

平成14年度 研究開発成果報告書

「超高速光リンク光源の研究開発」

目 次

I 緒言 (技術背景と現状技術)	3
II 研究開発の全体計画	4
II -1 研究開発課題の概要	4
II -2 研究開発目標	5
II -2-1 最終目標	5
II -2-2 中間目標	5
II -3 研究開発の年度別計画	6
II -4 研究開発体制	7
II -4-1 研究開発管理体制	7
II -4-2 研究開発実施体制	8
III 研究開発の概要 (平成14年度まで)	9
III-1 研究開発実施計画	9
III-1-1 研究開発の計画内容	9
III-1-2 研究開発課題実施計画	10
III-2 研究開発の実施内容	11
IV 研究開発実施状況 (平成14年度)	12
IV -A-1 GaInAs を活性層に用いた端面発光型レーザの試作	12
IV -A-1-a 目的	12
IV -A-1-b 研究成果	12
IV -A-1-c 結論	14
IV -A-1-d 参考文献	14
IV -A-2 プロセス技術の開発	15
IV -A-2-a 目的	15
IV -A-2-b 研究成果	15
IV -A-2-b-1 ドライエッチング法によるメサストライプ形成技術	15
IV -A-2-b-2 低接触抵抗電極形成技術	18
IV -A-2-c 結論	18
IV-A-3 超高速面発光レーザに関する基礎検討	19
IV -A-3-a 目的	19
IV -A-3-b 研究成果	19
IV -A-3-c 結論	22
IV -A-3-d 参考文献	22

IV-B-1	GaInAs レーザ試作の為の結晶成長	23
IV -B-1-a	目的	23
IV -B-1-b	研究成果	23
IV -B-1-c	結論	24
IV-B-2	高品質 GaInNAs 活性層作製の為の超高真空結晶成長室の作製	25
IV -B-2-a	目的	25
IV -B-2-b	研究成果	25
IV -B-1-c	結論	26
IV-B-3	GaInNAs の物性評価	27
IV -B-3-a	目的	27
IV -B-3-b	研究成果	27
IV -B-3-b-1	GaInNAs/GaAs 単一量子井戸の結晶性のフォトルミネッセンスによる評価	27
IV-B-3-b-2	GaInNAs/GaAs 単一量子井戸のエネルギー準位の測定	29
IV -B-3-b-2-1	高密度励起PL測定	29
IV- B-3-b-2-2	フォトリフレクタンス測定	31
IV- B-3-b-2-3	PL 励起スペクトル (PLE) 測定	32
IV-B-3-c	結論	34
IV-C	総括	35

(添付資料)

1 研究発表、講演、文献等一覧

I 緒言（技術背景と現状技術）

IT時代を支えるのがネットワークである。ネットワークの高速化が、今日のブロードバンド旋風を起こしている。イーサネットに代表されるLANでは、4－5年毎に10倍の通信速度が3倍のコストで要求・実現されてきた。（ビット単価は、約1/3になる。）1 Gbps以降は、ネットワークが光リンクで構築されるようになっており、信号源には半導体レーザが使用されている。2002年には、10 Gbpsの規格がほぼ確定し、対応する製品も市場に出始めた。次期規格は、2006年頃に概要が決まり量産化は2010年頃と予想される。通信速度は、40 Gbps以上が期待される。

現在、40 Gbps 以上の超高速光源では、半導体レーザに外部変調器を組み合わせる研究開発が進められている。しかし、外部変調器の周辺回路を含めた光モジュールは、どうしても大型、高消費電力、高価格となる。低コスト化のためには、外部変調器を使用することなく直接変調が可能な超高速半導体レーザが望ましい。しかし、材料の物理限界からその研究開発は現在壁に直面している。現在実用化されている最速の半導体レーザは 10 Gbps である。他方、複数の半導体レーザを用いる並列化が考えられる。しかし、並列数が増えると指数関数的に歩留まりが悪化しコストが上昇する。因って、市場が許容する価格（現行モジュールの3倍程度）で光モジュールを作製することは極めて難しい。

本研究開発では、（株）日立製作所が所有する半導体レーザ材料、素子作製・評価技術を発展させることにより、世界最速の光リンク用半導体レーザを作製することを目標としており、動作速度としては40 Gbps動作を目指している。その結果、光モジュールの並列数を削減できる。従って、低コスト化において優位となる。

II 研究開発の全体計画

II -1 研究開発課題の概要

(株) 日立製作所が所有する半導体レーザ材料技術、素子作製・評価技術を発展させて、世界最速の光リンク用半導体レーザを作製する。動作速度としては、40 Gbps 動作を目指す。

半導体レーザの高速化には、大きな光学利得を発生する材料を活性層に用いる必要がある。図1に、種々の半導体レーザにおける量子井戸活性層の伝導帯のバンド不連続 (ΔE_c) と利得定数 (G_0) の関係を示す。 ΔE_c が大きく量子井戸が深い程、大きな光学利得を発生することが判る。光学利得発生に寄与しない高量子準位でのキャリア分布が減少する為である。従来材料の GaInPAs および AlGaInAs の利得定数は、500 および 1000 cm^{-1} と小さい。この物性が半導体レーザの超高速動作を阻止している主要原因である。これに対して、(株) 日立製作所が開発した新材料 GaInNAs の利得定数は 1800 cm^{-1} と、活性層材料のなかで最大であり、従来材料の数倍の大きさである。

本研究開発では、①超高速動作に適した半導体レーザの構造の開発と、②高品質 GaInNAs 多重量子井戸活性層の作製技術の開発を平行して行い、チェックポイントを経て両技術を合体させて③目標のレーザを試作する。

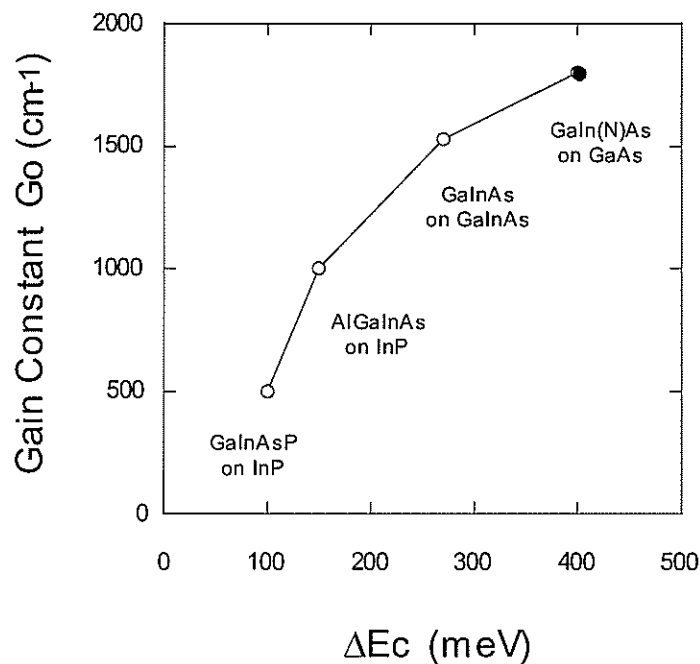


図1 種々の半導体レーザにおける量子井戸活性層の ΔE_c と G_0 の関係

II -2 研究開発目標

II -2-1 最終目標 (平成 17 年 3 月末)

世界最速の光リンク用 GaInNAs 半導体レーザを実現する。

- (1) 動作速度： 40 Gbps
- (2) 波長： 1.3 μ m 帯

II -2-2 中間目標 (平成 16 年 3 月末)

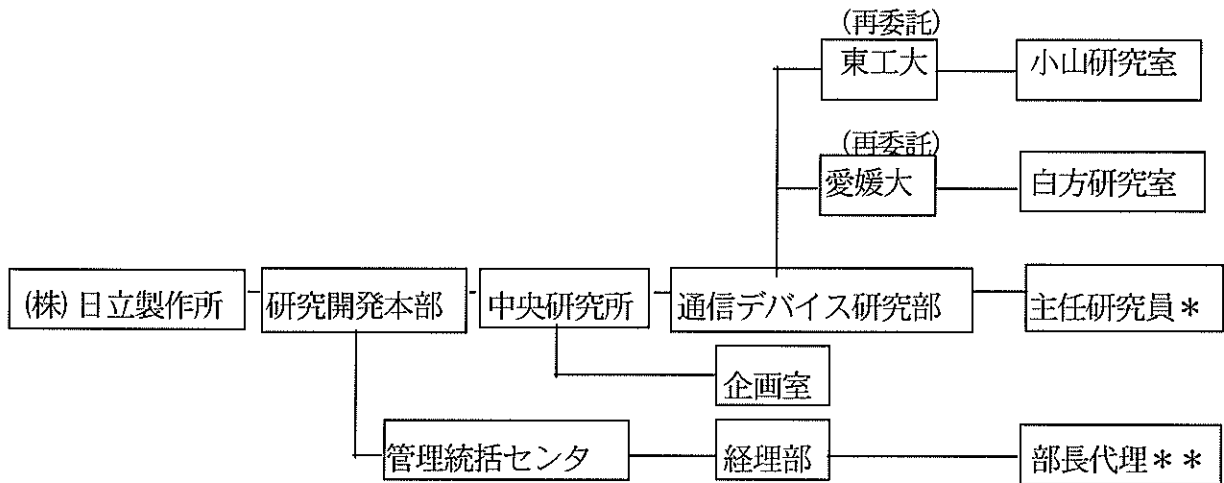
- (1) GaInAs レーザ：40 Gbps の動作速度
- (2) 1.3 μ m 帯 GaInNAs 多重量子井戸の作製

