

第5章 気相拡散・表面拡散の適用範囲

第3・4章では、気相拡散及び表面拡散に注目し、MOVPE 選択成長のモデル化を行ったが、それ以外に見落としている現象がないか、再び検証する。本章では計算には気相拡散のみを考える。大きく分けて、(1)狭幅選択成長に対して、(2)V族組成が一定であるという想定について、(3)歪みの大きな場合での計算の適用範囲について、それぞれ調べた。

5.1. 選択成長領域幅の狭い場合

第3章では、選択成長領域を $60\mu\text{m}$ から $20\mu\text{m}$ へと狭めたときに既に気相拡散では説明できないとされていたが、更に狭めた場合について議論する。ここでは、選択成長マスク幅を $20\mu\text{m}$ から $2\mu\text{m}$ まで狭めた場合の選択成長領域中央部の InGaAsP の PL 波長の結果を調べた。サンプル構造は InP 基板の上に InP バッファ層 50nm 成長した後に、InGaAsP を 150nm 成長し、最後に InP cap 層を 7nm 成長したものである。膜厚はプレーナ部の膜厚である。

A. 実験結果と測定結果の比較

使用したマスクパターンは Fig. 5-1 に示す通りである。実際に測定した結果と、気相拡散モデルによる計算結果のうち、選択成長領域幅依存性(ストライプ幅依存性)についてまとめたものを Fig. 5-2、マスク幅の依存性についてまとめたものを Fig. 5-3 に示す。

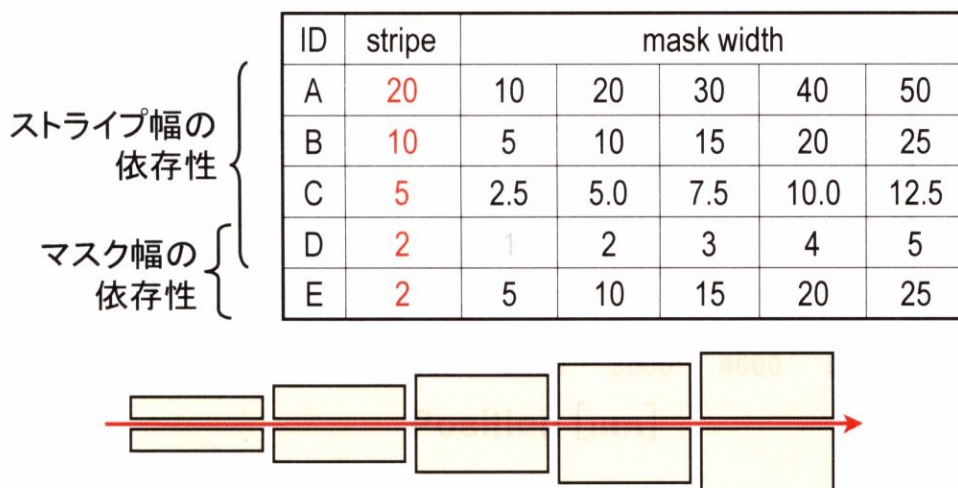


Figure 5-1: (a)マスクパターンと、(b)マスクのパラメータ：選択成長領域幅とマスク幅の設計値。

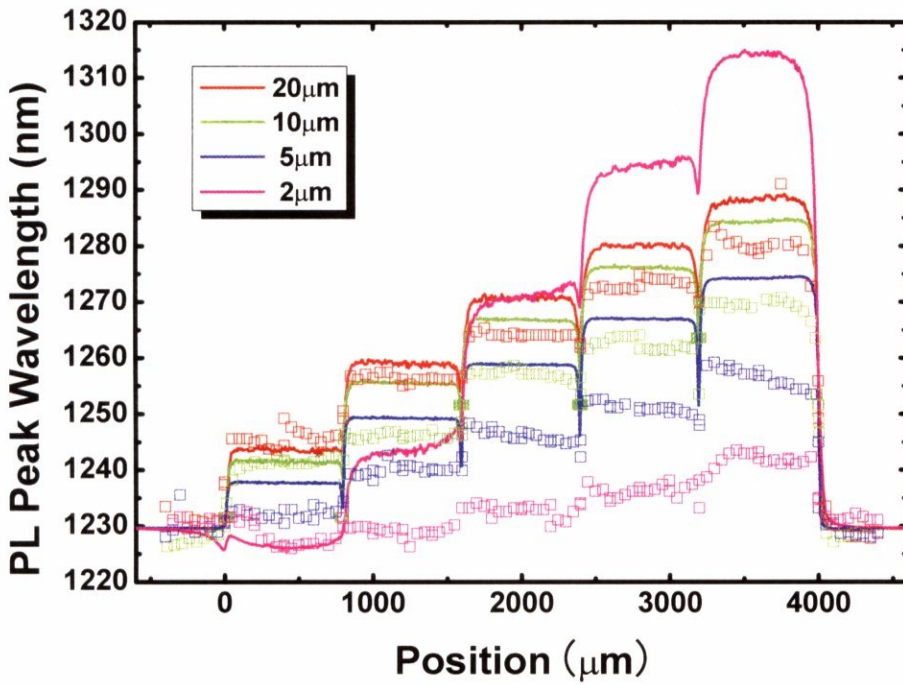


Figure 5-2: InGaAsP 狭幅(2-20 μm)選択成長における PL ピーク波長依存性.

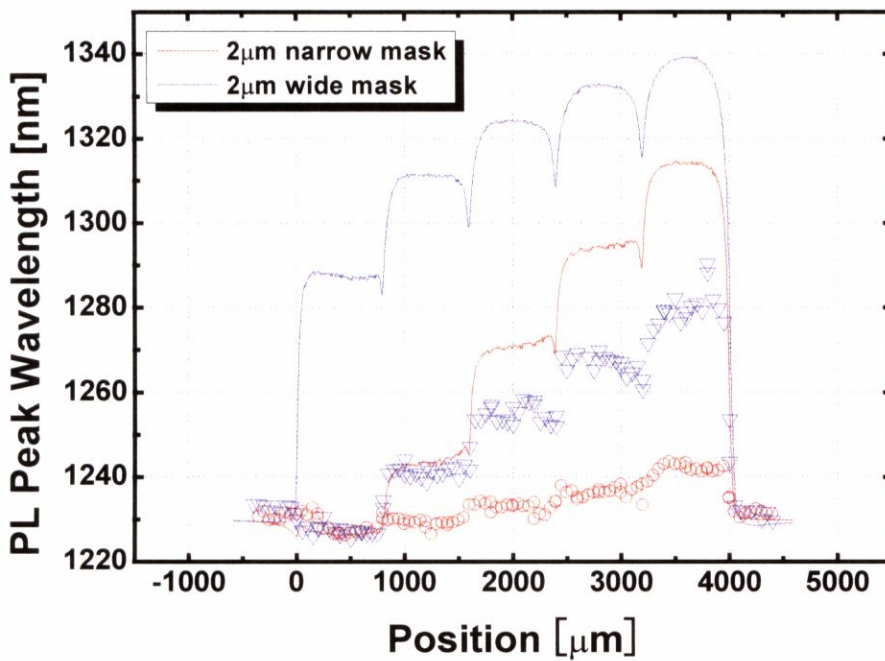


Figure 5-3: InGaAsP 狭幅選択成長の PL ピーク波長のマスク幅依存性. 選択成長領域幅は 2 μm .

