

平成16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17年5月

情報通信研究機構

平成16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.....	6
2-2-1	最終目標（平成17年3月末）.....	6
2-2-2	中間目標（平成16年3月末）.....	6
2-3	研究開発の年度別計画.....	7
3	研究開発体制.....	8
3-1	研究開発実施体制.....	8
4	研究開発実施状況.....	9
4-1	超高速レーザー構造の研究開発.....	9
4-1-1	序論.....	9
4-1-2	GaInNAs レーザの基本特性.....	9
4-1-3	GaInNAs レーザの高速特性.....	13
4-1-4	40G 直接変調レーザーの伝送特性の基礎検討.....	18
4-1-5	ドライエッチングの基礎検討.....	23
4-1-6	超高速面発光レーザーに関する基礎検討.....	25
4-2	高品質活性層の作製技術の研究開発.....	26
4-2-1	序論.....	26
4-2-2	GaInP クラッド層の MBE 成長に関する研究.....	26
4-2-3	GaInNAs の物性評価.....	31
4-3	総括.....	45
5	参考資料、参考文献.....	47
5-1	研究発表・講演等一覧.....	47

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。

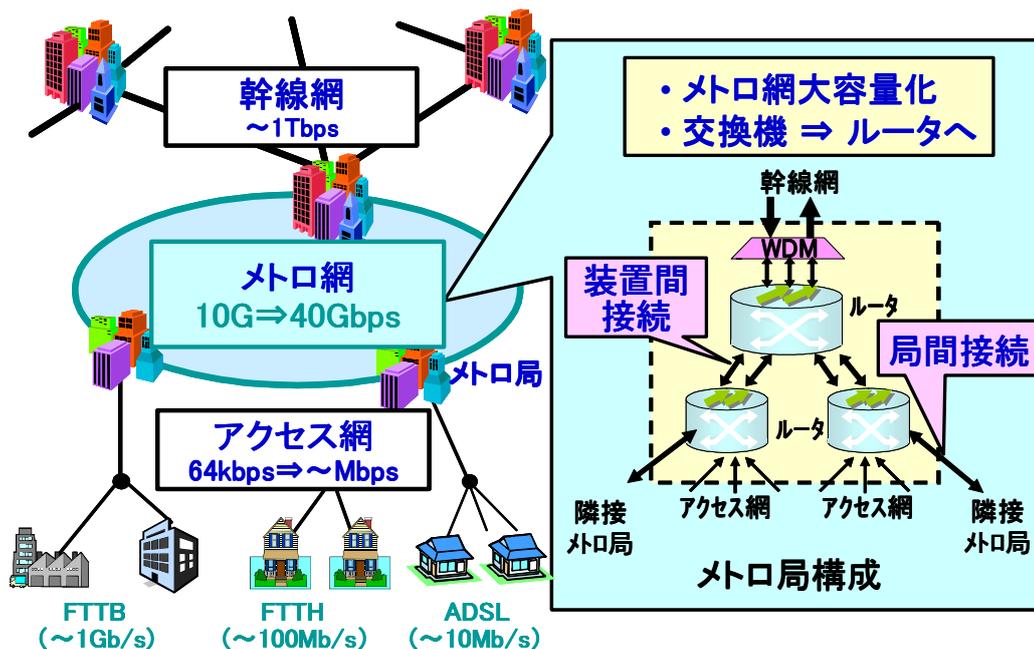


図 1-1 光通信網の模式図

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。

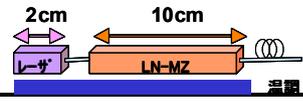
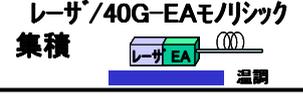
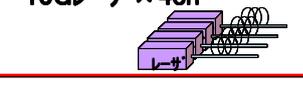
本研究開発では、(株) 日立製作所が所有する半導体レーザ材料、素子作製・評価技術を発展させることにより、低コスト、低消費電力、小型化が可能な超高速短距離伝送用光リンク用

半導体レーザー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ー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 の直接変調レーザー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。半導体レーザーによる 40Gb/s 直接変調動作は $1.3\mu\text{m}$ 帯 InGaAsP 系 DFB レーザ[4]と $1.55\mu\text{m}$ 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	 レーザー/40G-MZ変調器		$6 \times 17\text{cm}^2$	8 W	要	> 80 km	10
	 レーザー/40G-EAモジュック集積		$2 \times 3\text{cm}^2$	4 W	要	> 2 km	5
直接変調	 10Gレーザー×4ch		$5 \times 5\text{cm}^2$	5 W	不要	<300 m	2
	 レーザー40G 直接変調 (本提案)		$1 \times 2\text{cm}^2$	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 型変調ドーピング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 μm 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 μm 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 $1.3\ \mu\text{m}$ 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。よって端共振器構造が 40Gbps 実現のための有力な手段となる。現状のへき開による共振器構造作成では約 $200\ \mu\text{m}$ 以下のレーザ作成は難しい。よって図 2-1 に示すドライエッチ端面を有する短共振器構造を検討

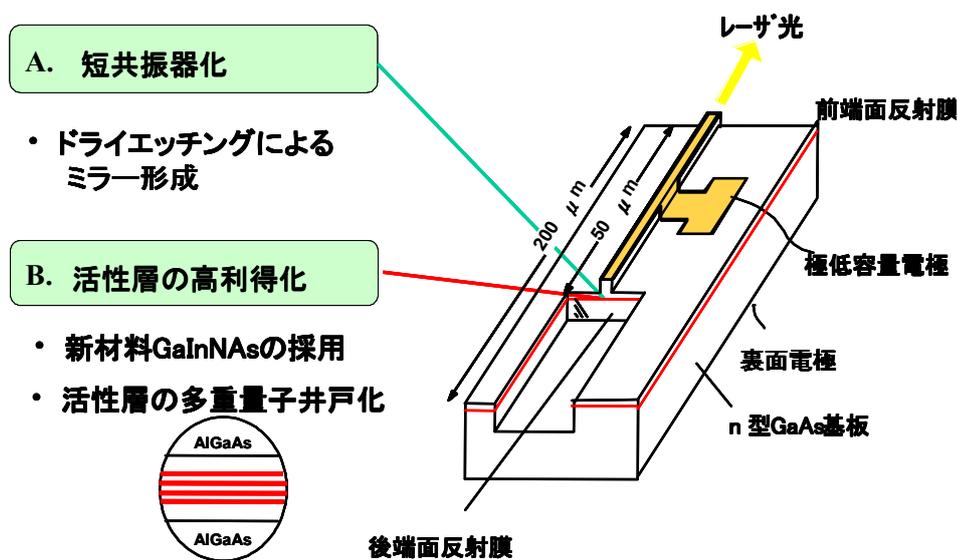


図 2-1 本研究の素子構造案

する。

尚、次世代超高速リンクの規格化に影響を与える面発光レーザの高速化に関する基礎検討を「超高速面発光レーザに関する基礎検討」は東京工業大学 小山研究室に再委託した。さらに、GaInNAs 量子井戸層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た。

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 超高速レーザー構造の研究開発			→			一部テーマを東京工業大学小山研究室に再委託
② 高品質活性層の作製技術の研究開発				→		一部テーマを愛媛大学白方研究室に再委託
③ 超高速光リンク用半導体レーザーの研究開発					→	
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)。

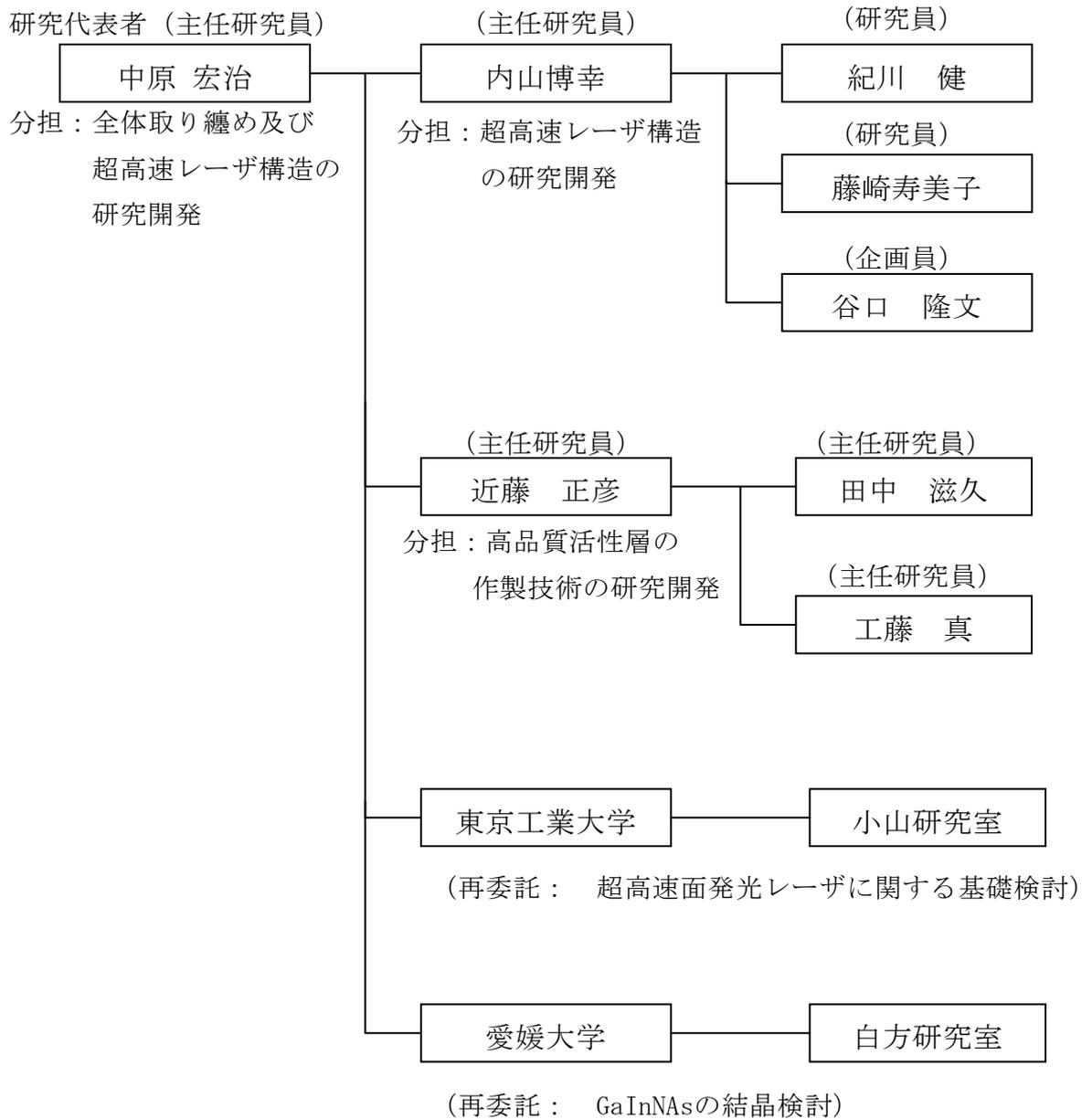
2 備考欄に再委託先機関名を記載

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

通信デバイス部 部長：武鎗 良治



4 研究開発実施状況

4-1 超高速レーザー構造の研究開発

4-1-1 序論

平成15年度までは1.1 μ m帯GaInAsレーザーの40Gbps直接変調動作とGaInNAs3重量子井戸層のPL発光を実現し中間目標を達成することができた。従って本サブテーマでは昨年度開発されたGaInNAs活性層を用いてレーザーを作製しその基本特性と高速特性について検討した。また、40Gbpsで動作する直接変調レーザーの光ファイバー伝送をシミュレーションを用いて検討した。このとき、チャープに関するパラメータ、具体的には線幅増大係数は半導体レーザーから実験的に抽出した。この半導体レーザーは10Gbps用の製品同等レベルの1.3 μ m帯レーザーを使用した。高速化に重要な短共振器化についてはドライエッチ技術の基礎検討を行った。

4-1-2 GaInNAsレーザーの基本特性

本節では昨年度にGaInAsと同等のPL強度を得たGaInNAs活性層を用いてレーザー構造を作製しその基本特性を検討した。具体的にはまず、評価が比較的簡単なEL(electro-luminescence)測定によるEL光の電流密度依存性を検討し、次にBA(Broad Area)-LDによるしきい電流密度の評価を行った。表4-1-2-1に作製した素子の仕様を示す。クラッド層は昨年度報告のGaInAs-LDに適用したAlGaAsではなくGaInPを適用した。これは昨年度報告したようにGaInNAs成長炉中のNがAlと結合しやすいためAlGaAsクラッド層によるAlの混入を避けるための措置である。但し、昨年度報告のGaInAs-LD結晶はGaInAsとしての最適化が行われているためリファレンスとし、今回検討した結果と比較を行った。今回の試作では量子井戸層数が1のSQW(Single Quantum Well)と3のTQW(Triple Quantum Well)を有するGaInNAs-LDを作製した。また、比較のためGaInNAsと同一構造のGaInAs-LDを作製した。本節ではGaInNAs-TQW-LDについては述べないが、これは試作の都合により基本特性の素子を作製しなかったためであり、次節にて特性を報告する。GaInNAs活性層については歪の小さい、即ち従来より結晶成長条件の緩い状態でのN原子の有無依存性をみるためにIn組成は従来のGaInNAsの組成である0.33~0.36より低い0.3としてある。井戸層幅とSCH(Separate Confinement Heterostructure)幅は昨年度のGaInAsレーザーの高速化の最適化検討に基づいた値を用い、障壁層は10nmである。

表 4-1-2-1 結晶仕様

結晶記号	活性層材料	ウェル数	井戸層幅 [nm]	SCH層幅 [nm]	備考
GaInNAs-SQW	GaInNAs	1	7	150	今回試作
GaInAs-SQW	GaInAs	1	7	150	
GaInAs-TQW	GaInAs	3	5	120	
GaInAs-Ref.	GaInAs	1	7	150	リファレンス

EL測定では電極が約 $80\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ の素子を用い、へき界面からの発光強度を測定した。また BA-LD のしきい電流密度の測定では共振器幅 $80\mu\text{m}$ のにより、電流－光出力特性の評価を行った。

