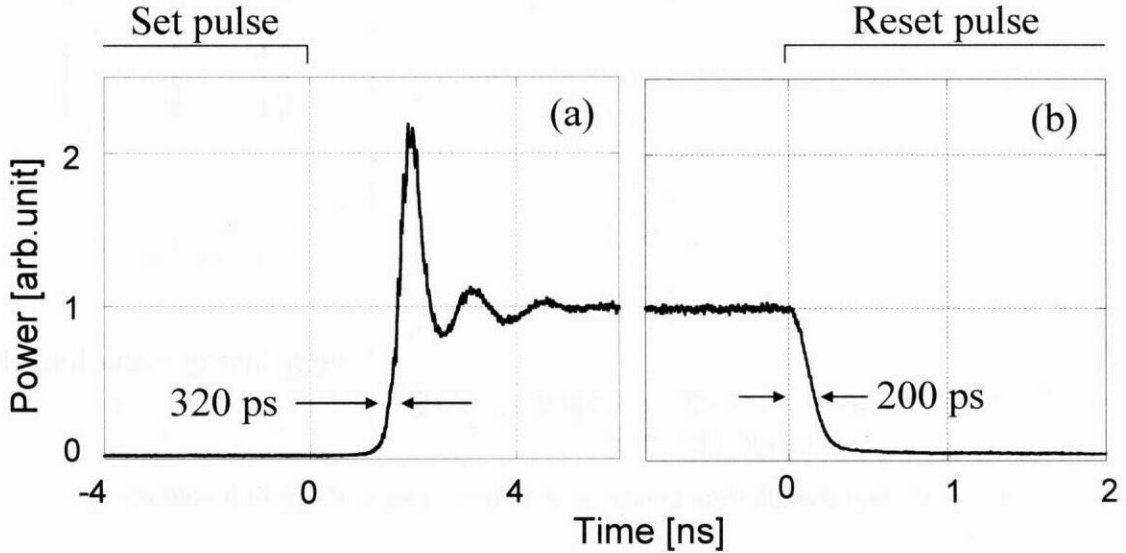


Fig. 5-12: Extended waveform of dynamic flip-flop operation at (a) rising point, (b) falling point.

動的なフリップ・フロップ動作をしている波形の、立ち上がり部・立ち下がり部の拡大波形をFig. 5-12 に示す。時間軸については、セットパルスの立ち下がりとリセットパルスの立ち上がりを基準にしている。フリップ・フロップの立ち上がりについては、セットパルスの立ち下がりからある遅れ時間の後、320 ps で立ち上がった。この時のセットパルス強度は時間平均値で+5 dBm である。一方、立ち下がりについてはリセットパルスの立ち上がりと同時に落ち始め、200 ps で立ち下がった。ここでの立ち上がり・立ち下がり時間は、光強度のピーク値に対して10%～90%の間を変化するのに要した時間で定義している。また、立ち上がり部分には緩和振動が見られ、その周波数はおよそ0.7 GHz であった。立ち下がり部分には緩和振動は見られなかった。ここで、緩和振動周波数と、振動の減衰係数は

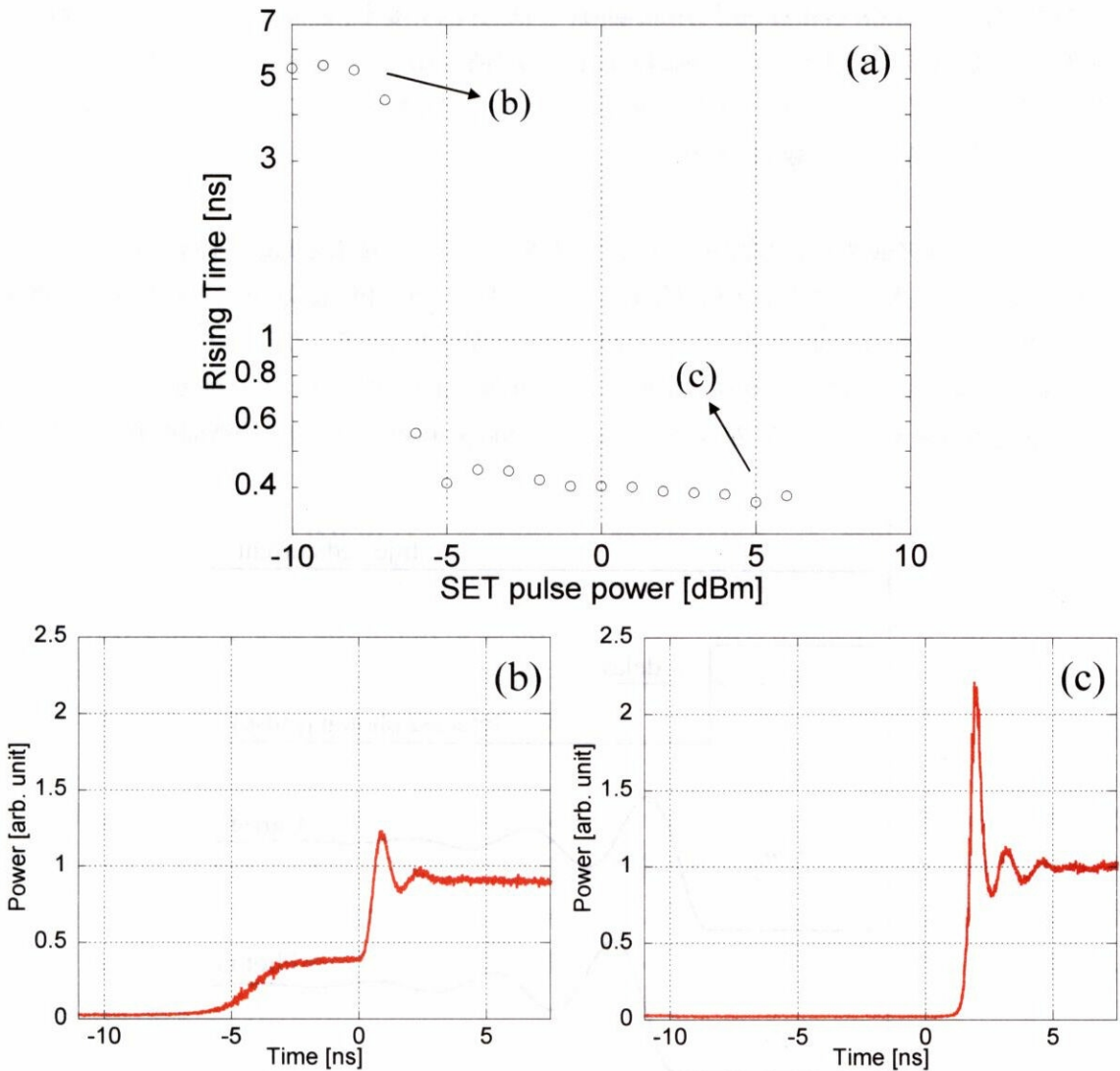
$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\partial G}{\partial n} \frac{S_0}{\tau_{ph}}}$$