B. 実験結果の議論と考察

選択成長領域幅(ストライプ幅)の依存性を見ると、選択成長領域幅が $20\mu\text{m}$ の場合が最も計算結果と実測値の誤差が少なく、選択成長領域幅が小さくなるに従い誤差が大きくなり、選択成長領域幅 $2\mu\text{m}$ の場合などは系統的な誤差が生じている。Fig. 5-3 では選択成長領域幅が $2\mu\text{m}$ の場合、やはり計算値と実測値は大きく異なるが、マスク幅が $5\mu\text{m}$ 付近となるところから選択成長効果が徐々に大きくなってきていることがわかる。

気相拡散に表面拡散を追加して考えても、気相拡散効果以上に選択成長効果が大きくなることは説明できるが、気相拡散より効果が小さくなることは説明できない。これは、気相拡散の効果が小さくなってきていると受け取るべきであり、これまでのモデルでは説明できない。

Sakata らは、選択成長効果が得られ始めるマスク幅が $5\text{-}10\mu\text{m}$ (成長圧力に依存)としており[1]、この実験事実と一致している。4 章でも述べたが、この値に対応するのは In の気相拡散長($20\mu\text{m}$)である。マスク両端に $10\mu\text{m}$ のマスクが存在したとき、気相拡散長とほぼ同程度となる。気相拡散長を下回るマスクの存在に対しては、効果が非常に小さくなることがわかる。

5.2. V 族影響 (InAsP 選択成長)

これまで本研究では V 族は過剰供給と反応律速であることから、V 族組成の分布は無いと想定していた。これは世間一般的な認識であるが、Mori ら(NEC)のグループでは V 族組成が選択成長領域で変化していることを既に指摘している。本研究では InP 上に As 組成の小さい InAsP 成長を行い、PL という比較的簡単な方法で V 族組成の分布があることを説明する。

サンプルとして、InP 上に、InAsP を平坦部で 50nm 成長した。As 組成を変えるたものを 2 種類測定した。プレーナ領域での組成は、 $\text{InAs}_{0.007}\text{P}$ と $\text{InAs}_{0.07}\text{P}$ である。選択成長領域の中央部の PL ピーク波長分布を Fig. 5-4 に示す。

世間的には V 族ソースは AsH_3 , PH_3 であるのに対し、我々の場合 V 族ソースとして TBAs, TBP といった有機金属を用いていることにも、我々の特徴があり注意しなければならない。Zimmermann らは TBAs, TBP を用いて InP, InGaAs, InGaAsP を成長し AsH_3 , PH_3 の場合と比較し基本的に変わらないことを示している[2]が、V 族の分布という立場では考慮されていない。

実験結果を見ると、InAsP 選択成長では組成に応じた PL ピークのシフトが見られる。このことより、V 族組成が一定であるという想定適用は限界があることがわかる。その原因として考えられるのは、Sugiyama ら[3]の報告によると、In の上昇によりその触媒的な効果により As が入りやすくなるという報告もあり、この実験事実と一致する。また Futakuchi らは、As 組成を In 分圧の関数にして示すことにより、選択成長の分布計算を行っており[4]、この実験結果と同様の傾向を示している。今後はこのような触媒的效果をモデルに取り入れる必要があると考えられる。

一方、実際に V 族に分布を持つこと自体は知られつつある。Kimura らは SPring-8 を用いることによって微小領域[5]での格子定数の情報を得ることができ、マスク幅の依存性を調べ、マスク幅が大きくなるにつれ As 組成が上昇していること、一方マスク幅が $10\mu\text{m}$ 以下の領域では As 組成が減少する現象を確認している。V 族組成の変動要因に複数のメカニズムが存在し、それらが As 原料と P 原料で各々逆方向の効果をもたらしている可能性があるとして指摘している[6]。

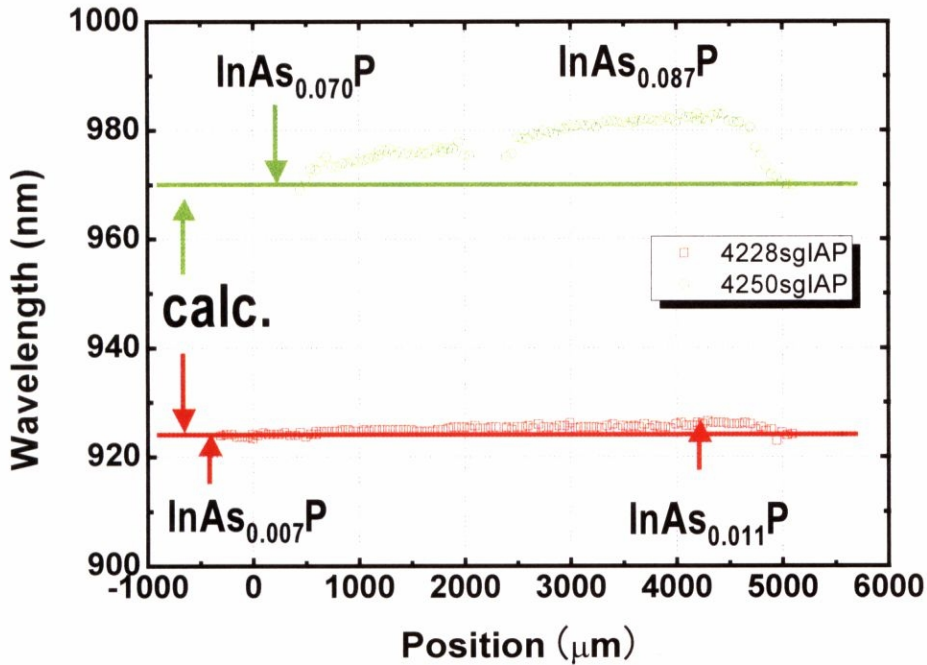


Figure 5-4: InAsP 選択成長の PL 波長依存性. 計算値は通常の気相拡散モデルで行い, V 族の分布は無いと想定している.

5.3. 歪の分布 (InGaAs 選択成長)

InGaAsP 結晶成長では PL ピークと XRD による歪み量といった, 組成を求めるのに 2 つの測定が必要になり, XRD は微小領域で測定することが難しい. しかしながら, InGaAs といった 3 元混晶では PL もしくは格子定数(XRD による)のいずれかがわかれば組成を求めることができる. 言い換えれば, PL ピーク波長によって歪みを求めることができる.

そこで, 組成を変化させた InGaAs バルクについて PL 発光波長分布を測定し, 計算と比較したものを Fig. 5-5 に示す. InGaAs の組成を変化させる際, 格子整合や圧縮歪になるような組成では μ PL 装置の検出限界である 1600nm より長波になることを考え, 引っ張り歪みになるような組成を用いた. それぞれの組成比は InGa_{0.548}As, InGa_{0.739}As である.

Fig. 5-5 には気相拡散モデルによる計算結果も実線で示しているが, 測定結果と 40nm 程度の大きな誤差があることがわかる. 4359sglGA では, XRD で観測された歪みは -15280ppm であり, PL 波長から組成比を計算し, その組成から歪みに直すと -18724ppm となる. また, 4315sglGA では XRD から -5231ppm, PL から組成に直してから歪み量を求めると -5569ppm となった. 膜厚はプレーナ部で 50nm 程度であり, 量子効果による発光波長シフトは数 nm 程度も無いと考えられる. 高引張歪みの例では, 組成から計算する歪み量と PL ピーク波長に違いがあることがわかる.

本研究では発光波長に歪みによるシフトを考慮して計算しているが, その適用範囲の限界が考えられる. 全て InGaAsP として一般化して計算を行っているが, InGaAs の場合等はより現実に近い計算式が存在しており, 計算手法の高度化が望まれる.