図 4-1-2-1 は GaInNAs-LD 用結晶及び GaInAs-LD 用結晶を用いて EL 評価を行った結果で、EL 発光強度の注入電流密度依存性を示す。GaInAs はいずれも同様の傾向を示しているが、GaInNAs は GaInAs に比べ EL 発光強度が低い。半導体レーザの動作電流密度とほぼ同等の $500\text{A}/\text{cm}^2$ における EL 発光強度は GaInAs では $5\sim 10\text{mW}$ であるのに対し、GaInNAs ではその $10\sim 20\%$ の 1mW であった。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。

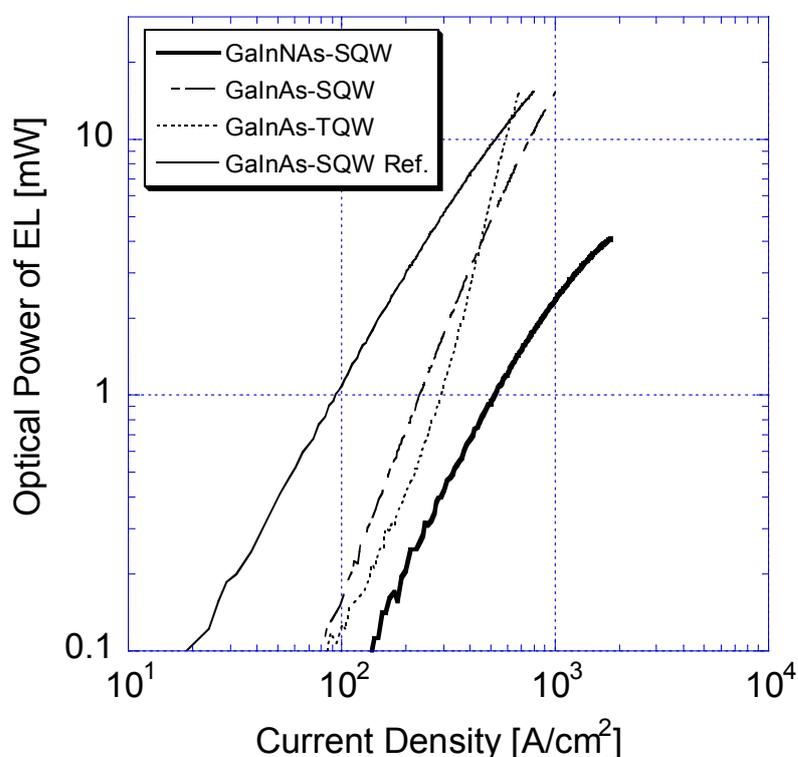


図 4-1-2-1 EL 発光強度の注入電流密度依存性

次に、実際に BA-LD を作製し、しきい電流密度の実測値を求めた結果を示す。図 4-1-2-2 は共振器長 L の逆数に対するしきい電流密度 J_{th} の関係である。GaInAs に比較して GaInNAs はしきい電流密度が大きいことが分かる。また GaInAs の中で比較すると、本研究で試作した GaInAs-LD 用結晶はリファレンスよりしきい電流密度が大きい。これはリファレンスの GaInAs は最適化されているが、本検討の GaInAs は GaInNAs 結晶の最適成長条件により成長しており GaInAs の最適条件になっていないためと考えられる。図 4-1-2-2 より共振器長 L を無限大に外挿して求めたしきい電流密度 $J_{th}(L=\infty)$ は、GaInNAs では $700\text{A}/\text{cm}^2$ である。従来の値は $1500\text{ A}/\text{cm}^2$ であり、約 $1/2$ に低減することが出来た。これは特性劣化を招く Al が結晶中に混入しないよう検討し、得られた結果である。しかし、GaInAs とは差があるため、今後も GaInNAs の結晶性の改善が必要である。

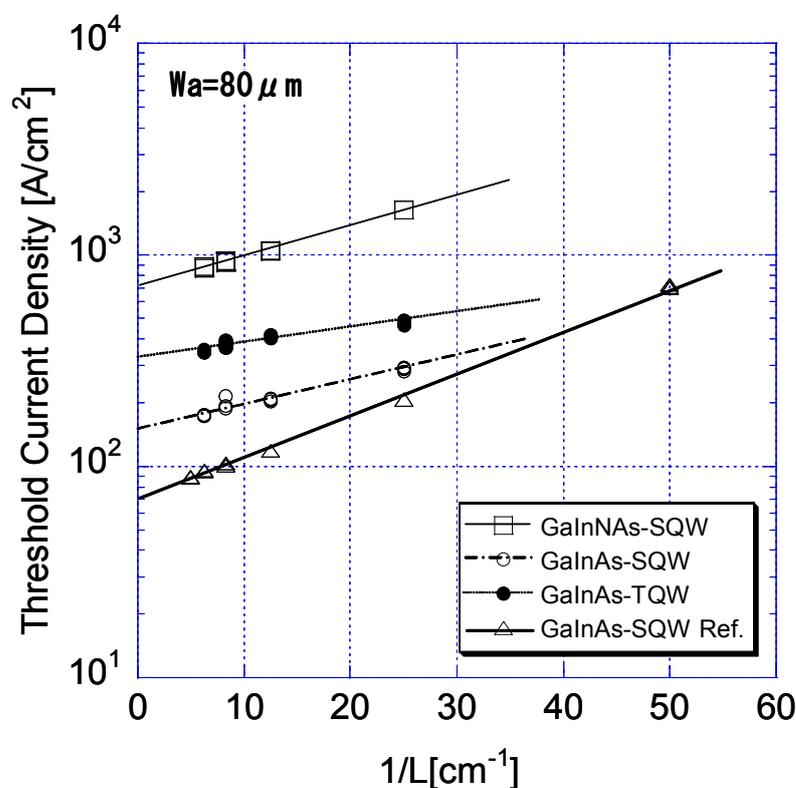


図 4-1-2-2 共振器長の逆数としきい電流密度の関係

図 4-1-2-1 から求めた EL 発光強度が 10mW となる注入電流密度と、図 4-1-2-2 から求めたウエル当りの $J_{th}(L=\infty)$ の関係を見ると図 4-1-2-3 の実線となる。また、図 4-1-2-3 で破線で示しているのは、結晶を最適化した GaInAs での実測値を基準にして EL 評価結果から求めた予測値である。予測値である破線と今回の実測値である実線はほぼ一致している。よって簡便な EL 評価によりレーザを作製しなくとも $J_{th}(L=\infty)$ を良く予測できることが確認された。EL 評価によって結晶性検討へのフィードバックを早く行うことが出来、またレーザ素子作製前に結晶が選別できるため素子作製の効率を向上させることが出来る。

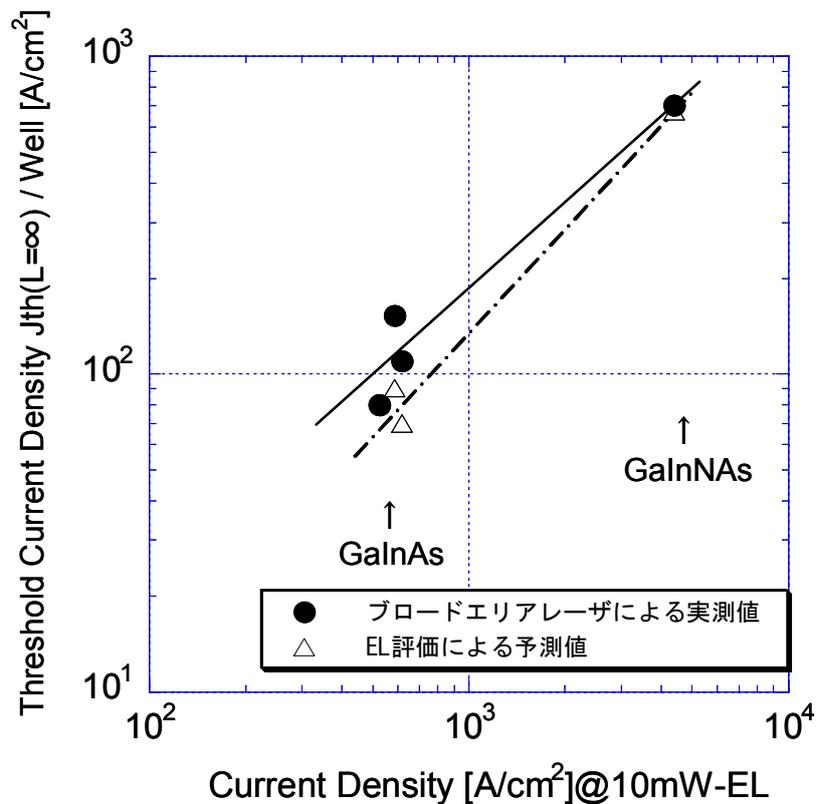


図 4-1-2-3 EL 評価における同一 EL 発光強度の注入電流密度とブロードエリアレーザによるしきい電流密度の関係

図 4-1-2-4 は BA-LD による、共振器長 L と外部微分量子効率 η_d の逆数の関係である。この結果より共振器長 L を 0 に外挿して内部微分量子効率 η_i を求めると、GaInNAs においては従来の約 2 倍の値となる 0.62 であった。効率が向上したのは先にも述べた通り、結晶の Al フリー化により結晶性が向上したためと考えられる。GaInAs の内部微分量子効率は GaInNAs と同程度の 0.60~0.70 であった。リファレンスの GaInAs は 0.85 である。また、内部損失係数 α_i は今回試作の GaInNAs 及び GaInAs で $8.6 \sim 9.6 \text{ cm}^{-1}$ であるのに対し、リファレンスの GaInAs では 2.1 cm^{-1} である。リファレンスに比べ今回の結晶で内部微分量子効率 η_i が小さく内部損失係数 α_i が大きいのは、クラッド層材料の違いによるバンドプロファイルの差異、ドーピング濃度や成長温度の違い、アニール有無の差によると考えられる。詳細は今後の検討としたい。

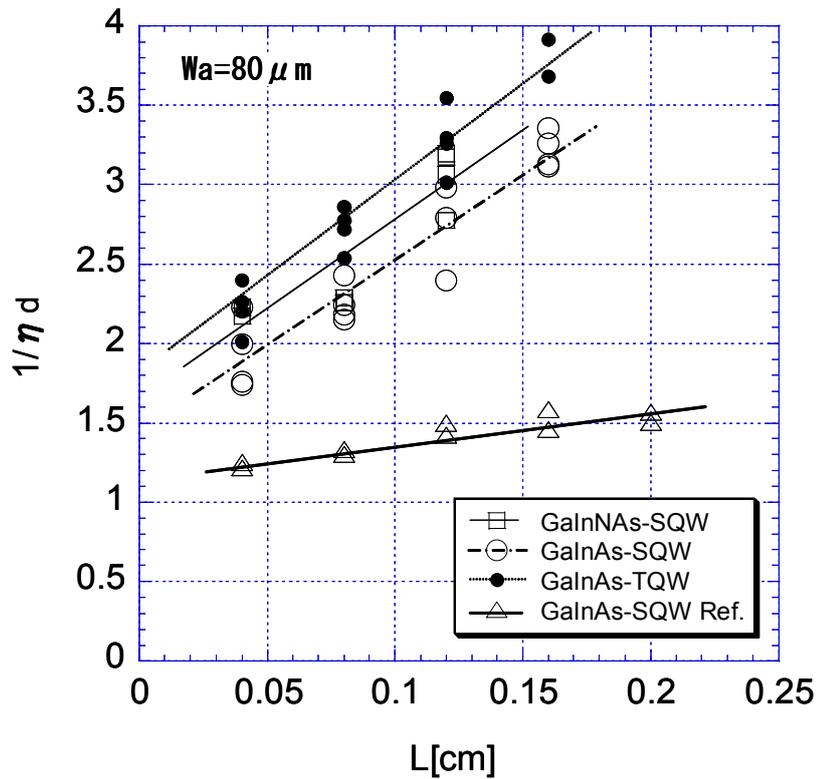


図 4-1-2-4 内部微分量子効率の共振器長依存性

4-1-3 GaInNAs レーザの高速特性

本節で検討した GaInNAs-LD (laser diode) の素子構造の模式図を図 4-1-3-1-a に示す。また、断面の走査型電子顕微鏡像を図 4-1-3-1-b に示す。本素子は逆メサのクラッド層を有するリッジ型レーザである。表 4-1-3-1 には作製した素子の仕様を示す。基本的な層構造は前節と同一である。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。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 4-1-3-2 に示す。素子のしきい電流は 9.2mA であり、従来の日立の GaInNAs レーザ約 $1/5$ と良好な値を得た。このしきい電流低減は Al フリー-MBE 成長炉による不純物混入の抑制、及び図 4-1-3-1 に示す逆メサ構造による電流狭窄化に起因すると考えられる。図 4-1-3-3 には本素子の 3mW 光出力時のスペクトル波形を示す。中心波長は $1.267\ \mu\text{m}$ であり、 $1.3\ \mu\text{m}$ には達していない。これは前述のように歪低減のために In 組成を減らしたことに因る。発振スペクトルの包絡線は一般的な FP-LD ような単峰性ではなく $1.261\ \mu\text{m}$ 付近にも極大値を持つ。この原因については今後の検討としたい。

