

第4章

GaAs 基板上面発光レーザ

4.1 はじめに

本研究の目的は、OEIC への応用を考えた Si 基板上面発光レーザの室温連続発振であるが、まず面発光レーザの諸特性を知るために GaAs 活性層と格子整合する GaAs 基板上に試料を作製することにした。作製上重要なのは、面発光レーザの特性を決めてしまう反射鏡の形成である。OEIC への応用を目指すことから、反射鏡としては、結晶成長中に形成できるものか、或いは成長後に簡単に形成できるものが望ましい。また第2章の図 2.8 で示したように、活性層構造も反射鏡に応じて最適化する必要がある。そこで本章では、まず結晶成長から特性評価までのプロセス及びその特性評価方法について説明し、次に基本構造となる面発光レーザにおける諸特性について述べ、その構造に対する反射鏡の改善法及び活性層の最適化について述べ、最後に現段階での最良特性を有する GaAs 基板上面発光レーザについてふれる。

4.2 結晶成長、素子化プロセス及び特性評価

4.2.1 結晶成長

第3章でも述べたように、結晶成長には常圧横型 MOCVD 装置を用いた。キャリアガスには H_2 、Ⅲ族原料には TMG、TMA、TMI を使い、V族原料には AsH_3 を用いた。n 型ドーパント用原料としては H_2Se 、p 型ドーパント用原料としては DEZ を用いた。高周波加熱方式を用い、成長温度は $750\text{ }^\circ\text{C}$ とし、(100) 面の n^+ -GaAs 基板を用いた。

4.2.2 素子化プロセス

結晶成長後、以下に示す(1)~(6)のプロセスでデバイス化した(図4.1参照)。全ての面発光レーザの素子化プロセスに共通している工程のみを列記する。個別な工程については、その都度説明を行う。

(1) 電流狭窄窓の形成

電流狭窄窓形成の準備として、まずフォトリソグラフィ法を用いリフトオフ用のパターンをレジストにより形成する。その後、試料表面の酸化膜をHClを用いて除去する。続いて高周波スputタリング法を用い100nm程度のSiO₂絶縁膜をp⁺-GaAs層上に形成し、アセトン中でリフトオフを行う。この工程で50μmφの窓が形成される。

(2) p側リング電極の形成

p側リング電極形成の準備として、フォトリソグラフィ法を用いリフトオフ用のパターンをレジストにより形成する。その後、電極の密着性を高めるために、p⁺-GaAs層をH₃PO₄:H₂O₂:H₂Oで10nm程度エッチングする。そして真空蒸着法によりp⁺-GaAsのオーミック電極となるTi(50nm)/Au(100nm)を形成し、アセトン中でリフトオフを行う。この工程で $\pi((25\mu\text{m})^2-(13\mu\text{m})^2)$ の面積をもつリング状電極が形成される。

(3) 光出射側反射鏡の形成

再びリフトオフが必要となるときは上記と同様に準備をした後、真空蒸着法により光出射側(p側)反射鏡を形成する。反射鏡として用いた材料については、その都度説明を行う。

(4) 基板の研磨

素子の個別評価のためには、劈開による素子分離が必要となる。そこで、試料の総膜厚が100μm以下となるまで研磨を行う。

(5) n側電極の形成

電極の密着性を高めるために、n⁺-GaAsをH₃PO₄:H₂O₂:H₂O(第5章で述べるSi基板上面発光レーザの場合は、n⁺-SiをHF:H₂O)で10nm程度エッチングする。

そして真空蒸着法により n^+ -GaAs(n^+ -Si) のオーミック電極となる AuSn(AuSb) (50 nm)/Au(100 nm) を形成し、アセトン中でリフトオフを行う。この工程で $\pi((25\ \mu\text{m})^2 - (13\ \mu\text{m})^2)$ の面積をもつリング状電極が形成される。

(6) 劈開とヒートシンクへのマウント

メスで試料を素子ごとに劈開し、それを In メッキが施された Cu のヒートシンク上にマウントし、180 °C に熱し接着する。

4.2.3 特性評価

特性評価としては、主に以下の方法を用いる。特別な評価法はその都度述べる。

(1) 反射率特性

作製した反射鏡の特性を知るための評価である。評価法としては、ある特定の波長の光を反射鏡に入射させ、その反射光の強度をフォトディテクターで測定することにより行った。光源として Xg ランプを用い、その光を分光器で特定の波長のみに分光した。反射率の絶対値を求める際には、あらかじめ測定しておいた標準鏡での反射光強度との比で求めた。

(2) 電流-電圧特性

作製した面発光レーザの立ち上がり電圧と直列抵抗そして逆方向の耐電圧を知るための評価である。評価法としては、劈開した素子を導電性のステージに置き、素子の p 側電極に+電極のプロブをそしてステージに-電極のプロブを接触させ、ある直流電圧をかけたときの電流値を測定することにより行った。逆方向電圧を測定する際は、電源側の極性を反転させることで行った。

(3) 電流-光出力特性

作製した面発光レーザの光出力と閾値電流値そして外部微分量子効率を知るための評価である。評価法としては、ヒートシンク上にマウントした素子を評価用ホルダーに装着した後、電源の+電極をホルダーの電極にそして-電極をヒートシンクに接触させ、あるパルス電流若しくは直流電流を流したときの光出力を測定することにより行った。光出力は Si フォトディテクターで電流に変換され、それ

をペンレコーダでモニターした。本研究を通じて、パルス電流としては、パルス幅 200 ns、周波数 5 kHz のものを用いた。

(4) スペクトル特性

作製した面発光レーザの発振波長と半値幅を知るための評価である。評価法としては、(3)と同様の手法で素子に電流を流し、分光器を備えたフォトディテクターに素子の光出力を光ファイバーを通じて入力することで、波長別の光出力を測定することにより行った。パルス駆動の場合は、光出力を積算することにより求めた。

4.3 基本構造となる面発光レーザ

前述したように、OEIC への応用という観点から基本構造としては、光出射側反射鏡として蒸着で簡単に形成可能な Au 薄膜反射鏡を用い、基板側反射鏡としては結晶成長で形成可能な半導体多層膜反射鏡を用いることにした。また活性層としては、バルクの GaAs を用いることにした。断面構造図を図 4.1 に示す。詳細な構造としては、 n^+ -GaAs 基板上にまず n^+ -GaAs 層を成長し、続いて n^+ -AlAs(76 nm)/ n^+ -Al_{0.1}Ga_{0.9}As(64 nm) DBR 多層膜を成長した。2.4 節でも述べたように、DBR 多層膜の場合はその 2 媒質の屈折率差とペア数で反射率が決定されるわけであるが、GaAs を活性層として用いる場合、GaAs を反射鏡としても用いると光吸収があり Al_{0.1}Ga_{0.9}As を用いた方が屈折率差は小さくなるものの、結果的には高い反射率が得られることになる。またペア数については、GaAs 基板上の場合は第 3 章で述べた格子不整合による問題が生じないため、理論的には無限に厚く成長可能となり図 2.3 より限りなく全反射に近い反射鏡を形成可能である、しかしながら Si 基板上への応用が前提であるのでなるべく薄い膜厚で構成する必要がある。そこで 99.9%の反射率を得られる反射鏡を形成することにした、図 2.3 より上記の 2 媒質においては 20 ペアで達成されるが、マージンをとって 23 ペアとした。また膜厚は、発振波長を 900 nm と想定し光学的 1/4 波長となるそれぞれの値とした。この DBR 多層膜の反射率特性の計算値を図 4.2 に示す、800 nm より短波長側で著しく反射率が減少しているのは光吸収のためである。ここで構造に戻ると、続いて n -Al_{0.7}Ga_{0.3}As(285 nm)、GaAs(250 nm) 活性層、 n -Al_{0.7}Ga_{0.3}As(257 nm) のダブルヘテロ (DH) 構造を成長し、最後に p^+ -GaAs(エッチングにより 34 nm→25 nm) コンタクト層を成長した。反射鏡間の

光共振器長は発振波長の整数倍とし定在波を発生させる必要があるため、DH 構造+コンタクト層の膜厚を 3λ とした。コンタクト層が通常の端面発光レーザの場合 (100 nm 程度) と比較して薄いのは、DBR 多層膜のところで述べたのと同様に光吸収を抑えるためである。以上が結晶成長により作製される部分で、その後は前節で述べた工程で作製した。光出射側反射鏡の Au 薄膜については、図 4.5 より膜厚が厚い程高反射率となるが、光出射側であるのである程度の透過性も必要である、そこで 0.5% の透過率が得られる膜厚である 70 nm とした。この Au 反射鏡の反射率特性の計算値を図 4.2 に示す、波長 900 nm での反射率は 93.6% である。

この AlAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As DBR 多層膜と Au 反射鏡を用いた、GaAs 基板上 GaAs バルク活性層を有する面発光レーザにおける 300 K パルス動作の電流-光出力特性とスペクトル特性を図 4.3 に示す。閾値電流値 266 mA のレーザ発振が得られ、その発振波長は 893 nm である。想定した波長より短波長側にずれているが、この程度なら図 4.2 より反射率の低下は殆ど無いと考えて差し支えない。また、外部微分量子効率が 0.61% と非常に小さいのは、図 2.9 に示したように Au 反射鏡による光吸収のためであると考えられる。しかしながら、この構造での室温連続動作は得られていない、それは閾値電流密度 (18.6 kA/cm²) の大きさに起因していると考えられる。そこで、閾値電流密度低減のために必要となるのは、式 (2.13) より反射鏡の高反射率化とそれに応じた活性層の最適化となる。次節では、まず反射鏡の改善について述べる。

4.4 反射鏡の改善

反射鏡の改善法としては、基本的に基板側、光出射側ともに反射率を上げることになるが、基板側は前節で述べたようにこの構造ではこれ以上の反射率は望めない、ということで本節では光出射側反射鏡の高反射率化に絞って述べる。基本構造では、形成の手軽さから Au 薄膜反射鏡を用いたが、透過性の必要性から Au のみではこれ以上の反射率を望めない。また、基板側と同様に DBR 多層膜を用いれば低損失で高反射率が達成できるが、前述したように成長層膜厚の制限から用いることが出来ない。そこで 2.4 節で述べた複合反射鏡を用いることになる。複合反射鏡としては、半導体多層膜+Au 薄膜または誘電体多層膜+Au 薄膜が考えられる。次項以降では、この 2 種類の反射鏡の利点と問題点について述べる。

4.4.1 半導体多層膜+Au 薄膜複合反射鏡

半導体多層膜+Au 薄膜複合反射鏡の利点は、ドーピングすれば電流を流せることと結晶成長と蒸着で容易に作製出来ることである。そこで、Au 薄膜反射鏡に基板側と同じ AlAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As DBR 多層膜を加えたときの反射率特性を計算すると図 4.4 となる。但し、成長層膜厚の増加をなるべく抑えるという観点から DBR 多層膜は 5 ペアとし、Au 薄膜 70 nm と同じ透過率が得られるように Au 薄膜は 53 nm とした。図 4.4 より最高反射率は 97.6% となり、複合化することで 4% 高くなったことになる。しかしながら、p タイプドーピングしたときの半導体多層膜は、2 媒質の組み合わせによっては非常に高抵抗となるとの報告がある¹⁾。それは、Anderson モデルで示されるヘテロ接合界面でのエネルギー障壁の形成によって説明される²⁾。図 4.6 に示されるように、バンドギャップ E_{g1} の p 型半導体 I と E_{g2} の p 型半導体 II が接触すると、価電子帯にバンドの不連続が発生する。幾何学的処理によりバンド不連続の大きさ ΔE_v と真空準位に生じる障壁高さ V_D は次式より求められる。

$$\Delta E_v = E_{g2} + \chi_2 - (E_{g1} + \chi_1) \quad (4.1)$$

$$V_D = \Delta E_v - \delta_2 + \delta_1 \quad (4.2)$$

ここで、 χ_1 、 χ_2 はそれぞれ半導体 I、II における電子親和力であり、 δ_1 、 δ_2 はそれぞれのフェルミ準位と価電子帯間のエネルギー差である。ここで外部電圧 V が印可されたときの、半導体 I、II 間を流れる電流を求めるためには、無バイアス時の価電子帯に生じる障壁 V_{D1} 、 V_{D2} を求める必要がある。バンド不連続の発生しない接合においては、ポアソンの方程式と、接合界面で電位と電束密度が連続であるという境界条件を用いて解くわけであるが、ヘテロ接合では電位が接合界面で不連続であるためこの境界条件を用いることが出来ない、よって電束密度連続という条件のみから解くことになる。以下では各半導体の接合界面での電束密度を求める。半導体 I をみると、価電子帯が接合界面付近で上向きに曲がっており、接合面には ΔE_v の障壁があることから、界面近傍に正孔が蓄積されていると考えられる。この構造を MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) 構造と同じとみなすと、MIS 構造における導出法により接合界面での電束密度 D_1 は次式となる

(導出法については参考文献を参照) 3)。

$$D_1 = \left\{ 2\epsilon_1 q N_{A1} \left[\frac{k_B T}{q} \left(\exp \frac{q(V_{D1} - V_1)}{k_B T} - 1 \right) - (V_{D1} - V_1) \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4.3)$$

但し、 q は電気素量、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度、 ϵ_1 、 N_{A1} はそれぞれ半導体Iにおける誘電率、アクセプタ密度、そして V_1 は印可電圧 V の半導体Iにかかる分圧である。次に半導体IIについてであるが、この価電子帯の曲がり金属とのショットキー接合同じで、ショットキー接合における導出法により接合界面での電束密度 D_2 は次式となる 4)。

$$D_2 = [2\epsilon_2 q N_{A2} (V_{D2} - V_2)]^{\frac{1}{2}} \quad (4.4)$$

但し、 ϵ_2 、 N_{A2} はそれぞれ半導体Iにおける誘電率、アクセプタ密度、そして V_2 は印可電圧 V の半導体Iにかかる分圧である。ここで前述した境界条件($D_1 = D_2$)を用い、式を整理すると次式となる。

$$\frac{k_B T}{q} \left(\exp \frac{q(V_{D1} - V_1)}{k_B T} \right) = \frac{\epsilon_2 N_{A2}}{\epsilon_1 N_{A1}} (V_{D2} - V_2) + (V_{D1} - V_1) + \frac{k_B T}{q} \quad (4.5)$$

上式と式(4.1)、(4.2)及び $V_D = V_{D1} + V_{D2}$ の関係を用いると、解析的に V_{D1} 、 V_{D2} が求められることになる。本題である、半導体I、II間を流れる電流の式を求めるときに考慮すべき現象がある。それは、界面準位の存在である。格子定数の異なった2つの半導体でヘテロ接合を作ると、3.2節でも述べたように格子定数の不整合を相殺するために、界面に転位が発生する。ダイヤモンド構造をもつ2つの半導体の(100)面でヘテロ接合を作る場合、dangling bondの密度(単位面積当たりの結合していない価電子の数)は、

$$N_{DB} = 4(a_1^{-2} - a_2^{-2}) \quad (4.6)$$

で与えられる。ここで、 a_1 、 a_2 は2つの半導体の格子定数である。このdangling bondによる準位はエネルギー的な観点から考察すると、深いアクセプタ準位とドナ準位を形成すると推定される。つまりこの界面準位密度が大きいと、キャリアが障壁を越えて移動する機構よりも、むしろ界面準位を通じてのトンネル電流が支配的となる。しかしながら、この密度が 10^{13} cm^{-2} 以下においては、この界面準位の効果をあまり受けないことが示されている。表4-Iに示したGaAsとAlAsの格子定数から界面準位を見積もると、

$2.0 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ となり、AlAs/AlGaAs 多層膜では考慮しなくても良いことがわかる⁵⁾。よって以下では界面準位を考慮しないで論議を進める。以上より半導体 II から I へ流れる電流密度 J は次式となる。

$$J = A^* T^2 \exp\left(-\frac{qV_{D2}}{k_B T}\right) \left[\exp\left(-\frac{qV_2}{k_B T}\right) - \exp\left(-\frac{qV_1}{k_B T}\right) \right] \quad (4.7)$$

ここで、 A^* は Richardson 定数である。この式より低抵抗化するためには V_{D2} を小さくする必要があることがわかる、そのためには式 (4.2) より ΔE_v を小さくする必要がある。 ΔE_v は 2 つの半導体の組み合わせによって決まるので、AlGaAs 系なら Al 組成比の差に依存することになる。また、Al 組成比を徐々に変えることでも 1 つの接合界面に生じるバンド不連続を小さくできると考えられる。また、半導体 I から II へ流れる電流を考えると、その障壁はバンドギャップの大きい方の半導体のフェルミ準位にも依存するので、高ドープとすることも抵抗値を下げることに繋がると考えられ、更に障壁幅が薄くなることからトンネル電流も同時に増加させられると考えられる⁶⁾。以上の考察より、以下の構造を p^+ -GaAs 基板上にそれぞれ 5 ペアずつ成長し、電流-電圧特性を測定することにした⁷⁾。

