

TR-O-0139

29

GaAs(311)A面・面発光レーザ

高橋 光男

1996. 3.27

ATR光電波通信研究所

GaAs(311)A 面・面発光レーザー

A T R 光電波通信研究所
通信デバイス研究室

高橋 光男
Mitsuō Takahashi

目次

	ページ
第1章 序論	2
第2章 (n11) A面上InGaAs/GaAs歪量子井戸構造の作製	3
2-1. InGaAs/GaAs歪量子井戸構造の成長	3
2-2. PL法によるInGaAs/GaAs歪量子井戸層の評価	5
第3章 GaAs(311) A面・面発光レーザの作製	10
3-1. (n11) 面上歪量子井戸面発光レーザの特徴	10
3-2. (311) A面上InGaAs/GaAs面発光レーザの作製	15
3-3. GaAs(311) A面上面発光レーザの結晶性評価	18
第4章 GaAs(311) A面上面発光レーザの発振特性	21
4-1. 面発光レーザの偏波制御について	21
4-2. GaAs(311) A面上InGaAs/GaAs面発光レーザの発振特性	24
第5章 まとめ	37
謝辞	37
参考文献	38

1章. 序論

GaAs (111) B面上に作製したGaAs/AlGaAs量子井戸(QW)構造の発光遷移確率の増大およびGaAs/AlGaAs量子井戸レーザのしきい値電流密度の低減が、早川等によって報告されて以来、高指数(n11)面上のQW構造の研究は、その特異な物性研究のみならず、デバイスの性能向上のための手段として活発に研究が進められている [1] - [2]。一方、近年InGaAs/GaAsやGaInAsP/InP系の材料を用いた歪量子井戸構造を用いることにより、半導体レーザの性能が著しく向上する事が報告され、歪量子井戸構造のデバイス応用が注目されている [3]。既に、筆者等は、この高指数面の持つ特徴と歪量子井戸構造の特性に着目し、(311) A面上のInGaAs/GaAs歪量子井戸構造を作製することにより、同様の発光遷移確率の増大およびInGaAs/GaAs歪量子井戸半導体レーザの低しきい値動作を確認した [4]。さらに、これを発展させ、将来の光インターコネクトや光並列情報処理システムのキーデバイスとして期待されている面発光レーザへの応用と性能向上について検討を行ってきた。

従来の面発光レーザは、通常結晶成長および加工が容易である等の理由から、(100)面方位の半導体基板が用いられてきた。この(100)面上に作製された面発光レーザでは、活性層の利得分布が等方的であり、かつ共振器も面内では等方的な構造であるため、偏波方向の選択性が小さく環境温度の変化や動作状態によって偏光スイッチやモードホッピングといった不安定な現象が生じ、応用上大きな課題となっている [5]。一方、(n11)面方位歪量子井戸(QW)構造は高利得および光学的異方性を有することが、日立の大歳等のグループにより明らかにされており、これを面発光レーザに応用することにより偏波制御の問題を解決することが可能である [6] - [8]。さらに、集積化の際、問題となる駆動電流の低減や発熱の問題についても、(n11)面方位歪量子井戸(QW)面発光レーザの低しきい値特性を用いて、同時に解決できることが期待できる。

今回、我々は、(311) A面GaAs基板上にInGaAs/GaAs歪量子井戸・面発光レーザを製作し、室温連続発振に成功した。さらに、(311)面上面発光レーザの特徴である低しきい値動作および安定な偏波制御特性が得られた。本報告では、この(311)面上面発光レーザの結晶成長・素子作製と発振特性について述べる。

2章. (n11) A面上 InGaAs/GaAs 歪量子井戸構造の作製

山本等によって、MBE法 (Molecular Beam Epitaxy) による GaAs (n11) A面上の GaAs 層または AlGaAs 層のエピタキシャル結晶成長およびドーピング特性について詳細な検討が行われ、特に、前処理条件および成長前の成長室の真空度および V/III フラックス比についての成長に及ぼす影響と最適化についての報告がなされた [9]。

GaAs (n11) A面上に InGaAs/GaAs 歪量子井戸構造の MBE 成長において、基本的な結晶成長条件は、上記の山本等が見いだした条件を用いたが、今回、新たに、成長温度をパラメーターに成長条件の最適化を行った。

2-1. InGaAs/GaAs 歪量子井戸構造の成長

InGaAs 層の MBE 成長は、特に、成長温度によって In 原子の再蒸発が起こるため、GaAs あるいは AlGaAs 層の成長に比較して、低温成長の必要がある。しかし、一般的に結晶の品質は成長温度が高い方が、良好な結晶が得られる。したがって、半導体レーザ構造を作製する際に要求される、ある程度の結晶品質を得るためには、成長温度に関して最適化することが重要である。今回、InGaAs/GaAs 単一量子井戸構造を作製し、フォトルミネッセンス (PL) 法を用いて光学的な評価を行うことにより、成長温度と得られた結晶の品質との関係を調べた [10]。

基板は、GaAs (100)、(311) A および (211) A 面方位の半絶縁基板を用いた。成長前の前処理として、濃硫酸 (H_2SO_4) により表面酸化膜を除去した後、 $\text{NH}_4\text{OH}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (2:1:95) エッチャントにより 1 分間 (25°C) のエッチングを行った。その後、直ちに Mo 製基板ホルダーにセットし、MBE 装置チャンバに搬入した。MBE 装置 (Varian Modular Gen II) は、3 成長室からなり、まず導入室で 200°C 、8 時間の条件でガス出しを行った後、準備室 (バッファチャンバ) に搬入する。さらに、成長直前に 250°C でベーキングし、成長室に搬入した。成長前に、基板温度を 650°C まで昇温しサーマルクリーニングを 5 分行った後、GaAs バッファ層を 300 nm の厚みで成長した。

良好な成長表面を得ることおよび Si 不純物を n 型としてドーピングするために、V/III フラックス比は 10:1 に固定し、 480 、 520 、 550 、および 580°C の成長温度

で $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 単一歪量子井戸 (SQW) 構造を成長した。

Ga および As 原子のフラックス比および成長速度の関係は、高エネルギー電子線回折 (RHEED) 法を用いて、 GaAs (100) 基板の上に成長した時の回折強度の振動から求めた。また、成長温度は、 GaAs (100) 基板の表面原子配列構造が $c(4 \times 4)$ 構造から (2×4) 構造に変化する温度 (As_4 フラックスが 2 ML/s 程度の時、 520°C にて変化が起こる。) とパイロメーター温度計を用いて校正した。 GaAs および $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 層の典型的な成長速度は、それぞれ 0.6 および $0.75 \mu\text{m/hr}$ である。

厚みが 2 nm 、 4 nm 、 6 nm および 10 nm の4つの $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 井戸層を含む構造を同一基板の上に作製し、PL法を用いて評価した。この時の GaAs バリア層の厚みは 50 nm である。図1に実験に用いた単一量子井戸構造の模式図を示す。

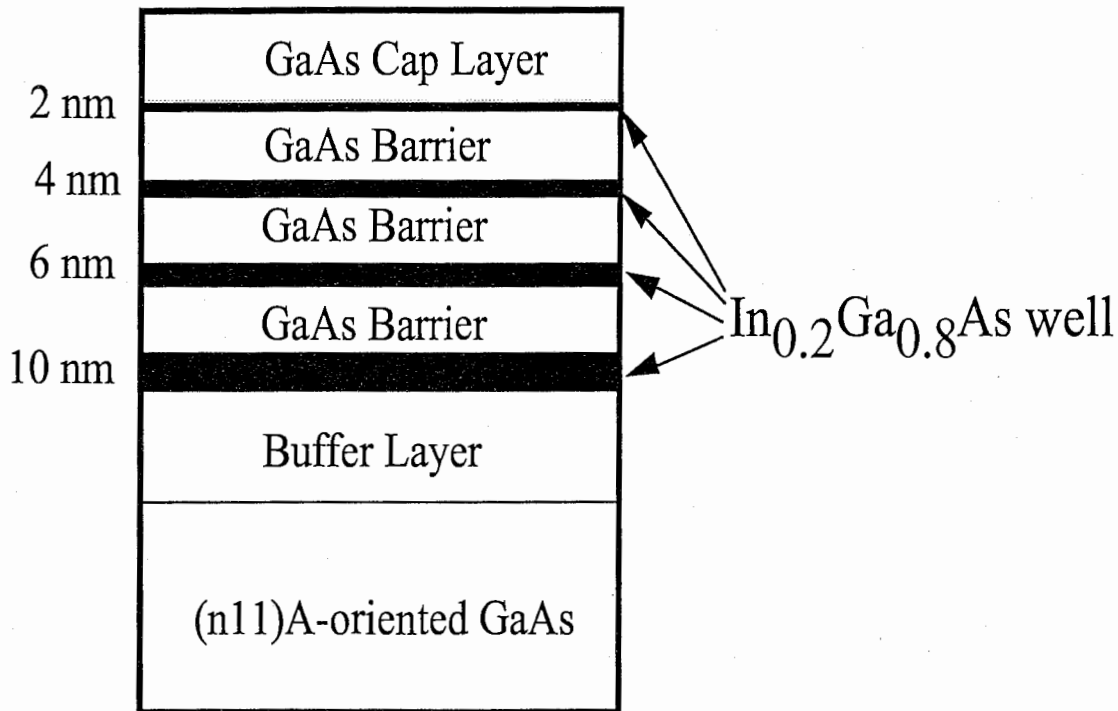


図1. $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 単一量子井戸 (SQW) 構造

These samples were grown on (100), (311)A- and (211)A- oriented GaAs substrates at 480°C , 520°C , 550°C and 580°C .

2-2. PL法による $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 歪量子井戸層の評価

作製した $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 単一歪量子井戸構造について、低温PL法による発光スペクトルの測定を行った。励起光として、Arイオンレーザ（波長488nm）を用いた。図2に面方位（100）、（311）Aおよび（211）A GaAs 基板上に作製した試料の12KでのPLスペクトルを示す。なお、これらの試料は、各成長温度について同一条件にて、同時に成長を行った。PL法による結果により、以下の点が明らかになった。

- (1) これらの3つの面方位の中では、（311）A面上量子井戸から発光が最も強く、また、成長温度を変化させても、ある程度強い発光が得られることから、比較的容易に良好な結晶が得られる。
- (2) いずれの面方位の試料についても、成長温度が480°Cから520°Cに上昇するにつれてPL発光強度は、急激に大きくなるが、550°C以上では、PLピーク波長の短波長へのシフトが著しくなり、成長中のInの再蒸発が起こる。
- (3) 特に、（211）A面量子井戸において、量子井戸層の厚みが厚くなるにしたがって、PLピーク波長が長波長にシフトし、かつPL半値幅が大きくなる。PL波長のレッドシフトの要因としては、ピエゾ効果と歪みの緩和の2つの効果が考えられるが、後で述べる透過電子顕微鏡（TEM）による評価でも、（211）A面上の歪量子井戸構造では、ミスフィット転位が観察されており、結晶性の劣化がPLスペクトルの変化に現れているものと考えられる。

さらに、（311）A面上歪量子井戸について成長温度とPLスペクトルの関係を詳しく評価するために、PLピーク波長および半値幅について、図3にプロットした。前述したように、成長温度が、550°C以上の温度ではIn原子の再蒸発によるPLピーク波長の短波長シフトが顕著になる。一方、PL半値幅は、図3（b）に示した様に、520°Cの成長温度で最小になる傾向にある。ところで、成長温度が580°Cの高温においても半値幅が狭くなる様に見えるが、これはPL波長あるいは InGaAs 量子井戸層のIn組成は成長温度によって変化するためである。PL半値幅の比較のために、PLピーク波長および半値幅の関係について図4にまとめた。図4において、今回作製した4つの、すべての量子井戸においてPL半値幅が成長温度520°Cで最小になることが明確になった。これらの結果から、良好な $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 単一歪量子井戸構造を得るためには、成長温度として520°Cを選択すれば良いことがわかる。

以上の実験結果より、MBE法による成長条件の最適条件が明らかになったが、本研究を進めていく過程で、(3 1 1) A面上のInGaAs/GaAs歪量子井戸構造が、他の面方位基板に作製したものに比較して、非常に結晶性が良好であり、特に、ミスフィット転位による緩和が起こる臨界膜厚が各面方位で異なること、(3 1 1) A面上の歪量子井戸の臨界膜厚が最も大きく転位が入りにくいことが明らかになりつつある。これらの事実は、従来転位に関するJ. W. Matthews等の理論 [11] では説明できず、また、成長メカニズムとも深く関わっていると予想され、今後の研究対象として興味深いものがある。