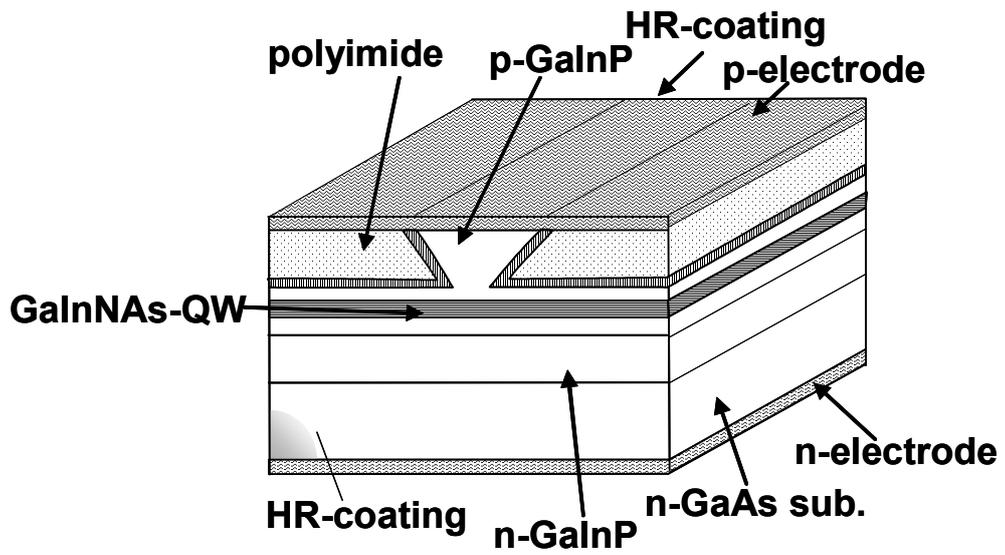


図 4-1-3-1-a GaInNAs リッジ型レーザの構造図

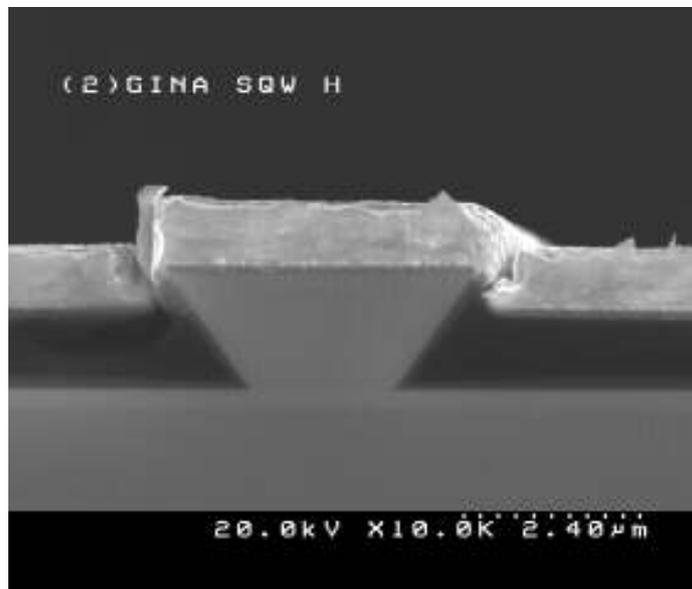


図 4-1-3-1-b リッジレーザの走査型電子顕微鏡像

表 4-1-3-1 試作仕様

試作記号	活性層材料	N_w	井戸層幅 L_w (nm)	SCH層幅 (nm)
GaInNAs-SQW	GaInNAs	1	7	150
GaInNAs-TQW	GaInNAs	3	5	120
GaInAs-SQW	GaInAs	1	7	150
GaInAs-SQW	GaInAs	3	5	120

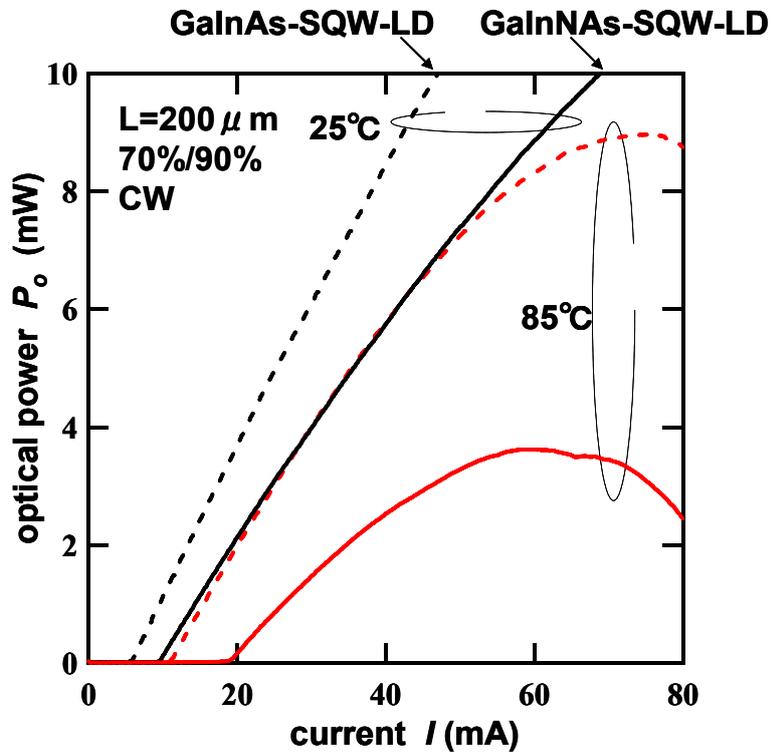


図 4-1-3-2 GaInNAs リッジ型レーザにおける光出力-電流特性の典型例

表 4-1-3-2 には本研究で作製した素子の特性を纏めた。それぞれの特性は約 10 素子の中央値として記した。SQW レーザにおいて GaInNAs のしきい電流 I_{th} は GaInAs の約 1.7 倍であ

り、従来の GaInNAs より大幅に改善されたとはいえ、GaInAs とはまだ特性に差が有ることがわかる。一方、TQW のレーザでは GaInNAs のしきい電流は GaInAs の約 3.5 倍あり SQW に比べると差が大きい。

表 4-1-3-2 試作した素子の LD 特性

試作記号	I_{th} (mA)	R_s (Ω)	η_s (W/A)	λ_c (nm)
GaInNAs-SQW	10.8	9.7	0.174	1267.3
GaInNAs-TQW	32.7	16.5	0.145	1224.6
GaInAs-SQW	6.0	11.7	0.256	1132.8
GaInAs-TQW	9.4	12.7	0.207	1077.3

これは多重量子井戸層では歪の増大により GaInNAs の 3 次元成長が促進されたためと考えられる。スロープ効率 η_s は GaInAs より GaInNAs が約 3 割低く、GaInAs との結晶性に差があることを示している。波長は N 導入の効果により従来と同様に GaInNAs が約 130nm 長波長化している。また、素子抵抗 R_s はいずれの素子も前回報告の GaInAs レーザの約 2 倍となっている。これは p-GaInP クラッド層の抵抗率が大きいため、今後の 40Gb/s 動作に対する課題となる。

図 4-1-3-4 は報告されている GaInNAs-SQW リッジ型レーザのしきい電流の年次推移を纏めたものである。図から判るようにしきい電流は GaInNAs のリッジ型レーザでは世界トップレ

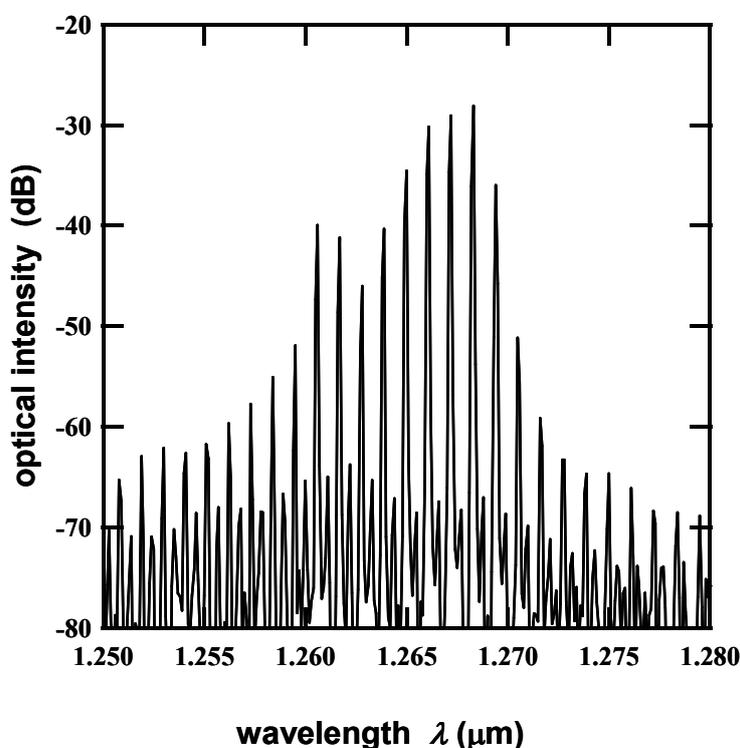


図 4-1-3-3 GaInNAs リッジ型レーザにおけるスペクトラム特性の典型例

ベルの値を得ることができた。この低いしきい電流は Al の混入を極力避けた MBE 成長炉による不純物混入の抑制、及び図 4-1-3-1 に示す逆メサ構造による良好な電流狭窄化に起因すると考えられる。

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 4-1-3-5 は大振幅電流により測定した各レーザの f_r の駆動電流依存性である。1.1 μm 帯で発振する GaInAs レーザでは SQW 及び TQW レーザの駆動電流の平方根に対する f_r の傾き a はそれぞれ、3.05GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ 、2.0GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ であった。この値は昨年度の報告とほぼ同等の値が得られ、GaInAs 活性層の結晶性は良好と考えられる。一方、GaInAs については SQW, TQW 共に傾き a が 1.45GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ と小さかった。これは GaInAs とは結晶が異なることを示している。特に TQW 化、すなわち多重量子井戸層化によっても a が増大しないのは前述のように 3次元成長の促進に起因していると考えられる。

昨年度の GaInAs レーザの高速動作の検討からアンドープの TQW では傾き a は 2.5 以上が必要であることがわかっているため GaInAs レーザの 40Gb/s 動作達成には結晶性のさらなる改善が必要であることが判明した。

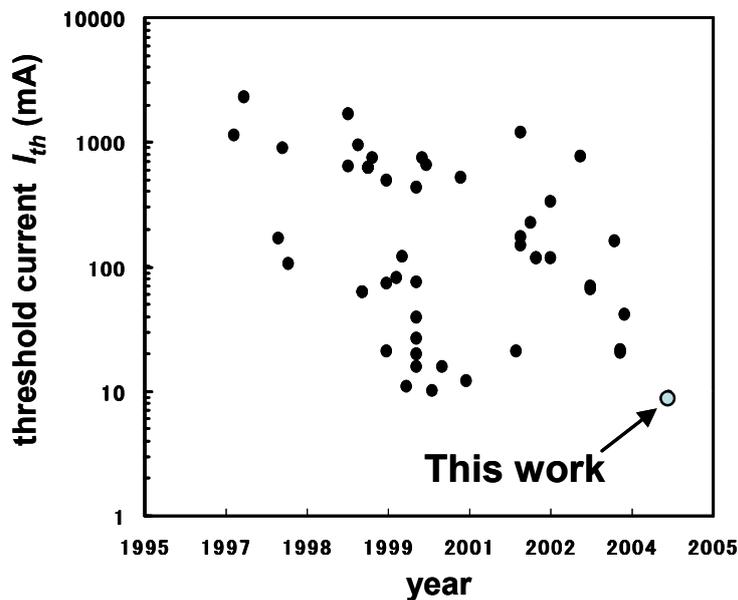


図 4-1-3-4 報告された GaInAs リッジ型レーザのしきい電流年次推移

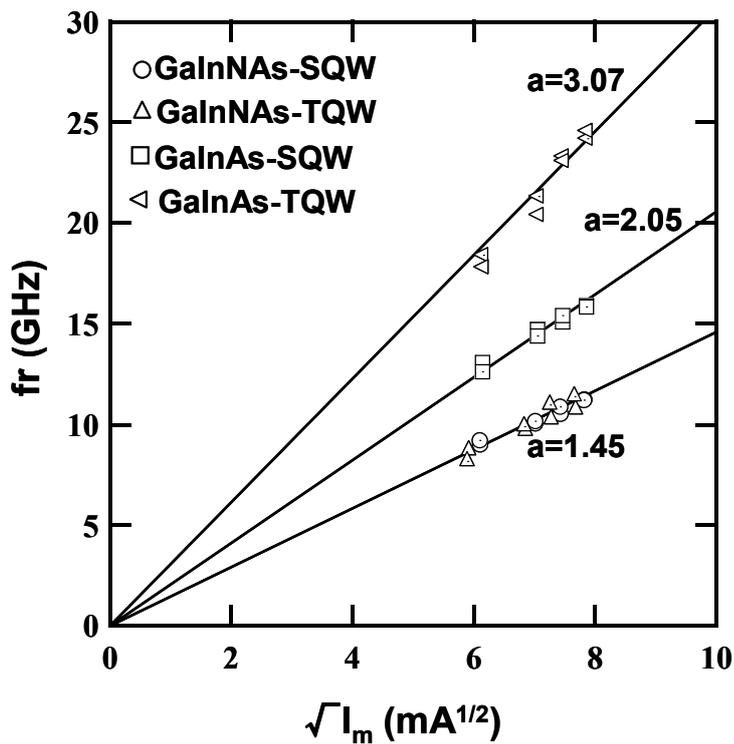


図 4-1-3-5 緩和振動周波数 f_r と駆動電流の平方根 $\sqrt{I_m}$ の関係

4-1-4 40G 直接変調レーザの伝送特性の基礎検討

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平成 15 年度に実現した 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

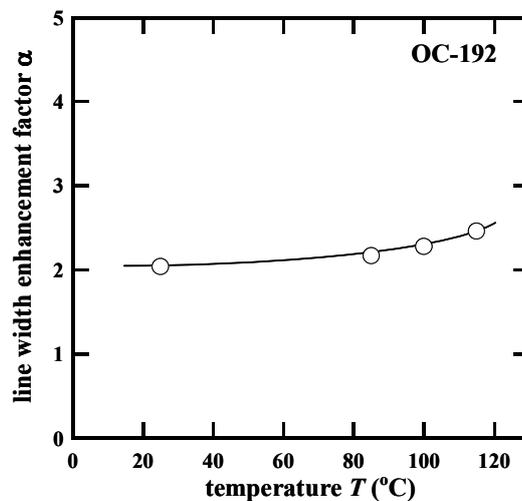


図 4-1-4-1 10Gbps 用半導体レーザにおける線幅増大係数の温度依存性

めた線幅増大係数 α 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/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 μ m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	μ m	200	
活性層幅	W	μ m	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	
光閉込込め係数	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}	$\alpha_i=20cm^{-1}$, 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。

