

3.3 量子細線レーザー

3.3.1 ファブリーペロー型量子細線レーザー

3.3.1-1 はじめに

量子細線や量子ドットなどの量子ナノ構造を用いた半導体レーザーは、状態密度分布の急峻性や緩和過程の限定などにより発光半値幅が縮小することや、活性層体積が減少し、低電流密度で反転分布が得られることから、低しきい値電流発振や高い微分利得による高速動作が期待されてきた。しかしながら、現実の量子ナノ構造は、形状揺らぎによる量子レベルの不均一性のため、発光半値幅が広がり、予測された特性が得られていない。また、レーザー発振における光電界分布(0.2~0.3 μm)に対して量子ナノ構造のサイズあるいは分布する範囲が小さい場合には、閉じこめ係数が小さく、十分なレーザー利得が確保できない。そのため、活性層体積に対して高い注入条件が必要となり、量子細線レーザーにおいては、高次の横モード発振が一般的であった。理論的に予測されている量子ナノ構造の特質を現実の高性能半導体レーザーとして実現するためには、十分な密度の量子ナノ構造を原子層精度で形成することが要求されることになる。この要求を満たすためには、基板の凹凸やリソグラフィ技術によるサイズの揺らぎをある程度許容できる原子層レベルで自己形成的な技術の開発が極めて重要となる。本節では、第2章で述べた、V溝基板上の流量変調エピタキシー法(Flow Rate Modulation Epitaxy: FME)により平坦性が向上した量子細線を用いて、ファブリーペロー型量子細線レーザーを作製し、その発振特性を報告する。

3.3.1-2 ファブリーペロー型量子細線レーザーの試作と発振特性

図3.3.1は、流量変調エピタキシー法(Flow Rate Modulation Epitaxy:FME)により成長したGaAs/AlGaAs V溝量子細線からのフォトルミネセンス(左)とその温度特性(右)を示す。平坦部の量子井戸部分は、選択エッチングにより除去している。量子細線からの発光の他に、V溝の中央部に形成される垂直量子井戸やV溝斜面の量子井戸からの発光が観察されている。右図に、同様な厚さを持つ量子細線と量子井戸の発光半値巾の温度依存性を示す。低温では、量子細線と量子井戸は、ほぼ同じ半値巾を示しているが、温度の上昇とともに、細線の半値巾の方が、井戸よりも狭くなっている。従来、1次元や0次元構造の状態密度の急峻性は、マクロレベルで見ると、構造の不均一性により隠れていたが、本プロジェクトにより、2次元量子井戸と同程度に構造の不均一性を向上することができた。すなわち、実用的な意味で、量子井戸を凌駕する可能性を持った光デバイス用材料を準備することができた。