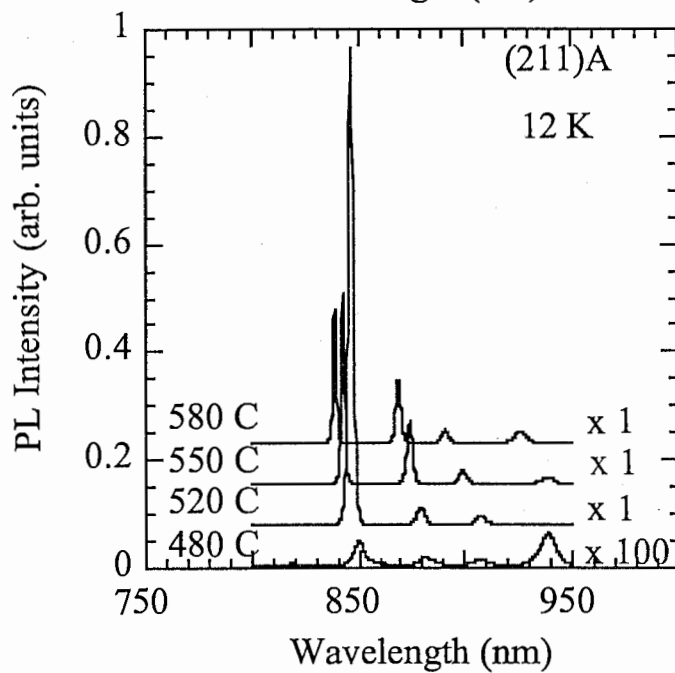
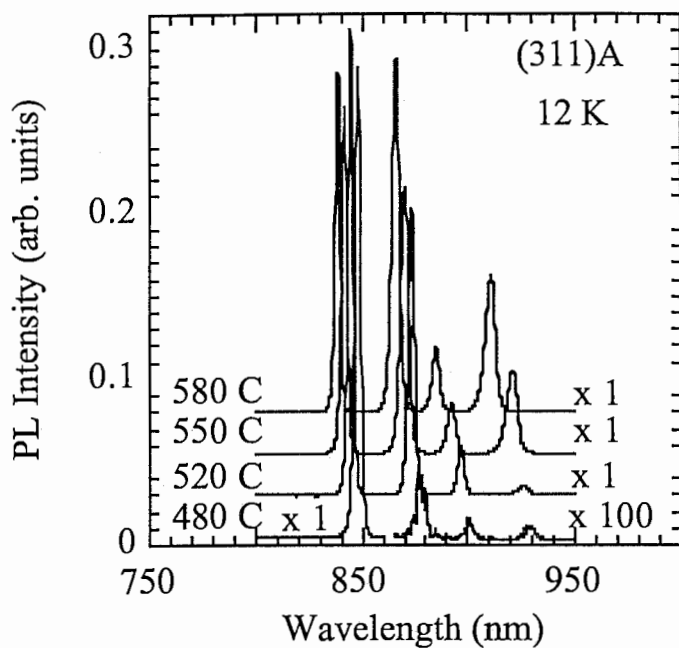
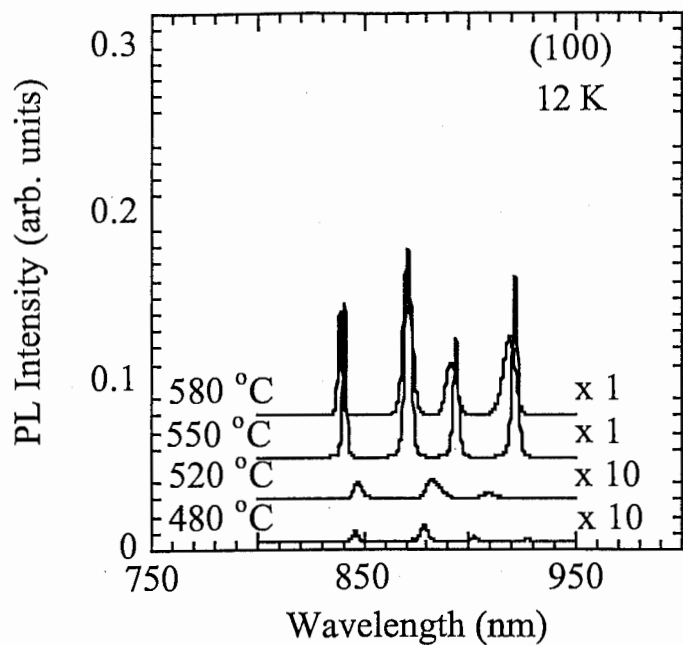
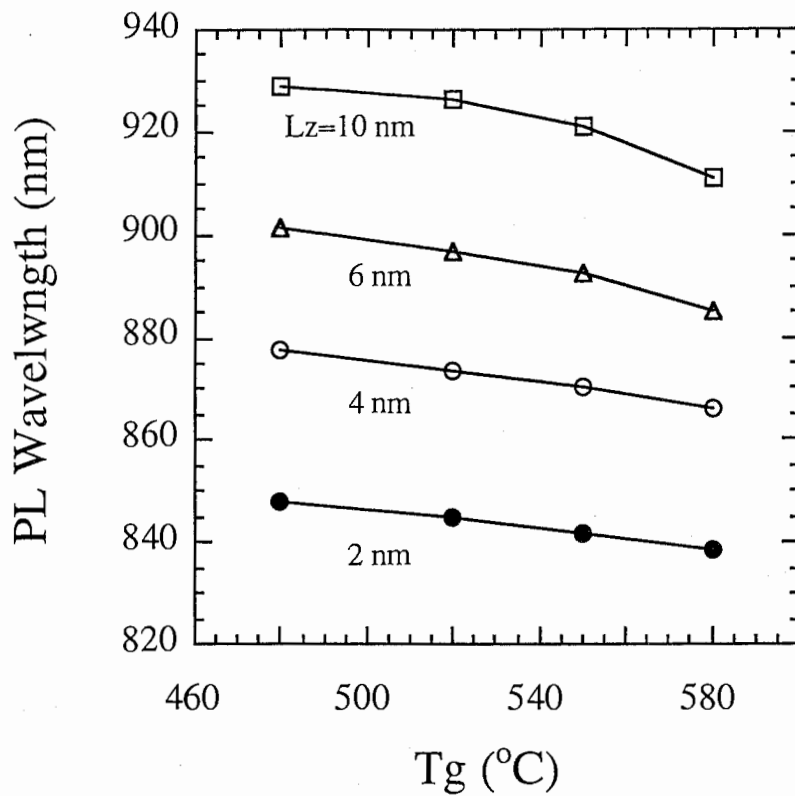
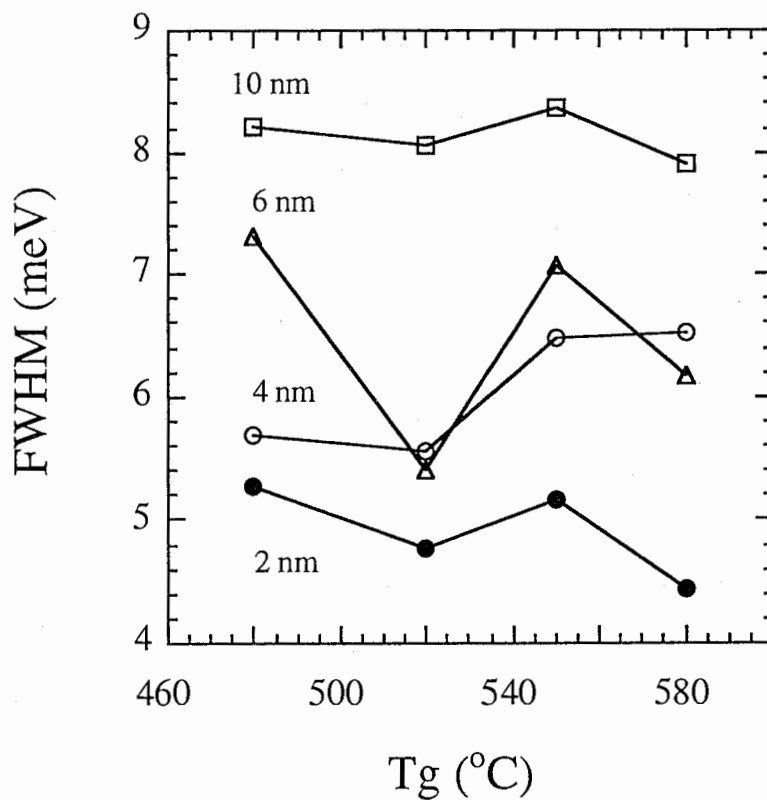


図2 低温PLスペクトル



(a) 成長温度とPLピーク波長との関係



(b) 成長温度とPL半値幅との関係

図3 GaAs (311)A基板上In_{0.2}Ga_{0.8}As/GaAs SQWの成長温度とPLピーク波長および半値幅との関係 (測定温度は12 K)

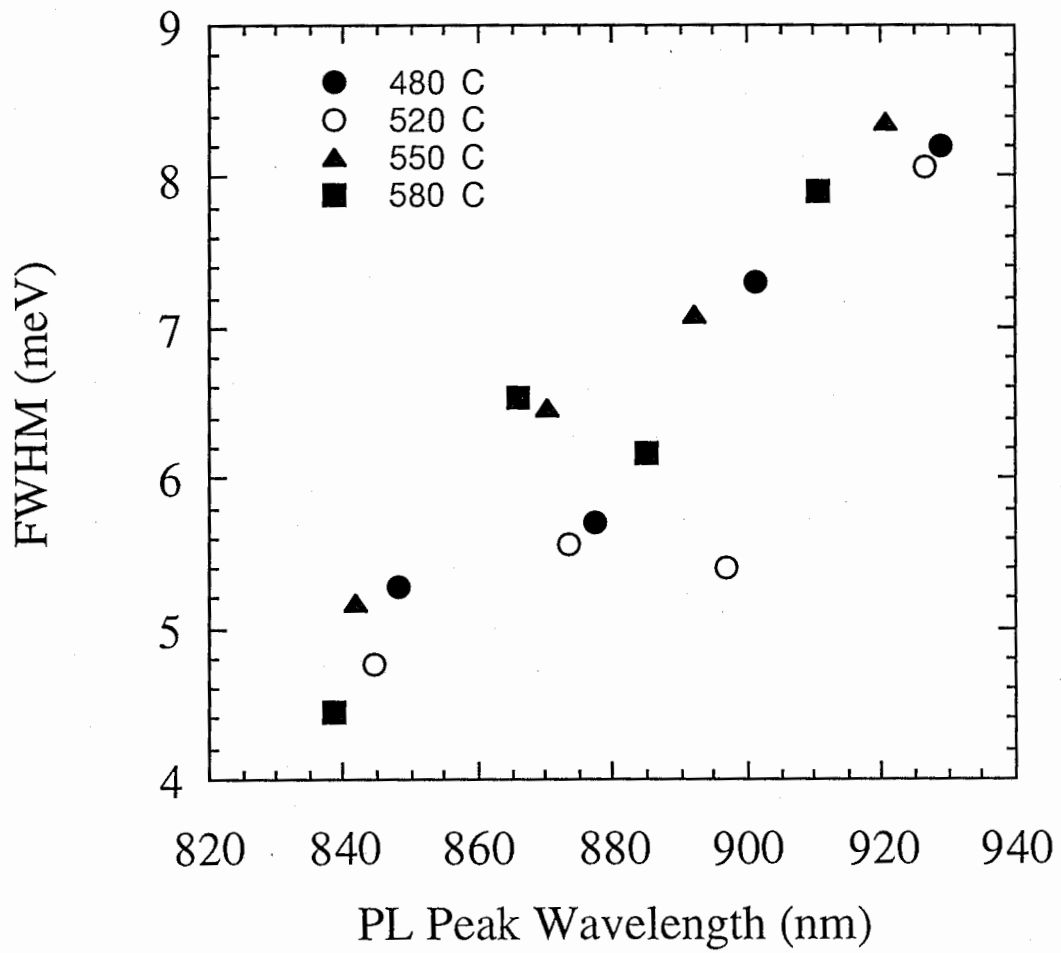


図4 GaAs (311) A面上InGaAs/GaAs SQWのPL波長とPL半値幅 (測定温度は12 K)

3章. GaAs (311) A面・面発光レーザの作製

我々は、高指数面、特に (n11) A面の結晶成長および物性研究に加えて、デバイスへの応用をテーマに、長年研究を行ってきた。最近、面発光レーザにおいて、(n11) A面上歪量子井戸の持つ優れた特性が、デバイスの性能向上のみならず従来解決が困難であった課題の一つである偏波面制御について、比較的簡単な構造で解決できることが明らかになってきた。つまり、従来の (100) 面方位の面発光レーザでは、共振器構造が等方的であるため偏波方向の選択性が小さく環境の変化や動作状態によって偏光スイッチやモードホッピングといった不安定な現象が生じることが知られている。一方、(n11) 面方位歪量子井戸 (QW) 構造のもつ高利得および光学的異方性を利用して、比較的簡単な構造で偏波制御の問題を解決することが可能である [6] - [8]。今回、我々は、(311) A面 GaAs 基板上に InGaAs/GaAs 歪み量子井戸・面発光レーザを製作し、はじめて室温連続発振を確認した。さらに、(311) 面上面発光レーザの特徴である低しきい値動作および安定な偏波制御特性が得られた。

