

第4章 FP レーザーによる Active / Passive 集積の検証

前章では DBR-MMI-BLD を作製するためのプロセスについて述べた。本章では、実際に DBR-MMI-BLD を作製するための予備実験として、Offset quantum well による Active / passive 集積の検証を行ったものについて述べる。ここでは MMI や DBR は作製せず、単に単一モード導波路の中に Active 領域と Passive 領域を同時に作りこみ、その界面での反射が起こっていないかどうか見積もる。

まず用いたテストパターンについて述べた後、測定系について簡単にまとめる。その後、1 つのレーザーの中の様々な場所に Active 領域を作りこんだものの特性や Active / passive 界面での反射について述べ、最後に Active 領域を2つに分けることによって作製した双安定レーザーについて述べる。

4.1. テストパターン

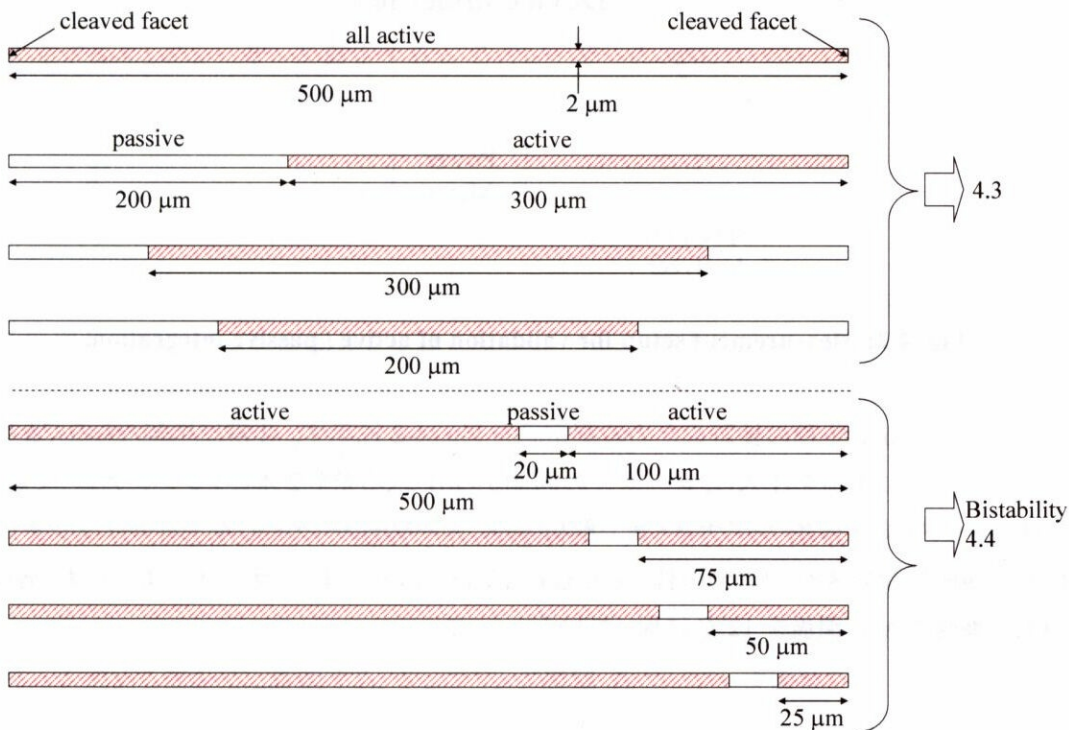


Fig. 4-1: Test element groups for active / passive integration. Red shaded area is active, and white area is passive region.

