

平成17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

委託先： (株)日立製作所

平成18年4月

情報通信研究機構

平成17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

1	研究開発課題の背景	2
2	研究開発の全体計画	4
2-1	研究開発課題の概要	4
2-2	研究開発目標	5
2-2-1	最終目標（平成17年3月末）	5
2-2-2	中間目標（平成16年3月末）	5
2-3	研究開発の年度別計画	6
3	研究開発体制	7
3-1	研究開発実施体制	7
4	研究開発実施状況	8
4-1	超高速レーザ構造の研究開発	8
4-1-1	研究開発内容	8
4-1-2	1.1 μ m帯 GaInAs レーザの高速変調の検討	8
4-1-3	半導体レーザのドライエッチング技術の検討	11
4-1-4	40Gbps 動作直接変調レーザの伝送特性の検討	16
4-1-5	GaInNAs 単一量子井戸レーザの基礎検討	20
4-1-6	GaInNAs 三重量子井戸レーザの基礎検討	23
4-1-7	面発光レーザの高速化に関する検討	24
4-1-8	まとめ	26
4-2	高品質活性層の作製技術の研究開発	27
4-2-1	研究開発内容	27
4-2-2	GaInP クラッド層の MBE 成長に関する研究	27
4-2-3	GaInNAs 単一量子井戸層の高品質化	29
4-2-4	GaInNAs 三重量子井戸層の高品質化	31
4-2-5	GaInNAs の物性評価	34
4-2-6	まとめ	45
4-3	超高速光リンク用半導体レーザの研究開発	46
4-3-1	研究開発内容	46
4-3-2	GaInNAs 三重量子井戸レーザの高速特性の検討	46
4-3-3	GaInNAs 三重量子井戸レーザの 40Gbps 動作の検討	47
4-3-4	まとめ	48
4-4	総括	49
5	参考資料・参考文献	50
5-1	研究発表・講演等一覧	51

1 研究開発課題の背景

世界規模のインターネットの普及により、光通信網のデータトラフィック内容が音声からデータ中心に変化しており、近年の経済停滞にもかかわらずデータトラフィック量は年約3倍で増大している。このような変化に伴い公共光通信網は従来のATMからコア/エッジルータを介したIP(Internet Protocol)によるシステムへ変わりつつある。従来の幹線網における長距離での高速化に加えて図1-1に示すようなメトロ網において局内や局間のルータ間接続に使用する10km以下の短距離での高速で安価な光通信モジュールが求められている。

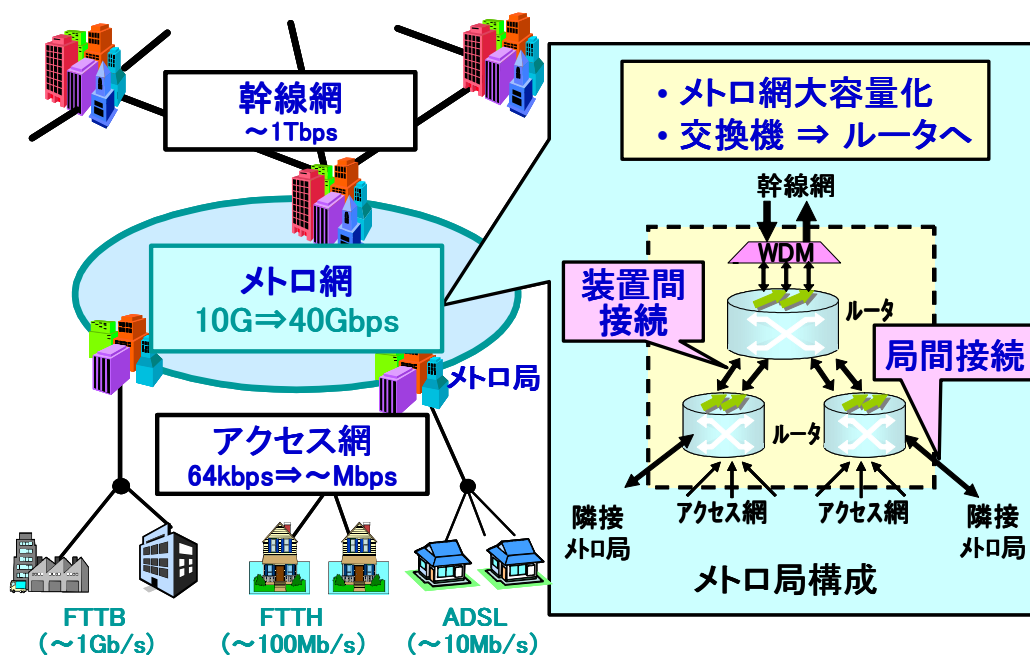


図 1-1 光通信網の模式図

現在、メトロ網用のシステムは10Gbpsのデータ速度を中心に開発が進んでいる。しかし、メトロ網の容量不足から、次世代の40Gbps短距離モジュールの研究開発も活発化している。さらに、コンピュータ間ネットワークを発端としたEthernetは4-5年毎に10倍の通信速度で高速化が実現されてきた。1 Gbps以降は光リンク中心で構築されるようになっており、2002年には10 Gbpsの規格が確定した。次期規格は2006年頃に概要が決まると予想され、速度は40 Gbps以上が期待される。

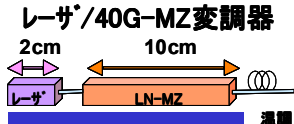



このように公共光通信のメトロ網およびEthernetでは次世代の通信速度として40Gbpsが待望視されている。伝送距離は10Gbpsと同様にLR(long reach: $\leq 80\text{km}$), IR(intermediate reach $\leq 40\text{km}$)と呼ばれる中長距離のみならずSR(short reach: $\leq 2\text{km}$), VSR(very short reach: $\leq 300\text{m}$)の短距離用途の需要が予想される。短距離は局内のコア/エッジルータ装置間やインターネット業者の局内サーバー間等の用途が期待されており、キーデバイスである半導体送信光源は低コストで低消費電力が期待されている。

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、低コスト、低消費電力、小型化が可能な超高速短距離伝送用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。

現状では 40Gbps の送信光源は高速で動作する EA(electro absorption)[1], 或いは MZ(Mach-Zehnder)型変調器[2]を用いた研究開発が中心である。表 1-1 に 40Gbps の光源技術の比較を示す。変調方法としては主に外部変調によるものと半導体レーザの直接変調によるものに大別される。外部変調器を用いたものは高速動作時の波長変動が小さく長距離伝送に向いている。しかし、これらは熱電冷却(ペルチェ)素子にて冷却するためモジュールの消費電力が大きくなる。さらに素子構造が複雑なためモジュールサイズが大きい。従ってモジュールコストは高くなる。一方、直接変調方式は高速動作時の波長変動が大きいため伝送距離は短い。しかし、ペルチェ素子が不要で素子構造が簡単のため低消費電力化、省モジュール化が容易となり、低コスト化が実現できる。直接変調方式では 10Gbps を 4 チャンネル並列化したモジュールの開発も活発化している[3]。この方式では既存の送信光源が使用できるが、モジュール寸法、消費電力は大きくなる。さらに、複数の光素子と光ファイバを光結合しなければならないため、コスト低減に限界が生じる。

一方、本研究の方式は 40Gbps の直接変調レーザを実現することにより送信光モジュールの並列数を削減できる。従って、小型化、低消費電力化、及びコスト低減において優位となる。半導体レーザによる 40Gbps 直接変調動作は 1.3 μm 帯 InGaAsP 系 DFB レーザ[4]と 1.55 μm 帯 DBR レーザ[5]を使用した報告がある。しかし、前者ではバイアス電流が 140mA と非常に高く、消光比はいずれも 3dB と小さく、直接変調による 40Gbps 動作は未だ研究開発途上段階にあると考えられる。また、小信号変調では VCSEL に外部光を注入して緩和振動周波数を増大させ、50GHz を得た例がある[6]。この方法は緩和振動周波数の増大に有効であるが、高価な光サーキュレータを使用しなければならず、さらに構成が複雑になるのが欠点である。

表 1-1 通信用 40Gbps 光源の比較

	方式	性能	寸法(含IC)	消費電力	温度調整	伝送距離	相対コスト
外部変調	 レーザ/40G-MZ変調器 2cm 10cm レーザ LN-MZ 温度		6 × 17cm ²	8 W	要	> 80 km	10
	 レーザ/40G-EAモリシック 集積 レーザ EA 温度		2 × 3cm ²	4 W	要	> 2 km	5
直接変調	 10Gレーザ × 4ch		5 × 5cm ²	5 W	不要	<300 m	2
	 レーザ40G 直接変調 (本提案)		1 × 2cm ²	2 W	不要	<300 m	1

2 研究開発の全体計画

2-1 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。動作速度は 40 Gbps 動作を目指す。半導体レーザを超高速度で動作させるためには緩和振動周波数を増大させる必要がある。

緩和振動周波数 f_r は次式で表すことができる[7]。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{v_g}{qL_c} \frac{\Gamma_{MQW}}{N_w d_w W_a} \eta_i \frac{dg}{dn} I_m \right)^{1/2} \quad (1)$$

ここで v_g は群速度で q は電子の電荷、 L_c は共振器長、 N_w は量子井戸数、 d_w は量子井戸の幅、 W_a は活性層の幅、 η_i は内部微分量子効率、 dg/dn は微分利得であり、 Γ_{MQW} は量子井戸層の光閉じ込め係数である。また、 I_m は駆動電流である。(1)式から一定の共振器長と活性層幅を有するレーザ構造である駆動電流において緩和振動周波数を向上するためには微分利得の項を増加させるのが有効である。微分利得は使用する活性層材料によって異なる。表 2-1 に長波長半導体レーザ用活性層材料における単一量子井戸あたりの利得定数(G_0)をまとめた。

表 2-1 長波長半導体レーザ用活性層材料の単一量子井戸あたりの利得定数等の特性

材料	GaIn(P)As	AlGaInAs	GaInAs	GaInNAs
基板	InP	InP	GaAs	GaAs
発振波長(μm)	1.55	1.3~1.55	1.1	1.3
1 量子井戸層当りの利得定数(cm^{-1})	~500	~1000	~1800	~1800
量子井戸数	2~8	3~5	1	1
歪	0	~1.4	~2.2	~2.5

G_0 はしきい電流密度の共振器依存性から導かれたもので微分利得に相当する。表から判るように GaInAs と GaInNAs の利得定数が最も高い。この理由は GaIn(N)As 系が電子とホールの有効質量に対してより理想的なバンド構造を有することと歪量に起因すると思われる。よって GaInNAs を活性層とし、さらなる微分利得向上のための施策、すなわち量子井戸幅の適正化、歪の増大、量子井戸数の増大、p 型変調ドープ構造導入等の量子井戸構造の最適化を行えば緩和振動周波数は格段に向上すると考えられる。

しかし、 $1.3 \mu m$ 帯で発振する GaInNAs 活性層は結晶の高品質化と量子井戸層数増大が課題である。そこで N を含まない $1.1 \mu m$ で発振する GaInAs 層を活性層とする半導体レーザ構造の最適化による 40Gbps 動作の検討と GaInNAs の高品質化を行う結晶性向上の検討を平行して行い、最終的に $1.3 \mu m$ 帯での 40Gbps 動作を実現する計画である。

40Gbps 動作の実現のためには上記に述べた活性層の最適化のほかにレーザ構造の最適化を行う。(1)式からわかるように共振器長の低減によって f_r は増大する。よって短共振器構造が 40Gbps 実現のための一つの手段となる。よって図 2-1 に示すドライエッチ端面の技術を検討

する。

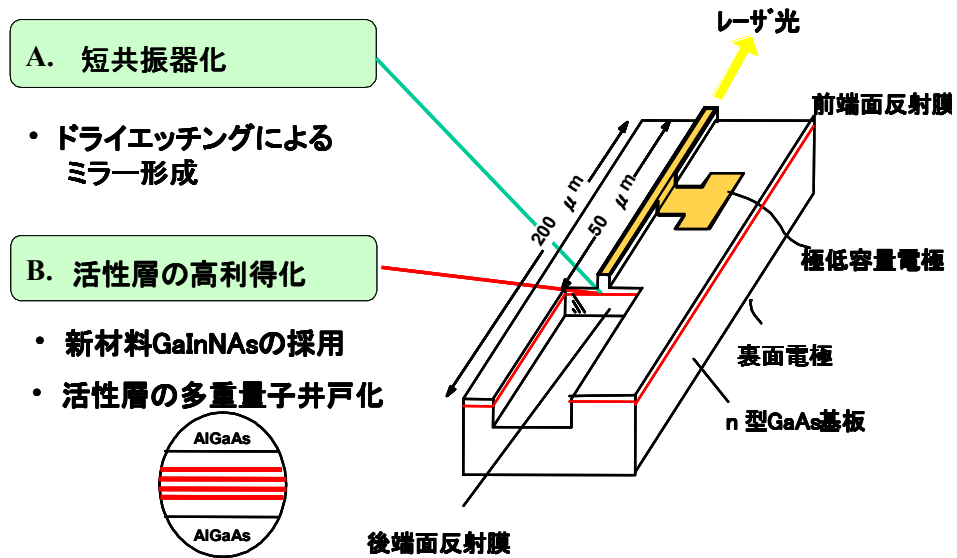


図 2-1 本研究の素子構造案

尚、GaInNAs のさらなる結晶性改善を目的に「GaInNAs の結晶評価」の一部は、愛媛大学白方研究室に再委託し、また、「GaInNAs 量子井戸層の微細構造解析」は神奈川科学技術アカデミーに再委託する。

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成 17 年 3 月末）

世界最速の光リンク用 GaInNAs 半導体レーザーを実現する。

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

2-2-2 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

2-3 研究開発の年度別計画

(金額は非公表)

研究開発項目	14年度	15年度	16年度	17年度	計	備考
① 超高速レーザ構造の研究開発				→		一部テーマを愛媛大学白方研究室、及び神奈川科学技術アカデミー斎木研究室に再委託
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				→		
間接経費額 (税込み)						
合計						

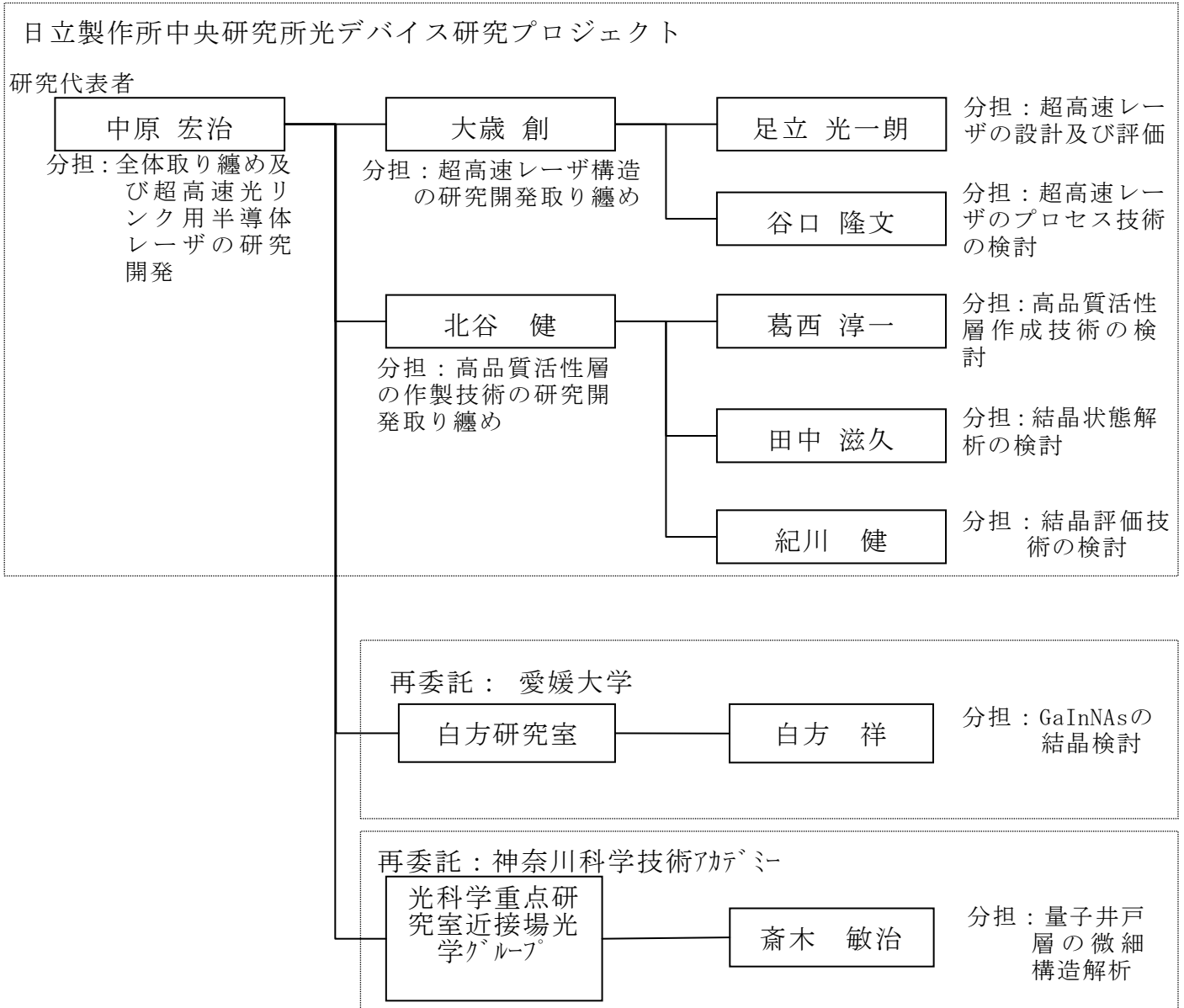
注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。

2 備考欄に再委託先機関名を記載

3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



4 研究開発実施状況

4-1 超高速レーザ構造の研究開発

4-1-1 研究開発内容

本サブテーマでは始めに活性層作製方法が確立されており、光学利得が大きい GaInAs を用いて超高速レーザ構造の検討を行った。次に短共振器化やメサ形成に有効なドライエッチング技術の検討を行なった。また、40Gbps 直接変調時の伝送特性の検討をシミュレーションにて行った。GaInAs レーザに関しては後述する高品質活性層の作製技術の研究開発にて得られた単一量子井戸レーザ、及び三重量子井戸レーザの基本特性について検討した。さらに、面発光レーザについての高速化の検討を行った。

4-1-2 1.1 μm 帯 GaInAs レーザの高速変調の検討

本研究で検討した GaInAs-LD(laser diode)のバンド構造を図 4-1-2-1 に示す。活性層は、厚さ 10 nm のバリア層と GaInAs 量子井戸層からなる量子井戸層が上下の GaAs-SCH(separate confinement heterostructure)により挟まれた構造である。クラッド層は厚さ 1.5 μm の AlGaAs 層を用いた。

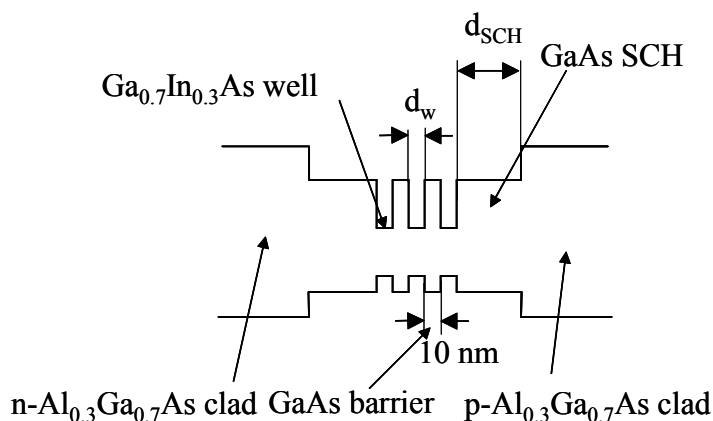


図 4-1-2-1 GaInAs-QW-LD のバンド構造

図 4-1-2-2 に今回試作した素子構造の模式図を示す。結晶成長は MBE を用いた。導波路構造はリッジ型を採用し、 f_r の増大のために短い 200 μm の共振器長の素子を作製した。尚、メサ幅は約 2.0 μm とした。しきい利得低減を目的として両端面には 60/85% の高反射率コーティング

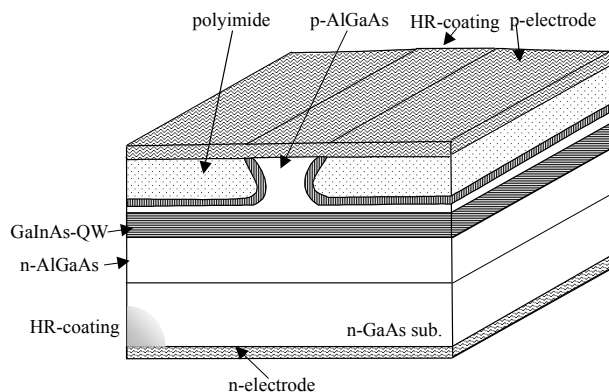


図 4-1-2-2 GaInAs-QW レーザの模式図

グを施した。さらに寄生容量低減のためにポリイミド埋込みを行った。

素子設計の際には計算による量子井戸層幅，p型変調ドーパ構造導入，井戸層の多層化の最適化を行なった。表 4-1-2-1 には本試作での素子仕様を示す。

表 4-1-2-1 試作した素子の仕様

試作記号	L_w (nm)	N_w	SCH層幅 (nm)	バリア層 変調ドーパ 濃度 (10^{18} cm^{-3})
TQW-U	5	3	120	0
TQW-M1	5	3	120	0.47
TQW-M2	5	3	120	1.4
TQW-M3	5	3	120	2.3
SQW	7	1	150	0

表 4-1-2-2 に共振器長 $200 \mu\text{m}$ で高反射コーティングを施した素子の DC 特性の結果を示す。表のようにすべての素子において良好なレーザ特性を得ることができた。変調ドーパ構造の素子 (TQW-M1~TQW-M3) はアンドーパの素子(TQW-U)に比べてしきい電流が増大している。これはブロードエリアレーザと同様に主にキャリア寿命時間の低減によるものと考えられる。また，光出力-電流特性の典型例を図 4-1-2-3 に示す。