以下、高指数面上の面発光レーザの特徴、GaAs (311) A面上面発光レーザ構造の作製および素子特性について述べる。

3-1. (n11) 面上歪量子井戸面発光レーザの特徴

(100) 面以外の面方位をもつ量子井戸 (QW) の光学特性について、これまで無歪 AlGaAs/GaAs 系での理論的な検討 [12] - [15] や GaAs/AlGaAs QWレーザにおける発振しきい値の低減について実験的に検討され、面方位を変えることによるバンド構造の制御と半導体レーザの性能向上の可能性について議論されてきた [1] - [2]。さらに、近年、歪量子井戸構造を導入することによっても半導体レーザのしきい値電流やスペクトル線幅が低減できることが指摘された [16]。

つまり、バンド構造を決定するこの歪と面方位を同時に制御することにより、新たなデバイスの性能向上の可能性が見えてきたわけである。しかし、これまで高指数面上に形成した歪量子井戸の報告例はほとんどない [17] - [20]。特に、一般に結晶成長が困難である (n11) A面での報告例は、筆者が知る限り、今回が初めてである。

歪量子井戸の光学特性と面方位の関係は、日立の大歳等のグループによって、はじめて詳細に検討された。高指数面上半導体基板上に形成した歪量子井戸において、基板の面方位を (100) 面から (110) 面の方向に傾斜することによって、価電子帯の状態

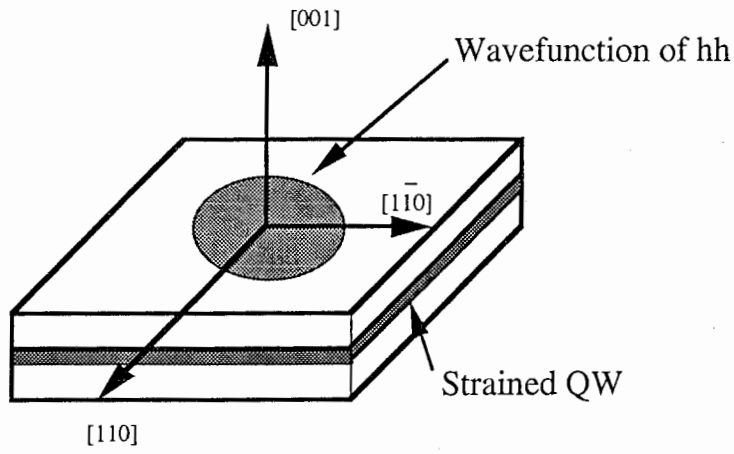
密度が低減し、光学利得が著しく増大する。また、圧縮性歪の場合、価電子帯の重い正孔（HH）帯の波動関数が等方的でなくなるために、発光遷移確率が結晶方位に依存するようになる（光学的異方性）。図5に、価電子帯構造と面方位の関係を概略的に示した。以下の式で示される光学行列要素は、光学遷移確率に比例する量で、伝導帯の波動関数は等方的であるため、この光学行列要素の異方性は価電子帯（HH）の波動関数の形状で決定される。

$$|M|^2 = \left| \langle c | \hat{e} \cdot \hat{p} | v \rangle \right|^2$$

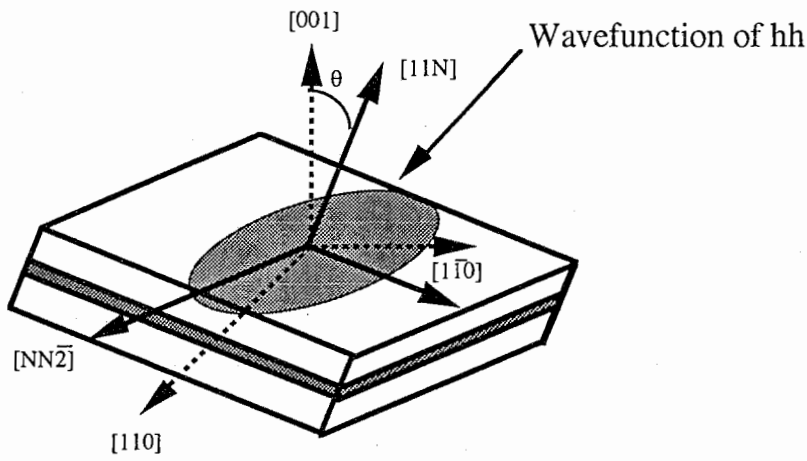
ここで、 c 、 v はそれぞれ伝導帯、価電子帯の固有状態を表し、 \hat{p} は運動量演算子、 \hat{e} は光の偏光方向の単位ベクトルを示す。

(1 0 0) 面方位の歪QWでは、HHの波動関数は結晶軸面内で等方的であるが、(1 1 0) 方向に傾斜した歪QWでは、波動関数に異方性が現れる。(1 1 n) 面上に形成された歪QWでは $[n \ n \ \bar{2}]$ 方向で光学遷移確率（つまり光学利得）は最大となり、これと直交する $[1 \ \bar{1} \ 0]$ 方向で最小となる。また、(n n 1) 面方位では、 $[1 \ \bar{1} \ 0]$ 方向で光学遷移確率が最大となる。一方、結晶的に非常に対称性の良い(1 1 1) 面方位では、光学利得は増大するが、(1 0 0) 面と同様光学遷移確率は等方的である。図6に、大歳らが解析した、 $\text{In}_{0.7}\text{Ga}_{0.3}\text{As} / \text{InP}$ 歪量子井戸面発光レーザの利得分布の計算結果を示す。

光学的異方性の大きさは、(1 0 0) 面から(1 1 1) 面の範囲では(1 1 2) 面上歪QWで最大となり、(1 1 1) 面から(1 1 0) 面に傾斜した面では(1 1 0) 面で最大となる。(図7)



(a) (001) QW



(b) (11N) QW

$$|M|^2 = \left| \langle c | \hat{e} \cdot \hat{p} | v \rangle \right|^2$$

図5 (1 1 N) 面方位 QW の hh → c 遷移行列と光学異方性

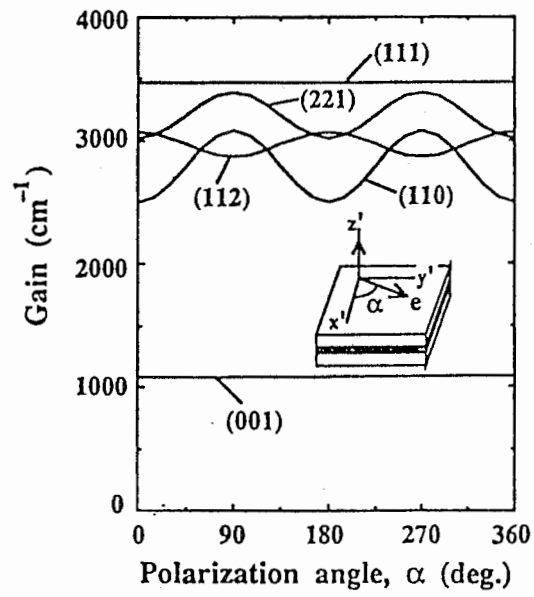
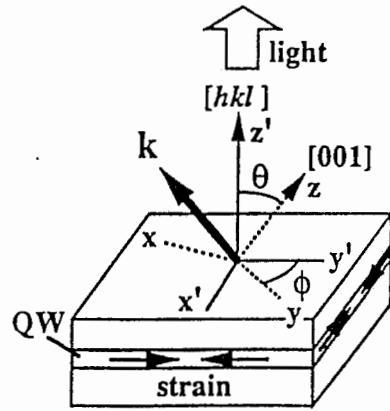


図6 光学利得と面方位の関係
(大歳等による計算結果、文献 [6] 参照)

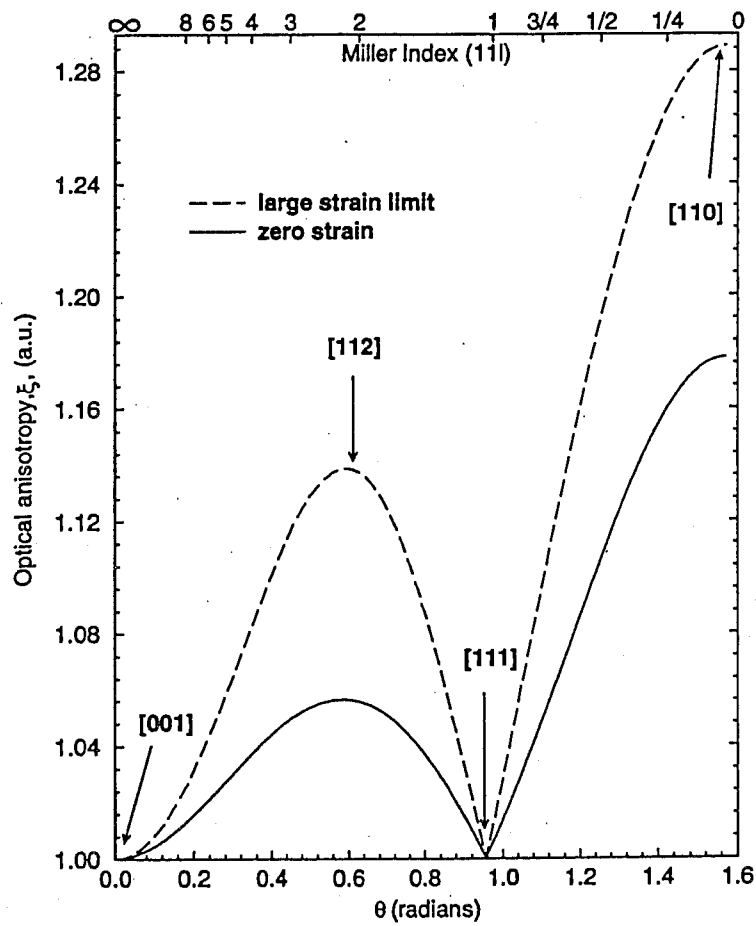


図7 光学異方性と面方の関係
 (R. H. Henderson 等による、文献 [8] 参照)

3-2. (311) A面上InGaAs/GaAs面発光レーザの作製

前章のInGaAs/GaAs歪量子井戸構造の成長条件にもとづいて、歪量子井戸層を活性層とする面発光レーザをMBE法により作製した。図8に、作製した面発光レーザの概念構造図を示す。活性層は厚み8nmの $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ 井戸層と厚み8nmのGaAs障壁層からなる二重歪量子井戸層(DQW)からなり、スペーサ層は、一波長厚の $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ 層である。上部および下部のDBRミラーは、それぞれ25周期と22.5周期のAlAs/GaAs($\lambda/4$ 厚)層からなる。なお、ドーピングは、n型不純物にSi、p型不純物にBeを使用し上部および下部DBRミラー共に $2 \times 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$ の濃度で一様にドーピングした。また、素子抵抗低減のために、上部p-DBR膜のAlAs層とGaAs層との界面には6周期からなるAlAs/GaAs超格子層(Chirped Super Lattice Layer)を挿入した。(図9)さらに、p-DBRミラー上部のGaAsキャップ層の厚みは、オーミック電極との位相整合を考慮して決定した。上部および下部DBRミラーの成長温度は、結晶性を向上する目的で 620°C の高温で行い、 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 二重歪量子井戸活性層は、 520°C で成長し、その中間の $\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ スペーサ層は、なめらかに温度を傾斜させながら成長中断せずに成長を行った。