Active / passive 集積検証のためのテストパターンを Fig. 4-1 に示す。導波路幅は全て $2\text{ }\mu\text{m}$ に、導波路の長さは $500\text{ }\mu\text{m}$ に設定してある。長さについては実際にはへき開精度のため $5\sim 600\text{ }\mu\text{m}$ 程度になっている。全体 $500\text{ }\mu\text{m}$ のうち、片側に $300\text{ }\mu\text{m}$ のみ Active 領域を設けてあるもの、また中央部に $300\text{ }\mu\text{m}$ 、 $200\text{ }\mu\text{m}$ の Active 領域を設けてあるものを用意してある。

また、過飽和吸収体の長さを変化させた双安定レーザーを用意した。全体の長さは同じく $500\text{ }\mu\text{m}$ であり、 $20\text{ }\mu\text{m}$ の Passive スペースを挟んで $25\text{ }\mu\text{m}$ 、 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、 $75\text{ }\mu\text{m}$ 、 $100\text{ }\mu\text{m}$ の過飽和吸収体を持っている。

作製プロセスについては第3章で紹介したものと同様である。ただし DBR は作製していないため、EB 描画は行っていない。また Active / passive 界面については Appendix A で述べるように導波路に対して直交する方向から 7° 傾けてある。

4.2. 測定系

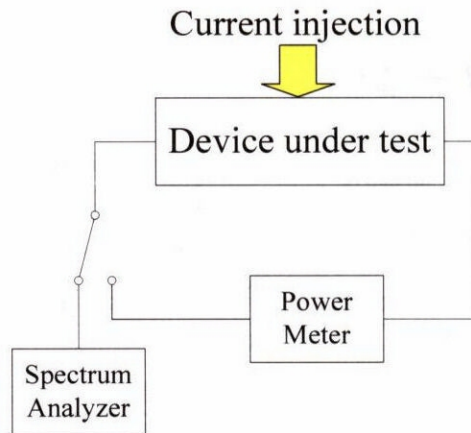


Fig. 4-2: Measurement setup for validation of active / passive integration.

Active / passive 集積の検証のための測定系を Fig. 4-2 に示す。非常に単純なものであり、対象となるデバイスに電流を注入し、レーザーの両側から出てくる光を2本のレンズファイバで結合し、光パワーメータと光スペクトルアナライザで解析する。光パワーメータと光スペクトルアナライザは、それぞれ機械的な光スイッチで切り替えられるようになっている。また、デバイスはペルチェ冷却素子の上に乘せてあり、温度を 12°C に保っている。

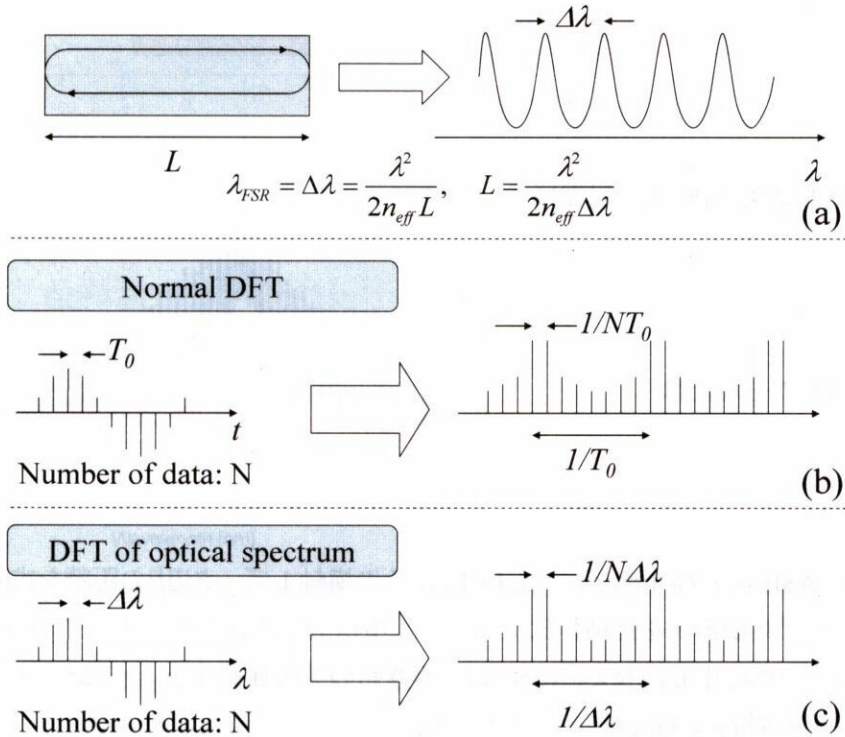


Fig. 4-3: Cavity length analysis using Fourier transform.