(i) p -AlAs/ p -Al_{0.1}Ga_{0.9}As DBR 多層膜

(ii) p -Al_{0.7}Ga_{0.3}As/ p -Al_{0.1}Ga_{0.9}As DBR 多層膜

(iii) p -Al_{0.5}Ga_{0.5}As graded 層を用いた p -AlAs/ p -Al_{0.1}Ga_{0.9}As DBR 多層膜

(iv) 650 °C で成長した p -AlAs/ p -Al_{0.1}Ga_{0.9}As DBR 多層膜

(i) の構造は基本となる構造で、2 媒質の屈折率差が大きいことからこの中で最も高反射率となる、(ii) の構造は AlAs にかえて Al_{0.7}Ga_{0.3}As を用い、Al_{0.1}Ga_{0.9}As とのバンドギャップ差が小さくすることで、 ΔE_v を小さくし低抵抗化を試みる構造である、しかしながら屈折率差も同時に小さくなることから反射率の低下が生じる。そこで透過率 0.5% が得られるときの反射率特性を計算してみると、図 4.4 より Au58 nm と複合化することで、96.6% の反射率を達成可能であることが見積もれた。(iii) の構造は、graded 層を用い 1 つの接合界面に生じるバンド不連続を小さくすることで低抵抗化を試みる構造である、この場合に問題となるのはその膜厚である。そこで Al_{0.5}Ga_{0.5}As graded 層の膜厚に対する反射率を計算してみると、図 4.5 となる。Au 薄膜反射鏡の反射率 93.6% を下回っては意味がないが、ある程度の膜厚がないと graded 層の効果が現れない、そこで

graded 層を挿入しない場合と比較して 3%の反射率減少となる膜厚 20 nm とした。そして (iv) の構造は 650 °C で成長することにより AlAs 層のドーピング量を増やし、障壁を小さくし障壁幅を薄くすることで低抵抗化を試みる構造である。以上 4 種類の DBR 多層膜をメサ状にエッチングし、オーミック電極を付け電流-電圧特性を測定した結果を図 4.7 に示す。図より明らかに直列抵抗が改善された構造とそうでない構造があることがわかる。更にメサ径を変化させて、DBR 多層膜の直列抵抗を測定した結果を図 4.8 に示す。図 4.1 の面発光レーザの反射鏡として用いる場合、電流が流れるのは 50 $\mu\text{m}\phi$ であることから、(i) の構造では 5k Ω もの高抵抗となり、発熱により活性層の利得が飽和し、素子は急速劣化を示すものと考えられる。また (ii) の構造も大きな改善とはならず、反射鏡として用いるのに適していない。一方、残りの 2 つの構造は、目覚ましい改善が見られ、前述した 2 つの構造と比較して 1/1000 以上の低抵抗化に成功している。しかしながら、最も低抵抗を示した (iv) の構造は、表面が白濁したため図 4.4 に示した理論反射率を示さないと考えられる。濁った原因としては、成長温度が低かったため AlAs が 2 次元ではなく 3 次元に成長してしまい、結果として成長層表面に凹凸ができたためであると思われる。また、この凹凸が低抵抗化の一因である可能性もある。他の研究機関では、鏡面を保ちながら低抵抗化に成功している例もあるので、成長温度の最適化が行えれば期待はもてる反射鏡である⁸⁾。結論としては、バンドギャップ差を小さくすることで低抵抗化を試みた (i) の構造の $\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As}/\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ DBR 多層膜が、Au 薄膜反射鏡との複合反射鏡に最も向いているという結果が得られたが、それでも図 4.8 より 100 Ω 程度の直列抵抗を持っており、室温連続を考えると適した反射鏡とは言い難い。

4.4.2 誘電体多層膜+Au 薄膜複合反射鏡

光出射側反射鏡として誘電体多層膜+Au 薄膜複合反射鏡を用いる場合には、誘電体を用いることから電極を兼ねた構造というわけにはいかない、そこで 4.2 節で述べた作製工程で、蒸着+リフトオフを更にもう一度行うことになる。素子化プロセスには多少手間が増えるが、前項の半導体多層膜を用いる場合と比較してその層数は少なく済む。それは、誘電体材料には屈折率差が大きい組み合わせがあり、また赤外光領域では光吸収が無いので、少ない層数で高反射率を達成できるからである。更に真空蒸着法により結晶成長後の試料表面に形成することから、理論的には膜厚の制限もなく Au 薄膜反射

鏡と複合化しなくても、図 2.3 に示したように 99%以上の反射率を有する反射鏡が形成可能である。しかし、本研究室の真空蒸着機では、酸素原子を含んだ誘電体の蒸着が不可能なうえに、nm オーダの膜厚制御が難しく、また蒸着した誘電体同士の接合力が弱いために素子化プロセスで剥離してしまう問題もある。そこで、再現性と安定性を重視して本研究では、 MgF_2 の単層+Au 薄膜の複合反射鏡を採用することにした。前項と同様に Au 反射鏡 70 nm のときの透過率 0.5%と揃えるために、発振波長を 900 nm と考え MgF_2 は光学的 1/4 波長である 164 nm とし、Au は 56 nm とした。この複合反射鏡の反射率特性の計算値を図 4.9 に示す。図より Au 反射鏡 (70 nm) と比較して、高い反射率を有することがわかる、900 nm における計算上の反射率は 98.2%であり、複合化することで 4.6%高くなったことになる。この値は、前項で DBR 多層膜を 5 ペアと限定したときに達成できる反射率より 0.6%高いに過ぎないが、図 2.2 より明らかなように、反射損失という観点からは大きな違いがある。そこで、この複合反射鏡を前節で述べた GaAs 基板上 GaAs DH 構造面発光レーザに応用し、300 K パルス動作における電流-光出力特性を測定することにした。この測定より求められる閾値電流密度の値と前節の基本構造で得られている値とを比較すると図 4.10 となる。式 (2.13) より、活性層構造が同じである以上、反射率が高い分だけ閾値電流密度が小さくなるはずであるが、図 4.10 から大差は無いように思われる。レーザ発振した素子が少ないため、その差が現れなかった可能性もあり、断定的なことは言えないが基板側の反射鏡に問題がある可能性がある。それは、本研究室の MOCVD 装置で成長した試料の膜厚に面内分布があることに起因し、素子化プロセスを行う前に成長層表面から反射率を測定することで設計通りに成長された場所を見付け出し、その部分を素子化するが、それでも反射率ピーク波長のずれが多少存在することになるからである。特にこの評価のように違うプロセスで素子化した試料を比較する場合、その試料間の「ずれ」はより大きくなり特性に影響を与える可能性が大きくなると考えられる。このような理由から、一概に Au+ MgF_2 複合反射鏡の効果を論議することは出来ない。ちなみに、Au+ MgF_2 複合反射鏡を用いたときの典型的な電流-光出力特性は図 4.11 となり、閾値電流 317 mA、発振波長 895 nm のレーザ発振である。

4.5 活性層の最適化

基本構造ということで、前節までは活性層としてバルク結晶を用いてきたが、2章で述べたように1次元を量子化することによって、状態密度関数を階段状にし、利得スペクトルの幅を狭くすることでピーク利得を大きくした量子井戸構造を用いた方が、低閾値電流密度動作の可能性が高く、ひいては室温連続動作につながる。そこで本節では、量子井戸数の最適化を試みることにする。最適化を行うのは、図4.12に示した構造で、Si基板上への応用が可能な構造とした。基板側反射鏡としては基本構造と同じく、 n^+ -AlAs/ n^+ -Al_{0.1}Ga_{0.9}As DBR多層膜を用い、クラッド層も同じくp,n-Al_{0.7}Ga_{0.3}Asを用いることにした。但し活性層はGaAs量子井戸9nm、Al_{0.3}Ga_{0.7}Asバリア層5.5nmとした。また、前節における実験からはその特性が得られなかったものの、計算上は基本構造で用いたAu薄膜反射鏡よりも高反射率を有するAu+MgF₂複合反射鏡を光出射側に用いた構造とした。よって、両反射鏡の反射率の計算値は、発振波長によって多少違うものの、99.9%と98.2%となり、相乗平均は99.0%と決まる。図2.8はSi基板上での300K連続動作の計算値であるので、そのままこの最適化には使えないが、反射率に応じた最適な井戸数が存在することには変わりはない。そこで井戸数を1(SQW)、3(TQW)、7(7QWs)、10(10QWs)と変化させた上記の面発光レーザを作製し、電流-光出力特性を測定し閾値電流密度を求めることにした。各量子井戸数に対する、それぞれの層の膜厚を表4-IIに示す。膜厚が違うのは想定した発振波長が異なるからであり、光共振器も3λとなるように設計した。図4.13に比較のためにバルク結晶を用いた構造も加えた、300Kパルス動作における閾値電流密度の測定結果を示す。図より測定値に最大2倍程度のばらつきがみられる、これは前節でも述べたように成長膜厚の面内分布に起因する基板側反射鏡の反射率の揺らぎであると考えられる。また量子井戸数が3の試料ではレーザ発振が得られなかった、これも結晶成長に問題があると思われる。しかしながら全体的な分布と最良値から井戸数が多い試料ほど低閾値電流密度化しているように見て取れる。これ以上井戸数を増やすと均一にキャリアが注入されない恐れもあり、更に井戸数を増やしたものを測定してみないと断言はできないが、現段階では量子井戸数10が図4.12の構造には最適であると考えられる。