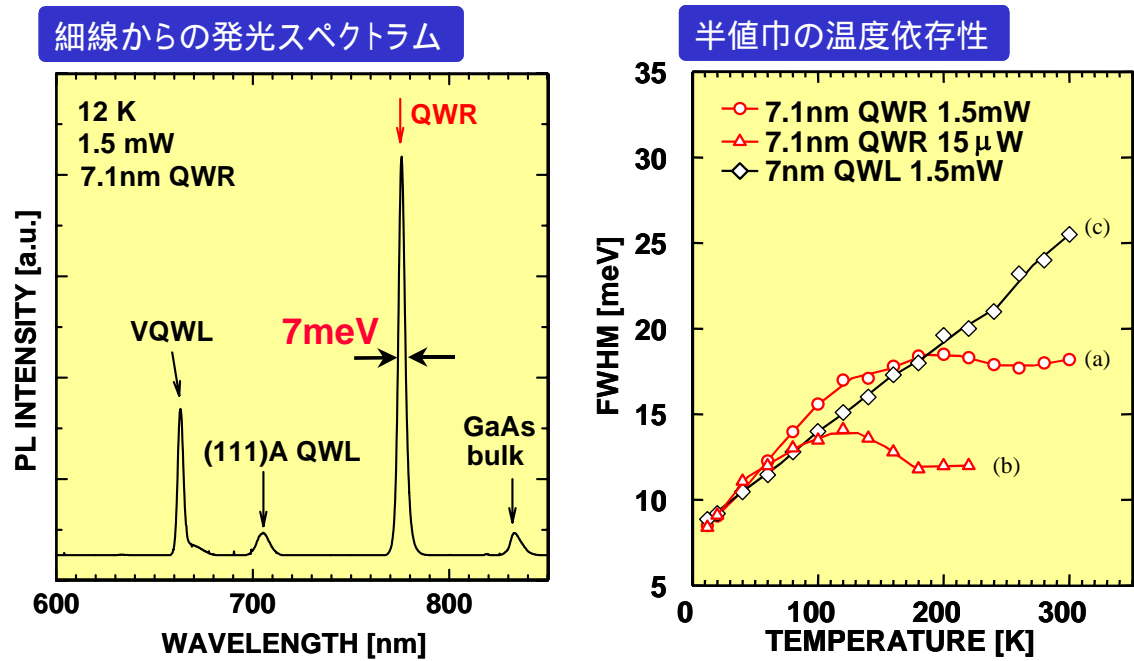


図3.3.1 流量変調法による量子細線のPLスペクトラ（左）および発光レベルの温度依存性（右）量子細線からの発光は、低温において、不均一広がりが同等で、室温においては、量子井戸より狭くなる。

図 3.3.2 に 3 重量子細線の断面写真とデバイスの模式図(左)、SEM(中)およびTEM(右)断面図を示す。 光リソグラフィで形成した $\langle 01-1 \rangle$ 方向の $2 \mu\text{m}$ のライン&スペースパターンをウェットエッチング ($\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}=1:3:50$) した V 溝基板上に N- $\text{Al}_{0.5}\text{GaAs}$ クラッド層 ($1 \mu\text{m}$)、N- $\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}$ ガイド層 ($0.2 \mu\text{m}$)、FME による 3 重量子細線、P- $\text{Al}_{0.2}\text{GaAs}$ ガイド層 ($0.2 \mu\text{m}$)、P- $\text{Al}_{0.5}\text{GaAs}$ クラッド層 ($1 \mu\text{m}$) および GaAs キャップ層 ($0.2 \mu\text{m}$) を成長した。 量子細線の厚さおよび巾はそれぞれ 8nm と 80nm である。 3 重量子細線間のバリア層の厚さは 25nm 、Al 組成は 0.2 である。 結晶成長後、フォトリジストを塗布し、溝部分のレジストのみが残るようにアッシングを施し、アンモニア過酸化水素により、ウェットエッチングを行うことにより、平坦部分や斜面の量子井戸層を除去した。 更に、イオンビームスパッタリングにより、量子細線の直上部に残

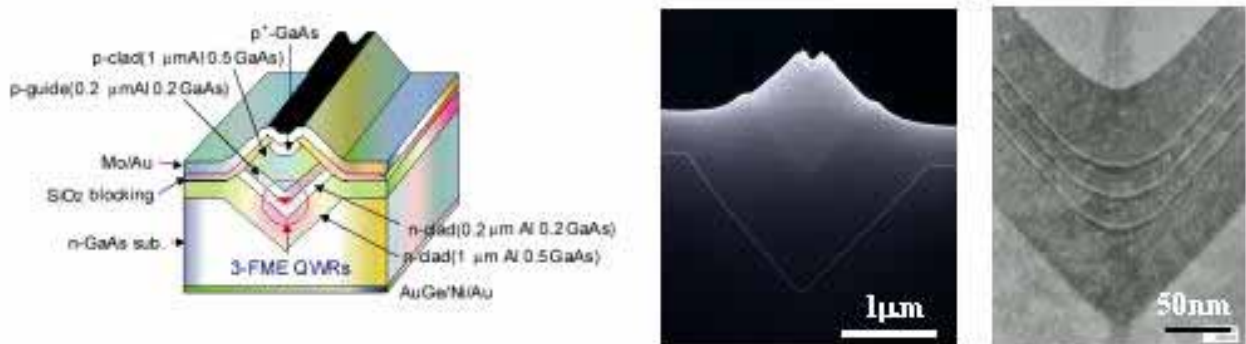


図3.3.2 3重量子細線レーザーの模式図(左)、SEM断面写真(中)、TEM断面写真(右)。

存したフォトリソをマスクにして、厚さ 100nm の SiO₂ を形成した。 フォトリソ除去後、Mo/Au による P 型電極および 80 μm 程度にラップ後、AuGe/Ni/Au の N 型電極を蒸着した。