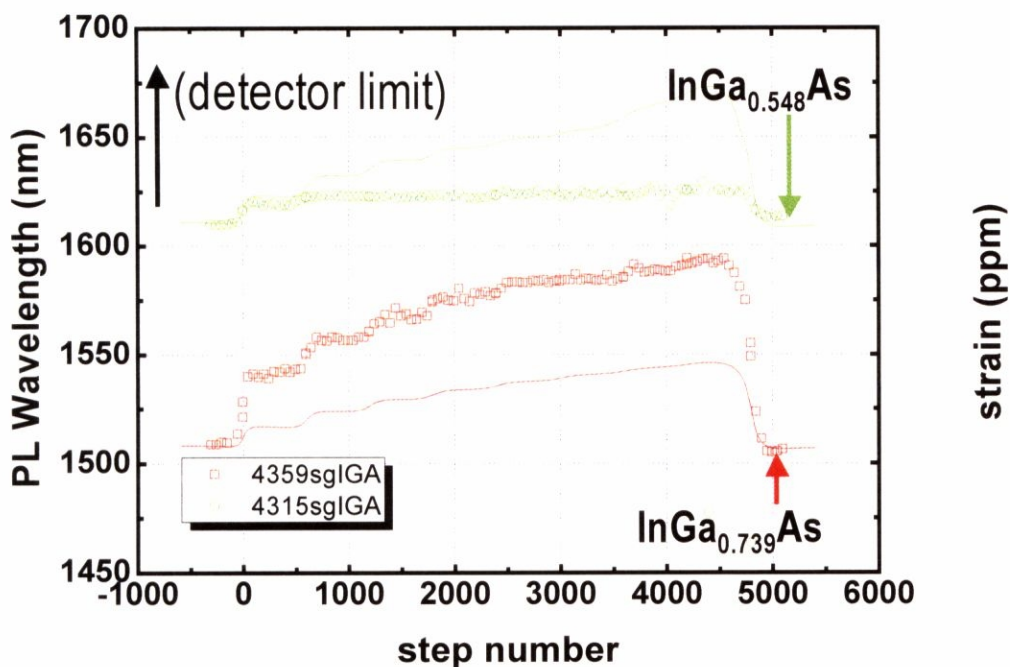


Figure 5-5: InGaAs 選択成長の PL 波長依存性.

5.4. まとめ

本章では気相拡散の適用範囲として、 $10\mu\text{m}$ 以下の狭幅選択成長、V 族組成の分布、高歪み時における発光波長計算手法の制限について指摘した。マスク幅が In の気相拡散長 $20\mu\text{m}$ を下回る場合、気相拡散効果が著しく減少することがわかった。また V 族組成に分布があり、発光波長 10nm 程度はシフトすることが示された。In の製膜種濃度比に As/P の取り込みが依存するという報告もあり、In/Ga の製膜種濃度比に依存した、即ち触媒的效果のモデルを用いて V 族分布を計算することが今後の展望である。高歪み時には組成から InGaAs において発光波長と歪み量が一致せず、計算手法として一部破綻する領域があることがわかった。これには InGaAsP といった一般化された式ではなく、より詳細な、例えば InGaAs に限定した式などを用いて確認することが必要である。

Reference

- [1] Y. Sakata, Y. Inomoto, K. Komatsu, "Surface migration effect and lateral vapor-phase diffusion effect for InGaAsP/InP narrow-stripe selective metal-organic vapor-phase epitaxy", *J. Crystal. Growth*, vol. **208** (2000), pp. 130-136.

-
- [2] G. Zimmermann, A. Ougazzaden, A. Gloukhian, E.V.K. Rao, D. Delprat, A. Ramdane, A. Mircea, "Selective area MOVPE growth of InP, InGaAs and InGaAsP using TBAs and TBP at different growth conditions", *J. Crystal Growth*, vol. **170** (1997), pp. 645-649.
- [3] 杉山正和, "FT-IR を用いた MOCVD 原料ガス分解反応の速度論的解析", 修士論文 (1996).
- [4] 二口尚樹, "選択 MOVPE 成長を用いた光能動・受動素子の集積化に関する研究", 博士論文 (2002).
- [5] S. Kumura, H. Kimura, K. Kobayashi, T. Oohira, K. Izumi, Y. Sakata, Y. Tsusaka, K. Yokoyama, S. Takeda, M. Urakawa, Y. Kagoshima, J. Matsui, "High-resolution microbeam x-ray diffractometry applied to InGaAsP/InP layers grown by narrow-stripe selective metal-organic vapor phase epitaxy", *Appl. Phys. Lett.*, vol. **77**, no. 9 (2002), pp. 1286-1288
- [6] 木村滋, 木村英和, 小林憲司, 泉弘一, 阪田康隆, 津坂佳幸, 松井純爾, "高分解能マイクロビーム X 線回折法による InGaAsP 選択成長層の評価", *SPring-8 information*, vol. **6**, no.3, (2001), pp. 211-217

第6章 選択成長偏波無依存半導体光増幅器の設計

これまでに選択成長のモデル化を継続して行い、マスクパターンから様々な選択成長領域の特性を計算できることを示したが、その目的はあくまでもデバイス設計のためである。本章では実際に偏波無依存の半導体光増幅器(SOA: Semiconductor Optical Amplifier)を設計し、一方デバイスを設計に基づいて作成し、設計手法が実際に応用可能なものかどうかを検討する。実際に設計に基づいてデバイスを作成することによって、応用上の要請を知ることも目的である。

6.1. 偏波無依存 SOA 作製に必要とされる特性

偏波無依存型の半導体光増幅器はモノリシック集積する際に付加価値の高いものである。偏波に依存しない利得には、歪みの精密な制御が必要であり、一般的に引っ張り歪みが必要だと言われている。Fig. 3-1 に示される通り、引っ張り歪みの場合は価電子帯のバンド端側が Light Hole(LH)になる。LH は TE モードに対して 1/3, TM モードに対して 4/3 の遷移確率を持ち、Heavy Hole(HH)にはない TM モードに対する利得を得ることができる。またその遷移確率が 4/3 と大きいことから、一般的なレーザの性質として引っ張り歪を導入することによって、閾値電流値の低減、変調速度の増大が見込まれる。但し、量子閉じ込め効果を用いた場合は $\hbar k^2 / 2m^*$ 分の量子準位が形成されるが、LH の有効質量は HH のそれと比較して 1/10 倍程であることに注意しなければならない。量子準位によりバンドギャップ端側の LH の準位は大きく変動し HH の準位に近づく。ホールを LH に選択的に再結合させたい場合、この問題を解決するために一般的に井戸層厚が 10nm 以上の厚いものとなっている。この際、臨界膜厚を越えてしまわないよう、注意しなければならない。

また、引っ張り歪みの場合伝導帯のバンドオフセット小さく、ある歪み量以上では井戸層の伝導帯エネルギーが障壁層のものを越えてしまい量子効果が弱まってしまう[1]。Thijs らによると、In 組成が 0.2%程度以下の領域では Type-II 量子井戸になるといわれている[2]。

選択成長でなければ、多くの偏波無依存光増幅器の試作例が存在する。典型的な歪み量は-0.1% - -0.25%で膜厚は 50 - 200nm の活性層がバルクになっているもの[3]。やはり-0.12%のバルク型のものが MOVPE での成長例もある[4]。Ito らの場合-0.47%で well が InGaAs 13nm / barrier InGaAsP 20nm の 5MQW の例で偏波無依存動作成長は量子井戸の作製は MOMBE, 埋め込み構造作成時は MOVPE で行っており[5]、引張歪みの MOVPE 成長は一般的に難しいといわれている。

6.2. 偏波無依存型半導体光増幅器の設計

A. 引張歪み選択成長の問題提起

MOVPE 選択成長の場合、受動素子と能動素子の集積を行う際に In(Ga)組成の変化がそのシフト分を与えるだけに、PL 波長のシフトを得るために同様に歪も一意的に決まってしまう、制御に柔軟性が無いという問題がある。特に選択成長領域に偏波無依存 SOA を作製する場合、選択成長領域が引張歪みを持つために、プレーナ部ではより引張歪みをかけなければいけなく、臨界膜厚との兼ね合いが難しいという問題点がある。MOVPE 選択成長で偏波無依存の SOA は、バルクで選択成長領域のみ用いて波長集積した例はあるが[6]、パッシブ部とアクティブ部の両者を集積するために選択成長を用いているものでの実現例は無い。