表 4-1-2-2 試作した素子の DC 特性結果

試作記号	I_{th1} (mA)	R_s (Ω)	S_e (W/A)	Vertical FFP ($^\circ$)	Horizontal FFP ($^\circ$)	λ_c (nm)
TQW-U	8.3	5.0	0.393	55.1	22.8	1077
TQW-M1	10.4	3.9	0.385	56.2	24.8	1079
TQW-M2	9.4	4.5	0.385	55.6	26.8	1089
TQW-M3	11.2	4.6	0.466	59.4	24.6	1081
SQW	6.8	5.1	0.252	40.0	28.7	1122

次に高速化に重要な緩和振動周波数 f_r の測定を行った。図 4-1-2-4 に典型的な f_r の駆動電流依存性を示す。図からわかるように前節で述べた微分利得向上施策により従来素子(SQW)に比べて f_r の傾きは 2 倍以上となり， $200 \mu\text{m}$ 素子では 25GHz ， $100 \mu\text{m}$ 素子では 28GHz の f_r が得られた。図 4-1-2-5 は測定で得られた駆動電流の平方根に対する f_r の傾きの変調ドーパ濃度依存性である。図中の実線は計算に基づき，SQW の測定値で規格化した f_r の傾きである。図から測定値と計算値はほぼ一致することがわかった。

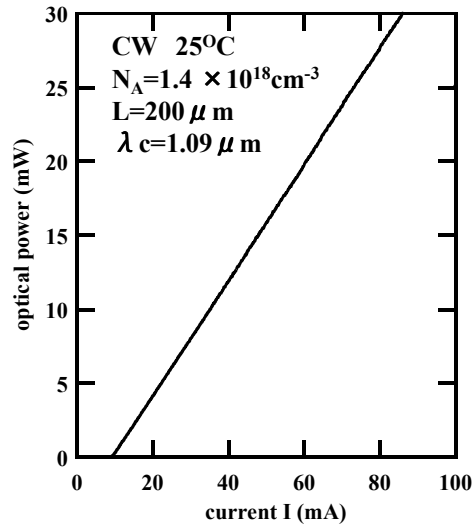


図 4-1-2-3 試作した光出力-電流特性の典型例

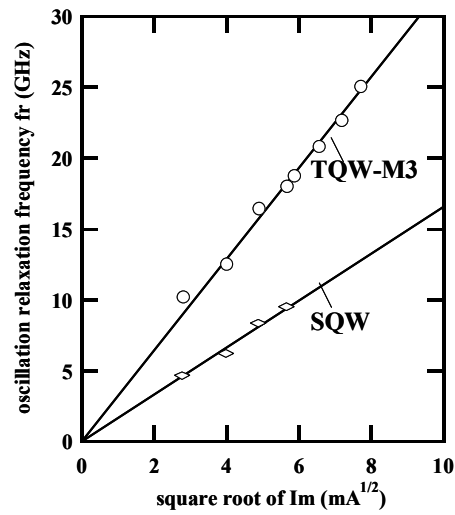


図 4-1-2-4 f_r の駆動電流依存性の典型例 (測定値)

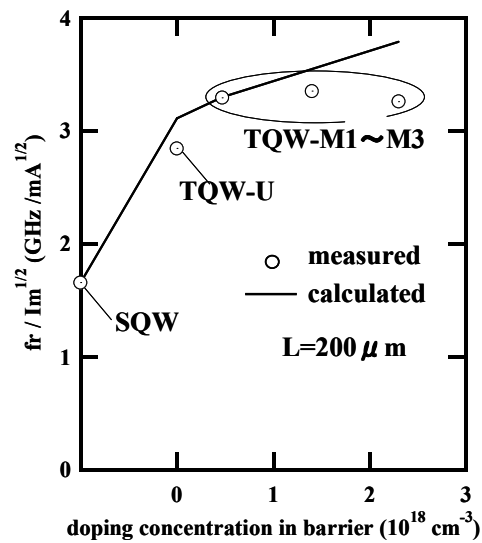


図 4-1-2-5 f_r の傾きに対する障壁層ドーピング濃度依存性

さらに高い f_r が得られた素子について 40Gbps 動作試験を行った。SONET の OC-768 に相当するは 39.813Gbps のビットレート及び 27-1 長の擬似ランダムパターンにて測定を行った。尚、測定治具の関係から室温にて測定を行った。図 4-1-2-6 に素子の 40Gbps 光波形特性を示す。図から $200\ \mu\text{m}$ では高い f_r 特性を反映してアイ開口を得ることができた。このときのバイアス電流、駆動電流はそれぞれ 60mA、56.4mA で消光比は約 5dB と良好であった。以上の検討から、量子井戸構造の改良により GaInAs レーザにおいて 40Gbps 動作を実現することができた。

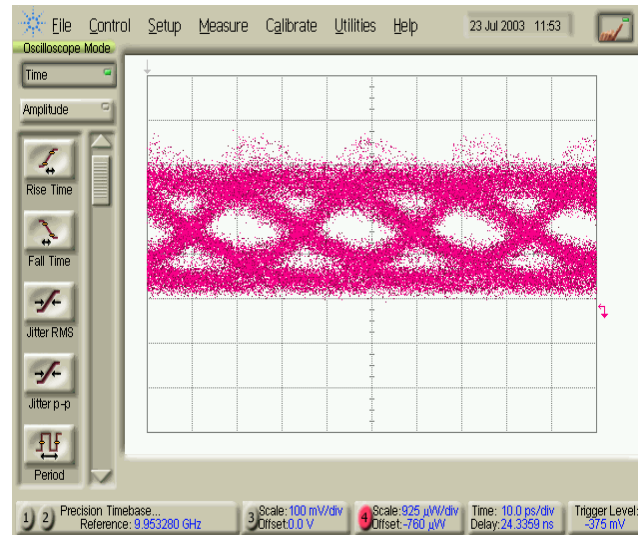


図 4-1-2-6 GaInAs-LD の 40Gbps 駆動時光波形 (横軸 : 10ps/div)
TQW-M2, $L_c=200\ \mu\text{m}$, $I_m=56.4\text{mA}$, $I_{\text{bias}}=60\text{mA}$, ER=5dB

4-1-3 半導体レーザのドライエッチング技術の検討

40Gbps 動作の実現のためには、活性層の最適化のほかにレーザ構造の最適化が必須である。共振器長の低減によって f_r は増大することから、短共振器構造が 40Gbps 実現のための有力な手段となる。しかし、現状のへき開による共振器構造作製では約 $200\ \mu\text{m}$ 以下のレーザ作製は難しい。そこで端面形成やメサ形成に有効なドライエッチング形成技術の検討を行なった。

(1) ドライエッチングの基礎検討

クラッド層に GaInP を有するレーザ構造のドライエッチングの基礎検討を行った。試料には、表 4-1-3-1 に示した GaInNAs 半導体レーザ構造を用いた。

エッチング用のマスクには常圧 CVD (Chemical Vapor Deposition) 法により堆積した PSG (Phospho Silicate Glass) / SiO_2 膜 (1000nm) を使用した。マスクパターンの形成は、キャノン製アライナ PLA-501F を用いてレジストパターンを形成した後、これを $\text{CHF}_3/\text{C}_2\text{F}_6$ ガスの反応性イオンエッチングで転写することで行った。

ドライエッチングには、日電アネルバ製 ECR6001 ドライエッチング装置を用いた。エッチングガスには塩素ボンベガス (昭和電工製、6N 以上) 及び高純度ライン窒素ガスを使用した。これらのエッチングガスはマスフローコントローラを介してエッチング反応室に供給した。ドライエッチング条件は表 4-1-3-2 の通りである。

エッチング終点の検出には、浜松ホトニクス製プラズマプロセスモニタ (C7469) を使用した。

また、エッチング表面の荒さの測定には、オリンパス製 NV-2100 原子間力顕微鏡 (AFM: Atomic Force Microscope) を用いた。

エッチング加工後の断面形状は走査形電子顕微鏡にて観察を行った。

表 4-1-3-1. 実験に用いた GaInNAs 系半導体レーザ結晶構造

① p-GaAs キャップ層 (Be: $2.0 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$)	200nm
② p-InGaP クラッド層 (Be: $0.8 \rightarrow 3.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)	1500nm
③ p-GaAs (SCH) 層 (Be: $3.0 \rightarrow 5.0 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$)	140nm
④ un-GaAs バリア層	10nm
⑤ un-GaInNAs 活性層	7nm
⑥ un-GaAs 層バリア層	10nm
⑦ n-GaAs (SCH) 層 (Si: $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)	140nm
⑧ n-InGaP クラッド層 (Si: $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)	1500nm
⑨ n-GaAs バッファ層 (Si: $1.0 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$)	300nm
⑩ S.I. GaAs sub.	$350 \mu\text{m}$

表 4-1-3-2. リッジ形成と端面ミラー形成に用いたドライエッチング条件

エッチング材料ガス: $\text{Cl}_2(12.5 \text{ sccm})/\text{N}_2(7.5 \text{ sccm})$
エッチング圧力: 0.15 Pa
Rf パワー: 60 W
マイクロ波パワー: 400 W

図 4-1-3-1 は表 4-1-3-2 に示したドライエッチング条件 (エッチング圧力: 1.13 mTorr , $\text{Cl}_2(12.5 \text{ sccm})/\text{N}_2(7.5 \text{ sccm})$, Rf パワー: 60 W , マイクロ波パワー: 400 W) において、リッジ形成を行った場合のエッチング断面形状について SEM 観察を行った結果である。この結果、マスク後退によるエッチング形状の悪化も見られず、良好なエッチング断面形状及び平滑底面が確保された。これは、 N_2 添加により、サイドエッチングを阻止できる良好な側壁保護膜が形成されたことを示しており、In のフッ化物など揮発性の極めて低い物質の堆積が予想できる。また、この条件では、エッチング底面において、 N_2 スパッタリングによる物理的効果とそれによるイオンアシストによる効果が大きく、 N_2 添加量の少ないラジカル成分が比較的大きな場合によく観察される底面の針状の荒れは観察されなかった。この底面の針状の荒れは、In と P の揮発性に大きな差がある為起こる現象で、揮発性の大きな P が選択的に除去され、揮発性の低い In が取り残されることにより形成される現象である。

次に、端面ミラー技術について検討を行った。この場合もリッジ形成技術と同様にエッチング表面・側壁の平滑性及び垂直性が必須である。更に、n-InGaP クラッド層下の GaAs 基板までエッチング除去が必要で、エッチング深さは、リッジ形成のエッチング深さ約 $1.7 \mu\text{m}$ の 2 倍以上になる。リッジ形成と同様の表 2. のエッチング条件において、エッチング時間のみを $195 \rightarrow 390 \text{ [sec]}$ としたエッチング断面形状を図 4-1-3-2 に示す。その結果、端面ミラーにおいても良好なエッチング平滑性及び垂直性が得られることを確認した。

以上の結果から、表 4-1-3-2. のエッチング条件は p-GaAs キャップ層・p-InGaP/n-InGaP クラッド層のリッジ形成と端面ミラー形成においてエッチング側壁及び平面の平滑性が良好なエ

ツチング形状が確保出来ることを確認した。

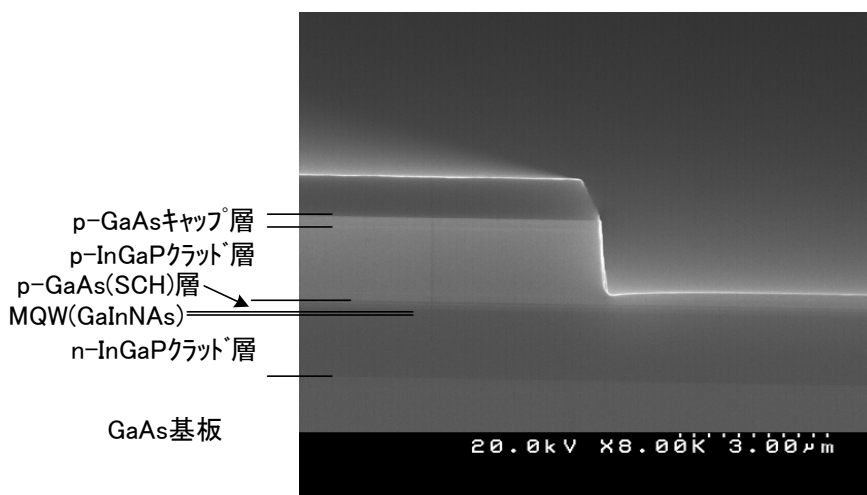


図 4-1-3-1 リッジ形成におけるエッチング断面形状

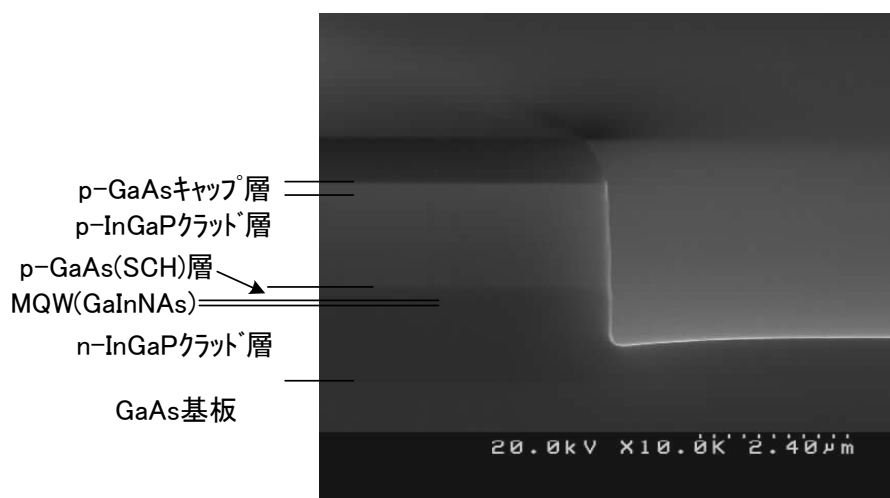


図 4-1-3-2 端面ミラー形成におけるエッチング断面形状

(2)プロセスの机上検討

従来の、へき開による共振器作製プロセスでは、ウエハによる工程を終了した後にウエハのへき開を行い、端面を形成する。へき開の工程をそのままドライエッチに置き換えるとそれ以前の工程を変更する必要が無く、プロセスの検討項目は少なく済む。そこでまず、電極形成までのウエハ工程終了後にドライエッチによる端面形成を行う場合を考える。

ウエハ上に既にデバイスが形成されている場合、ドライエッチのマスク材料としてレジストを使用する必要がある。マスクの形状をそのまま結晶部分に転写するにはマスク自身はエッチングされないことが必要であり、また本検討においてはドライエッチにより形成された側面、すなわち共振器の端面はへき開面になるべく近く、原子レベルでの平坦性を要する。これを1層レジストのマスクで実現するのは困難であり、過去に3層レジストを用いてマスク形成した等の検討例がある。しかし、本検討に用いるドライエッチング条件ではレジストが容易にエッチングされるため、マスク材の最適化は困難であると考えられる。そこで次に、これまでに実

績のある SiO₂ をドライエッチングのマスク材に用いる場合を検討する。

SiO₂ をマスク材として用いる場合、デバイスを形成した後ではデバイス上に保護膜(SiO₂)があるため、その保護膜を保存したままマスク材を除去することが非常に困難となる。よって、ドライエッチングによる端面形成の工程を初めにすることが必要である。この場合、プロセスの順序変更に伴って多くの検討課題が生じる。検討の主な要点は、(a)SiO₂ マスク形状の垂直性と側面の平坦性、(b)端面形成後のプロセス時の端面保護、(c)端面形成により生じた溝部の平坦化、(d)端面近傍のスルーホール（電極孔）および電極形成位置、である。これらの検討項目は実現可能であると考えられる。

以上、二通りのプロセスフローの他、数種類のフローに関してプロセス装置の制約等も加味しながら机上検討を行った結果、上記2つめの『はじめに端面を形成する』プロセスフローを採用することにした。

(3)要素プロセス検討

机上検討を行った結果をもとに、要素プロセスの検討を行った。まず最初はメサ形成を行わず電極にて電流狭窄を行う簡易構造について検討した。プロセス順は以下の通りである。

1. ドライエッチングによる端面形成
2. 端面反射膜を兼ねた端面保護膜の形成
3. スルーホール形成
4. 電極形成

以下、机上検討の検討課題毎に検討結果を述べる。

(a)SiO₂ ドライエッチングマスクの形状の垂直性と側面の平坦性

端面をウエハに対し垂直に且つ形成した面を平坦にするには、ドライエッチングのマスク自体をそのように形成する必要がある。形成した面の平坦性に最も影響するのはフォトマスク自身が持つ直線のうねりである。この影響をなるべく避けるため、フォト工程を密着露光ではなく1/5の縮小投影露光(ステップ露光)を用いた。ステップ露光により、SiO₂ マスクを形成するためのフォトレジストマスクの垂直性も改善された。露光条件を最適化したところ、垂直性は85度まで達した。

(b)端面形成後のプロセス時の端面保護

端面を形成した後、端面を清浄に保ったままプロセス進行するために保護膜の形成を行った。端面はウエハに対し垂直な面であるので保護膜形成方法としてはカヴァレッジの良好な方法を選択する必要がある。本検討ではこの保護膜が端面反射膜を兼ねるよう、カヴァレッジが良く垂直面でも膜質の劣化が少なく、膜厚制御性も良いプラズマ CVD 法を適用した。端面反射膜を兼ねることで本保護膜は除去する必要が無くなり、端面が薬品等に晒されることが無い。端面反射膜の形成では膜厚の制御が重要である。精度を高めるため膜形成直前に成膜速度を測定しフィードバックするようにしたところ、±10%の精度で成膜することができた。

(c)端面形成により生じた溝部の平坦化

端面エッチングの深さは、レーザの出射光が溝の底面で『けられ』ないよう4~5μmとした。よってプロセス進行に当たっては、特にフォト工程ではこの溝部を埋めて平坦化しながら進める必要がある。また溝を埋める材料は工程後容易に除去できる材料でなければならない。初め

によく用いられているポリイミド数種で検討を進めたところ、本構造では溝部の大きさ（埋める体積）が大き過ぎ、対応できないことが判明した。次にフォトプロセスの露光に用いている光の波長では感光せず、また現像液に溶解するレジスト”PMGI”を用いて検討した。その結果、PMGIの硬化バーク条件を最適化することにより、その上にフォトレジストを形成しても混じり合うことが無く、制御も容易であることが分かった。またPMGIと上層のイメージング層の形成条件を最適化し、溝部を平坦化することが出来た（図4-1-3-3）。

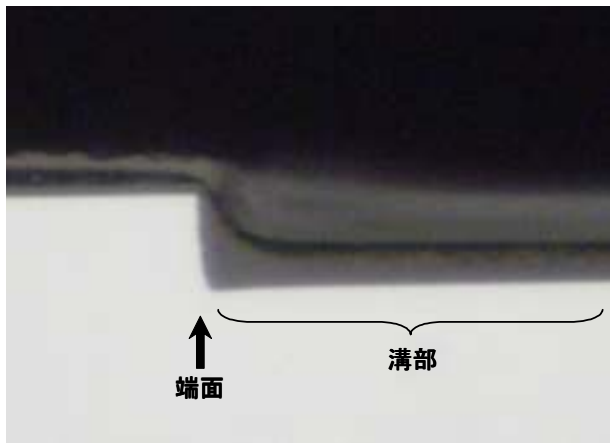


図 4-1-3-3 溝部の平坦化

(d) 端面近傍のスルーホール（電極孔）および電極形成

端面形成後にスルーホールや電極の形成を行う場合、それらの端部が共振器端面に近接しているため高度な位置制御性が必要となる。制御性に劣れば、スルーホールや電極が光の出射部にかかったり、逆に共振器の内部方向に寄り過ぎると端面に電流が届かない、といったことが生じてしまう。フォト工程にステップを採用したためフォト工程自体の位置精度は良い（ $\sim 1 \mu\text{m}$ ）。従って主にスルーホール形成の際のフォトやエッチングにおけるサイドエッチ量および電極形成の指向性を考慮して精度を検討し、フォトマスクの設計を行った。スルーホールの端から共振器端面までの距離の目標値を $3 \mu\text{m}$ 以下とした。その結果、図4-1-3-4に示すように目標を達成し非常に良好な仕上がりとなった。

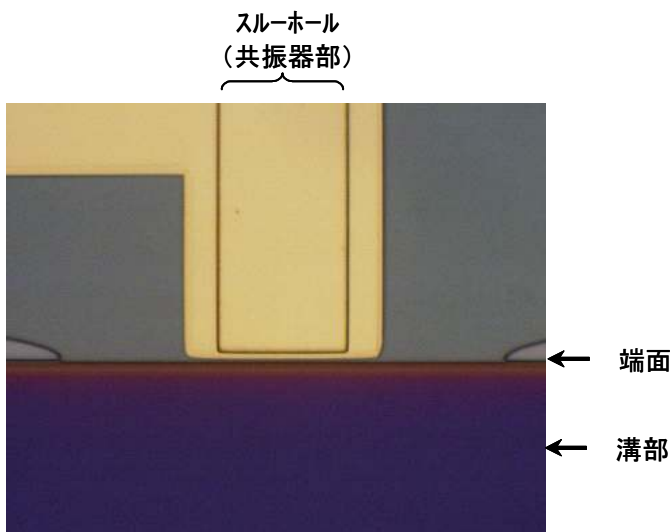


図 4-1-3-4 共振器端面近傍の上面図

(4)レーザ端面構造の試作

以上のプロセス検討を行った後、レーザ構造の試作を行った。検討結果が良く再現された形状を実現することが出来た。そのSEM(Scanning Electron Microscope)像を図4-1-3-5に示す。