図 3.3.3 は、3 重量子細線レーザの発振特性を示す。 レーザ長は 600 μm で端面は無コートである。図 3.3.3 (左) に示すようにしきい値 5mA にで室温パルス発振している。 図 3.3.3 (右) は、発振しきいスペクトラムを示す。 発振前では、834nm 付近に単峰性のゆるやかなピークを持ち、スペクトラムレンジを拡大すると、ファブリペロモードによる強度の変調が観察された。 レーザ発振後は、ファブリペロ - モードに対応した 2, 3 本のスペクトラムが現れるが、ピークの発振モードは遷移していない。発振波長の変化は 0.2 nm/mA 以下である。 レーザ長を変化させたときの発振しきい値電流と発振波長の関係を図 3.3.4 に示す。 レーザ長 350 μm を境に発振波長が 835nm から 827nm 付近に不連続に変化している。 これは、式 1) に示すように、レーザ長が短縮されるにつれレーザ発振に必要な利得が増加し、発振時の注入キャリア濃度が増加する結果、フェルミレベルが上昇し、基底サブバンドから第一次励起サブバンドに発振レベルが遷移するためである。

$$\Gamma g_{th} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} \quad \text{----- 1)}$$

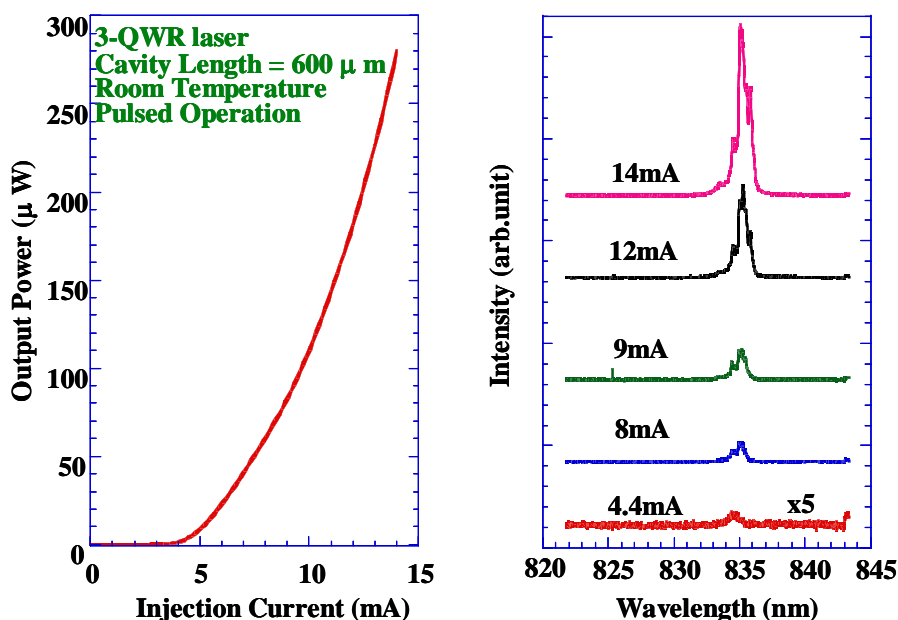


図3.3.3 3重GaAs / AlGaAs量子細線レーザの基底サブバンドレベルからの最初の室温パルス発振特性 (左) と発振スペクトラム特性 (右)