次に、レーザーの発振前の ASE スペクトルを分析し、共振器長を見積もる手法について説明する。まず長さ L のレーザーを仮定すると、そのレーザーの ASE スペクトルには λ_{FSR} の周期の振動が現れる(Fig. 4-3(a))。中心波長を λ とし、導波路の等価屈折率を n_{eff} とすると

$$\lambda_{FSR} = \frac{\lambda^2}{2n_{eff}L} \quad (4.1)$$

で表される。つまり、共振器長 L と振動周期 λ_{FSR} には 1 対 1 の関係にある。よって、スペクトル上の振動周期を分析すれば共振器長を見積もることができる。実際にはスペクトルをフーリエ変換することによって振動周期を分析することができるので、それを共振器長に変換しなおすことによって共振器長や内部反射があるかどうかを見積もることができる。

スペクトルもあるサンプリング周期でとった離散データになるため、離散フーリエ変換 DFT、実際には FFT を用いて計算をする。FFT は 2 の乗数個のデータ列があれば実行することができるが、横軸の単位に注意する必要がある。まず最も一般的な FFT である、時間データを変換し周波数スペクトルを求める例を元に説明する。サンプリング周期 T_0 で、データ個数を N とすると、その FFT 結果は $1/T_0$ の繰り返し周期になり、周波数分解能は $1/NT_0$ となる(Fig. 4-3(b))[52]。これを光スペクトルに当てはめてみる。サンプリング周期を $\Delta\lambda$ とし、データ個数を N とすると、FFT 結果は $1/\Delta\lambda$ の繰り返し周期になり、分解能は $1/N\Delta\lambda$ という物理量となる。これは式(4.1)より、共振器長と対応

づけることができる。

$$L = \frac{\lambda^2}{2n_{\text{eff}}\lambda_{\text{FSR}}} \quad (4.2)$$

であるから、FFT 結果の繰り返し周期は

$$L = \frac{\lambda^2}{2n_{\text{eff}}\Delta\lambda} \quad (4.3)$$

となり、共振器長の分解能は

$$\frac{L}{N} = \frac{\lambda^2}{2n_{\text{eff}}N\Delta\lambda} \quad (4.4)$$

となる。つまり、ASE スペクトルのデータを FFT し、その横軸 1 データ辺りの距離を式(4.4)で共振器長におきかえれば共振器長を見積もることができる。例えば、波長のサンプリング間隔 $\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$ 、データ個数 $N = 1024$ 、中心波長 $\lambda = 1550 \text{ nm}$ 、導波路の等価屈折率 $n_{\text{eff}} = 3.25$ とすると、FFT した結果のデータ列の間隔は $3.6 \text{ }\mu\text{m}$ という共振器長に対応していることが分かる。