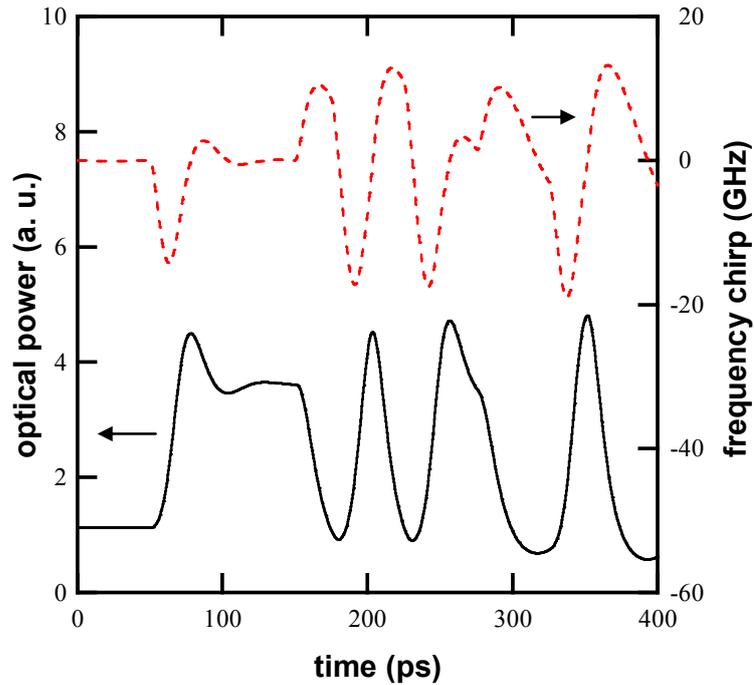
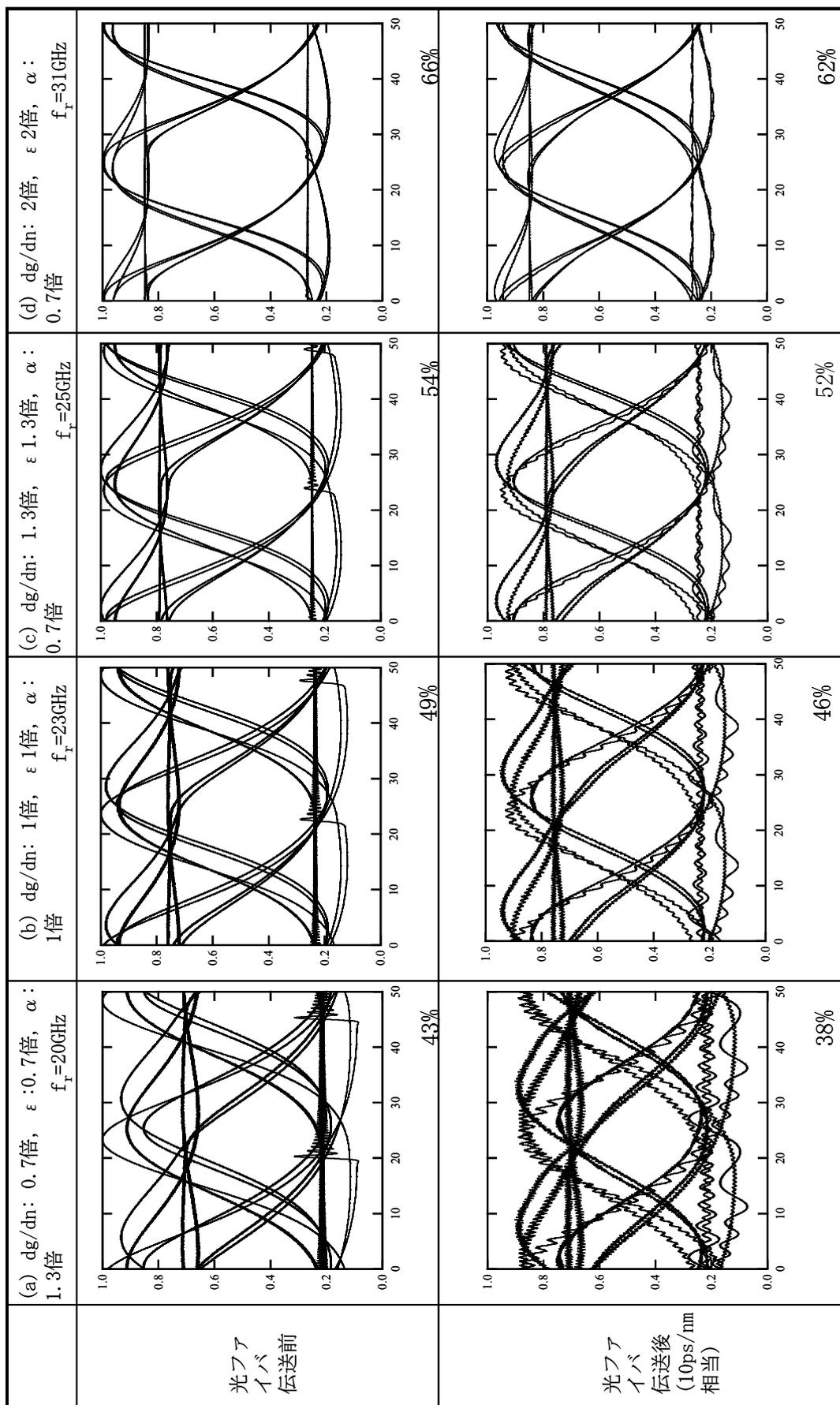


図 4-1-4-2 40Gbit/s 動作動作波形の 1 例 (表 4-1-4-1 のパラメータによる)

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 $\pm 30\%$ 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 7.5 ps/nm/km を仮定すると $1.3 \mu\text{m}$ 帯の光ファイバ 2.67 km 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 0.28 dB 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%



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, 各アイパターンの数値は71開口率)

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。

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

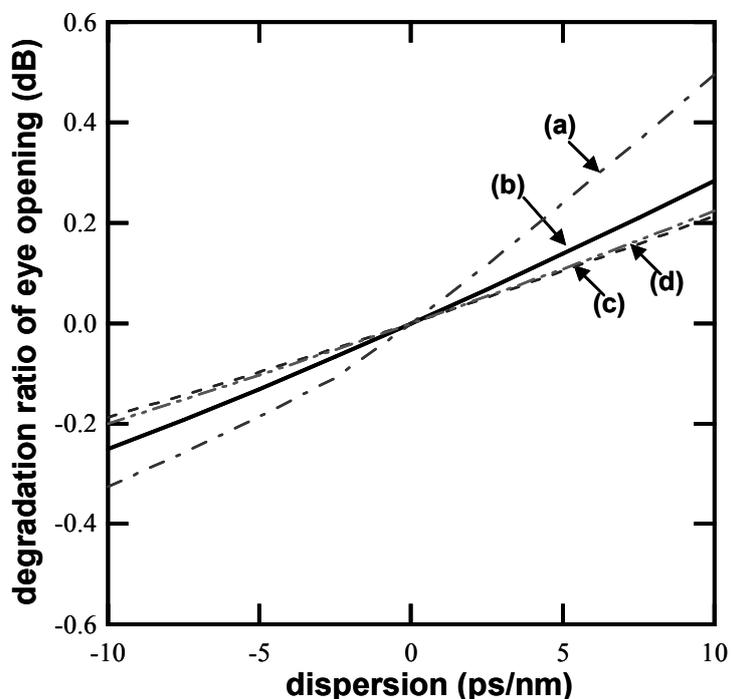


図 4-1-4-4 40Gbit/s 動作動作時における光ファイバ分散とアイ開口劣化の関係

- (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

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。本研究の最終目標である GaInNAs による 1.3 μm 帯 40Gbps 動作には少なくとも現状の GaInAs レーザと同じ微分利得と非線形飽和係数が必要であることがわかった。

4-1-5 ドライエッチングの基礎検討

昨年度までは AlGaAs を含むドライエッチングの検討を行った。今年度は Al フリー化に伴い、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 4-1-5-1 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 (Pospho Silicate Glass)/SiO₂ 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 CHF₃/C₂F₆ 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 4-1-5-2 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 4-1-5-1. 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: 2.0e19cm ⁻³)	200nm
② p-InGaP クラッド層 (Be: 0.8→3.0e18cm ⁻³)	1500nm
③ p-GaAs (SCH) 層 (Be: 3.0→5.0e17cm ⁻³)	140nm
④ un-GaAs ハリア層	10nm
⑤ un-GaInNAs 活性層	7nm
⑥ un-GaAs 層ハリア層	10nm
⑦ n-GaAs (SCH) 層 (Si: 1.0e18cm ⁻³)	140nm
⑧ n-InGaP クラッド層 (Si: 1.0e18cm ⁻³)	1500nm
⑨ n-GaAs ハッファ層 (Si: 1.0e18cm ⁻³)	300nm
⑩ S. I. GaAs sub.	350 μm

表 4-1-5-2. 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: Cl ₂ (12.5 sccm) / N ₂ (7.5 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 4-1-5-2 は表 4-1-5-2 に示したドライエッチング条件(エッチング圧力:1.13 mTorr, Cl₂(12.5 sccm)/N₂(7.5 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、N₂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、N₂スパッタリングによる物理的效果とそれによるイオンアシストによる効果が大きく、N₂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に起こる現象で、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 μm 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 → 390 [sec]としたエッチング断面形状を図 4-1-5-3 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 4-1-5-2. 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ッチング形状が確保出来ることを確認した。

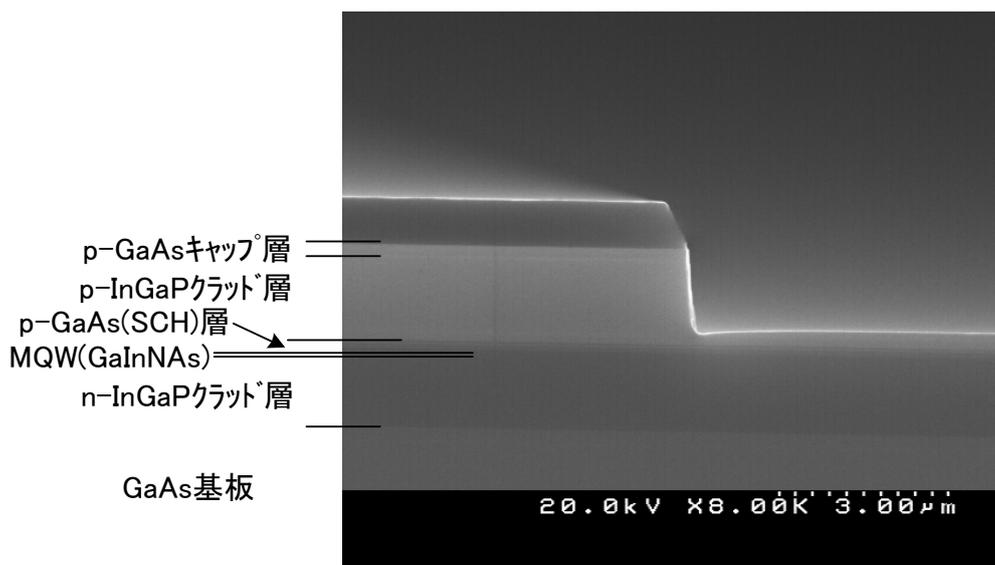


図 4-1-5-2. リッジ形成におけるエッチング断面形状

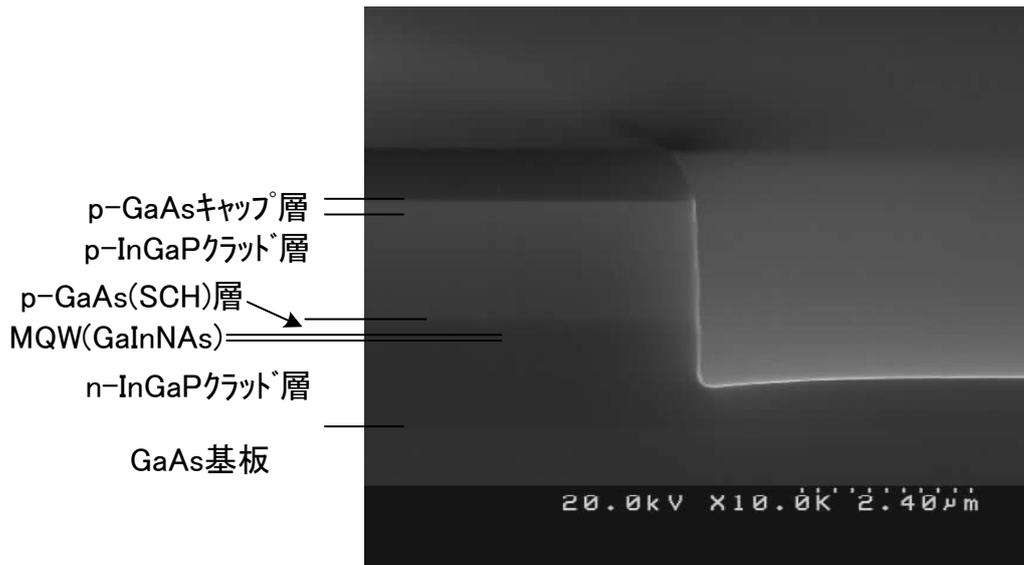


図 4-1-5-3. 端面ミラー形成におけるエッチング断面形状

4-1-6 超高速面発光レーザに関する基礎検討

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、①1.2 μm 帯高歪 GaInAs/GaAs 量子井戸面発光レーザ、②多波長アレイ集積化、③外部共振器による高速化を検討し、以下の成果を得た。

- ア) 高温動作可能な 1.2 μm 帯単一モード GaInAs/GaAs 面発光レーザを製作し、100 波長規模の多波長集積レーザアレイの試作に成功した。
- イ) 面発光レーザの高速直接変調特性の向上を目的として、外部光帰還による高速化を用いた外部複合共振器構造を提案し、その大信号変調特性のシミュレーションを行い、40Gbps 動作の可能性を示した。

4-2 高品質活性層の作製技術の研究開発

4-2-1 序論

平成 15 年度までは活性層単体での GaInNAs 3 重量子井戸層の PL 発光を実現した。本年度はレーザ構造による GaInNAs 量子井戸活性層の検討をクラッド層の変更を含めて行った。

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。実際、昨年度の重要成果である 1.1 μm 帯での 40Gbps 動作を達成した GaInAs 半導体レーザではクラッド層に AlGaAs を用いた。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。こ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 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。