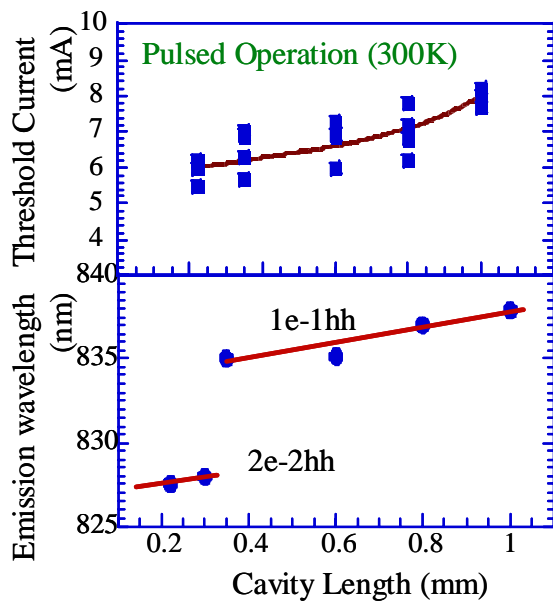


図3.3.4 レーザ長に対する発振しきい値電流と発振波長依存性共振器長350mmまで基底レベルで発振

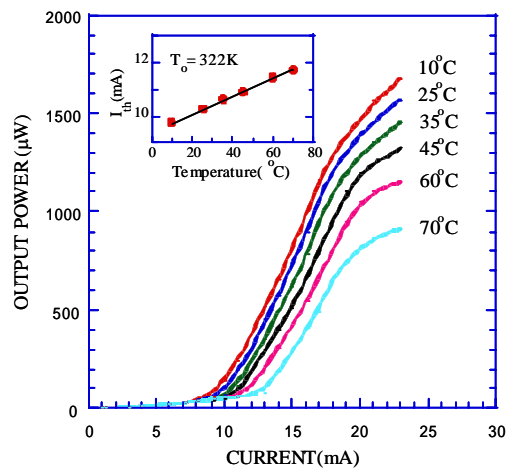


図3.3.5 発振しきい値電流の室温付近における温度依存性

また、同一サブバンド内でもレーザ長が短くなるとともに発振波長が光エネルギー側に推移している。共振器長を短くしてゆくと、共振器長 350 μm までは、基底レベルで発振し、そのあと不連続に2次のレベルの発振に推移する。本量子細線レーザの特徴は、単一サブバンドのみが発振に寄与することである。発振しきい値電流の室温付近における温度依存性を図 3.3.5 に示す。量子細線レーザの特性温度は、322K と比較的大きい値を示し、比較的高温でも特性の劣化が少ないことが判明した。これは、量子細線構造の状態密度が量子井戸構造よりも急峻であることに対応していると考えられる。

図 3.3.6 に量子細線レーザの光出力とその近視野像を示す。ほぼ真円に近い発光パターンが得られている。出力は、0.5mW 程度で飽和している。

サブバンド準位とレーザ発振スペクトラムとの関係を明らかにするために低温における PL, PLE とレーザ発振スペクトラムを比較した。PL および PLE を測定した試料は、