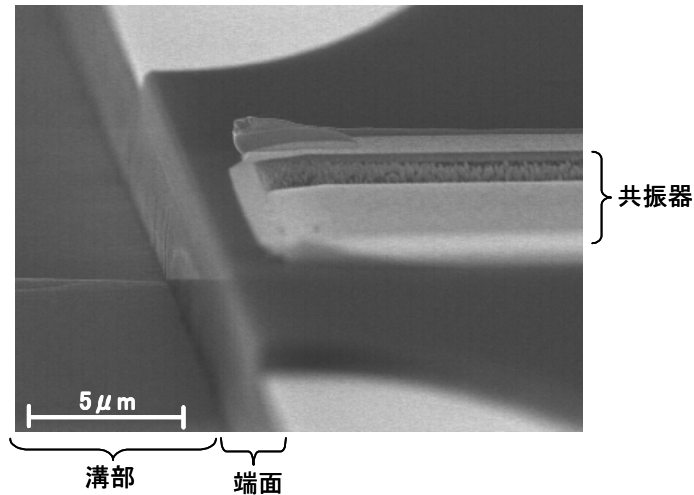


図 4-1-3-5 試作したレーザ構造の SEM 像

4-1-4 40Gbps 動作直接変調レーザの伝送特性の検討

40Gbps で動作する直接変調レーザの光ファイバー伝送をシミュレーションするに先立ち必要なパラメータの抽出を行った。主要なパラメータは4-1-2で述べた GaInAs レーザのパラメータを用いた。線幅増大係数 α は 10Gbps 用の製品同等レベルの $1.3 \mu\text{m}$ 帯レーザを使用した。図 4-1-4-1 にチャープ特性の時間応答特性と光出力から求めた線幅増大係数 α

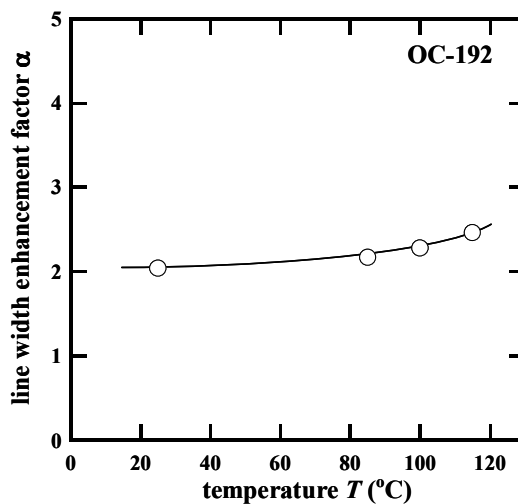


図 4-1-4-1 10Gbps 用半導体レーザにおける線幅増大係数の温度依存性

の温度依存性を示す。図から α はほぼ2であることがわかった。

シミュレーションは光密度、位相とキャリアの振る舞いを記述するレート方程式をルンゲクッタ法により離散的に解析する手法を用いた。40Gbit/sの超高速動作の応答を正確に解析するため、離散時間幅は 1.2fs としてこの 10 倍の時間間隔の解析データを計算値として記録した。この計算結果により得られた光密度と位相の情報を電界強度の複素表示に変換して光フ

ファイバ伝送シミュレーターに入力した。本シミュレーターはフーリエ変換による周波数領域の解析に基づくものであり、逆フーリエ変換により元の時間応答に戻す。

シミュレーションの際のレーザ特性に関するパラメータを表 4-1-4-1 に示す。本表において※印がついているパラメータはその値を±30%増減させて波形の変化を比較検討した。また、シミュレーションの際の信号データは"0011110101100100"の 16 ビットデータを用い、バイアス電流と駆動電流は実験値に近い値で静的な状態で消光比が 5.5dB になるような値を選んだ。尚、発振波長は 1.3 μm 帯を仮定し光ファイバ分散をパラメータとして計算を行った。

表 4-1-4-1 計算に使用した半導体レーザのパラメータ(標準値)

パラメータ	記号	単位	値	備考
共振器長	L	μm	200	
活性層幅	W	μm	5	リッジ構造の横方向拡散を考慮
総量子井戸幅	d	nm	15	5nm X 3 well
微分利得	dg/dn	m ²	2.18 × 10 ⁻¹⁹ ※	緩和振動周波数測定と光閉込計算から算出
透明となるキャリア密度	n _{tr}	m ⁻³	8 × 10 ²³	
実効屈折率	n _r	-	3.3	
光閉じ込め係数	Γ _{MQW}	-	0.033	2次元シミュレーションから算出
キャリア寿命時間	τ _n	s	7 × 10 ⁻¹⁰	InGaAlAs系レーザの実測値
光子寿命時間	τ _{ph}	s	2.99 × 10 ⁻¹²	α = 20cm ⁻¹ , Rf/Rr=60/85%
非線形利得係数	ε	m ³	7 × 10 ⁻²³ ※	InGaAlAs系レーザの実測値
線幅増大係数	α		2 ※	InGaAlAs系レーザの実測値
駆動電流	I _m	mA	60.7	消光比: 5.5dB
バイアス電流	I _b	mA	31.7	しきい電流の4倍の値
素子抵抗	R _s	Ω	5	
素子容量	C _s	pF	0.5	

※は値を変えて計算を行った。

図 4-1-4-2 にシミュレーションにより得られた伝送前の動作波形の一例を示す。図には光強度とチャープ特性の時間応答特性を載せた。同図から光波形は入力信号通りの波形を示して

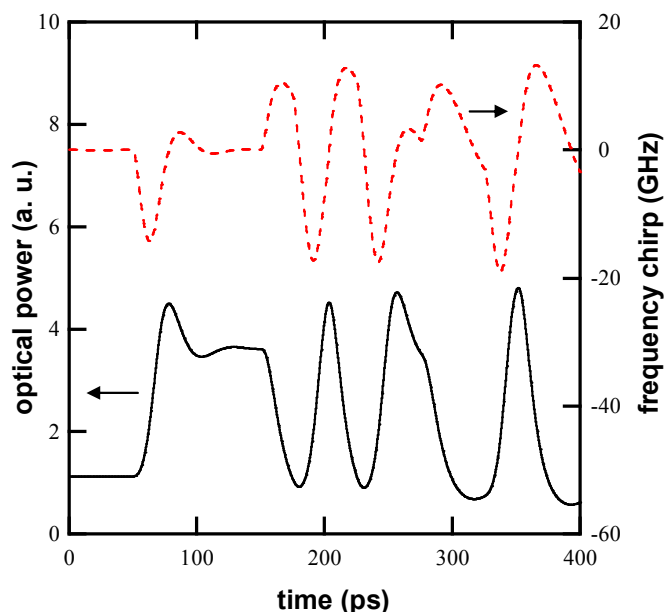
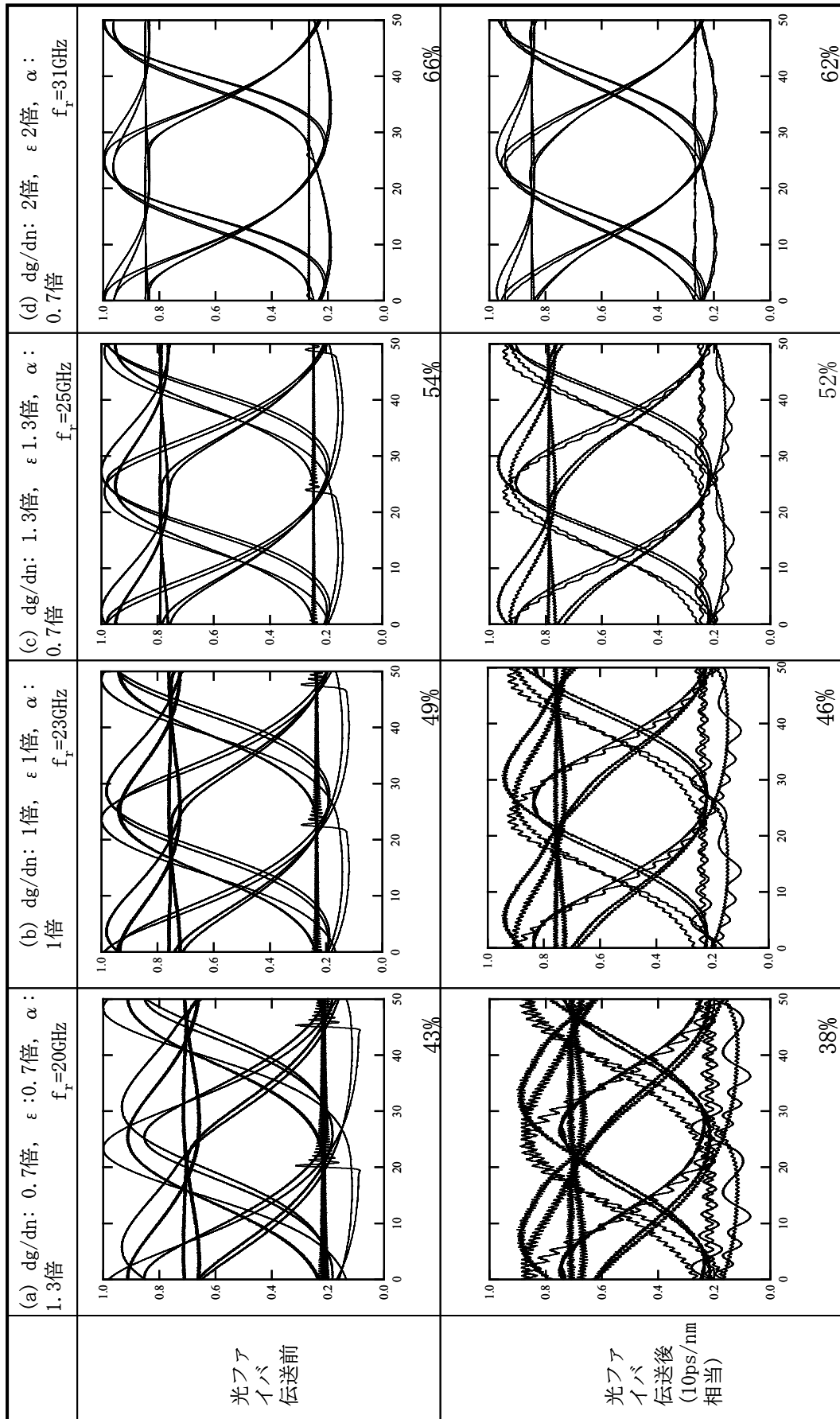


図 4-1-4-2 40Gbit/s 動作波形の 1 例 (表 4-1-4-1 のパラメータによる)

いる。しかし、パターンにより'0'と'1'の光強度が異なることがわかる。チャープ周波数は10Gbps動作の実験値である約10GHzに比べると最大で約2倍大きい。よって10Gbps動作に比べると伝送に対する影響が大きくなる可能性がある。

次にレート方程式により得られた40Gbps動作波形を伝送シミュレーションに入力して光ファイバ伝送後の波形と比較した。このとき表4-1-4-1の標準値に対して波形に重要なパラメータである微分利得、非線形利得係数、及び線幅増大係数を±30%変化させてその波形の変化を検討した。図4-1-4-3に光ファイバの分散が10 ps/nmに相当する距離の伝送を行った前後のアイ波形を示す。分散量10 ps/nmはファイバ長さ当たりの分散値7.5ps/nm/kmを仮定すると1.3 μm帯の光ファイバ2.67kmに相当する。本計算では伝送前を含めてフーリエ変換と逆フーリエ変換を離散的に行っているため、それらの変換の誤差として細かい振動が表れている。検討はこの振動を無視して行った。また、波形は全て光強度を規格化して表示してある。図4-1-4-3(b)は表4-1-4-1のパラメータを用いた場合の伝送前後の波形であり、同図の伝送前の波形は図4-1-4-2の光出力に相当している。伝送前のアイ波形は10 Gbpsの波形に比べるとオーバーシュートとアンダーシュートが大きくパターン効果が顕著である。この波形は実験データとほぼ同等の傾向を示している。シミュレーション波形のアイ開口率は49%であった。これに対して伝送後にはアイ開口率は46%と0.28dB劣化していた。図4-1-4-2ではチャープ周波数が10 Gbpsの2倍と大きかった。ここで、図4-1-4-2の光波形とその重ね合わせである図4-1-4-3(b)を比較するとチャープが大きな波形はオーバーシュートやアンダーシュートしている部分であり、その部分の波形は伝送後には変化しているもののアイ開口率への影響は小さいことが判った。この結果、アイ開口の劣化は微増に留まっていると考えられる。

(a)は(b)に対して微分利得と非線形利得係数が共に30%減少し、線幅増大係数が30%増大した場合の波形である。この条件は表1に対してレーザ特性を劣化させたことに相当する。(a)の伝送前の波形は(b)に比べ劣化しており、アイ開口率は43%に減少した。伝送後には38%と伝送前に比べて0.5dB劣化した。(c)は(a)とは逆に(b)に対して微分利得と非線形利得係数を30%増大させ、線幅増大係数を30%減少させた時の波形である。(c)の伝送前の波形は(b)に比べて改善しており、アイ開口率は54%であった。伝送後は52%と伝送前に比べて劣化は0.2dBに留まった。レーザ特性の向上により伝送前後のアイ開口が改善できることがわかった。しかし、(c)の特性でも波形にはオーバーシュートとアンダーシュートが大きく出ている。そこで微分利得と非線形利得係数が2倍のときの波形を(d)に示した。両係数の増大によりオーバーシュートとアンダーシュートは低減しアイ開口率は66%に増大した。伝送後は62%であり、(c)と同様に伝送による劣化は0.2dBであった。これは(c)と(d)では同一の α を使用したことに起因する。このように微分利得と非線形利得係数の増大が波形改善に有効であることがわかった。



norm. power
time (ps)

図4-1-4-3 40Gbit/s動作における光ファイバ伝送前後のアイパターン
(伝送前の光出力を規格化, 各アイパターン下の数値はアイ開口率)

図 4-1-4-4 には計算により得られたアイ開口劣化と光ファイバ分散の関係を図 4-1-4-3 の (a)-(d)の条件について纏めたものである。伝送によるアイ開口劣化は 1dB 未満であることが必要である。同図から実条件である (b)のアイ開口劣化は 10ps/nm においても 0.28dB と小さいことがわかる。高速に拘わるレーザ特性が悪い(a)ではアイ開口劣化は 0.5dB に劣化している。特性が良い(c)では 0.2dB と低い値であった。この図から 2.67km までは伝送によるアイ開口劣化は顕著ではないことが判る。また、(d)は α が (c)と同一であることから (c)と同一の値を示した。

以上の検討から 40Gbps 直接変調動作による光ファイバ伝送により 2km の短距離伝送ができる可能性を得た。しかし、伝送前の波形は改善の必要があり微分利得向上等の検討が必要と考えられる。

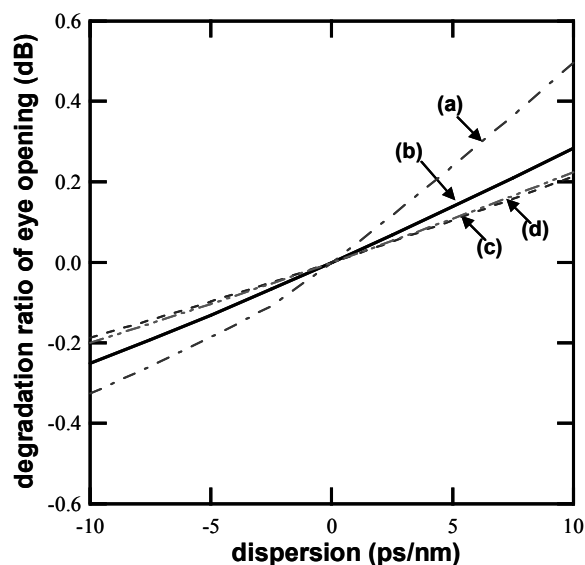


図 4-1-4-4 40Gbit/s 動作動作時における光ファイバ分散とアイ開口劣化の関係

- (a) dg/dn : 0.7 倍, ϵ : 0.7 倍, α : 1.3 倍 (b) dg/dn : 1 倍, ϵ : 1 倍, α : 1 倍
(c) dg/dn : 1.3 倍, ϵ : 1.3 倍, α : 0.7 倍 (d) dg/dn : 2 倍, ϵ : 2 倍, α : 0.7 倍

4-1-5 GaInNAs 単一量子井戸レーザの基礎検討

後述する GaInNAs 単一量子井戸層の高品質化に基づき、GaInNAs レーザを試作した。本研究で検討した GaInNAs レーザの素子構造の模式図を図 4-1-5-1 に示す。また、表 4-1-5-1 に作製した結晶の仕様を示す。比較のため、GaInNAs と同一構造の GaInAs レーザを作製した。クラッド層は後述するように Al 混入を抑制するため GaInP を用いている。GaInNAs の N 組成比は約 1%、In 組成は約 31%である。しきい電流密度の評価には メサ幅 W_a が 80 μm の BA レーザを用いた。また、前後端面にそれぞれ反射率 70、90%のコーティングを施した共振器長 200 μm 、メサ幅(W_a)2 μm のリッジ型レーザで CW 発振時の特性評価および高速動作に関する重要なパラメータである緩和振動周波数の測定を行った。

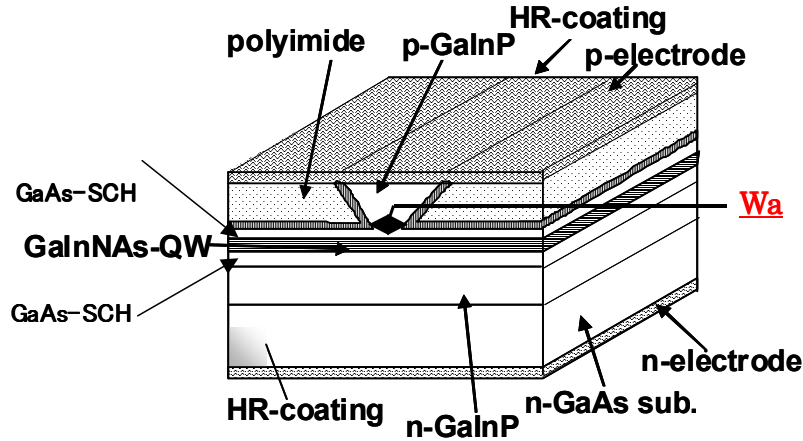


図 4-1-5-1 GaInNAs レーザの構造図

図 4-1-5-2 に BA レーザの測定から得られた GaInNAs と GaInAs のしきい電流密度と共振器長の逆数の関係の典型例を示す。図 4-1-5-2 から GaInNAs の共振器長無限大に相当するしきい電流密度 $J_{th\infty}$ は、 199.7A/cm^2 であり前回の 700A/cm^2 に対しておよそ 1/3 に低減することができた。このしきい電

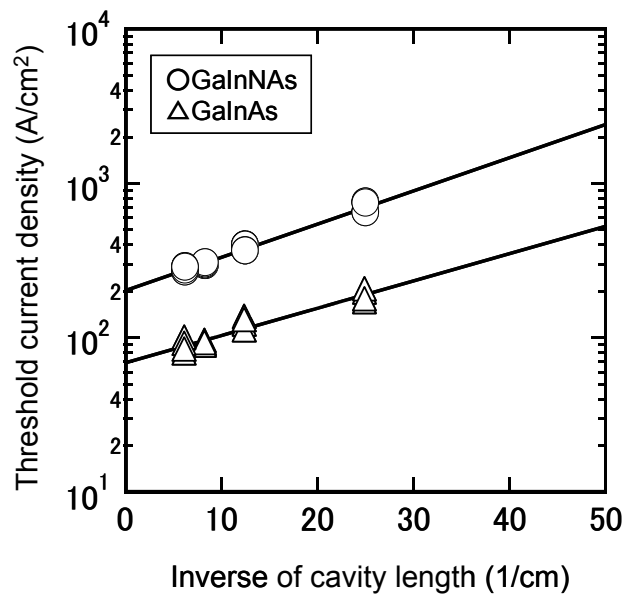


図 4-1-5-2 共振器長としきい電流密度の関係

流密度低減は後述するように Al フリー化に加えて GaInNAs 結晶の成長温度、砒素圧等の結晶成長条件を最適化したことで結晶性が改善されたためであると考えられる。今回得られた GaInNAs の $J_{th\infty}$ は、他機関より報告されている値、 $200\sim 300\text{A/cm}^2$ と同程度であり、先行していた他機関のトップデータと同等レベルに GaInNAs の結晶性が改善したといえる。

リッジ型レーザを用いて測定した 25°C における CW 発振時の電流-光出力特性の典型例を図 4-1-5-3 に示す。素子のしきい電流は 25°C 、 85°C でそれぞれ 5.2mA 、 10mA と非常に低い値を得ることができた。端面発光の GaInNAs レーザでこれらのしきい電流値は我々の知り得る限り世界で最小の値である。また、既に実用化されている InGaAsP や InGaAlAs 等の材料と比較しても同等以下の値である。図 4-1-5-4 には同じ素子のスペクトル波形を示す。ピーク波長は $1.31\ \mu\text{m}$ であり、光ファイバー通信に適合

する長波長化を低しきい電流にて実現することができた。これは後述するように、Alフリーの MBE 成長にて成長条件を最適化したことにより、GaInNAs の結晶性が改善したためと考えられる。