II -3 研究開発の年度別計画

研究開発項目	14年度	15年度	16年度	17年度
① 超高速レーザ構造の研究開発			→	
② 高品質活性層の作製技術の研究開発			→	
③ 超高速光リンク用半導体レーザの研究開発				→

II -4 研究開発体制

II -4-1 研究開発管理体制

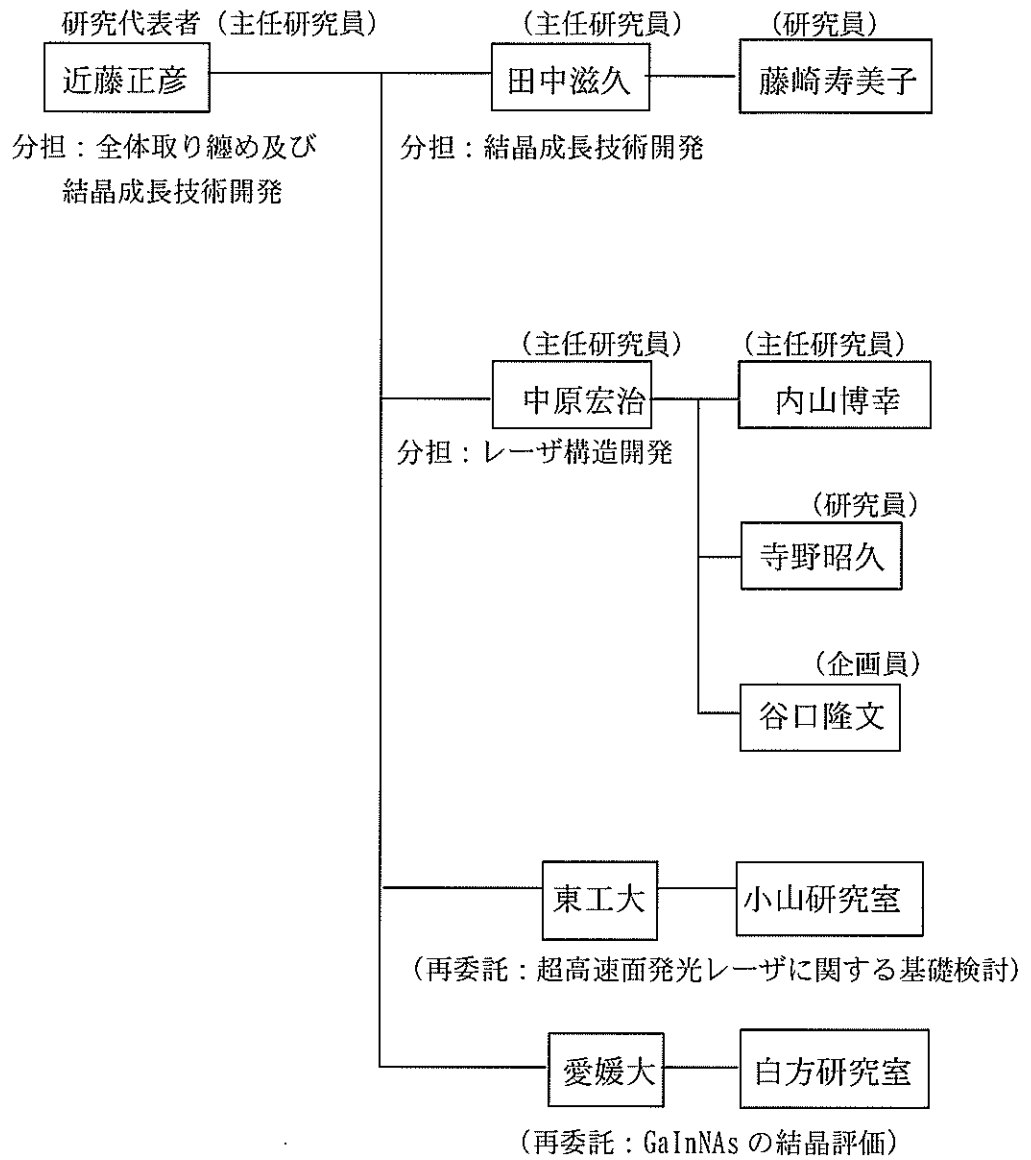


* : 研究代表者

** : 経理責任者

II -4-2 研究開発実施体制

通信デバイス研究部 部長：武鎗 良治



III 研究開発の概要（平成 14 年度まで）

III-1 研究開発実施計画

III-1-1 研究開発の計画内容

本研究開発の開始年度である平成 14 年度は、平成 16 年度に行う中間目標までの研究開発に先立ち、課題項目の詳細化、既存技術調査、主要研究設備の調達等を行った。具体的には、実施計画に基づき、下記の項目の研究開発を行った。

A 超高速レーザ構造の研究開発

- A-1) GaInAs を活性層に用いた端面発光型レーザの試作
- A-2) プロセス技術の開発
- A-3) 超高速面発光レーザに関する基礎検討（東工大へ再委託）

B 高品質活性層の作製技術の研究開発

- B-1) A-1) のレーザ試作の為に結晶成長
- B-2) 高品質 GaInAs 活性層作製の為に超高真空結晶成長室の作製
- B-3) GaInAs の物性評価（一部を愛媛大へ再委託）

III-1-2 研究開発課題実施計画

(平成 14 年度)

研究開発項目	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
A 高速レーザ構造の研究開発				
A-1 GaInAs 端面発光型レーザの試作と評価				→
A-2 活性層の微小体積化におけるプロセス技術の課題抽出				→
A-3 超高速面発光レーザに関する基礎検討				→
B 高品質活性層の作製技術の研究開発				
B-1 端面発光型レーザ試作の為に結晶成長				→
B-2 超高真空結晶成長室の設計、作製および日立所有の周辺装置への接続工事				→
B-3 GaInAs の結晶評価				→

III-2 研究開発の実施内容

平成14年度までの本研究開発の研究内容および予算使用は、概ね計画どおりに実施した。現在、本研究開発は全般として予定通り進捗している。

研究内容項目ごとの詳細な実施状況は、第IV章で述べる。

IV 研究開発実施状況 (平成 14 年度)

IV -A-1 GaInAs を活性層に用いた端面発光型レーザの試作

IV A-1-a 目的

活性層に GaInAs と特性がほぼ同等と考えられる GaInAs (波長: 約 $1.1\mu\text{m}$) を用いて端面発光型レーザを試作する。作製した素子の特性を解析することにより、超高速レーザ設計の指針を得る。

IV -A-1-b 研究成果

図 A-1-1 に、作製した素子の断面構造を示す。n-GaAs 基板の上に、n- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ クラッド層 (層厚 $1.5\mu\text{m}$)、 $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{As}$ 量子井戸層 (層厚 10nm) 及び GaAs 障壁層 (層厚 150nm) から構成される単一量子井戸活性層、p- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ クラッド層 (層厚 $1.5\mu\text{m}$)、p-GaAs キャップ層 (層厚 200nm) を、MBE (Molecular Beam Epitaxy) 法により順次形成した。III 族元素の原料は、金属のアルミニウム、ガリウム、及び、インジウムを用いた。V 族元素の原料には、金属砒素を用いた。n 型ドーパントとしては Si を、p 型ドーパントとしては Be を用いた。同図に示すように、そのエピウエハに、ウエットエッチングによりメサストライプを形成した。メサの方向は、逆メサ方向とした。図 A-1-2 に、メサストライプ周辺部の電子顕微鏡写真を示す。実際に形成したメサは、図 A-1-1 に示す形状とは異なり、高さ方向の中央部にくびれた部分 (ウエスト) を有する。また、メサ外部の p- $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ クラッド層のエッチング残し厚を 100nm に設定した。その後、電流狭窄の為に SiO_2 とポリイミドを堆積し、p 側電極および n 側電極を形成した。そのウエハから、劈開法により共振器長約 $200\mu\text{m}$ のレーザ素子を得た。素子の前面と後面には、誘電体積層構造の高反射膜を形成した。