B. 気相拡散モデルを用いた偏波無依存半導体光増幅器の設計

本節では Fig. 6-1 に示されるマスクパターンを用い、普段本研究室の選択成長デバイスグループがアクティブ部として用いている選択成長領域幅が $20\mu\text{m}$ (gap20)、選択成長マスク $50\mu\text{m}$ ($\times 2.5$ と記されている列)に対して、偏波無依存となる歪みを設計する。

実際に設計した例の PL 波長分布を Fig. 6-2 に示す。Fig. 6-2 ではこれまで用いてきた 8 段の階段状マスク(選択成長領域幅 $20\mu\text{m}$)を用いた。左から 5 番目の段が、目的となるアクティブ部である。偏波無依存動作の設計パラメータは Ito らのもの[5]を用いた。計算によると、 $1.55\mu\text{m}$ の発光波長かつ井戸層歪み-4500ppm を得るために、プレーナ部では-9851ppm の引張歪み InGaAs が必要であることがわかった。膜厚はプレーナ部で 5nm、アクティブ部で 9.5nm である。

井戸層の膜厚分布、歪み量、臨界膜厚の分布を計算したものを Fig. 6-3 に示す。また、実際に作製した MQW の μPL 発光波長スペクトラムを Fig. 6-4 に示す。



Figure 6-1: レーザ成長用のマスクパターン.

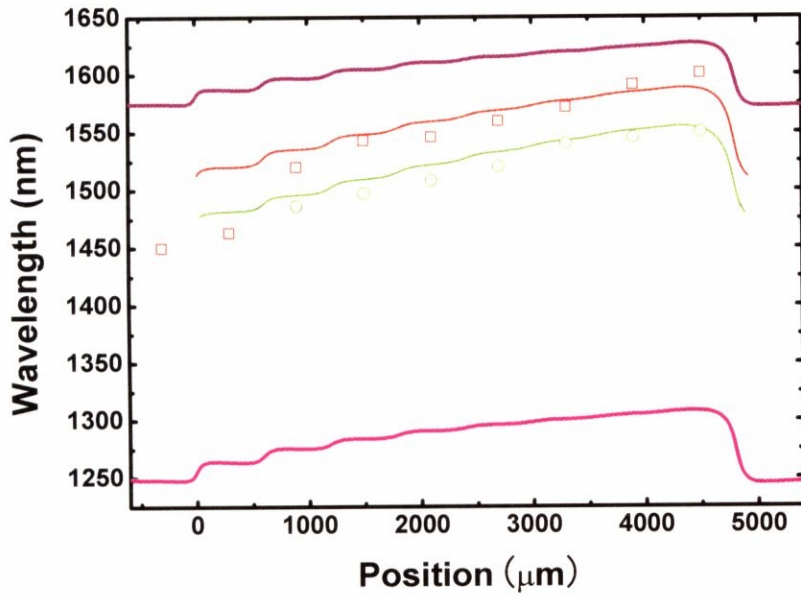


Figure 6-2: 選択成長領域が 1550nm の発光波長を持ち，引張歪みになる条件を設計した例.

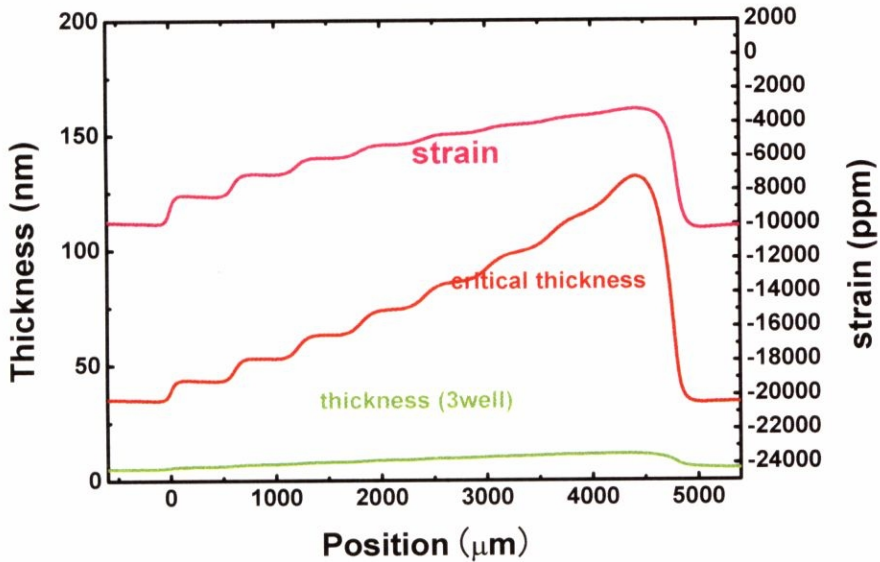


Figure 6-3: 歪み量と，臨界膜厚，井戸層膜厚分布.

C. 歪み補償構造

偏波無依存の SOA を作製するために，井戸層の発光波長・歪み・膜厚の値を設計で決定した．一方，バリア層に対しては自由度があり，井戸層の問題点である歪みを解決するために，歪み補償に重きをおいて設計する．圧縮歪み構造の場合 Fig. 3-14 に示されるとおり，選択成長領域では臨界膜厚が小さくなっていく問題があった．しかしながら引張歪みの場合，選択成長領域の方が歪み量が小さくなるので，臨界膜厚の制限が減ることがわかる(Fig. 6-3)．そこで，最も歪み緩和の恐れがあるのがプレー

ナ部であることがわかり、プレーナ部に歪み補償をかけるよう、設計した. Fig. 6-5 にはそのときの XRD ロッキングカーブである. また Fig. 6-5(b)には逆格子マッピングの測定結果を示しており、バリアと井戸層の歪みが InP に整合するようにし、歪みの緩和がないことが示されている.

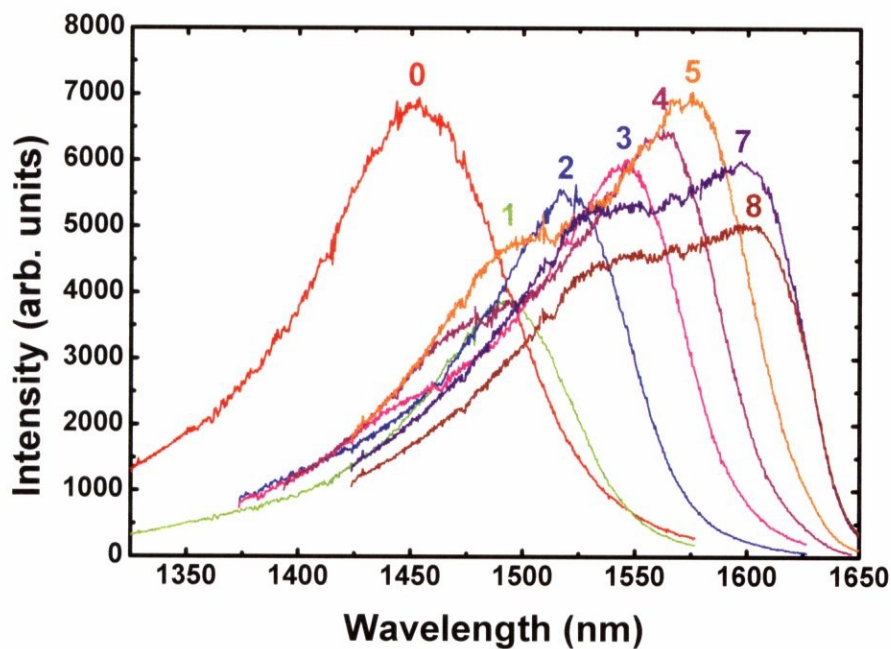


Figure 6-4: μ PL 測定結果. 数字は選択成長マスクの階段数. プレーナ部(0)では膜厚が薄いために準位の分離が見えない. 1 段目から 5 段目にかけて, PL 強度は徐々に強くなっていく. 一方, 7, 8 段目になるにつれ引張歪み量は小さくなるが, 膜厚の増大によってピークが 2 つに分離されていく.