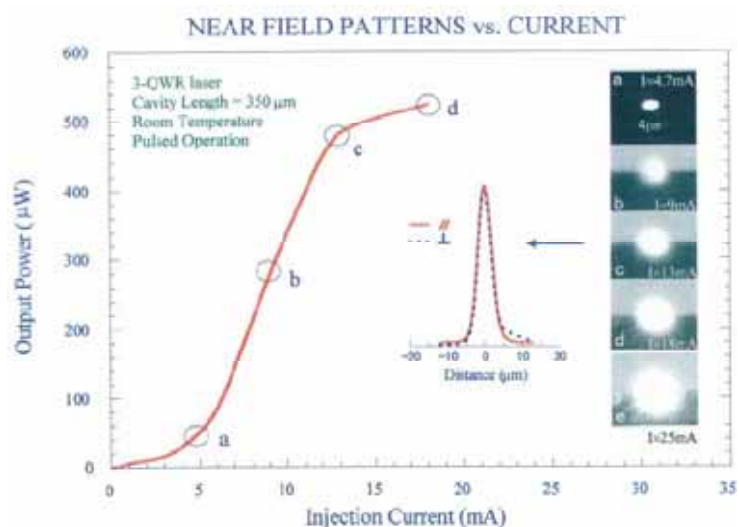


図3.3.6 GaAs/AlGaAs3重量子細線レーザの光出力特性と近視野像。ほぼ真円に近い発光パターンが得られている。

レーザを作製した試料の直後に成長したものであるが、図 3.3.7 において、発振スペクトラムの 782.5nm は、PL のピーク(783.2 nm)、および PLE の基底レベルにおける吸収ピーク(783.0 nm)とよく一致している。レーザ構造の試料の場合、Zn などの不純物ドーパの影響で、PLE におけるサブバンド構造は、ノンドーパ量子細線の場合に比べて急峻ではないが、基底レベルと第一励起レベルに対応する吸収ピークが現れている。不純物添加した試料においても、PL がエキシトンからの発光を示していると仮定すると、レーザ発振もエキシトンによるものであることを示唆している。挿入図は、PL、レーザ発振波長と GaAs バンドギャップの温度依存性を示す。室温におけるレーザ発振波長 835nm は、PL スペクトラムを室温に外挿した値とほぼ一致する。また、PL スペクトラムは、量子細線の形状から有効質量近似で計算した基底準位に一致する。従って、量子細線レーザからの発振は、基底レベルが寄与していると結論される。

3.3.1-3 量子細線レーザのゲインスイッチング特性

量子細線レーザは、急峻な状態密度に対応して量子細線の微分利得が増大すること、キャリア密度の空間的な変動が抑制され利得特性が空間的に安定していること、寄与す

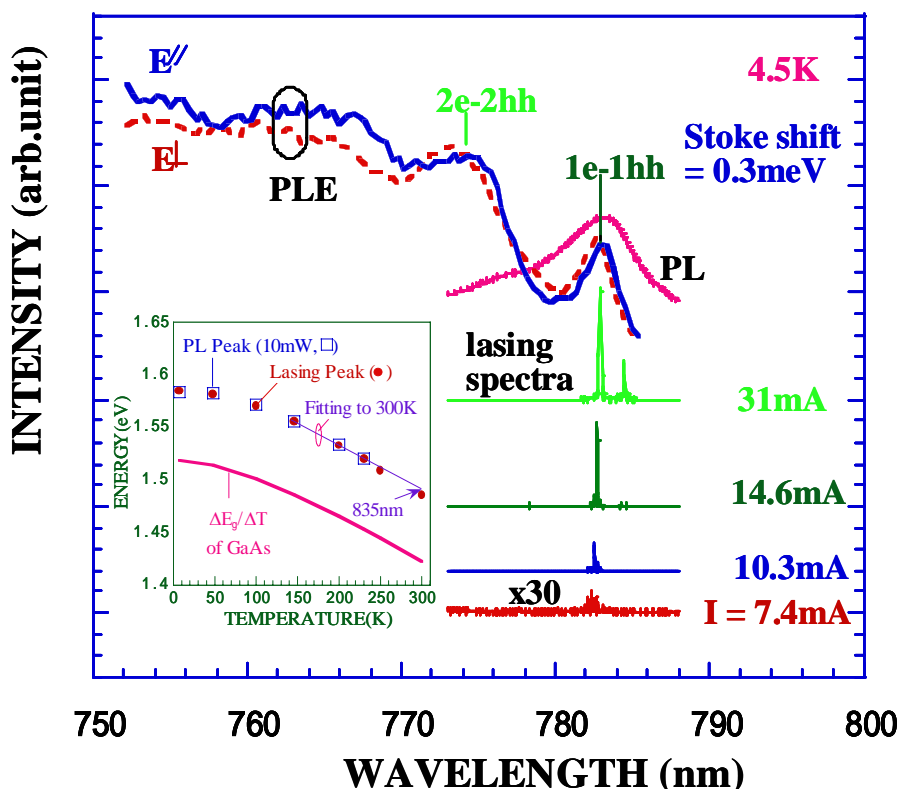


図3.3.7 低温に於ける PL, PLE および量子細線レーザの発振スペクトラ
 PLE、PLとレーザ発振波長は、低温にて一致する。また、PLの発光ピークは、
 250Kまでレーザ発振と一致し、室温でのレーザの発振波長835nmに外挿される。