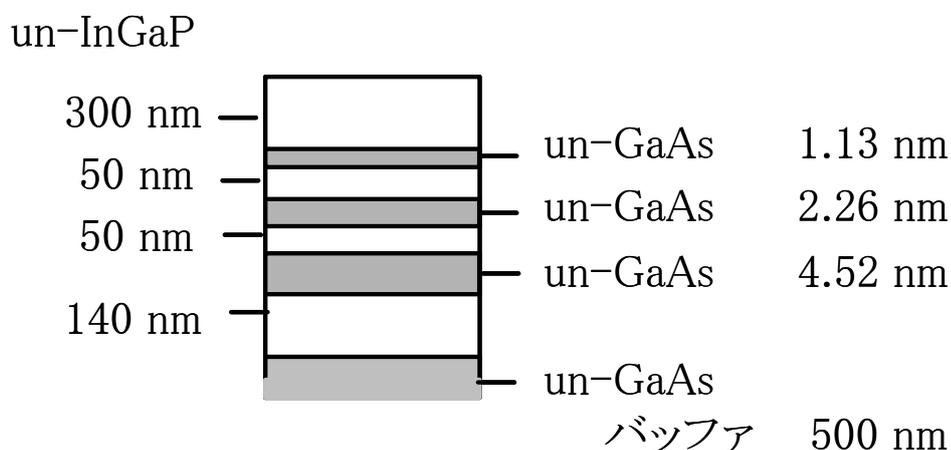


図 4-2-2-1 最適化に用いた GaAs/GaInP 量子井戸の構造

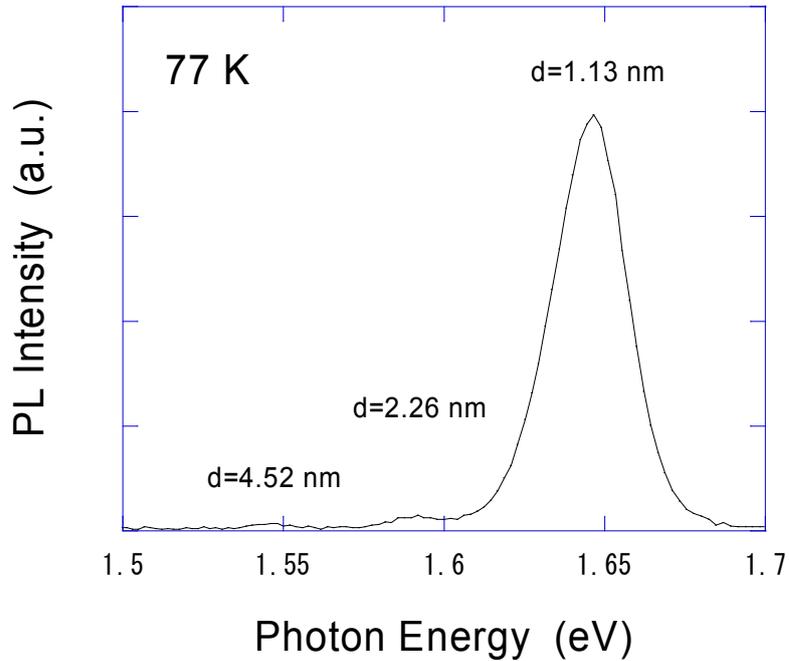


図 4-2-2-2 PL スペクトルの一例

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。そのことで、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 μm 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±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。

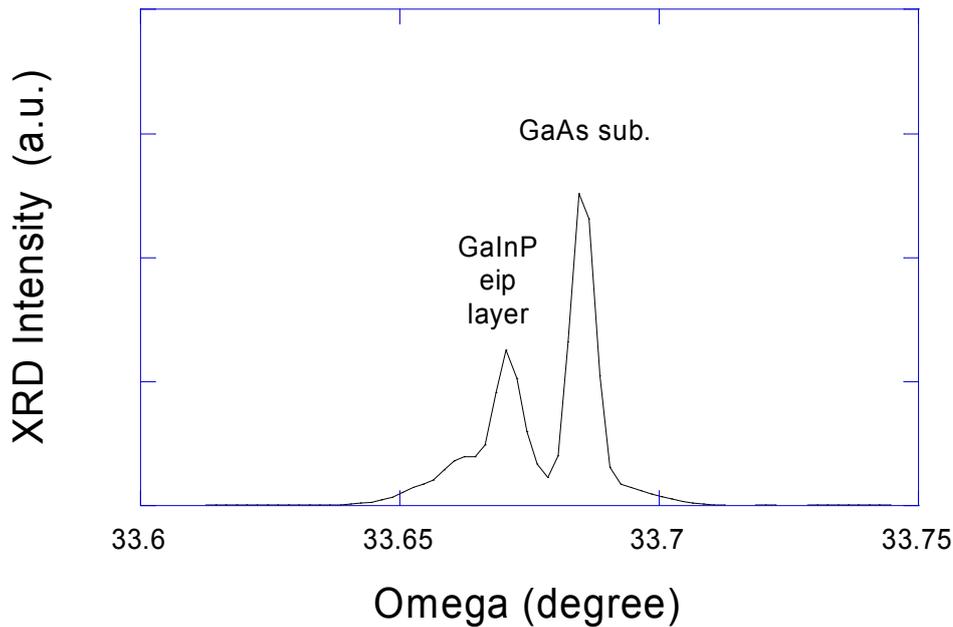


図 4-2-2-3 GaInP の X 線回折スペクトル

2) レーザの作製に向けた多層結晶の成長

GaInNAs 活性層と GaInP クラッド層の成長条件の最適化をそれぞれ行ったので、レーザ試作に向けた多層結晶の成長をおこなった。試作した素子の特性は、別項で報告したとおりである。まだまだ改善の必要がある。今回のレーザ用多層結晶の成長では、GaInNAs 活性層と GaInP クラッド層の作製条件の最適化が独立に行われた。それらを纏めて全体的に最適化することで、素子特性を改善することが可能である。

図 4-2-2-4 に、今回試作した素子と同条件で作製した活性層の AFM(原子間力顕微鏡)像を示す。本試料では活性層以下の層構造はレーザと全く同じである。従って、試作した素子の活性層の表面を評価することが出来る。同図より、数十 nm サイズの凹凸が表面に発生していることがわかる。これは、成長モードが 2 次元の層状成長から 3 次元の島状成長変化した為である。成長モードの変化は成長温度の高温化によってもたらされる。今回のレーザ用多層結晶の成長では、活性層の成長温度を活性層単体を成長する場合の最適値の 480℃とした。レーザ用多層結晶の成長ではガスセルやドーパントセルが昇温されているので、それらのセルからの輻射により実際の成長温度が活性層単体の成長の場合よりも幾分高くなったと考えられる。

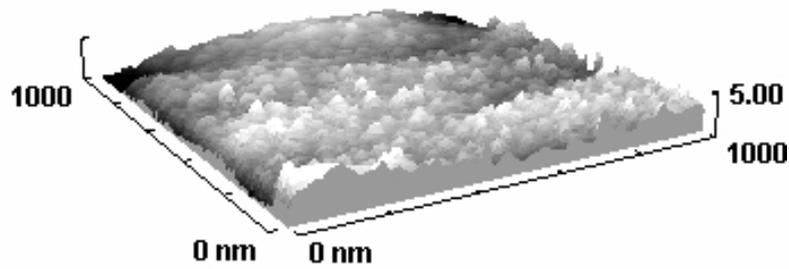


図 4-2-2-4 今回試作した素子と同条件で作製した活性層の AFM 像

図 4-2-2-5 に、設定温度を 450°C として、実際の成長温度を最適化した場合の AFM 像を示す。3次元成長はなくなり、表面のラフネスを示す RMS 値が 2.4 Å のスムーズな活性層表面を作製することができた。本図においては、数百 nm 周期の大きなウネリが見られる。これは、GaInP クラッドの成長中に発生するステップバンチングによるものである。このウネリも、GaInP クラッドの成長条件の最適化により取り除くことができた。

上記データが示すとおり、GaInNAs 活性層と GaInP クラッド層の作製条件を全体的に最適化することで素子特性を改善することが可能である。

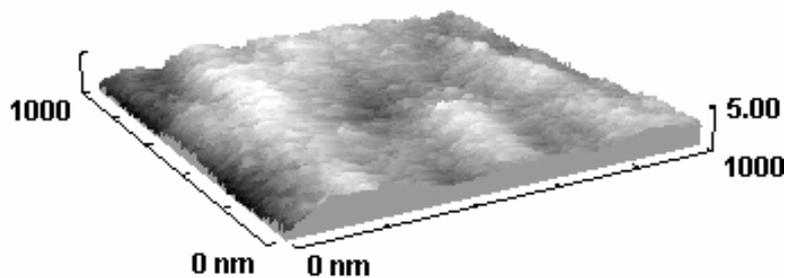


図 4-2-2-5 修正した成長温度で作製した活性層表面の AFM 像

修正した温度を用いてさらなる結晶性改善のために窒素組成の低減と Sb サーファクタントの導入を行った GaInNAs レーザ構造の EL (electroluminescence) 特性を図 4-2-2-6 に示す。図からわかるように発光強度が倍増している。この EL 特性から推定されるしきい電流密度は 250A/cm² であり、上述の GaInNAs レーザの半分以下のしきい電流が得られる見通しが得られた。

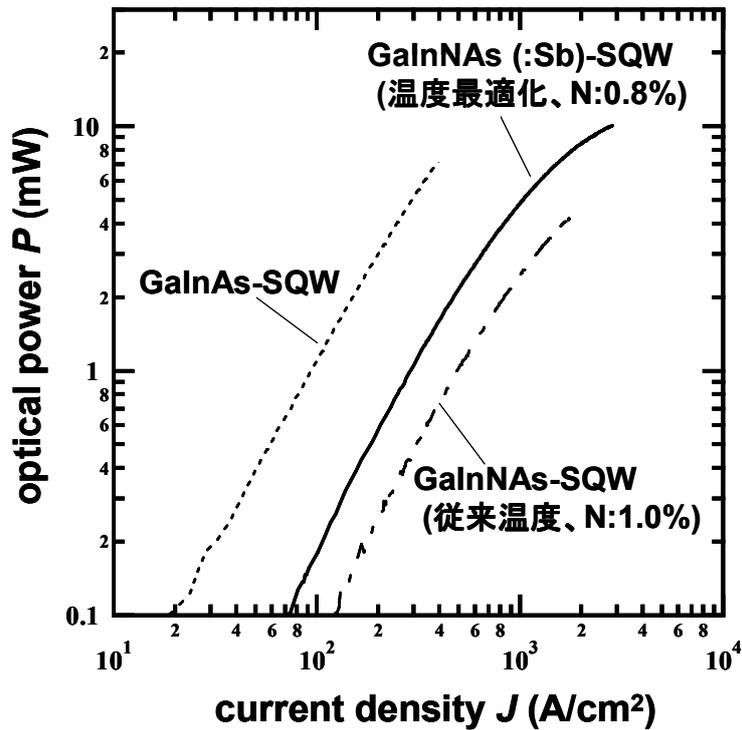


図 4-2-2-6 GaInNAs(:Sb) レーザの EL 特性

4-2-3 GaInNAs の物性評価

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、③GaInNAs N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 を得ること、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。

(1) Sb を添加した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

試料には固体ソースMBE (MBE) により成長したものを用いた。V族のN組成は1%である。基板温度は460℃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75 cm）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（8～300 K）には閉ループ型冷却器を用いた。

測定に用いた試料の作製条件を表4-2-3-1に示す。試料は2インチウエハの中心部のものである。Sbセル温度230°CのGaInNAs:SbのRTAのみ2インチウエハの端部（中心から20mm）のものを測定した。

表4-2-3-1 PL測定に使用した試料

試料名	活性層	N組成 (%)	In組成 (%)	Sbセル (°C)	Sb Flux (Pa)	アニール
K319	GaInNAs	1	30	なし	なし	as-grown, RTA : 740°C
K324	GaInNAs:Sb	1	30	220	1.00E-06	as-grown, RTA : 740°C
K328	GaInNAs:Sb	1	30	230	2.00E-06	as-grown, RTA : 720°C, 740°C

図4-2-3-1に、740°CでRTAを施したGaInNAs:Sb試料のPLスペクトルの温度依存性を示す。RTAを施したGaInNAs:Sbでは発光はバンド端の励起子発光が低温から室温まで（8～300 K）優勢であり、局在励起子発光や不純物の関与した発光は観られない。発光ピークの形状やその温度に対する依存性は、これまで測定してきたGaInNAs-SQWとほぼ同様である。局在励起子発光が観られないことから、今回測定に用いたGaInNAsおよびGaInNAs:Sbの結晶性はこれまで成長した最高級のものとはほぼ同等であると考えられる。

図4-2-3-2にas-grownのGaInNAs:SbのPLスペクトルの温度依存性を示す。GaInNAsおよびGaInNAsのas-grownでは低温度領域（8-60K）で局在励起子発光が見られる。RTAを施すことにより、結晶性が改善され局在励起子発光は見られなくなる。Sbの添加効果のPLスペクトルに与える影響は殆ど無いものと思われる。

図4-2-3-3にピークエネルギーの温度依存性を示す。300 Kの測定温度において、Sbを添加したGaInNAs:Sbでは無添加のGaInNAsに比べて、発光ピークエネルギーが若干（5～15 meV）高い。しかし、Sbフラックスが低い（ 1×10^{-6} Pa）試料K324の方が、Sbフラックスが高い（ 2×10^{-6} Pa）試料K328に比べて発光ピークエネルギーが高い。この結果より、Sbフラックスに対して発光ピークエネルギーが系統的に変化しているとは言えない。

RTAによる発光の高エネルギーへのシフト（ブルーシフト）はGaInNAsおよびGaInNAs:Sbで54～57 meVであり、Sb添加によりブルーシフトの大きさは殆ど変化しない。

図4-2-3-4（a）にRTA（740°C）を施したGaInNAs:Sb PLの半値幅の温度依存性を示す。8～300 Kの温度において半値幅は11～22 meVと小さい値であり、これまで得られた高品質のGaInNAs-SQWと同等である。Sb添加の半値幅に与える影響はごくわずかであるが、Sbの添加により半値幅がごくわずか（1 meV程度）小さくなる。従って半値幅からSbの添加により結晶性はわずかながら改善されるとも考えられるが、発光エネルギーが高エネルギー側へシフトすることを考慮すればSb添加により必ずしも結晶性が改善されたとは言えない。