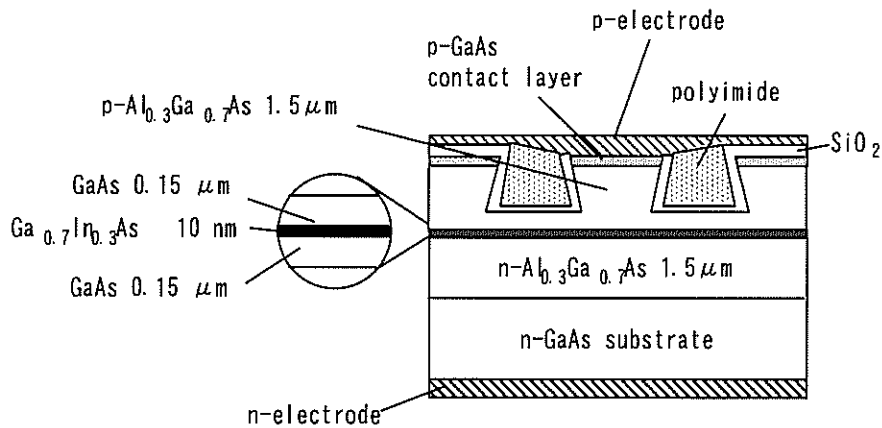


図 A-1-1 作製した素子の断面構造

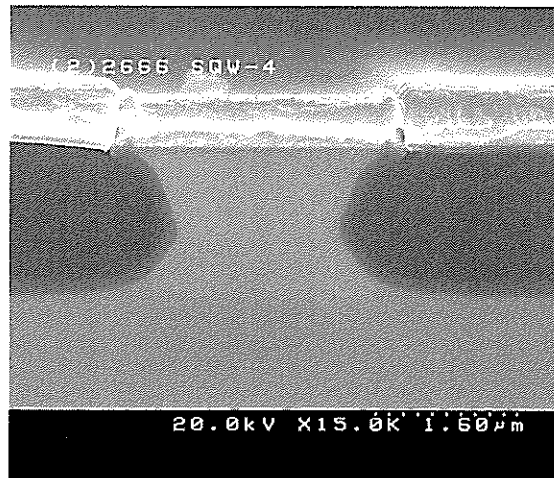


図 A-1-2 メサストライプ周辺部の電子顕微鏡写真

本素子は、室温において発振波長 $1.08\mu\text{m}$ でレーザ動作し、閾値電流は約 4mA と良好な値を得た。しかし、素子抵抗は約 8Ω と大きいことがわかった。RC 時定数による高周波特性劣化、及び高注入電流における発熱による光-電流特性劣化を抑制する観点から今後、素子抵抗の低減を検討する必要がある。

本素子の高速動作の適応性を検討するために、大振幅方形波電流注入による緩和振動周波数 (f_r) の測定を行った。バイアス電流はしきい電流に設定した。図 A-1-3 に、変調電流 (I_m) の平方根との関係を示す。図に示す通り 34mA にて 10GHz を越える良好な f_r 特性を得ることができた。また、同図におけるデータの傾きは 2.0 であり、GaInAs レーザにおける他の報告 [1] とほぼ同等の値を得ることができた。以上の検討により高速化への指針及び課題を得ることができた。今後は 40Gb/s 動作を実現するために、素子抵抗と寄生容量の低減、及び活性層の最適化と微小化を含むレーザ構造の超高速化検討を行う。

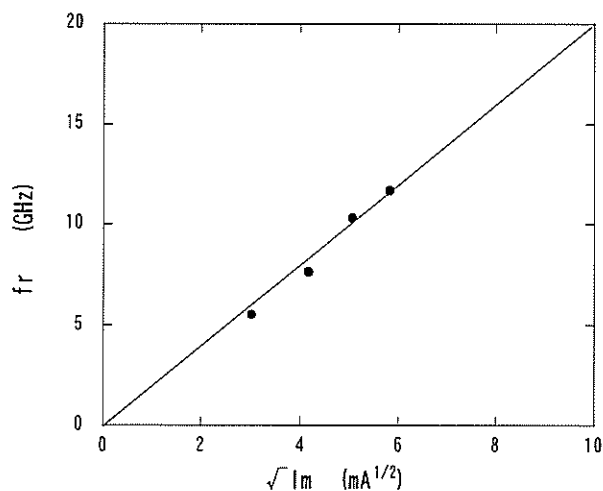


図 A-1-3 緩和振動周波数 (f_r) と変調電流 (I_m) の平方根との関係

IV -A-1-c 結論

高速化の基礎検討としてGaInAsレーザを試作し、高速特性を含むレーザ特性を評価した。その結果、良好な低閾値電流及び高緩和振動周波数を有することがわかり、超高速動作達成への見通しを得た。一方、素子抵抗が高く、今後の40Gb/s動作のためには、活性層の最適化のみならず、抵抗、容量などのレーザ構造全体の最適化が必要であることがわかった。

IV -A-1-d 参考文献

- [1] Weisser et. al, IEEE PTL Vol. 8, No. 5, pp. 608-610, 1996.

IV -A-2 プロセス技術の開発

IV -A-2-a 目的

レーザの高速化に必須なプロセス技術を開発することを目標に、H14年度はまず課題を抽出する。具体的には、ドライエッチング法によるメサストライプ形成技術と低接触抵抗電極形成技術について検討する。

IV -A-2-b 研究成果

IV -A-2-b-1 ドライエッチング法によるメサストライプ形成技術

IVA-1-b 節で説明した様に、ウエットエッチングによりメサストライプを形成する場合、メサ形状やメサ外部の $p\text{-Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ クラッド層のエッチング残し厚の制御が困難である。そこで、ドライエッチング法によるメサストライプ形成について検討した。ドライエッチング技術は、短共振器作製のためのドライエッチミラーの形成にも重要なものであり、早期の課題抽出が必須である。今回は、ドライエッチングのプラズマの方式として ECR (electron cyclotron resonance) と ICP (inductively coupled plasma) の2方式を検討した。

図 A-2-1 に、ECR プラズマを用いて作製したメサの断面形状を示す。チャンバー圧力などの条件を変えることにより、メサ形状を制御できることがわかる。尚、半導体上部にある濃色部はマスクとなる SiO_2 ストライプである。

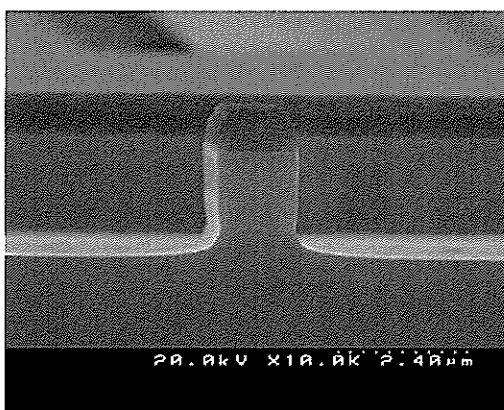
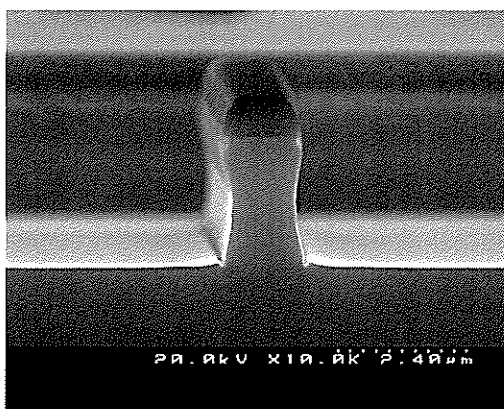
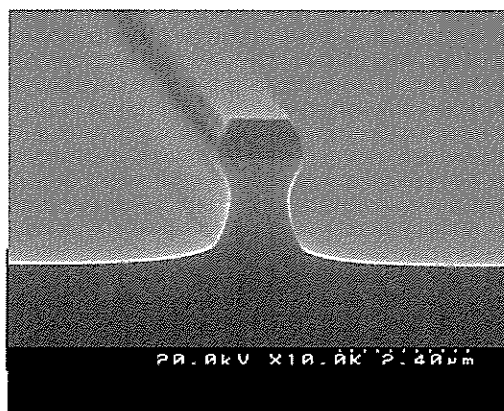


図 A-2-1 ECR プラズマを用いて作製したメサの断面形状

図 A-2-2 に、ICP プラズマを用いて作製したメサの断面形状を示す。ECR プラズマと同様にチャンバー圧力などの条件を変えることにより、メサ形状を制御できることがわかる。

図 A-2-3 に、Al 及び Ga 原子に関するプラズマ発光の分光強度の時間変化を示す。混晶組成に応じて、発光強度が変化する様子がわかる。従って、分光強度をモニターすることにより、エッチング深さの正確な制御が可能となる。

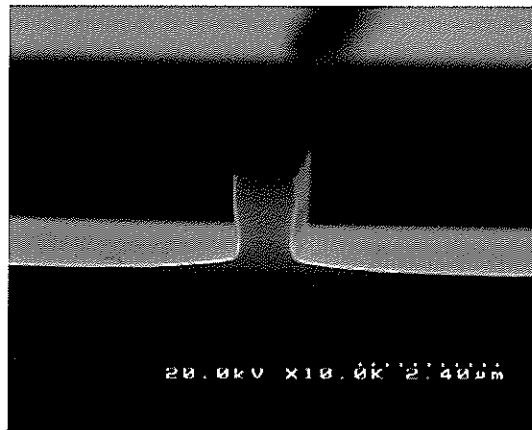
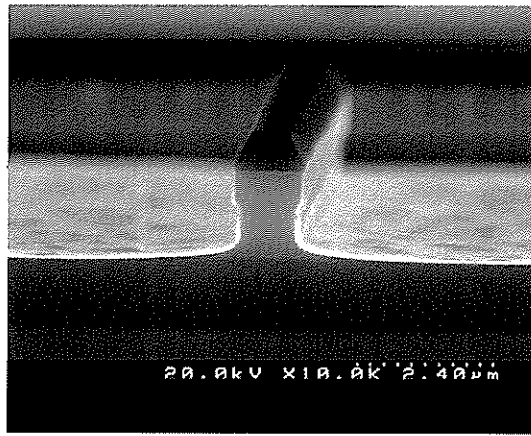