4.3. FP レーザーの特性

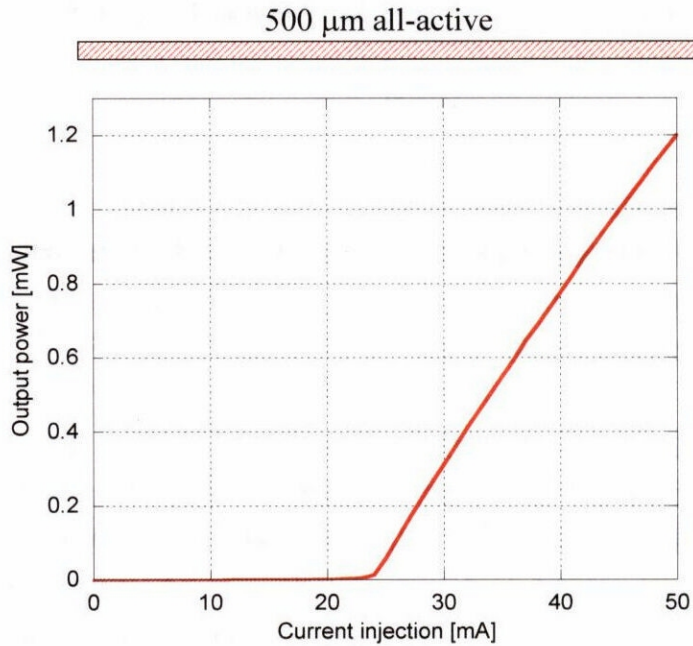


Fig. 4-4: L-I characteristic of 500 μm long FP laser.

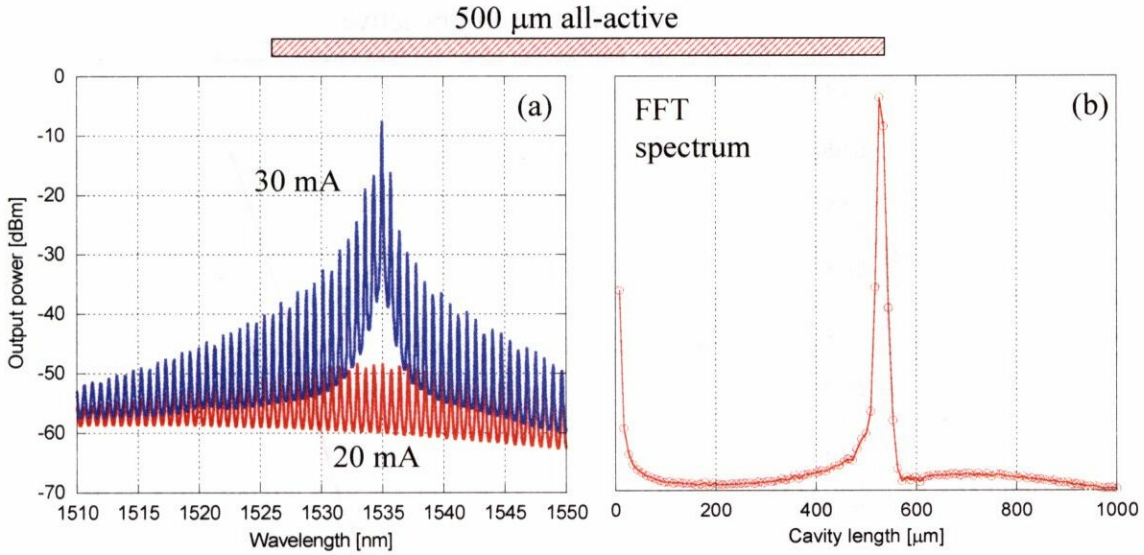


Fig. 4-5: (a) Lasing spectrum of 500 μm long FP laser, (b) FFT result of ASE spectrum.

まず Active / passive 集積の無い、全て Active 導波路からなる 500 μm の FP レーザーの注入電流—光出力(L-I)特性を Fig. 4-4 に示す。典型的なレーザーの L-I 特性が得られ、発振しきい値電流は 24 mA であり、50 mA の注入電流で 1.2 mW の光出力が得られた。これより、正常に利得を持つ活性層が作れており、導波路の作製プロセスに問題が無いことが分かる。

500 μm の長さの FP レーザーの発振スペクトルを、注入電流 20 mA と 30 mA の 2 種類について Fig. 4-5(a)に示す。典型的な FP レーザーの発振スペクトルであり、ここでは発振波長は 1535 nm であった。