4.6 最適化された面発光レーザの諸特性

前節までの最適化により、図 4.12 で井戸数 10 の構造が、300 K パルス動作において最低閾値電流動作を示すことが実験により求められた。この構造で 300 K パルス動作のレーザ発振が確認された素子に対して、本章の目的でもある連続動作を試みたが、利得の飽和がおこりレーザ発振には至らなかった。そこで測定雰囲気低温下することで連続動作を試みることにした。まず 30 K まで雰囲気温度を下げ測定したところレーザ発振が得られたので、その後数十 K ずつ温度を上げながら電流-光出力特性を測定したところ、図 4.14 に示す特性が得られた。雰囲気温度が上昇するにつれて、閾値電流値が増大していることがわかる。これは式 (2.13) における J_0 、 G_0 が温度の関数で、 J_0 は温度に対して指数関数的に増大し、 G_0 は温度に対して指数関数的に減少するからである⁹⁾。一般に、端面発光レーザにおいては、閾値電流密度と雰囲気温度との間に実験式として次式が成立することが解っている。

$$J_{th} = J_c \exp\left(\frac{T}{T_0}\right) \quad (4.8)$$

ここで、 J_c 、 T_0 は定数である。2.3 節でも用いたが、特に T_0 は特性温度と呼ばれ、レーザの温度依存性を示す重要な値であり、大きいほど温度特性が良いことになる。そこで図 4.14 の測定結果から各雰囲気温度に対して、そのときの閾値電流密度を対数プロットすると図 4.15 となる。図より明らかに直線でないことがわかる、そして温度が高くなるにつれて閾値電流密度の増加が小さくなることがわかる。これは、温度による発振波長 (バンドギャップ) のシフト量と DBR 多層膜の反射率ピーク波長 (屈折率) のシフト量が違うことによって説明される。つまり温度が高くなるにつれて、キャリアのオーバーフローが顕著になり閾値電流密度が増加することを式 (4.8) は示しているが、面発光レーザで特に高反射率帯に限られた反射鏡を用いている構造では、室温動作設計の場合、室温に近づくにつれて発振波長と反射率ピーク波長が設計通りに一致するので反射損失が小さくなり、閾値電流密度を減少させる逆作用も働くからである^{10, 11)}。ここで、本研究で得られた最高雰囲気温度 260 K における連続動作の電流-光出力特性を図 4.16 に示す。この図より閾値電流 114 mA、発振波長 875 nm のレーザ発振が得られていることがわかる。

4.7 まとめ

OEIC への適用と Si 基板上への応用を前提に、GaAs 基板上に GaAs 活性層を有し、基板側反射鏡として AlAs/Al_{0.1}Ga_{0.9}As DBR 多層膜 23 ペアを用いた面発光レーザを製作した。光出射側反射鏡の改善と活性層の最適化を行ったところ、本章で用いた構造では、光出射側反射鏡として Au+MgF₂ の複合反射鏡を用い、活性層として量子井戸を 10 個多重化した 10 重量子井戸 (10QWs) を用いた構造が、最も低閾値電流密度動作の可能性が高いことが結論として得られた。この構造の面発光レーザにおける 260 K 連続動作において、閾値電流 114 mA、発振波長 875 nm のレーザ発振が得られた。室温での連続レーザ発振には至らなかったが、本研究で用いた反射鏡よりも高反射率の反射鏡が形成可能となれば、活性層の最適化を行うことにより本章で用いた構造で室温連続発振も可能であると考えられる。

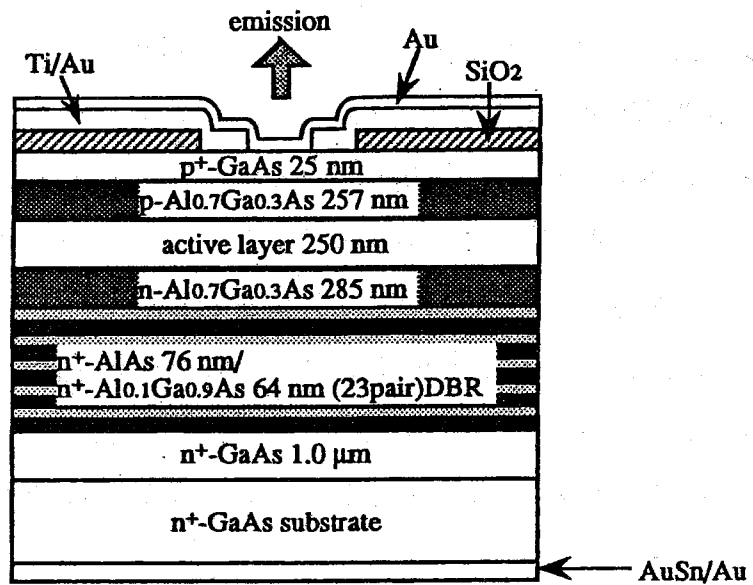


図 4.1: GaAs 基板上 GaAs DH 面発光レーザの断面構造図

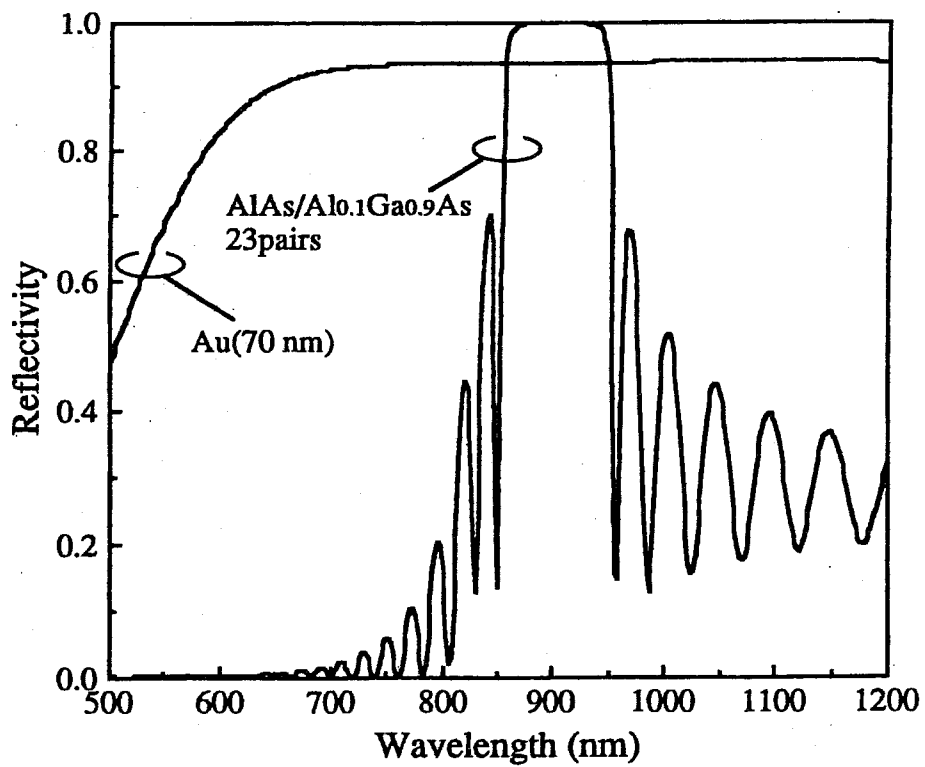


図 4.2: 各反射鏡の反射率特性 (計算値)

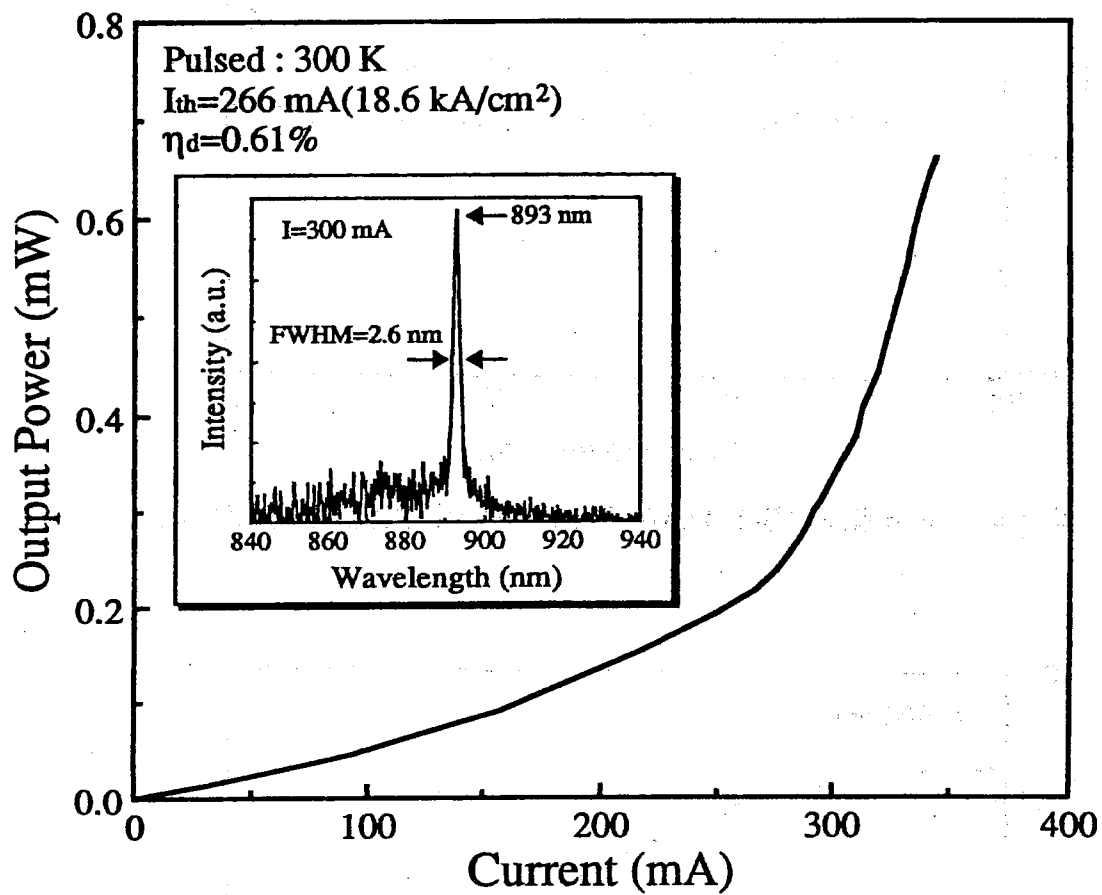


図 4.3: 電流-光出力特性とスペクトル特性 (Au 薄膜反射鏡)