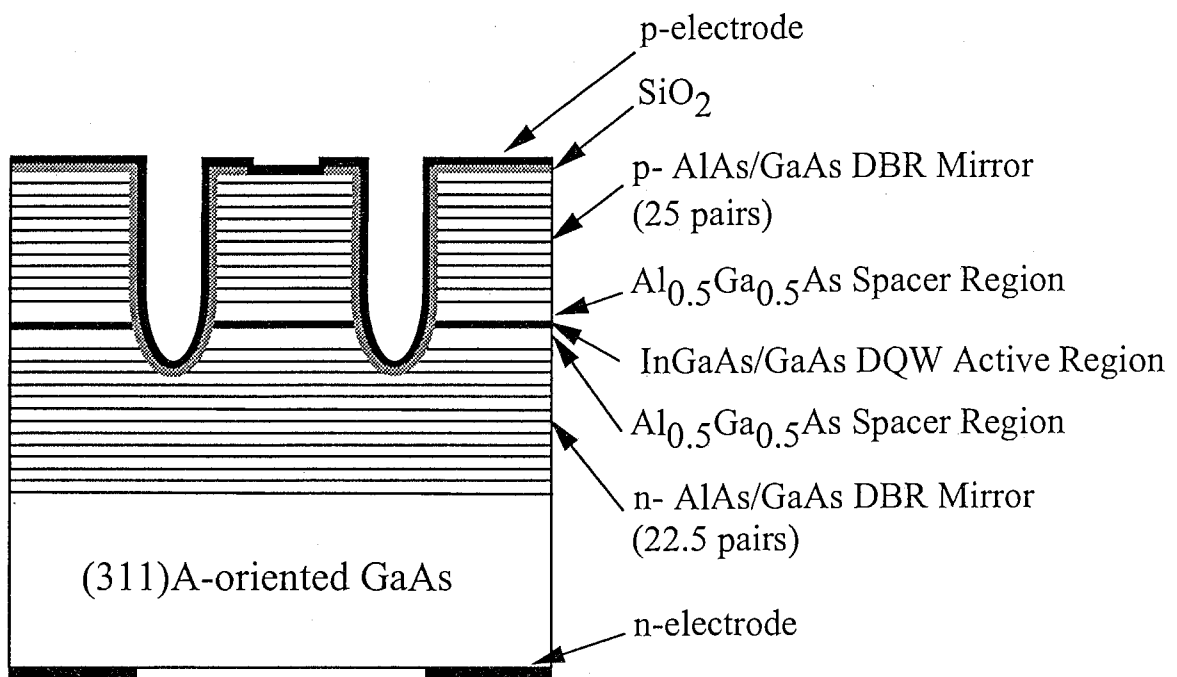
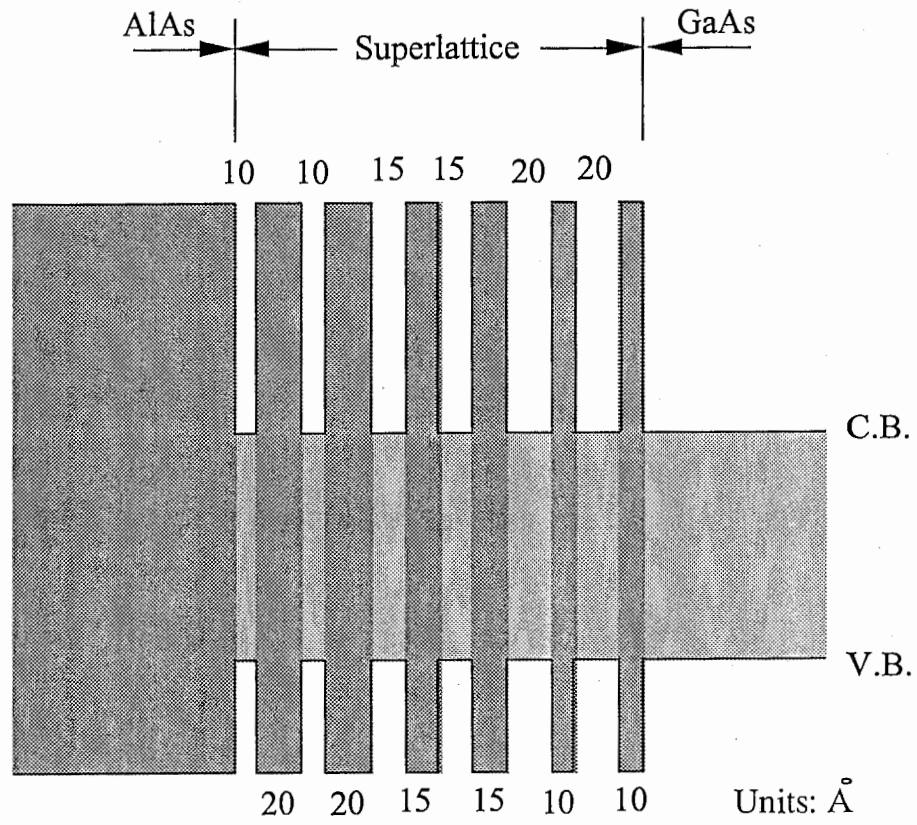


図8 GaAs (311) A面上面発光レーザの構造



Dopant: Be, $2 \times 10^{18} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$

図9 P-AlAs/GaAs DBR ミラー構造
 (順方向電圧の低減のために6層の chirped AlAs/GaAs superlattice を挿入した。)

上記構造を、MBE結晶成長にて形成した後、通常の写真リソグラフィとウエットエッチングによりエア・ポスト型共振器を形成した。図10に、作製した面発光レーザの顕微鏡写真を示す。

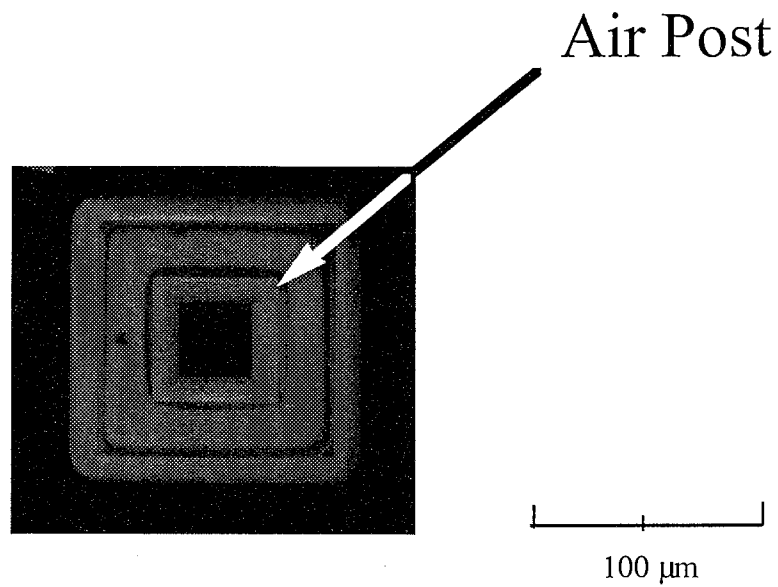


図10 (311) A面上面発光レーザ

3-3. GaAs (311) A面上面発光レーザの結晶性評価

面発光レーザ素子を作製する前に、面発光レーザ構造の結晶性について評価することは、面発光レーザの性能予測やプロセスへのフィードバックを行う上で非常に重要なことである。今回、DBR膜の反射スペクトルおよび断面TEM観察の手法を用いて、作製した面発光レーザ構造の結晶性評価を行った。

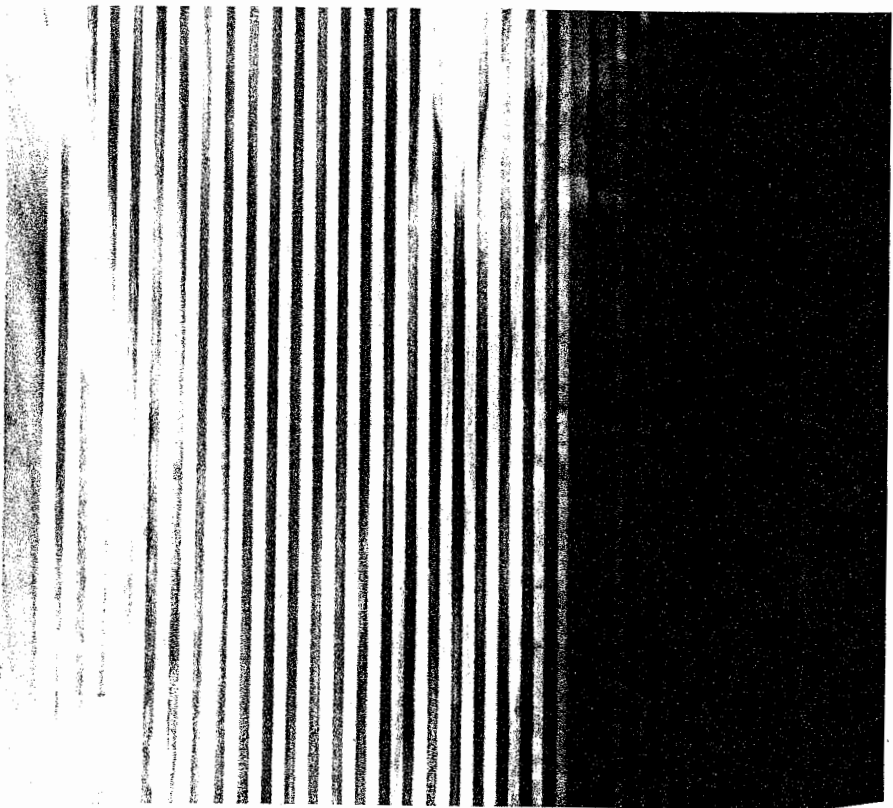
(1) 断面TEM観察

図11に、GaAs (311) A面およびGaAs (211) A面基板上に作製した面発光レーザの断面TEM像を示す。GaAs (311) A面基板上の面発光レーザでは、ヘテロ接合界面は非常に平坦でありミスフィット転位等の欠陥は全く観察されず、良好な結晶が得られている。一方、(211) A面上では、InGaAs/GaAs歪量子井戸活性層付近にミスフィット転位と思われる貫通転位が観察され、前述したPLスペクトルの結果と合わせて、結晶性が劣化していることが分かる。

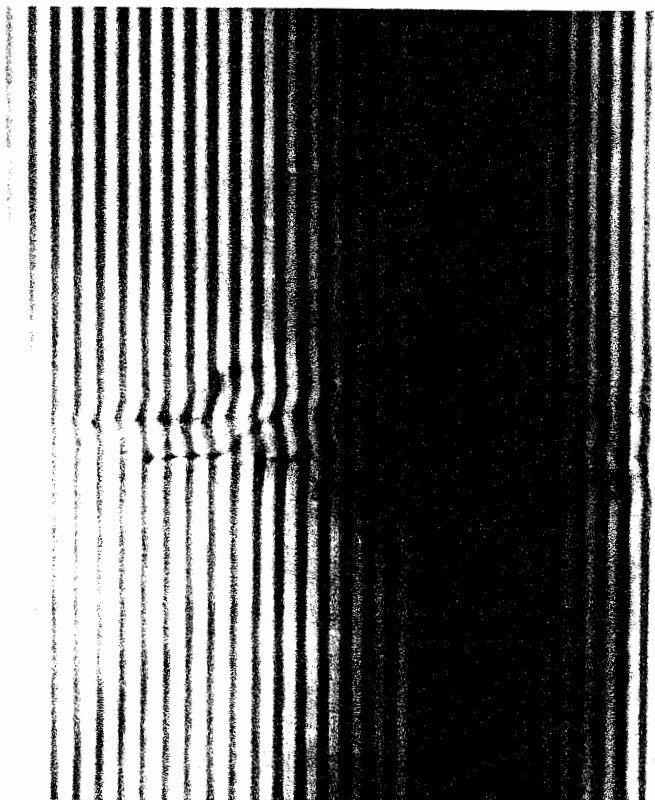
理論的な解析結果では、(311) A面上に比較して、(211) A面上歪QWの方が光学利得および光学的異方性は大きいことが予測されるが、残念ながら(211) A面上での最適な歪QWの結晶成長条件は、まだ見いだされておらず、今後の研究課題の一つである。

(2) 反射スペクトル

別の結晶性の評価として、面発光レーザの反射スペクトルの評価を行った。反射スペクトルの評価は、結晶性以外に面発光レーザの共振器モードやストップバンドを知る上でも必須の測定である。図12に、GaAs (311) A面基板上に作製した面発光レーザの反射スペクトル(室温で測定)を示す。99%以上の高い反射率と平坦な反射特性が得られている。また、計算結果ともよい一致を示しており、ほぼ設計通りの構造が得られていることが分かる。同図には、上部DBRミラーを除去して測定したPLスペクトルも合わせてプロットした。面発光レーザのキャビティモードがPLピーク波長(光学利得ピーク波長に相当)に対し、-17 nm離調している。



(a) (311)A



(b) (211)A

1 μm

Fig. 11. Cross-sectional TEM image of a VCSEL on (a) (311)A and (b) (211)A substrate