また発振しきい値以下である 20 mA の注入電流での ASE スペクトルをフーリエ変換した結果を Fig. 4-5(b)に示す。横軸は前節で示した方法を用いて共振器長に変換してある。共振器長 530 μm 付近に強いピークが見られ、他の部分にはピークが無いことが分かる。なお、ここでは発振スペクトルの DC 成分に相当する部分を差し引いていないため、共振器長 0 μm 付近にも強いピークが見られるが、ここでは表示していない。フーリエ変換より得られた共振器長 530 μm という値は光学顕微鏡での実測値とよい一致を見せており、これよりフーリエ変換による解析が有効であることが分かる。

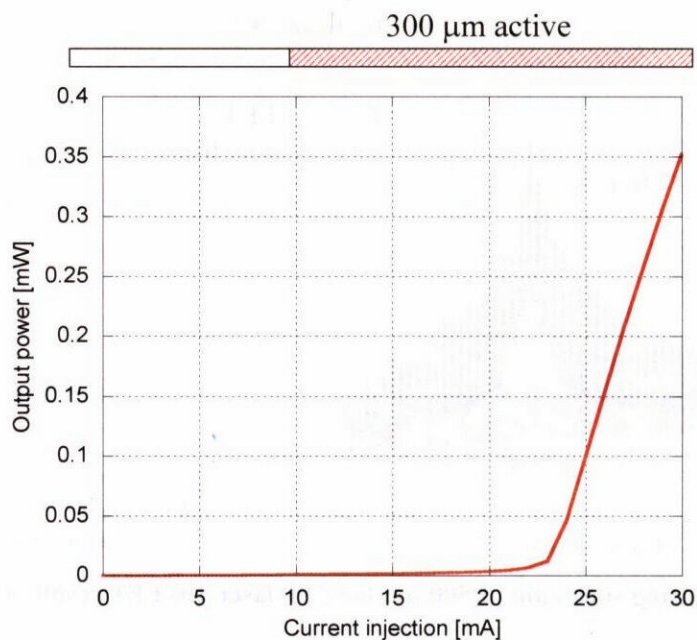


Fig. 4-6: L-I characteristic of FP laser, with 300 μm long active region.

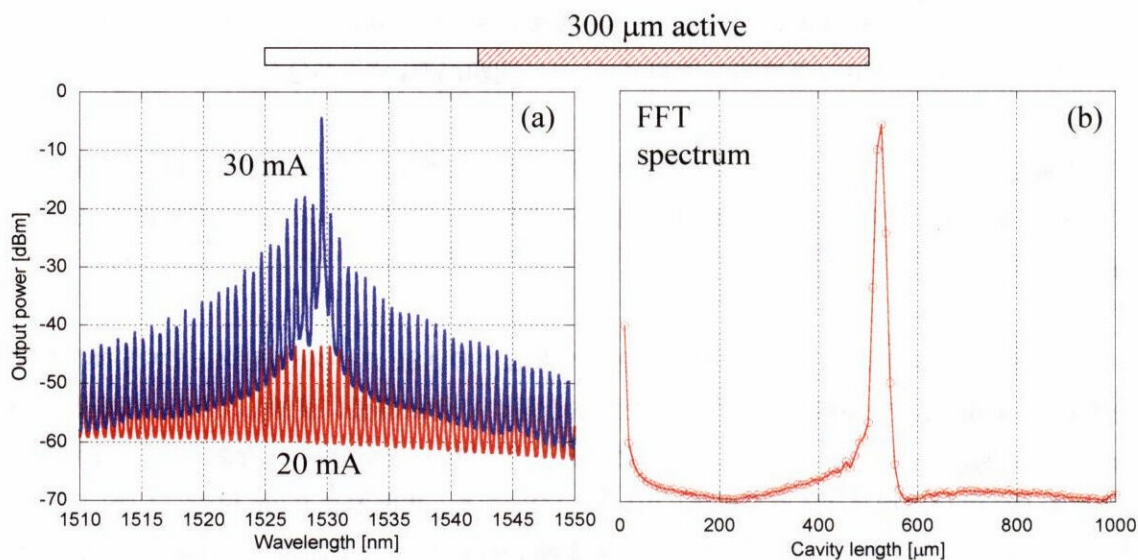


Fig. 4-7: (a) Lasing spectrum of FP laser, with 300 μm long active region. (b) FFT result of ASE spectrum.