図 A-2-2 ICP プラズマを用いて作製したメサの断面形状

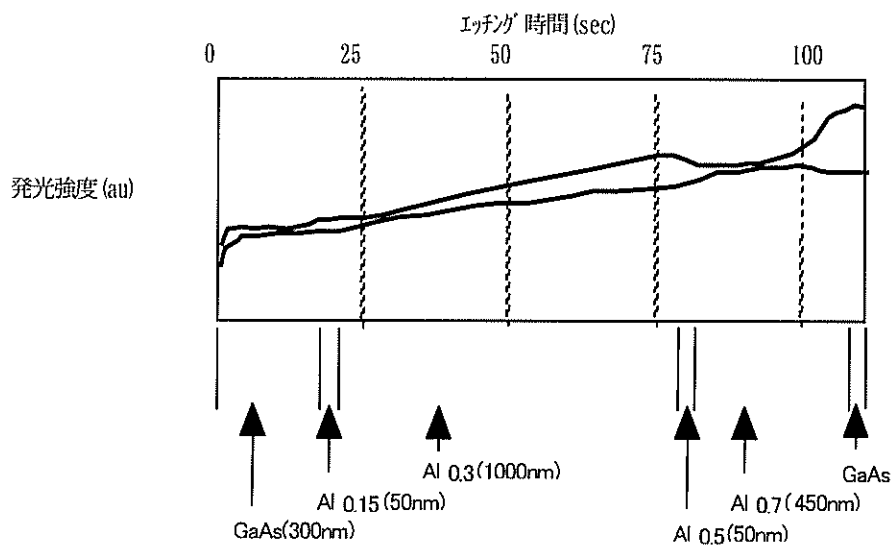


図 A-2-3 プラズマ分光強度の時間変化

IV-A-2-b-2 低接触抵抗電極形成技術

次に、低接触抵抗電極形成技術について述べる。レーザの高速化に繋がる活性層の微小体積化は、メサストライプの微小体積化により達成される。メサストライプの微小体積化は、電気抵抗を増加させ時定数 CR を増加させるので、高速動作の制限要因となる。従って、メサストライプの低抵抗化は、重要な技術課題である。その解決策の一つとして、メサストライプの n 型伝導化を考えている。電極コンタクト層となる GaAs に MBE 成長で標準的な Si をドーパントに用いると最高キャリア濃度が $1.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ の中程度に制限される。従って、n-GaAs に対する接触抵抗が低いオーミック電極形成技術の開発が必要となる。

具体的には、コンタクト層としては比較的低濃度である n 型 GaAs ($n=2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) に対して、2 種類のオーミック電極材料を検討した。図 A-2-4 に、電極の接触抵抗 (ρ_c) のアニール温度依存性を示す。アニール温度を 350°C と最適化することにより 1×10^{-5} 代 ($\Omega \text{ cm}^2$) の接触抵抗が再現性よく得られ、開発した両電極材料とも素子への適用において問題が無いことが判った。

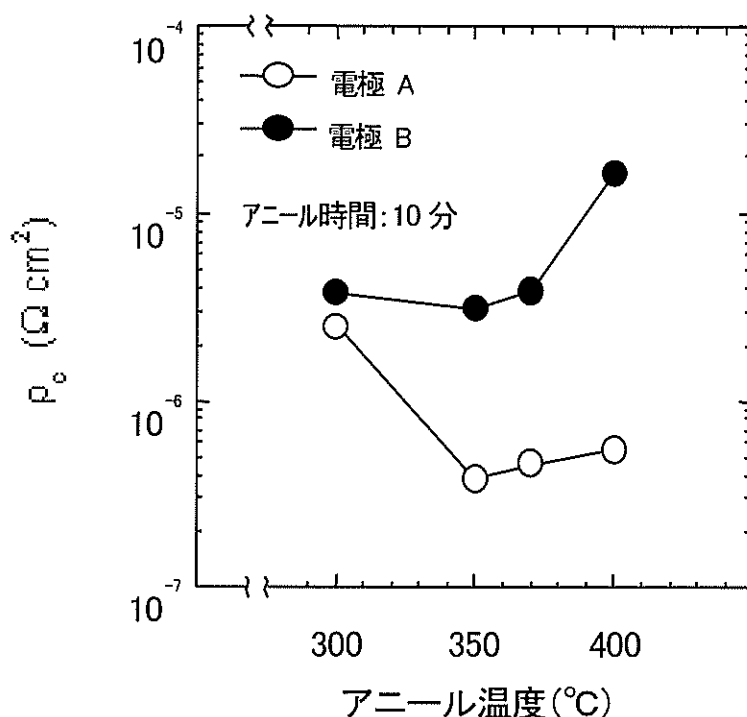


図 A-2-4 電極の接触抵抗 (ρ_c) のアニール温度依存性

IV-A-2-c 結論

メサストライプおよび短共振器ミラーの形成に必要な GaAs 系材料のドライエッチング技術の開発に着手した。プラズマの方式として ECR と ICP の 2 方式を検討した。初期結果ではあるが、両方式ともプラズマ条件を最適化することによりメサ形状やエッチング深さを制御できることが判った。今後もさらなる条件の最適化を行い、素子作製へ適用できるプロセス技術として向上させていく。

また、高速動作を制限する CR 時定数を低減する為にメサストライプの n 型伝導化を検討し、n 型 GaAs に対する低接触抵抗電極形成技術を開発した。

IV-A-3 超高速面発光レーザに関する基礎検討

IV -A-3-a 目的

超高速データ伝送用 40Gb/s の直接変調半導体レーザの実現を目的として、超高速面発光レーザを中心とした新しいデバイス構造や変調方式を研究することを目的とする。

IV -A-3-b 研究成果

近年、光ファイバネットワークが拡大・普及し、ギガビットLANの商用化が実現されている。更に、10ギガビット級LANの研究も活発に進められ、実用化は近いと思われる。本研究では、更なる高速化が必要とされる次世代の光通信用キーデバイスとして期待される面発光レーザにおける超高速直接変調動作の実現を目指している。現在までに、20 Gbpsでの大信号変調動作や21.5 GHzでの小信号変調 [1] が達成されている。面発光レーザに直接変調を行う場合において、問題となる点は、第一に素子やパッケージング部分のキャパシタンスが大きく、その結果、CR時定数が増大し、電气的に変調帯域を制限されること、第二に、面発光レーザ内部の緩和振動周波数によって制限されるということにある。そこで、本研究では、浮遊容量低減のために多層酸化膜構造 (MOX VCSEL) [2] の導入、また、緩和振動周波数の増大には微分利得向上が有効であり、そのためにp型変調ドーピング量子井戸構造 (p-MD) の導入 [3] をすることとした。

まず、多層酸化膜構造の導入について述べる。まず、小信号変調実験及び理論解析により、通常構造の $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{As}/\text{GaAs}$ 面発光レーザは、最大3 dB変調帯域が7 GHz、電气的変調帯域が7 GHzであり、変調帯域は電气的に制限されていることを解明した。次に、寄生容量低減のために、図 A-3-1およびA-3-2に示すような多層酸化層数を4層とし、多層酸化膜、酸化狭窄膜開口幅共に、 $5\mu\text{m}$ とした面発光レーザを製作し、AlAs酸化狭窄膜の容量を従来の0.7 pFから0.2 pFまで低減した。等価回路モデルによる理論解析により、この構造の電气的な変調帯域は、16 GHzと従来構造の7 GHzから大幅に改善している。小信号特性を従来構造と比較した。図A-3-3に示す。なお、この面発光レーザはマルチモード発振であった。最大3 dB変調帯域は、従来の7 GHzから、11 GHzまで改善している。これは、多層酸化膜による寄生容量低減効果によるものである。理論解析によると、電气的な変調帯域は16 GHzと見積もられた。また、大信号変調では、10 Gbpsの変調が可能であった。

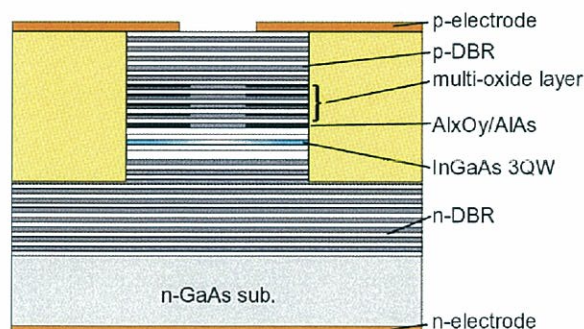


図 A-3-1 Schematic structure of a fabricated MOX VCSEL

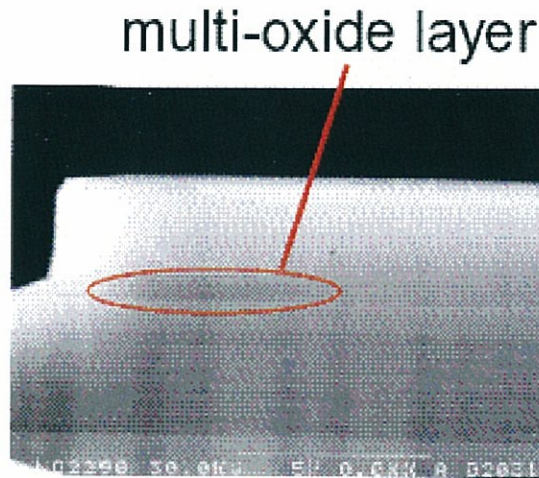


図 A-3-2 Cross sectional SEM image of MOX-VCSEL

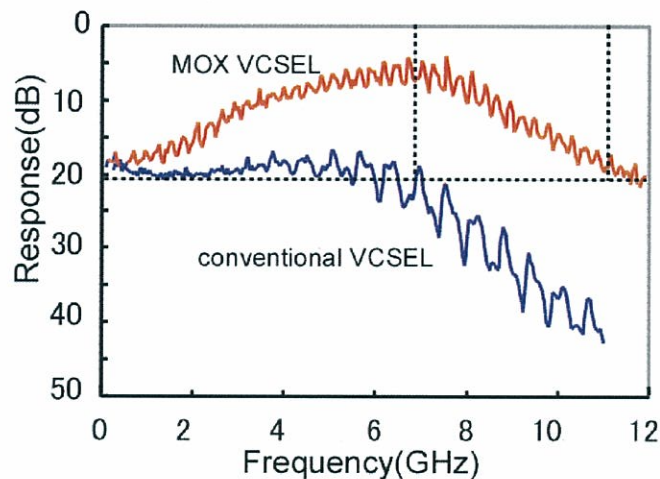


図 A-3-3 Comparison of a small signal modulation characteristics of MOX VCSEL and conventional VCSEL

