

## GaAs系半導体発光素子の高機能化に関する研究

大郷, 毅

<https://doi.org/10.15017/1398409>

---

出版情報：九州大学, 2013, 博士（工学）, 課程博士  
バージョン：  
権利関係：全文ファイル公表済

博士（工学）学位論文

**GaAs** 系半導体発光素子の  
高機能化に関する研究

九州大学大学院総合理工学府  
量子プロセス理工学専攻

大郷 毅

指導教員氏名：浜本 貴一 教授

提出日：2013年 7月 8日



## 概要

本研究の目的は半導体発光素子の更なる応用分野の拡大を目指して、新たな機能を付加した GaAs 系半導体発光素子を提案し、同時に、その素子が実用化に耐えうる寿命性能をもつことを実証することにある。具体的には (A) 光通信用光源として要求される高速変調特性と 10 万時間レベルの寿命性能を 0.66 $\mu\text{m}$  赤色半導体レーザにて実現すること、さらに (B) 1.0 $\mu\text{m}$  帯半導体発光素子において「光スペクトル幅の広帯域化」と「高出力化」を両立させ、かつ寿命性能 3000 時間以上を実現すること、の 2 テーマに取り組んだ。

### (A) 赤色半導体レーザの長寿命化と高速変調特性の実現

赤色半導体レーザには GaAs 系材料において最も短波長材料となる GaInP/AlGaInP が用いられている。材料の問題から長寿命化が困難とされていたが、本研究により目標値を大幅に超える 60 $^{\circ}\text{C}$ 、5mW 駆動時における推定平均寿命 80 万時間、そして故障率 1%においても推定寿命 20 万時間となる寿命性能を達成した。この成果は寿命 10 万時間レベルでは緩慢劣化が主な劣化モードであり、端面破壊による衝撃劣化が素子故障の要因ではないこと、そして GaInP/AlGaInP 結晶品質の改善による駆動電流密度の低減が長寿命化に効果的であることを明らかにしたことが大きく寄与している。また半導体レーザ内部の寄生容量を電氣的に分離した素子構造を採用し、1.25Gbps の変調特性を得ることに成功した。この結果は光通信用光源に必要な性能を赤色半導体レーザで実現できることを示したものである。

### (B) 1.0 $\mu\text{m}$ 帯広帯域半導体発光素子の高出力化と長寿命化

1.0 $\mu\text{m}$  帯半導体発光素子には GaAs 系材料において最も長波長材料となる InGaAs を用いている。半導体発光素子の原理上、発光スペクトル幅の広帯域化と高出力化はトレードオフの関係にあるが、異なる 2 つの量子井戸層を備えた素子構造を採用することで、従来構造と比較して波長帯域で 1.4 倍、光出力で 1.65 倍の性能を得ることができた。この成果は 2 つの量子井戸層のバンドギャップ差に最適設計値が存在すること、また光閉じ込め率が、各量子井戸層に注入されるキャリア量に影響を与えていることを明らかにしたことが大きく寄与している。寿命特性では、量子井戸層における光パワー密度を低減させることにより寿命性能を改善できることを明らかにし、25 $^{\circ}\text{C}$ 、30mW 駆動において 4500 時間以上の安定動作を実現できた。

本研究で実現した素子性能は特定の製品仕様に適合させたものであるが、この研究を通して得られた素子構造設計技術、結晶成長技術、劣化モード解析技術などの知見は特定の応用分野に限定されることなく、今後の GaAs 系半導体発光素子の発展に寄与するものと考えている。



## 目次

第1章 緒言	7
1.1 本研究の目的と意義	7
1.2 半導体レーザの機能とその発展	8
1.3 半導体発光素子の更なる発展にむけて	11
1.4 本研究の位置づけと論文構成	13
参考文献	16
第2章 半導体発光素子の動作原理と寿命性能	19
2.1 はじめに	19
2.2 半導体発光素子の動作原理	19
2.2.1 半導体発光素子の発光メカニズム	19
2.2.2 半導体レーザの基本構造	21
2.2.3 半導体レーザの動作原理	24
2.2.4 半導体レーザの変調特性	25
2.3 半導体発光素子の寿命性能	26
2.4 半導体発光素子の結晶成長技術	28
参考文献	32
第3章 赤色半導体レーザの長寿命化と高速変調特性の改善	35
3.1 はじめに	35
3.2 本章の目的	37
3.3 従来技術における赤色半導体レーザ	37
3.4 赤色半導体レーザの素子構造と作製方法	38
3.5 赤色半導体レーザの劣化モード解析	46
3.6 AlGaInP 結晶の高品位化による寿命特性の改善	49
3.7 GaInP 結晶の高品位化による寿命特性の改善	54
3.8 高速変調特性の改善	59
3.9 まとめ	61
参考文献	62
第4章 1.0 $\mu\text{m}$ 帯半導体発光素子の「広帯域化」と「高出力化」	67
4.1 はじめに	67
4.2 本章の目的	68
4.3 従来技術における広帯域半導体素子と 1.0 $\mu\text{m}$ 帯発光素子	68
4.4 広帯域半導体発光素子の素子構造と作製方法	74

4.5	発光領域の多重化による広帯域化と高出力化の両立	80
4.6	光閉じ込め率の効果	83
4.7	素子性能	85
4.8	まとめ	87
	参考文献	88
第5章	1.0 $\mu\text{m}$ 帯半導体発光素子の劣化モード解析と長寿命化	93
5.1	はじめに	93
5.2	本章の目的	94
5.3	従来技術における InGaAs 発光素子の寿命性能	94
5.4	1.0 $\mu\text{m}$ 帯半導体発光素子の素子構造と作製方法	97
5.5	1.0 $\mu\text{m}$ 帯 InGaAs 量子井戸レーザの長寿命化	99
5.6	1.0 $\mu\text{m}$ 帯 InGaAs スーパールミネッセントダイオードの長寿命化	104
5.7	まとめ	109
	参考文献	110
第6章	結言	114
	研究業績リスト	117
	謝辞	123

# 第 1 章 緒言

## 1.1 本研究の目的と意義

1970年代の初頭に AlGaAs/GaAs ダブルヘテロ半導体レーザー<sup>1)</sup>が発明されて以来、III-V族、およびII-VI族化合物半導体を用いた様々な半導体発光素子が開発されてきた。これらの半導体発光素子は光ファイバ通信システム、光記録メディアシステム、光プリンタ、LED 照明などの光源として広く用いられ、今日の情報通信社会やマルチメディア社会を支える技術として今やなくてはならないものとなった。

しかしこれまで半導体発光素子の開発を牽引してきた光ファイバ通信システム産業、および光記録メディアシステム産業が成熟しつつある状況のなかで、半導体発光素子の技術革新に対するニーズが弱まってきている。

その一方で光の多様な特性を活かした新たな技術が開発され次世代産業として期待されている。その分野は医療分野（診断、治療）、農業、生産技術（レーザー加工）、殺菌技術、省エネルギー照明など多岐にわたる。今後、半導体発光素子はそのような新しい光技術産業を支える光源として活用されるべく、更なる高機能化に対する要求が高まっていくと思われる。

高機能化を半導体発光素子の側から考えると、図 1-1-1 に示すように「発光波長」、「寿命性能」、「(その他の) 機能」の3つの性能軸の拡大ととらえることができる。そしてこれらの性能軸をバランスよく伸ばしていくことが、半導体発光素子の応用範囲を広げていくうえで非常に重要である。この考えのもと、本研究は「新たな機能を付加した GaAs 系半導体発光素子」を提案し、かつその素子が「実用化に耐える寿命性能を持つ」ことを実証する、ことを目的とした。

具体的には2つの検討を行った。1つ目は、GaAs 系材料として「最も短波長」である GaInP/AlGaInP 赤色半導体レーザーに「長寿命性能」、「高速変調特性」を付加し、これまで InGaAsP/InP 赤外半導体レーザーでしか実現しえなかった光通信システ



ム用光源としての性能を得る試みである。そして2つ目は GaAs 系材料として「最も長波長」である InGaAs 半導体発光素子に「高出力かつ広帯域な発光特性」と「長寿命性能」を付加することで医療診断用光センシング用光源としての性能を得る試みである。

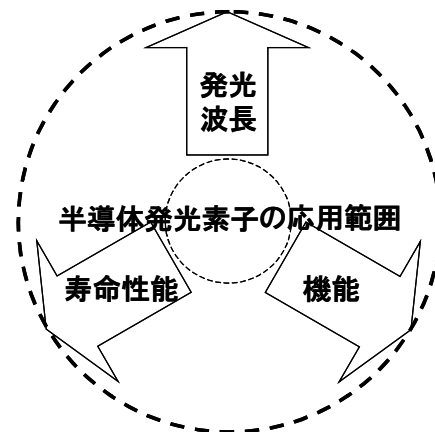


図 1-1-1 半導体発光素子の性能軸と応用範囲との関係

## 1.2 半導体レーザーの機能とその発展

この節では半導体発光素子の「発光波長」、「寿命性能」、「(その他の) 機能」という3つの性能軸が、応用範囲の拡大にどう寄与したのかを半導体レーザーの開発史とともに振りかえる。

最初の半導体レーザー理論は1953年にフォン・ノイマンによって着想されたと言われている<sup>2)</sup>。しかしノイマンはこれを公表しなかったため、この着想が直接技術開発に結びつくことはなかった。公表された半導体レーザーの原型は、1957年の西澤潤一による半導体レーザーの特許<sup>3)</sup>である。その後、77Kでのパルス発振ではあるが1962年にレーザー発振が複数の研究機関にて確認<sup>4,7)</sup>された。これ以降、室温連続発振の達成が重要な研究課題となったが、室温駆動ではすぐに過熱してしまいレーザーが劣化してしまっていた。これを解決したのが、ハーバート・クレマーによるダブルヘテロ構造の提案<sup>8)</sup>である。これは2つの異なる材料の間に薄い活性層を挟

むサンドイッチ状構造にするもので、レーザ発振に寄与する電子が薄い活性層に閉じ込められるため必要な電流がわずかですみ、かつ熱の発生が抑えられるのが特徴である。この提案は理論的には重要であったが、実際に室温連続発振が達成されるには時間がかかった。室温連続発振は 1970 年にソ連のジョレス・イヴァノヴィッチ・アルフェーロフ<sup>9)</sup>によって、またベル研究所の林巖雄とモートン・パニッシュ<sup>1)</sup>によって達成された。これらは GaAs を材料にしたもので、波長は 0.8 $\mu\text{m}$  であった。このように半導体レーザは「寿命性能」の追求から開発史が始まったと言える。

半導体発光素子の開発黎明期から、AlGaAs/GaAs 半導体レーザおよび AlGaAs/GaAs 発光ダイオードが光ファイバ通信システム用光源として精力的に開発されてきた。その数年後、光ファイバの飛躍的な改良によりファイバ伝送損失、光分散が最小となる波長領域が 1.0~1.7 $\mu\text{m}$  へと移行すると、半導体発光素子の開発対象も InP 基板に格子整合した InGaAsP/InP 材料をもちいたダブルヘテロ半導体レーザ、発光ダイオードへと移っていった<sup>10)</sup>。この InGaAsP/InP 材料を用いた半導体発光素子は、寿命性能の点で AlGaAs/GaAs 材料を用いた半導体発光素子と比べてはるかに優れていることが明らかになり、長距離、大容量かつ信頼性の高い光ファイバ通信システムの実用化に大きく寄与した。

その一方で、波長 0.8 $\mu\text{m}$  以下の短波長半導体発光素子は光記録メディアシステム、光プリンタなどの光源として脚光を浴び、AlGaAs/GaAs ダブルヘテロレーザなどが開発された。特に光記録では、記録・再生が可能な容量が光源の波長の 2 乗に反比例するため、半導体レーザの「発光波長」を短くする技術検討が行われた<sup>11-13)</sup>。また「発光波長」は光記録分野以外においても、様々な産業のニーズに応える形でその発振波長域を広げる開発が行われ、現在では図 1-2-1 に示すように紫外域~遠赤外域の広い範囲にわたってレーザ発振が可能となっている<sup>14-19)</sup>。

このように半導体レーザは「寿命性能」の改良からその歴史が始まり、用途に合

わけて「発光波長」範囲を広げてきたといえる。また「(その他の) 機能」についても、光ファイバ通信システム用光源では「発振モードの安定化技術」、「光ファイバへの低損失結合」、「高速変調」などが、光記録メディアシステムでは「高出力化」、「低ノイズ化」、「低非点隔差」などの数多くの技術が開発された。これらがシステムの実用化に果たした貢献は大きい。

このように半導体発光素子は、「発光波長」、「寿命性能」、「(その他の) 機能」の3つの性能軸の拡大と共に応用範囲を拡大してきたと言える。

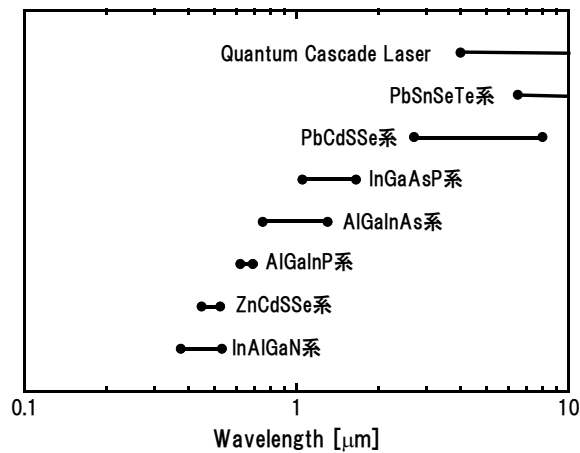


図 1-2-1 半導体レーザーの発振波長帯域

表 1-2-1 半導体レーザーの開発史(代表的なもの)

1953	フォン・ノイマンが半導体レーザーの発振理論を着想
1957	東北大学の渡辺寧、西澤潤一が半導体レーザーのアイデアを特許化(特公昭35-13787)
1962	GE・IBM・MIT・UIUCがホモ接合構造による半導体レーザーの低温パルス発振に成功 ニック・ホロニアックが半導体レーザーによる可視光の発振に成功
1963	ハーバート・クレマーがヘテロ接合によるレーザーの低閾値化の提案
1970	ベル研究所の林厳雄、M. B. Panish、ソ連アカデミーのジョレス・アルフェーロフらによって、ほぼ同時期にAlGaAs/GaAsダブルヘテロ接合構造にて室温連続発振に成功 コーニング社が通信用の光ファイバーを開発
1975	分布帰還型(DBF)レーザーおよび分布反射型(DBR)レーザーが提案される
1977	伊賀健一が"VCSEL"を提案し、同年に最初のデバイスを開発
1982	荒川泰彦、榊裕之らが量子ドットレーザーを提案 シャープがCD用半導体レーザーを上市
1991	3M社にてZnSe系レーザーで低温発振
1994	ベル研究所にてカスケードレーザーが発明
1995	日亜化学工業の中村修二がInGaIn/GaN青色半導体レーザーのパルス発振に成功
2000	「半導体ヘテロ接合の提案と実証」研究によってハーバート・クレマー、ジョレス・アルフェーロフにノーベル物理学賞を授与
2012	緑色半導体レーザー(530nm)の発振に成功

### 1.3 半導体発光素子の更なる発展にむけて

1.1 節で述べたように半導体レーザは光ファイバ通信システムと光記録メディアシステムへの応用によって、その技術開発が牽引されてきたと言える。図 1-3-1<sup>20)</sup>は日本における 1971 年から 1996 年までに依頼された半導体レーザに関する特許出願件数を用途別に分類したものである。この図からも半導体レーザにおける技術開発の牽引役が光通信と光記録分野であったことが分かる。逆に言うと、これまでの半導体レーザは、これらの分野に特化した機能を持った半導体発光素子だったとも言える。

その一方で、半導体レーザの応用分野という広い観点から分類すると、図 1-3-2<sup>20)</sup>に示すように光通信と光記録分野以外にも非常に多くの産業分野が存在している。これらの中には現時点での市場規模は小さいものの、今後の発展が期待される応用分野が数多く含まれている。これらを産業として根付かせていくためには、従来の半導体レーザがもつ機能だけでは不十分であり、新たな機能付加が欠かせない。

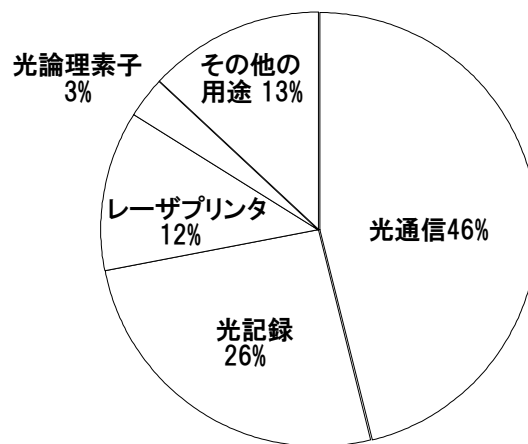


図 1-3-1 半導体レーザの用途に関する出願構成比 (1971～1996 年) <sup>20)</sup>

前述したように半導体発光素子の機能は「発光波長」、「信頼性」、「(その他の)機能」の 3 つに大別することができる。そしてこれら 3 つの性能をバランスよく満

たすことで応用範囲を拡大してきたといえる。例えば光ファイバ通信システム用光源は「発光波長（1.3～1.55μm）」、「寿命性能（通信用としての信頼性）」を実現したうえで「高速変調特性」<sup>21)</sup>の機能を高め、光通信システム全体としての性能を向上させる役割を果たした。また光記録メディアシステムへの応用では「発光波長（短波長化）」、「寿命性能（民生品としての信頼性）」をベースに「高出力特性」の機能を高め、大容量・高速記録を実現してきた<sup>22,23)</sup>。

このように「発振波長」はそれぞれの用途によって決まり、「寿命性能」は実用化における必須の条件である。そして「(その他の)機能」を拡大させていくことが、半導体発光素子の応用範囲を広げていく鍵だといえる。

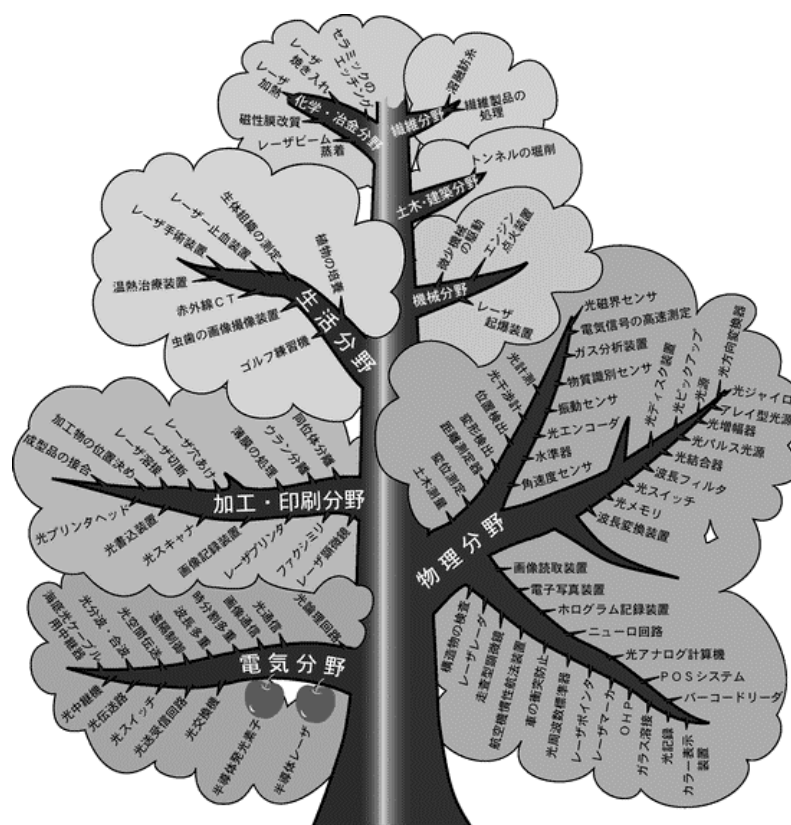


図 1-3-2 特許分類による半導体レーザーの応用分野<sup>20)</sup>

#### 1.4 本研究の位置づけと論文構成

本研究の目的は半導体発光素子の更なる応用範囲の拡大を目指し、「新たな機能」を付加した GaAs 系半導体発光素子を提案し、それが実用化に耐えうる「寿命性能」を持つことを実証することである。本論文は 1 章から 6 章までで構成されている。第 1 章を除く各章の概要と位置づけを以下に述べる。