るサブバンドレベルが確定していることなど、高速変調に有利であると予想される。

一般に半導体レーザの高速変調特性を向上するためには、緩和周波数を与える式 2) が示すように、内部フォトン密度を増加させるか、モード微分量子効率 $\Gamma dg/dN$ を向上させることが重要である。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c}{n_g} \Gamma \frac{dg}{dN} \frac{P_0}{\tau_p}}, \quad \tau_p = \frac{1}{V_g (\alpha_i + \alpha_m)} \quad \text{--- 2)}$$

量子細線構造により微分量子効率は向上していると予想されるが、量子細線レーザの場合閉じこめ係数 Γ は、量子井戸レーザよりも一桁程度小さいことが当面の問題になる。

図 3.3.8 は、量子細線レーザの利得スイッチ速度を測定するためのセットアップを示す。15V、200ps 程度の電気パルスバイアスティーを用いてレーザチップに導入し、発生した光パルスのスペクトラ分解時間応答をストリークカメラにより計測した。図 3.3.9 は、量子細線レーザの過渡応答特性を示す。DC バイアス 2mA、パルス幅 350ps、パルス電圧 15V で駆動したときの発光パルス半値幅は 21ps である。また、緩和周波数は、22GHz である。発光パルスの立ち下がりがやや遅れているのは、まず、1 次の励起準位からの発光が半値幅 15ps で消光した後も、基本レベルからの発光が継続しているからである。図 3.3.10 は、それぞれレーザ長が 220 および 350 μm の場合の発光スペクトラムを示す。図 3.3.11 は、レーザ長を変化させたときの光パルス巾を示す。基底サブバンド発振が可能な最も短いレーザ長で最短パルスが得られている。量子井戸の場合、高次のサブバンドが連続的に現れるのに対し 9)、量子細線では、10nm 程度分離されており、レーザ発振に寄与するサブバンドが明瞭に区別できるのが特徴である。

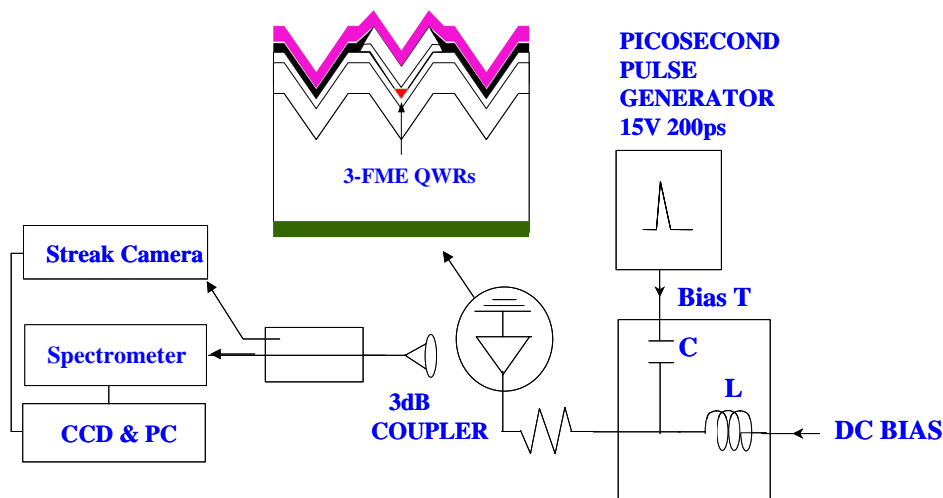
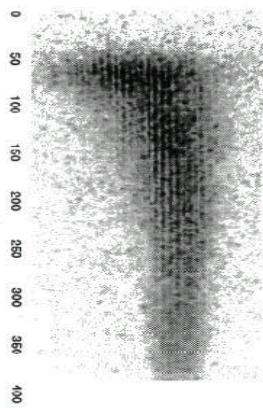