次に、p型変調ドーピング量子井戸について述べる。p型変調ドーピングにより、微分利得は1.5倍増大し、緩和振動周波数は1.3倍程度増加すると見積られる(図A-3-4)。高歪GaInAs/GaAs量子井戸のバリア層にp型変調ドーピングをした量子井戸を減圧MOCVD法により結晶成長した。この量子井戸のフォトルミネッセンス(PL)特性は、GaAsバリア層中での成長中断の導入(G.I.)により、図A-3-5に示すように、変調ドーピングしていないものよりは劣るものの、レーザ発振には十分なPL特性であった。更に、p型クラッド層の低温成長をすることにより、この量子井戸を導入した50 μ mストライプレーザの発振に成功した(図A-3-6)。

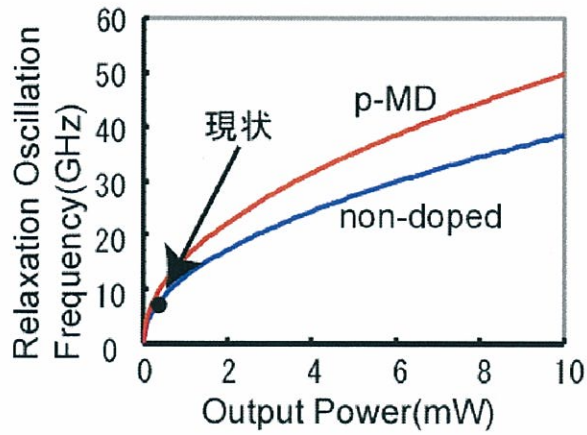


図 A-3-4 Estimation of relaxation oscillation frequency of VCSEL with p-type modulation doped quantum well structure

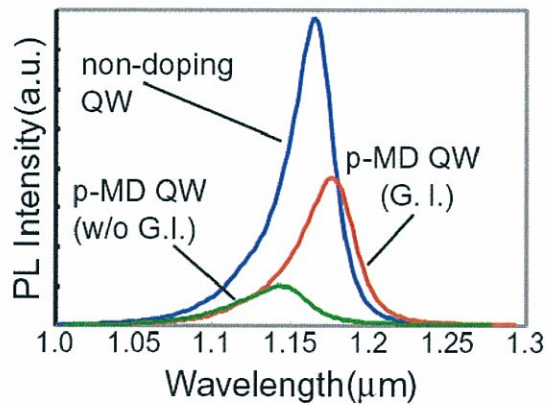


図 A-3-5 PL spectra of p-type modulation doped highly strained GaInAs/GaAs quantum wells and non-doped highly strained GaInAs/GaAs quantum wells

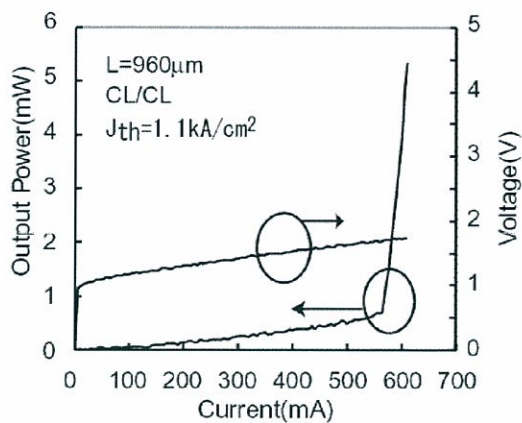


図 A-3-6 L/I and V/I characteristics of p-type modulation doped highly strained GaInAs/GaAs quantum wells stripe laser

IV-A-3-c 結論

本研究により、高速データリンクの超高速光伝送を可能とする新しいデバイス工学・システムへの展開が期待できる。

IV -A-3-d 参考文献

- [1] K. L. Lear et al., IEEE/LEOS Summer Top. Meetings, WA1, pp. 53-54, 1997.
- [2] N. Nishiyama et al., IEEE Photon. Technol. Lett., vol. 12, No. 6, pp. 606-608, 2000.
- [3] K. Uomi et al., Jpn. J. Appl. Phys., vol. 29, No. 1, pp. 81-87, 1979.

IV-B-1 GaInAs レーザ試作の為の結晶成長

IV -B-1-a 目的

IV -A-1 章のレーザ試作の為の結晶成長を行う。その為、高品質な GaInAs および AlGaAs 結晶の成長条件を確立する。

IV -B-1-b 研究成果

IV -A-1 章のレーザで使用する半導体材料は GaInAs や AlGaAs などの従来材料であるが、高品質な結晶を得るためには成長条件の最適化が必要である。MBE 成長の場合、基板結晶はヒータで過熱され熱電対を用いて測温および制御される。熱電対は回転する基板結晶と多少の距離があるため、一般に基板結晶と熱電対の温度に数十から百℃の差がある。この差は個々の MBE 装置により異なるので、他の装置や文献から最適値を移植する場合に注意が必要である。

図 B-1-1 に、活性層となる GaInAs/GaAs 量子井戸の室温におけるフォトルミネッセンス (PL) 半値幅の成長温度依存性を示す。ここでの、成長温度は熱電対の指示温度である。550℃以上では、三次元成長の発生により、半値幅が増大した。一方、530℃以下では半値幅が 17meV 以下の良好な結晶が得られることが判った。

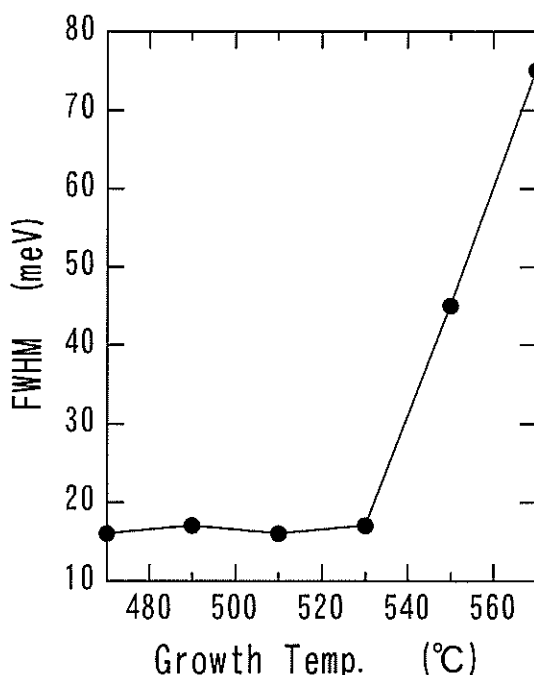


図 B-1-1 GaInAs/GaAs 量子井戸の室温におけ PL 半値幅の成長温度依存性

クラッド層となる AlGaAs 厚膜についても同様に成長条件の最適化を行い、77 K における PL 半値幅が 15meV 以下の良好な結晶を得られることができた。

最適化した結晶成長条件の下でレーザ構造のウエハを成長しレーザに加工したところ、IV -A-1 章で示した様に良好な特性の素子が得られた。

IV -B-1-c 結論

成長温度などの条件を最適化することにより、高品質なレーザ用結晶を作製することに成功した。IV -A-1 章のレーザ試作の為の結晶供給に問題がないことが判った。

IV-B-2 高品質 GaInNAs 活性層作製の為の超高真空結晶成長室の作製

IV -B-2-a 目的

高品質 GaInNAs 活性層を作製する為に、超高真空結晶成長室を設計し作製する。また、日立製作所所有の MBE 周辺装置との接続を行う。

IV -B-2-b 研究成果

高品質な GaInNAs 結晶を成長する為には、不純物の混入を極力阻止しなければならない。その為、真空内面に特殊加工を施した MBE 成長室を設計/作製した。また、活性層となる高歪 GaInNAs/GaAs 量子井戸を多重化することを考慮して、P および Sb を供給できるように MBE 成長室のセルポートをそれぞれの専用セルが取り付け可能な形状に設計/作製した。

図 B-2-1 に、作製した MBE 成長室の写真を示す。(写真右部の日立製作所所有の MBE 周辺装置とは未接続) 図 B-2-2 に、MBE 周辺装置と接続した後に焼き出しの為のアルミフォイルを巻きつけた MBE 成長室の写真を示す。