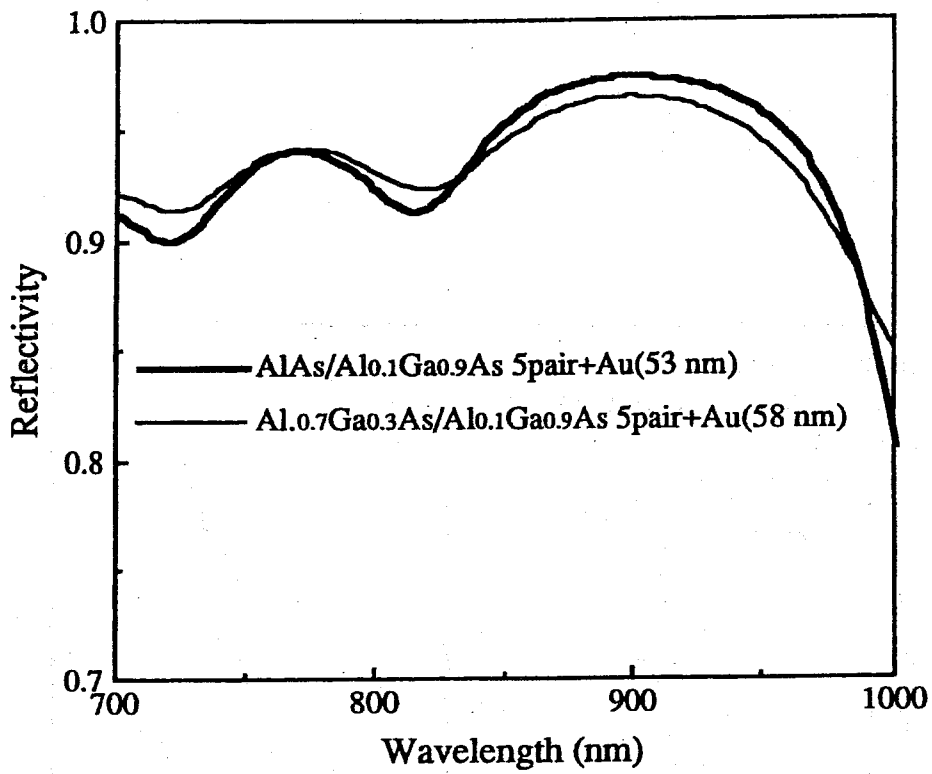


図 4.4: Au 薄膜反射鏡と DBR 多層膜の複合反射鏡の反射率特性

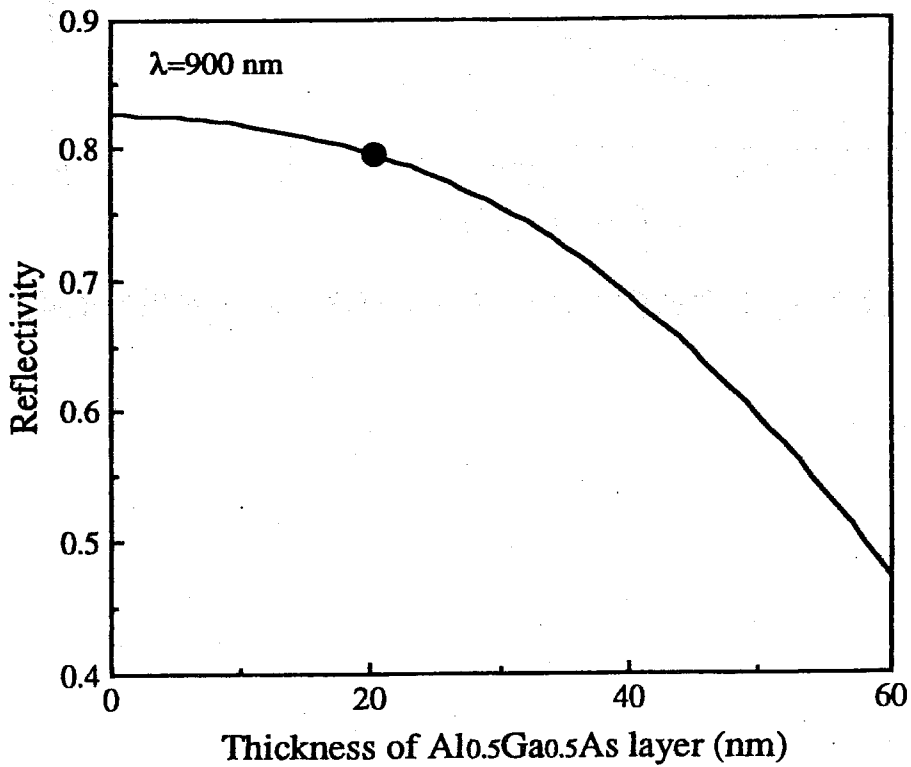


図 4.5: graded 層の膜厚に対する DBR 多層膜の反射率変化

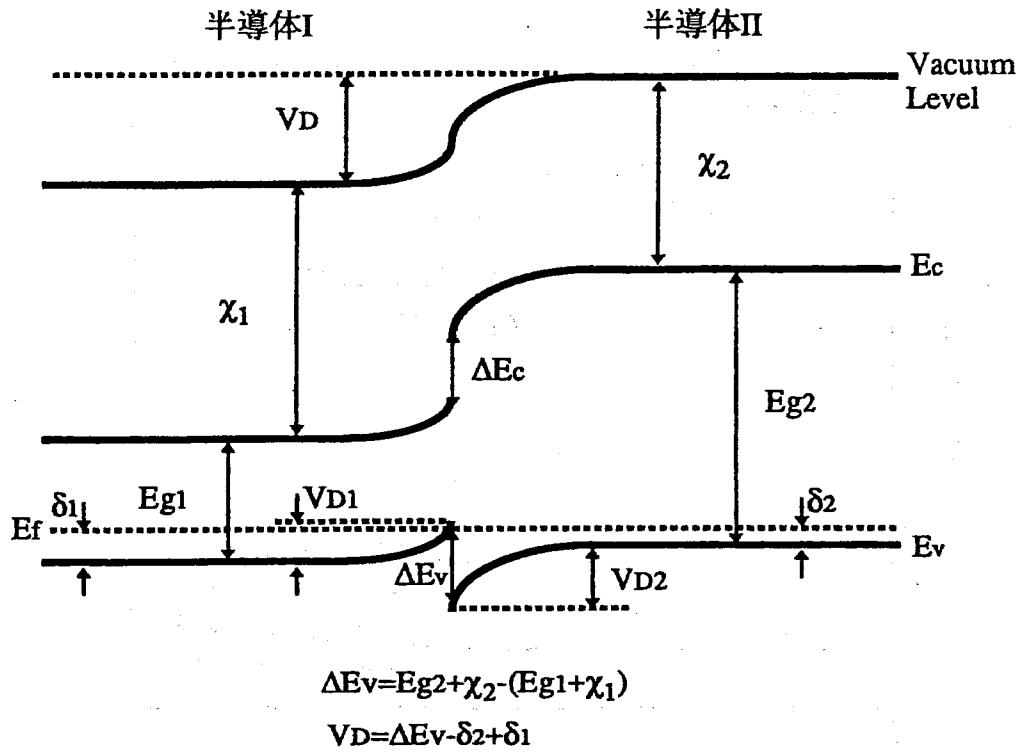


図 4.6: p-p ヘテロ接合時のエネルギーバンド図 (Anderson モデル)

表 4-I: GaAs と AlAs の各物理定数 (AlGaAs はベガード則より導出)

半導体	禁制帯幅 E_g (eV)	比誘電率 ϵ_s	格子定数 a (Å)	電子親和力 χ (eV)
GaAs	1.43	11.5	5.654	4.07
AlAs	2.15	10.1	5.661	3.5