第 2 章では、本論文の理解を助けるために半導体発光素子の動作原理と、その寿命性能について述べる。まず半導体発光素子の発光原理となる自然放出および誘導放出現象について説明する。また高速変調特性についても説明する。さらに半導体レーザの光出力特性を示す理論式から、高性能化には何が必要なのかを述べたのち、半導体発光素子の劣化モード、そして半導体発光素子の作製に不可欠な結晶成長技術について説明する。

第 3 章では赤色半導体レーザのプラスチック光ファイバー (POF) 通信用途を想定した長寿命化検討と高速変調化検討の結果を述べる。この研究は、図 1-4-1 に示すように、DVD システムの読み込み用レーザとして開発された  $0.66\mu\text{m}$  赤色半導体レーザの「寿命性能」を大幅に向上させ、また「(その他の) 機能」となる高速変調特性を付加することで、従来技術では実現できなかった POF 通信用赤色レーザの実用化に向けた試みと位置づけることができる。

第 4 章では  $1.0\mu\text{m}$  帯スーパーluminescentダイオードの「光スペクトルの広帯域化」と「高出力化」の両立に向けた技術検討結果について述べる。この 2 つは半導体発光素子の発光メカニズムによりトレードオフの関係にあるものである。これを打ち破るために、本研究では新たな素子構造を採用した。この章ではその素子構造の設計指針と、実際に作製した素子の特性について述べる。

第 5 章では第 4 章で提案した素子の長寿命化検討について述べる。ここでは作製した素子の劣化モードを解析し、それを抑制するための素子構造の設計提案を行っ

ている。また実際に作製した素子の寿命性能について述べる。

第4章、第5章での研究は、図1-4-2に示すように、従来、光通信におけるErドープファイバ増幅器の励起用光源として用いられてきた0.98 $\mu\text{m}$  InGaAs 赤外半導体レーザに「1.0 $\mu\text{m}$  帯への長波長化」、「光スペクトル幅の広帯域化」、「高出力スーパーluminescentダイオードとしての長寿命化」という特性を備えさせることで、医療用光センシング用光源としての可能性を追求したものと位置づけることができる。

最後に第6章で本論文の総括と今後の展開について述べる。

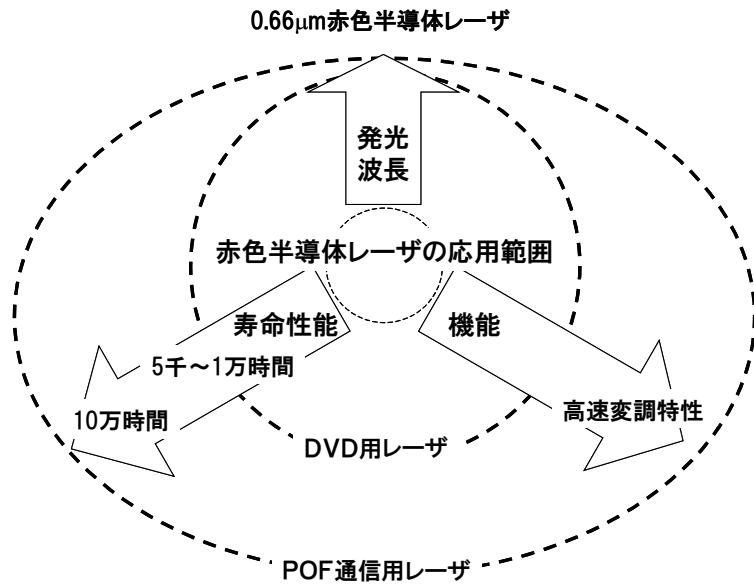


図 1-4-1 第 3 章：赤色半導体レーザー研究の位置づけ

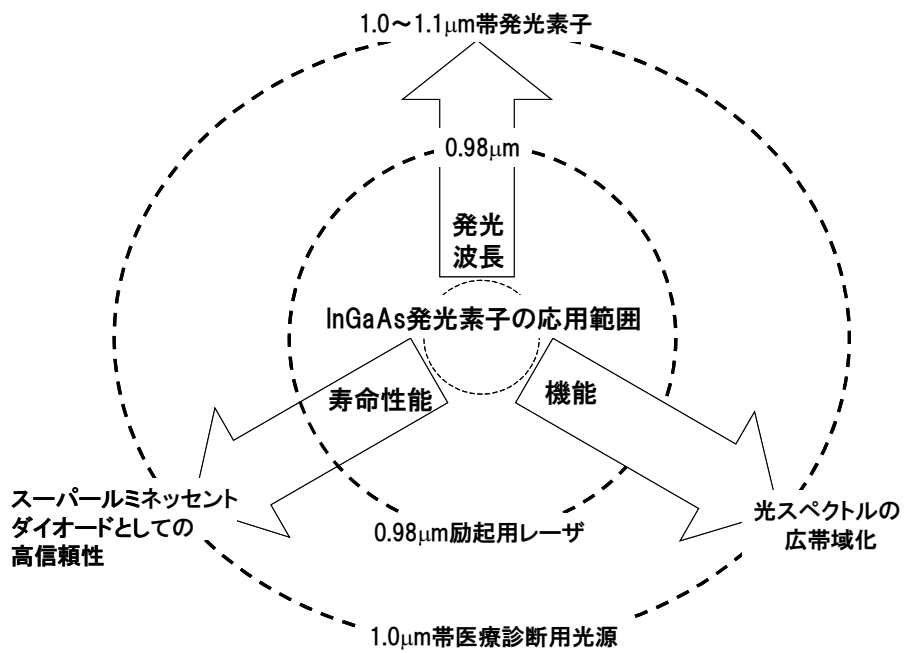


図 1-4-2 第 4、5 章：1.0μm 帯 InGaAs 半導体発光素子研究の位置づけ



## 第1章の参考文献

- 1) I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, "Junction lasers which operate continuously at room temperature", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.17, pp.109-111 (1970)
- 2) 渋谷寿, "光通信物語", オプトロニクス社, p.42 (2003)
- 3) 西澤潤一, "半導体メーザー", 特公昭 35-13787
- 4) N. Holonyak, S. F. Bevacqua, "Coherent (visible) light emission from Ga(As<sub>1-x</sub>P<sub>x</sub>) junctions", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.1, pp.82-83 (1962)
- 5) R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, "Coherent light emission from GaAs junctions", *Phys. Rev. Lett.*, Vol.9, pp.366-368 (1962)
- 6) M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. J. Dill, and G. J. Lasher, "Stimulated emission of radiation from GaAs p-n junctions", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.1, pp.62-64 (1962)
- 7) T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. McWhorter, and H. J. Zeigler, "Semiconductor maser of GaAs", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.1 pp.91-92 (1962)
- 8) H. Kroemer, "A proposed class of hetero-junction injection lasers", *Proc. IEEE*, Vol.51, pp. 1782-1783 (1963)
- 9) Zh. I. Alferov, V. M. Andreev, E. L. Portnoi and M. K. Trukan, "AlAs-GaAs heterojunction injection lasers with a low room-temperature threshold", *Sov. Phys. Semicond.*, Vol.3 pp.1107-1110 (1970)
- 10) J. J. Hsieh, "Room-temperature operation of GaInAsP/InP double-heterostructure diode lasers emitting at 1.1  $\mu\text{m}$ ", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.28, pp.283-285 (1976)
- 11) S. Yamamoto, H. Hayashi, S. Yano, T. Sakurai, and T. Hijikata "Visible GaAlAs V-channeled substrate inner stripe laser with stabilized mode using p-GaAs substrate", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.40, pp.372-374 (1982)
- 12) K. Kobayashi, S. Kawata, A. Gomyo, and T. Suzuki, "Room-temperature CW operation of

- AlGaInP double-heterostructure visible lasers”, *Electron. Lett.*, Vol.21, No.20, pp.931-932 (1985)
- 13) S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwasa, T. Yamada, T. Matsushita, H. Kiyoku and Y. Sugimoto, “InGaN-based multi-quantum-well-structure laser diodes”, *J. Appl. Phys.*, Vol.35, pp.L74-76 (1996)
- 14) C. J. Nuese, R. E. Enstrom and J. R. Appert, “1.7  $\mu\text{m}$  hetero-junction lasers and photodiodes of  $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}/\text{InP}$ ”, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.ED-24, p.1213 (1977)
- 15) R. E. Nahory and M. A. Pollack, “Low-threshold room-temperature double-heterostructure  $\text{GaAs}_{1-x}\text{Sb}_x/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_{1-x}\text{Sb}_x$  injection lasers at 1  $\mu\text{m}$  wavelength”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.27, pp.562-564 (1975)
- 16) M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki and Y. Yazawa, “GaInNAs : A novel material for long-wavelength-range laser diodes with excellent high-temperature performance”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.35-2B, pp.1273-1275 (1996)
- 17) J. Faist, F. Capasso, D. L. Sivco, A. L. Hutchinson, S. -N. G. Chu, A. Y. Cho, “Short wavelength ( $\lambda \sim 3.4 \mu\text{m}$ ) quantum cascade laser based on strained compensated InGaAs/AlInAs”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.72, pp.680-682 (1998)
- 18) Y. Horikoshi, M. Kawashima and H. Saito, “PbSnSeTe-PbSeTe lattice matched double-heterostructure lasers”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.21, pp.77-84 (1982)
- 19) H. Okuyama, T. Miyajima, Y. Morinaga, F. Hiei, M. Ozawa, K. Akimoto, “ZnSe/ZnMgSSe blue laser diode”, *Electron. Lett.*, Vol.28, pp.1798-1799 (1992)
- 20) 特許庁(1998年)「技術分野別特許マップ(電気 10 半導体レーザー)」  
<http://www.jpo.go.jp/shiryousonota/map/denki10/frame.htm>
- 21) 荒川泰彦, “半導体レーザーの変調特性”, *レーザー研究*, 第 15 卷, pp.4-11 (1987)

- 22) 坂本善史, “DVD 記録用赤色 LD の高出力化への取り組み”, 生産と技術. 第 62 卷,  
pp.18-22 (2010)
- 23) 竹岡忠士、高橋向星、松本晃広、厚主文弘、渡辺昌規、松井完益、林寛, “赤色高出  
力半導体レーザー”, シャープ技報, 第 84 号, pp.41-44 (2002)

## 第2章 半導体発光素子の動作原理と寿命性能

### 2.1 はじめに

この章では GaAs 系半導体発光素子の動作原理と寿命性能について説明する。ここで述べる動作原理および寿命性能が、第3章での赤色半導体レーザの高速変調特性、第4章での広帯域発光素子の発光メカニズム、第3、5章における半導体発光素子の寿命特性についての基礎理論となっている。

### 2.2 半導体発光素子の動作原理

#### 2.2.1 半導体発光素子の発光メカニズム

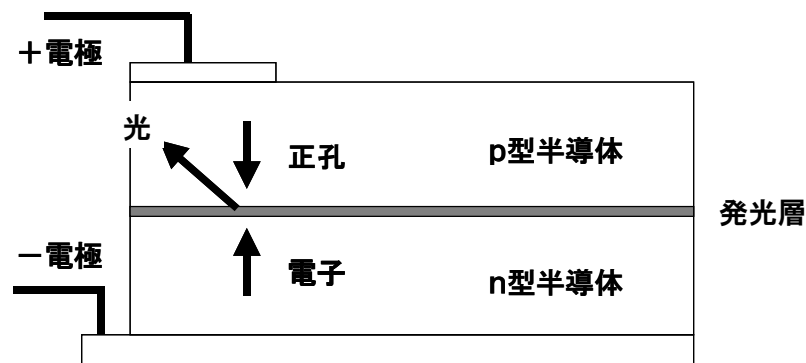


図 2-2-1 半導体発光素子における発光メカニズム

図 2-2-1 のように半導体でできた発光層を挟んで pn 接合を作り電圧をかけると、半導体のバンドギャップ  $E_g$  に相当する電圧を超えた時点から電流が流れはじめる。n 型半導体から電子が、p 型半導体から正孔が発光層に注入され、数十 ns の間に再結合して消滅する。この時、電子のエネルギーは発光層の  $E_g$  だけエネルギーが高いため、再結合により消滅したエネルギーは別のエネルギーに変換される。系全体のエネルギーは保存されるため、その大部分は光となって自然放出される。この発光を利用したデバイスが発光ダイオード (Light Emitting Diode : LED) である。

ここでの光発生現象は自然放出 (spontaneous emission) と呼ばれる<sup>1)</sup>。定性的には次のように理解できる。発光層へ注入された電子と正孔の波動は干渉しあい、時間的に振動する電子の存在確率の偏りを作る。半導体結晶中の伝導帯にある電子、価電子帯にある正孔はそれぞれ次のような波動関数で表すことができる。

$$\text{電子： } \Phi_e \propto \exp[-iE_c t / (\hbar/2\pi)] \quad (2-1)$$

$$\text{正孔： } \Phi_h \propto \exp[-iE_v t / (\hbar/2\pi)] \quad (2-2)$$

ここで  $E_c$  と  $E_v$  はそれぞれ電子と正孔のある基準からのエネルギー、 $\hbar$  はプランク定数、 $t$  は時間である。これらが発光層に共存していると互いに干渉する。波動関数の重ね合わせた状態の絶対値の2乗が存在確率であるため、

$$|\Phi_e + \Phi_h|^2 \propto \exp[i(E_c - E_v)t / \hbar] \quad (2-3)$$

となつて、2つの波動関数の空間的な干渉 (ビート振動) を引き起こす<sup>2)</sup>。この振動はエネルギー差  $E_c - E_v$  に比例した周波数をもつ。その角周波数  $\omega_0$  は

$$\omega_0 = (E_c - E_v) / (\hbar) \quad (2-4)$$

で与えられる。これはボーアの条件 (Bohr's Condition) と呼ばれるもので、直流である電流から交流である光の電磁波が発生する原理となっている。

なお、ここで注入された電子と正孔は、半導体結晶格子から熱振動のエネルギーを与えられてフェルミ・ディラック分布に従うエネルギー分布をもつ。そのため室温では発光スペクトル幅はバンドギャップだけでは決まらず、10nm ほどの幅を持つ。また異なるエネルギーをもつ電子と正孔の干渉が独立に生じるため、発光する光は位相のそろっていないインコヒーレント光となる。ここでの再結合寿命は約 10ns と長いため、これ以上の早い電流変化に応答できない。そのため発光ダイオードの変調周波数は寿命の逆数、すなわち 100MHz 程度に限られる。そのため、それ以上の高速変調が必要な場合には半導体レーザーが用いられる。

## 2.2.2 半導体レーザーの基本構造

効率よく半導体発光素子を発光させるために、誘導放出と共振器構造による光の帰還作用を利用したものが半導体レーザーである。電子と正孔とが干渉しているところへ光が入射され、その光の周波数が干渉振動の周波数に等しいとき、振動する双極子は相互作用により入射光と位相のそろった波を放出する。これが増幅作用であり、LASER (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*)<sup>3)</sup>の原理である。ただし伝導帯にいる電子の数、価電子帯にいる正孔の数を熱平衡状態よりも多くしておかないとエネルギーが光に移らず吸収されてしまう。このような熱平衡よりも高いエネルギーの状態を反転分布という。この増幅された光を再び発光層に帰還させると次々と増幅が行われ、光の伝搬損失が増幅で完全に補われると発振が起こる。この帰還させる仕組みが共振器であり、通常は互いに反射鏡を向かい合わせたフアブリー・ペロー型共振器が用いられる。

半導体レーザーの基本構造であるダブルヘテロ構造<sup>4)</sup>の概念図を図 2-2-2 に示す。この構造の特徴は「キャリア閉じ込め」と「光閉じ込め」を同時に行えることにある。まず「キャリア閉じ込め」について説明する。この素子構造において、活性層のバンドギャップはクラッド層のものよりも小さくなっており、その差は伝導帯の底の不連続  $\Delta E_c$  と価電子帯の上端の不連続  $\Delta E_v$  に分配される。またクラッド層は活性層に電子と正孔を同時に注入するため、片方が n 型半導体、もう片方が p 型半導体となっている。

このような構成をとることで、クラッド層における価電子帯の正孔は正孔濃度の低い n 型領域側へと拡散し、またクラッド層における伝導帯の電子は電子密度の低い p 型領域側へと拡散していく。拡散が生じることで p 型クラッド層領域の活性層側近傍にイオン化アクセプタが、n 型クラッド層領域の活性層近傍にイオン化ドナーが発生した「空間電荷」が存在する領域が生まれる。この領域は空乏層と呼ばれ

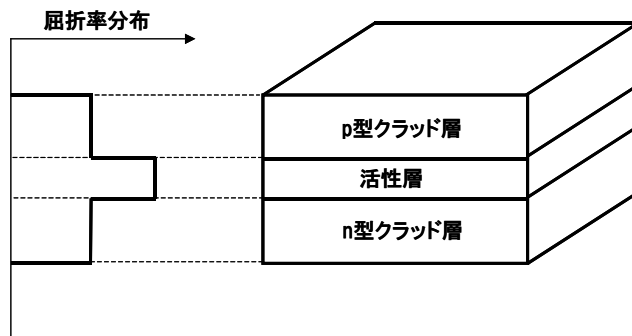


図 2-2-2 ダブルヘテロ構造の概念図

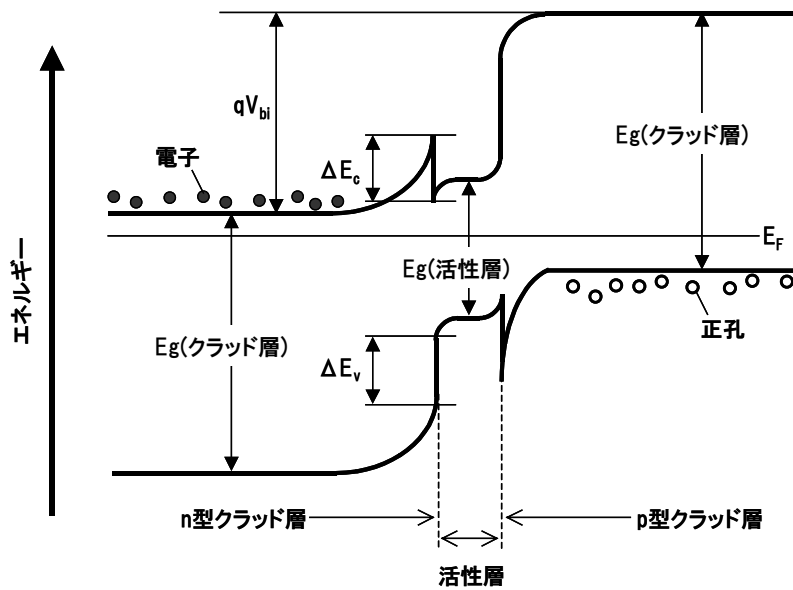


図 2-2-3 ダブルヘテロ構造のバンドダイアグラム (無バイアス時)