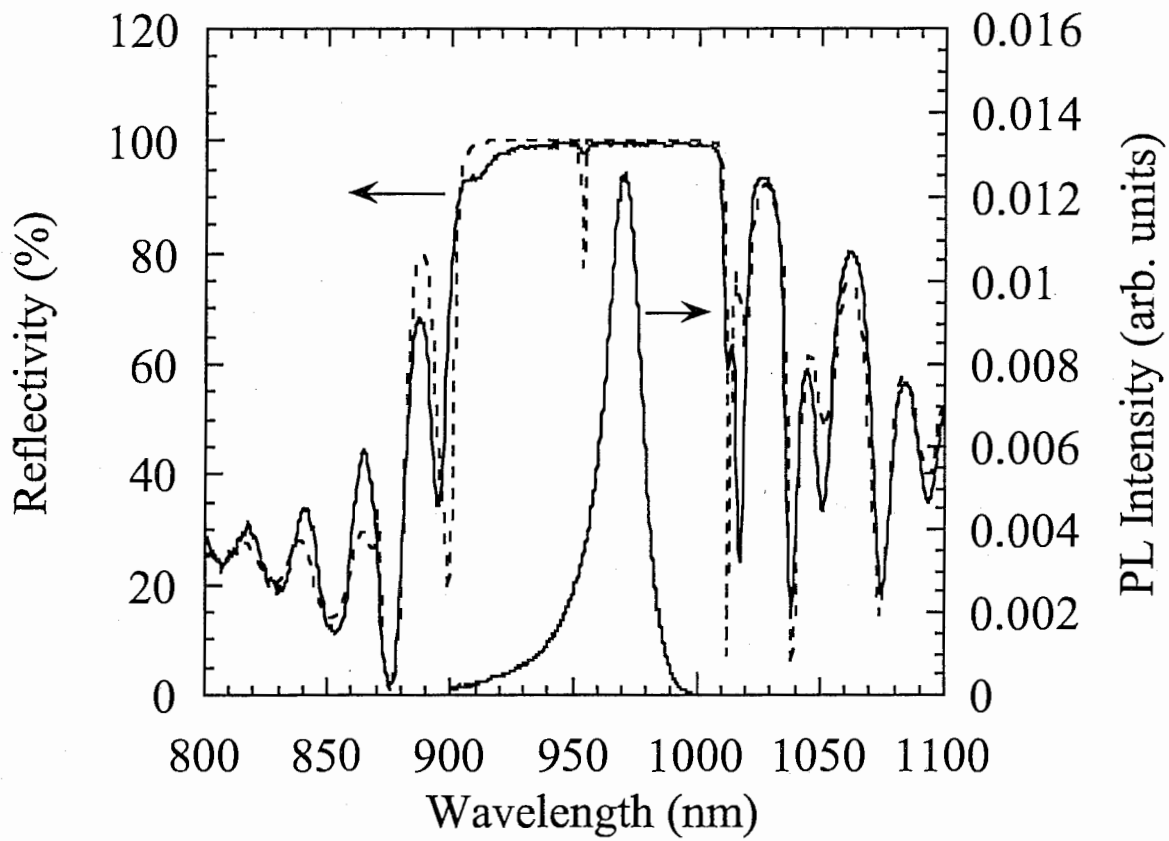


図12 GaAs (311) A面・面発光レーザの反射スペクトル
 (実線は実験値、点線は計算結果を示す。また、上部DBRミラーをエッチングで除去して測定した同一試料のPLスペクトルも合わせて示した。図から、キャビティモードが、PL波長から -17 nm だけ離調していることが分かる。)

4章. GaAs (311) A面上面発光レーザの発振特性

3章において、高指数面 (n11) 面上の歪量子井戸構造が高い光学利得と光学的異方性を有することが理論的に明らかになった。本章では、まず、この光学的異方性と面発光レーザの発振モードとの関係を2モードレート方程式を用いて簡単に説明し、次に、試作したGaAs (311) A面上に作製した面発光レーザの発振特性について詳述する。

4-1. 面発光レーザの偏波制御について

面発光レーザの偏波制御については、種々の方法が提案されている [21] - [25] が、いづれも構造あるいは形状が複雑になり、製造プロセスもそれに伴い相当煩雑になると予想される。これに対し、基板の面方位を変えることにより得られる光学的異方性を利用する場合、基板の面方位を変えるだけで構造上の変更は一切不要であり、製造プロセスも従来の (100) 面上の素子作製で用いられてきた方法が、ほとんどそのまま使用でき、非常に簡便であると言える。

どれだけの光学的異方性あるいは光学利得差があれば、安定した変更特性が得られるかを数値計算の結果に基づいて説明したいと思う。レーザの発振特性を理解するために、キャリアと光子のレート方程式が一般的に用いられる。2モード発振に対するレート方程式は、式 (1) によって示される。ただし、利得飽和の効果は、簡単のため無視できるものとした。

$$\begin{aligned}\frac{dn}{dt} &= \frac{J}{ed} - \frac{n}{\tau_s} - v_g g_1(n) s_1 - v_g g_2(n) s_2 \\ \frac{ds_1}{dt} &= v_g \Gamma_1 g_1(n) s_1 - \frac{s_1}{\tau_{p1}} - \beta B_1 n^2 \\ \frac{ds_2}{dt} &= v_g \Gamma_2 g_2(n) s_2 - \frac{s_2}{\tau_{p2}} - \beta B_2 n^2 \\ g_i &= a_i (n - n_g) , \quad (i=1 \text{ or } 2)\end{aligned}\tag{1}$$

ここで、各記号は以下のパラメータを示す。

n: carrier density	[cm ⁻³]
s ₁ , s ₂ : photon density	[cm ⁻³]
J: current density	[A cm ⁻²]
τ _s : carrier lifetime	[s]
v _g : group velocity	[cm s ⁻¹]
Γ _i : optical confinement factor	
τ _{p1} , τ _{p2} : photon lifetime	[s]
β: spontaneous emission factor	
B ₁ , B ₂ : recombination coefficient	[cm s ⁻¹]

各発振モードに対する利得 g をパラメータに、注入キャリア密度 J と光子密度 s との関係を実験した結果を図 13 に示す。計算には、パラメータとして以下の値を用いた。

$$\tau_s = 2.5 \text{ [ns]},$$

$$v_g = 8.6 \times 10^9 \text{ [m/sec]},$$

$$n_g = 1.0 \times 10^{18} \text{ [cm}^{-3}\text{]},$$

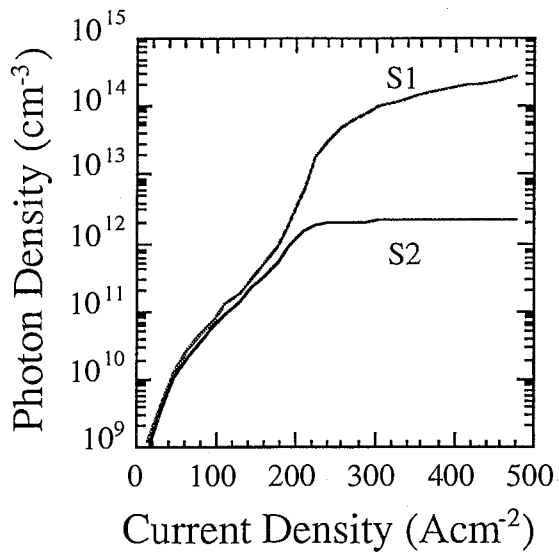
$$\tau_{p1} = \tau_{p2} = 2.0 \text{ [ps]},$$

$$\beta = 1 \times 10^4,$$

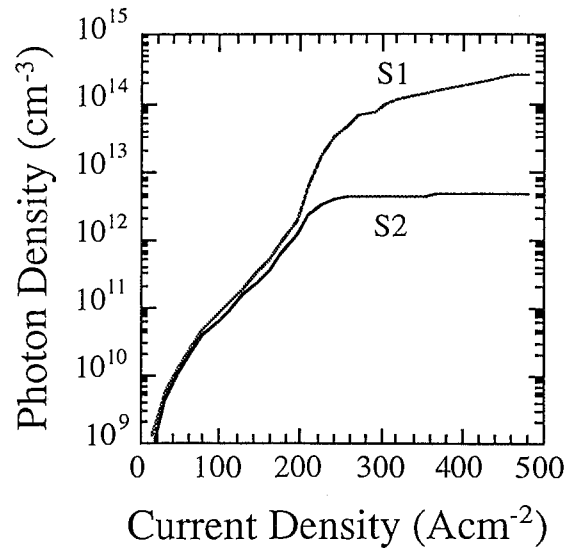
$$B_1 = 1.33 \times 10^{-10} \text{ [cm s}^{-1}\text{]},$$

$$B_2 = 0.8 \times B_1 \text{ [cm s}^{-1}\text{]}.$$

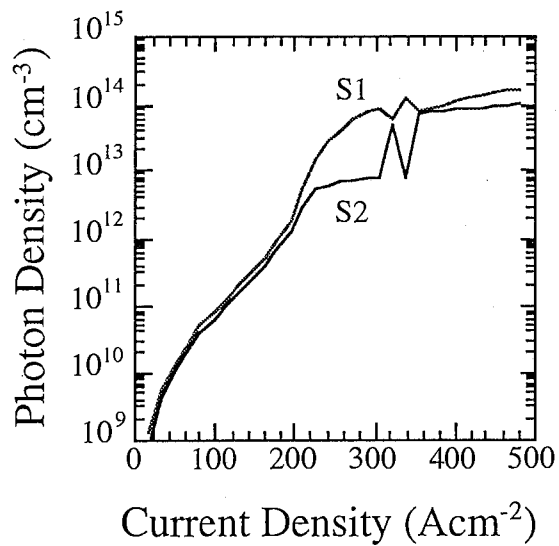
利得差が 5 % 以上では、2 モード間の発光強度比として 10 dB 以上の安定した単一モードが得られている。一方、利得差が 2.5 % (図中 (c)) あるいは 1 % ((d)) と小さくなると、(100) 面上の面発光レーザで観察されるような 2 モード発振やモードスイッチングの現象が現れる。



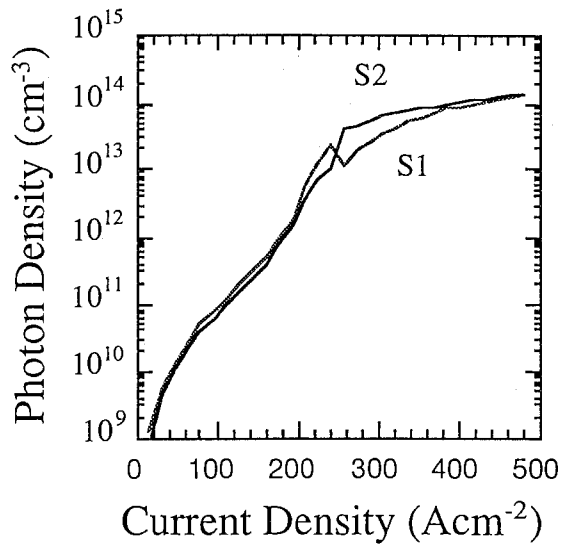
(a) $\Delta g/g=0.1$



(b) $\Delta g/g=0.05$



(c) $\Delta g/g=0.025$



(d) $\Delta g/g=0.01$

図 1 3 光学利得差と発振特性の解析結果

4-2. GaAs (311) A面上InGaAs/GaAs面発光レーザの発振特性
前述した様に、(311) A面上のInGaAs/GaAs歪み量子井戸構造は、高い光学利得と光学的異方性を有することから、面発光レーザの特性としてしきい値の低減および偏波面の制御の両特性について改善することができる。次に、これらの特性について実験結果を示す。

(1) I-L特性・発光スペクトル

図14に、室温・CWバイアス条件での電流・光特性(I-L特性)およびI-V特性を示す。この時、ヒートシンクは使用せず、また、特別な温度制御も行っていない。発振しきい値電流は、3mAであり、しきい値電流密度に換算すると、 188 A/cm^2 である。この低しきい値特性は、(311)量子井戸活性層の特長である高利得によるものと考えられる。しきい値電圧 V_{th} は、7.3Vで十分小さいとは言えないが、AlAs層とGaAs層とのヘテロ界面に挿入した超格子層が、抵抗低減にある程度有効に作用していることが分かる。図15に典型的な発光スペクトルを示す。光波長は、950nmである。今回、試作した素子のポストサイズが $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ と比較的大きいため、高注入時には、高次の横モードが見られる。高次の横モード発振については、後述する遠視野パターン(FFP)の測定データで明らかである。図16にバイアス条件 $I/I_{th}=1.2$ における近視野像を示す。ほぼ円形で均一な発光パターンが得られた。