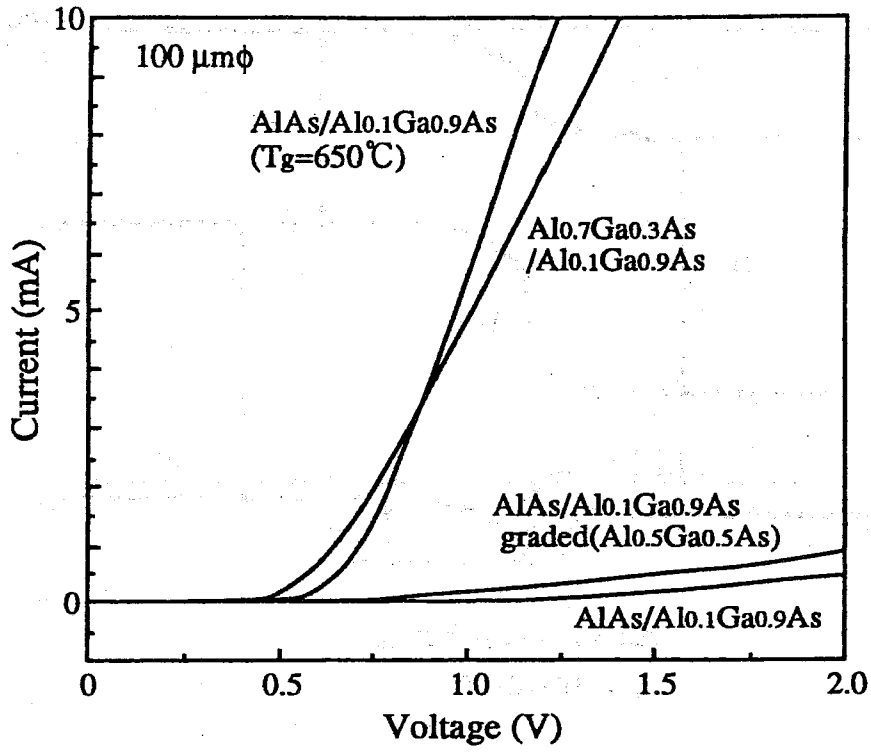


図 4.7: p 型 DBR 多層膜の電流-電圧特性

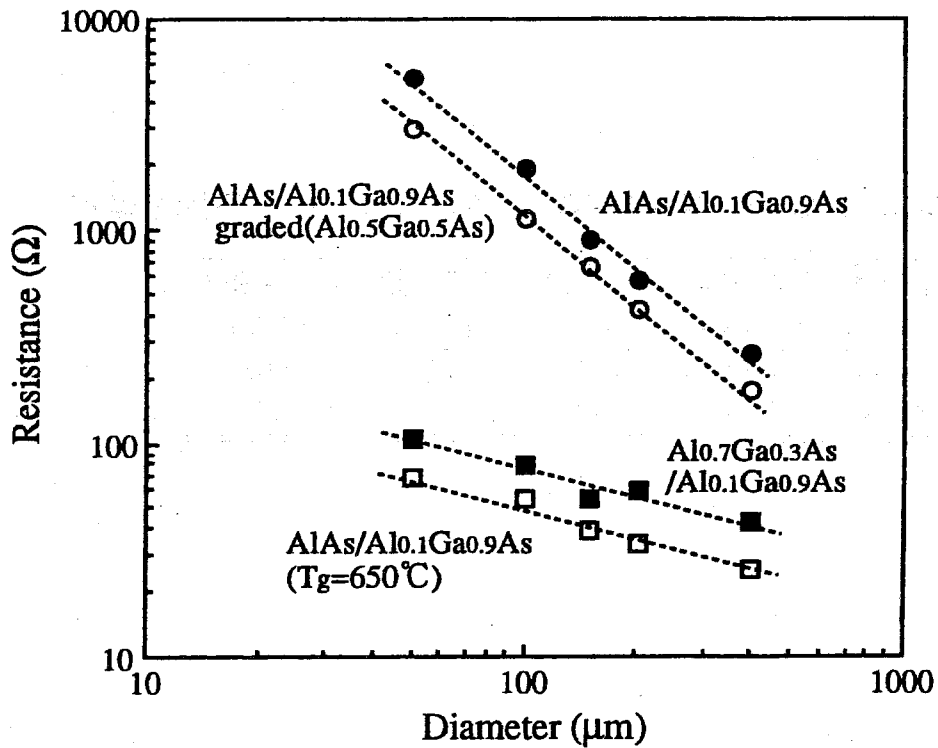


図 4.8: メサ径に対する p 型 DBR 多層膜の直列抵抗値

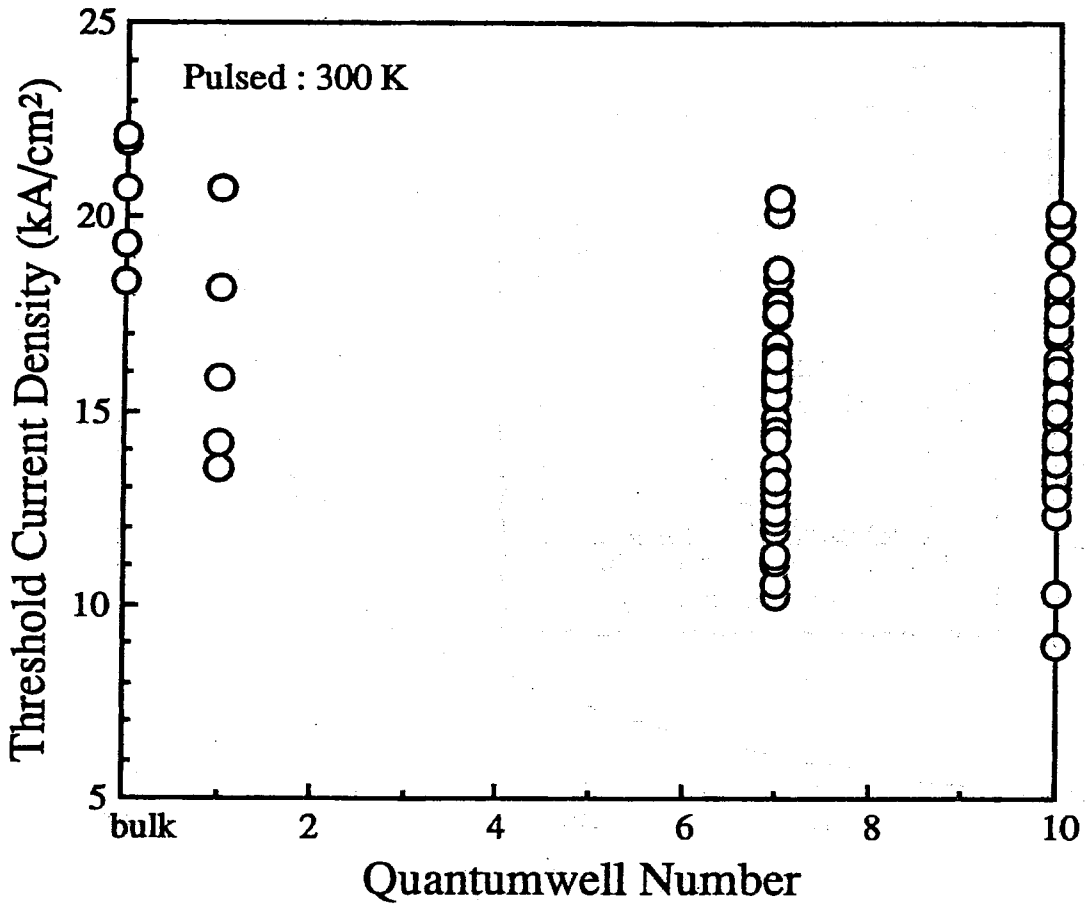


図 4.13: 閾値電流密度の量子井戸数依存性 (図 4.12 の構造)