図 4-2-3-4 (b) に as-grown の GaInNAs:Sb PL の半値幅の温度依存性を示す。50 K 付近で半値幅が極大値をとる理由は局在励起子発光と励起子発光ピークの強度が同等となり発光ピークの重なりによるものである。低温で半値幅への Sb 添加の影響は観られないが、室温付近で Sb 添加により半値幅が大きくなる傾向がある。

図 4-2-3-4 (a) と図 4-2-3-4 (b) を比較することにより RTA による半値幅の減少と局在励起子発光の低減が観られる。

図 4-2-3-5 に発光の積分強度（発光ピーク強度と半値幅の積であり発光量にほぼ比例する）を温度の逆数（ $1000/T$ ）に対してプロットして示す。高温領域で Sb 添加による発光強度の違いは殆ど観られない（as-grown, RTA 試料共に）。100 以下の低温（ $1000/T > 10$ ）では、発光強度に Sb 添加の効果が若干表れており、as-grown 試料では Sb 添加による発光強度の減少が、RTA 試料では Sb 添加による発光強度の増加が観られる。しかし、違いはごくわずかである。アーレニウスプロットより求められた高温領域（120～300 K）における温度消光の活性化エネルギーは、63 meV (GaInNAs)、68 meV (GaInNAs:Sb, Sb flux: 1×10^{-6} Pa)、66 meV (GaInNAs:Sb, Sb flux: 2×10^{-6} Pa) である。昨年度までの PL の温度依存性より、GaInNAs 系においては高温領域の活性化エネルギーと結晶性に正の相関が観られる。この活性化エネルギーの大きさは、他の PL パラメータにより評価した結晶性と矛盾しない。

また、アニールによる発光強度（積分強度）の増加（改善）は室温で30倍程度である。

以上、半値幅、PL 強度、局在励起子発光より結晶性を評価した結果、Sb 添加により RTA 試料では結晶性の向上が、as-grown 試料では結晶性の低下が観られるが、その変化はわずかである。これは、発光波長の短波長化（窒素組成の変化によるものと予想される）による結晶性の向上と相殺することを考えれば必ずしも Sb 添加により結晶性が向上したとは言えない。

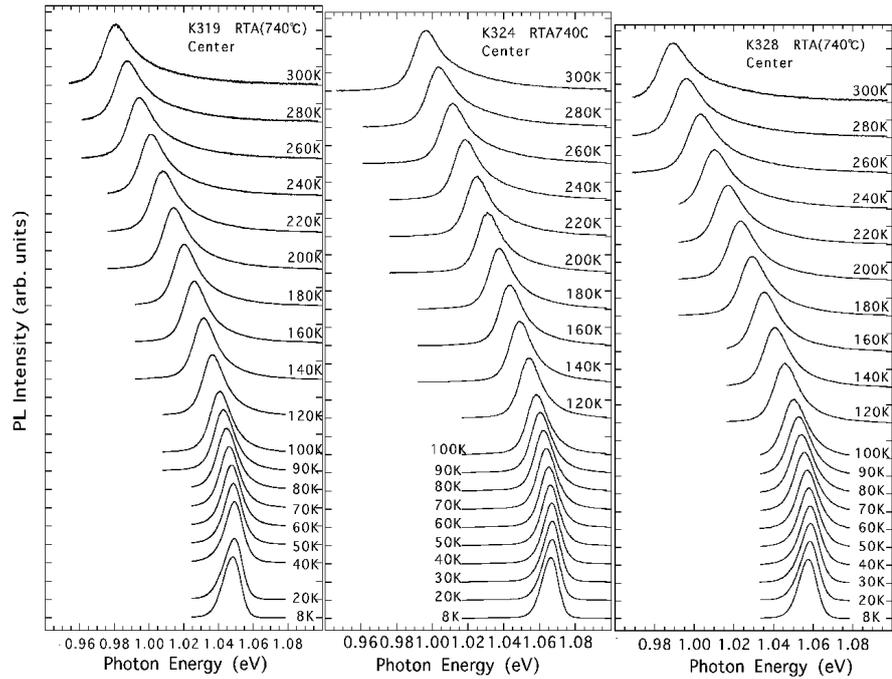


図 4-2-3-1 GaInNAs:Sb-SQW の P L スペクトルの温度依存性 (R T A 7 4 0 °C)
 K 3 1 9 は S b をドーブしていない GaInNAs、K 3 2 4 および K 3 2 8 は S b フラック
 スがそれぞれ 1.0×10^{-6} Pa および 2.0×10^{-6} Pa で作成された。

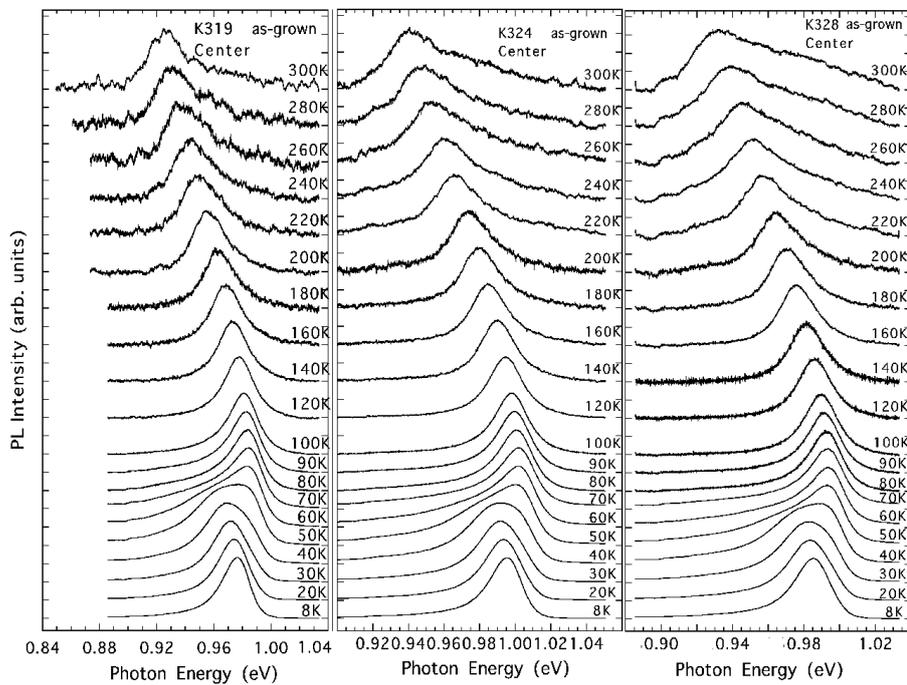


図 4-2-3-2 GaInNAs:Sb-SQW の P L スペクトルの温度依存性 (as-grown)。

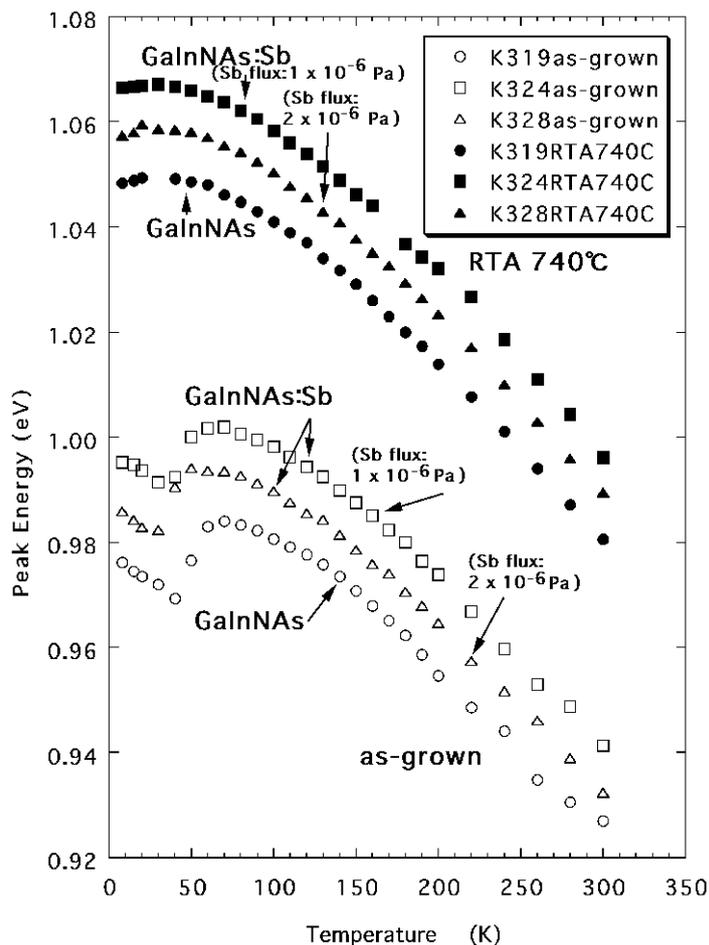
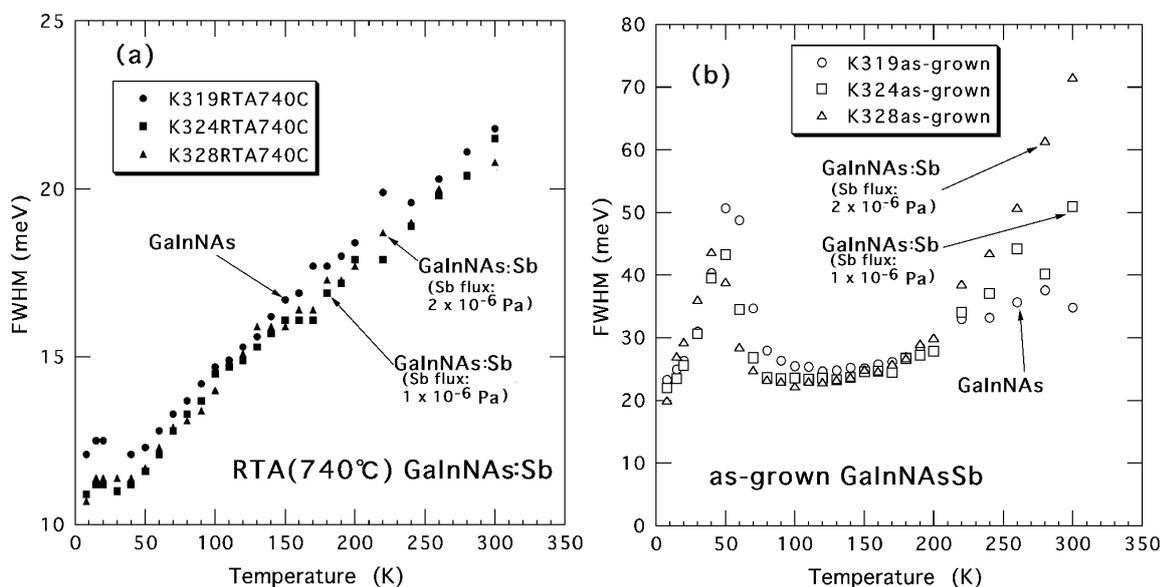


図 4-2-3-3 GaInNAs:Sb-SQW の P L ピークエネルギーの温度依存性



(a) 740°CのRTAを施した試料

(b) as-grown試料

図 4-2-3-4 GaInNAs:Sb-SQW の P L の半値幅の温度依存性

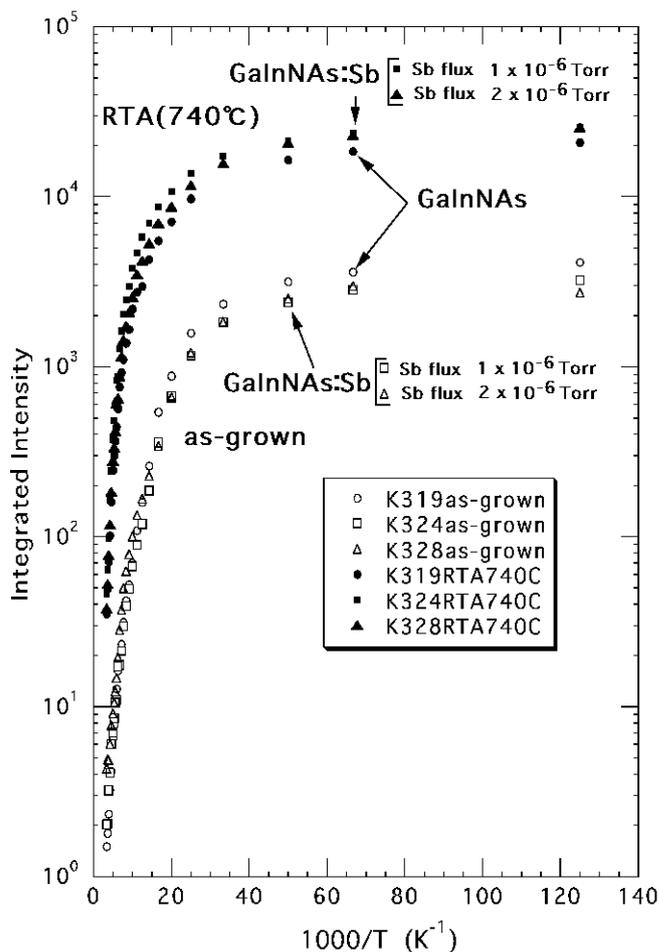


図 4-2-3-5 GaInNAs:Sb-SQW の PL の発光強度の温度依存性
(積分強度を温度の逆数に対してプロットしている。)

(2) GaInNAs:Sb/GaAs 単一量子井戸のアニール条件と結晶性の関係の評価

GaInNAs:Sb/GaAs 単一量子井戸試料 (Sbセル温度 230°C、Sbフラックス 2×10^{-6} Pa) に関して PL 特性のウェハー面内分布と熱処理 (RTA、30 秒) 温度との関係の評価を行った。RTA 温度は 720°C および 740°C の試料に対して 2 インチウェハーの中央部および端部に関して PL の温度依存性の測定を行った。発光強度 (積分強度)、半値幅およびの PL ピークエネルギー測定温度依存性をそれぞれ図 4-2-3-6、図 4-2-3-7 および図 4-2-3-8 に示す。