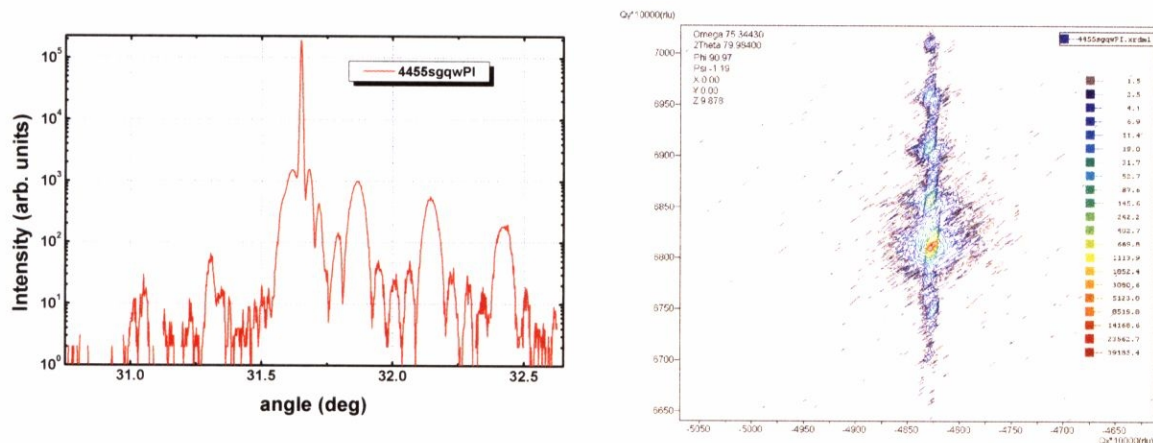


Figure 6-5: XRD 測定結果. (a)Rocking curve と(b)逆格子マッピング測定.

6.3. 設計に基づくデバイスの作製

第 2 節において設計した偏波無依存型半導体光増幅器を実際に作成した。設計したレーザ構造を Table 6-1 に示す。結晶成長後にはノマルスキ顕微鏡にて表面モフォロジを確認した。選択成長であるが故のマスク近傍での波状のモフォロジが見える以外は鏡面であった。

また、MOVPE 成長後のレーザ作成手順を Table 6-2 に示す。

Table 6-2: LD 作成手順.

導波路パターン形成

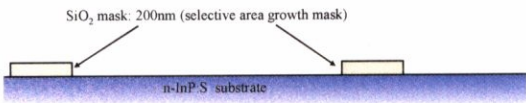
工程	使用装置等	目的, 内容
1	有機洗浄	アセトン, エタノール, 水, N2 ブロー. 90°C オープンで少しベーク.
2	スピンコータ	Primer, レジスト S1805 を 500 回転 5 秒, 6000 回転 40 秒.
3	マスクアライナ	露光時間 3.8 秒
4	現像	現像液 NMD-3 を用いて 15 秒程度.

導波路形成

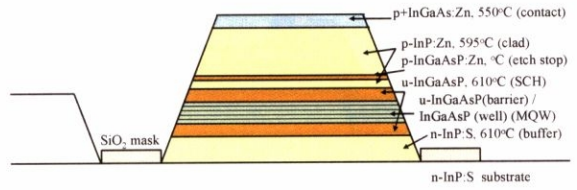
5	InGaAs コンタクト層エッチング	H2SO4: H2O2: H2O (SBW)=1:1:5 を 5°C で 20 秒エッチング. リフトオフを考え, 10 秒程度マスクアライナで全面を露光する.
6	Al2O3 蒸着	EB 蒸着装置を用いて絶縁膜として Al2O3 を斜め蒸着. 60° と -60° で 200nm (EB 付随の水晶振動子膜厚計で 400nm). 60° ~ 85° まで回しながら蒸着する.
7	リフトオフ	アセトンを加熱, 超音波 50% で 5 分程度.
8	InP クラッド層エッチング	HCl (36%) と HCl (20%) = 1:5 で混ぜ, 常温下で 3 分程エッチング.

電極形成

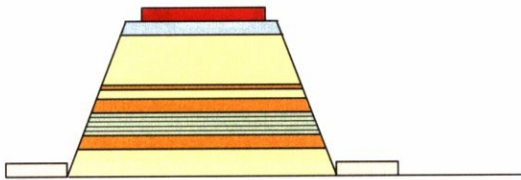
9	Ti 蒸着	InGaAs と Au と合金化する Ti をまず蒸着する. 50nm. 斜め蒸着で表示は 50x2=200nm. Ti の膜厚表示は 1/2 とい噂もあるが, 自分がやるとそうならない.
10	Au 蒸着	200nm. 斜め蒸着で表示は 200x2=400nm.
11	裏面研磨	熱拡散と, 劈開のために, サリチル酸フェニルで研磨器台に固定した後, 研磨器で厚さ 120um になるまで研磨する.
12	裏面 Au 蒸着	裏面電極形成のため, クイックコータを用いてプラズマ電流 12mA くらいで 13 分行う. この時 Au 厚さは 200nm. 裏面 n 型は仕事関数上コンタクトが取りやすいのでクイックコータで蒸着する.
13	アニール	Ti/Au を合金化するために, 簡易アニール装置を用いて 385°C で 30 秒間程度アニール.



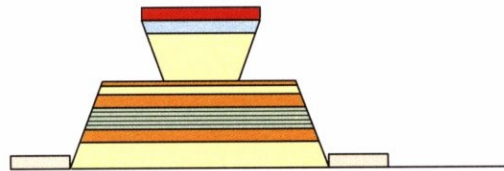
(1) 選択成長マスクパターンの形成



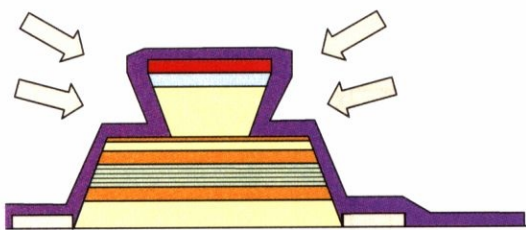
(2) MOVPE 成長でレーザ構造(Table 6-2)を作製.