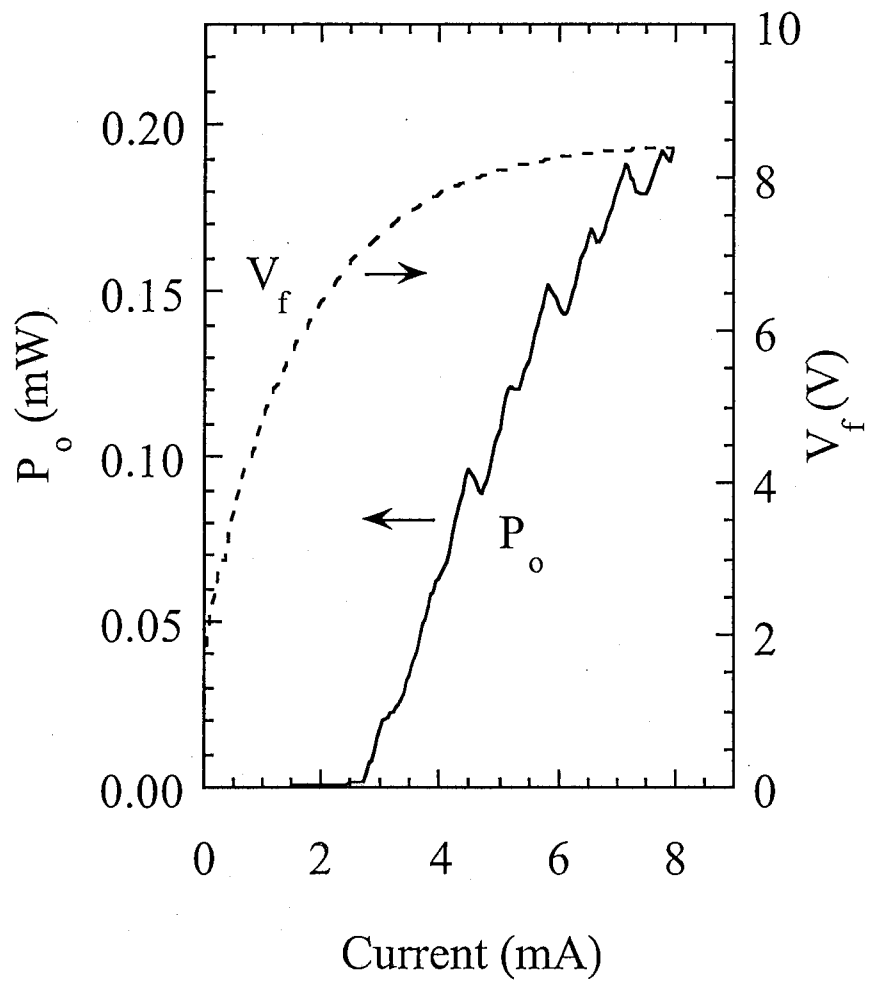


図14 GaAs (311) A面・面発光レーザの電流-光出力特性 (室温、CW)

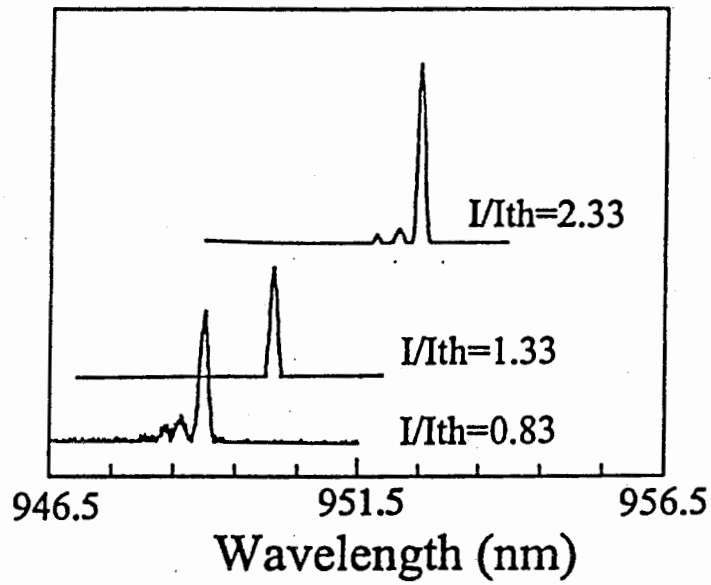


図15 面発光レーザの発光スペクトル

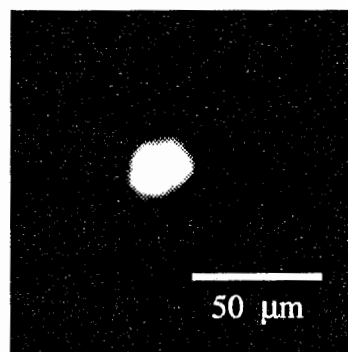


図16 面発光レーザの近視野像
($I/I_{th} = 1.2$)

(2) ファーフィールドパターン (FFP)

図17に、注入電流を変えて測定したFFPを示す。今回、試作した素子のポストサイズが比較的大きいため、注入電流を増加させるに従って高次の横モードが現れていることが分かる。

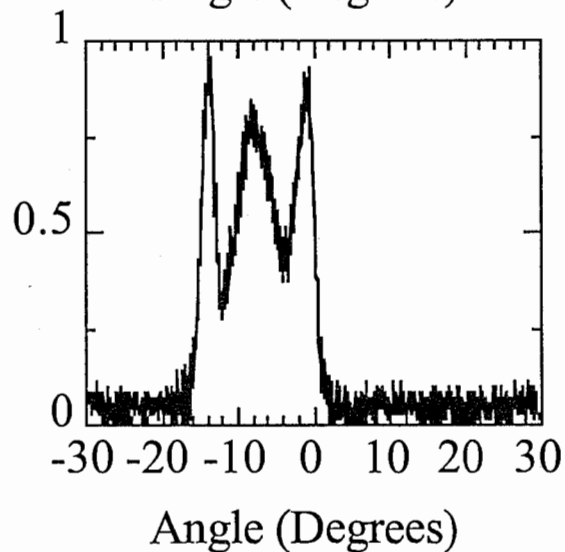
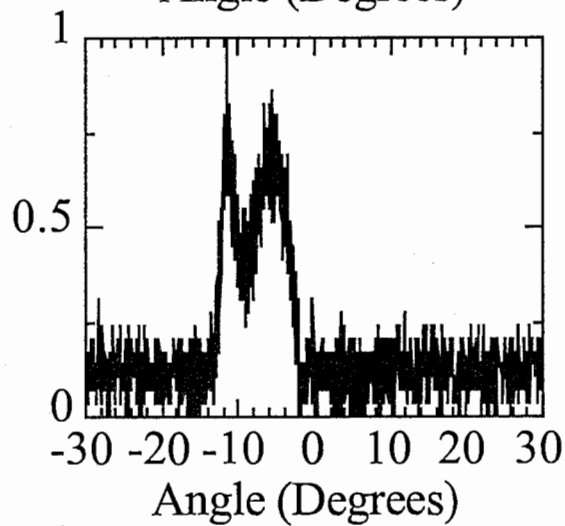
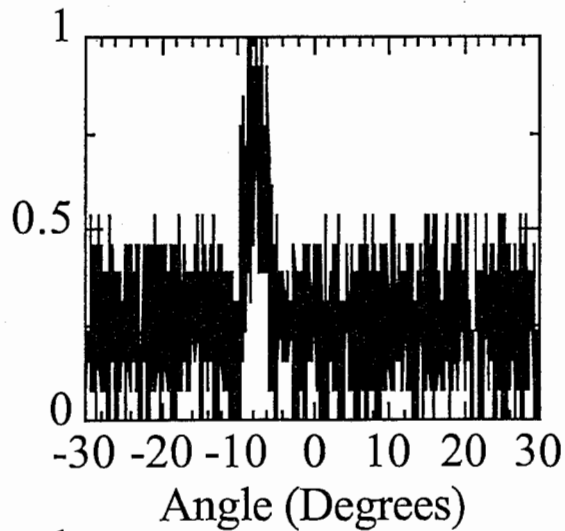


図17 面発光レーザの注入電流とFFPの関係

(3) 偏光特性

図18に、先のI-L測定を行った素子と同一素子を用いて、2方向の直交する偏光成分に分離して測定したI-L特性の結果を示す。図中の偏波成分 P_{max} は光学利得が最大になる方向である結晶軸 $\langle \bar{2}33 \rangle$ 方向と一致している。 P_{min} は、 $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向に一致している。しきい値の約2.7倍までの非常に広い駆動範囲で、偏波面が保存されていることが分かる。図中のI-L特性におけるキックは、高次横モード発振と基板からの反射光の両方の影響によるものである。特に、基板からの反射光の影響について、これまでは主に、横モードへの影響について検討されてきた。今回の実験から偏光制御についても、この基板からの反射の影響を軽減することが重要であることが明らかになった。

また、各バイアス電流での、偏光子（グラン・トムソン偏光プリズム）の回転角度をパラメータとした時の偏光特性を図19に示す。しきい値以下のバイアス時においても、既に、光出力に偏りがあり、電流がしきい値の0.9倍のときの P_{max}/P_{min} 比は1.7倍である。また、 $I/I_{th}=2.33$ のときの P_{max}/P_{min} 比（消光比）は、12.7dBの値が得られた。最大消光比としては、20.8dBの値が得られている。これらの偏光特性は、(311)A面歪み量子井戸の結晶軸面内での光学利得の差を反映したものであり、先ほどの計算結果を考慮すると、2つの偏波面での利得差は5%以上の値であることが推定される。

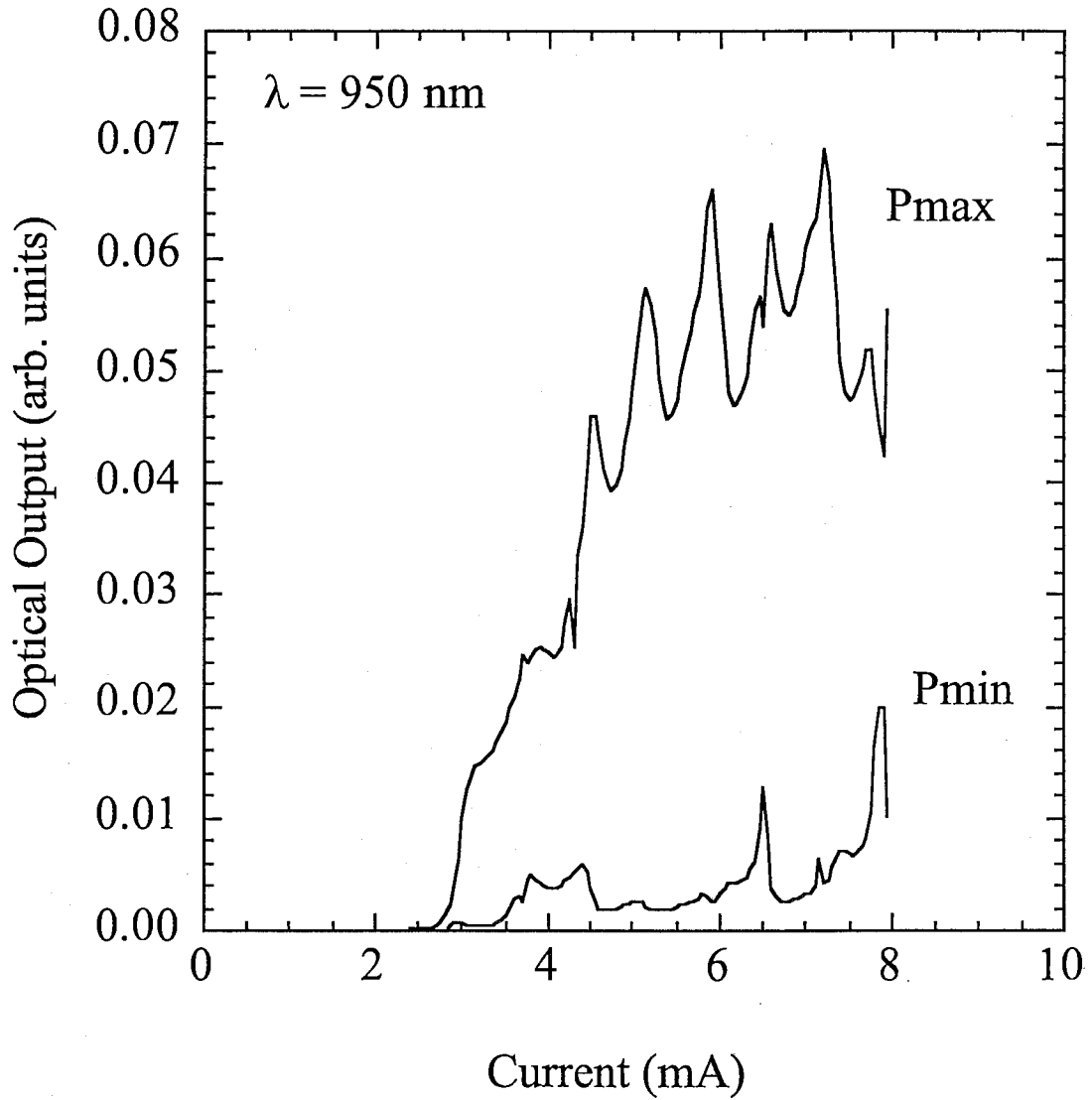


図18 直交する2方向の偏波光のI-L特性

P_{max} , P_{min} は、それぞれ直交する偏波光の最大光出力および最小光出力方向を示し、また、 P_{max} は結晶軸 $\langle 2\bar{3}3 \rangle$ 方向と、 P_{min} は $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ 方向と一致している。