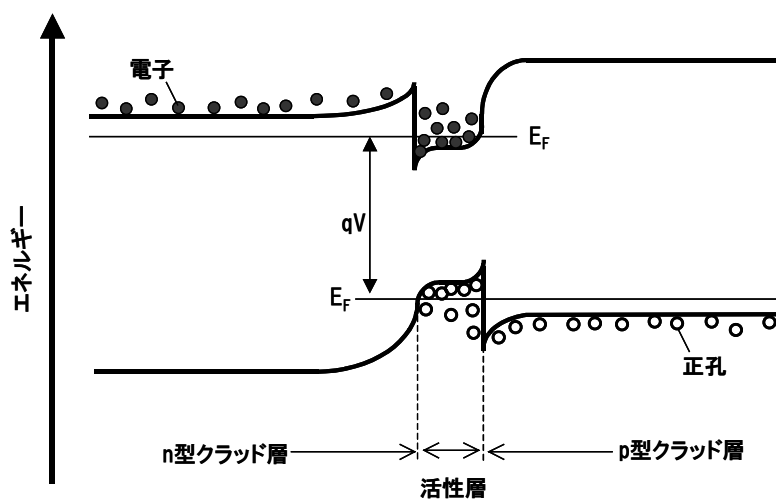


図 2-2-4 ダブルヘテロ構造のバンドダイアグラム (順バイアス時)

る。この領域では電場が発生し、拡散方向とは逆の方向へのキャリアのドリフト現象が発生するが、拡散とドリフトとの均衡によりビルトインポテンシャル  $V_{bi}$  が形成されるとともに、p型領域とn型領域のフェルミ準位が一致する（図2-2-3）。空乏層自体の幅はこの均衡状態の度合いによって決まる。空乏層にはキャリアが存在しないため電流はほとんど流れず、その電気抵抗はキャリアが多数存在する空乏層以外のp型領域、n型領域と比べてはるかに大きい。そのためビルトインポテンシャル  $V_{bi}$  のほとんどが空乏層に集中することになる。また外部から加えたバイアス電圧もこの領域に集中的に加わる。このバイアス電圧を印加することにより、拡散電位により形成された空乏層障壁の制御が可能となる。例えば、順バイアスを加えることで空乏層障壁を低下させ、電子と正孔を活性層へ注入することができる。これらのキャリアは  $\Delta E_c$  と  $\Delta E_v$  の存在により、活性層のバンドギャップにほぼ等しい順バイアス ( $V=E_g/q$ ) を印加した条件においても活性層中に閉じ込められる（図2-2-4）。これは実効的に注入されたキャリアの拡散長さを活性層の厚みに限定する働きをしている。

つぎに「光閉じ込め」について説明する。ダブルヘテロ構造は、活性層の屈折率がクラッド層の屈折率よりも大きいため、光ファイバのような光導波路として働くことになり、光は活性層に効率よく閉じ込められる。これは屈折率  $n_1$  の大きい媒体から小さい媒体 ( $n_0$ ) へ光が入ろうとするとき、ある臨界角  $\theta_c$  ( $\sin \theta_c = n_0/n_1$ ) 以上で入射された場合、すべての光が反射される全反射される効果を利用したものである。なお半導体レーザ内を導波する光の全エネルギーのうち活性層にある部分の割合を光閉じ込め率  $\Gamma$  とよぶ。半導体レーザでは活性層中にある光の成分だけが利得を得ることができるため、光閉じ込め率  $\Gamma$  は構造設計において非常に重要なパラメータである。ただしダブルヘテロ構造は「キャリア閉じ込め」と「光閉じ込め」を同じ場所にて行うため、活性層厚みを薄くしすぎると光閉じ込め効果が落



ちてしまいレーザ特性が低下してしまう欠点がある。

この問題を解決するため、キャリア閉じ込め領域と光閉じ込め領域を別々にしたのが図 2-2-5 に示す分離閉じ込めヘテロ構造（SCH：Separate Confinement Heterostructure）である。この構造では活性層厚みを  $0.1\mu\text{m}$  以下へと薄くしても（量子井戸層を用いても）、光は光ガイド層に閉じ込められているために光閉じ込め率の低下は生じない。本論文にて報告する半導体光発光素子はすべて、分離閉じ込めヘテロ構造を用いている。

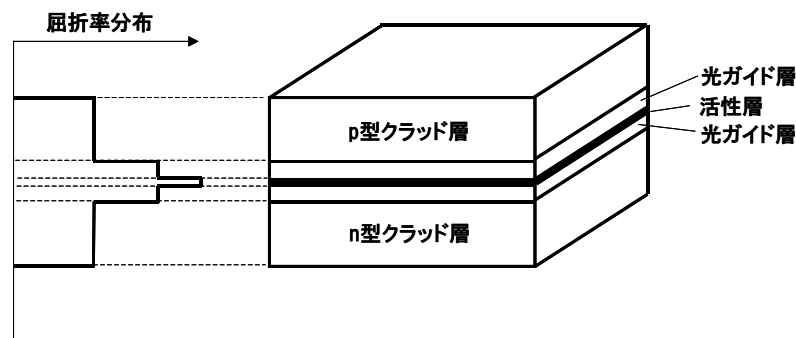


図 2-2-5 分離閉じ込めヘテロ構造の概念図

### 2.2.3 半導体レーザの動作原理

次に半導体レーザの動作について説明する<sup>5)</sup>。半導体レーザを閾値電流以下で動作させたときは、スペクトル幅が広く、空間的に位相のそろっていないインコヒーレントな光を放出し、発振閾値に達すると誘導放出により位相がそろったコヒーレントな光を放出する。そのときの半導体レーザの光出力  $P_f$  は次式にて与えられる。

$$P_f = \eta_i \frac{1}{1 + \frac{1-R_f}{1-R_r} \sqrt{\frac{R_r}{R_f}}} \times \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} (I - I_{th}) \left( \frac{I_{ac}}{I_{ac} - I_L} \right) \Theta(\mathcal{T}) \quad (2-5)$$

ここで  $\eta_i$  は内部量子効率、 $R_f$ 、 $R_r$  はそれぞれ前面反射率、後面反射率、 $\alpha_i$ 、 $\alpha_m$  はそれぞれ内部損失、反射鏡損失、 $I$ 、 $I_{th}$  はレーザの駆動電流および閾値電流、 $I_{ac}$ 、

$I_L$  は駆動電流のうち実際にレーザ発振に寄与する電流、および無効電流である。

$\Theta(T)$ は発熱による光出力の飽和を表す項である。この式より高い光出力を得るためには

- (a) 高い内部量子効率の実現（量子井戸層の使用など）
- (b) 非対称端面コーティングの採用（「前面低反射率/後面高反射率」の採用）
- (c) 低い内部損失の実現（ドーピングプロファイルの最適化など）
- (d) 活性層以外を流れる漏れ電流の低減（電流狭窄層をもつ素子構造など）
- (e) 熱放散性の改善（素子の長共振器化、熱伝導率の高いヒートシンク使用など）

が有効である。これらの指標は半導体レーザを如何に安定的に動作させるかを示すものでもあり、寿命性能を考える際に重要な設計パラメータとなる。ただしデバイスの仕様や使用する材料系によって、これらの項目が互いにトレードオフの関係になることも多いため、デバイスの目的によって最適化することが必要である。

#### 2.2.4 半導体レーザの変調特性

半導体レーザは式(2-5)から分かるように、出力は駆動電流と直接比例しないが、バイアスの直流電流を流しておいて、その上で電流値に変化を与えると、その変化分に比例して光出力が変調される。これが半導体レーザの直接変調である。その変調速度はキャリア寿命だけでなくレーザの緩和振動周波数  $f_r$  で決まり、次式にて与えられる。

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\tau_s} \sqrt{\frac{\tau_s}{\tau_p} \left( \frac{I}{I_{th}} - 1 \right)} \quad (2-6)$$

ここで  $\tau_s$ 、 $\tau_p$  はそれぞれ電子・正孔の再結合寿命時間（半導体レーザでは約 2 ~ 3ns）、および共振器中の光寿命である。この式に従い、閾値を超える大きな電流範囲で動作させることで 10GHz 以上の変調周波数を得ることができる。

## 2.3 半導体発光素子の寿命性能

半導体発光素子の開発において、寿命性能は最も重要な開発項目の1つである。1970年当時のダブルヘテロレーザ<sup>6)</sup>の寿命は数分から数十分程度であったが、様々な技術検討によって劣化メカニズムが解明され、それを克服することによって長期寿命を保証できるレーザが開発された。

半導体発光素子の劣化モードは次の3つに分類できる。

- a) 急速劣化 (Rapid degradation)<sup>7,8)</sup>
- b) 緩慢劣化 (Gradual degradation)<sup>9,10)</sup>
- c) 衝撃劣化 (Catastrophic degradation)<sup>11,12)</sup>

図 2-3-1 は APC (Auto Power Control: 定光出力) 駆動、図 2-3-2 は ACC (Auto Current Control: 定電流) 駆動時における劣化モードを模式的に示したものである<sup>13)</sup>。

急速劣化は活性層内部の結晶欠陥が数分から数十時間のタイムスケールで増殖することによって起こる現象である。結晶欠陥は非発光再結合中心となり、これが応力下での通電によって増殖し、暗線欠陥 (dark line defect : DLD)<sup>14)</sup>として観測されるようになる。現在では低転位密度の基板を用い、さらに有機金属気相法などのエピタキシャル成長法を用いて欠陥の少ない結晶成長を行い、またデバイス作製工程での応力発生を極力抑えることで、このような急速劣化の問題は解決された<sup>15,16)</sup>。

一方、緩慢劣化は急速劣化モードを除去したあとに残る長時間に渡る穏やかな劣化モードである。劣化機構としては動作時の非発光再結合による点欠陥の生成、凝縮による点欠陥クラスタないし微小転位ループの形成などが考えられている<sup>17)</sup>。

3つめの劣化モードである衝撃劣化は光出力端面にて COMD (Catastrophic Optical Mirror Damage) と呼ばれる衝撃的光学損傷<sup>18)</sup>が生じることによって起こるものである。図 2-3-3 を用いて COMD が発生するメカニズムを説明する。

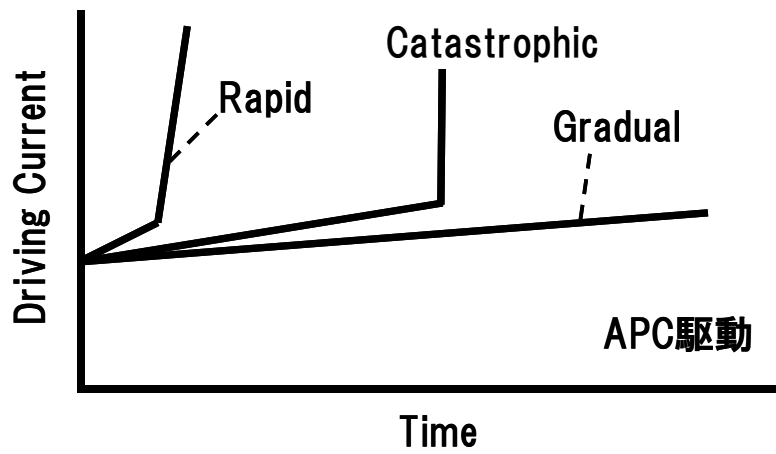


図 2-3-1 APC 駆動時における各劣化モードの挙動

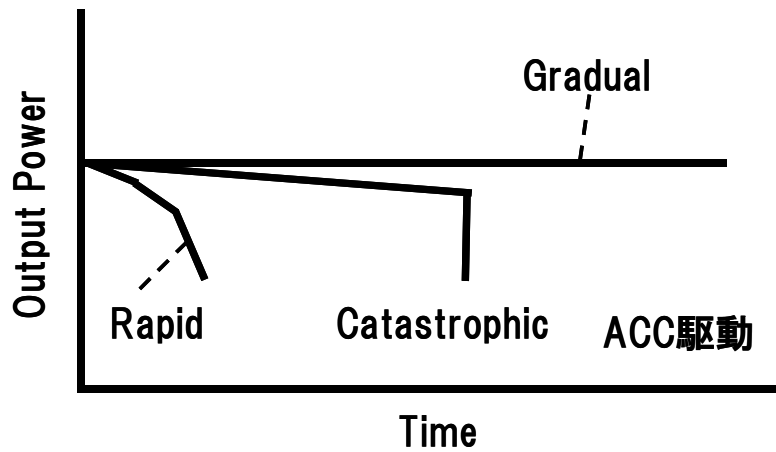


図 2-3-2 ACC 駆動時における各劣化モードの挙動

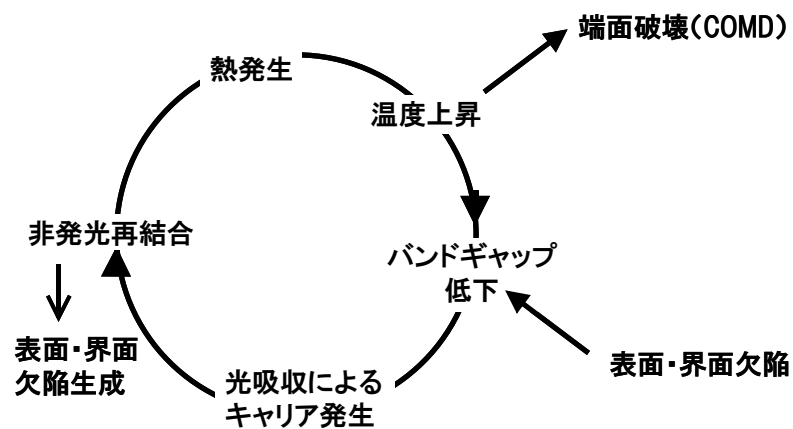


図 2-3-3 COMD 発生メカニズム

欠陥などの影響により半導体発光素子の端面にてバンドテイリング<sup>19)</sup>が生じ、本来のバンドギャップエネルギーに対応する波長よりも長い波長の光を吸収するようになる。このため光の吸収に続いて起こる非発光再結合によって温度が上昇して更にバンドギャップが小さくなる、という一連の過程に正のフィードバックがかかり、最終的に端面が破壊されるという劣化モードである。この劣化モードを抑制するために端面コーティング<sup>20)</sup>や窓構造<sup>21)</sup>（端面付近のバンドギャップを大きくする）を用いる方法や、光スポット径を拡大<sup>22)</sup>することで活性層における光パワー密度を低減するなどの方法が提案されている。

そのほかに外部から電流サージ（静電気など）によって大電流がデバイスに加えられ、COMD レベルを超える巨大な光出力によって故障を起こすモード<sup>23)</sup>が存在する。このようなサージ破壊からデバイスを保護するため、通常は駆動電源にサージ電流を防止する回路が組み込まれている。

半導体発光素子を長寿命化するには、まず劣化モードを明らかにすることが非常に重要である。本研究でも様々な手法をもちいて劣化モードの解明を行い、劣化の起源や機構を考慮したうえで劣化抑制に取り組んでいる。詳細は赤色半導体レーザの長寿命化を第3章にて、1.0 $\mu\text{m}$  帯スーパーluminescentダイオードの長寿命化についての検討結果を第5章にて述べる。

## 2.4 半導体発光素子の結晶成長技術

半導体発光素子における技術革新の原動力となったのが、半導体薄膜結晶成長技術である。これらはエピタキシャル成長法と呼ばれるもので、基板結晶の上に引き続き、その原子配列の影響を受けつつ結晶を成長させることをいう。この方法は融点よりはるかに低い温度で、完全性の高い単結晶薄膜を得ることが可能であるほか、原子層レベルでの成長制御が可能であり、量子効果の顕現も可能である。

半導体発光素子に用いられる結晶成長方法として、液相成長法、分子線エピタキシャル（MBE）成長法、有機金属気相（MOCVD）成長法があげられる。液相成長法は成長材料を溶かした溶液からエピタキシャル成長を行うもので、1963年に提案され、1970年のAlGaAs/GaAs半導体レーザの室温連続発振に大きく寄与した<sup>24)</sup>。ただし液相成長法は比較的容易に高品質な結晶が得られるものの、原子層レベルで結晶成長を制御することはできない。これを改善するため、開発されたのが気相エピタキシャル法である。その1方式である分子線エピタキシャル法は超高真空下にて結晶成長を行うもので、1981年にAlGaAs/GaAs半導体レーザが作れることが実証<sup>25)</sup>され、その後の半導体レーザの研究を大きく加速させた。また同じく気相エピタキシャル成長法の1種で、有機金属化合物を原料とし、化学反応を用いてエピタキシャル成長を行う有機金属気相成長法による最初の半導体レーザが1981年に報告<sup>26)</sup>された。この方法は分子線エピタキシャル成長法と比べてリンを含む混晶の結晶成長が容易という特徴がある。半導体レーザが大量生産され、民生用として用いることができたのは、これら分子線エピタキシャル成長法や有機金属気相成長法といった気相エピタキシャル成長技術の発達があったためといっても過言ではない。

本研究では有機金属気相成長法により結晶成長を行っている。この成長法の概念を図2-4-1に示す。この成長法は有機金属からなる気体原料をキャリアガスとともにリアクタに導入し、化学反応によって基板上に薄膜結晶を成長させている。リアクタに導入された原料は加熱された基板付近にて分解され、その分解により生成されたラジカルが基板表面に吸着、表面拡散、脱離を繰り返す過程のなかで原子が結晶内に取り込まれて結晶が成長していく。取り込まれなかった原料はリアクタ内の気相の流れに沿って排気される。結晶の膜厚・組成の制御は、時間と原料ガスの流量比を変えることで制御することができる。

本研究ではⅢ族原料としてトリエチルガリウム（TEG）、トリメチルインジウム

(TMI)、トリメチルアルミニウム (TMA)、V族原料としてアルシン ( $\text{AsH}_3$ )、ホスフィン ( $\text{PH}_3$ ) を用いた。III族原料およびp型ドーパント材料 (ジエチル亜鉛 : DEZn) は有機金属原料であり、バブラーと呼ばれるステンレス製の密閉容器に入っている。これにキャリアガスである高純度水素ガスを導入してバブリングすることによって飽和蒸気圧分の気体原料を取り出してリアクタへと送る。V族ガスおよびn型ドーパント材料 (シラン :  $\text{SiH}_4$ ) は常温・大気圧で気体であるため、ボンベから直接原料を取り出しリアクタに送っている。

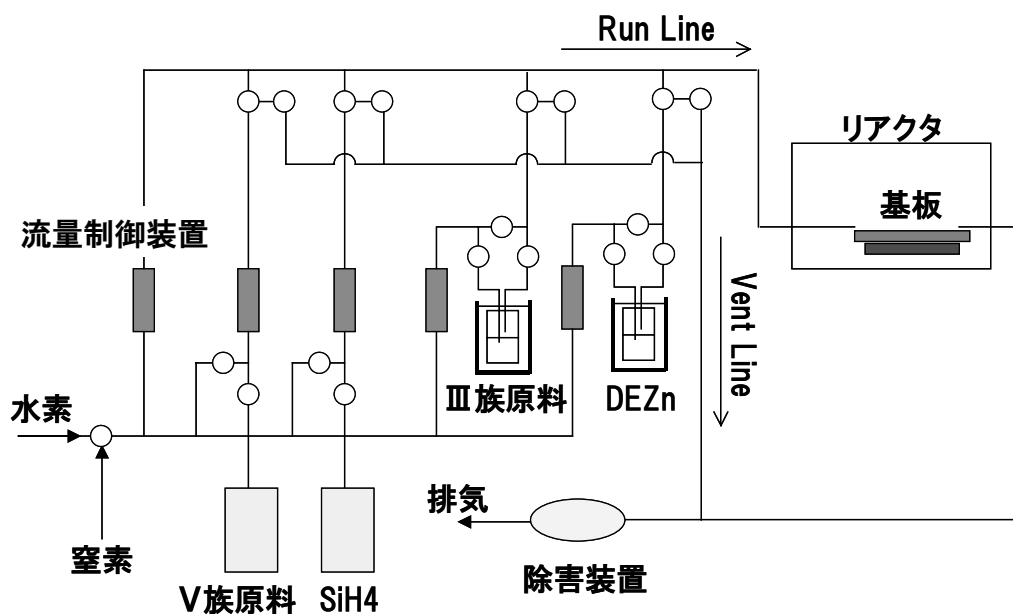


図 2-4-1 有機金属気相成長法の概念図

原料ガスは流量制御装置 (マスフローコントローラ) を通して、所望の流量とし、さらにエアバルブによりリアクタ内に導入 (Run Line) するか、排気ラインへ捨てるか (Vent Line) を切り替えるようになっている。この際、リアクタ内のガス総流量が変動すると成長圧力が変動し、結晶成長に悪影響が生じてしまう。これを避けるためにガス切り替えの際にはダミー水素ラインの流量を調整することによって、リアクタ内に送り込むガスの総流量が一定になるように制御している。これは量子