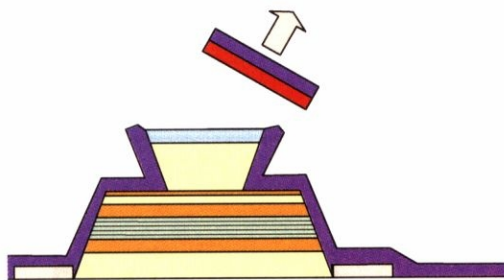
(3) 導波路パターンを形成



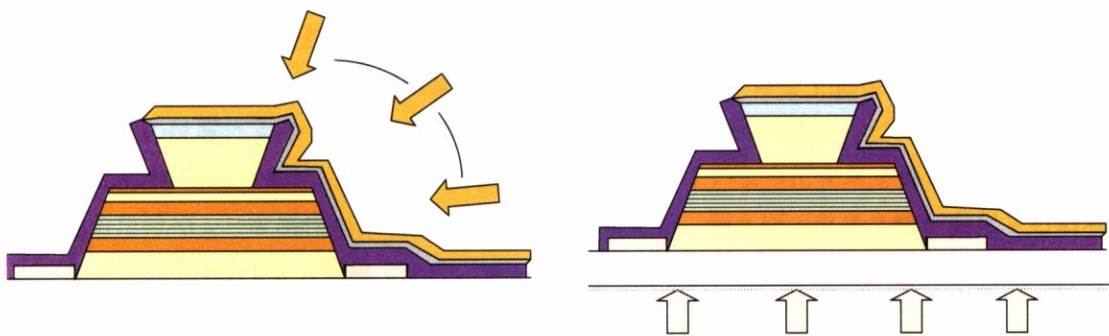
(4) InGaAs コンタクト, InP クラッド層をエッチング



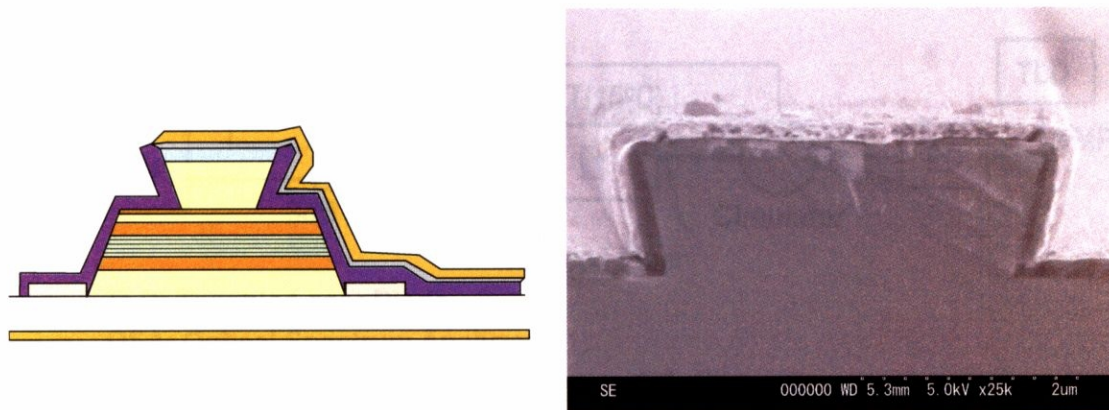
(5) 斜めから Al₂O₃ を 200nm 蒸着.



(6) 導波路のパターンをリフトオフ



(7) 斜めから電極 Ti (50nm) / Au (200nm)を蒸着. (8) 裏面を 120 μ m まで機械研磨.



(9) クイックコータで裏面に Au 200nm 蒸着. 実際に作製したレーザ構造のリッジ

このようなプロセスで実際にレーザを作製した. 目的としたアクティブ領域をレーザ化して, Fig. 6-6 にはパルス電流注入による発光強度の様子を示す. パルスでは発振していることがわかり, その閾値電流は 60mA であった.

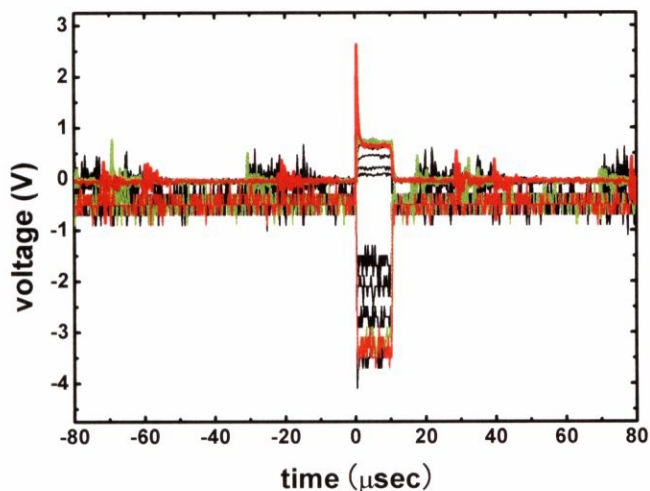


Figure 6-6: パルス電流を注入した時の光出力をフォトダイオードで受けたものをオシロスコープで観測したグラフ. 緑の線が 60mA, 赤の線が 80mA. 発振電流値は 60mA であった.

6.4. 設計に基づくデバイスの ASE 測定

マスク上のいくつかの部分レーザとして切り出し、そのいくつかについて電流と自然放出光のスペクトラムを観測した。測定系を Fig. 6-6 に示し、スペクトラムを Fig. 6-7 に示す。

マスク上の位置によって、発光波長は異なるが、(選択成長領域幅)/(マスク幅)=2.5 である場所の発光波長は 1550 付近であり、設計通りである。また Fig. 6-1 のようにマスク幅が変化していくのは、その変化分だけのレーザ特性が集積されているとも言える。例えば、マスク幅が変化する領域での ASE スペクトラムを Fig. 6-8 の紫線で示す。マスク幅の 2 領域にまたがる、ブロードな ASE スペクトラムが得られている。

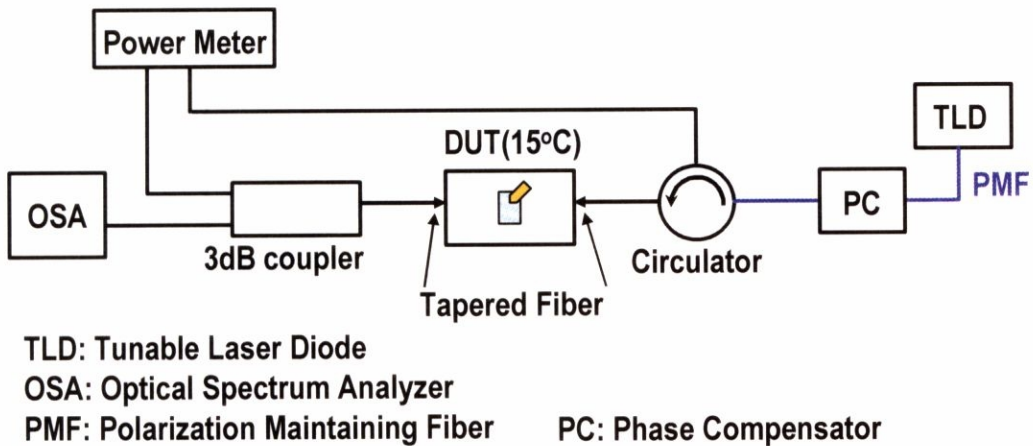


Figure 6-7: 測定系の図. 今回は主に、DUT 左側のみ使用した.

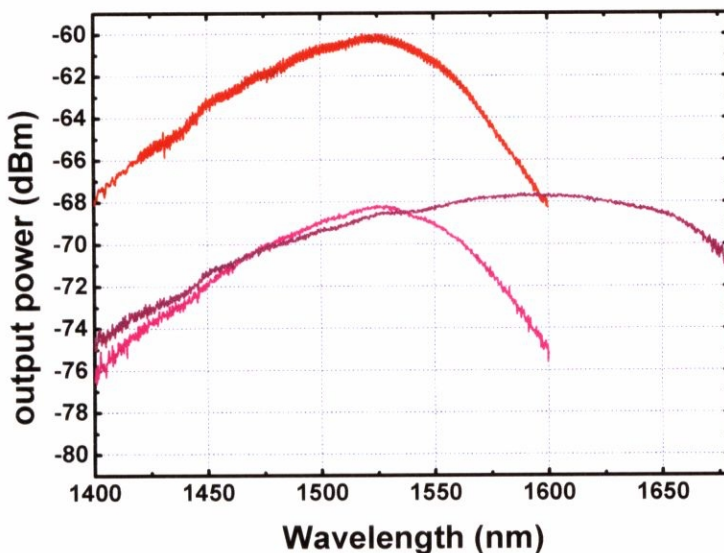


Figure 6-8: ASE スペクトラムを OSA で測定したもの.