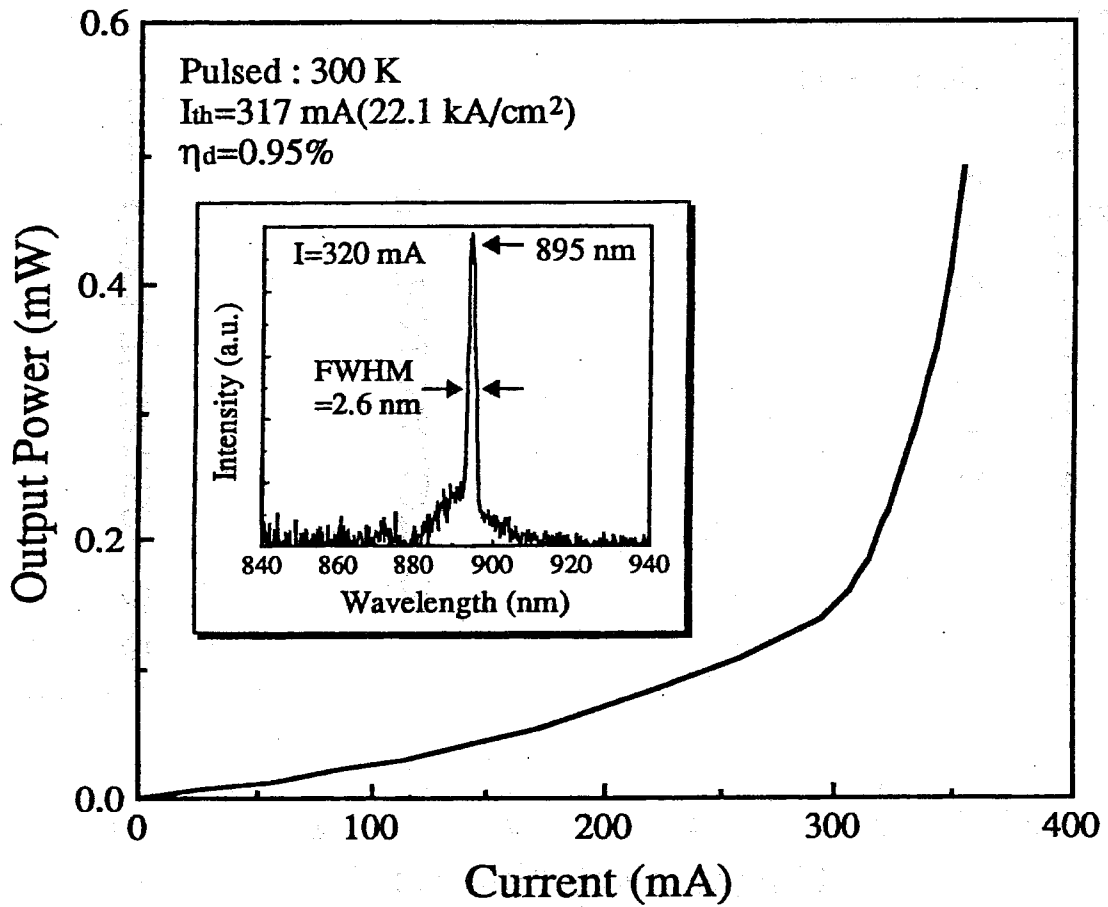


図 4.11: 電流-光出力特性とスペクトル特性 (Au+MgF₂複合反射鏡)

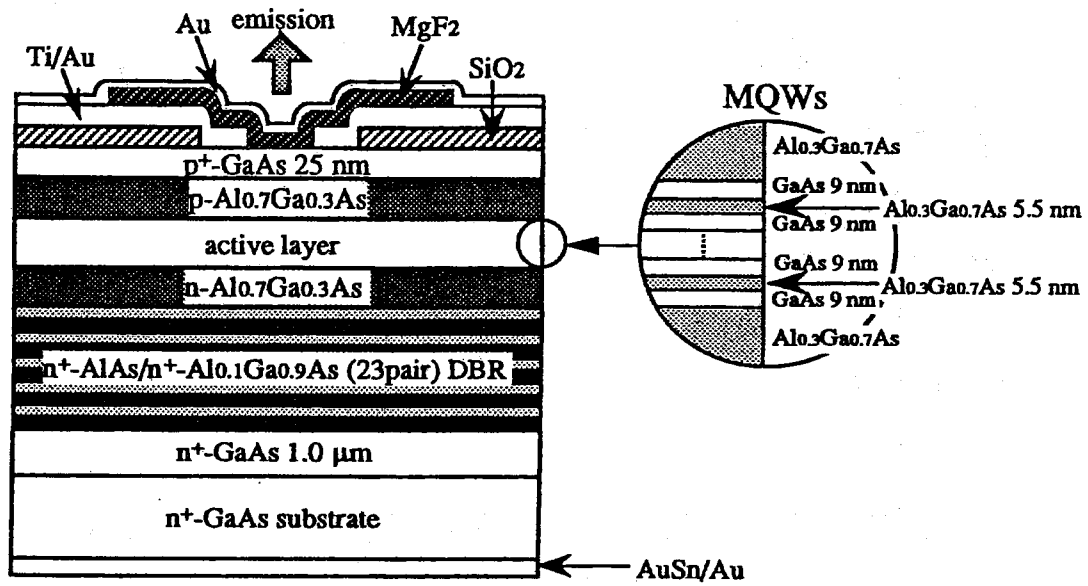


図 4.12: GaAs 基板上 GaAs MQW 面発光レーザの断面構造図

表 4-II: 図 4.12 の構造での各量子井戸数に応じた各層の膜厚

Layer	SQW	TQW	7QWs	10QWs
p-Al _{0.7} Ga _{0.3} As	239	239	245	245
Al _{0.3} Ga _{0.7} As	120	105	79	58
n-Al _{0.7} Ga _{0.3} As	268	268	276	276
n ⁺ -AlAs/Al _{0.1} Ga _{0.9} As DBR	71/60	71/60	73/61	73/61

(単位 : nm)

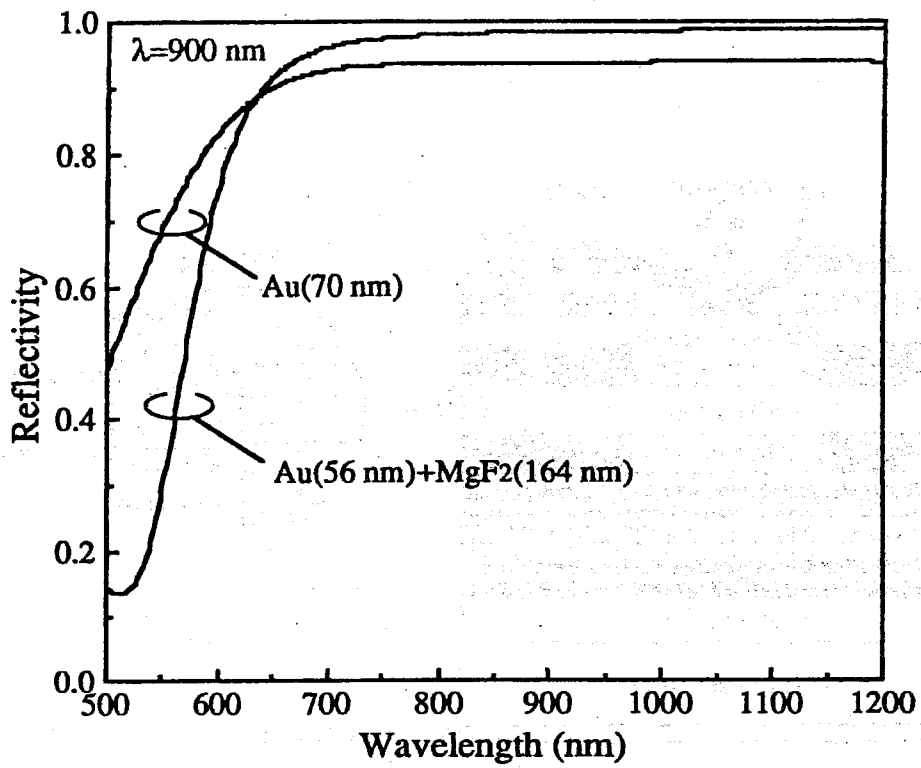


図 4.9: Au 薄膜反射鏡と MgF₂ の複合反射鏡の反射率特性

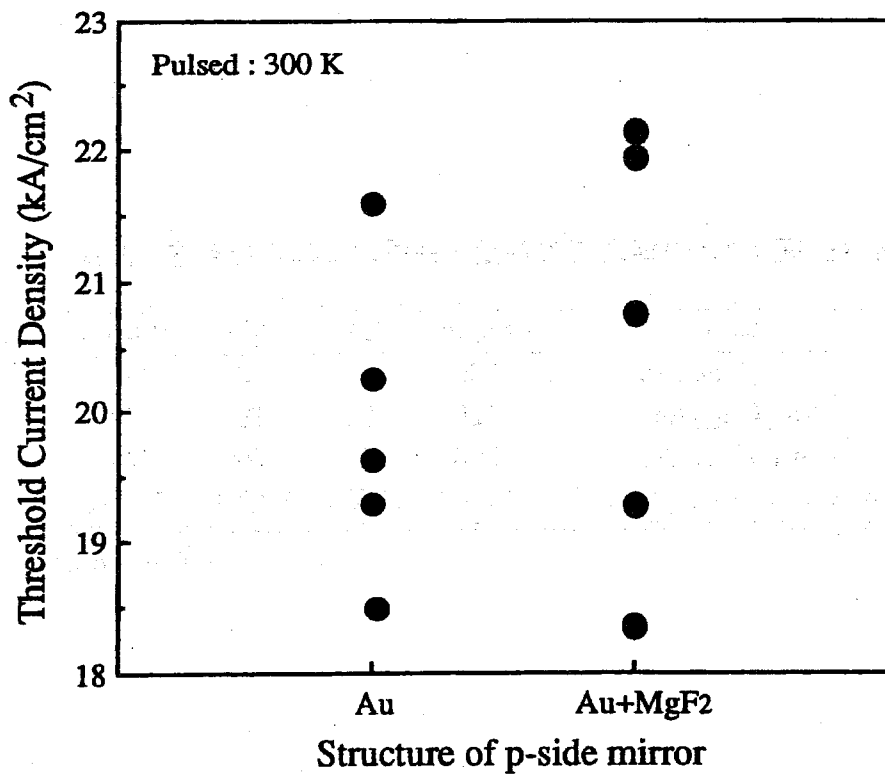


図 4.10: 閾値電流密度の光出射側反射鏡依存性 (図 4.1 の構造)