図 4-2-3-6 示すように、熱処理温度が 720°C 試料では、ウェハー中央部より端部の発光強度が大きい。しかし、740°C の試料では逆に、中央部より端部の発光強度は小さくなる。また、熱処理温度が 720°C の試料の端部と 740°C の試料の中央部の発光強度がほぼ同等であった。発光強度が大きい試料ほど非発光再結合中心濃度が小さいと考え、これを結晶性の測度として以下の結果を得た。

(1) PL強度でも評価結果は、熱処理においてウェハーの端部のRTA温度は中央部と比較して約20°C温度が高いことを良く再現している。

(2) 740°Cの熱処理を施した試料の端部で発光強度が大きく低下することから、熱処理温度が740°Cを越えるとオーバーアニールの可能性はある。

(3) ウェハー内の温度分布が小さい熱処理装置を用いた場合、熱処理温度は740°Cが最適である。

図4-2-3-7よりまた熱処理温度740°Cのウェハー中央部の試料が、4種類の試料PLの中で半値幅が最小であることから、PL強度の評価結果同様、この試料の結晶性が最も良いことがわかった。それ以外の3試料のPL半値幅はほぼ同等の大きさであり顕著な違いは認められない。図4-2-3-6はPLピークエネルギーを示しているが、熱処理温度が720°Cのウェハー中央部の試料が他の3試料に比べPLピークエネルギーがわずかに(約2meV)低く、他の3試料では殆ど違いが観られない。このことは熱処理温度が720°Cウェハー中央では、PL波長に関する限りわずかに干処理温度が不足しているものと思われる。

以上より、熱処理温度は740°Cが最適であると考えられるが現状ウェハー面内の約20°Cの温度分布はPLで観る限り大きいと思われる。熱処理温度を740°Cとするならば、ウェハー一端でオーバーアニールによる発光強度の低下を防ぐために温度分布は10°C以内が望ましい。現状のように熱処理温度の分布を20°Cまで許すならば、熱処理温度を720°Cが最適と考えられる。

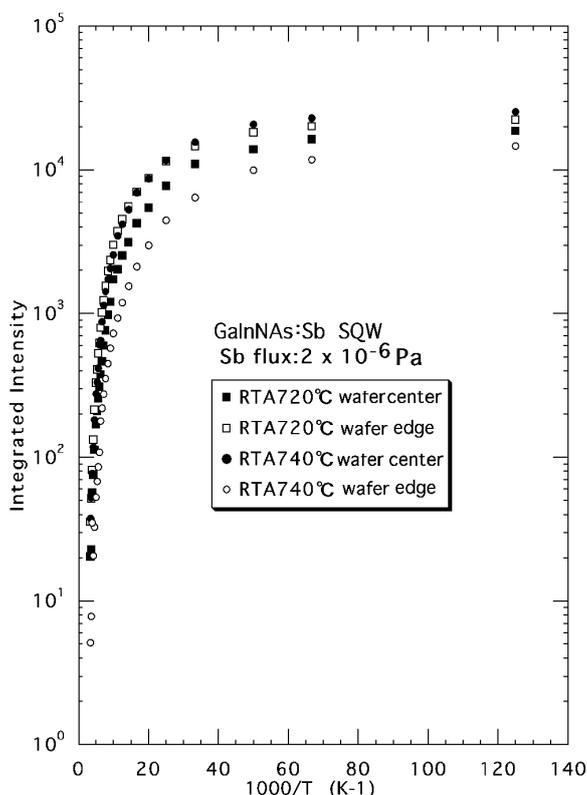


図4-2-3-6 GaInNAs:Sb-SQWのPLの発光強度の温度依存性。アニール温度(720、740°C)とウェハーの中央と端におけるデータを示している。(積分強度を温度の逆数に対してプロットしている。)

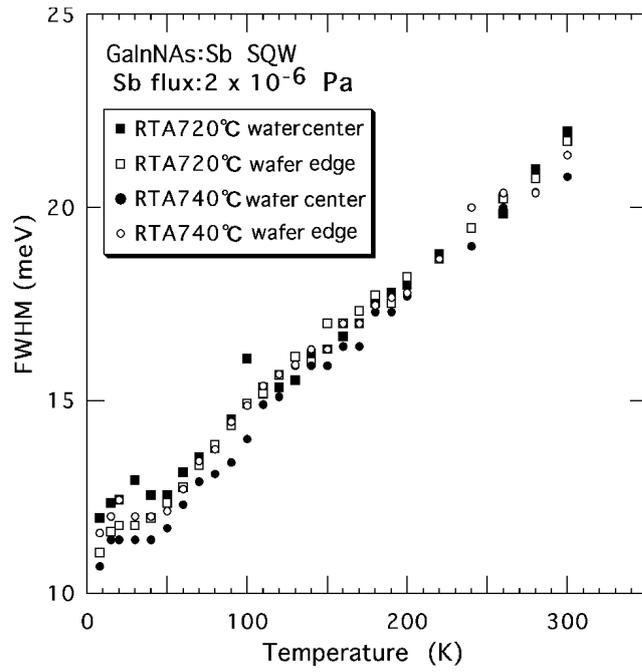


図 4-2-3-7 GaInNAs:Sb-SQW の P L の半値幅の温度依存性。

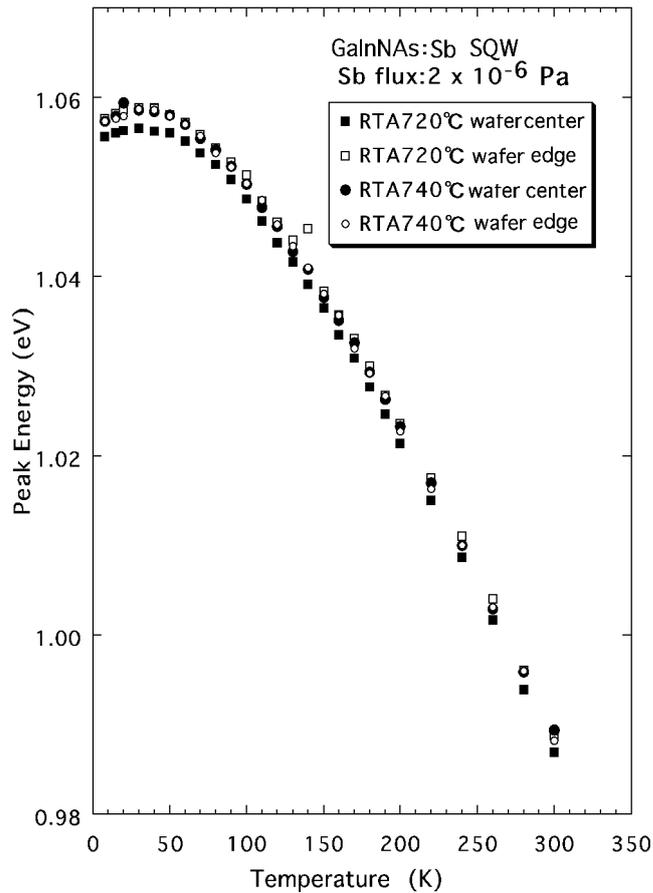


図 4-2-3-8 GaInNAs:Sb-SQW の P L ピークエネルギーの温度依存性

(3) GaInNAs/GaAsおよびGaNA s/GaAsのラマン散乱分光による局所原子構造の評価

GaInNAsでは、アニールにより結晶性が向上し、発光特性が改善される一方で、バンドギャップが約50meV増加する。これは長波長化の観点から問題であるが、理由としてGaInNAsの混晶局所原子構造の変化が考えられている。しかし局所構造は殆どが解明されておらず、これは基礎物性のみならず将来のデバイスの安定動作の観点から大きな課題である。

ラマン散乱は格子振動を反映し、局所的原子配列に関する評価が可能である。昨年度は、N原子の局在振動モードに注目して、原子配置の評価を行った。結果として、as-grownでランダムに分布していたInが、熱処理により、In-N最近接ペアを形成することを明らかにした。In-Nペア形成とバンドギャップの関係はさらに検討中であり、種々のInおよびN組成の試料に関して測定および、理論的解析を行っているがその結果は来年度報告する。

本年度は特に格子モード（通常GaAsモードのLOおよびTOフォノンと呼ばれている）に注目し、GaInNAs系ではラマン散乱において通常ジंकブレンド系の混晶半導体では観られない現象に関して評価を行った。

GaInNAs/(100)GaAsでは、ジंकブレンド構造でラマン選択則で禁止であるTOフォノンが非常に強く観測されることが特徴である。一般的な混晶半導体において、混晶における原子配列の不規則性により結晶の並進対称性が失われるために本来禁止であるTOフォノンがしばしば観測される(DATO: Disorder-Activated Transverse Optical Phonon)。ところが本研究において、GaInNAsにおける禁止TOフォノンの強度が非常に大きくしかも性質が他の混晶のDATOと大きく異なることが見いだされた。本年度は主に禁止TOフォノンの詳細に調べることにより、NおよびInの混晶化によるラマンスペクトルの変化を通して、混晶の原子配置の検討を行った。

測定には、GaAs(100)基板上に固体ソースMBEで成長したGaInNAsを用いた。ラマンの励起光としてAr⁺レーザの514.5nm線を用い、散乱光を焦点距離85cmのモノクロメータで分光し、冷却型CCDマルチチャンネル光検出器で検出した。レーリ-散乱光の除去にホログラフィック・ノッチフィルターを使用した。

図4-2-3-9に種々の偏光で測定したGa_{0.93}In_{0.07}N_{0.025}As_{0.975}のラマンスペクトルを示す。図中のx(z_y)-x, z(z_z)-z, x(y'x')-x, x(y'y')-xは後方散乱位置（括弧の外側の記号は入射光および散乱光の伝搬方向）での偏光（括弧の内側の記号は入射光および散乱光の偏光）を示す。なお、x'およびy'はそれぞれ[110]および[1-10]偏光を示す。図中の記号(T₂, A₁, E)はラマン選択則により許容となる格子振動の対称性の規約表現であり、ジंकブレンド格子（点群T_d）では、ラマン活性な光学フォノンはT₂対称性を持つ。選択則では、ジंकブレンド格子の(100)面での後方散乱測定ではLOフォノンが許容、TOフォノンが禁止である。また偏光選択則により、LOフォノンはx(z_y)-xおよびx(y'y')-xの偏光では許容で、z(z_z)-zおよびx(y'x')-xの偏光で禁止である。

GaInNAsでは289cm⁻¹にLOピークが、265cm⁻¹付近に禁止TOによる弱

いピークが観られる (図 4-2-3-9)。LOフォノンを選択則により $x(z\bar{y})-x$ および $x(y'\bar{y}')-x$ 偏光で強く観測されるが、 $z(z\bar{z})-z$ および $x(y'\bar{x}')-x$ 偏光で禁止されているため非常に弱く、ジंकブレンドのラマン選択則が満たされている。しかし、TOフォノンは偏光にかかわらず禁止であるが、全ての偏光配置で観測され、許容のLOフォノンの $1/10$ 以上の強度である。

定量的な考察のためには、偏光角の関数としてLOおよび禁止TOピーク強度を測定し、ラマン選択則からのずれを考察することが一般的である。しかし、測定系の偏光特性や偏光子の回転に対する光軸のずれは測定の信頼性を低下させる。本研究では、励起と受光の偏光を固定した上で、試料を回転させてラマン光強度の測定を行い、偏光子の回転による方法と等価な評価を行った。ここで用いた偏光配置と選択則の関係を図 4-2-3-10 に示す。入射光と散乱光の偏光が直交 (\perp) している場合 (図 4-2-3-10 の上の図)、 $[011]$ 軸と入射光の偏光が平行の場合Eモードが許容である (T_2 対称性を持つLOモードは禁止)。その位置から結晶を5度おきに回転させ、45度回転して $[001]$ 軸が入射光の偏光が平行になった場合 T_2 (LO) モードが許容である。この直交偏光配置では A_1 対称性を持つモードは禁止である。

入射光と散乱光の偏光が平行 ($//$) の場合 (図 4-2-3-10 の下の図)、 $[011]$ 軸と入射光の偏光が平行の場合 A_1 , E, T_2 モードが許容である (LOモードは許容)。同様に結晶45度回転させた角度で、 A_1 およびEモードが許容である (LOモードは禁止)。この平行偏光配置では A_1 モードが許容である。

図 4-2-3-11 に $\text{Ga}_{0.94}\text{In}_{0.06}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}$ のラマンスペクトルの試料回転角度依存性を、図 4-2-3-12 (a) にLOおよび禁止TOモードの強度の試料回転角度 θ 依存性を示す。LOモードは直交偏光 (\perp) では $\cos^2 2\theta$ 平行偏光 ($//$) では $\sin^2 2\theta$ に従って強度が変化することから、ラマン選択則を満たしている。禁止TOモード強度は平行偏光 ($//$) でLOモードの約20%の強度であり、直交偏光 (\perp) における1~7%と比較して明らかに強度が大きい。この結果より、禁止TOモードでは A_1 が T_2 に比べて大きな強度を持つことがわかる。また、図 4-2-3-12 (b) に同様に $\text{GaN}_{0.025}\text{As}_{0.975}$ の結果を示す。禁止TOモードの強度は15~18%と大きな値を持つ。したがって、 GaInNAs でみられる禁止TOモードは主にNの混晶化によるものであり、In混晶化の効果は小さいものと考えられる。

N組成を $y = 0.012$ として、In組成を $x = 0, 0.018, 0.034, 0.045$ と変化させ、同様の測定を行った。図 4-2-3-13 に $\text{Ga}_{0.966}\text{In}_{0.034}\text{N}_{0.012}\text{As}_{0.988}$ の結果を示す。禁止TOモードの強度は3~4%と大きく低下する。従って、N組成の増加に伴い禁止TOモードの強度は急激に増加する。これは、ジंकブレンド格子からのずれがN混晶化により急激に大きくなることを示している。

以上より禁止TOモードに含まれる振動の対称性 (A_1 , E, T_2) の成分を求め、その結果を図 4-2-3-14 に示す。横軸はIn混晶組成 x であり、窒素組成 $y = 0.012$ および $y = 0.025$ をパラメータとして示している。大きさを比較すれば、 $A_1 > T_2 > E$ である。また、高N濃度の $y = 0.025$ ではIn組成増加に伴い A_1 および T_2 強度が増加する。低N濃度の $y = 0.012$ ではIn濃度が0.034で A_1 および T_2 強度は極小値をとる傾向がある。 $x = 0.034$ は格子整合条件を満たし、この組成で極小値をとることは興味深い。