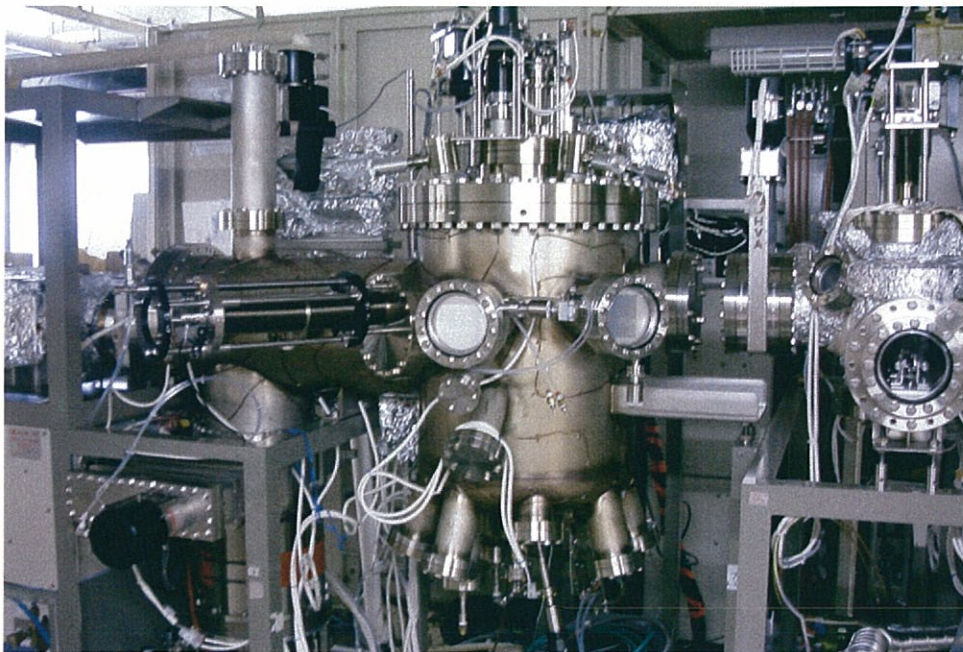


図 B-2-1 作製した MBE 成長室

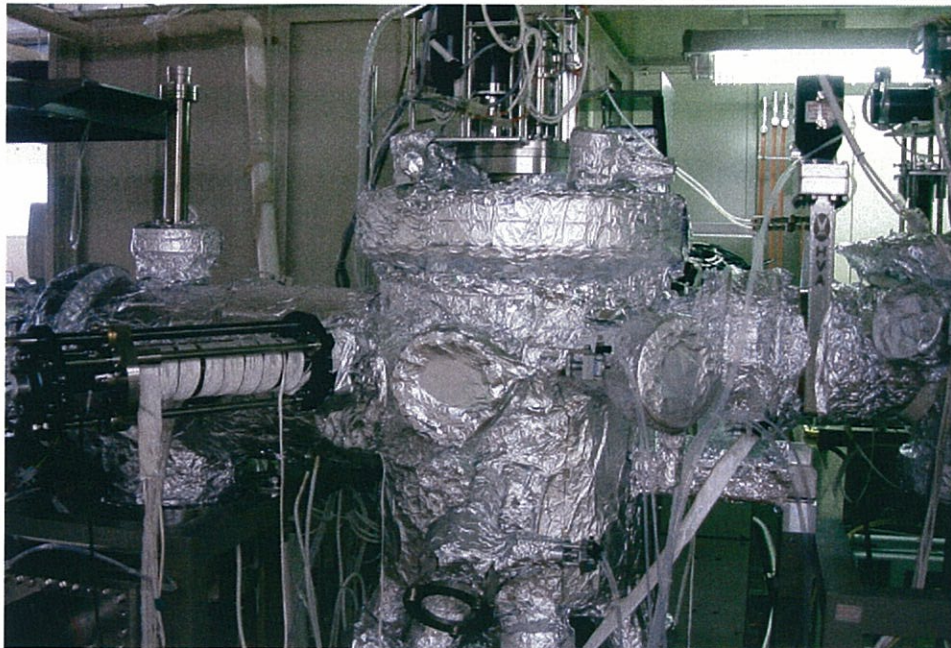


図 B-2-2 MBE 周辺装置と接続し焼きだしのためにアルミフォイルを巻きつけた
MBE 成長室

IV -B-2-c 結論

GaInNAs 活性層を作製する為に、超高真空結晶成長室を作製し日立製作所所有の MBE 周辺装置に接続を行った。これにより、高品質な GaInNAs の結晶形成に欠かせない結晶成長装置を実現した。

IV-B-3 GaInNAs の物性評価

IV -B-3-a 目的

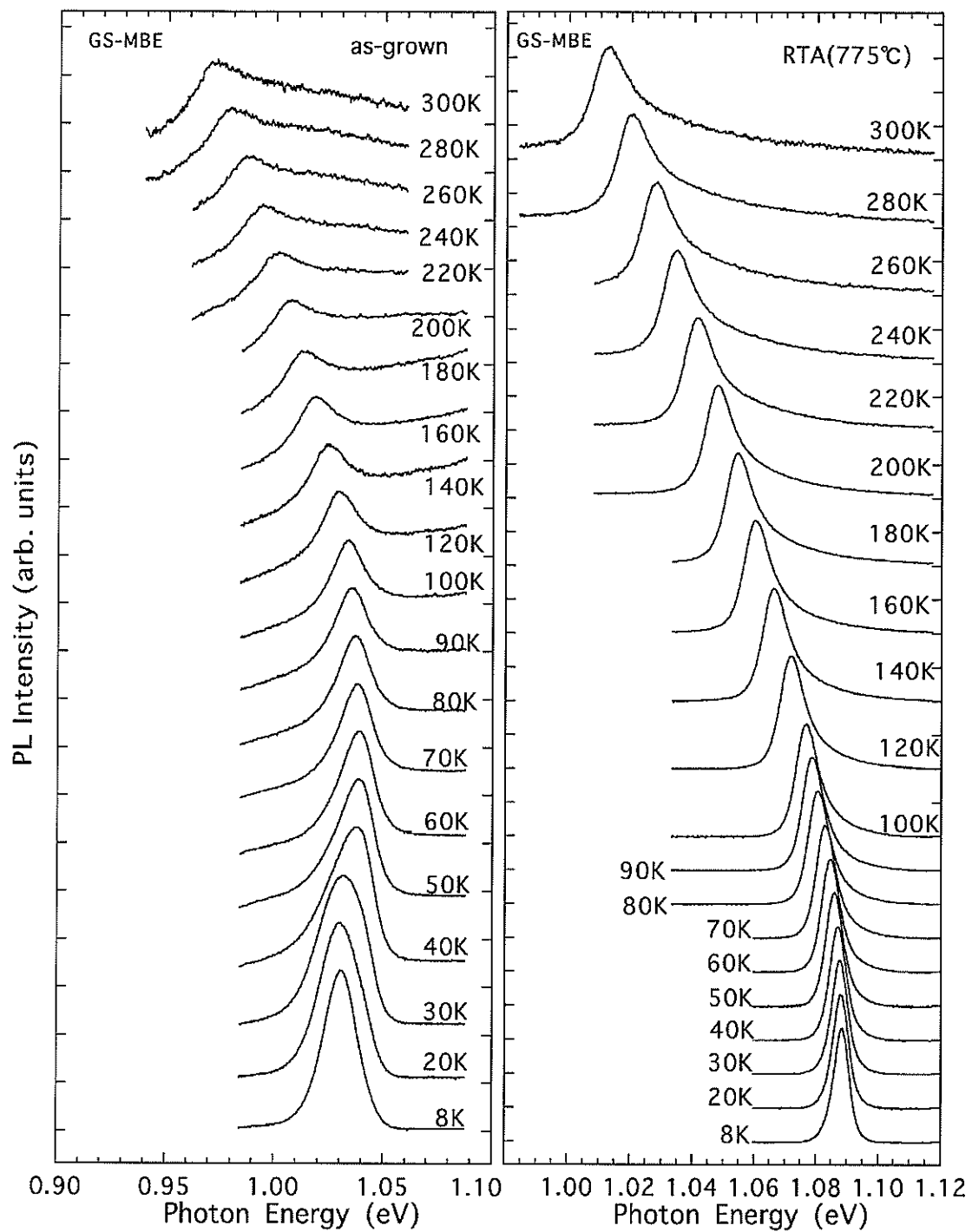
GaInNAs 半導体は電気陰性度の非常に高い窒素を構成元素として%オーダー含んでいる。この窒素に関わる原因で結晶性が低下し、GaInNAs は多くの非発光中心を含むことが知られている。また、GaInNAs 半導体に関する物性の多くは明らかにされていない。本研究の目的は、①非発光中心を形成する欠陥をフォトルミネッセンスを中心とする光物性測定より明らかにすること、②高品質試料を用いてGaInNAs の基礎的物性明らかにすること、③窒素原子の回りの局所原子構造に起因するGaInNAs 特有の物性を明らかにすること、④量子構造評価の電子状態を明らかにすること、である。これらの評価結果を結晶成長にフィードバックすることにより、より高品質なGaInNAs を作製し、高速・高信頼性のレーザダイオードを得るための設計方針を明らかにする。

IV -B-3-b 研究成果

IV -B-3-b-1 GaInNAs /GaAs 単一量子井戸の結晶性のフォトルミネッセンスによる評価

試料にはガスソースMBE (GS-MBE) により成長した井戸幅10 nmのものを用いた。基板温度は460°Cで、RTA (Rapid Thermal Annealing) は775°Cで処理時間は30秒間である。フォトルミネッセンス (PL) 励起光源にはArレーザの514.5 nm線を用い、シングルモノクロメータ (焦点距離50 cm、あるいは75 cm) で分光し、電子冷却型のGaInAs-pinフォトダイオードで検出を行った。低温冷却と温度変化 (8~300 K) には閉ループ型冷却器を用いた。