最後に、設計対称だった、選択成長領域幅 $20\mu\text{m}$ 、選択成長マスク幅 $50\mu\text{m}$ の領域をレーザ構造にし、ASE スペクトラムを測定したものを Fig. 6-9 に示す。その領域に設計通り 1550nm 付近の放出光を観測した。ピークが 1558nm 付近に、また 1530nm 付近にもピークが見られ、PL 発光スペクトラムを反映している。但し今回作製したレーザは CW では発振しなかった。今回、作製したデバイスのうち選択成長領域ではプロセスの不完全さから耐圧の取れないものが多かった。これについては今後の向上が見られる。

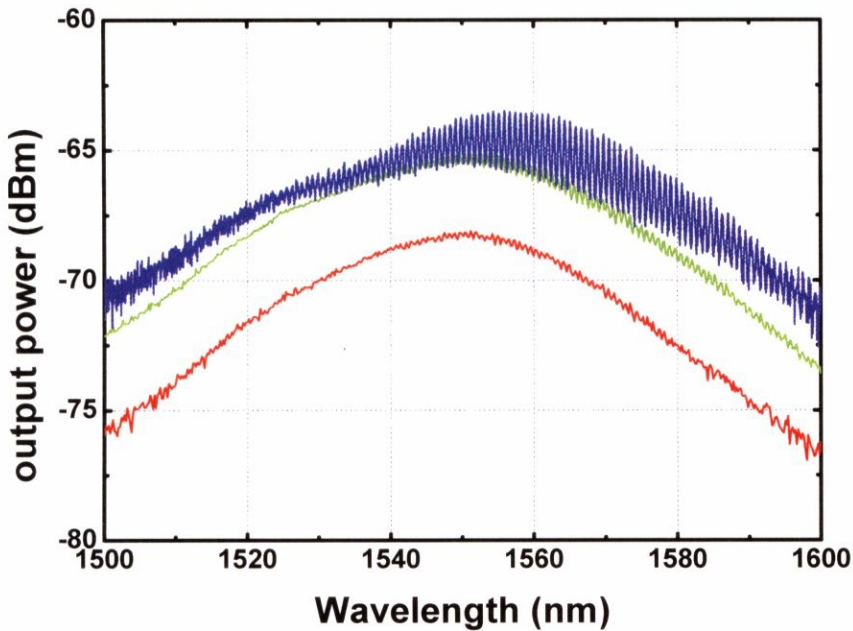


Figure 6-9: 作成した LD の CW 電流注入特性を OSA で観測したもの。ASE のピークが $1550\text{-}1560\text{nm}$ の領域に存在している。

6.5. まとめと結論

偏波無依存型の半導体光増幅器を設計し、選択成長領域幅 $20\mu\text{m}$ で選択成長マスクが $50\mu\text{m}$ の領域で -0.46% の歪が必要な場合は、プレーナ領域では -0.99% の歪が必要なことを計算で示した。歪み・臨界膜厚・膜厚・PL ピーク波長を計算し、総合的気相拡散モデルを設計ツールとして用いた。また、バリア層を歪み補償として特にプレーナ部に対して最適化するべきであることを示した。そして実際にその条件でレーザ構造を作成し、電流注入特性を調べた。レーザはパルス電流注入の時でのみ発振し、CW の場合は ASE スペクトラムのみを観測した。ASE スペクトラムは 1550nm 領域にピークを持っており、設計通りの特性を得られた。

Reference

- [1] 横内則之, “ひずみ量子井戸光半導体”, *応用物理*, vol. **74** (2005), pp. 1238-1241.
- [2] P.J.A. Thijs, L.F. Tiemeijer, J.J.M. Binsma, T. Dongen, “Progress in Long-Wavelength Strained-Layer InGaAs(P) Quantum-Well Semiconductor Lasers and Amplifiers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. **30**, no. 2 (1994), pp. 477-499.
- [3] K. Morito, M. Ekawa, T. Watanabe, Y. Kotaki, “High-Output-Power Polarization-Insensitive Semiconductor Optical Amplifier”, *J. Lightwave Technol.*, vol. **21**, no. 1 (2003), pp. 176-181.
- [4] M. Itoh, Y. Shibata, T. Kakitsuka, Y. Kadota, Y. Tohmori, “Polarization-Insensitive SOA With a Strained Bulk Active Layer for Network Device Application”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. **14**, no. 6 (2002), pp. 765-767.
- [5] T. Ito, N. Yoshimoto, K. Magari, H. Sugiura, “Wide-Band Polarization-Independent Tensile-Strained InGaAs MQW-SOA Gate”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. **10**, no. 5 (1998), pp. 657-659.
- [6] S. Kitamura, K. Komatsu, M. Kitamura, “Polarization-Insensitive Semiconductor Optical Amplifier Array Grown by Selective MOVPE”, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. **6**, No. 2 (1994), pp. 173-.

第7章 本研究のまとめと結論

第3章では、MOVPE 選択成長の気相拡散が最も支配的であろうとの想定の下、InGaAsP の III 族側製膜種それぞれに対して気相拡散モデルを用い、任意の形状のマスクに対する製膜種の濃度分布を計算した。その結果、選択成長幅が $60\mu\text{m}$ ないし $40\mu\text{m}$ と広いときの中央部の発光波長、膜厚の計算結果と実測値が非常に精度良いことがわかった。一方、選択成長領域幅が $20\mu\text{m}$ の時は MQW の発光波長の一部が異なった。断面方向の膜厚プロファイルを測定し、 $20\mu\text{m}$ より広幅な時は懸垂線的膜厚プロファイルを持つのにに対して、狭幅の時は平坦になるという現象が見られた。

第4章では表面拡散に調べ、InP 年輪成長を行いマスク近傍での膜厚の時間発展性を調べた。その結果マスク近傍以外では一定の成長レートを持つのにに対し、マスク近傍部では成長レートが時間に比例して増加し、一定の成長レートで飽和した。これに対応する物理現象を考え、(111)B 面からのマイグレーションをモデル化した。成長初期には気相拡散による成長レートに等しいが、成長時間が経過するにつれ(111)B 面が形成され、(100)面への供給される。一方、(111)B 面の拡散長と思われる $1.44\mu\text{m}$ を超えると(100)面への供給量は一定となる。このモデルは従来から言われている、マスクから表面マイグレーションする成分が気相拡散として考慮すべきであることを示している。

第5章では気相拡散の適用範囲として、 $10\mu\text{m}$ 以下の狭幅選択成長、V 族組成の分布、高歪み時における発光波長計算手法の制限について指摘した。マスク幅が In の気相拡散長 $20\mu\text{m}$ を下回る場合、気相拡散効果が著しく減少することがわかった。また V 族組成に分布があり、発光波長 10nm 程度はシフトすることが示された。In の製膜種濃度比に As/P の取り込みが依存するという報告もあり、In/Ga の製膜種濃度比に依存した、即ち触媒的効果のモデルを用いて V 族分布を計算することが今後の展望である。高歪み時には組成から InGaAs において発光波長と歪み量が一致せず、計算手法として一部破綻する領域があることがわかった。これには InGaAsP といった一般化された式ではなく、より詳細な、例えば InGaAs に限定した式などを用いて確認することが必要である。

第6章では、偏波無依存型の半導体光増幅器を設計し、選択成長領域幅 $20\mu\text{m}$ で選択成長マスクが $50\mu\text{m}$ の領域で -0.46% の歪が必要な場合は、プレーナ領域では -0.99% の歪が必要なことを計算で示した。歪み・臨界膜厚・膜厚・PL ピーク波長を計算し、総合的気相拡散モデルを設計ツールとして用いた。また、バリア層を歪み補償として特にプレーナ部に対して最適化すべきであることを示した。そして実際にその条件でレーザ構造を作成し、電流注入特性を調べた。レーザはパルス電流注入の時でのみ発振し、CW の場合は ASE スペクトラムのみを観測した。ASE スペクトラムは 1550nm 領域にピークを持っており、設計通りの特性を得られた。