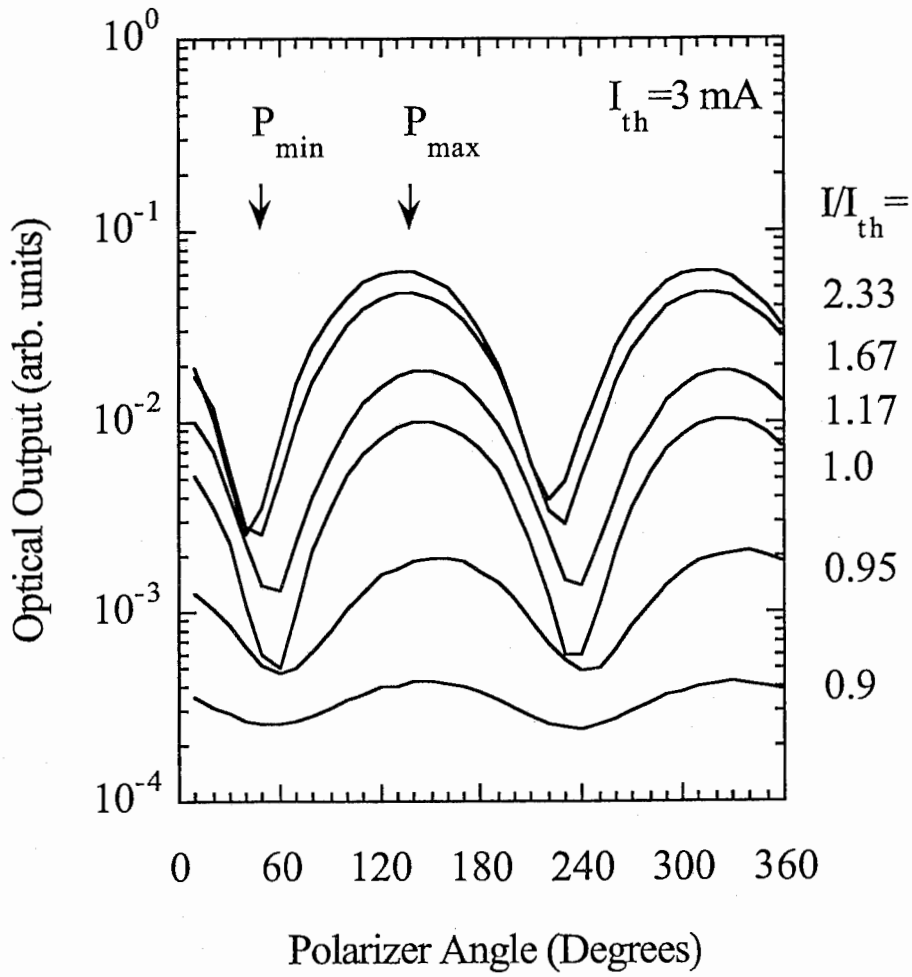
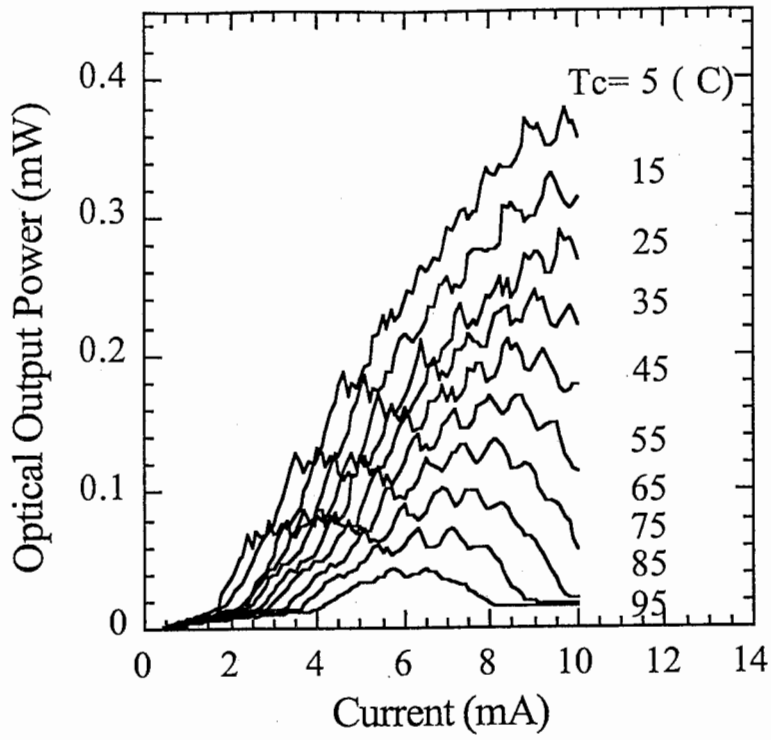


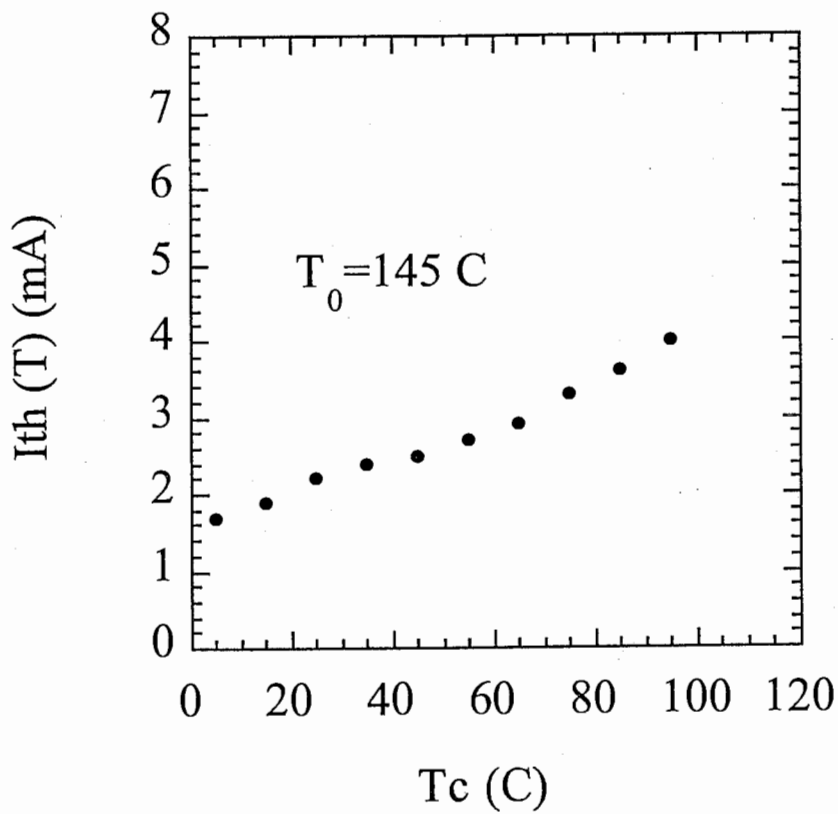
図 1 9 偏光子回転角と発光出力との関係

(4) 温度特性

面発光レーザを集積化して使用する際に重要な特性として、低発振しきい値動作と合わせて、温度特性が良好であることが必要である。図20に、ケース温度を5°Cから95°Cまで変化させたときの発光出力と発振しきい値電流の温度特性を示した。今回評価した素子では、面発光レーザのキャビテイモードが光学利得のピーク波長からマイナス側に離調されているため、温度上昇と共にキャビテイモードと光学利得のピーク波長との差がさらに大きくなることから、温度特性としては非常に不利な条件となっているにもかかわらず、最高発振温度として100°C以上の高温動作が得られた。また、25°Cから75°Cまでの特性温度、 T_0 として145°Cの値が得られた。これらの結果は、(311) A面上歪量子井戸の高利得による低しきい値動作により、素子の発熱が低減された効果によるものと考えられる。今後、キャビテイモードと活性層の利得波長との関係を最適化することにより、さらに低しきい値動作および高温特性が期待される。



(a) I - L の温度特性



(b) 発振しきい値電流の温度特性

図 2 0 面発光レーザの温度特性

(5) 面発光レーザのサイズと発振しきい値電流

最後に、これまで評価した素子について、それぞれの共振器サイズとしきい値電流の関係についてまとめ、低しきい値化の可能性について言及する。

面発光レーザの共振器サイズとしきい値電流の関係を図21にプロットした。最低しきい値電流密度は、ポストサイズが $3.3\ \mu\text{m}$ の素子に対し $160\ \text{A}/\text{cm}^2$ という、通常の簡便なエアー・ポスト型構造としては非常に小さい値が実現できた。今後、素子サイズの低減によって、 μA オーダーの極低しきい値が期待できるものと考えられる。

面発光レーザのポスト径の低減の方法として、最近、DBRミラーのAlAs層を選択的に酸化させる方法が提案されている。この方法は、また、プロセス加工時に生じる表面ダメージ層での表面再結合電流を低減できるという効果も期待できるため、しきい値電流の低減に非常に有効な方法である。東京工業大学・伊賀教授等のグループによりポスト径 $5\ \mu\text{m}$ の素子で $70\ \mu\text{A}$ の低しきい値電流が報告されている[26]。我々も、この方法により、ポスト径の低減を試みた。図23に、DBRミラー酸化後の顕微鏡写真を示す。比較のため、(100)面上(文献27より引用)の結果も合わせて示す。ポストは、はじめ円柱上に加工したが、酸化が進むにつれて、結晶の異方性を反映して三角形の形状に変化するのが分かる。つまり、結晶的に等方的な(100)面では、酸化も等方的に進行するが、(311)A面では、酸化の速度が結晶方位によって異なることが明らかとなった。残念ながら、今回の試作ではレーザ発振には至らなかったが、今回の結果を元に、(100)面とは違った新たな形状・構造をもつ面発光レーザの研究への発展も考えられ、今後の進展に期待したい。

今回得られた(311)A面上の面発光レーザと(100)面上の面発光レーザの特性とを比較するために、それぞれの面発光レーザの発振しきい値電流を図24にプロットした。