次に、全体の長さ 500 μm のうち右側 300 μm にのみ Active 領域を作製した FP レーザーの L-I 特性を Fig. 4-6 に示す。発振しきい値電流は 23 mA であり、30 mA の電流注入で 0.35 mW の光出力を得ることができた。

Fig. 4-6 と同様に右側に 300 μm だけ Active 領域がある FP レーザーの発振スペクトルを、20

mAと30 mAの電流注入値においてFig. 4-7(a)に示す。典型的なFPレーザーの発振スペクトルであり、発振波長は30 mAの電流注入において1529.5 nmであった。

また、20 mAの電流注入値におけるASEスペクトルをフーリエ変換した結果をFig. 4-7(b)に示す。全てActive領域で作製したサンプルと同様に、共振器長530 μm 付近に強いピークが見られ、これがへき開端面での反射を示している。また、長さ300 μm のActive領域と長さ200 μm のPassive領域が集積されているため、それぞれの長さの共振器も存在しうるが、530 μm 以外には共振器のピークは見られない。このことから、反射の少ないActive/passive界面が得られていることが分かる。

発振波長が、500 μm の長さ全体に渡ってActiveのレーザー(Fig. 4-5では1535 nm)と比べて短波長化している結果が得られた。これはPassive領域に損失があるためにActive領域に大きな利得を持たせる必要があり、より短い領域にたくさんの電流を注入したことによるバンドフィリング効果で利得中心が短波長化したものと考えられる。

今度は全体500 μm のうち中央に300 μm のActive領域を設け、両端100 μm をPassive導波路にしたFPレーザーのL-I特性についてFig. 4-8に示す。発振しきい値電流は17 mAであり、40 mAの注入電流で1.7 mWの光出力が得られた。

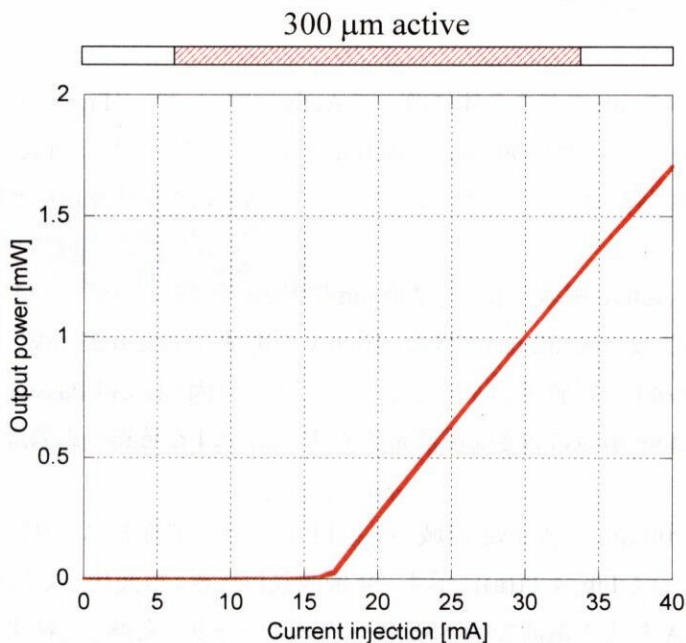


Fig. 4-8: L-I characteristic of FP laser, with 300 μm long active region.