以上の実験・計算を通し、MOVPE 選択成長の気相拡散モデルを用いた光デバイス設計手法を確立した。

本研究に関する発表等 **Related Publications**

Journal Paper:

- [1] T. Shioda, T. Doi, A. Al Amin, X.L. Song, M. Sugiyama, Y. Shimogaki, Y. Nakano, “Simulation and Design of the Emission Wavelength of Multiple Quantum Well Structures Fabricated by Selective Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy”, *Thin Solid Films*, vol. **498**, no. 1-2, pp. 174-178 (2006). (3章前半相当)
- [2] T. Shioda, M. Sugiyama, Y. Shimogaki, Y. Nakano, “Vapor Phase Diffusion and Surface Migration Combined Model Analysis for InGaAsP/InP Selective Area Growth”, *J. Crystal Growth* (to be submitted) (4章相当分)

Proceedings of International Conferences:

- [3] T. Shioda, T. Doi, A. Al Amin, X. Song, M. Sugiyama, Y. Shimogaki, Y. Nakano, “Simulation and Design of the Emission Wavelength of Multiple Quantum Well Structures Fabricated by Selective Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy”, *The 3rd Asian Conference on Chemical Vapor Deposition (ACVD-III)*, O-B22, p. 63, Taipei, Taiwan, 12-14 November (2004).
- [4] T. Shioda, M. Sugiyama, Y. Shimogaki, Y. Nakano, “Prediction Method for the Bandgap Profiles of InGaAsP Multiple Quantum Well Structures Fabricated by Selective Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy”, *The 17th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM 2005)*, Glasgow, Scotland, UK, 8-12 May (2005).
- [5] A. Al Amin, K. Sakurai, T. Shioda, M. Sugiyama, Y. Nakano, “Selective Area MOVPE Based InP WDM Channel Selector”, *The 17th Indium Phosphide and Related Materials Conference (IPRM 2005)*, Glasgow, Scotland, UK, 8-12 May (2005).
- [6] T. Shioda, M. Sugiyama, Y. Shimogaki, Y. Nakano, “Vapor Phase Diffusion and Surface Migration Combined Model Analysis for InGaAsP/InP Selective Area Growth”, *International Conference on Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy XIII (ICMOVPE-XIII)*, Miyazaki, Japan, 22-26, May (2006) (submitted).
- [7] R. Onitsuka, M. Sugiyama, T. Shioda, Y. Shimogaki, Y. Nakano, “Reactor-scale Uniformity of Selective-Area Growth Performance in InGaAsP System”, *International Conference on Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy XIII (ICMOVPE-XIII)*, Miyazaki, Japan, 22-26, May (2006) (submitted).

Proceedings of Domestic Conferences, Symposiums:

- [8] 塩田倫也, 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭, “InGaAsP 選択成長における量子井戸発光波長の予測”, 化学工学会第70年会, M301, 3月22-24日, 名古屋大学 (2005)
- [9] 塩田倫也, アルアミン A., 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭, “MOVPE 選択成長のモデリングと InGaAsP/InP 系選択成長の特性予測”, 第52回応用物理学関係連合講演会, 31a-ZM-4, 3月29日

-4 月 1 日, 埼玉大学 (2005).

- [10] 櫻井謙司, アルアミンアブドゥッラー, 塩田倫也, 杉山正和, 中野義昭, “選択成長による光合分波器と半導体光増幅器の集積化”, 電気情報通信学会 2005 年総合大会, C-3-19, 3 月 21-24 日, 大阪大学 (2005).
- [11] T. Shioda, M. Sugiyama, Y. Shimogaki, Y. Nakano, “Predictive Modeling of the Properties of InGaAsP/InP Grown by Selective Area Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy”, 24th Electronic Materials Symposium, メルパルク松山, F6, 7 月 4 日 (2005).
- [12] 塩田倫也, 宋学良, アルアミン A., 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭, “InGaAsP/InP 系 MOVPE 選択成長のモデリングにおける表面拡散の影響”, 第 66 回応用物理学会学術講演会, 10p-ZA-13, 徳島大学, 9 月 7-11 日 (2005).
- [13] アブドゥラアルアミン, 塩田倫也, 杉山正和, 中野義昭, “テーパーマスクを用いた MOVPE 選択成長による半導体光増幅器の試作”, 第 66 回応用物理学会学術講演会, 徳島大学, 8a-T-2, 9 月 7-11 日 (2005).
- [14] M. Sugiyama, T. Shioda, A. Al Amin, X.L. Song, Y. Shimogaki, Y. Nakano, “Simulation and Design of Bandgap Modulation Brought by Selective-area Metalorganic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE)”, The 2005 CREST Symposium on “Function Evolution of Materials and Devices based on Electron / Photon Related Phenomena (FEMD)”, p. 133, 10 月 18-19 日, コクヨホール(品川), 東京 (2005).
- [15] 塩田倫也, イットフーチョン, 宋学良, 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭, “InGaAsP/InP 系 MOVPE 選択成長を用いた半導体光増幅器の偏波依存性”, 第 53 回応用物理学関係連合講演会, 3 月 22-26 日, 武蔵工業大学, 東京 (2006).
- [16] 塩田倫也, 杉山正和, 霜垣幸浩, 中野義昭, “InGaAsP/InP 系 MOVPE 選択成長における気相拡散・表面拡散複合反応モデル”, 化学工学会第 71 年会, H314, 3 月 28-30 日, 東京工業大学, 東京 (2006).

謝辞 Acknowledgement

本研究を行うに当たり、研究全般にわたり絶えず前向きなご指導と数々の有益な御助言を頂きました中野義昭教授に感謝いたします。

本研究のテーマ設定と、研究全般、学会発表等に対して絶えずご指導と数々の有益なご助言を頂きました杉山正和助教授に感謝いたします。

清水大雅助手には、研究に対する態度の指導と、研究設備や装置の使用上の総合面から支えて頂きました。心より感謝申し上げます。

中野研究室 PD である竹中充氏には理論面から数々の有用なご指摘を頂きました。宋学良氏には本研究室における選択成長に対するこれまでの重要な技術情報を教えて頂くとともに、プロセス装置や測定方法を教えて頂きました。アブドゥラアルアミン氏には研究に取り掛かり時に一部共同で研究させて頂き、MOVPE 選択成長プロセス・評価方法を教えていただくとともに、有用な議論を行うことができました。各人に心より感謝申し上げます。

宮川宏枝秘書には物品購入や学会発表などにおける金銭的な業務を引き受けて頂きました。心より感謝申し上げます。

博士課程であるイトフチョン氏には本人の最も忙しい時期であったにも関わらず、本修士論文第6章における全般的なアドバイスと、レーザプロセスから評価・測定方法を教えて頂きました。マテリアル工学専攻霜垣研究室の中野貴之氏には MOVPE 装置のトラブル対処法やメンテナンス方法、また X 線回折に纏わる知識を教えて頂きました。各人に心より感謝申し上げます。

雨宮智宏氏には同期の間柄を通じて装置使用方法や、研究室、大学での生活上での励ましやアドバイスを頂きました。心より感謝申し上げます。

鬼塚隆祐氏には MOVPE 装置のメンテナンス業務を補助して頂きました。武田浩司氏には一部のフォトマスクを作成して頂きました。各人に心より感謝申し上げます。

本研究は前任者の土居猛氏の研究を引き継いだものであります。本研究の土台を築いて下さったことに心より感謝申し上げます。

この他にも多くの方々のお世話になりました。ここに改めて皆様に感謝申し上げます。