井戸層のように（超薄膜であるが故に）ガス切り替えを短時間のスパンで繰り返す結晶成長において非常に重要である。また Run Line と Vent Line とに圧力差があると切り替え時に流量変動が生じるため、差圧制御を行っている。本研究で用いた MOCVD 装置（日本酸素株製 HR3248）の外観を図 2-4-2、2-4-3 に示す。

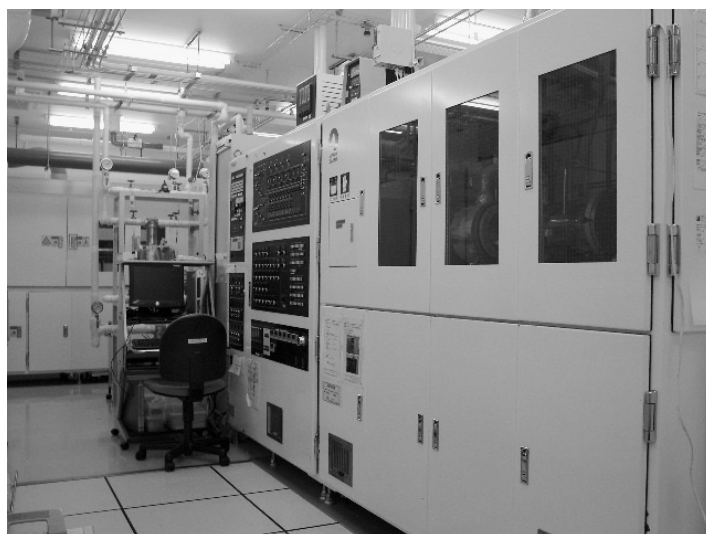


図 2-4-2 研究に用いた有機金属気相成長装置（外観）

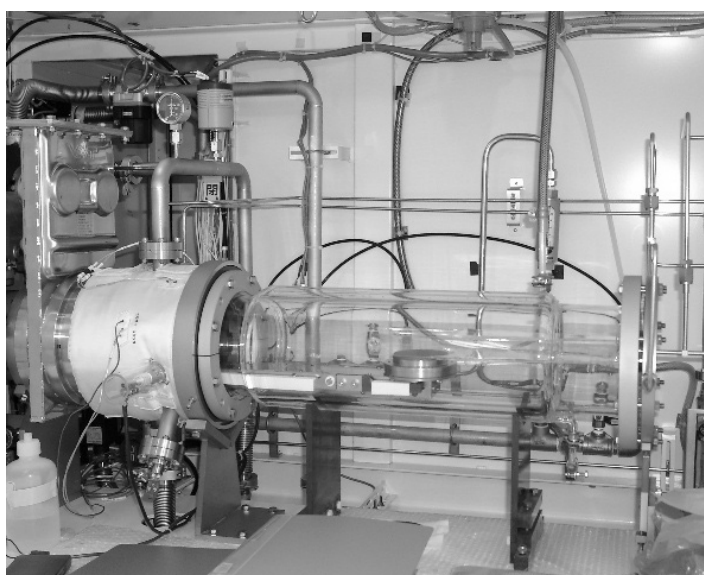


図 2-4-3 研究に用いた有機金属気相成長装置（リアクタ部）



## 第2章の参考文献

- 1) 伊賀健一, “半導体レーザー”, 光学, 30 卷, 7 号, pp.464-471 (2001)
- 2) 末松安晴、伊賀健一, “光ファイバ通信入門 (改訂 4 版)”, 第 4 章, オーム社 (2006)
- 3) A. L. Schawlow and C. H. Townes, “Infrared and optical masers”, Phys. Rev. Vol.112, pp.1940-1949 (1958)
- 4) 伊藤良一, 中村道治, “半導体レーザ[基礎と応用]”, 第 2 章, 培風館 (1989)
- 5) 粕川秋彦, 向原智一, 山口武治, 城川潤二郎, “光ファイバアンプ励起用高出力半導体レーザの現状”, 古河電工時報, 第 105 号, pp.13-18 (2000)
- 6) I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, “Junction lasers which operate continuously at room temperature”, Appl. Phys. Lett., Vol.17, pp.109-111 (1970)
- 7) M. Abe, I. Umebu, O. Hasegawa, S. Yamakoshi, T. Yamaoka, T. Kotani, H. Okada, and H. Takanashi, IEEE Trans. Electron Devices, “High-efficiency long-lived GaAlAs LED’s for fiber-optical communications”, IEEE Trans. Electron Dev., Vol.ED-24, pp.990-994 (1977)
- 8) B. C. De loach, Jr., B. W. Hakki, R. L. Hartmann, and L. A. D’Asaro, “Degradation of CW GaAs double-heterojunction lasers at 300K”, Proc. IEEE, Vol.61, pp.1042-1044 (1973)
- 9) T. Uji, T. Suzuki, and T. Kamajima, “Deep-level changes in (Al,Ga)As double-heterostructure lasers degraded during accelerated aging at high temperatures”, Appl. Phys. Lett., Vol.36, pp.655-657 (1980)
- 10) K. Kondo, O. Ueda, S. Isozumi, S. Yamakoshi, L. Akita, and T. Kotani, “Positive feedback model of defect formation in gradually degraded GaAlAs light emitting devices”, IEEE Trans. Electron Devices, Vol.30, pp.321-326 (1983)
- 11) H. Kressel, and H. Mierop, “Catastrophic degradation in GaAs injection lasers”, J. Appl. Phys., Vol.38, pp.5419-5421 (1967)
- 12) B. W. Hakki and F. R. Nash, “Catastrophic failure in GaAs double-heterostructure injection

- lasers”, J. Appl. Phys., Vol.45, pp.3907-3912 (1974)
- 13) O. Ueda, “On degradation studies of III-V compound semiconductor optical devices over three decades: focusing on gradual degradation”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.49, 090001 (2010)
  - 14) O. Ueda, S. Isozumi, T. Kotani, and T. Yamaoka, “Defect structure of <100> dark lines in the active region of a rapidly degraded Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As LED”, J. Appl. Phys., Vol.48, pp.3950-3952 (1977)
  - 15) O. Ueda, I. Umebu, S. Yamakoshi, and T. Kotani, “Nature of dark defects revealed in InGaAsP/InP double heterostructure light emitting diodes aged at room temperature”, J. Appl. Phys., Vol.53, pp.2991-2997 (1982)
  - 16) 上田 修, “半導体発光デバイスの劣化解析と劣化抑制”, IEICE Fundamentals Review, Vol.6, pp.294-304 (2013)
  - 17) K. Kondo, O. Ueda, S. Isozumi, S. Yamakoshi, K. Akita, and T. Kotani, “Positive feedback model of defect formation in gradually degraded GaAlAs light emitting devices”, IEEE Trans. Electron. Devices., Vol. ED 30, pp.321-326 (1983)
  - 18) C. H. Henry, P. M. Petroff, R.A. Logan, and F. R. Meritt, “Catastrophic damage of Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As double-heterostructure laser material”, J. Appl. Phys., Vol.50, pp.3721-3732 (1979)
  - 19) M. Fukuda, M. Okayasu, J. Temmyo, and J. Nakano, “Degradation behavior of 0.98-μm strained quantum well InGaAs/AlGaAs lasers under high-power operation”, IEEE J. Quantum Electron., Vol.30, pp.471-476 (1994)
  - 20) H. Horie, H. Ohta, and T. Fujimori, “Reliability improvement of 980-nm laser diodes with a new facet passivation process”, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., Vol.5, pp.832-838 (1999)
  - 21) J. Hashimoto, N. Ikoma, M. Murata, and T. Katsuyama, “A highly reliable GaInAs-GaInP

- 0.98- $\mu\text{m}$  window laser”, IEEE J. Quantum Electron., Vol.36, pp.971-977 (2000)
- 22) T. Hayakawa, M. Wada, F. Yamanaka, H. Asano, T. Kuniyasu, T. Ohgoh, and T. Fukunaga, “Effects of broad-waveguide structure in 0.8  $\mu\text{m}$  high-power InGaAsP/InGaP/AlGaAs lasers”, Appl. Phys. Lett., Vol.75, pp.1839-1841 (1999)
- 23) Y. Twu, L. S. Cheng, S. N. G. Chu, F. R. Nash, K. W. Wang, and P. Parayanthal, “Semiconductor laser damage due to human-body-model electrostatic discharge”, J. Appl. Phys., Vol.74, pp.1510-1521 (1993)
- 24) I. Hayashi, M. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, “Junction lasers which operate continuously at room temperature”, Appl. Phys. Lett., Vol.17, pp.109-111 (1970)
- 25) W. T. Tsang, “High-through-put, high-yield, and highly-reproducible (AlGa)As double-heterostructure laser wafers grown by molecular beam epitaxy”, Appl. Phys. Letts., Vol. 38, pp.587-589 (1981)
- 26) J. P. Duchemin, J. P. Hirtz, M. Razeghi, M. Bonnet and S. D. Hersee, “GaInAs and GaInAsP materials grown by low pressure MOCVD for microwave and optoelectronic applications”, J. Cryst. Growth., Vol.55, pp.64-73 (1981)

## 第3章 赤色半導体レーザーの長寿命化と高速変調特性の改善

### 3.1 はじめに

この章では赤色半導体レーザーのプラスチック光ファイバー（Plastic Optical Fiber : POF）システム用光源としての応用検討について述べる。POFはその名の通り、プラスチックでできた光ファイバーで、石英などの無機系光ファイバーに比べて屈曲や振動に強く、ファイバー径が太い（約8倍）のが特徴<sup>1)</sup>である。また接続の際にファイバーの中心軸を合わせるための高度な技術を要しないことから、接続が容易でコストが安い利点をもつ。その一方で無機系光ファイバーと比べて伝送損失が大きいため光伝送距離が2桁ほど短く<sup>2)</sup>、その用途は短距離通信に限定される。

これらの特徴をもつ POF は図 3-1-1 に示すように光データ通信用途<sup>3、4)</sup>のほか、イルミネーション用途<sup>5)</sup>、光センシング用途<sup>6)</sup>など様々な分野に応用されている。



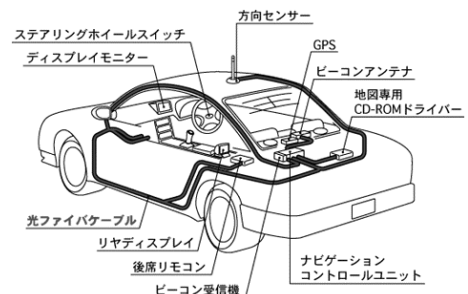
プラスチック光ファイバー(<http://www.ohbakiko.co.jp/light/pof-assy.html>)



イルミネーション用途  
([http://www.twalighting.com/Optic\\_Fiber.php](http://www.twalighting.com/Optic_Fiber.php))



データ通信用途  
(<http://www.fujifilm.jp/business/material/pof/>)



車内データ通信用途  
([http://www.toray.jp/electronic/raytela/ray\\_003.html](http://www.toray.jp/electronic/raytela/ray_003.html))

図 3-1-1 プラスチック光ファイバーの応用例

POFにおける光伝送距離は、伝送中の光吸収と拡散によって決まる。損失の主要因はコア材を構成しているPMMA（ポリメタクリル酸メチル）分子におけるC-H結合の伸縮運動による固有の吸収損失と、材料の密度揺らぎによるレイリー散乱である。石英系光ファイバーは近赤外領域まで分子振動による吸収がないため、1.3～1.55 $\mu\text{m}$ 帯にて0.5dB/kmを下回る低損失を実現できる。ところがPOFはこれらの損失が非常に大きいため、分子振動による吸収の影響が少なくなる可視域領域にて用いられる。図3-1-2はPMMA-POFの各波長における伝送損失を示したものである。この図から0.65～0.66 $\mu\text{m}$ 近辺に吸収の少ない領域が存在しており、この帯域で発光する半導体光源がPOFシステムにとって有望であることが分かる。

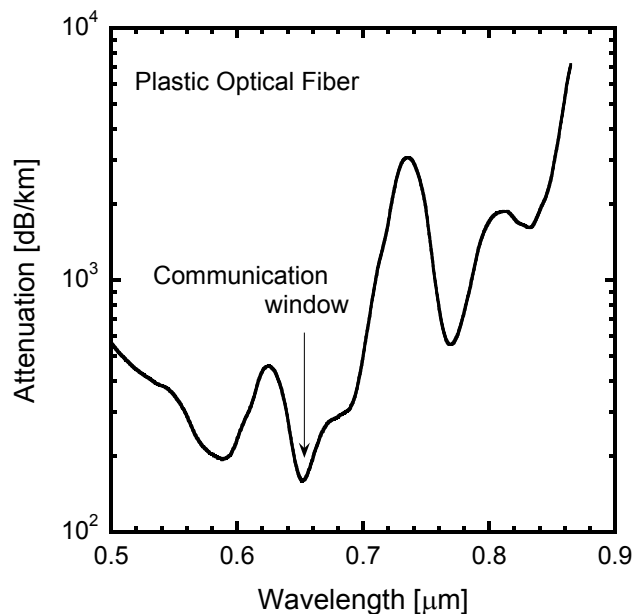


図 3-1-2 PMMA コア・プラスチック光ファイバーの伝送損失

この帯域の半導体光源<sup>7)</sup>としてはLED (Light Emitting Diode)、RCLED (Resonant Cavity LED)、LD (Laser Diode) があるが、LED と RCLED は注入された電子のライフタイムが大きく、数百 MHz 以上の高速変調に対応できない。一方、LD は変調特性に優れているが、光通信用途としての寿命特性が得られていない (DVD 用低

出力赤色半導体レーザにて 5000~10000 時間レベル) のが現状である<sup>8,9)</sup>。

本研究では 0.66 $\mu\text{m}$  赤色半導体レーザの結晶品質の向上、および素子構造の最適化を行い、5mW 駆動における 10 万時間以上の寿命性能と 1.25Gbps の高速伝送特性を実現することに成功した。この結果は赤色半導体レーザにおいて光通信用光源に要求される寿命性能を満たせることを初めて示したものである。本章ではその素子性能と、高信頼性および高速変調特性を実現した技術について述べる。

### 3.2 本章の目的

POF 通信用光源として要求される「発振波長 0.66 $\mu\text{m}$ 」、「1.25GHz 以上の高速変調特性」および「60 $^{\circ}\text{C}$ 、5mW における故障率 1%の寿命 10 万時間の信頼性」を満たす赤色半導体レーザの実現を目的として研究を行った。

### 3.3 従来技術における赤色半導体レーザ

赤色半導体レーザの歴史は古く、1985 年に 0.68 $\mu\text{m}$  帯における室温連続発振が報告されている<sup>10-12)</sup>。翌 1986 年には 2000 時間以上、1988 年には約 1 万時間の安定動作が得られ、赤色半導体レーザの信頼性・実用性が実証された。また 1996 年には初の DVD プレーヤが発売され、ピックアップ用光源として赤色半導体レーザが大量生産される時代に突入した。しかし DVD 用光源である赤色半導体レーザの仕様は「寿命数千時間、変調速度 100Mbps」レベルであり、光通信用光源として必要な「寿命 10 万時間、変調速度 1.25Gbps 以上」とは大きな開きがある。

赤色半導体レーザの信頼性については数多く報告されている。赤色半導体レーザの寿命が短い原因として、①発光層近傍にアルミニウムを含む層が存在している<sup>13)</sup>、②ヘテロバリア障壁が低い<sup>14)</sup>、③熱抵抗が大きい<sup>15)</sup>、があげられている。これらについて詳しく説明する。

赤色半導体レーザは量子井戸層にバンドギャップの大きい GaInP を用いるため、クラッド層には GaAs 基板に格子整合し、かつ III-V 族化合物半導体のなかでバンドギャップが最大となる  $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  を用いている<sup>16)</sup>。また光ガイド層には量子井戸層とクラッド層との中間のバンドギャップをもつ  $(\text{Al}_{0.5}\text{Ga}_{0.5})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  を用いざるを得ないため、発光層近傍に酸化しやすいアルミニウムが存在することになる。これが結晶欠陥の発生を誘発するため寿命が短いとされている。

また赤外半導体レーザと比較すると、量子井戸層とクラッド層との間のバンドギャップ差が小さく、キャリアがオーバーフローしやすい。そのため素子の温度特性が悪く、無効電流が大きい。さらに赤外半導体レーザに用いられている GaAs 系材料と比べて、赤色半導体レーザに用いられる GaInP 系材料は熱抵抗が約 5 倍大きいとされている。そのため放熱性が悪く、活性層温度の上昇分が大きい。活性層温度が上昇すると活性層における欠陥の増殖を早め、素子寿命の低下をまねく。このことから赤色半導体レーザは本質的に高温動作、高出力動作に適さないレーザだと言える。

その一方で、赤色半導体レーザの性能を向上させるための様々な技術検討が行われ、駆動電流密度の低減<sup>17,18)</sup>や、高出力動作時に生じる端面破壊による故障モードの抑制<sup>19,20)</sup>などに大きな成果が得られた。これにより現在では赤色半導体レーザを数百 mW~W 級の高出力動作<sup>21,22)</sup>できるようになっている。しかしながら光通信用途に耐えうる寿命性能を実現するには至っていないのが現状である。

### 3.4 赤色半導体レーザの素子構造と作製方法

赤色半導体レーザは構成材料に AlGaInP を用いているため、結晶界面での再結合速度が大きく注入されたキャリアが界面で消滅するため、通信用 InP 系半導体レーザのように活性層部を必要な幅のみ残して両脇を埋め込むような素子構造は用い

ることができない。そのため図 3-4-1 に示すように活性層が平坦でかつ途切れない構造で、かつ AlGaInP 結晶を最初の結晶成長で全て積層する SBR (Selectively Buried Ridge Waveguide) 構造を用いるのが一般的である<sup>23)</sup>。この構造は MOCVD 法による選択成長を用いてリッジストライプ部を n-GaAs 電流狭窄層で埋め込んでいる。この発光領域に近接した電流狭窄層が発振レーザ光を吸収することで、水平方向に実効屈折率分布を生じさせ、光閉じ込めを行う設計となっている<sup>24)</sup>。半導体レーザは差別化のためメーカー独自の構造を用いることが多いが、赤色半導体レーザに限っては材料による制限が大きいため SBR 構造を採用しているメーカーが多い。本研究でも SBR 構造を採用した。

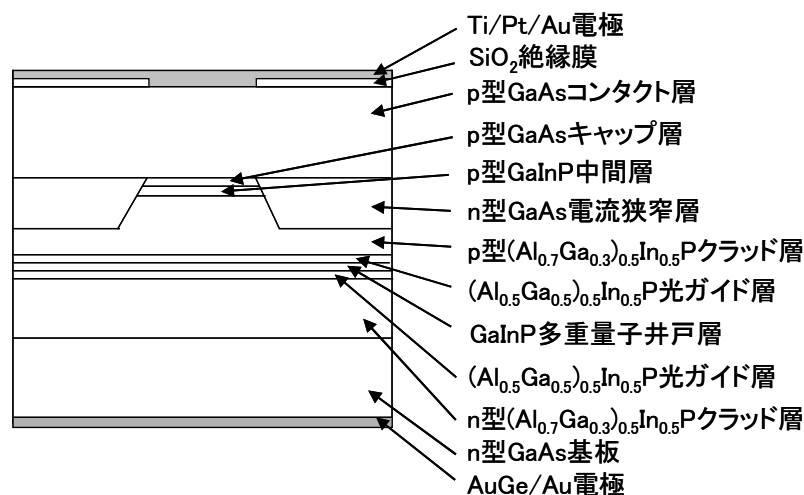


図 3-4-1 本研究で用いた赤色半導体レーザの素子構造 (SBR 構造)