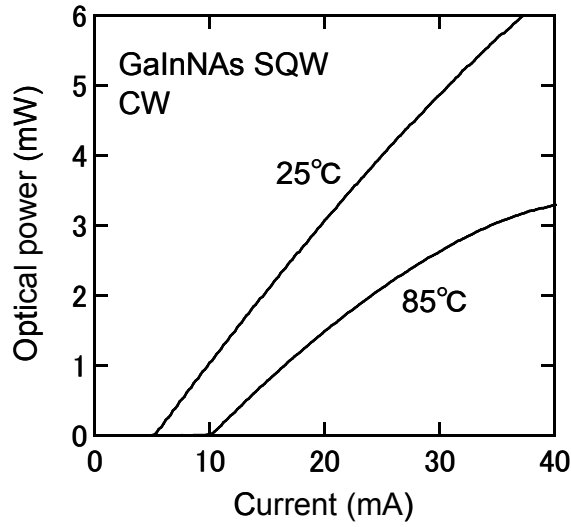


図 4-1-5-3 GaInNAs 単一量子井戸レーザの光出力-電流特性

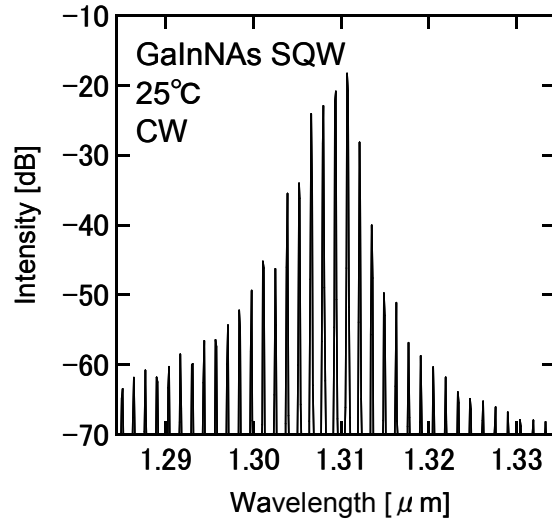


図 4-1-5-4 GaInNAs 単一量子井戸レーザの光スペクトル波形

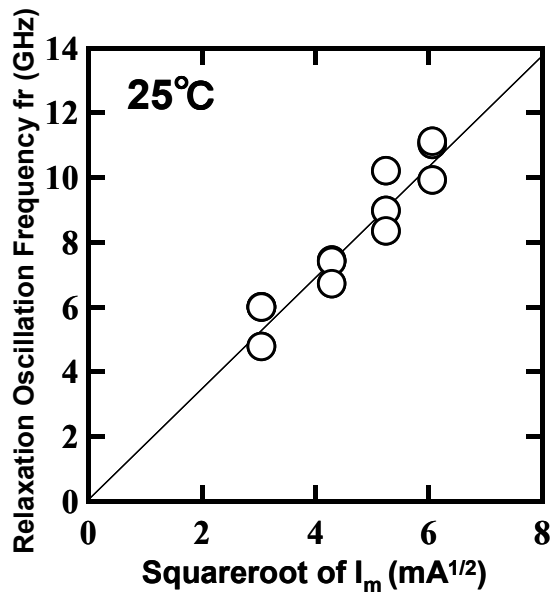


図 4-1-5-5 GaInNAs 単一量子井戸レーザの光出力-電流特性

次に本レーザの緩和振動周波数特性を検討した。図 4-1-5-5 は大振幅電流で測定した緩和振動周波数と駆動電流の平方根の関係である。図から緩和振動周波数の傾きは量子井戸層数が1にもかかわらず $1.8 \text{ GHz}/\text{mA}^{1/2}$ と非常に高い値を得ることができた。この値は 10 層の InGaAsP 量子井戸レーザとほぼ同じ値であり[8]、本材料による高速性が実証された。

以上の検討から本研究の GaInNAs 単一量子井戸レーザは $1.3 \mu\text{m}$ を越える発振波長で端面発光レーザにおける世界最小の低しきい電流を実現し、さらに高緩和振動周波数特性を得ることができた。

4-1-6 GaInNAs 三重量子井戸レーザの基礎検討

GaInNAs 三重量子井戸活性層は後述する活性層の高品質化によって実施された。ここでは高品質化に基づいて作製された三重量子井戸レーザの基本特性を検討した。井戸層幅と SCH (Separate Confinement Heterostructure) 幅は 4-1-2 の高速化の最適化検討に基いた値、即ち、井戸幅 5.5nm 、SCH 層幅 120nm を適用した。井戸層が若干厚いのは長波長化との兼ね合いに依る。障壁層厚は 10nm 幅と比較してより PL (Photoluminescence) 発光が強い 20nm 幅を適用した。共振器長は $200 \mu\text{m}$ とし、しきい利得低減を目的として両端面には 70/90% の高反射率コーティングを施した FP (Fabry-Perot) -LD とした。レーザ構造の概観は図 4-1-5-1 と同様である。

今回測定した素子の室温における光出力-電流特性の典型例を図 4-1-6-1 に示す。素子のしきい電流、スロープ効率はそれぞれ 5mA 、 $0.22\text{W}/\text{A}$ と良好な値を得た。しきい電流は端面発光型の GaInNAs-TQW-LD で世界最小の値であり、既に実用化されている InGaAsP 系や InGaAlAs 系の LD と比較して同等の値を有する。しかし素子抵抗が 10Ω と大きく注入電流値が 50mA 程度で光出力の飽和傾向が見られる。これは GaInP クラッド層及び GaAs-SCH 層の p 型ドーピングが最適化されていないためである。今後、ドーピング濃度の最適化を行う必要がある。図 4-1-6-2 に光出力 3mW 時の光スペクトル波形を示す。図から判るようにピーク波長は約 $1.29 \mu\text{m}$ となり、光ファイバ通信に適合する長波長の発振を得ることができた。

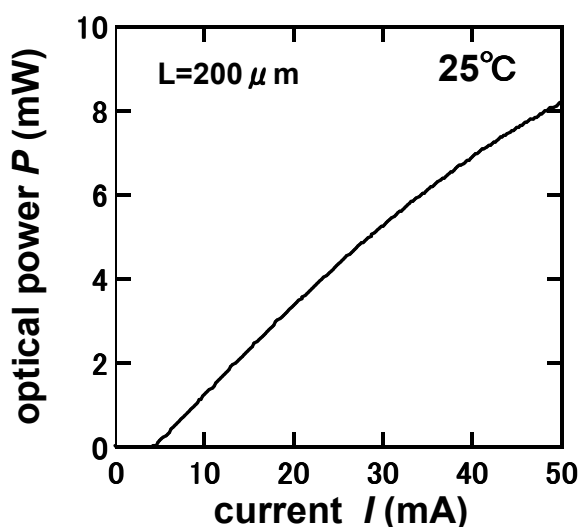


図 4-1-6-1 光出力-電流特性

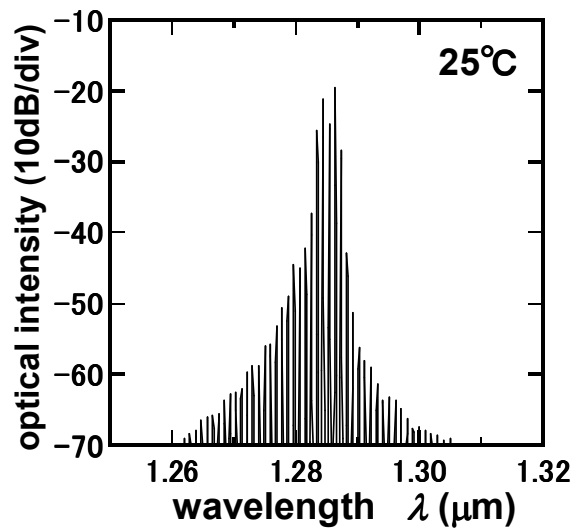


図4-1-6-2 光スペクトル波形

4-1-7 面発光レーザの高速化に関する検討

本研究では、次世代の光インターコネクタ、及びアクセス系光ネットワーク用のキーデバイスとして注目されている面発光レーザの直接変調の高速化を研究目標とし、近年、端面出射型レーザの外部光帰還による直接変調帯域の増大が報告されている。これによる面発光レーザの高速化を検討している。これまでに、周波数チャーピングを無視した小信号解析を行い、外部帰還光をレーザ共振器に、同位相で結合させたときに変調帯域は抑圧され、逆位相で結合させたときに、変調帯域は増大し、同相で帰還させたときに抑圧されるということを見出した。

(1) 疑似ランダム信号解析

4 次の Runge-Kutta 法を用いて、疑似ランダム信号に対する外部複合共振器面発光レーザの応答の数値解析を行った。ここでは周波数チャーピングを考慮して議論した。20Gbps の NRZ 疑似ランダム信号に対する応答をアイパターンで評価した。小信号解析の結果と同様に、逆位相で帰還させたときに最もアイ開口に改善がみられたが、同相で帰還させたときにも応答が改善する条件が存在するという小信号解析の結果と、完全には一致しない結果を得た。これを受けて、同相で帰還させた場合について、周波数チャーピングを考慮した場合と、無視した場合のアイパターンを比較した。結果としては、図 4-1-7-1 (a) (b) に示すように、周波数チャーピングを考慮した場合は外部光帰還により、アイ開口に改善がみられた。チャーピング効果を無視した方は逆にアイ開口は悪化した。小信号解析と、疑似ランダム信号解析の結果から、外部共振器による変調帯域増大の原理は、外部反射鏡に由来する、実行的な反射率の摂動による共振器損失変調と、チャーピングによる損失変調であるという考察をした。

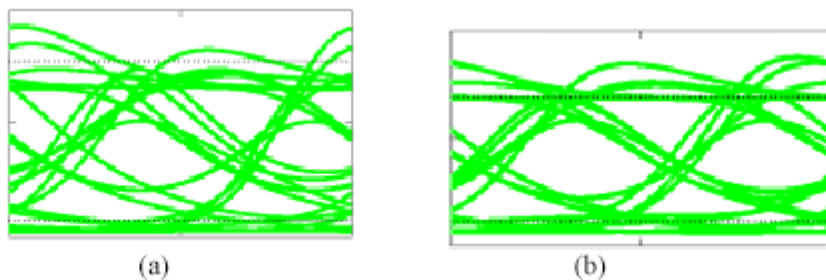


図 4-1-7-1 Calculated eye patterns at 20Gbps

(a) without optical feedback (b) with optical feedback

(2)モノリシック集積複合共振器面発光レーザの提案と試作

基板出射型面発光レーザの基板側表面に，HBr ウェットエッチングで球面レンズを加工し，モノリシックに複合共振器を集積する構造を提案した。まず，溶液の温度 30℃，エッチング時間 2 分のエッチング条件における，ホーリング用の円形マスクの直径とレンズの曲率半径の条件だしを行った。結果を図 4-1-7-2 (a)，(b)に示す。次に，この素子のプロセスを検討し，製作と評価をした。製作した素子の写真を図 4-1-7-3 (a)，(b)に示し，I-L 特性と発振スペクトルをレンズ無しのものと比較した結果を図 4-1-7-4 (a)，(b)に示す。I-L 特性ではレンズ無しのものにはみられない，外部共振器レーザに特徴的なキックが強く出た。また，4mA の電流で発振させた発振スペクトル解析では，リファレンスの発振スペクトルは SMSR が約 32dB で単一モードであったが，モノリシック集積複合共振器面発光レーザの発振スペクトルには複数のピークが出て，そのスペクトル間隔は複合共振器モードの一部がスペクトルホールバーニングにより，抑圧されたプロファイルであった。以上の結果は外部光帰還が起きなくては説明できないので，目的とする素子構造の製作には成功したといえる。今後，製作した素子の動特性評価を行う予定である。

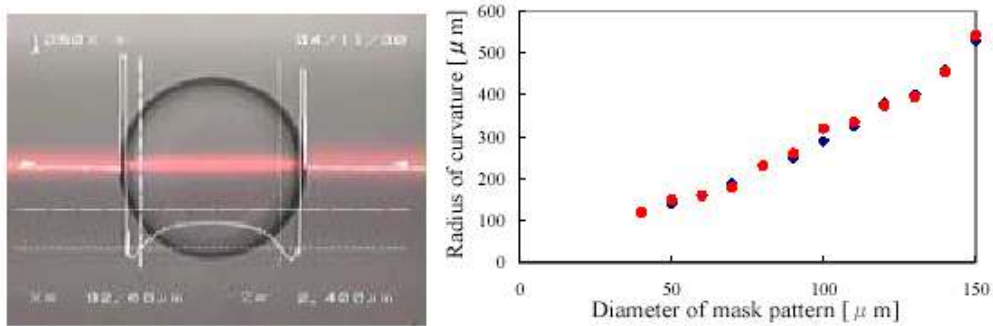


図 4-1-7-2 (a) Fabricated GaAs micro-lens. (b) Lens curvature versus mask diameter

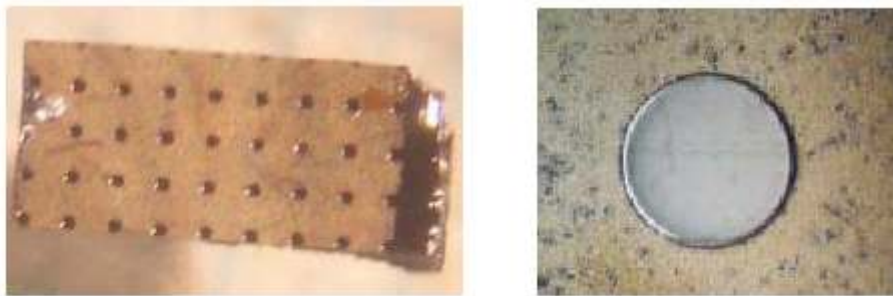


図 4-1-7-3 (a) Fabricated VCSEL with micro-lens. (b) Top view of microlens.

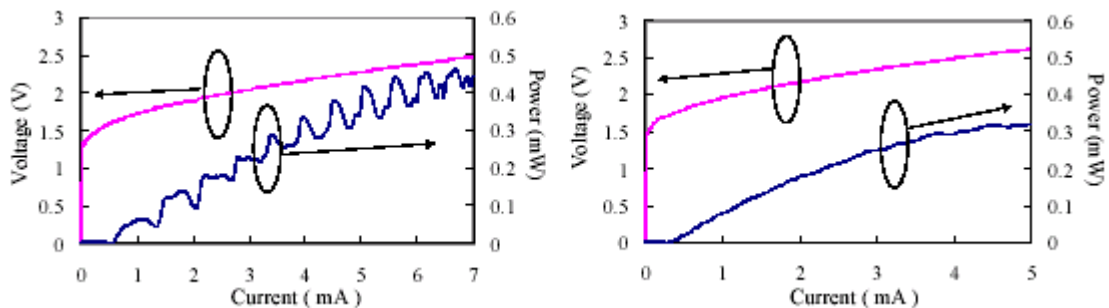


図 4-1-7-4 (a) L/I characteristic with micro-lens. (b) L/I characteristic without micro-lens.

4-1-8 まとめ

超高速レーザ構造及びそのファイバ伝送特性の検討を行い以下の結果を得た。

- (1) $1.1\ \mu\text{m}$ 帯 GaInAs レーザにおいて量子井戸活性層の最適化、多重量子井戸層化、p型変調ドープ構造導入により緩和振動周波数を単一量子井戸層の約2倍に向上させることができた。さらに40Gbps動作にて消光比約5dBの良好なアイ開口を得ることができた。
- (2) ECRドライエッチを使用したリッジ形成と端面ミラー形成の検討を行い、共に良好なエッチング表面・側壁の平滑性と垂直性エッチング形状が得られる ECR エッチング条件を見出すことができた。さらに、ドライエッチ端面レーザプロセスの検討を行い、垂直なエッチ端面を有するレーザ構造を形成することができた。
- (3) 半導体レーザの40Gbps直接変調動作に関して GaInAs レーザの特性と、既に製品化されている10Gbpsレーザの特性に基づいてレート方程式を用いてシミュレーションを行った。その結果、ルータ間接続に相当する短距離伝送の約2.7kmの短距離伝送が適用できる可能性を見出した。
- (4) GaInNAs 単一量子井戸レーザにおいて MBE 成長では世界最小と同等のしきい電流密度を得た。さらにリッジ型レーザにおいて世界最小のしきい電流特性を $1.3\ \mu\text{m}$ を超える波長で初めて得ることができた。
- (5) GaInNAs 三重量子井戸リッジ型レーザにおいて結晶性の改善により世界最小となるしきい電流5mAを発振波長 $1.29\ \mu\text{m}$ で得た。
- (6) [再委託研究]面発光レーザにおいて外部複合共振器構造の導入により20Gbpsの高速動作にてアイ開口が改善することを計算で見出した。さらにモノリシック集積複合共振器面発光レーザの構造を提案し試作を行った。

4-2 高品質活性層の作製技術の研究開発

4-2-1 研究開発内容

本サブテーマでは高光学利得を有する $1.3\mu\text{m}$ 帯の材料 GaInNAs の高品質化の研究開発を行った。他の材料と比較して層分離しやすいため結晶成長条件の余裕度が小さく、高品質化への手法が確立されていなかった。本研究では始めに Al 混入を避けるために Al を含まない MBE 装置を用いて GaInNAs 高品質化の検討を行った。次にレーザ構造での単一量子井戸層の最適化を行った。さらに、高速化に必須な三重量子井戸層の検討を行った。尚、本材料は微細な結晶状態が明確にわかっていないため物性の評価を行い高品質化への指針を得た。

4-2-2 GaInP クラッド層の MBE 成長に関する研究

半導体レーザ用多層結晶を作製する為には、活性層の上下にクラッド層を配置しなければならない。我々はこれまで、クラッド層の材料に AlGaAs を用いてきた。AlGaAs は、GaAs 基板上に高品質な結晶を比較的容易に作製できる利点を有する。しかし、GaInNAs レーザでは Al が外部不純物となり結晶性を低下させることが判明したので、クラッド層の材料には Al を含む AlGaAs を避けるのが賢明だと考えられる。

AlGaAs に変わる材料としては GaInP が挙げられる。しかし、GaInP の結晶成長は、特に MBE 法では困難である。主な問題は、次の 2 である。

- (ア) 活性層の GaInNAs 系材料は V 族元素が As であるが、GaInP では V 族元素が P である。それらの材料を積層するには、V 族原料の急峻な切り替えが必要になる。最適化が不十分な場合、V 族元素の抜けや As と P の混合が発生してしまい良質な接合界面を形成することが出来ない。その結果、非発光中心が発生する。
- (イ) AlGaAs の場合、混晶組成が多少ずれても格子整合が保たれるので結晶性の劣化は生じない。一方、GaInP の場合、結晶性の劣化を防ぐ為には格子不整合度を $\pm 0.05\%$ 以内に収めなければならない。これは、混晶組成の変動を $\pm 1\%$ 程度に収めなければならないことを意味している。原料の供給量を熱（温度）で制御する MBE 法では特に困難である。

一方、クラッド層を GaInP とする利点は以下のとおりである。MBE 成長室から Al 材料を完全に取り除くことができるので、GaInNAs 活性層への Al の混入を排除できる。また、Al 原料は非常に活性なので、大気中の酸素を取り込みやすく MBE 成長室内での O 供給源となる。従って、Al 材料の排除は、GaInNAs の結晶性を低下させる不純物の Al と O の両方の低減に有効である。また、GaInP では格子不整合度の故意的なシフトが可能なので、活性層に与える歪を抑制することが可能である。

以上を鑑み、我々はクラッド層の材料を GaInP へ変更する決断をくだし、上記の問題(ア)及び(イ)を解決する方法を検討した。以下に、その結果を示す。

(ア) V族元素の急峻な切り替え

V族元素の急峻な切り替えを実現するためには、原料供給のシーケンスを最適化する必要がある。原料供給のタイミングは装置のジオメトリーに依存する。従って、最適な原料供給のシーケンスは、各結晶成長装置ごとに異なる。本研究では、図 4-2-2-1 に示す構造の GaAs/GaInP 量子井戸を作製し、77K でフォトルミネッセンスを測定し、その発光波長と半値幅を、他の結晶成長装置で最適化をすました弊社の標準試料の値を目標に最適化を行った。最小の井戸幅は

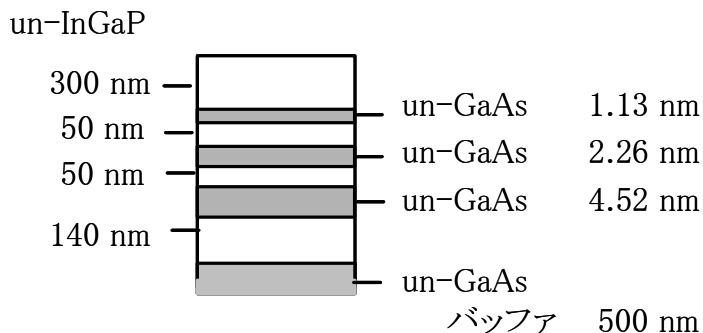


図 4-2-2-1 最適化に用いた GaAs/GaInP 量子井戸の構造

1.13 nm (4 原子層厚) で、III-V 混晶の量子井戸としては作製限界に近い。図 4-2-2-2 に、PL スペクトルの一例を示す。表 4-2-2-1 に、最適化後の結果を示す。界面で As と P の混合が発生した場合には発光波長が長波長化 (低エネルギー化) してしまうことを、念頭において頂きたい。データが示すとおり、最適化が上手くおこなわれ十分な特性が得られたことが分かる。

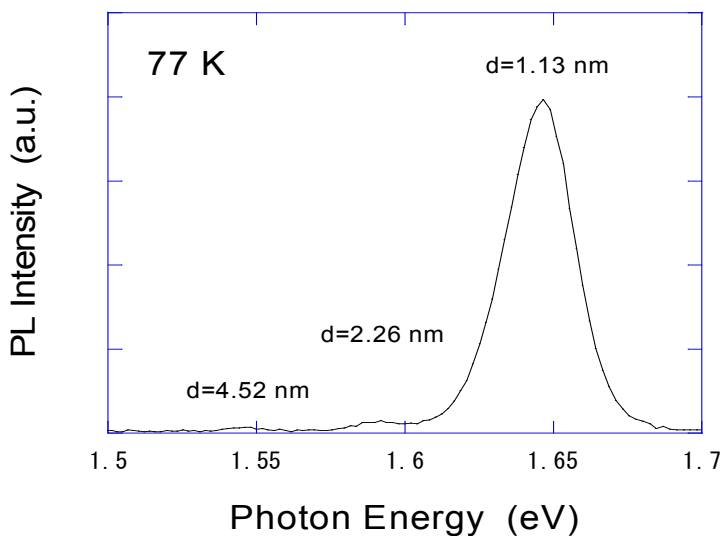


図 4-2-2-2 PL スペクトルの一例

表 4-2-2-1 作製した量子井戸の 77K における PL 特性

井戸幅	本研究		日立標準品	
	エネルギー	半値幅	エネルギー	半値幅
1.13 nm	1.646 eV	27.1meV	1.65	30
2.26 nm	1.589	15.1	1.58	20
4.52 nm	1.544	11.6	1.54	10

(イ) 混晶組成の安定性

原料供給を安定化させるために、まず Ga と In の Flux のどちらが時間的に不安定なのかを検討した。手法は、異なる In 混晶組成の GaInAs 結晶を作製し、その組成変動値と In 混晶組成の相関を調べた。その結果、セル温度の高い Ga の Flux がより不安定であることが分かった。そこで、Ga セルの構造を変更することにした。設計を変えて試作したセルの一つが安定性に優れることが分かった。図 4-2-2-3 に、そのセルを用いて結晶成長した $1.5\mu\text{m}$ 厚の GaInP の X 線回折スペクトルを示す。GaAs 基板と GaInP エピ層の半値幅はそれぞれ 20 及び 26 秒であり、GaInP エピ層の値としては十分良いものである。また、本試料の格子不整合度は +0.02% であり、目標範囲の $\pm 0.05\%$ に入っている。さらに run to run の再現性も 0.04% 程度の変動に収まった。