他の混晶系、 $\text{GaAs}_{0.4}\text{Sb}_{0.6}$ 、 $\text{InAs}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ 、 $\text{Al}_{0.12}\text{Ga}_{0.88}\text{As}$ 、 $\text{Ga}_{0.969}\text{In}_{0.031}\text{As}$ でも禁止TOフォノンが観測されているが、これらは混晶の不規則性(disorder)により活性化されたDATO(Disorder Activated Transverse Optical)モードであり、その対称性は T_2 が優勢である。しかし、 GaInNAs 混晶で見られる禁止TOモードは A_1 対称性をもつことから、その主たる起源を混晶の不規則性によるDATOと考えることができない。 A_1 対称性は、ジंकブレンドの格子振動の中で最も対称性の高い振動モードであることから、これには窒素原子の回りに発生した強い歪み場と深い関係があるものと推測される。これは他の混晶系では全く報告が無い結果であり、希薄窒化物半導体固有の特徴であると考えられる。

今後、実験結果の解析および、成長・熱処理条件依存性の研究により原子間結合および局所原子配置の評価に利用できる可能性が高い。

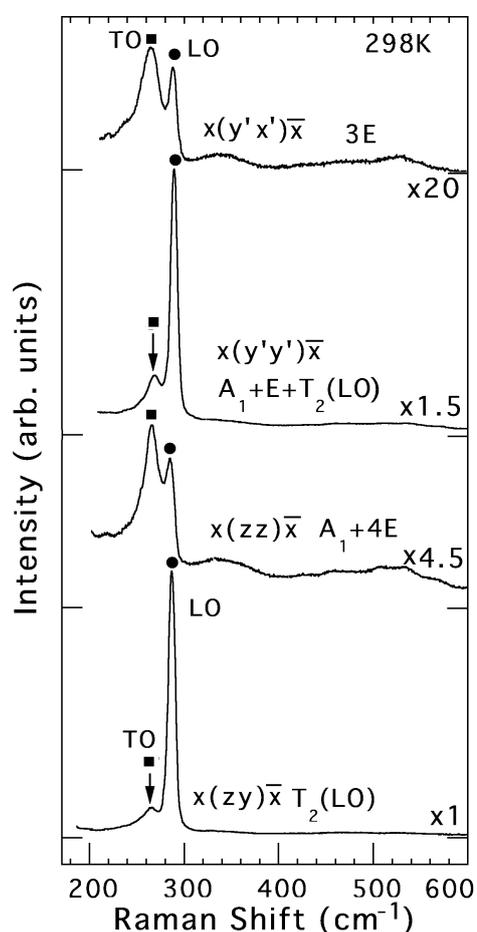


図 4-2-3-9 種々の偏光で測定した $\text{Ga}_{0.94}\text{In}_{0.06}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}$ のラマンスペクトル

Back-scattering $x(\pi_i \pi_s)\bar{x}$ on (100) face

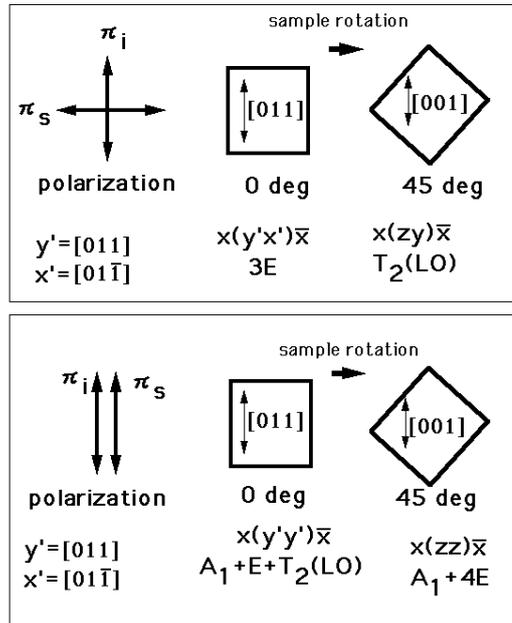


図 4-2-3-10 種々の入射光偏光 π_i 散乱光偏光 π_s における後方散乱配置 $x(\pi_i, \pi_s)\bar{x}$ において観測される格子振動のモードとその対称性

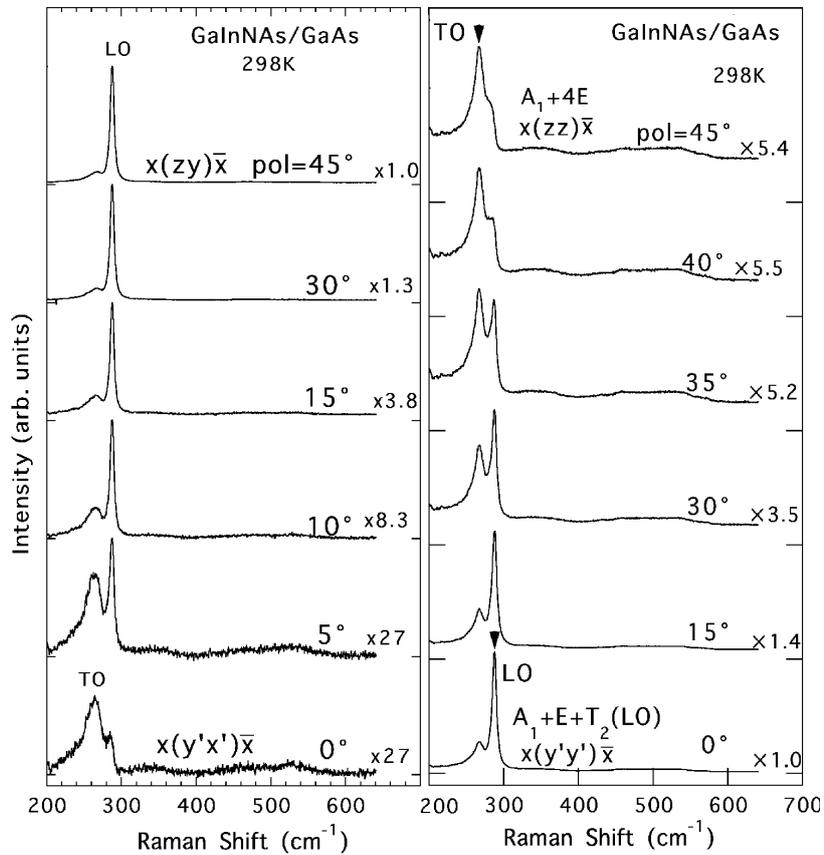
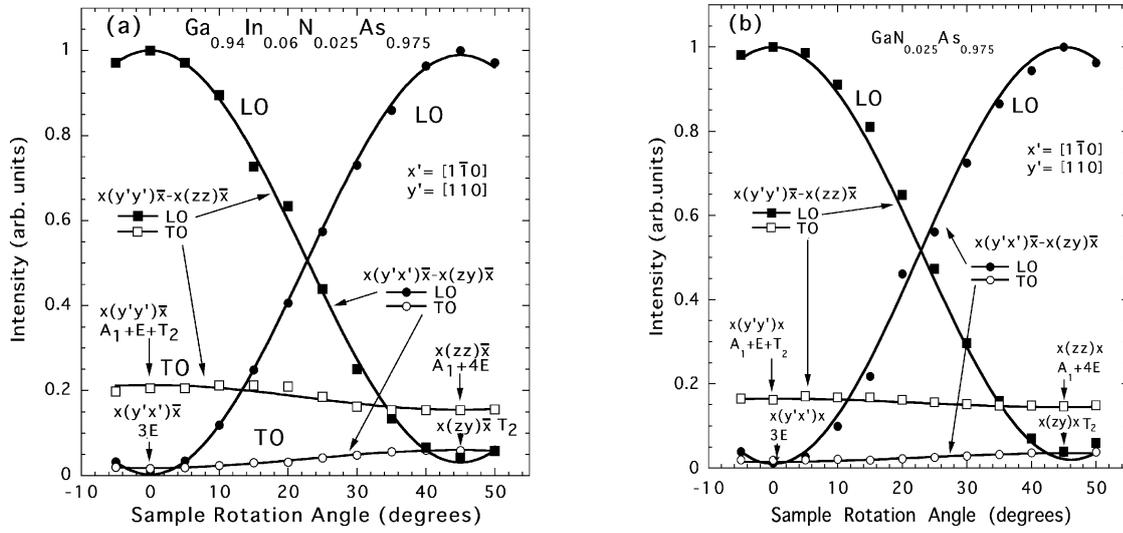


図 4-2-3-11 試料を 5 度毎に回転させ測定した $Ga_{0.94}In_{0.06}N_{0.025}As_{0.975}$ のラマンスペクトル。



(a) $\text{Ga}_{0.94}\text{In}_{0.06}\text{N}_{0.025}\text{As}_{0.975}$

(b) $\text{GaN}_{0.025}\text{As}_{0.975}$

図 4-2-3-12 LOフォノンおよび禁止TOフォノン強度の試料回転角依存性。

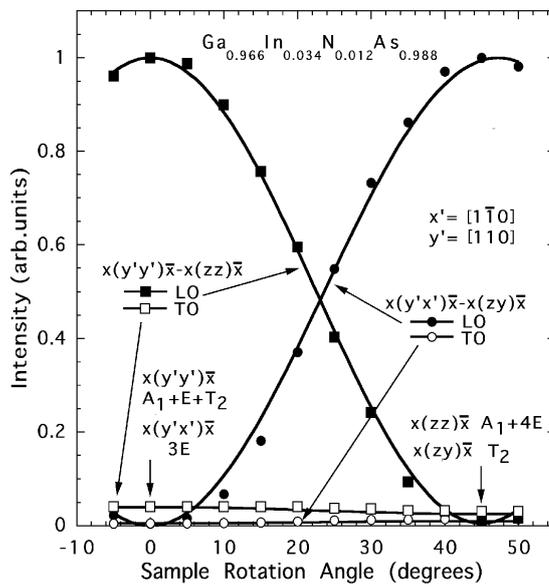


図 4-2-3-13 $\text{Ga}_{0.966}\text{In}_{0.034}\text{N}_{0.012}\text{As}_{0.988}$ におけるLOフォノンおよび禁止TOフォノン強度の試料回転角依存性。

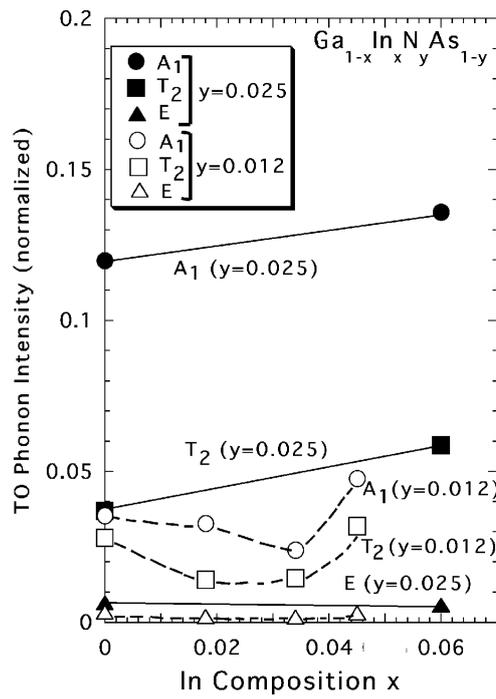


図 4-2-3-14 禁止TOフォノンにおける振動の対称性 (T₂, A₁, E) の成分の大きさを In 組成 x に対して示している (N組成は y=0.012 および y=0.025 である)。

4-3 総括

平成16年度はGaInNAs量子井戸層を活性層とする直接変調レーザの超高速変調の実現に向けて検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) AlフリーMBEで成長したGaInNAs-SQW-LDのしきい電流密度は従来の約半分の700A/cm²であった。これは不純物抑制の効果に起因すると考えられる。
- (2) GaInNAsのレーザとしての結晶性を容易に判断する手法としてEL測定法を適用し、しきい電流密度とよく一致することを確認した。
- (3) AlフリーMBEで成長したGaInNAs-SQWリッジ型レーザのしきい電流は世界トップレベルと同等の低しきい電流である9.2mAであった。しかし、上記のSQWの緩和振動周波数特性から高速性に関してGaInNAs結晶は課題が存在することを明らかにした。
- (4) 半導体レーザの40Gbps直接変調動作に関してレート方程式を用いてシミュレーションを行い、約2.7kmの短距離伝送が適用できる可能性を見出した。
- (5) GaInPクラッド層を含むGaInNAsレーザ構造のドライエッチ基礎検討を行い、垂直な断面形状が得られた。
- (6) GaInPをクラッド層として使用することに関して良好なV族元素切り替えができていることGaAs/GaInP量子井戸層のPL測定から明らかにした。
- (7) 上記(4)に関してクラッド層を含むGaInNAs活性層の成長の場合最適な成長温度からずれおり、最適温度にすることによりより平坦な活性層表面が得られることがわかった。
- (8) 最適な温度で成長したレーザ構造のGaInNAs活性層のEL測定から従来の約倍の発光特性が得られ、より低いしきい電流が得られる見通しを得た。

最終年度にあたる平成17年度は上記の問題点对策を実施し、更なるGaInNAs結晶の高品質化を行い、1.3 μ m帯での40Gbps動作を実現する。

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.

5 参考資料、参考文献

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「Polarized Raman Spectra and N-Related Local Vibrational Mode in GaNAs and GaInNAs Epitaxial Layers Grown on GaAs」を寄稿し、掲載可となった。(vol. 44 (2005))
- ② 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」を寄稿し、掲載可となった。(招待論文)
- ③ 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」を寄稿し、掲載可となった。

国際会議発表（査読有）

- ① 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”を発表。
- ② 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”を発表。
- ③ 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」を発表。
- ④ 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」を発表。
- ⑤ 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」を発表。

一般口頭発表

- ① 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。
- ② 2005年春季第52回応用物理学会学術講演会に(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。
- ③ 2005年春季第52回応用物理学会学術講演会に(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。