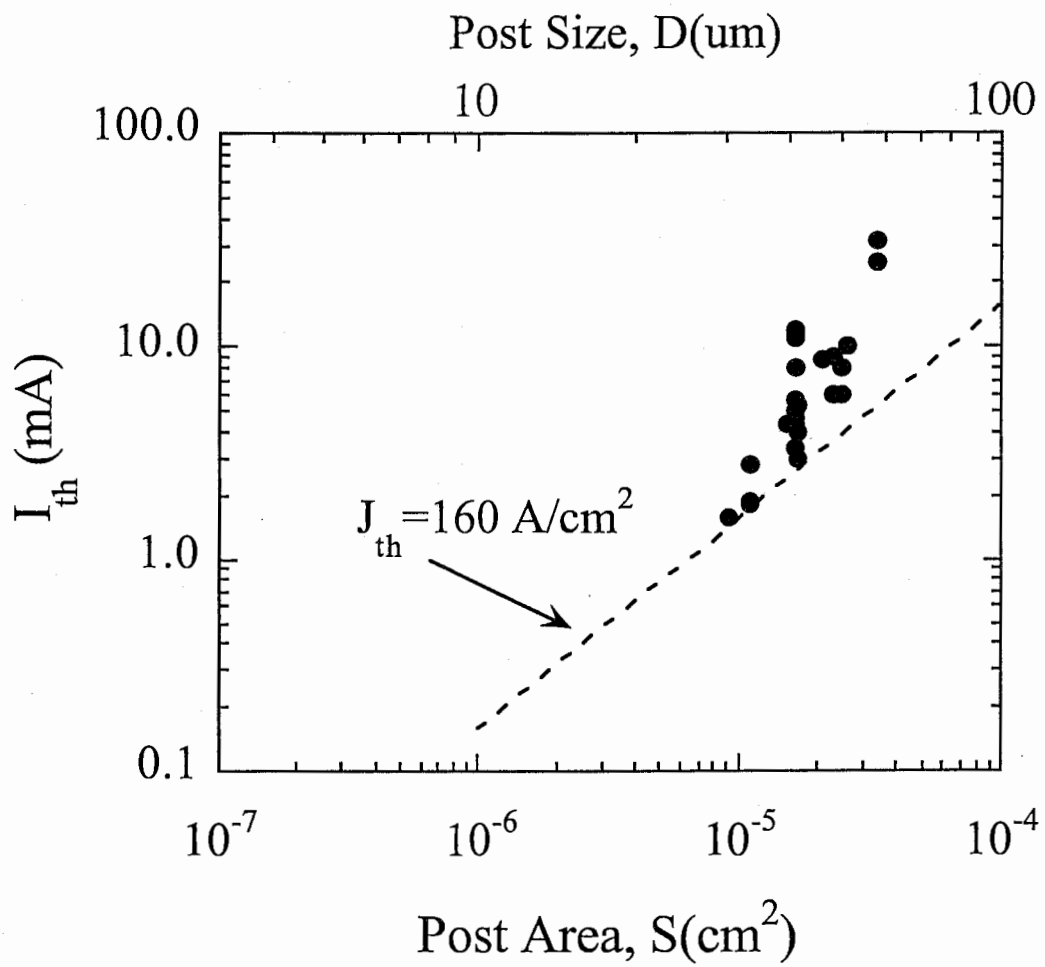


図 2 1 面発光レーザのポストサイズと発振しきい値電流

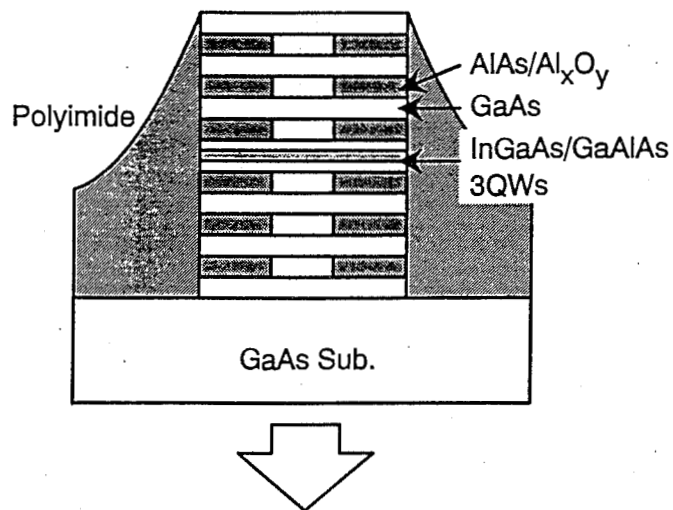
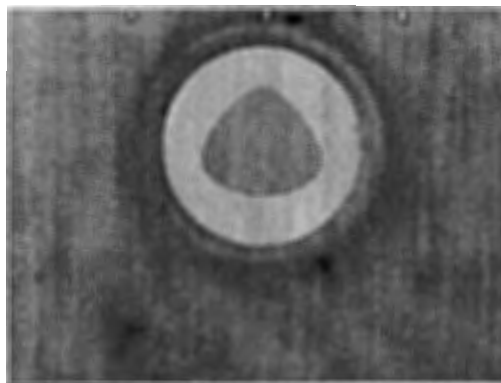
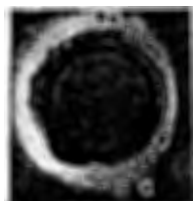
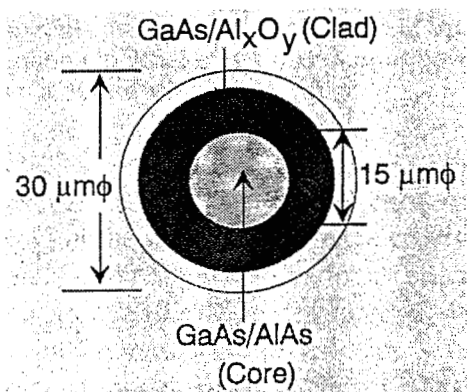


図 2 2 DBRミラー酸化構造面発光レーザ
(東京工業大学・伊賀教授らのグループによる [26])



50 μm

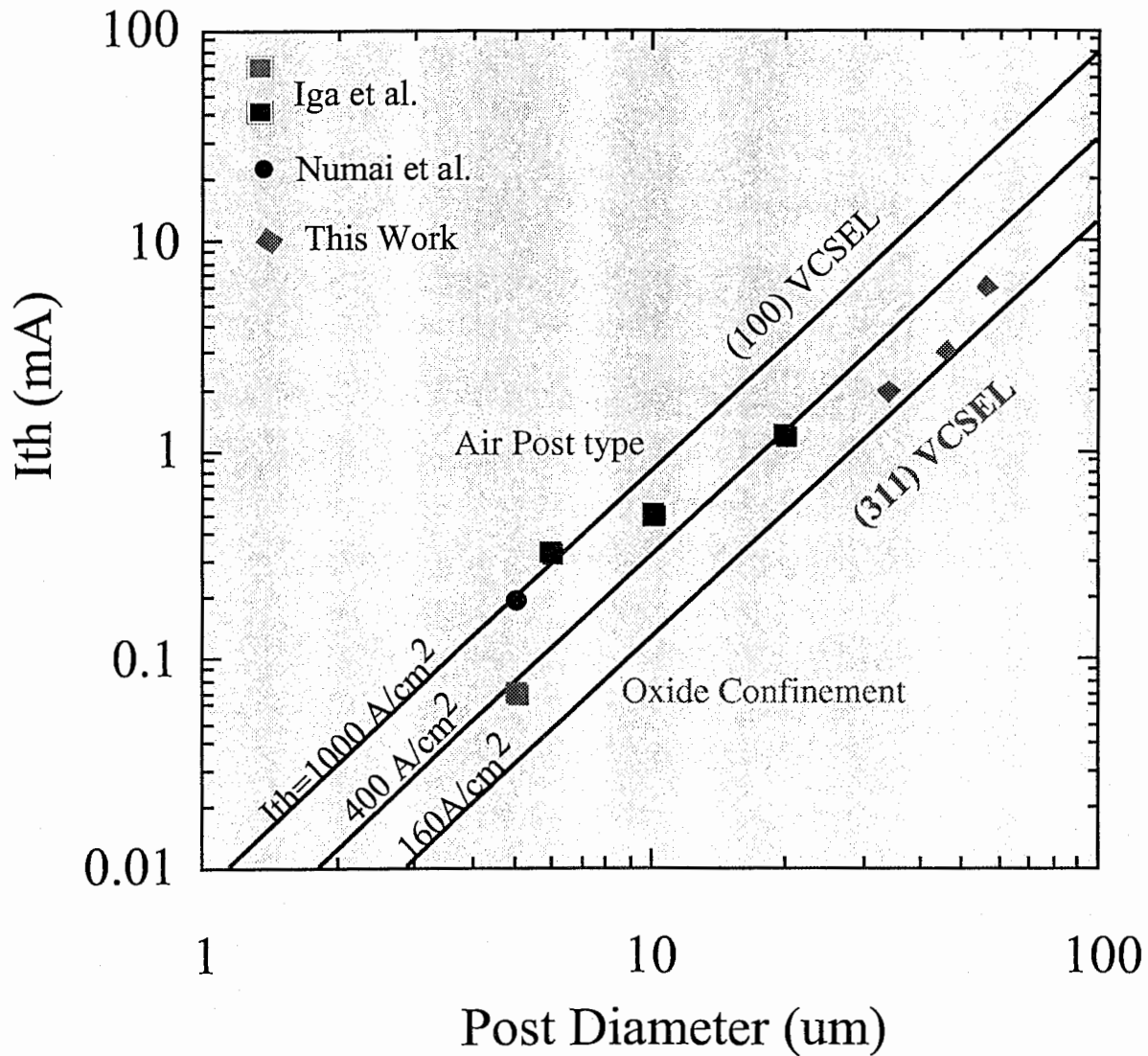


(a) (100) 面上面発光レーザ
(文献 [26] 参照)

(b) (311) A 面上面発光レーザ

図 2 3 DBRミラー酸化構造面発光レーザの上面図

Approach to the Low Threshold Current VCSELs



- Reduction of Active Volume
- Reduction of Surface Carrier Recombination
- Reduction of Electric Resistance and Thermal Resistance

図 2 4 面発光レーザの低しきい値化について

5章. まとめ

MBE法を用いて、GaAs (311) A面基板上のInGaAs/GaAs歪量子井戸構造について最適化を行い、これまでの高指数面上の成長条件に加えて、成長温度に関し、520°Cにて良好な歪量子井戸構造が得られることを新たに明らかにした。さらに、InGaAs/GaAs歪み量子井戸・面発光レーザ構造を作製し、無転位・無欠陥で、かつ高反射率のDBR膜構造を有する良好な結晶が得られた。電流注入型の素子に加工し、はじめて、室温連続発振動作を確認した。これまで報告されているしきい値電流で最低の160 A/cm²の値を得た。さらに、通常の(100)面上面発光レーザで問題となっている偏波制御について、しきい値の2.7倍までの安定な偏波制御特性と10 dB以上の消光比を確認した。これらの結果は、(311) A面上の歪QWの特徴である高い光学利得と光学的異方性に基づくものであると考える。今回の研究において、はじめて高指数面上歪QW面発光レーザの特徴を実験的に明らかにしたが、特に構造においては決して最適化されているとは言えない。今後、さらに成長技術あるいは微細加工プロセス技術の進展により、(311)面あるいは(211)面をはじめとして高指数面の利用が、面発光レーザの性能をさらに向上することを期待する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、その機会を与えていただいたATR光電波通信研究所猪俣英行社長に深く感謝いたします。日頃よりご指導を頂いている渡辺敏英室長に深く感謝いたします。結晶成長について有意義な助言をいただいた藤田和久主任研究員、Pablo Vaccaro客員研究員に深く感謝いたします。また、本研究を行うにあたり有意義なご助言・ご指導をいただいた東京工業大学・小山二三夫助教授ならびに伊賀教授に深く感謝いたします。面発光レーザのプロセス加工の一部をお願いし、また、有意義な討論をしていただいた東京工業大学・向原智一氏をはじめ伊賀研究室のみなさんに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Hayakawa, T. Suyama, K. Takahashi, M. Kondo, S. Yamamoto, and T. Hijikata, Appl. Phys. Lett., 52 (1988)339.
- [2] T. Hayakawa, T. Suyama, K. Takahashi, M. Kondo, S. Yamamoto, and T. Hijikata, J. Appl. Phys., 64 (1988) 297.
- [3] J. S. Osinski, P. Grodzinski, P. D. Dapkus, Z. Karim, and A. R. Tanguay, Jr, IEEE Photon. Technol. Lett., 4 (1992) 1313.
- [4] M. Takahashi, P. Vaccaro, K. Fujita, and T. Watanabe, Appl. Phys. Lett., 66 (1995) 93.
- [5] T. Mukaihara, N. Ohnoki, Y. Hayashi, N. Hatori, F. Koyama, and K. Iga, IEEE Photon. Technol. Lett. , 7 (1995) 1113.
- [6] T. Ohtoshi, T. Kuroda, A. Niwa, and S. Tsuji, Appl. Phys. Lett., 65, (1994) 1886.
- [7] A. Niwa, T. Ohtoshi, and T. Kuroda, IEEE J. Selected Topics in Quantum. Electron., 1, (1995) 211.
- [8] Decai Sun, Elias Towe, Paul H. Ostdiek, Jeffery W. Grantham, and Gregory J. Vansuch, IEEE J. Selected Topics in Quantum. Electron., 1, (1995) 674.
- [9] T. Yamamoto, M. Inai, T. Takebe, and T. Watanabe, J. Vacc. Sci. & Technol. A, 11 (1993) 631.
- [10] M. Takahashi, P. Vaccaro, K. Fujita, and T. Watanabe, to be published in the proceedings of the 1995 MRS fall Meeting.
- [11] J. W. Matthews, S. Mader, T. B. Light, J. Appl. Phys., 41 (1970) 3800.
- [12] W. Batty et al., Semicond. Sci. Technol., 4 (1989) 904.
- [13] T. Takahashi et al., Appl. Phys. Lett., 58 (1991) 881.
- [14] Jian-Bai Xia, Phys. Rev., B43 (1991) 9856.
- [15] A. T. Many, Superlattices and Microstructures, 1 (1992) 31.
- [16] E. Yablonovitch et al., IEEE J. Lightwave Technol., 6 (1988) 1292.
- [17] I. W. Tao, and W. I. Wang, Electron. Lett., 28 (1992) 705.
- [18] A. Ishihara, and H. Watanabe, Jap. J. Appl. Phys., 33 (1994) 1361.
- [19] T. Takeuchi, K. Muraki, Y. Hanamaki, S. Fukatsu, N. Yamada, N. Ogasawara, N. Mikoshiba and Y. Shiraki, J. Crystal Growth, 150 (1995) 1338.
- [20] Y. Kaneko, S. Nakagawa, T. Takeuchi, D. E. Mars, N. Y. Yamada, and N. Mikoshiba, Electron. Lett., 31 (1995) 805.

- [21] M. Shimizu, T. Mukaihara, F. Koyama, and K. Iga, *Electron. Lett.*, 27 (1991) 1067.
- [22] T. Mukaihara, F. Koyama, and K. Iga, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 5 (1993) 133.
- [23] A. Chavez-Pirson, H. Ando, H. Saito, and H. Kanbe, *Appl. Phys. Lett.*, 62 (1993) 3082.
- [24] K. D. Choquette and R. E. Leibenguth, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 6 (1994) 40.
- [25] T. Mukaihara, N. Ohnoki, Y. Hayashi, N. Hatori, F. Koyama, and K. Iga, *IEEE J. Selected Topics in Quantum. Electron.*, 1, (1995) 667.
- [26] Y. Hayashi, T. Mukaihara, N. Hatori, N. Ohnoki, A. Matsutani, F. Koyama, and K. Iga, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 7 (1995) 1234.