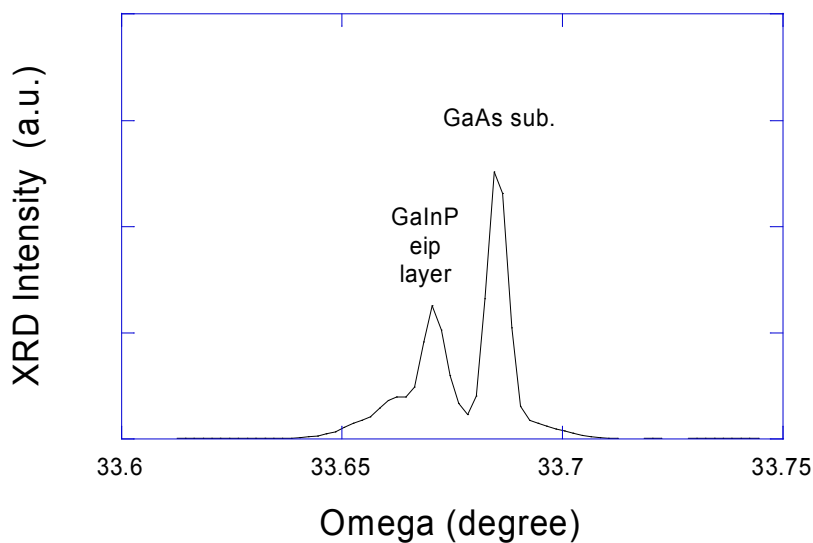


図 4-2-2-3 GaInP の X 線回折スペクトル

4-2-3 GaInNAs 単一量子井戸層の高品質化

GaInNAs 中への Al の混入が結晶性劣化の一つの原因になることが最近報告されている [9]。そこで、我々のところでも MBE 成長室を新規に購入して、原料として Al を成長室で全く使用しない Al フリー GaInNAs 結晶の検討を行った。前節でも述べたように、まず、AlGaAs クラッドの代わりに GaInP クラッドを用いるための検討を行った。次に、Al フリー結晶成長での成長条件最適化を行うことにより、結晶性のさらなる向上を目指すことにした。本節ではその検討結果について報告する。

まず、種々の条件で成長した単一量子井戸結晶を PL (Photoluminescence) 法により評価し、PL 強度が強くなる最適条件を探すこととした。PL 測定は顕微フオルミネセンス装置を用いて室温で行った。分光器の焦点距離は 32cm であり、分光した光を液体窒素冷却の Ge 検出器を用いてロックイン検出した。励起波長は Ar イオンレーザの 514.5nm と YAG レーザの 1064nm であり、励起強度はレーザの出射端でそれぞれ 50mW と 80mW とした。GaInNAs/GaAs 量子井戸をこれらの波長の光で励起すると、514.5nm 励起では井戸層と障壁層の両方でキャリアが励起されるが、1064nm 励起では井戸層のみで励起される。一般に、井戸層励起では PL 強度が弱くなるが、再結合するキャリアの量が主に井戸層のみに依存するために、井戸層の結晶性に関する定

量的な議論ができる。そこで、レーザ構造結晶の PL 測定については、励起波長として 1064nm を採用し、PL 強度の低下を開口数の大きい赤外対物レンズ (NA=0.8) を使った顕微測定で補った。一方、PL 強度が弱いものも含む成長条件の最適化では、励起光のスポットサイズが数 100 μm になるマクロ測定室で PL 測定を行い、励起波長を 514.5nm とした。

GaInNAs 結晶では、結晶性を向上させるために通常結晶成長後に熱アニールを行う。このアニールを行わなければ、室温では PL 強度が微弱で GaInNAs 結晶の PL 評価が難しい。今回の検討では、MBE 成長室ではアニールは行わず、MBE 成長室の外でアニールを行った。アニールはそれぞれの結晶で数点の温度で行い、試料ごとにアニール温度の最適化を図った。これは最適なアニール温度は結晶構造が異なれば変わる可能性があるためである。

今回特に注目して最適化を行った成長条件は成長温度と砒素圧である。GaInNAs 単一量子井戸についてこれらの PL 強度依存性を調べ、最適条件を得た。次に得られた最適条件で成長した単一量子井戸レーザ構造結晶を EL (Electroluminescence) により評価した。EL 法は半導体レーザ結晶に比較的大きめの電極を設けて電流を注入し、端面から出射する光の強度やスペクトルを調べる評価方法である。これまでの報告で確認されているように、EL 強度とレーザのしきい電流密度に明瞭な相関が見られ、EL 強度が強いほどしきい電流密度が小さくなる。EL 評価を行った理由は、作製と評価に時間のかかるレーザを試作する前に簡便な EL 素子作製を行い、しきい電流密度を推定するためである。

図 4-2-3-1 に、今回作製した EL 素子における発光強度の注入電流密度依存性の一例を、GaInAs 試料および成長条件の最適化前の前回 GaInNAs 試料を含めて示す。GaInNAs および GaInAs 単一量子井戸の井戸幅は 7nm で、In 濃度は 31%、N 濃度は 1% である。この図で明らかのように、今回の最適条件で成長した GaInNAs では前回の最適化前の GaInNAs に比べて約 3 倍の EL 強度が得られた。このことは、EL 強度としきい電流密度との相関から、今回の結晶でレーザを作製すれば、しきい電流密度が大幅に改善されると推定できる。また、このことは今回の結晶で結晶性が大幅に改善されていることを示している。一方、GaInAs に比べては GaInNAs の EL 発光強度はいまだ低い。半導体レーザの動作電流密度とほぼ同等の 500A/cm² における EL 発光強度は GaInAs では 6mW であるのに対し、GaInNAs ではその約 1/3 の 2.5mW である。これは GaInNAs の非発光再結合成分が GaInAs に比べて多いためと考えられる。

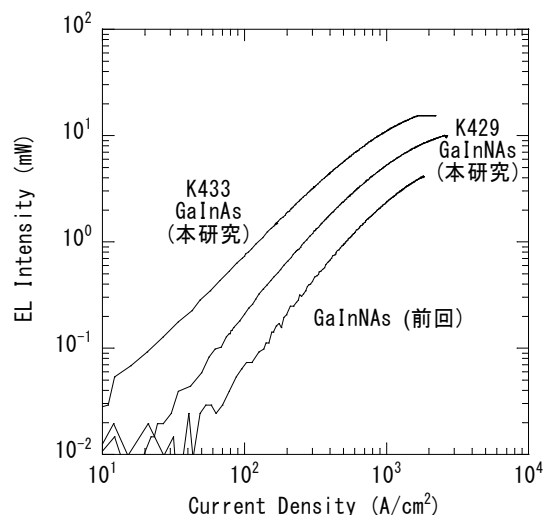


図 4-2-3-1 EL 強度の注入電流密度依存性

次に、レーザのしきい電流密度と PL 強度との関係を調べるために、EL 強度と PL 強度との相関に注目してみる。これは、GaInPAs/InP 量子井戸では井戸層励起の PL 強度とレーザのしきい電流密度との間に相関が見られるために[10]、GaInNAs 量子井戸でもそのような相関が期待できるためである。図 4-2-3-2 は EL 強度 10mW での電流密度と PL 強度との関係をまとめたものである。EL 強度 10mW での電流密度は、図 4-2-3-1 の EL 強度の電流密度依存性で、電流密度が $500\text{A}/\text{cm}^2$ 近傍における接線が EL 強度 10mW の線と交差するところから推定した。PL 強度は EL 素子と同じウエハから切り出した結晶に関する PL 測定から得た値で、励起波長は井戸層励起に対応する 1064nm である。また、この図にはこれまでに集められたデータを白丸でいっしょに示した。この図 4-2-3-2 から明らかなように、EL と PL との間には相関があり、その関係は、今回の単一量子井戸結晶ではおおよそ $(\text{EL}) \propto (\text{PL})^{-1}$ である。つまり、レーザのしきい電流密度と PL 強度との間には逆比例の関係があることが分かる。このことは、PL 測定でよく光る結晶ほど、EL での電流密度が下がり、レーザのしきい電流密度も小さくなることを示している。したがって、本報告で PL 強度をもとに結晶成長の条件最適化を行ったことの正当性は、この関係からも裏づけられる。

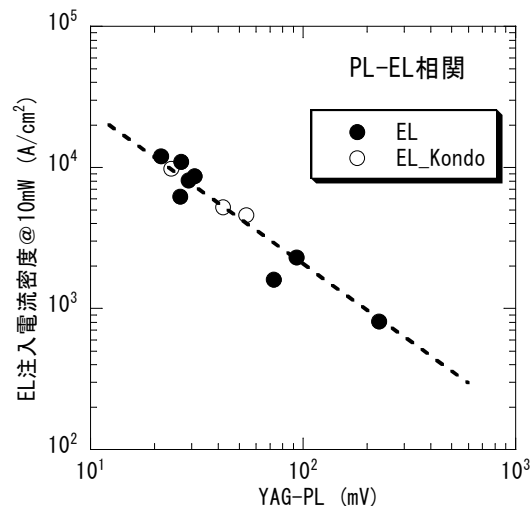


図 4-2-3-2 EL と PL の強度相関

最後に、実際にブロードエリアレーザを作製して、しきい電流密度を実測した。4-1-5 節で述べたように、作製したブロードエリアレーザは発振波長 $1.31\mu\text{m}$ で、しきい電流密度 $199\text{A}/\text{cm}^2$ という小さい値を示し、特性が格段に向上したことが分かる。このことから GaInNAs 単一量子井戸の結晶性が大幅に改善されたことがわかる。

4-2-4 GaInNAs 三重量子井戸層の高品質化

前節の検討から、GaInNAs 単一量子井戸の結晶性は向上し、レーザ特性も向上したことが分かる。しかし、 $40\text{Gbit}/\text{s}$ での直接変調動作を実現するためには、活性層を微分利得の高い多重量子井戸構造にする必要がある。一方、 $1.3\mu\text{m}$ 帯で発振する GaInNAs レーザを実現するためには、結晶性を低下させる N の組成を 1% 程度以下に極力低くし、In 組成を 30% 程度まで高くしなければならないと考えられている。このような条件下での GaInNAs 単膜の歪量は約 +2% と高く

なり、このため良い結晶性を保ちながら形成できる多重量子井戸の周期数は、多重量子井戸の平均歪量の大きさから 3 周期程度が限界と見積もられている。また、先に検討した $1.1\mu\text{m}$ 帯 GaInAs の三重量子井戸 (TQW: Triple-quantum-well) レーザにおいては 40Gbit/s 動作を実現している。これらのことから、目標の 40Gbit/s 動作の達成に必要な最小限の周期数は 3 周期であると推測される。しかし、多重量子井戸に関するこれまでの検討では、PL 強度は現在得られている単一量子井戸結晶に比べて十分強いとは言えない状況であった。そこで、GaInNAs 単一量子井戸で最適化された Al フリー成長での条件を GaInNAs 三重量子井戸にも適用し、三重量子井戸の結晶性改善を次に目指した。本節ではその検討結果について報告する。

まず、多重量子井戸の平均歪がレーザ特性に及ぼす影響を調べるために、五重までの多重量子井戸を成長し、その PL 測定を YAG レーザの 1064nm 励起により行った。GaInNAs/GaAs 量子井戸は、井戸層が 7nm、障壁層が 20nm で、In 濃度が 31%、N 濃度が 1% である。また、Sb サーフアクトは後で説明するように、今回の多重量子井戸の成長では用いなかった。熱アニールはそれぞれの結晶で数点の温度で行い、試料ごとにアニール温度の最適化を図った。図 4-2-4-1 には単一から五重までの量子井戸結晶に関する PL 測定の結果を示す。この図で明らかなように、スペクトルの半値幅は量子井戸の数にかかわらずほぼ一定である。一方、PL 強度は、量子井戸の数が増え、発光層の総膜厚が増えるにしたがって大きくなっている。図 4-2-4-2 にこの PL 強度の井戸数依存性を示す。図中に示した PL 強度と井戸数の比例関係を表す点線から明らかなように、三重では量子井戸の数に比例した PL 強度が得られていて、一方五重では PL 強度が 5 層分の値よりも小さくなっている。この PL 強度の井戸数依存性から、今回の結晶構造 (井戸層幅 7nm、障壁層幅 20nm) の五重量子井戸では PL 強度に対する歪の影響が大きいと考えられるものの、三重までの多重量子井戸ではこれまで考えられていたものほど大きくはないことがわかる。このことは Al フリー成長での最適成長条件を適用すれば、三重量子井戸レーザでも単一量子井戸レーザと同様にその特性が向上することが期待できる。

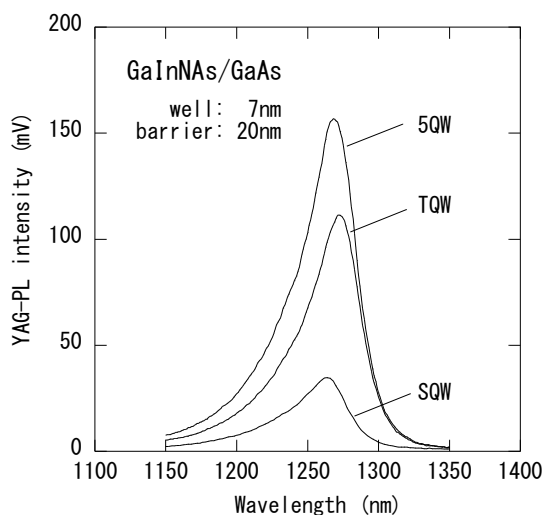


図 4-2-4-1 PL スペクトル

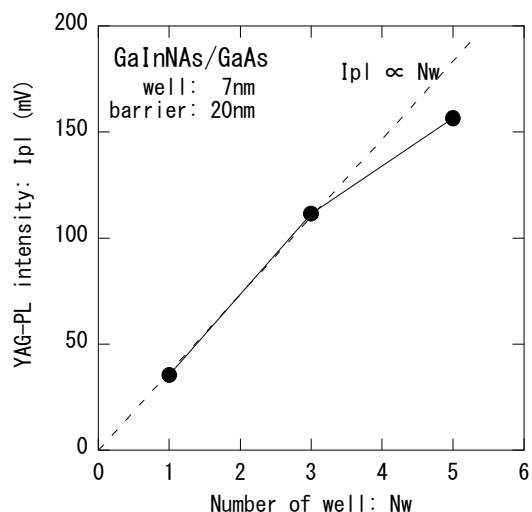


図 4-2-4-2 PL 強度の井戸数依存性

ここで Sb サーフアクトに関する注意を述べておく。前節の GaInNAs 単一量子井戸では、格子不整合の大きい GaInNAs 井戸層の成長時に、Sb を 3 次元成長の抑制のためのサーファクタン

ト[11]として基板に供給した。実際、Sb サーファクタントを添加することにより GaInNAs 単一量子井戸の PL 強度は約 20%強くなることが確かめられている。このことは、PL 強度としきい電流密度との相関から、Sb サーファクタントにより、単一量子井戸レーザのしきい電流密度が約 20%低くなっていることを意味する。同様な PL 強度増強効果をねらって、Sb サーファクタントを三重量子井戸にも用いて当初は結晶成長を行った。しかし、井戸数の比から推測して三重量子井戸の PL 強度は単一量子井戸の 3 倍程度になるはずであるが、実際は 2 倍程度にしかならなかった。また、4-2-5 節で述べるように、Sb 添加の三重量子井戸では PL スペクトルが低温測定時にピーク分離することが分かった。これらのことから、Sb サーファクタントを添加して成長した三重量子井戸では各井戸層がうまく機能していないと考えられる。そこで、今回の多重量子井戸の検討では Sb サーファクタントを用いないことにした。実際、Sb サーファクタントを用いないことにより、上で述べたように、三重量子井戸の PL 強度は、絶対強度が大きくなったわけではないものの、単一量子井戸の 3 倍程度になった。また、4-2-5 節で述べるように、三重量子井戸の PL ピーク分離もなくなる。三重量子井戸で PL 強度を増強させる Sb サーファクタントの添加法については今後の課題としたい。

次に、前節と同様に、作製と評価に時間のかかるレーザを試作する前に、簡便な EL 素子作製を行い、しきい電流密度の推定を試みた。三重量子井戸レーザ構造の結晶は、井戸層幅が 7nm または 5.5nm、障壁層幅が 20nm であり、In 濃度は 31%、N 濃度は 1%とした。図 4-2-4-3 に、今回作製した EL 素子における発光強度の注入電流密度依存性を Al フリー成長での最適化を行う前の前回のものも含めて示す。この図 4-2-4-3 で明らかなように、今回の EL 強度は前回に比べ強くなっており、今回の GaInNAs 三重量子井戸でしきい電流密度が改善されたことがわかる。このことは GaInNAs 三重量子井戸でも結晶性が改善されたことを示している。さらに、GaInAs 三重量子井戸の EL 素子と同様に、GaInNAs 三重量子井戸でも高電流注入時に発光強度が急激に強くなる傾向が見られるようになった。このような傾向はこれまでに見られなかったことであり、このことから結晶性の改善がわかる。

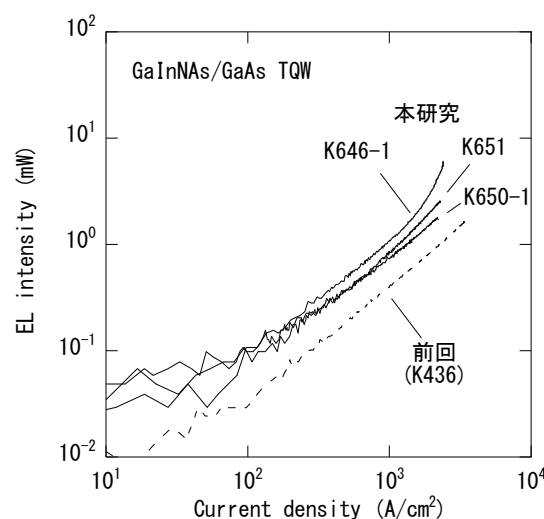


図 4-2-4-3 EL 強度の注入電流密度依存性

次に、40Gbit/s 直接変調動作した GaInAs 三重量子井戸にならって、GaInNAs 三重量子井戸で

も障壁層に p 型ドーピングする変調ドーピング結晶を成長した。しかし、この結晶の PL 評価を行ったところ、変調ドーピングしていない結晶に比べてその強度は極めて弱いものとなった。さらに、EL 評価も行ったところ、推定しきい電流密度は非常に高いものとなった。この原因として考えられることとして、GaInAs 結晶では行わず、GaInNAs 結晶で行う熱アニールがあげられる。我々の MBE 成長では p 型ドーパントとして Be を用いており、障壁層中のこの Be が熱アニール中に拡散して GaInNAs 量子井戸を劣化させたものと考えられる。このことから、今回作製する三重量子井戸レーザ用の結晶では変調ドーピングを行わないこととした。

最後に、変調ドーピングをしていない三重量子井戸結晶からレーザを作製してその特性を評価した。4-1-6 節で述べたように、作製したブロードエリアレーザは発振波長 $1.29\mu\text{m}$ で、しきい電流密度 $392\text{A}/\text{cm}^2$ という小さい値を示した。また、リッジレーザではしきい電流が 5mA という世界最高の値を示した。これらのことから、GaInNAs 三重量子井戸でも結晶性が大幅に改善されたことがわかる。

4-2-5 GaInNAs の物性評価

GaInNAs 半導体は電気陰性度の高い窒素を構成元素として数%含んでおり、この窒素が原因で結晶性が低下し、結晶中に高い濃度の非発光中心が含まれることが知られている。半導体レーザの高性能化の為に、レーザに用いられているヘテロ構造に関連させて GaInNAs 半導体の結晶性を明らかにしていく必要がある。そこで、愛媛大学 白方研究室には GaInNAs の結晶評価を再委託し、神奈川科学技術アカデミー 光科学重点研究室近接場光学 齋木グループには、GaInNAs 量子井戸の微細構造解析を再委託した。最初に、白方研究室の成果について、続いて齋木グループの成果について記述する。

(1) GaInNAs の結晶評価 愛媛大学 白方研究室

本研究の目的は、①GaInP クラッド層を持つ GaInNAs-SQW のフォトルミネッセンス (PL) による結晶性の評価、②GaInNAs 三重量子井戸 (TQW) の評価を行うこと、③これらの構造を持つ GaInNAs 量子井戸に対する Sb のドーピングの効果を明らかにする、等の検討により、レーザデバイスとして適当な GaInNAs の構造を確立することである。

実験方法

試料には MBE により成長したものをを用いた。V 族の N 組成は 1at%である。基板温度は $420\sim 440^\circ\text{C}$ 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 514.5nm 線を用い、シングルモノクロメータ (焦点距離 75cm) で分光し、電子冷却型の InGaAs pin フォトダイオードで検出を行った。低温測定と温度変化測定 ($8\sim 300\text{K}$) には閉ループ型冷却器を用いた。

(I) GaInP クラッドを持つ GaInNAs 単一量子井戸 (SQW) のフォトルミネッセンスによる評価 GaInP クラッドを持つ分離閉じこめ型ヘテロ構造 (SCH 構造) である $p^+\text{GaAs}/p\text{-GaInP}/\text{GaAs}/\text{GaInNAs}/\text{GaAs}/\text{GaInP}:\text{Si}/\text{GaAs}:\text{Si}/n\text{-GaAs}$ 基板 (試料 K440) に対する PL 評価を行った。GaInP クラッド上に形成した GaInNAs 単一量子井戸層の結晶性が、これまでに

GaAs 基板上に成長したものと遜色無く、高品質であることを確認する必要がある。また、GaInP 層の評価やその上への成長層の評価が必要である。そのために、SCH 構造を作製後に、エッチングにより上部 p-GaInP 層を取り除いた GaAs/GaInNAs/GaAs/GaInP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板の SQW 構造および、さらに GaAs/GaInNAs/GaAs を取り除いた GaInP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板の PL 法による評価を行った。GaAs/GaInNAs/GaAs/GaInP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板構造において $Ga_{0.67}In_{0.33}N_{0.009}As_{0.991}$ 井戸層厚 $l_z=7nm$ 、アンドープ GaAs-SCH 層厚は 150nm、GaInP-SCH 層厚は 1500nm である。