図B-3-1に、GS-MBEで成長したGaInNAs-SQWのPLスペクトルの温度依存性をas-grownの試料 (図 (a)) およびRTAを施した試料 (図 (b)) について示す。V族におけるN組成は0.5 at%である。RTAを施した試料では、PLは量子準位 (e1-hh1) の発光のみが観測され、PLピークの温度依存性はバンドギャップの温度依存性とほぼ一致して変化している。また、発光強度は非常に大きく、同様の条件で成長したソリッドソースMBE (SS-MBE) 成長GaInAs-SQWのものとはほぼ同等である。as-grown試料では8~50 Kにおいて局在励起子 (LE) 発光が観測される。LE発光は低温で顕著であり、温度上昇に従って弱くなり50 Kで消失する。それ以上の温度では量子準位 (e1-hh1) の発光が支配的である。この結果は、励起子を局在させる結晶ポテンシャルの不均一性がRTAにより取り除かれたことを示している。PLの温度依存性はSS-MBEとはほぼ同様の結果が得られており、GS-MBEによりSS-MBE比べて遜色の無い良質なGaInNAs が成長しているものと考えられる。結果の要約を以下に述べる。①as-grownの試料ではLE発光が観られるが、RTAによりLE発光は完全に取り除かれる。②RTAを施した試料のPLピークは全ての温度範囲で量子準位 (e1-hh1) によるものであり、バンドギャップの温度依存性を反映している③発光の半値幅はRTAを施した試料で17 meV以下と小さい。④低温において発光強度がRTAにより大きく改善され、非発光中心濃度は小さいと考えられる。以上の結果は、GS-MBE試料におけるN組成が0.5%とSS-MBEでのN組成1%よりも小さくN組成増加に伴う結晶性の低下を考慮しても、GS-MBEによりSS-MBEと遜色無いGaInNAs が成長できることを示している。



図B-3-1 GS-MBEで成長したGaInNAs-SQWのPLスペクトルの温度依存性

IV-B-3-b-2 GaInNAs/GaAs 単一量子井戸のエネルギー準位の測定

単一量子井戸 (SQW) 構造の光学的評価では、量子井戸レーザ設計に必要な量子井戸に造られる電子エネルギー準位やバンドオフセットを評価することができる。また、量子井戸構造における結晶性や界面を光学的に評価しこれらの結果とレーザ特性との関係を明らかにすることは本章での研究の大きな課題である。

本節では、SS-MBEで成長した井戸幅 (l_z) 10 nmのSQW構造および、井戸層幅を3~10 nm変化させたGS-MBE成長SQWの量子準位に関して、フォトルミネッセンス、高密度励起PL、精密な電子準位決定が可能なフォトリフレクタンス (PR) およびフォトルミネッセンス励起スペクトル等の測定を行い、量子準位の決定と量子準位の井戸幅依存性の検討を行った。

IV -B-3-b-2-1 高密度励起PL測定

量子井戸を高密度に光励起することにより、基底状態の状態密度以上に電子の励起を行うことにより基底状態間の光学遷移による $n=1$ 発光が飽和し、励起準位間の発光 ($n=2, 3, \dots$) が観測される。実験ではQスイッチYAGレーザのSHG光 (波長532 nm、パルス幅5 nano sec) を用いて、低温 (8 K) において高密度励起を行った。励起光密度は最大で540 (KW/cm^2) である。

図 B-3-2 に種々の l_z (3~10 nm) を持つGaInNAs-SQW (GS-MBE) の高密度励起PLスペクトルを示す。① $l_z=10$ nmのSQWでは、1.09 eV ($e1-hh1$) および1.19 eV ($e1-lh1$ あるいは $e2-hh2$) が現れ、1.32 eV付近に $n=3$ と思われるPL帯が現れている。 $l_z=10$ nmでは、 $e1-lh1$ と $e2-hh2$ 遷移は殆ど同じエネルギーにあるものと考えられる。② $l_z=7$ nmのSQWでは、弱励起で観られる1.14 eV ($e1-hh1$ 遷移) ピークの他に、強励起下では1.26および1.32 eVにピークが観測される。 l_z の変化により、歪による hh と lh の分裂エネルギーは殆ど変化しないが、 l_z の値は量子準位に大きく影響するため $n=1$ と $n=2$ 準位のエネルギー差は変化すると考えられる。従って、 $l_z=7$ nmのSQWでは、観測される1.26および1.32 eVのPLピークはそれぞれ、 $e1-lh1$ と $e2-hh2$ 遷移に対応しているものと考えられる。③ $l_z=5$ nmのSQWでは、強励起下で1.26~1.30 eV付近に発光帯が観られる。同様の考察より、これは $e1-lh1$ 遷移によるものと考えられる。 $e2-hh2$ は準位のエネルギーがバリア層GaAsのバンドギャップエネルギーに近いので、準位に励起された電子がバリア層に漏れ出す為に $e2-hh2$ 遷移が現れないものと考えられる。④ $l_z=3$ nmのSQWでは、強励起下でも $e1-lh1$ 遷移の1.28 eV以外にPLは観測されない。これは、 l_z が小さい為に $n=2$ 準位のエネルギーは量子井戸内には存在せず。また、 $e1-lh1$ 遷移もバリア層のGaAsのバンドギャップエネルギーに近いので、準位に励起された電子がバリア層に漏れ出す為に $e1-lh1$ 遷移が現れないものと考えられる。

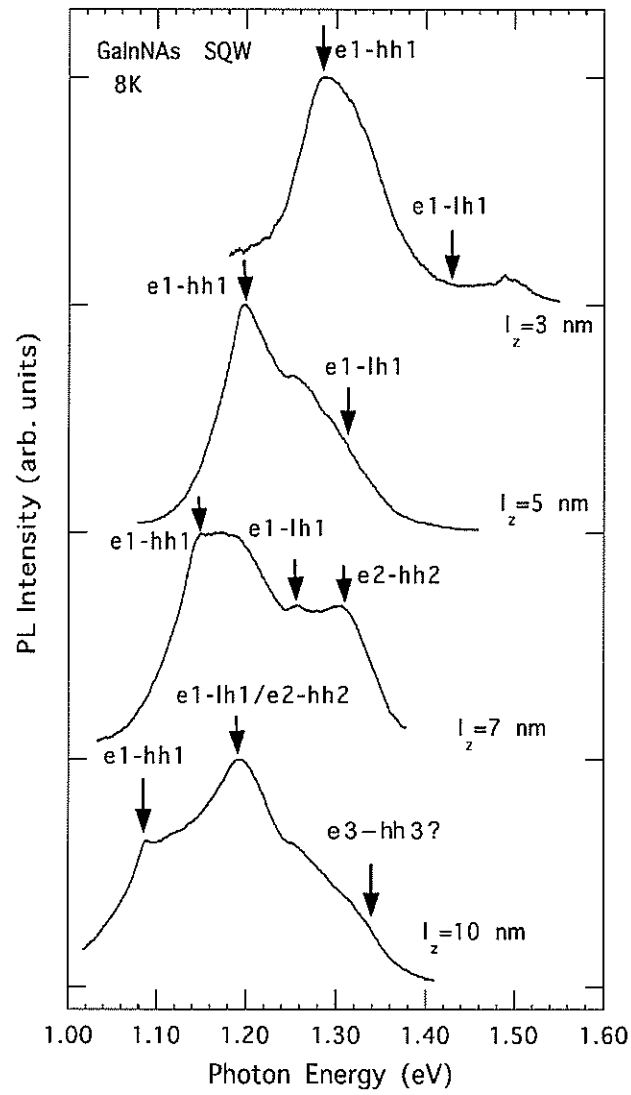


図 B-3-2 GS-MBEで成長したGaInNAs-SQWの高密度励起PLスペクトル

IV- B-3-b-2-2 フォトリフレクタンス測定

図 B-3-3 に、SS-MBEで成長したGaInNAs-SQW ($l_z=10\text{ nm}$) の室温でのPRスペクトルを示す。RTAを施した試料では 0.99 eV に $e1-hh1$ 遷移が 1.12 eV にエネルギー的に縮退した $e1-lh1$ 、 $e2-hh2$ 遷移が観られる (図中a)。また、 1.22 eV にも遷移が観られ (図中b)、これは $e2-lh2$ 遷移の可能性があるが、詳細は検討中である。RTAを施した試料ではas-grownの試料に比べて、SQWの全ての遷移エネルギーにおいて 0.05 eV のブルーシフトがみられる。