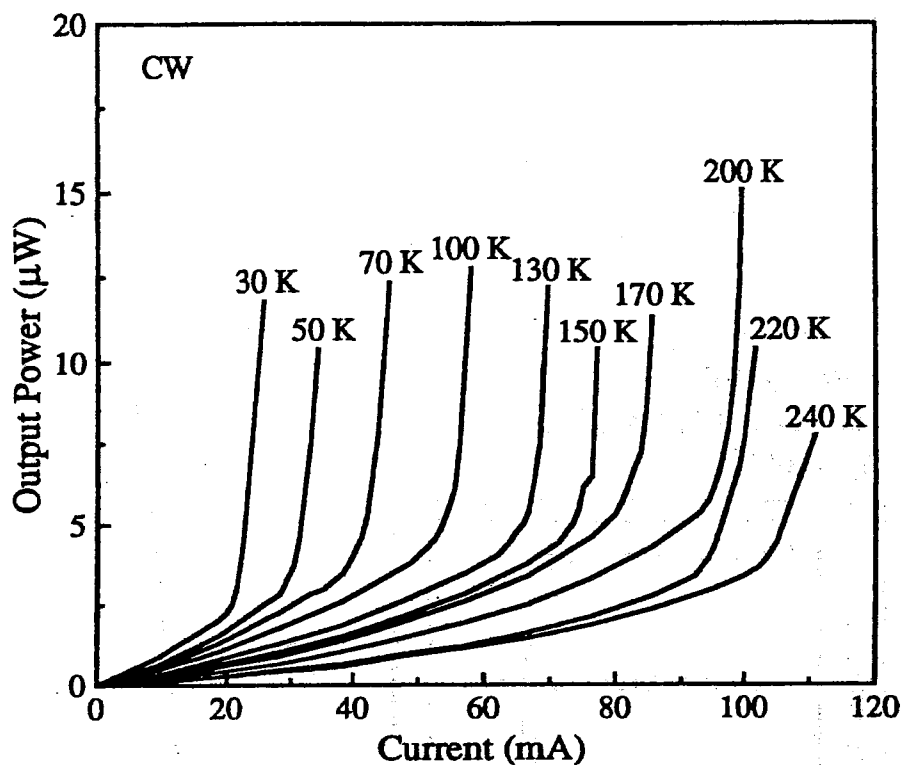


図 4.14: 電流-光出力特性の雰囲気温度依存性 (図 4.12 の構造で $N_w=10$)

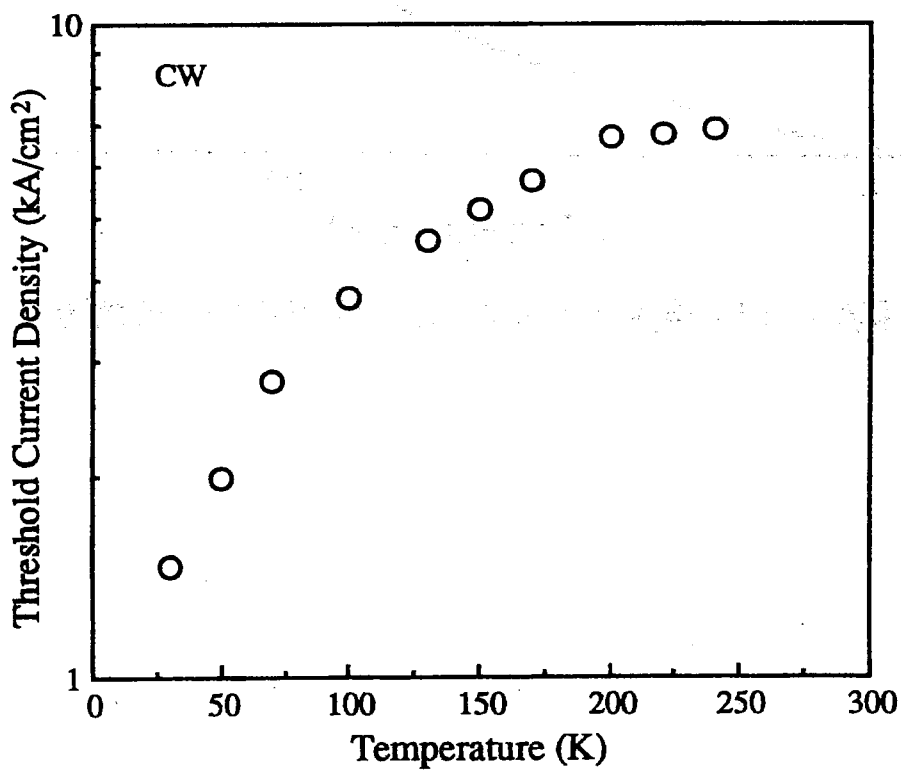


図 4.15: 閾値電流密度の雰囲気温度依存性 (図 4.14 の特性から)

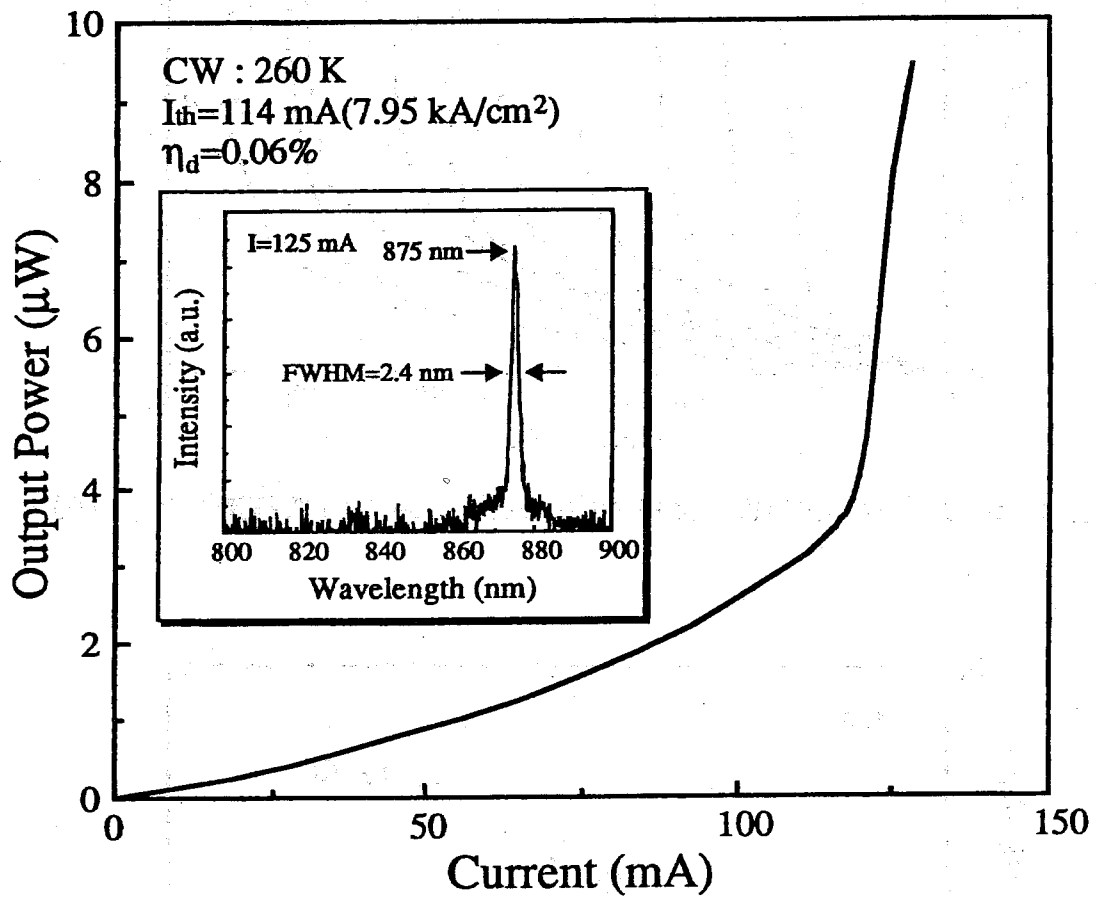


図 4.16: 電流-光出力特性とスペクトル特性 (図 4.12 の構造で $N_w = 10$)

参考文献

- 1) G. W. Yoffe: *J. Appl. Phys.*, **70**, 1081(1991).
- 2) R. L. Anderson: *Solid-State Electron.*, **8**, 721(1965).
- 3) 古川: 半導体デバイス (電気情報通信学会)
- 4) S. M. Sze: *Physics of Semiconductor Devices*
- 5) A. G. Milnes and D. L. Feucht: 半導体ヘテロ接合
- 6) H. Adachi, Y. Kobayashi, T. Chino and K. Matsuda: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33**, 836(1994).
- 7) T. Kawakami, Y. Kadota, Y. Kohama and T. Tadokoro: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 886(1992).
- 8) Y. Kohama, Y. Kadota and Y. Ohiso: 第40回応用物理学会予稿集 318(1993).
- 9) T. Namegaya, N. Matsumoto, N. Yamanaka, N. Iwai, H. Nakayama and A. Kasukawa: *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 1887(1994).
- 10) K. Streubel, S. Rapp, J. André and J. Wallin: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 1121(1996).
- 11) G. Goncher, B. Lu, W. Luo, J. Cheng, S. Hersee, S. Z. Sun, R. P. Schneider and J. C. Zolper: *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 316(1996).