図3.3.8 量子細線レーザの利得スイッチに使用した機器の構成



FWHM = 21 ps
Cavity Length = 350 μm
Bias = 2mA (DC) +
15V, 350ps, 1kHz

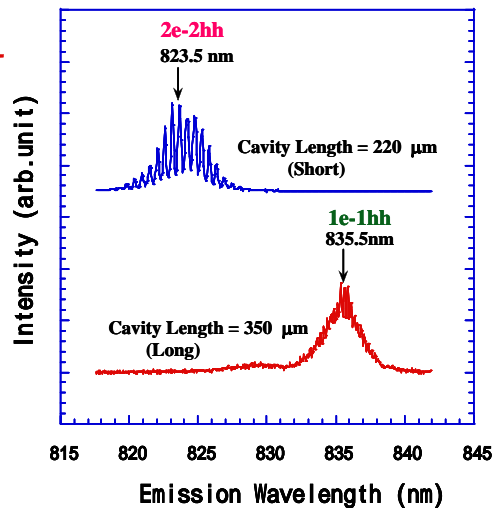
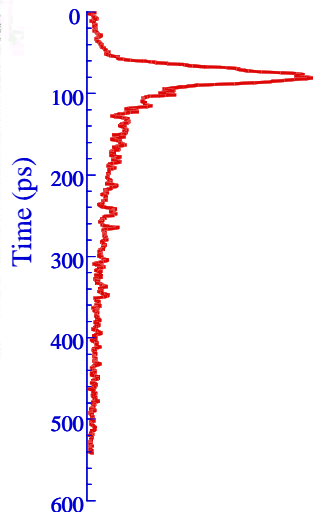


図3.3.9 GaAs/AlGaAs3重量子細線レーザの利得スイッチ特性。電気パルス巾350psecに対して、光パルスの半値巾は21psecで、単一サブバンドから発振している。

図3.3.10 利得スイッチモードにおける発振スペクトラム。レーザ長により基底レベルあるいは励起レベルのいずれかから発振している。

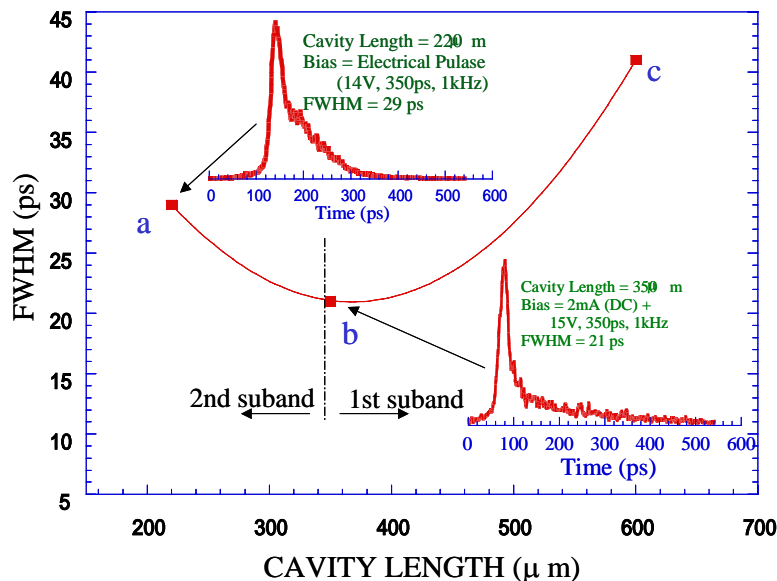


図3.3.11 GaAs/AlGaAs3重量子細線レーザのレーザ長と光パルス出力の半値巾。基底サブバンド発振の可能なレーザ長の限界付近で最短光パルスが得られた。

以上、FME法により、界面の平坦性が改善された量子細線を作製し、量子細線レーザにおいて初めて基底サブバンドレベルからの発振に成功した。細線レーザからの利得スイッチによる21psecの短パルス発光を得たが、変調速度に関しては現状では量子井戸レーザと比較して劣っている。今後、細線の充填密度を上げることにより、閉じこめ係数が改善された時点で、低次元構造を利得媒質に用いた利点が見られると考えられる。