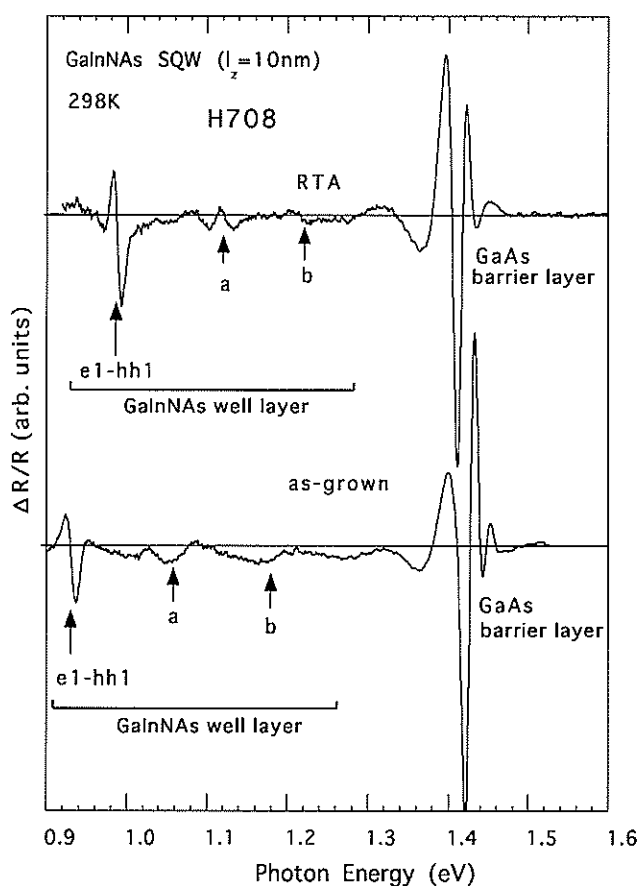


図 B-3-3 SS-MBEで成長したGaInNAs-SQW ($l_z=10\text{ nm}$) の室温でのPRスペクトル

IV-B-3-b-2-3 PL励起スペクトル (PLE) 測定

PLE測定には、励起光源として200Wタンゲステンハロゲンランプを小型ダブルモノクロメータ (SPEX社、1680型、22cm焦点距離、1.25 μ mブレード) を用い、これを波長可変の単色光源として用いた。発光はモノクロメータ (SPEX社1702型、75cm焦点距離、1.25 μ mブレード) で分光し、GaInAs-pinフォトダイオードで検出した。

図 B-3-4 に、SS-MBEで成長したGaInAs-SQW ($l_z=10$ nm) のPR、定常励起PL、PLEスペクトル、および高密度励起PLスペクトルを比較して示す。なおPRスペクトルは8Kと77Kのバンドギャップのシフトを考慮して8Kの値として示している。PLEスペクトルでは1.07eVのe1-hh1遷移のPLをモニターした。PLEスペクトルにおいては1.17eVおよび1.20eVにピークが観測される。これは、e1-lh1、e2-hh2遷移が分離して観測されたものと考えられる。77KでのPRにおいて、同じエネルギーに遷移が観られる。PLEでは、1.32eV (e2-lh2) や1.37eVにも弱いピークが観測されている。高密度励起PLにも対応するエネルギーにピークはみられるが、1.17および1.20eVの遷移は分離して観測されなかった。

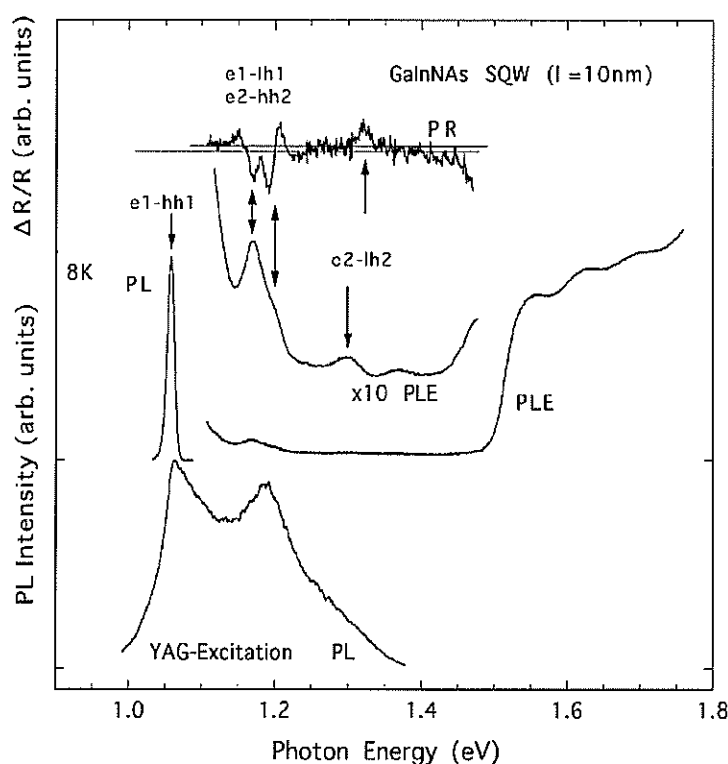


図 B-3-4 SS-MBEで成長したGaInAs-SQW ($l_z=10$ nm) のPR、定常励起PL、PLEおよび高密度励起PLスペクトル

図 B-3-5 に、GS-MBEで成長したGaInNAs-SQW ($l_z=3\sim 10$ nm) の8 KでのPLEスペクトルを示す。 $l_z=10$ nmのSQWではe1-lh1、e2-hh2遷移が縮退しているが、 l_z の減少に伴ってこれらの遷移が分裂していく様子が現れている。また、高密度励起PLでは観測されなかった、 $l_z=5$ nmのe2-hh2遷移や $l_z=3$ nmのe1-lh1遷移がPLEスペクトルで観測された。また、 $l_z=3$ nmのSQWで1.32 eVにみられるPLEピークはe1-hh1遷移であり、1.28 eVの発光は局在準位によるものと考えられる。このエネルギー差はストークスシフトを表し、大きさは40 meVである。全ての遷移は l_z の減少に従って高エネルギー側にシフトするがe1-hh1遷移とe1-lh1遷移のエネルギー差は約130 meVと一定である。このことは歪みの価電子帯に与える影響は l_z が変化してもあまり変わらないことがわかる。これに対して、 $n=1$ 準位と $n=2$ 準位の差を表すe1-hh1遷移とe2-hh2遷移のエネルギー差は l_z の減少に伴い大きく増加していくことがわかる。

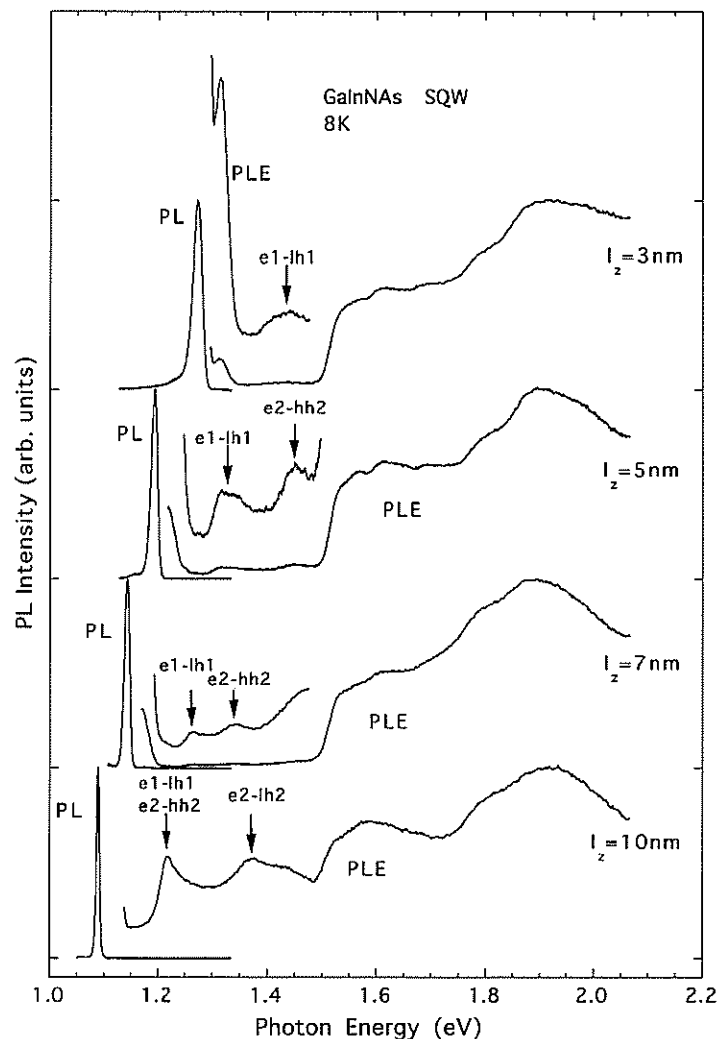


図 B-3-5 GS-MBEで成長したGaInNAs-SQW ($l_z=3\sim 10$ nm) の8 Kでの PLE スペクトル

IV-B-3-c 結論

PLの温度依存性より、ガスソースMBE法により成長したGaInNAs-SQWは非常に高品質であり、この方法でこれまで固体ソースMBEで得られた高品質なものと同色のGaInNAsが成長できることがわかった。

また、単一量子井戸の光学スペクトル測定より光学遷移を同定し、量子準位の遷移エネルギーの井戸層幅依存性を明らかにした。

IV-C 総括

開発初年度の平成14年度は概ね計画どおりの研究開発を実施し、課題項目の詳細化、既存技術調査、主要研究設備の調達等を行えた。現在、本研究開発は全般として予定通り進捗している。

(添付資料 1)

研究発表、講演、文献等一覧

- ① 2003 年春季第 50 回応用物理学会学術講演会 (神奈川、2003 年 3 月 30 日) にて、「GaInNAs/GaAs のフォトルミネッセンスとフォトリフレクタンス (V)」を発表した。
(和文講演、査読無)
- ② 学術誌 Japanese Journal of Applied Physics に、「Infrared Absorption Spectrum of GaInNAs」を寄稿し掲載可となった。vol. 42 (2003), no. 7 に掲載の予定。(英文寄稿、査読有)