図 4-2-5-1 にこれらの試料の低温 (8K) における PL スペクトルを示す。GaInNAs SQW 層および GaAs-SCH 層のピークが観測される (下図)。また、SQW 層を取り除いた GaInP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板構造では、1.9eV に GaInP からの赤色発光が観測される。この構造で GaAs の PL ピークはブロードであり、これは Si ドーピングによるものと考えられる。また、0.9-1.2eV にかけてブロードな発光帯 (0.95 および 1.15eV にピークを持つ) が観測される。

図 4-2-5-2 に GaInP 上に作製された GaInNAs/GaAs SQW 試料の PL スペクトルの温度依存性を示す。ピークは単一でありこれらのスペクトルはこれまで GaAs 上に作製された高品質の SQW と同等である。

図 4-2-5-3 に PL ピークエネルギーの温度依存性を、図 4-2-5-4 に半値幅の温度依存性を、図 4-2-5-5 に PL 積分発光強度の温度依存性を示す。局在励起子の効果がピークエネルギー、半値幅にみられない。半値幅や発光強度の温度依存性のデータからも、本試料これまで GaAs 上に作製された高品質の SQW と遜色のないものと考えられる。

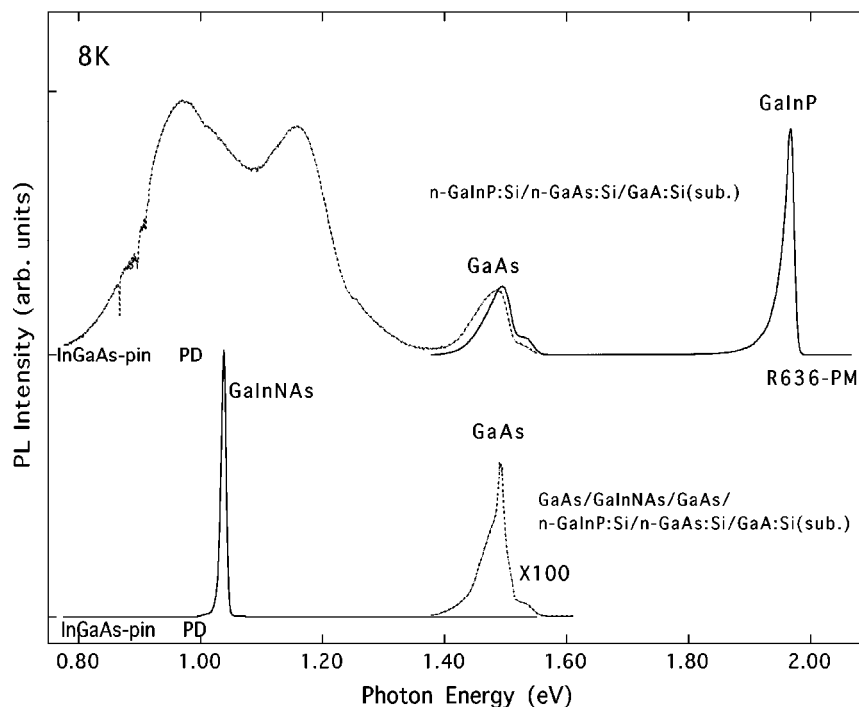


図 4-2-5-1 GaInP クラッドを持つ GaInNAs SQW の PL スペクトル。

GaAs/GaInNAs/GaAs/GaInP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板-構造 (図中下の曲線) および GaAs/GaInNAs/GaAs を取り除いた GaInP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板-構造 (図中上の曲線)

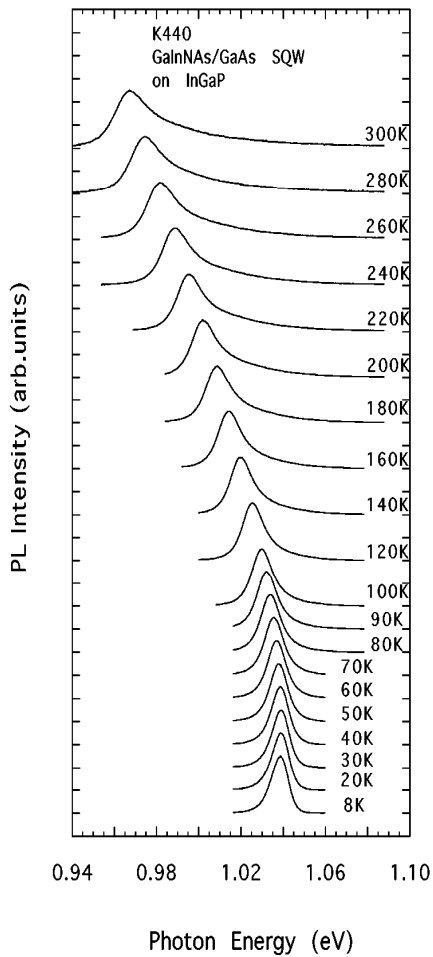


図 4-2-5-2
GaAs/GaInNA ($l_z=7\text{nm}$)/GaAs/
n-GaInP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板
構造の GaInNAs-SQW の PL スペクトル
の温度依存性

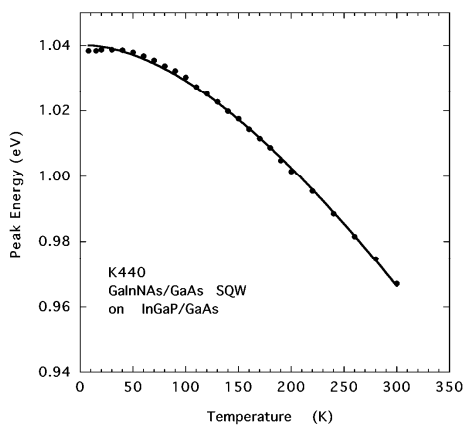


図 4-2-5-3
GaAs/GaInNAs/GaAs/n-GaInP:Si/GaAs:Si/
n-GaAs 基板 SQW の PL ピークエネルギー
の温度依存性

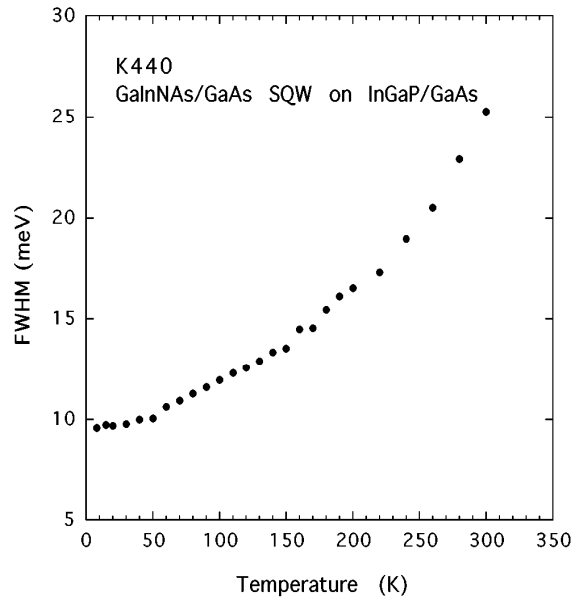


図 4-2-5-4
GaAs/GaInNAs/GaAs/n-GaInP:Si/GaAs:Si/n-GaAs
基板 SQW の PL 半値幅の温度依存性

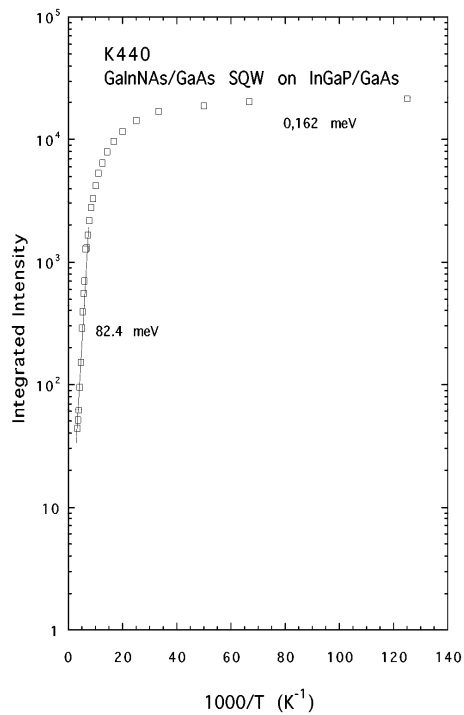


図 4-2-5-5
GaAs/GaInNAs/GaAs/n-GaInP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板
SQW の積分発光強度の温度依存性

(I I) GaInNAs-TQW のフォトルミネッセンス

半導体レーザにおいて大きな光学ゲインを得て低閾値電流化を図るためには多重量子井戸レーザ構造を用いることが必要とされる。これまでに $1.3\mu\text{m}$ 帯 GaInNAs レーザの単一量子井戸には $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_{0.01}\text{As}_{0.99}$ の組成の GaInNAs が用いられてきた。In を約 30% 固溶することにより GaInNAs 量子井戸層には大きな圧縮歪が生じる。そのため多くの量子井戸を形成することにより弾性エネルギーの蓄積により、転移や欠陥等が生じる等の問題が生じる。本研究では三重量子井戸 (TQW) 構造の PL 評価を行い、欠陥の少ない最適な構造に関して検討を行った。

(a) 井戸層 GaInAs と GaInNAs:Sb の比較

最初に同じ In 組成を持つ $\text{Ga}_{0.67}\text{In}_{0.33}\text{As}/\text{GaAs}$ (試料 K444) および $\text{Ga}_{0.69}\text{In}_{0.31}\text{N}_{0.01}\text{As}_{0.99}:\text{Sb}/\text{GaAs}$ (試料 K436) の TQW に関して PL の温度依存性の測定を行った。これらの試料の構造は以下のとおりである。

試料 K444 : GaAs/GaInAs/GaAs TQW

GaAs (cap)/GaInAs/GaAs/GaInAs/GaAs/GaInAs/GaAs/InGaP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板

GaInAs $l_z=7\text{nm}$, GaAs (barrier)=20nm

試料 K436 : GaAs/GaInNAs:Sb/GaAs TQW

GaAs (cap)/GaInNAs:Sb/GaAs/GaInNAs:Sb/GaAs/GaInNAs:Sb/GaAs/InGaP:Si/GaAs:Si/n-GaAs 基板 $l_z=7\text{nm}$, GaAs (barrier)=20nm

図 4-2-5-6 に GaInNAs:Sb/GaAs-TQW と GaInAs/GaAs-TQW のフォトルミネッセンスを示す。GaInAs/GaAs-TQW は単一の PL ピークを示すが、GaInNAs:Sb/GaAs-TQW は 1.02 および 1.03eV の約 10meV 異なる 2 つの PL ピークを示す。低温では低エネルギーのピークが支配的であるが、温度上昇に伴い高エネルギー側のピークの相対強度が増加する。両者は約 140K で同程度の強度となり、室温付近では、高エネルギーのピークのみが観測される。GaInNAs:Sb/GaAs-TQW が 2 つの発光ピークを示す理由は種々考えられるが、後で述べるように Sb のドーピングが関与している可能性が大きい。

図 4-2-5-7 に PL ピークエネルギーを、図 4-2-5-8 に半値幅 (2 つのピークを分離しない値) を温度の関数として示す。GaInAs:Sb/GaAs-TQW の 2 つの PL ピークは温度に対して同様の傾向を示し、これらは共にバンドギャップの温度依存性を反映している。

図 4-2-5-9 に PL 積分発光強度の温度依存性を示す。発光強度は全温度範囲で、GaInAs/GaAs-TQW が GaInNAs:Sb/GaAs-TQW に比べて大きい。温度消光の活性化エネルギーは、GaInAs/GaAs-TQW で 196meV、GaInNAs:Sb/GaAs-TQW で 150meV である。

(b) GaInNAs/GaAs-TQW における Sb ドーピング効果と井戸層厚 (l_z) の効果の検討

GaInNAs 量子井戸における井戸層の厚みと Sb ドーピングの効果を明らかにする目的で、3 種類の TQW の PL 測定を行った。試料は GaAsP バリア層を持たない GaAs/GaInNAs/GaAs-TQW 構造で

あり、GaAs バリア層厚を 20nm に固定した。Sb 無添加 GaInNAs で、井戸層の厚さをが 5.5nm (試料 K651) のものと 7nm (試料 K650) のものを比較した。また、井戸層幅 l_z が 7nm で、Sb の添加を行ったもの (試料 K660) と行わなかったもの (試料 K650) を比較した。各試料の構造を以下に示す。

試料 K650 : GaAs (cap)/GaInNAs/GaAs/GaInNAs/GaAs/GaInNAs/GaAs/n-GaInP:Si/n-GaAs 基板
GaInNAs $l_z=7\text{nm}$, GaAs (barrier)=20nm, GaAs (cap, buffer)=120nm

試料 K660 :

GaAs (cap)/GaInNAs:Sb/GaAs/GaInNAs:Sb/GaAs/GaInNAs:Sb/GaAs/n-GaInP:Si/n-GaAs 基板
GaInNAs:Sb $l_z=7\text{nm}$, GaAs (barrier)=20nm, GaAs (cap, buffer)=120nm

試料 K651 : GaAs (cap)/GaInNAs/GaAs/GaInNAs/GaAs/GaInNAs/GaAs/n-GaInP:Si/n-GaAs 基板
GaInNAs:Sb $l_z=5.5\text{nm}$, GaAs (barrier)=20nm, GaAs (cap, buffer)=120nm

図 4-2-5-10 に TQW の PL スペクトルを示す。図 4-2-5-11 に PL ピークエネルギーを図 4-2-5-12 に半値幅 (2つのピークを分離しない値) を温度の関数として示す。また、図 4-2-5-13 に PL 積分発光強度の温度依存性を示す。Sb 無添加 GaInNAs 井戸層厚 (l_z) の効果 K650 ($l_z=7\text{nm}$) と K660 ($l_z=5.5\text{nm}$) の試料ではともに低温領域において局在励起子発光が観測され、8-50K の温度領域で温度の低下に伴い、PL ピークのエネルギーはわずかに低下する。また、半値幅の温度依存性も局在励起子発光と励起子発光が重なるため 50-70K 付近で極大値をとる傾向がある。局在励起子の効果は $l_z=5.5\text{nm}$ の試料 K660 が $l_z=7\text{nm}$ の試料 K650 と比較して若干小さく、また発光強度も $l_z=5.5\text{nm}$ の試料 K660 が若干大きい。Sb を添加した試料 K660 では、30-70K において主発光の高エネルギー側に、局在励起子とは異なる発光ピークが観測される。この結果は、GaAsP バリア層を持つ TQW での 1. 2. 2 の結果と良く対応しており、Sb のドーピングにより低温で主発光ピークのわずかに高エネルギーに発光ピークが現れることを示している。

(c) GaInNAs/GaAs-TQW における PL のまとめ

TQW 構造における GaInNAs 量子井戸への Sb ドーピングにより、低温 PL で2つのわずかにエネルギーの異なる発光が生じることがわかった。GaInNAs 量子井戸に Sb ドーピングを施した SQW 構造ではこのような発光は観測されず、これは TQW 構造特有の現象であることが判明した。