$$\gamma_0 = \frac{\partial G}{\partial n} S_0 + \frac{1}{\tau_n}$$

で表すことができる[28]。 $\partial G/\partial n$ は微分利得、 $S_0$ は定常状態での光子密度、 $\tau_{ph}$ は光子の寿命、 $\tau_n$ は電子の寿命である。高速に動作させるためには $f_r$ 、 $\gamma_0$ ともに大きくなる必要がある。そのためには微分利得を上げる、定常状態での光子密度を上げる、光子と電子の寿命を下げるのが有効である。また、光子の寿命 $\tau_{ph}$ については

$$\frac{1}{\tau_{ph}} = \frac{c}{n_r} \left( \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \right)$$

と表すことができる。ここで  $c$  は真空中の光速、 $n_r$  は導波路の等価屈折率、 $L$  は共振器長、 $R_1$ 、 $R_2$  は反射鏡での反射率である。損失を上げてしまうと発振しきい値が上がったり十分な光出力を取れなくなったりするので、光子の寿命を下げるには共振器長を短くすることが有効であると分かる。つまり、デバイス長を短くすればよい。このデバイスは主に MMI の長さで共振器長が決まっている。MMI を短く作製するには、2.4.5 で示した *paired interference* の条件に合わせ、さらに導波路の屈折率差を大きく取ればよい。これには活性層直前までエッチングしリッジ高さを大きく取ること、究極的にはハイメサ導波路にすることが有効である。



**Fig. 5-13: (a) Relationship between SET pulse power and rising time. Extended waveform (b) at “critical slow down” condition, (c) with SET pulse power of +5 dBm.**

セットパルス強度と立ち上がり時間の関係を Fig. 5-13(a) に示す。立ち上がり時間については2つの要因からなっていることが見て取れる。すなわち、数百 ps で律速している要因と数 ns での要因の2つであり、弱いパルス強度では後者が律速し前者は見えなくなっているが、強いパルス強度で入射すると前者で律速されることが分かる。この前者が緩和振動周波数による律速であり、後者は BLD で知られている“critical slow down”と呼ばれる現象である[38][53]。Critical slow down の状態の波形を Fig. 5-13(b) に、緩和振動律速の状態の波形を Fig. 5-13(c) に示す。Critical slow down とは、BLD を発振しきい値ぎりぎりの状態にすると立ち上がりが極端に遅くなる現象である。

強いパルスを入射した時に見られる立ち上がりの遅れ時間について、注入している電流、光子(光パルス)、レーザー内でのキャリア、光子の関係を Fig. 5-14 に示す。電流は常に一定に注入しているが、光パルス入射時は相互利得飽和によってレーザーのキャリアは発振しきい値  $n_{th}$  以下に抑えられている。パルスが立ち下ると同時に、注入している電流によってキャリアが回復し始め、発振しきい値  $n_{th}$  まで達すると発振が始まり光子が放出され始める。強いパルスを入射するとその分キャリアが少なくなるため、キャリア数が発振しきい値まで回復するのに時間がかかる。これが立ち上がりの遅れ時間として観測される。