次に素子の作製方法について述べる。結晶成長には有機金属気相成長 (MOCVD) 法を用い、基板は(100)面から<011>方向へ 10 度傾斜した Si ドープ GaAs 基板を用いた。Ⅲ族原料には、トリエチルガリウム、トリメチルインジウム、トリメチルアルミニウムを用い、V族原料にはホスフィン、アルシンを用いた。ドーパントには p 型、n 型それぞれジエチル亜鉛、シランを用いている。成長温度は 685°C で、成長速度はクラッド層、光ガイド層となる AlGaInP 層が 1.5 $\mu\text{m}/\text{h}$ 、量子井戸層となる



GaInP層が $0.75\mu\text{m/h}$ である。成長圧力は $10.1\text{kPa}$ とした。SBR構造の作製にあたり、結晶成長を3回に分けて行っている。まずn-GaAs基板の上にn-GaAsバッファ層( $0.2\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $7\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ )、n-(Al $_{0.7}$ Ga $_{0.3}$ ) $_{0.5}$ In $_{0.5}$ Pクラッド層( $1.2\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $7\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ )、i-(Al $_{0.5}$ Ga $_{0.5}$ ) $_{0.5}$ In $_{0.5}$ P光ガイド層( $80\text{nm}$ )、i-GaInP歪み多重量子井戸層(各層 $6\text{nm}$ )、i-(Al $_{0.5}$ Ga $_{0.5}$ ) $_{0.5}$ In $_{0.5}$ P光ガイド層( $80\text{nm}$ )、p-(Al $_{0.7}$ Ga $_{0.3}$ ) $_{0.5}$ In $_{0.5}$ Pクラッド層( $1.2\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $1.5\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ )、p-Ga $_{0.5}$ In $_{0.5}$ P中間層( $0.1\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ )、p-GaAsキャップ層( $0.2\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $2\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ )を順次積層する。次にエッチングによりp-(Al $_{0.7}$ Ga $_{0.3}$ ) $_{0.5}$ In $_{0.5}$ Pクラッド層にリッジ型ストライプを形成し、2回目の結晶成長によりリッジ部の両脇をn-GaAs電流狭窄層( $1.2\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $1\times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ )にて埋め込む。その後、3回目の結晶成長によりp型GaAsコンタクト層( $0.2\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $2\times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ )を形成する。リッジ底のストライプ幅は $2.5\mu\text{m}$ とした。その後、電極としてn型、p型それぞれ、AuGe/Ni/AuおよびTi/Pt/Auを形成し、劈開により端面を形成したのち、10%/95%の端面コーティングを行った。素子の共振器長は $0.9\text{mm}$ とし、ヒートシンクにジャンクションアップで実装している。更にそれを図3-4-2に示すように $9\text{mm}$ φステムに取り付けている。本研究で用いた素子設計、プロセスにて特に重要なものについて、以下に詳細に述べる。



図 3-4-2 作製した赤色半導体レーザ

### (1) 量子井戸層の設計

本研究では3層の歪み量子井戸層からなる歪み多重量子井戸構造を採用した。量子井戸層間のバリア層には光ガイド層と同じ材料を用いた。歪み多重量子井戸構造は格子歪みによりバンド構造が変形し、反転分布に要するキャリア密度が減少するため、無歪みの量子井戸構造と比べて閾値キャリア密度を小さくできる利点がある<sup>25,26)</sup>。その一方で歪み結晶は内部にストレスを内在させるため、歪みに耐える臨界膜厚を超えてしまうとミスフィット転位が生じ、レーザ特性が悪化する。また量子井戸層の歪み量、膜厚を変えることで発振波長が変化してしまうため、歪み量、膜厚、発振波長すべてを考慮して量子井戸層の設計を行う必要がある。

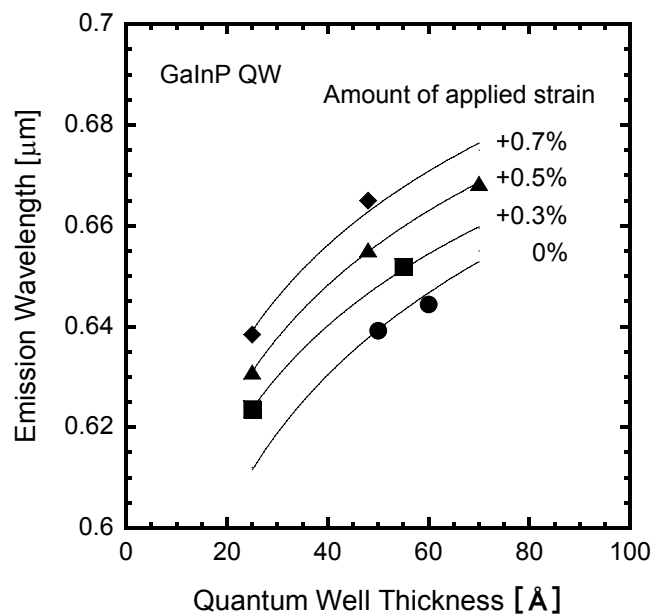


図 3-4-3 量子井戸層の厚みと発振波長との関係

図 3-4-3 に量子井戸層の厚みと発振波長との関係を、シミュレーションと実験により求めた結果を示す。また活性層における歪み量と電流閾値との関係を実験により求めた結果を図 3-4-4 に示す。この2つの実験結果をもとに電流閾値を低減させる設計として圧縮歪み+0.5%、厚さ 60 Åを量子井戸層の成長条件として選択した。

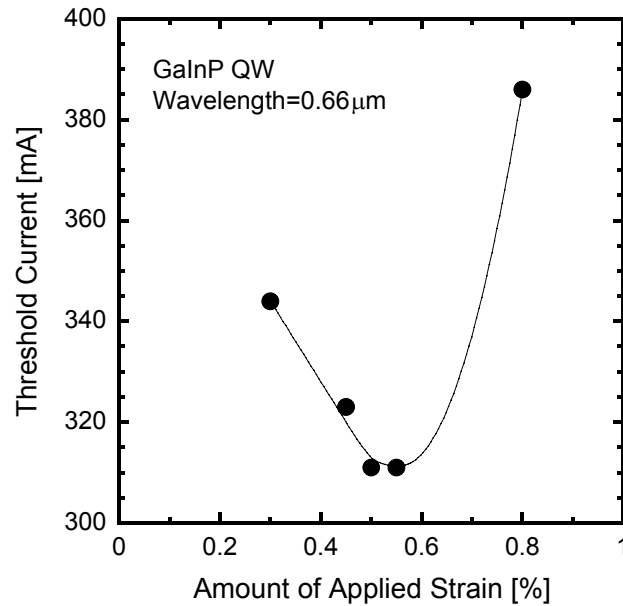


図 3-4-4 量子井戸層の歪み量と、電流閾値の関係

## (2) クラッド層の設計

前述したように赤色半導体レーザは量子井戸層とクラッド層との間のバンドギャップ差が小さくキャリアがオーバーフローしやすい。これは活性層に注入されたキャリアが活性層からクラッド層へあふれ出してしまう現象である。オーバーフローが多いと半導体レーザの温度が上昇した際に、動作電流が増加して消費電力が増えるとともに、電流密度の増加により活性層の劣化が促進されてしまう。このオーバーフローを防止するには活性層とクラッド層との間に生じるヘテロ障壁の高さを大きくする必要があるが、赤色半導体レーザは材料の制約から十分なヘテロ障壁をとることができない。そこで p 型クラッド層へ高濃度不純物ドーピングを行い、クラッド層中の擬フェルミ準位をバンド端に近づけて擬フェルミ準位と真性フェルミ準位との差を大きく (pn 接合のビルトイン障壁を大きく) することでキャリアのオーバーフローを抑制する検討を行った<sup>27)</sup>。図 3-4-5 に p 型 AlGaInP クラッド層における p 型キャリア濃度と赤色半導体レーザの静特性との関係を示す。

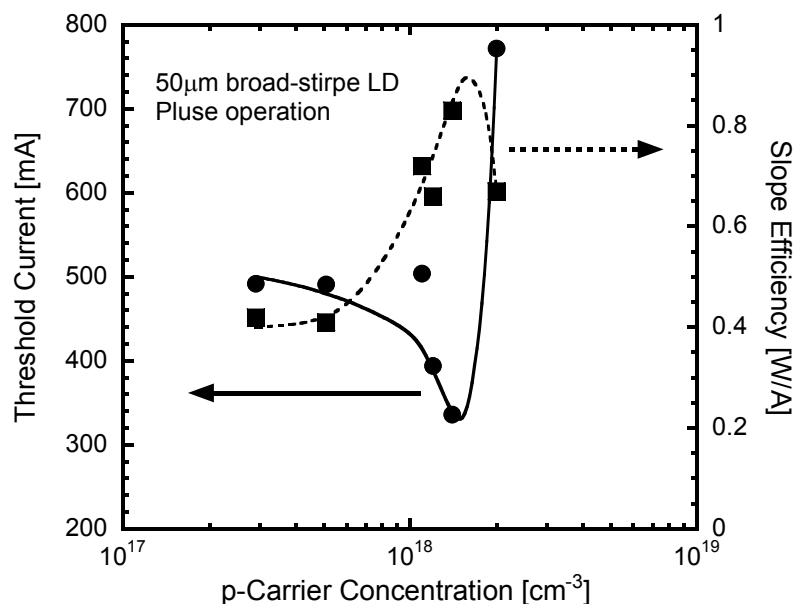


図 3-4-5 赤色半導体レーザにおける p 型キャリア濃度と静特性との関係

この検討には発光幅が 50 $\mu\text{m}$  のブロードエリアレーザを用い、パルス駆動にて特性の評価を行った。電流閾値、スロープ効率ともに p 型キャリア濃度を増やしていくことにより特性の向上が見られ、 $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  にて最も良好な特性が得られることが分かった。また更にキャリア濃度を増やしていくと急激な特性劣化が生じることが分かった。これは AlGaInP 結晶中のキャリア濃度があるレベルを超えると、p 型不純物である Zn の添加量を増やしてもキャリア濃度が増えずに飽和し、飽和した分以上のキャリアが不活性キャリアとして非発光再結合中心になったためと考えられる。

### (3) p 型ドーパントの活性化プロセス

MOCVD 成長法により作製した AlGaInP 系半導体レーザの問題として、p 型ドーパントとして添加された Zn がアクセプタとして機能しない、すなわち不活性化するという現象がある<sup>28)</sup>。不活性化はキャリア濃度の制御を困難にするだけでなく

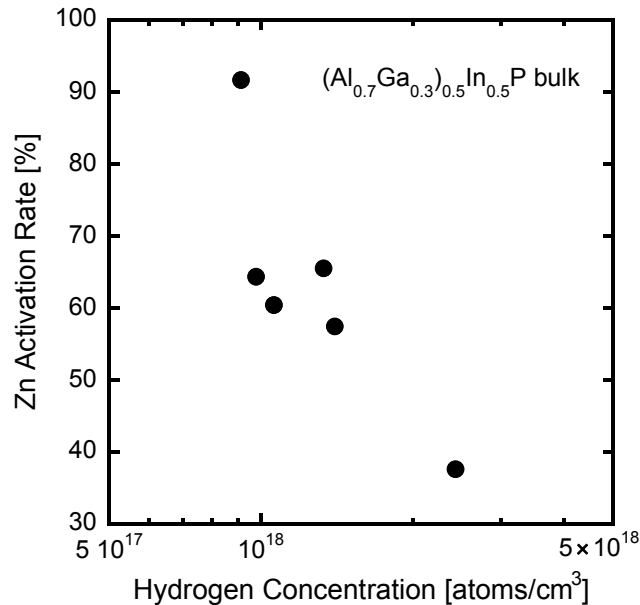


図 3-4-6 p 型 $(\text{Al}_{0.7}\text{Ga}_{0.3})_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  結晶中における水素濃度とキャリアの活性化

結晶中に欠陥を生じさせ、半導体レーザの特性を悪化させる原因となる。

この現象は AlGaInP 結晶内に水素が混入し、p 型ドーパントと V 族原子との結合が切れて V 族元素と水素が結合することにより、p 型ドーパントが不活性化するものとされている。そこで、この現象を確認するため作製した p 型 AlGaInP 結晶中における水素含有量とキャリアの活性化率との関係性を評価した。これを図 3-4-6 に示す。水素含有量は SIMS (Secondary Ion Mass Spectrometry : 二次イオン質量分析法) 分析により測定し、活性化率は「SIMS 分析による含有 Zn 濃度」と「CV 測定法による p 型キャリア濃度」との比率により算出している。図 3-4-6 から水素含有量が少ないほど活性化率が向上しており、過去の論文を裏付ける結果となった。

この AlGaInP 結晶中の残留水素を除去するため、結晶成長後にアニールを行う検討を行った。アニールは水素ガス雰囲気 10.1kPa 条件下にて 600°C、1 時間行った。図 3-4-7 はアニール前後の AlGaInP 結晶のキャリア濃度を CV 法により測定したものであるが、アニールにより活性化率が 60.0% から 90.2% にまで上がることが分か

った。この結果をもとに成長後のウェハに対して水素雰囲気中、600°Cでのアニールを行い、アクセプタの活性化を行うこととした。

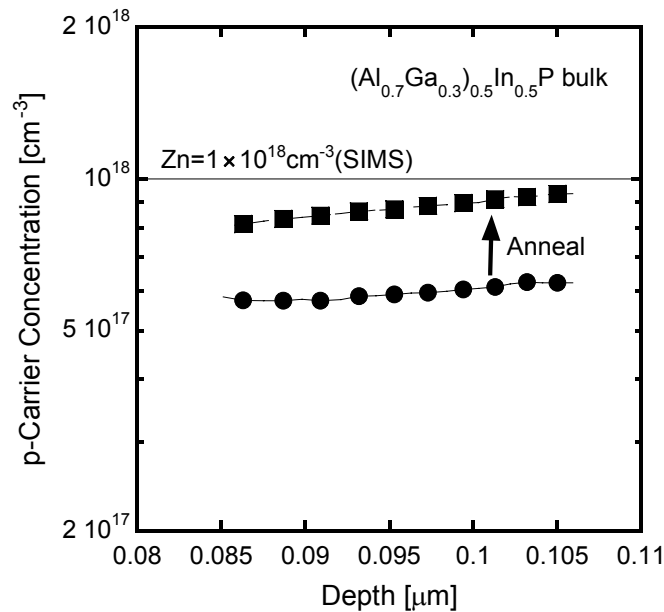


図 3-4-7 アニールによる p 型キャリア濃度の変化

#### (4) 傾斜基板角度

GaInP、AlGaInP 系材料は成長条件に依存してバンドギャップエネルギーが変わる性質をもっている<sup>29-31)</sup>。この材料系では結晶の組成が同じであってもⅢ族原子が規則的に並んで自然超格子を形成している状態と、無秩序に並んでいる状態とが成長条件の違いによって発生し、両者ではバンドギャップが 50~90meV ほど異なることが知られている。この秩序度合いは傾斜基板角度、成長温度、成長 V/Ⅲ比により変化する。図 3-4-8 は面方位が(100)面から<011>方向へ傾いた GaAs 基板上に GaInP を成長させ、そのときのフォトルミネッセンス・ピーク波長をプロットしたものである。傾斜角度 0~10 度にてピーク波長が急激に短波長化し、10 度以上ではほぼ一定値となることが分かる。この結果から発振波長を短波長化 (~0.66μm) するには傾斜基板を用いることが必要であると分かる。(レーザ発振時に生じる熱

の影響のため、発振波長はフォトルミネッセンス・ピーク波長よりも約 10nm 長波長化する。)

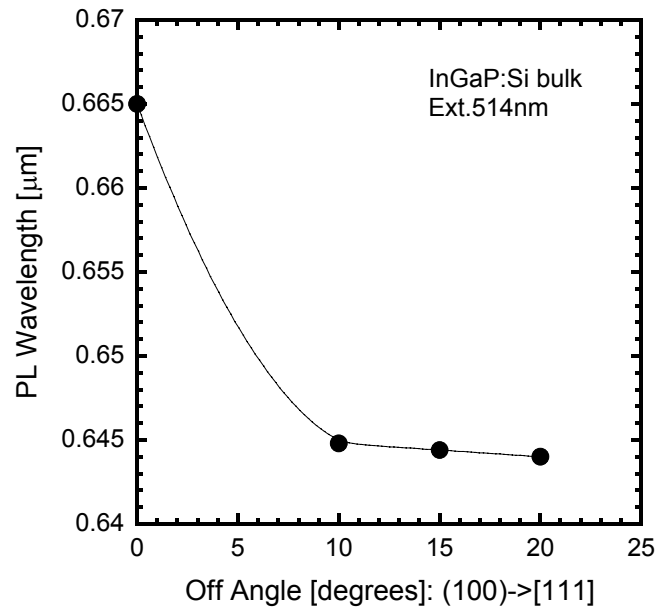


図 3-4-8 傾斜基板角度と GaInP 結晶の PL 波長

その一方で傾斜角度の大きい基板をリッジ導波型のレーザに用いた場合、通常 (111)面が傾斜面となるはずのリッジ構造がエッチングの方位依存性により活性層を挟んで非対称性となってしまうため導波モードがストライプ幅で完全に規制されず、近視野像が非対象となり横モードが不安定になりやすく電流-光出力特性にキックが発生しやすいという問題が生じる。これらを考慮し、本研究では、10 度の傾斜基板を用いることとした。

### 3.5 赤色半導体レーザの劣化モード解析

第 2 章で述べたように半導体レーザの劣化モードには、動作電流値が緩やかに上昇する緩慢劣化と通電中に光学損傷 (COMD) レベルが低下し、動作出力値と一致したときに端面破壊を起こして発振停止に至る衝撃劣化<sup>32)</sup>とがある。一般的に低出

力動作では緩慢劣化が、高出力動作では衝撃劣化が素子寿命を支配することが知られている<sup>33)</sup>。POF 通信システムの場合、出力が 5mW と低出力であるため、緩慢劣化が主な劣化モードだと考えられる。

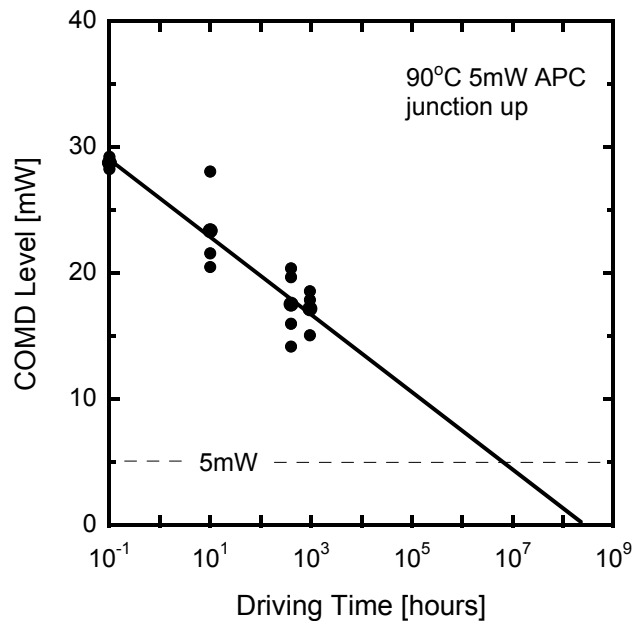


図 3-5-1 5mW 出力駆動時における COMD レベルの経時変化

これを検証するため、環境温度 90°C、出力 5mW、低出力（APC）駆動における赤色半導体レーザの COMD レベルの経時変化を調べた。その結果を図 3-5-1 に示す。経時にもない COMD レベルが低下していき、約 1000 万時間で動作出力である 5mW と一致することが分かった。この結果は仕様である 10 万時間程度の寿命特性を想定する場合、衝撃劣化が素子故障原因にはならないことを示している。