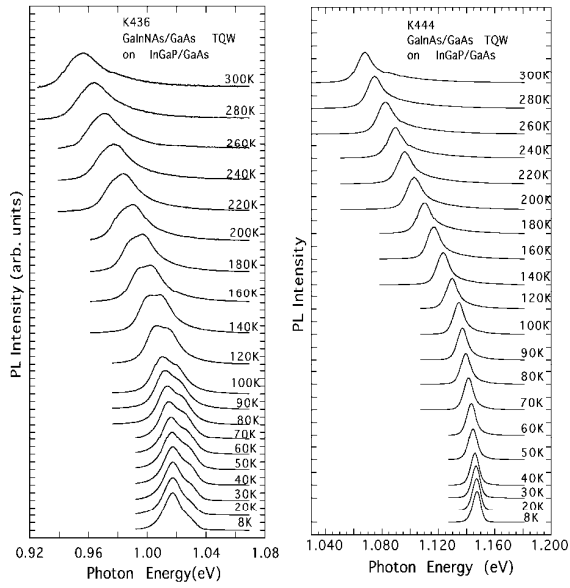


図 4-2-5-6

GaInAs/GaAs-TQW と GaInAs/GaAs-TQW on InGaP/GaAs のフォトルミネッセンス

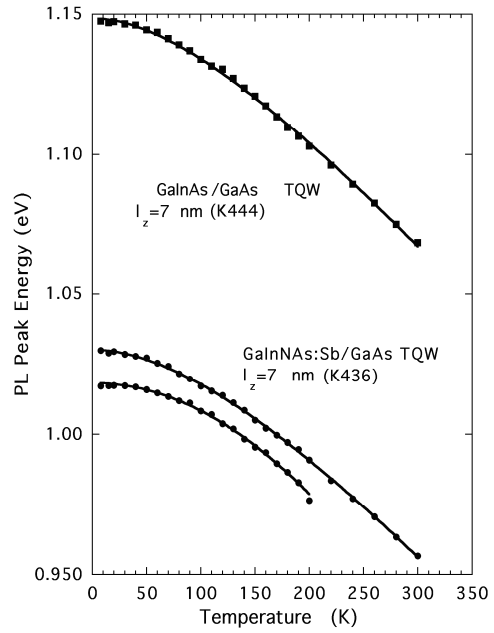


図 4-2-5-8

GaInAs:Sb-TQW と GaInAs-TQW の PL ピークエネルギーの温度依存性

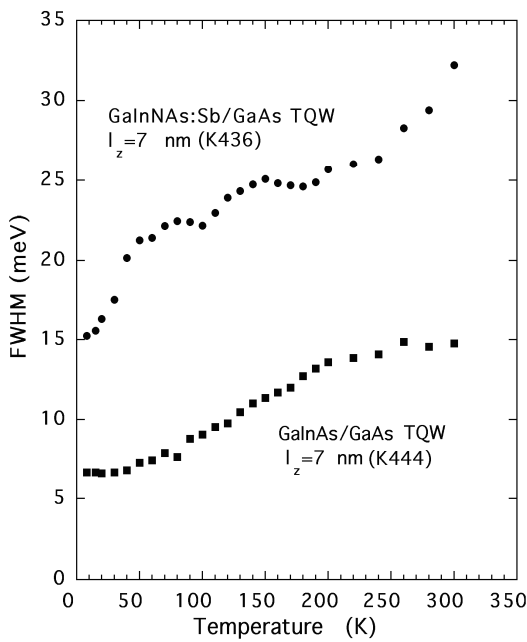


図 4-2-5-7

GaInAs:Sb-TQW と GaInAs-TQW の PL ピーク半値幅の温度依存性

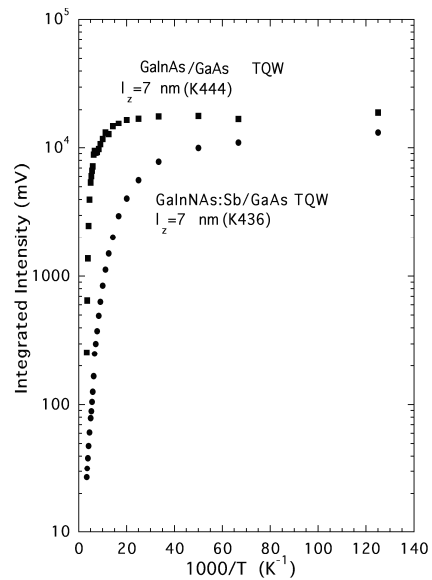


図 4-2-5-9 GaInAs:Sb-TQW と

GaInAs-TQW の 積分発光強度の温度依存性

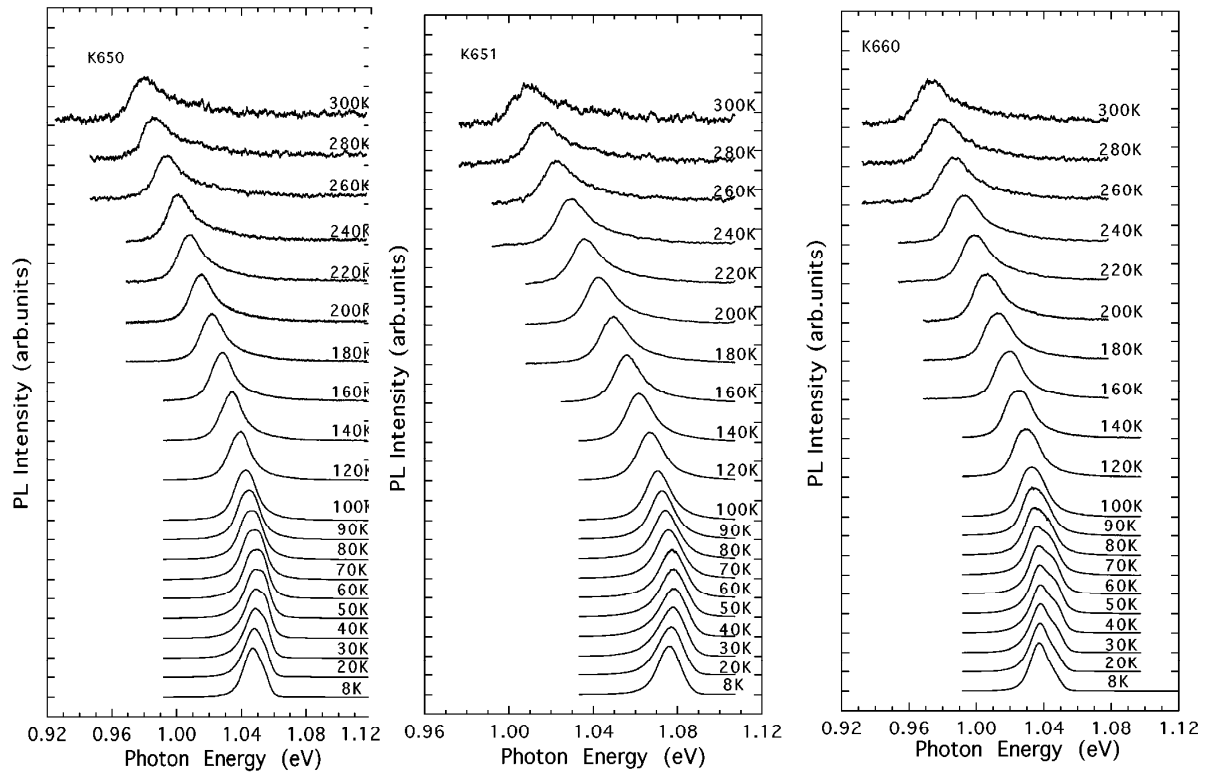


図 4-2-5-10 GaAs/GaInNAs/GaAs TQW の PL スペクトルの温度依存性基板

試料 K650 : GaInNAs/GaAs TQW $l_z=7\text{nm}$

試料 K660 : GaInNAs:Sb/GaAs TQW $l_z=7\text{nm}$

試料 K651 : GaInNAs/GaAs TQW $l_z=5.5\text{nm}$

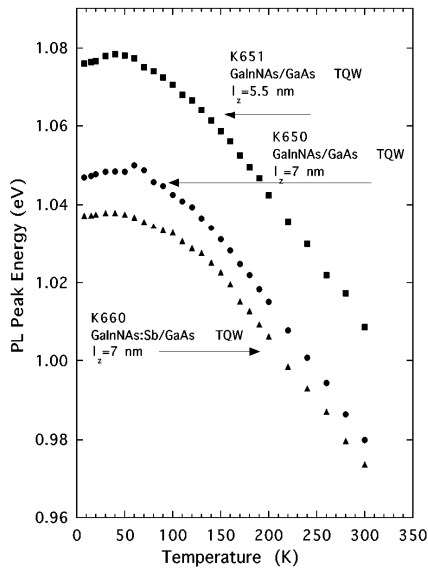


図 4-2-5-11 GaAs/GaInNAs/GaAs TQW の PL ピークエネルギーの温度依存性

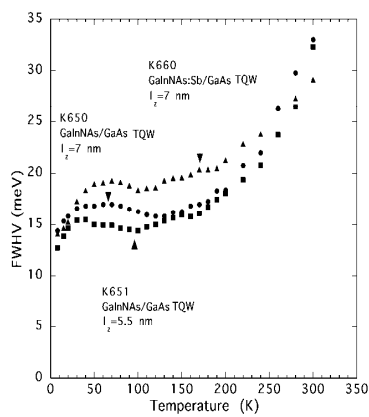


図 4-2-5-12 GaAs/GaInNAs/GaAs TQW の PL 半値幅の温度依存性

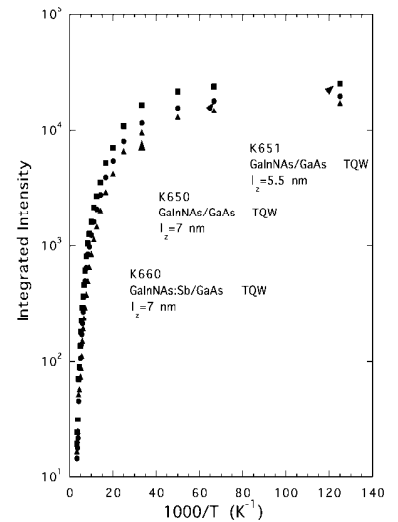


図 4-2-5-13 GaAs/GaInNAs/GaAs TQW の積分発光強度の温度依存性

(2) 近接場光学顕微鏡(NSOM)による GaInNAs における局在発光の観察

バンド端における GaInNAs の基本的な光学特性は窒素の空間分布によって大きく左右される。窒素の不均一な分布によってポテンシャルは空間的に揺らぎ、電子(励起子)の局在化をもたらす。発光分光を通して揺らぎの大きさ、深さ、分布を解明するためには、非常に高い空間分解能を有する顕微分光技術が必要とする。われわれは近接場光学顕微鏡を利用し、30nm 程度の空間分解能によって、局在した励起子発光の空間分布の測定をおこなった。

図 4-2-5-14 に測定方法の概略を示す。He-Ne レーザーからの励起光はファイバプローブ終端から入射し、ファイバプローブ先端に近接場光を発生させる。そのファイバプローブを試料上の 900nm×900nm の領域において 30nm 間隔で走査させ、各点で発光スペクトルを取得した。そして、得られた発光スペクトルから各発光エネルギーについての発光強度の分布図を作製した(図 4-2-5-18 (b))。試料は 12.5K に冷却させて測定を行った。試料は窒素濃度が 0.3%のもの(K543)と 1.0%のもの(K542)を用いた。どちらもアニール処理を行ったものについて測定した。

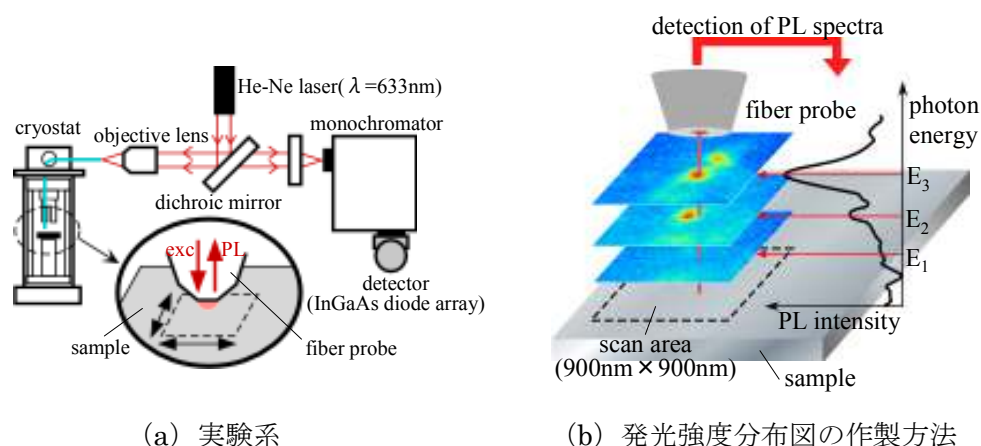


図 4-2-5-14 測定方法

まず 2 つの試料に対する測定結果の違いを大局的にながめてみる。すべての測定点における発光スペクトルを積算したスペクトル(900nm×900nm の領域からのマクロなスペクトル)を図 4-2-5-15 に示す。ピークエネルギーは $x=1.0\%$ の方が低エネルギー側にシフトしているが、スペクトルの半値幅はほぼ同程度であることがわかる。つまりポテンシャルの揺らぎの大きさには有意な差は見られない。発光強度については、 $x=1.0\%$ の方が 1/3 程度に小さいことがわかる。ごく狭い領域での比較ではあるが、非発光センターの密度、捕獲確率の違いのあらわれと考えられる。

次に、発光強度(各点での発光スペクトルを積分した値)の分布を図 4-2-5-16 に示す。(a)、(b)それぞれ $x=0.3\%$ 、 1.0% に対する結果である。いずれも発光箇所がまばらに点在していることがわかる。暗い位置は非発光センターが多く分布している可能性が高い。ただし、ポテンシャルが比較的平坦な場所では励起領域からの拡散が起こり、そのために発光が検出されない(集光領域から励起子が逃げてしまう)可能性も排除できない。暗い領域の面積からすると、 $x=0.3\%$

の方が発光強度が低いように見えるが、積分値として見ると上に示した通り、実際はその逆である。窒素濃度の違いによって、深い局在ポテンシャル近傍での非発光センターの分布や局在ポテンシャルに捕獲されるまでの拡散距離が異なり、結果として発光強度を左右していると考えられる。

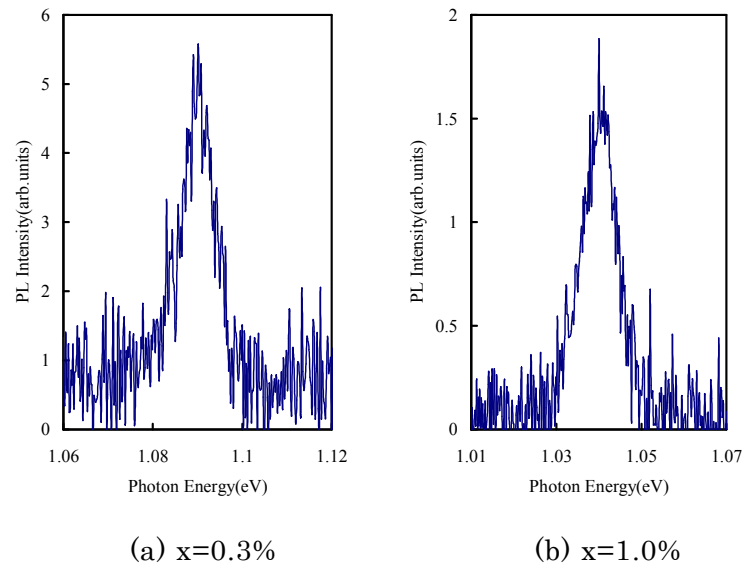


図 4-2-5-15 測定領域で積算したマクロなスペクトル

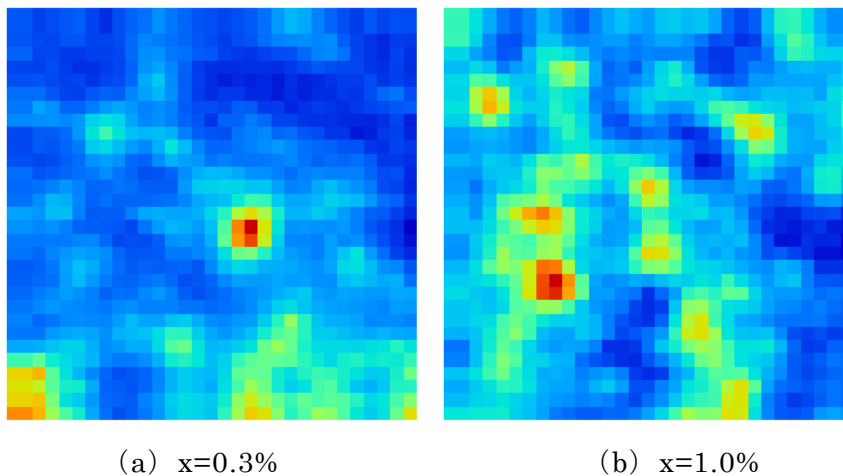


図 4-2-5-16 発光強度（スペクトル積分値）のマッピング

続いて、スペクトル分解と空間分解の両方を同時におこない、より詳細な考察を試みる。図 4-2-5-17 は $x=0.3\%$ の試料に対して発光エネルギーごとに強度分布をマッピングした結果である。左上(発光エネルギー1.0765eV)から右下(1.0976eV)に向かって、0.4meV ごとに発光強度分布を示している。図 4-2-5-18 に特徴的な位置での発光スペクトルを示す。図 4-2-5-19、図 4-2-5-20 は $x=1.0\%$ の試料に対する同様の結果である。図 4-2-5-19 は左上(発光エネルギー1.0267eV)から右下(1.0471eV)に向かって、0.4meV ごとに発光強度分布を示している。図 4-2-5-17 と図 4-2-5-19 を一見すると、傾向として局在ポテンシャルの数以外に大きな違いは見られないが、発光スペクトルを同時に参照することにより以下のような特徴を抽出することができる。

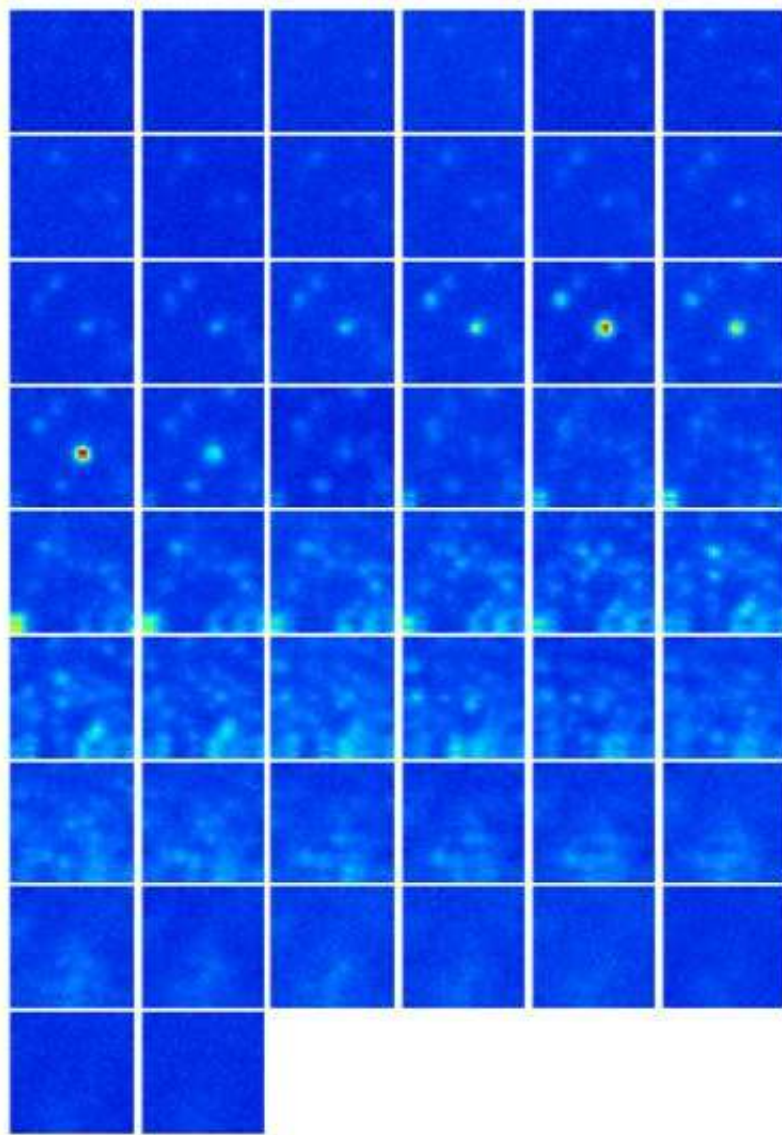


図 4-2-5-17 発光強度分布 (x=0.3%)

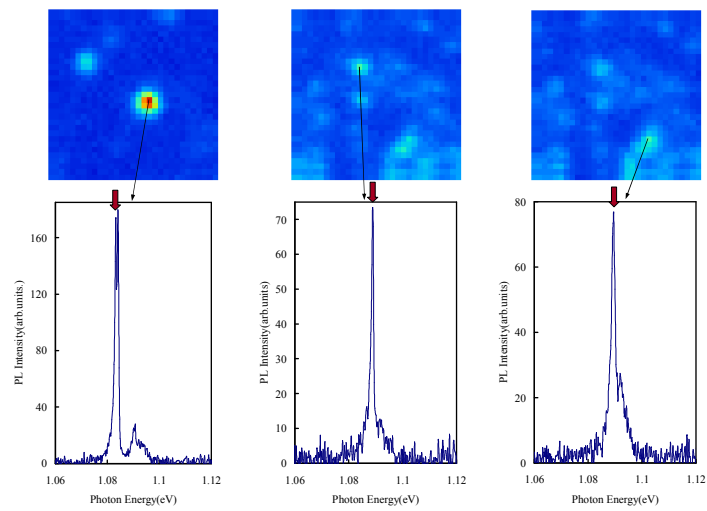


図 4-2-5-18 特徴的な発光スペクトル (x=0.3%)

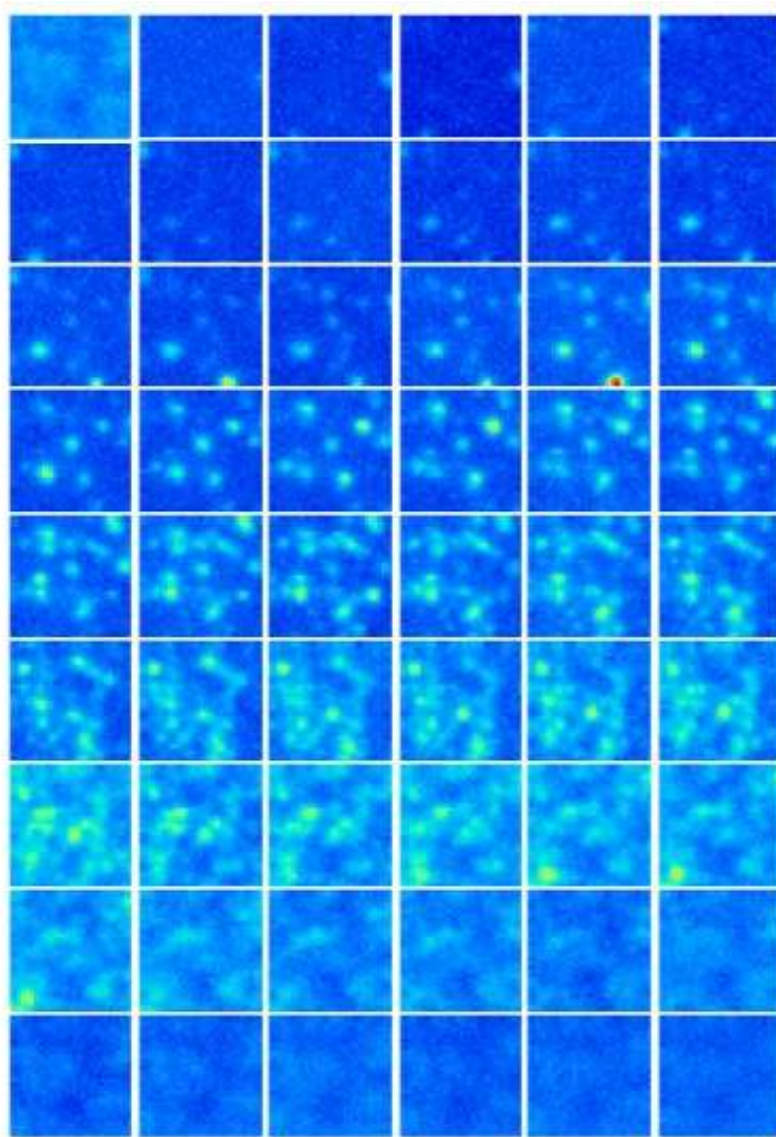


図 4-2-5-19 発光強度分布 (x=1.0%)

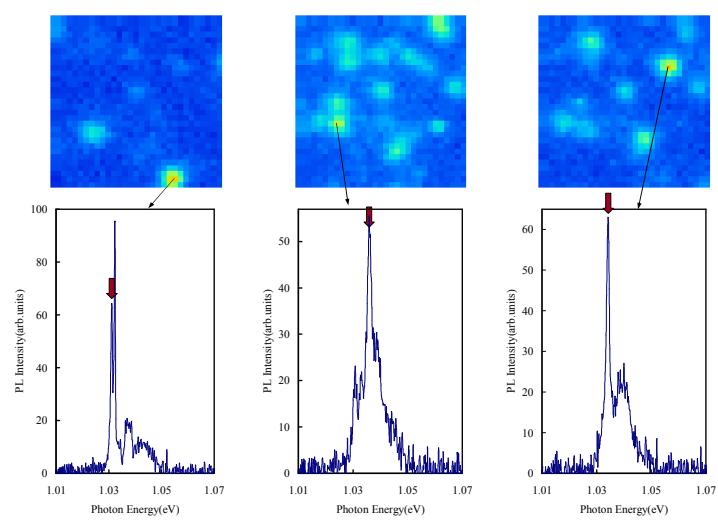


図 4-2-5-20 特徴的な発光スペクトル (x=1.0%)

まず両者の共通点として、低エネルギーの発光は局在度が強く、スペクトルが鋭い。また逆に高エネルギーに向かうに従い、発光が非局在化し、スペクトル幅も広がっている。深いポテンシャルは理想的な量子ドット構造のように振る舞い、閉じ込められた励起子の散乱が抑制されるため、スペクトルは鋭くなる。ポテンシャルが浅い位置では、波動関数の広がりが大きく、場所によっては隣のポテンシャルに閉じ込められた励起子の波動関数と重なりをもつ。このような場合、量子閉じ込めの準位間隔は狭く(準連続状態)なり、量子ドット的な振る舞いは見られず、発光スペクトルも熱エネルギー程度となる。また、熱エネルギー以上に広いスペクトルも観察されており、空間分解能以下の狭い領域で依然不均一性が観察されていると解釈される。

もう一つの特徴として、 $x=0.3\%$ の試料の方がより多くの局在ポテンシャルにおいて狭い発光スペクトルを示している。閉じ込めポテンシャルのサイズ(結果としての準位間隔)や励起子の散乱確率が窒素濃度の違いを反映している可能性が高い。

興味深い結果として、図 4-2-5-20 左端などのスペクトルがダブルレット構造を示している。偏光依存性などを詳細に検討することにより、局所的な歪み、異方性などの情報が引き出せるのではないかと期待している。

4-2-6 まとめ

本サブテーマでは GaInNAs 量子井戸結晶の高品質化に関する研究開発を行なった。本研究では、GaInNAs 結晶を劣化させる原因の一つと考えられる Al の混入を避けるために、原料として Al を含まない MBE 装置を導入し、高品質化に関する検討を進めた。以下に、その Al フリー MBE 装置を用いた GaInNAs 量子井戸結晶の高品質化に関する検討の結果をまとめる。

- (1) レーザ構造結晶に必須であるクラッド材料として GaInP を選定し、その MBE 成長技術を確立した。
- (2) 単一量子井戸結晶の成長条件最適化を行ったところ、PL 評価および EL 評価からその結晶性が向上したことが分かった。この向上により、4-1-5 節で述べたように、レーザのしきい電流密度は大幅に低下した。
- (3) 三重量子井戸結晶に単一量子井戸結晶の最適化成長条件を適用させたところ、PL 評価および EL 評価からその結晶性が向上したことが分かった。この向上により、4-1-6 節で述べたように、レーザのしきい電流は大幅に低下し、世界最高値を示した。
- (4) 量子井戸結晶の物性評価により、単一量子井戸で有効な Sb サーファクタントが三重量子井戸では各井戸層の特性をばらつかせることが分かった。そこで、三重量子井戸に関する今回の検討では Sb サーファクタントを用いないことにした。
- (5) GaInAs 三重量子井戸レーザでの高速化に有効であった変調ドーピング技術を、GaInNAs 三重量子井戸結晶に適用させたところ、PL 評価および EL 評価からその結晶性が劣化したことが分かった。そこで、三重量子井戸に関する今回の検討では変調ドーピングを用いないことにした。