リセットパルス強度を変えながら立ち下がり時間を測定した結果を Fig. 5-15 に示す。立ち下がり時間は、パルス入射による相互利得飽和でキャリア数がしきい値  $n_{th}$  以下に下がる段階で律速されており、パルス強度を強くするとその分立ち下がり時間を短くすることができる。ただしこのデバイスは前述の通り片方のモードのみが発振している状態であり、リセットパルス強度をあまり強くしすぎると再度発振を始めてしまう。最適条件において 200 ps 程度の立ち下がり時間を実現することが

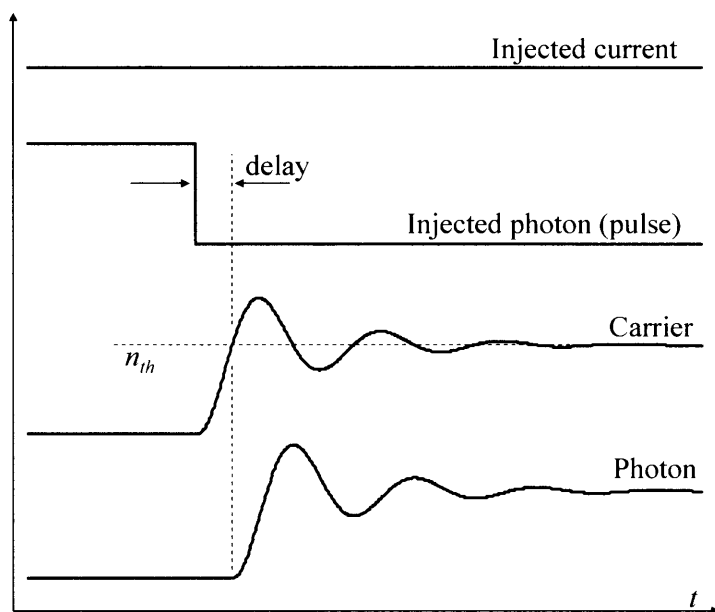
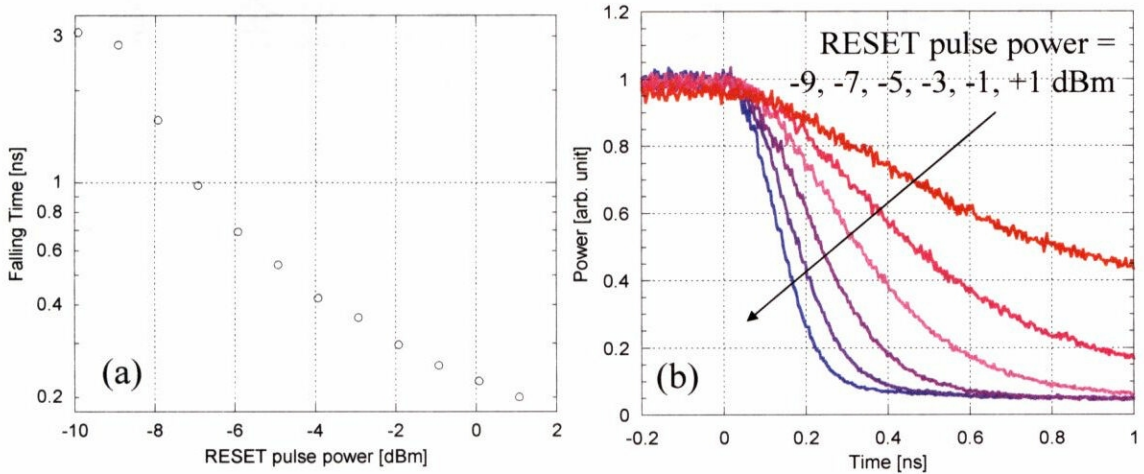


Fig. 5-14: Relationship between injected current, injected photon, carrier, and photon of BLD.





**Fig. 5-15: (a) Relationship between RESET pulse power and falling time. (b) Extended waveform at falling point.**

できた。

さらに高速な動作のためには 2 モード両方ともがきちんと発振し、pitchfork 状態でモードの切り替えができるようになる必要がある。

## 5.8. まとめ

本章ではまず DBR-MMI-BLD に電流を注入し静特性を測定した。発振しきい値電流は 167 mA であり、L-I 特性中に幅約 5 mA のヒステリシスを得た。また DBR の波長選択性により単一モード発振し、ON/OFF 比は 26 dB、SMSR は 23 dB であった。さらに CW 光をデバイスに入射し、静的に SET / RESET 動作させることに成功した。滑らかな波長依存性を持って切り替えができ、静的に動作可能な波長範囲は 1520～1570 nm であった。

さらに、LN 変調器を用いて光パルスを生成し、デバイスを動的にフリップ・フロップ動作させる実験を行った。10 ns 幅の光パルスを用いて 320 ns 周期で動的にフリップ・フロップ動作させることに成功した。動的な ON/OFF 比は 16 dB であった。また、動作可能な波長範囲は、発振波長付近を除き 1535～1570 nm であった。立ち上がり時間、立ち下がり時間の最大値はそれぞれ 320 ps、200 ps であった。