図 3-5-1 の結果から POF 通信システムにおける赤色半導体レーザの劣化要因は緩慢劣化であると推定した。そこで次に緩慢劣化に影響を与える動作電流密度と素子寿命との関係性を評価した。図 3-5-2 は 0.66 $\mu$ m 赤色半導体レーザにおける推定寿命と動作電流密度との関係性を調べた結果である。比較のため波長 0.94 $\mu$ m の赤外半導体レーザにおける評価結果も示した。推定寿命は初期動作電流値から 20%増加した



時点を故障と定義して算出している。赤色半導体レーザ、赤外半導体レーザともに動作電流密度の増加により推定寿命が短くなる傾向を示しているが、赤色半導体レーザのほうが動作電流密度の変化に対する推定寿命の変化が大きいことが分かる。

この結果は POE 通信システム仕様における赤色半導体レーザの長寿命化には動作電流密度の低減が非常に重要であることを示している。

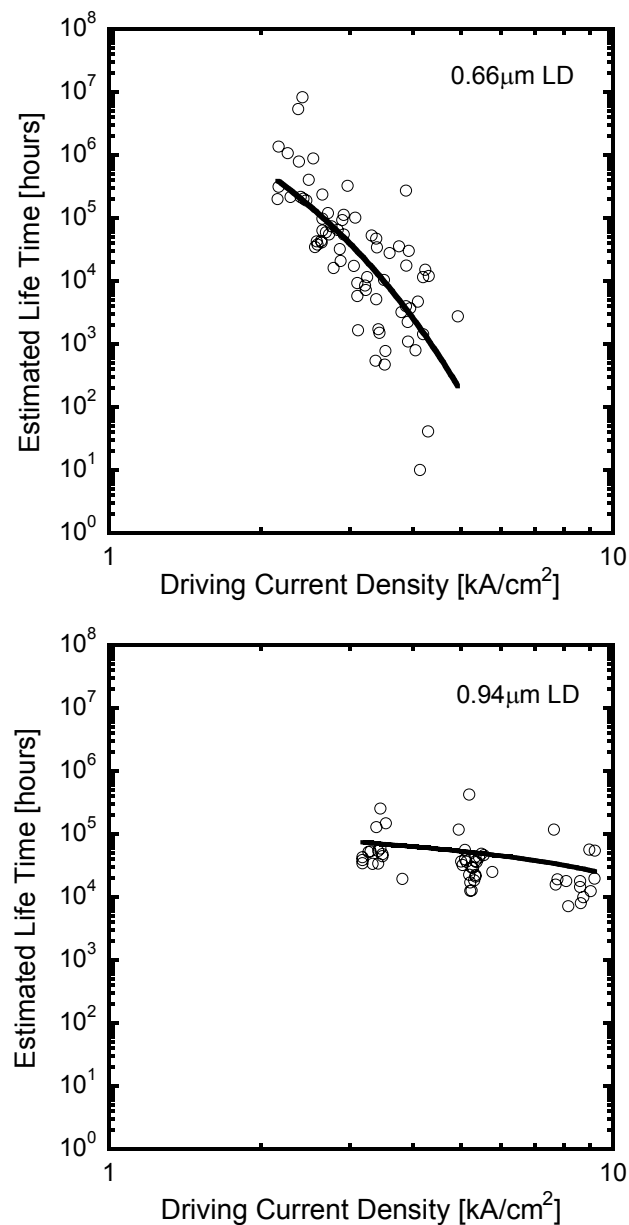


図 3-5-2 初期動作電流密度と推定寿命との関係  
上図：赤色半導体レーザ、下図：赤外半導体レーザ

### 3.6 AlGaInP 結晶の高品位化による寿命特性の改善

#### (1) 静特性

前節にて赤色半導体レーザの長寿命化には動作電流密度の低減が重要であることを示した。動作電流密度を低減するには、p 型 AlGaInP クラッド層のキャリア濃度を上げてビルトイン障壁を拡大する、共振器長、端面反射率を最適化することにより内部損失を低減するなどの方法が有効である<sup>34)</sup>。本研究でも同様の方法を採用しているが、これらに加え、結晶品質の改善による動作電流密度の低減に取り組んだ。

赤色半導体レーザを構成する $(Al_xGa_{1-x})_{0.5}In_{0.5}P$  結晶 ( $0 \leq x \leq 1$ ) は成長温度、V 族原料と III 族原料との供給モル比 (V/III 比)、成長温度、基板方位などの成長条件により結晶品質が変化することが知られている<sup>35-37)</sup>。本研究では特に V/III 比に着目して特性改善を試みた。V/III 比の制御は III 族原料を一定とし、V 族ガスの流量のみを変えることで行った。なお本検討ではレーザ結晶を成長する際の V 族ガス流量をクラッド層、光ガイド層、量子井戸層とで同一としており、V/III 比を変えた場合には全ての層の V/III 比が変化している。

図 3-6-1 は電流—光出力特性の温度依存性に V/III 比が与える影響を示したものである。図中に示した V/III 比は $(Al_{0.7}Ga_{0.3})_{0.5}In_{0.5}P$  クラッド層に対する値である。V/III を 170 から 550 に変えることで高温時における電流閾値が大幅に下がり、結果として最高発振温度が 20°C 上昇していることが分かる。

V/III=550 で成長した素子の 25°C における電流閾値は 58mA であり、5mW 連続発振時の動作電流値は 65mA、発振波長は 0.66 $\mu$ m である。遠視野像の半値幅は垂直方向が 33 度、水平方向が 7 度であった。V/III 比を変えることで内部損失が 17.6 $cm^{-1}$  から 12.9 $cm^{-1}$  に低減し、内部量子効率は 66.9% から 72.1% へと向上した。

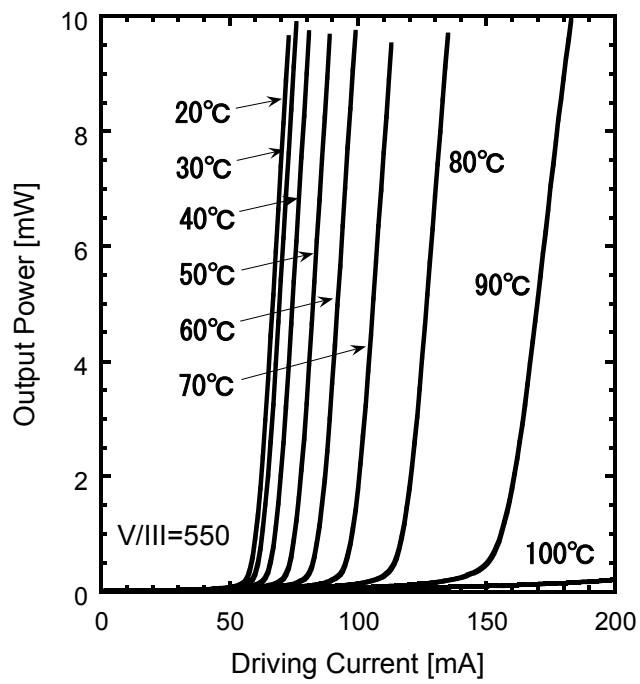
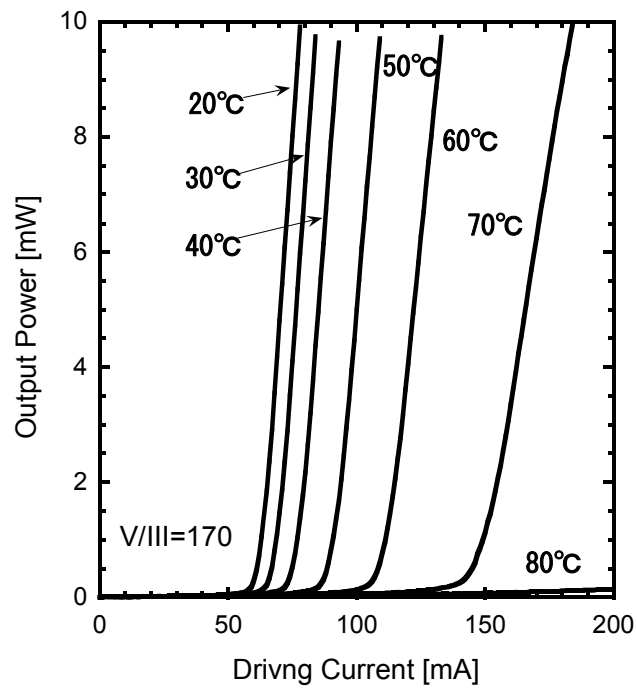


図3-6-1 V/Ⅲ比違いにおける電流-光出力特性の温度依存性  
 上図：低V/Ⅲ（170）、下図：高V/Ⅲ（550）

## (2) 寿命特性

V/Ⅲ比を 550 として作製した素子の寿命試験結果を図 3-6-2 に示す。70°C、5mW の APC 駆動条件において 1 万時間経過後も目立った劣化はなく、安定した動作が得られている。図 3-6-3 は環境温度  $T_a=70^\circ\text{C}$ 、 $80^\circ\text{C}$ 、 $90^\circ\text{C}$  で行った 5mW 出力の通電試験によって得られた推定寿命をプロットしたものである。推定寿命は初期駆動電流値から 20%増加した時点を故障と定義して算出している。環境温度による劣化の加速係数（活性化エネルギー）は各試験条件における半導体レーザの劣化率から算出した。各環境温度にて活性化エネルギーが異なっているが、これは動作電流値の増加に伴う素子自体の発熱により、素子内部の温度が環境温度の上昇分以上にあがっているためと考えられる。

また  $T_a=50^\circ\text{C}$  での試験も行ったが、劣化率が算出できなかつたため 50~70°C 間における活性化エネルギーは文献<sup>38)</sup>を参考に 1eV と仮定した。この場合、本素子の 60°C、5mW 駆動における平均寿命は 80 万時間以上、故障率 1%においても 20 万時間以上と見積もることができる。この寿命性能は、光通信用半導体レーザとして使用するのに十分な値である。

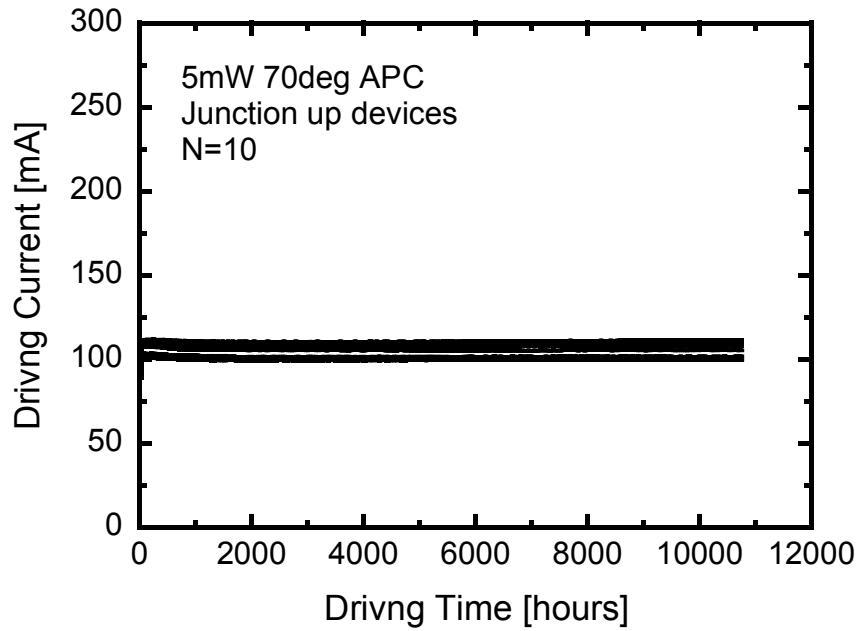


図 3-6-2 寿命試験結果 (5mW、70°C、APC 駆動)

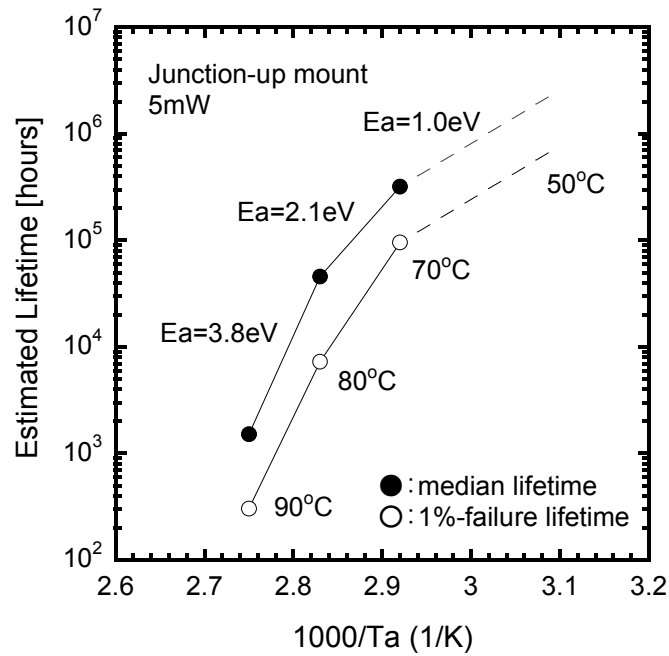


図 3-6-3 赤色半導体レーザの推定寿命

V/Ⅲ比による特性改善の原因ははっきりしないが、次のような実験から以下のように推測している。図3-6-4は50 $\mu\text{m}$ の発光幅をもつ赤色半導体レーザを用いて、p型クラッド層のみ、n型クラッド層のみ、p型およびn型クラッド層両方を高V/Ⅲ比にて成長させた各素子の寿命試験結果である。この実験からp型およびn型クラッド層ともに高V/Ⅲ比成長の効果が現れているが、よりp型クラッド層にて顕著であることが分かる。このことからV/Ⅲ比向上による寿命改善の効果はp型ドーパントであるZnによって生じる欠陥を抑制した効果によるものと考えられる。

なお文献ではAlGaInP結晶中の含有酸素量の低下による結晶品質向上が指摘されている<sup>39,40</sup>が、本研究で作製したAlGaInP結晶はV/Ⅲ比の変更前後にかかわらず、SIMS分析にて測定した酸素濃度が測定下限( $\sim 5 \times 10^{16} \text{atoms/cm}^3$ )以下であり、文献にて特性へ悪影響が生じるとされている $10^{17} \text{atoms/cm}^3$ レベルの酸素濃度は検出されなかった。このことから、本研究におけるV/Ⅲ比による特性改善は含有酸素量の影響ではないと考えている。

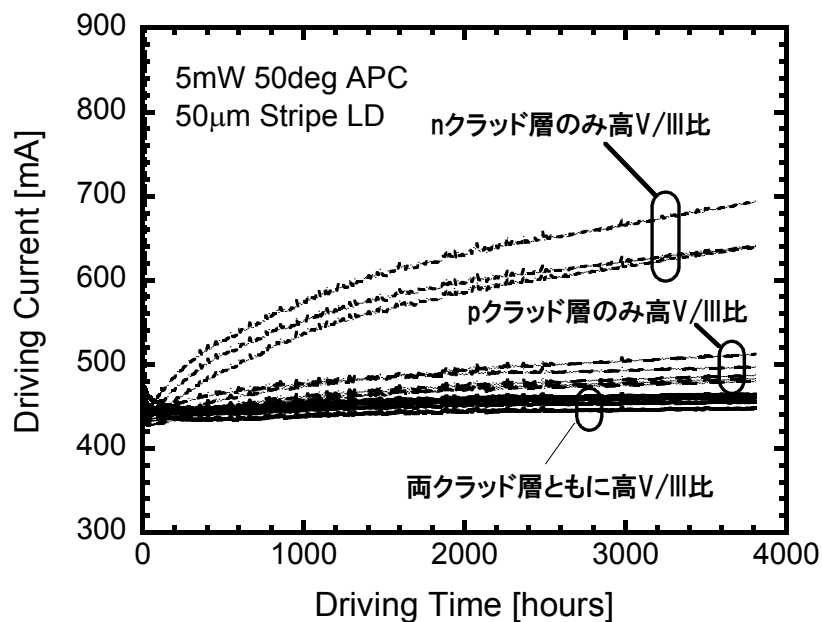


図 3-6-4 高V/Ⅲ成長が寿命性能に与える効果

### 3.7 GaInP 結晶の高品位化による寿命特性の改善

#### (1) 静特性

図 3-6-4 の結果から高 V/III 比での結晶成長は AlGaInP クラッド層に対する効果が大きいことが分かった。そこで次に量子井戸層である GaInP に対する V/III 比の効果を調べた。図 3-7-1 は厚さ  $0.5\mu\text{m}$  の GaInP バルク膜と GaInP 量子井戸層をもつレーザ構造からのフォトルミネッセンス (PL) 強度の V/III 比依存性を評価したものである。レーザ構造では前節と同じように AlGaInP、GaInP 層の V/III 比を同時に増減させている。また V/III 比の変化に伴い PL ピーク波長が変化するため、量子井戸層の厚さを調整して  $0.66\mu\text{m}$  で一致となるようにしている。

図 3-7-1 に示すようにレーザ構造では V/III 比の増加にともない PL ピーク強度が増加していくのに対して、GaInP バルク膜では V/III=35 で最大となり、その後は PL ピーク強度が低下していくことが分かる。このときの GaInP バルク膜の表面を AFM (Atomic Force Microscope : 原子間力顕微鏡) にて観察した結果を図 3-7-2 に示す。V/III=10 では V 族であるリンが不十分とみられる凹凸の大きい表面性となっており結晶品質が悪いことが想像できる。また V/III=35 と V/III=300 とを比較すると V/III=35 が無秩序状態になっているのに対して、V/III=300 では自然超格子が形成されていることが分かる (図 3-7-3 参照)。これがフォトルミネッセンスにて強度比が生じた原因と考えられる。

これらの結果は GaInP 層と AlGaInP 層とで最適な成長 V/III 条件が異なっており、かつ赤色半導体レーザでは GaInP 層よりも AlGaInP 層の品質のほうが特性に与える影響が大きいことを示唆している。