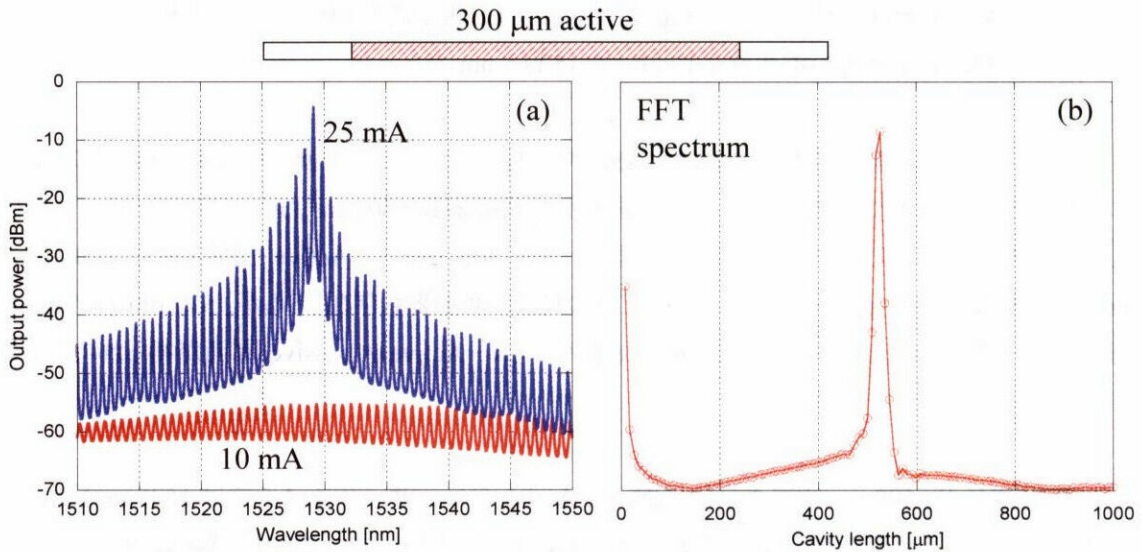


Fig. 4-9: (a) Lasing spectrum of FP laser, with 300 μm long active region. (b) FFT result of ASE spectrum.

同じく中央にのみ 300 μm の Active 領域がある FP レーザーの発振スペクトルを、10 mA と 25 mA の電流注入値において Fig. 4-9(a)に示す。発振波長は 1529 nm であった。また 10 mA の電流注入値での ASE スペクトルをフーリエ変換した結果を Fig. 4-9(b)に示す。これまでと同様に、共振器長 530 μm 付近においてのみ強いピークが見られ、反射の少ない滑らかな Active / passive 界面が作製されていることが分かる。

発振波長が、500 μm の長さ全体に渡って Active のレーザー (Fig. 4-5 では 1535 nm) と比べて短波長化しており、また右側 300 μm が Active となっているレーザー (Fig. 4-7 では 1529 nm) とほぼ同じとなる結果が得られた。これもバンドフィリング効果による短波長化と考えられる。

最後に中央の Active 領域の長さを 200 μm に減らした FP レーザーの L-I 特性を Fig. 4-10 に示す。発振しきい値はおおよそ 32 mA であり、40 mA の電流注入で 0.23 mW の光出力を得た。これまでのものと比べ発振しきい値電流が高くなっているが、原因としては Passive 導波路に損失があることと、また短い Active 領域に大きな電流を注入することによる発熱の影響などが考えられる。

同じく中央に 200 μm の Active 領域がある FP レーザーの発振スペクトルを、25 mA と 40 mA の電流注入値において Fig. 4-11(a)に示す。発振波長は大きく短波化しており、おおよそ 1519 nm であった。また、25 mA の注入電流での ASE スペクトルをフーリエ変換した結果を Fig. 4-11(b)に示す。これまでと同様に共振器長 530 μm 付近においてのみ強いピークが得られた。これより反射の少ない滑らかな Active / passive 界面が得られていることが分かる。