今後の課題について以下にまとめる。

- (1) 三重量子井戸の結晶性向上を目指して、三重量子井戸で有効な Sb サーファクタントの添加法を確立すること。
- (2) 三重量子井戸レーザのさらなる高速化を目指して、GaInNAs 三重量子井戸での変調ドープング技術を確立すること。

4-3 超高速光リンク用半導体レーザの研究開発

4-3-1 研究開発内容

本サブテーマでは前述の2つのサブテーマの成果を纏めて最終目標である 1.3 μm 帯レーザの 40Gbps 直接変調動作を検討する。

4-3-2 GaInNAs 三重量子井戸レーザの高速特性の検討

4-1-6 で述べた GaInNAs 三重量子井戸レーザの高速特性について検討した。高速化に重要な緩和振動周波数 f_r の測定を行った。図 4-3-2-1 は大振幅電流により測定した典型的な f_r の駆動電流依存性である。図から駆動電流の平方根に対する f_r の傾きは 2.0-2.3GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ であった。10Gbps 用 LD、すなわち InGaAlAs 系で 200 μm の共振器長の FP-LD の f_r の傾きは 2.1GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ であり、GaInNAs-LD にてほぼ同等以上の f_r 特性を得ることができた。

図 4-3-2-2 に端面発光型の GaInNAs-TQW-LD のしきい電流密度と緩和振動周波数の駆動電流に対する傾きの関係を示す。図のようにしきい電流と緩和振動周波数の双方が実用化されている InGaAlAs 系 LD と同等以上の特性を有し、同構造が 10Gbps や 40Gbps の高速 LD として適することが判明した。

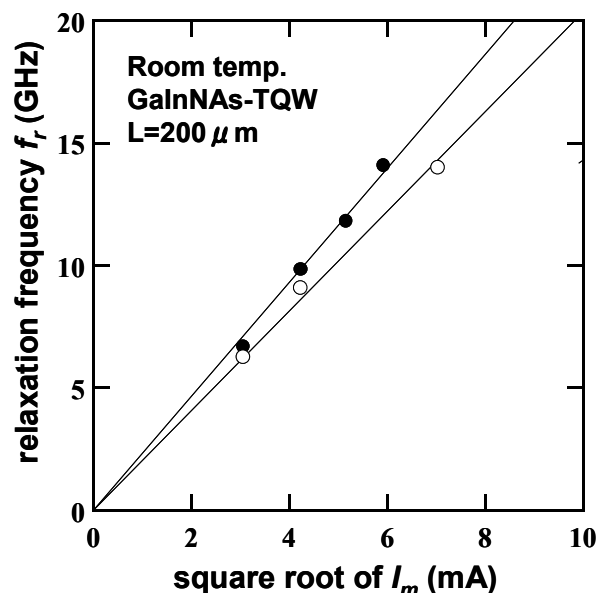


図4-3-2-1 緩和振動周波数と駆動電流の平方根の関係

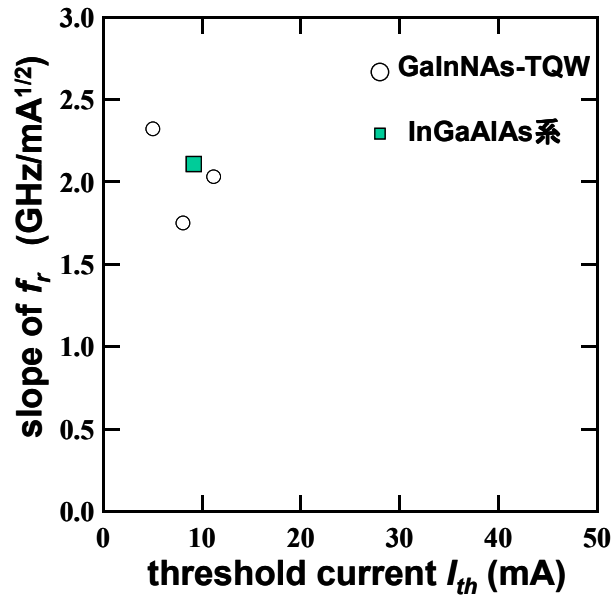


図4-3-2-2 緩和振動周波数の傾きとしきい電流の関係

4-3-3 GaInNAs 三重量子井戸レーザの 40Gbps 動作の検討

次に前項の高速動作試験を行った。高速試験は 2^7-1 長の擬似ランダムパターンにて 36Gbps と SONET の OC-768 に相当する 39.813Gbps のビットレートで測定を行った。図 4-3-3-1 に室温での 36Gbps 光波形特性を、図 4-3-3-2 には 5°C における 40Gbps 光波形特性を示す。図から判るように多少ノイズは残るものの 36Gbps、40Gbps にてそれぞれアイ開口を得ることができた。前述したように本 LD はまだドーピング濃度等の最適化を行っていない。よって高速化のための最適化によりより良好なアイ開口を得ることができると考えられる。以上の検討から本 LD により直接変調の方式にて 40Gbps 動作を実現することができた。

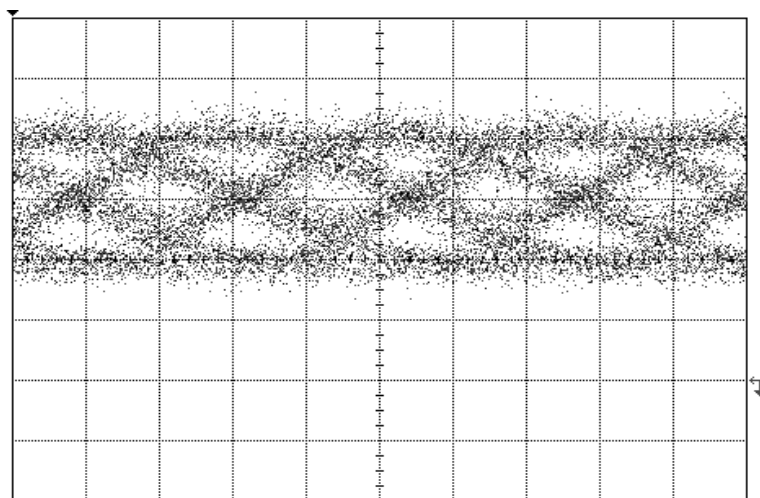


図4-3-3-1 室温における36Gbps動作波形(横軸12.2ps/div)

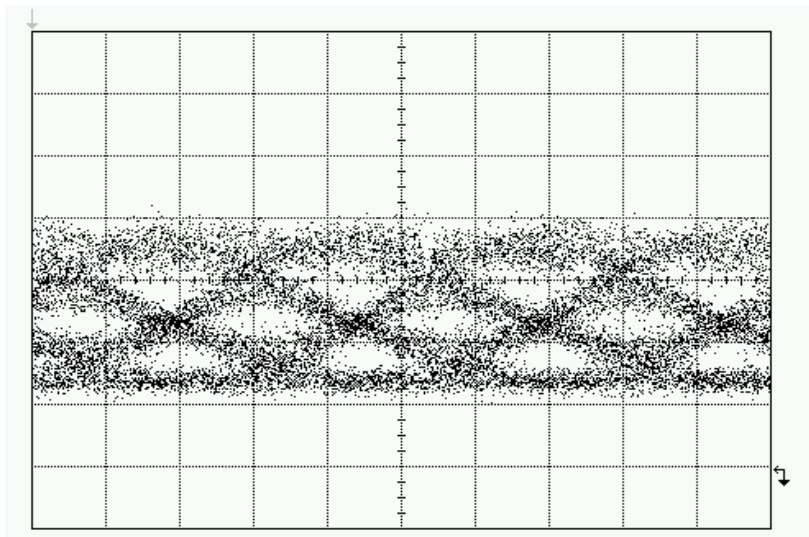


図4-3-3-2 5°Cにおける40Gbps動作波形（横軸10 ps/div）

4-3-4 まとめ

本サブテーマでは4-3-2と4-3-3のサブテーマを統合してGaInNAs三重量子井戸レーザによる40Gbps直接変調動作の検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) GaInNAs三重量子井戸構造の結晶性の改善によりGaInNAs三重量子井戸レーザは既に商用化されているInGaAlAs活性層と同等以上の高緩和振動周波数と低しきい電流特性を得た。
- (2) GaInNAs三重量子井戸レーザを室温で高速変調した結果、36Gbpsにおいてアイ開口を得ることができた。
- (3) 5°CにおいてGaInNAs三重量子井戸レーザを用いて40Gbps動作におけるアイ開口を得ることができた。

4-4 総括

公共光通信のメトロ網および Ethernet の次世代送信光源の実現を目的として日立製作所が提案してきた GaInNAs の活性層を用いて 40Gbps 超高速光リンク光源の研究開発を行った結果、以下の成果を得ることができた。

- (1) 1.1 μm 帯 GaInAs レーザにおいて量子井戸活性層の最適化、多重量子井戸層化、p 型変調ドープ構造導入により緩和振動周波数を単一量子井戸層の約 2 倍に向上させることができた。さらに 40Gbps 動作にて消光比約 5dB の良好なアイ開口を得ることができた。
- (2) ECR ドライエッチを使用したリッジ形成と端面ミラー形成の検討を行い、共に良好なエッチング表面・側壁の平滑性と垂直性エッチング形状が得られる ECR エッチング条件を見出すことができた。さらに、ドライエッチ端面レーザプロセスの検討を行い、垂直なエッチ端面を有するレーザ構造を形成することができた。
- (3) 半導体レーザの 40Gbps 直接変調動作に関して GaInAs レーザの特性と、既に製品化されている 10Gbps レーザの特性に基づいてレート方程式を用いてシミュレーションを行った。その結果、ルータ間接続に相当する短距離伝送の約 2.7km の短距離伝送が適用できる可能性を見出した。
- (4) Al フリー化のためにレーザ構造結晶に必須であるクラッド材料として GaInP を選定し、その MBE 成長技術を確立し、GaInNAs 単一量子井戸結晶の成長条件最適化を行ったところ、PL 評価および EL 評価からその結晶性が向上したことが分かった。さらにこの結晶を使用して作製した GaInNAs 単一量子井戸レーザは MBE 成長において世界最小と同等のしきい電流密度 ($200\text{A}/\text{cm}^2$) を得た。またリッジ型レーザにおいて世界最小のしきい電流値 (7mA) を 1.3 μm を超える波長で初めて得ることができた。
- (5) 三重量子井戸結晶に単一量子井戸結晶の最適化成長条件を適用させたところ、PL 評価および EL 評価からその結晶性が向上したことが分かった。この向上により、GaInNAs 三重量子井戸リッジ型レーザにおいて世界最小となるしきい電流 5mA を発振波長 1.29 μm で得た。
- (6) GaInNAs 三重量子井戸構造の結晶性の改善により GaInNAs 三重量子井戸レーザは既に商用化されている InGaAlAs 活性層と同等以上の高緩和振動周波数と低しきい電流特性を得た。この結果を反映してを室温における 36Gbps のアイ開口動作と 5°C における 40Gbps のアイ開口動作を得ることができた。

5 参考資料・参考文献

- [1] M. Shirai, H. Arimoto, K. Watanabe, A. Taike, K. Shinoda, J. Shimizu, H. Sato, T. Ido, T. Tsuchiya, M. Aoki, S. Tsuji, N. Sasada, S. Tada, and M. Okayasu, "40 Gbit/s electroabsorption modulators with impedance-controlled electrodes," *Electronics Letters*, Vol. 39, No. 9, pp. 733-735, 2003.
- [2] S. Akiyama, S. Hirose, T. Watanabe, M. Ueda, S. Sekiguchi, N. Morii, T. Yamamoto, A. Kuramata, and H. Soda, "Novel InP-based Mach-Zehnder modulator for 40 Gb/s integrated lightwave source," *Technical Dig., IEEE 18th International Semiconductor Laser Conference*, pp. 57-58, 2002.
- [3] M. Shishikura, K. Nagatsuma, M. Tokuda, H. Ichikawa, T. Ido, M. Takahashi, T. Nagara, K. Nakahara, E. Nomoto, Y. Matsuoka, K. Ishikawa, M. Ito, H. Chiba, Y. Ito, H. Takahashi, R. Takeyari, and H. Sano, "4-channel X 10-Gbit/s parallel optical transmitter and receiver modules for high-capacity very short reach application," *Technical Dig., 28th European Conference and Optical Communication*, 5.4.2, 2002.
- [4] K. Sato, S. Kuwahara, and Y. Miyamoto, "Direct modulation of a distributed feedback laser for 40-Gbit/s very-short-reach optical links," *Technical Dig., OFC 2002, ThF2*, pp.416-417, (2002).
- [5] O. Kjebon, M. N. Akram, and R. Schatz, "40 Gb/s transmission experiment using directly modulated 1.55- μ m DBR lasers," *IEEE IPRM 2003, FA1.2*, pp. 495-498, 2003.
- [6] L. Chrostowski, X. Zhao, and C. J. Chang-Hasnain, "50 GHz Directly-Modulated Injection-Locked 1.55 μ m VCSELs," *Technical Dig. OFC2005, ThF2*, 2005.
- [7] K. Uomi, T. Tsuchiya, H. Nakano, M. Aoki, M. Suzuki, and N. Chinone, "High-speed and ultralow-chirp 11.55 μ m multiquantum well $\lambda/4$ -shifted DFB lasers," *IEEE J. of Quantum Electorn.*, QE-27, pp.1705-1713, 1991.
- [8] T. Ishikawa et al. 10th Intern. Conf. on InP and Related Materials, ThP-55(1998)
- [9] P. Sundgren et al. : *Applied Physics Letters* 82 (2003) pp.2431-2433.
- [10] M. Nakao et al. : *Journal of Applied Physics* 63 (1988) pp.1722-1728.
- [11] X. Yang et al. : *IEEE Photonic Technology Letters* 12 (2000) pp. 128-130

5 - 1 研究発表・講演等一覧

研究論文（査読有）

- 1 学術誌 Japanese Journal of Applied Physics に「Infrared Absorption Spectrum of GaInNAs」を寄稿。vol. 42 No. 7A, (2003), p p.4286-4287 に掲載済。
- 2 学術誌 Japanese Journal of Applied Physics に「Amplified spontaneous emission measurement of GaInNAs laser wafers with and without rapid thermal annealing」を寄稿。vol. 42 (2003), p p.L1012-1014 に掲載済。
- 3 学術誌 Japanese Journal of Applied Physics に「Investigation of the Electron Non-radiative Transition in extremely thin GaInNAs/GaAs Single Quantum Well by Using a Piezoelectric Photothermal Spectroscopy」を寄稿。vol. 43, No. 5B, (2004), pp. 2942-2945 に掲載済。
- 4 学術誌 Journal of Physics: Condensed Matter へ「Annealing in GaInNAs system」を寄稿（招待論文）。vol. 16, No 31, (2004) pp. S3229-S3244 に掲載済。
- 5 学術誌 Japanese Journal of Applied Physics に「Polarized Raman Spectra and N-Related Local Vibrational Mode in GaNAs and GaInNAs Epitaxial Layers Grown on GaAs」を寄稿。vol. 44, No. 6A, (2005), pp. 4019-4021 に掲載済。
- 6 学術誌 IEICE Transactions on Electronics に「High-temperature and high-speed performances of InGaAlAs-MQW DFB lasers for 10-Gb/s datacom applications」を寄稿（招待論文）。vol. E88-C, (2005), pp. 938-943 に掲載済。
- 7 学術誌 Journal of Physics and Chemistry of Solids に「Raman Studies of Lattice and Local Vibration Modes of GaInNAs Prepared by Molecular Beam Epitaxy」を寄稿。vol. 66, Issue 11, (2005), pp. 2119-2122 に掲載済。

国際会議発表（査読有）

- 1 The 22nd Electronic Materials Symposium（滋賀、2003年7月2日）にて「Photoluminescence and Photoreflectance of GaInNAs Layer Lattice-Matched to GaAs」を発表。
- 2 The 30th International Symposium on Compound Semiconductors (San Diego, 2003年8月25日)にて「Electron effective mass of Ga_{0.7}In_{0.3}N_xAs_{1-x}」を発表。
- 3 The 11th IEEE International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications (Florida, 2003年11月17日)にて「Investigation of the Electron Non-radiative Transition in GaInNAs/GaAs Single Quantum Well Structures by Using a Piezoelectric Photothermal Spectroscopy」を発表。
- 4 2003 International Semiconductor Device Research Symposium (Washington, DC, 2003年12月10日)にて「Temperature Variation of Nonradiative Electron Transitions in GaInNAs/GaAs SQW Investigated by a Piezoelectric Photothermal Spectroscopy」を発表。
- 5 Pre-Conference of IEEE International Semiconductor Laser Conference 2004 (神戸、2003

年 12 月 19 日) にて「GaInNAs lasers – Current status and issues of GaInNAs lasers –」を公表。(招待公演)

- 6 SPIE's Optoelectronics 2004 International Symposium (San Jose, 2004 年 1 月 26 日) にて「High-Speed GaInNAs Laser Diodes」を公表。(招待公演)
- 7 E-MRS 2004 Spring Meeting (Strasbourg, 2004 年 5 月 24 日) にて、「Temperature and Thickness Dependences of Electron Non-radiative Transitions in GaInNAs/GaAs SQW Investigated by a Piezoelectric Photothermal Spectroscopy」を公表予定。
- 8 The 13th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (Edinburgh, 2004 年 8 月 24 日) にて「Residual impurities in MBE-grown GaInNAs laser diodes」を公表予定。
- 9 The 14th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (Denver, 2004 年 9 月 27 日) にて、「Raman Studies of Lattice and Local Vibration modes of GaInNAs Prepared by Molecular Beam Epitaxy」を公表予定。
- 10 The 23rd Electronic Materials Symposium(伊豆長岡, 2004 年 7 月 7 日) にて"Impurities in GaInNAs laser diodes grown by molecular beam epitaxy"を公表。
- 11 The 23rd Electronic Materials Symposium (伊豆長岡, 2004 年 7 月 7 日) にて"Raman Spectra of GaInNAs Layers Lattice-Matched to GaAs"を公表。
- 12 E-MRS 2004 Spring Meeting (Strasbourg, 2004 年 5 月 24 日) にて、「Temperature and Thickness Dependences of Electron Non-radiative Transitions in GaInNAs/GaAs SQW Investigated by a Piezoelectric Photothermal Spectroscopy」を公表。
- 13 The 13th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (Edinburgh, 2004 年 8 月 24 日) にて「Residual impurities in MBE-grown GaInNAs laser diodes」を公表。
- 14 The 14th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (Denver, 2004 年 9 月 27 日) にて、「Raman Studies of Lattice and Local Vibration modes of GaInNAs Prepared by Molecular Beam Epitaxy」を公表。
- 15 15th International Conference on Ternary and Multinary Compounds (Kyoto, 2006 年 3 月 7 日) に「Studies of Quantum Levels in GaInNAs Single Quantum Wells」を公表。
- 16 Optical fiber Conference 2006 (Anaheim, 2006 年 3 月 8 日) に「High extinction ratio operation at 40-Gb/s direct modulation in 1.3-um InGaAlAs-MQW RWG DFB lasers」を公表。
- 17 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (Tokyo, 2006 年 9 月 3 日 予定) に「Variation of PL characteristics in rapid thermally annealed GaInNAs/GaAs multiple-quantum-well structure」を投稿。
- 18 14th International Conference on Molecular Beam Epitaxy (Tokyo, 2006 年 9 月 3 日 予定) に「Growth of low-threshold GaInNAs/GaAs triple-quantum-well lasers」を投稿。

収録論文 (英文寄稿、査読有)

- 1 Proceedings of The 11th IEEE International Symposium on Electron Devices for Microwave and Optoelectronic Applications に「Investigation of the Electron

Non-radiative Transition in GaInNAs/GaAs Single Quantum Well Structures by Using a Piezoelectric Photothermal Spectroscopy」を寄稿し掲載可となった。

- 2 Proceedings of The 30th International Symposium on Compound Semiconductors に「Electron effective mass of $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}_x\text{As}_{1-x}$ 」を寄稿し掲載可となった。
- 3 SPIE's Proceedings に「High-Speed GaInNAs Laser Diodes」を寄稿し掲載可となった。
- 4 Conference Proceedings in a special issue of physica status solidi (c)に「Studies of Quantum Levels in GaInNAs Single Quantum Wells」を寄稿し掲載可となった。

一般口頭発表

- 1 電気学会 第 10 回パワー半導体レーザ応用技術調査委員会（東京、2003 年 6 月 13 日）にて「GaInNAs 系半導体レーザの最近の進展」を発表。
- 2 2003 年秋季第 64 回応用物理学会学術講演会(福岡、2003 年 8 月 30 日)にて「GaInNAs/GaAs のラマンスペクトル」を発表。
- 3 電子情報通信学会 2003 光エレクトロニクス/レーザ・量子エレクトロニクス研究会（神戸、2003 年 12 月 18 日）にて「1.1 μm 帯 GaInAs 変調ドープ MQW レーザの 40Gb/s 直接変調動作」を発表。
- 4 2004 年春季第 51 回応用物理学会学術講演会（東京、2004 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(VI)」を発表。
- 5 電子情報通信学会量子エレクトロニクス研究会（京都、2004 年 10 月 21 日）に「不純物を抑制した MBE 成長 GaInNAs/GaAs レーザの特性」を発表。
- 6 2005 年春季第 52 回応用物理学会学術講演会(埼玉、2005 年 3 月 31 日)に「GaInNAs のラマン散乱 -In と N の混晶の効果-」を発表。
- 7 2005 年春季第 52 回応用物理学会学術講演会(埼玉、2005 年 3 月 31 日)に「新半導体 GaInNAs の物性と半導体レーザへの適用」を発表。
- 8 2006 年春季第 53 回応用物理学会学術講演会（東京、2006 年 3 月 22 日）に「1.31 μm 極低しきい値 GaInNAs 単一量子井戸半導体レーザ」を発表
- 9 2006 年春季第 53 回応用物理学会学術講演会（東京、2006 年 3 月 22 日）に「RTA を施した GaInNAs/GaAs 多重量子井戸における PL 特性の量子井戸数依存性」を発表