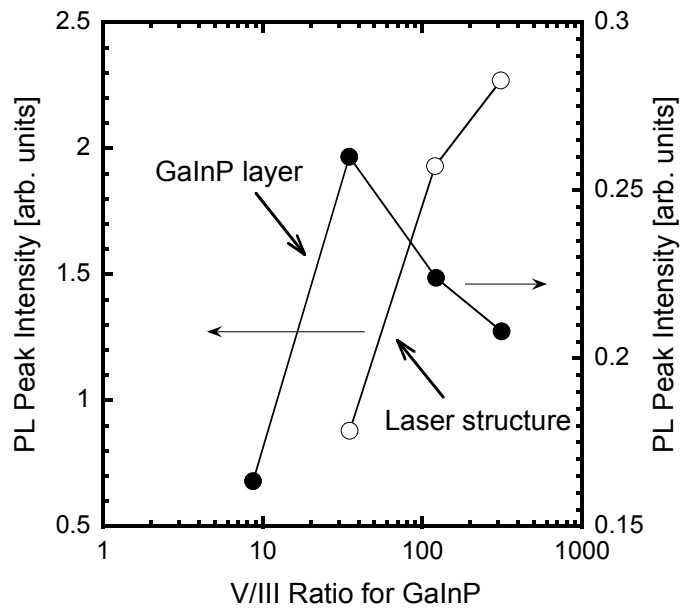


図 3-7-1 PL 強度の V/III 比依存性

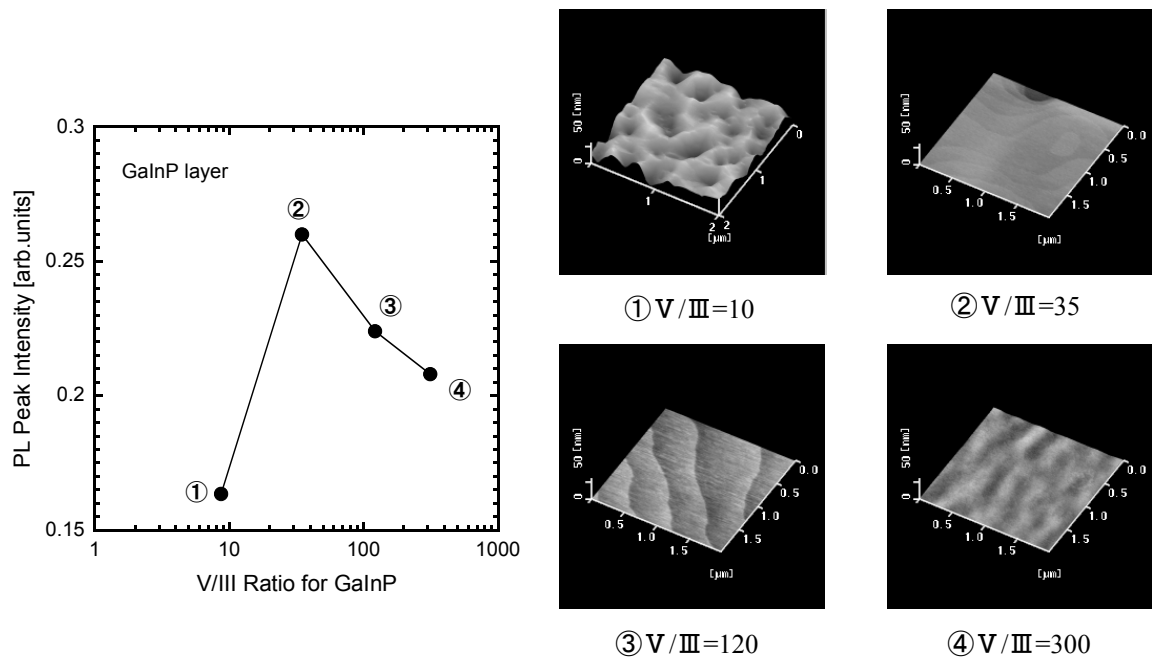
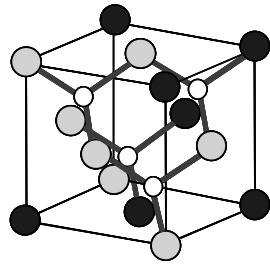


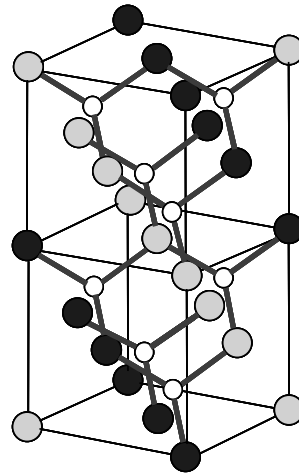
図 3-7-2 異なる V/III 比で成長した GaInP 層の表面 AFM 像



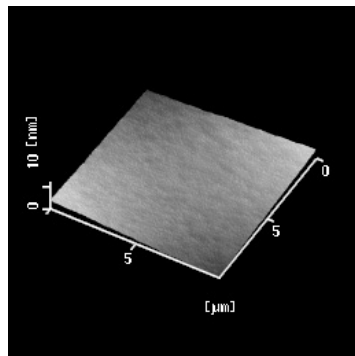
○ In ● Ga ○ P



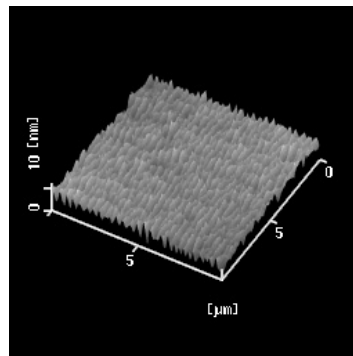
無秩序化状態の結晶構造



秩序化状態の結晶構造  
(自然超格子)



無秩序化状態の GaInP  
結晶の表面モフォロジ



秩序化状態の GaInP  
結晶の表面モフォロジ  
(自然超格子)

図 3-7-3 GaInP 結晶の無秩序化状態と秩序化状態

図 3-7-1 の結果をもとに AlGaInP 層の成長条件を高い V/Ⅲ比で一定とし、GaInP 量子井戸層の V/Ⅲ比を変化させたときの赤色半導体レーザの光学的、電気的特性の評価を行った。まずレーザ構造における PL ピーク強度の V/Ⅲ比依存性を図 3-7-4 に示す。V/Ⅲ比を変えるにあたり、AlGaInP 層の V 族ガス流量は 400scm で一定とし、GaInP 量子井戸層のみ V 族ガス流量を 5~300scm と変化させた。また先ほど

と同様に波長が  $0.66\mu\text{m}$  となるように量子井戸層厚みを調整した。比較のため図 3-7-4 に GaInP バルク膜における PL ピーク強度の V/III 比依存性も示したが、両者とも PL 強度が V/III=35 にて最大となり、傾向が一致することが分かった。

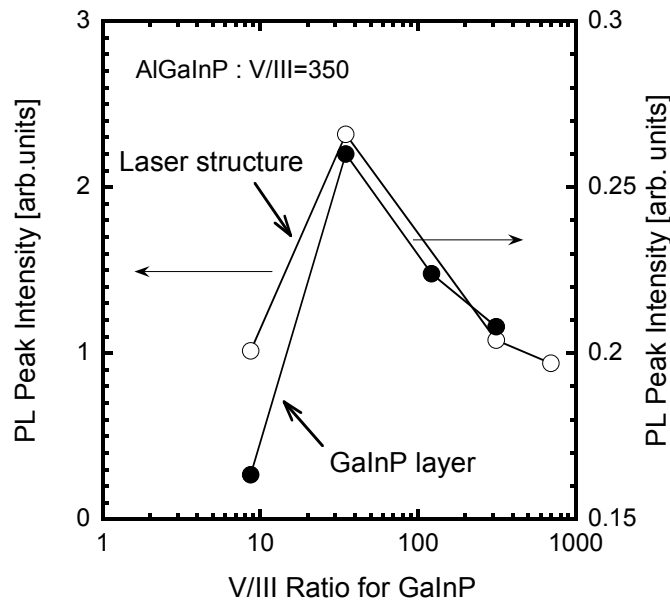


図 3-7-4 PL 強度の V/III 比依存性

次に赤色半導体レーザにおける電流閾値と外部微分量子効率の V/III 比依存性を評価した結果を図 3-7-5 に示す。図 3-7-4 と同様に AlGaInP 層の成長条件は高い V/III 比で一定とし、GaInP 量子井戸層の V/III 比のみ変えている。最小電流閾値と最大外部微分量子効率が V/III=35 にて得られ、図 3-7-4 の傾向と一致することが分かった。また  $50\mu\text{m}$  ストライプ幅の素子を使った評価では GaInP 量子井戸層の V/III 比を 700 から 35 へ減らすことによって内部ロスは変化しないものの、内部量子効率が 72.0% から 89.7% へと向上することが分かった。これらの結果は、GaInP 量子井戸層の成長 V/III 比条件を最適化することで量子井戸層の結晶品質を改善でき、かつ赤色半導体レーザの動作電流密度を低減できることを示している。

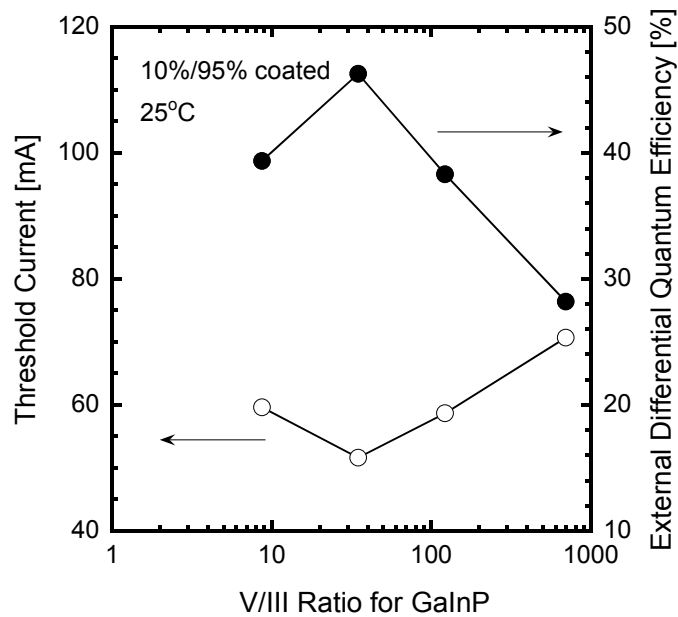


図 3-7-5 電流閾値と外部微分量子効率のV/III比依存性

## (2) 寿命特性

GaInP 量子井戸層の成長条件をV/III=35とした素子の寿命試験結果を図3-7-6に示す。試験条件は環境温度90°C、出力5mW、APC駆動である。比較のためV/III=700とした素子の試験データも示した。V/III=700で成長した素子は高温動作時における特性のばらつきが大きく、また短時間で劣化する素子が見られた。一方、V/III=35にて成長した素子は7000時間経過後も顕著な劣化を起こさず、安定した動作を続けている。この時点での劣化率から算出した推定平均寿命は10万時間を超えており、90°Cという高温環境動作にもかかわらず高い寿命性能を示すことが分かった。

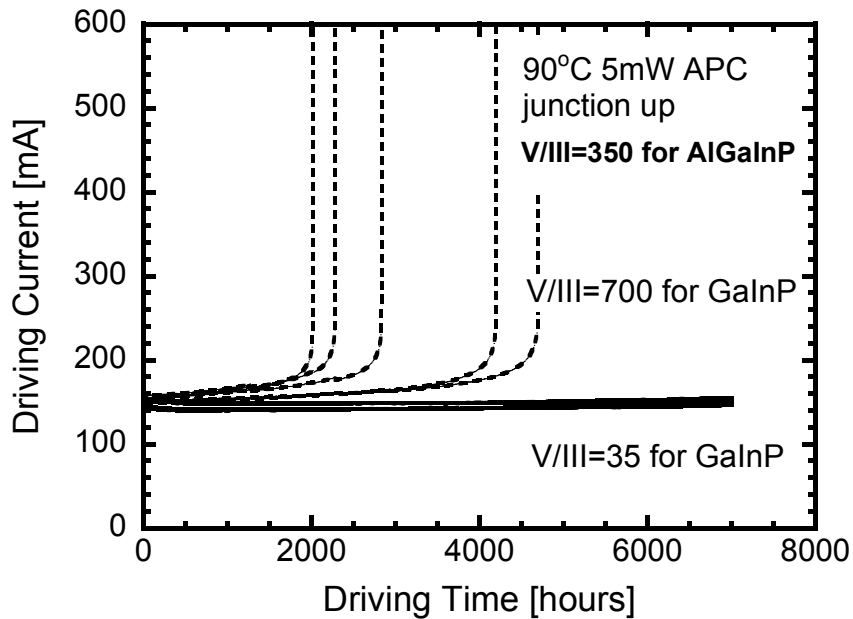


図 3-7-6 V/III比成長条件違いによる寿命試験結果

### 3.8 高速変調特性の改善

半導体レーザの変調特性は、寄生容量と半導体レーザ内部での光子とキャリアのダイナミクスによって決まる。そこで素子構造から等価回路モデル（図 3-8-1）をたて高速変調特性のシミュレーションを行い、変調特性を律速している部位の特定を行った。ボンディングワイヤはインダクタンス成分を持ち、電極コンタクト部、電流狭窄部、活性層には抵抗成分があり、 $\text{SiO}_2$  絶縁膜と電流狭窄層の pn 接合部にはキャパシタンス成分が存在する。インダクタンス成分とキャパシタンス成分は周波数特性を持っており、それがロールオフ（低周波側から高周波側に向かって信号が減衰していく現象）を引き起こす。高周波特性を改善するためには、このロールオフの傾きを小さくすることが必要である。そこでシミュレーションにより計算を行った結果、「電流ブロック層の pn 接合部」および「 $\text{SiO}_2$  絶縁膜部」に存在する寄生容量を小さくすることが有効であることが分かった。そこで電流狭窄層の pn 接

合部における寄生容量を低減するために、発光領域の外側に溝を形成して寄生容量を電氣的に分離した。また  $\text{SiO}_2$  絶縁膜の寄生容量に対してはパット電極を形成することで低減を行った。そのときの素子構造図を図 3-8-1 に示す。

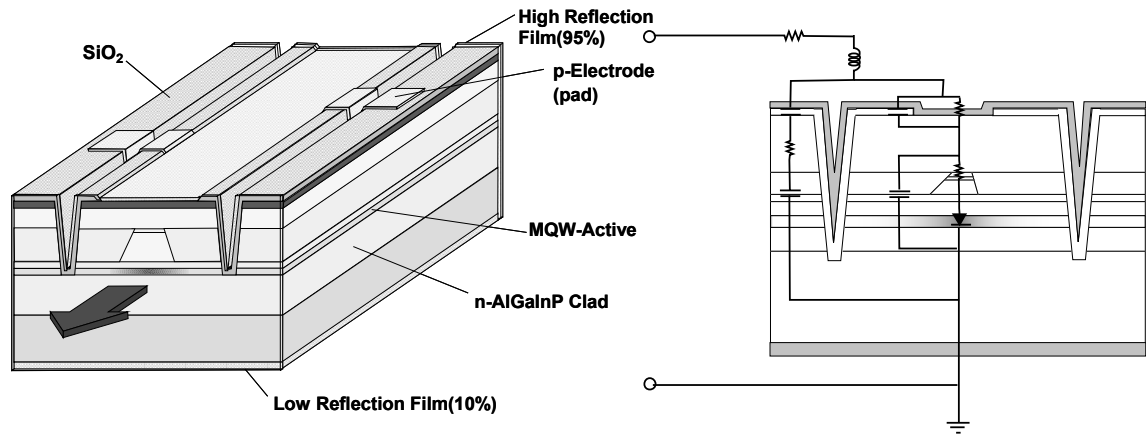


図 3-8-1 高速変調用の素子構造と等価回路図

その結果、数 100Mbps 程度であった応答特性が 1.25Gbps 以上に改善した。図 3-8-2 に 1.25Gbps の NRZ 信号で変調したときのビットエラーレート及びアイパターンを示すが、良好なアイ開口が得られており、1.25Gbps の高速変調が可能であることが示された。

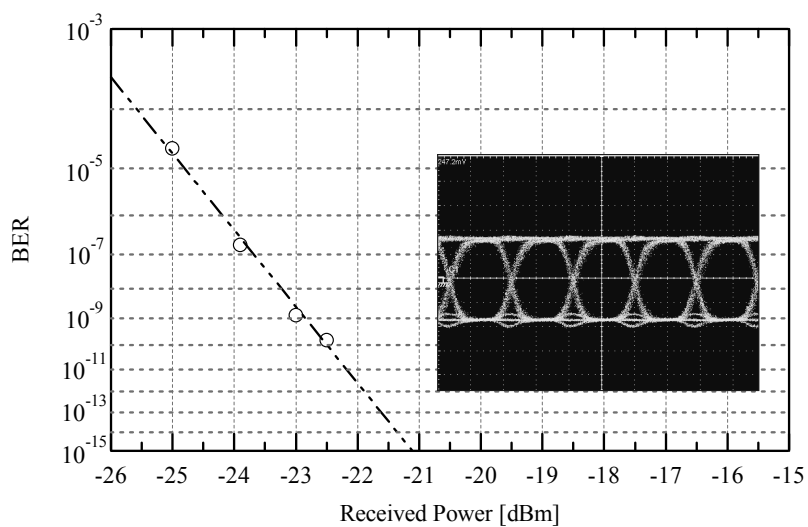


図 3-8-2 1.25Gbps 変調時の BER とアイパターン

### 3.9 まとめ

POF 通信用光源としての応用を目指し、赤色半導体レーザの高信頼性化と高速変調特性の向上について検討を行った。赤色半導体レーザにおける AlGaInP 層の結晶品質を改善することで 60°C、5mW、APC 駆動において推定平均寿命 80 万時間、故障率 1%においても推定寿命 20 万時間を達成した。さらに GaInP 量子井戸層の品質を改善することで 90°C、5mW、APC 駆動において 10 万時間を超える推定平均寿命の見込みが得られた。また高速変調特性として、半導体レーザ内部の寄生容量を低減する構造を採用することで 1.25Gbps の変調特性を実現した。

これらの結果は通信用光源として要求される特性を赤色半導体レーザにて実現し得ることを示している。

### 第3章の参考文献

- 1) Hans. Poisel, Olaf. Zieman, Karl-Friedrich. Klein, "Trends in Polymer Optical Fibers", Proc. SPIE Int Soc Opt Eng., Vol.5131, p213-219 (2003)
- 2) 塚本好宏, "プラスチック光ファイバ(POF)と車載用POFケーブルに要求される性能", 光と繊維, Vol.66, pp.303-307 (2010)
- 3) H. Suganuma, T. Matsunaga, "Plastic optical fibers for automotive applications", Proc. SPIE 1592, pp.165-172 (1991)
- 4) J. Cirillo and R. E. Steele, "High speed plastic networks (HSPN) program overview", Proc. 4th International Conf. Plastic Optical Fibers & Applications, pp.16-21 (1995)
- 5) J. Farenc, and P. Destruel, "Illumination, signalisation, and decoration using plastic optical fibers", Proc. 4th International Conf. Plastic Optical Fibers & Applications, pp.203-205 (1995)
- 6) D. Kalymnios, "Plastic optical fibres (POF) in sensing: current status and prospects", Proc. SPIE 5855, pp.1-4 (2005)
- 7) J. D. Lambkin, T. McCormack, T. Calvert, and T. Moriarty, "ADVANCED EMITTERS FOR PLASTIC OPTICAL FIBRE", ICPOF, pp.15-18 (2002)
- 8) J. Hashimoto, T. Katsuyama, J. Shinkai, I. Yoshida, and H. Hayashi, "Highly stable operation of AlGaInP/GaInP strained multiquantum well visible laser diodes", Electron. Lett., Vol.28, No.14, pp.1329-1330 (1992)
- 9) M. Ishikawa, H. Okuda, K. Itaya, H. Shiozawa, and Y. Uematsu, "Long-term reliability tests for InGaAlP visible laser diodes", Jpn. J. Appl. Phys, Vol.28, No.9, pp.1615-1621 (1989)
- 10) K. Kobayashi, S. Kawata, A. Gomyo, and T. Suzuki, "Room-temperature CW operation of AlGaInP double-heterostructure visible lasers", Electron. Lett., Vol.21, No.20, pp.931-932 (1985)

- 11) M. Ikeda, Y. Mori, H. Sato, K. Kaneko, and N. Watanabe, "Room-temperature Continuous-wave operation of an AlGaInP double heterostructure laser grown by atmospheric pressure metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.47, No.10, pp.1027-1028 (1985)
- 12) M. Ishikawa, Y. Ohba, H. Sugawara, M. Yamamoto, and T. Nakanishi, "Room temperature cw operation of InGaP/InGaAlP visible light laser diodes on GaAs substrates grown by metalorganic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.48, No.3, pp.207-208 (1986)
- 13) K. Domen, K. Sugiura, C. Anayama, M. Kondo, M. Sugawara, T. Tanahashi, K. Nakajima, "Study on radiative efficiency in AlGaInP/GaInP double heterostructures: influence of deep level in cladding layers", *J. Crystal Growth* Vol.115, pp.529-532 (1991)
- 14) D. P. Bour, D. W. Treat, R. L. Thornton, R. S. Geels, and D. F. Welch, "Drift Leakage Current in AlGaInP Quantum-Well Lasers", *IEEE J. Quantum Electron*, Vol.29, No.5, pp.1337-1343 (1993)
- 15) H. Fujii, Y. Ueno, and K. Endo, "Effect of thermal resistivity on the catastrophic optical damage power density of AlGaInP laser diodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.62, No.17, pp.2114-2115 (1993)
- 16) D. P. Bour, K. J. Beernink, and D. W. Treat, R. S. Geels, and D. F. Welch, "AlGaInP single quantum well laser diodes", *SPIE Vol.2115 Visible and UV Lasers* pp.269-280 (1994)
- 17) J. Rennie, M. Okajima, M. Watanabe, and G. Hatakoshi, "High temperature (74°C) CW operation of 634nm InGaAlP laser utilizing a multiple quantum barrier", *Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Int. Semiconductor Laser Conf.*, paper G-4, pp.158-159 (1992)
- 18) A. Valster, C. J. van der Poel, M. N. Finke, and M. J. B. Boermans, "Effect of strain on the threshold of GaInP/AlGaInP quantum well lasers emitting at 633 nm", *Proc. 13<sup>th</sup> IEEE Int.*



- Semiconductor Laser Conf., paper G-1, pp.152-153 (1992)
- 19) K. Itaya, M. Ishikawa, G. Hatakoshi, M. Okajima, and Y. Uematsu, "Window structure InGaAlP visible light laser diodes by self-selective diffusion induced disordering", Proc. 12<sup>th</sup> IEEE Int. Semiconductor Laser Conf., paper C-5, pp.36-37 (1990)
  - 20) Y. Ueno, H. Fujii, K. Kobayashi, K. Endo, A. Gomyo, K. Hara, S. Kawata, T. Yuasa, and T. Suzuki, "Novel window-structure AlGaInP visible-light laser diodes with non-absorbing facets fabricated by utilizing GaInP natural superlattice disordering", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.29, No.9, pp.L1666-1668 (1990)
  - 21) K. Shibata, Y. Yoshida, M. Sasaki, K. Ono, J. Horie, T. Yagi, and T. Nishimura, "High power 660-nm laser diodes for recordable dual layer DVD", Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Int. Semiconductor Laser Conf., paper FA7, pp.121-122 (2004)
  - 22) D. Imanishi, Y. Sato, K. Naganuma, S. Ito, and S. Hirata, "Highly reliable 7W operation of 644nm wavelength laser diodes arrays with top-hat near field pattern", Proc. 19<sup>th</sup> IEEE Int. Semiconductor Laser Conf., paper ThA8, pp.49-50 (2004)
  - 23) M. Ishikawa, Y. Ohba, Y. Watanabe, H. Nagasaka, H. Sugawara, M. Yamamoto and G.Hatakoshi, "InGaAlP transverse mode stabilized visible light laser diodes fabricated by MOCVD selective growth", Extended Abstracts, 18<sup>th</sup> Conf. on Solid State Devices and Materials, Tokyo, pp.153-156 (1986)
  - 24) K. Nitta, K. Itaya, M. Ishikawa, Y. Watanabe, G. Hatakoshi, and Y. Uematsu, "Astigmatism in Ridge-Stripe InGaAlP Laser Diodes", Jpn. J. Appl. Phys., Vol.28, No.11, pp.L2089-2091 (1989)
  - 25) A. R. Adams, "Band-structure for low-threshold current high-efficiency semiconductor laser", Electron. Lett., Vol.22, No.5, pp.249-250 (1986)
  - 26) C. J. Chang-Hasnain, R. Bhat, and M. A. Koza, "High-performance 634 nm InGaP/InGaAlP

- strained quantum well lasers”, *Electron. Lett.*, Vol.27, No.17, pp.1553-1555 (1991)
- 27) M. Okajima, H. Shiozawa, H. Okuda, G. Hatakoshi, M. Ishikawa, and Y. Uematsu, “InGaAlP visible laser diodes oscillating below 670 nm”, *Tech. Digest, Int. Symposium on Optical Memory 27D-8* (1989)
- 28) S. Minagawa, M. Kondow, H. Yanagisawa, and T. Tanaka, “Effect of cap layer and cooling atmosphere on the hole concentration of p(Zn)-AlGaInP grown by organometallic vapor phase epitaxy”, *J. Crystal Growth* 118 pp.425-429 (1992)
- 29) M. Kondow, H. Kakibayashi, and S. Minagawa, “Ordered structure in OMVPE grown Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>P”, *J. Crystal Growth* 88 pp.291-296 (1988)
- 30) S. Minagawa, M. Kondow, “Dependence of photoluminescence peak energy of MOVPE grown AlGaInP on substrate orientation”, *Electron. Lett.*, Vol.25, No.12, pp.758-759 (1989)
- 31) Y. Ohba, M. Ishikawa, H. Sugawara, M. Yamamoto, and T. Nakanisi, “Growth of high-quality InGaAlP epilayers by MOCVD using methyl metalorganics and their application to visible semiconductor lasers”, *J. Crystal Growth* 77 pp.374-379 (1986)
- 32) M. Fukuda, M. Okayasu, J. Temmyo, and J. Nakano, “Degradation behavior of 0.98 μm strained quantum well InGaAs/AlGaAs lasers under high-power operation”, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.30, No.2, pp.471-476 (1994)
- 33) M. Watanabe, H. Shiozawa, O. Horiuchi, Y. Itoh, M. Okada, A. Tanaka, K. Gen-ei, N. Shimada, H. Okuda, and K. Fukuoka, “High-temperature operation (70°C, 50mW) of 660-nm-band InGaAlP Zn-diffused window lasers fabricated using highly Zn-doped GaAs layers”, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.5, No.3, pp.750-755 (1999)
- 34) G. Hatakoshi, K. Nitta, Y. Nishikawa, K. Itaya, and M. Okajima, “High-temperature operation of high-power InGaAlP visible laser diodes”, *SPIE Vol.1850* pp.388-396 (1993)
- 35) A. Gomyo, K. Kobayashi, S. Kawata, T. Suzuki, and T. Yuasa, “Studies of Ga<sub>x</sub>In<sub>1-x</sub>P layers

- grown by metalorganic vapor phase epitaxy; Effects of V/III ratio and growth temperature”,  
J. Crystal Growth, Vol.77, No.1-3, pp.367-373 (1986)
- 36) T. Suzuki, A. Gomyo, I. Hino, K. Kobayashi, S. Kawata, and S. Iijima, “P-type doping effects on Band-gap energy for  $\text{Ga}_{0.5}\text{In}_{0.5}\text{P}$  grown by metalorganic vapor phase epitaxy”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.27, No.8, pp.1549-1552 (1988)
- 37) T. Tanaka, S. Minagawa, T. Kawano, and T. Kajimura, “Lasing wavelength of index-guided AlGaInP semiconductor laser as function of off-angle from (100) plane of GaAs substrate”, Electron. Lett., Vol.25, No.14, pp.905-907 (1989)
- 38) K. Endo, K. Kobayashi, H. Fujii, and Y. Ueno, “Accelerated aging for AlGaInP visible laser diodes”, Appl. Phys. Lett., Vol.64, No.2, pp.146-148 (1994)
- 39) Y. Noshikawa, H. Sugawara, M. Ishikawa, and Y. Kokubun, “Effects of V/III ratio on Zn electrical activity in Zn-doped InGaAlP grown by metalorganic chemical vapor deposition”, J. Crystal Growth, Vol.108, pp.728-732 (1991)
- 40) Y. Nishikawa, M. Suzuki, and M. Okajima, “Effects of growth parameters on oxygen incorporation into InGaAlP grown by metalorganic chemical vapor deposition”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol.32, No.1B, pp.498-501 (1993)

## 第4章 1.0 $\mu\text{m}$ 帯半導体発光素子の「広帯域化」と「高出力化」

### 4.1 はじめに

第4章では半導体発光素子における光スペクトル幅の広帯域化と、高出力化の両立をめざした検討について述べる。ここで検討する広い発光スペクトルをもつ光源は広帯域光源と呼ばれ、その特徴を活かして様々な用途に用いられている。特に近年、光センシング技術への応用が注目されている。これは光を対象物に照射することで生じる相互作用を観測し、対象物の構造・特性を非破壊的に計測する技術である。最近では医療診断分野において積極的に応用され、OCT (Optical Coherence Tomography) <sup>1-3)</sup>や血糖値計測 <sup>4)</sup>、血液中の酸素濃度測定などが研究されている。これらは波長 0.6~1.2 $\mu\text{m}$  前後の近赤外光 (すなわち「生体の窓」と呼ばれる波長領域) がもつ生体透過性 <sup>5)</sup>を利用して、生体内部の様子、または特定物質の状態を数値化、画像化することを目的としている。

光センシングには対象物からの情報量を増やすため、波長の異なる光を放出できる広帯域光源が用いられる。広帯域光源にはランプ光源やスーパーコンティニューム光 <sup>6)</sup>を用いた光源など様々なものがあるが、医療診断用として要求される波長帯域、輝度、集光特性、コストを考慮すると光半導体素子をもっとも有望である。このような広い発光スペクトルと光の指向性をもつ光半導体素子はスーパールミネッセントダイオード (SLD : Superluminescent Diode) <sup>7)</sup>と呼ばれ、半導体レーザの高輝度性と発光ダイオードがもつ低コヒーレンス性を備えた光デバイスとして知られている。本研究では新たな素子構造を用いることで、スーパールミネッセントダイオードにおいてトレードオフの関係にある発光スペクトル幅の広帯域化と高出力化を両立させることに成功した。本章では、その素子性能と、それを実現した技術について述べる。

## 4.2 本章の目的

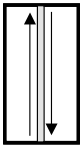
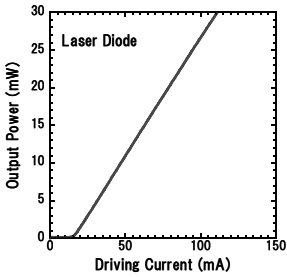
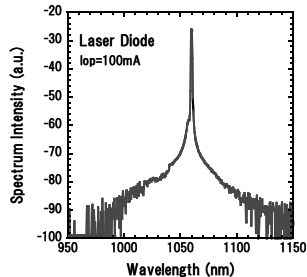
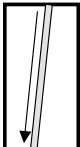
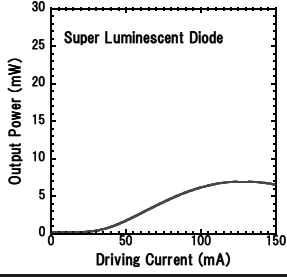
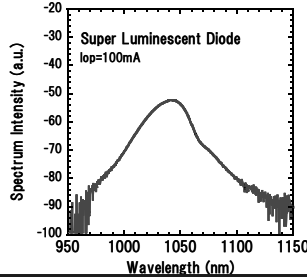
本研究は発光波長  $1.0\mu\text{m}$  帯のスーパーluminescentダイオードを用いて、発光スペクトル幅の広帯域化と高出力化を両立させる技術を確立することを目的として研究を行った。発光波長を  $1.0\mu\text{m}$  帯とした理由は、「生体の窓」領域の波長であり、かつ波長  $1.05\mu\text{m}$  にて水の分散と吸収が極小値を持つ<sup>8,9)</sup>ため、体内医療診断用途として  $1.0\mu\text{m}$  帯が有望<sup>10)</sup>と考えたためである。

## 4.3 従来技術における広帯域半導体素子と $1.0\mu\text{m}$ 帯発光素子

### (1) 広帯域半導体発光素子

表 4-3-1 はスーパーluminescentダイオードの性質を半導体レーザと比較したものである。半導体レーザが共振器構造をもち、誘導放出現象を積極的に利用しているのに対して、スーパーluminescentダイオードは構造的に発振を抑制し、増幅された自然放出光を放出するものである。

表 4-3-1 半導体レーザとスーパーluminescentダイオードの特徴比較

	導波路構造	電流-光出力特性	光スペクトル特性
半導体レーザ	 レーザ光 (共振器構造)		
広帯域半導体発光素子 (スーパーluminescentダイオード)	 増幅自然放出光 (発振抑制構造)		

このため半導体レーザと比較してスーパーミネッセントダイオードは光出力が小さいが、発光スペクトル幅は広がる。本研究の目的はこのスーパーミネッセントダイオードにおいて、広帯域化と高出力化を両立させることにある。しかしこの2つの特性は半導体発光素子の原理上、トレードオフの関係にある。

この関係は図4-3-1から読み取ることができる。この図は1つの量子井戸層を備えたスーパーミネッセントダイオードを作製し、0~400mAの範囲で駆動させたときの最大光出力値における光スペクトル幅をプロットしたものである。パラメータとしてスーパーミネッセントダイオードの素子長  $L_c$  を用い、光出力値と光スペクトル幅がどのように変化するかを示している。この図から素子長  $L_c$  が長くなると光出力が向上するが、光スペクトル幅は狭くなることから分かる。これは半導体発光素子の発光原理と関係がある。反転分布の大きな半導体利得媒体中でランダムに発生した自然放出光は素子中を通過する間に誘導放出現象により増幅され、増幅自然放出光として放出される。

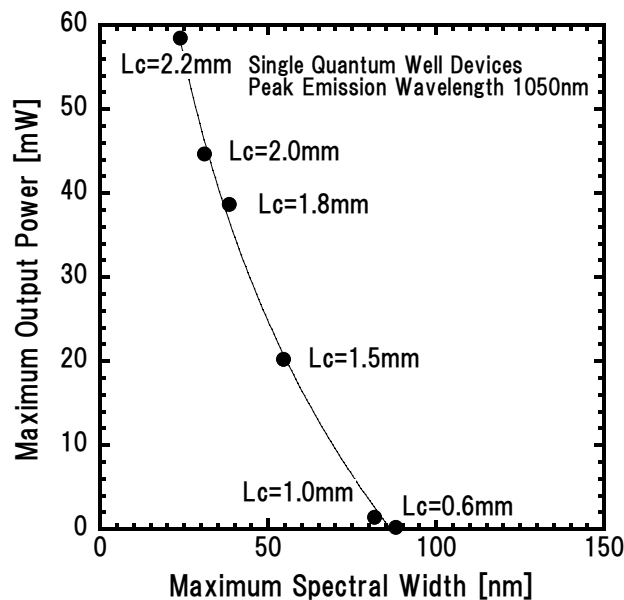


図4-3-1 スーパーミネッセントダイオードにおける光出力とスペクトル幅の関係

図 4-3-2 は、半導体発光素子における発光メカニズムを示したものである。半導体素子内部において電子は存在できる場所が決まっており、エネルギーが高い励起準位と低い基底準位の状態が存在する「2 準位モデル」で表すことができる。これ以外の中間的な場所には電子の存在は許されない。励起準位にある電子が基底準位に落ちるときにエネルギー差である  $E_g$ 、すなわち  $\lambda = 1.24/E_g$  ( $\lambda$  は光の波長( $\mu\text{m}$ )、 $E_g$  はバンドギャップ(eV)) に相当する波長光が放出される。

気体の場合には、電子の存在場所がエネルギー的に狭い範囲（準位）に限られており、その準位間で発光（ライン間遷移）する。一方、半導体の場合は存在場所がエネルギー的に幅をもったバンド構造をもち、励起準位のある幅をもった領域（伝導帯）から基底準位のある幅をもった領域（価電子帯）へ遷移して発光（バンド間遷移）する。このため光半導体素子はバンド幅に相当するブロードな波長光を放射する。このバンド幅分に相当する波長帯域が利得スペクトル幅であり、半導体発光素子の帯域幅はこの利得スペクトル幅に依存する。

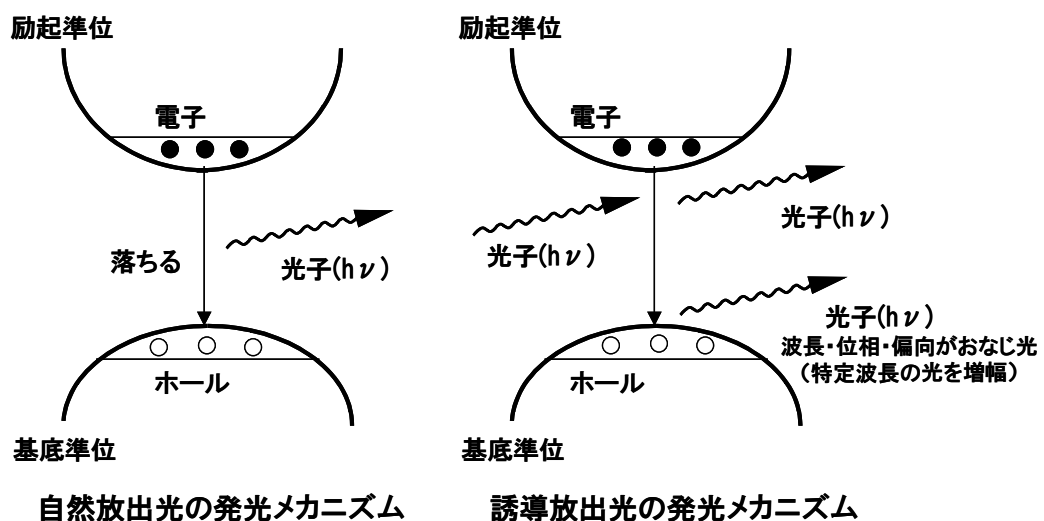


図 4-3-2 半導体発光素子における量子的発光機構

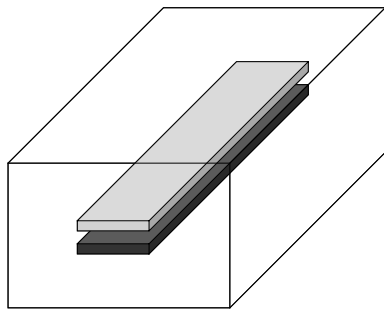
励起準位から基底準位への電子の落ち方には2通りある。1つは電子が自主的に落ちて光（フォトン）を出す「自然放出」、もう1つが外からの光（フォトン）が励起準位の電子に刺激を与え、それが引き金となって電子を基底準位に強制的に落とすことで光（フォトン）をだす「誘導放出」である。自然放出による光は電子が自由に落ちることによって生じるため、光の波長がばらばらなのに対して、誘導放出による光は電子を落とす引き金となった光と同じ波長、位相、偏光をもつ。この誘導放出現象は光の増幅現象と言い換えることができる。外から1個のフォトンが光半導体素子に入り、誘導放出により同じ波長、位相、偏光のフォトンが新たに生成されることから、結果的に光の強度が増えたと見なすことができる。このように半導体発光素子は、弱い自然放出光を誘導放出によって大きな出力へと変える機構をもったデバイスだと言える。

図 4-3-1 において素子長  $L_c$  を長くすることは誘導放出の回数を増やすことに相当する。反転分布の大きな半導体利得媒体中でランダムに発生した自然放出光は素子中を通過する間に誘導放出現象により増幅され、増幅自然放出光として放出される。しかし誘導放出は外部から入射された光と同じ波長・位相・偏向の光を放出（増幅する）ものであるため、誘導放出の回数を増やせば高出力化されるものの、同一波長光の成分が増えるため発光スペクトル幅が狭くなる。このことは発光スペクトル幅の広帯域化と高出力化がトレードオフの関係にあることを示している。

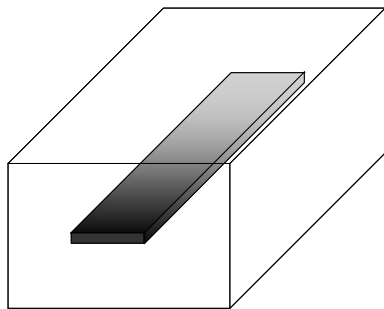
誘導放出による光スペクトル幅の狭帯化を防ぐには活性層における利得スペクトルを広くし、素子内で様々な波長の光をできるだけ均一に発光させることが重要である。これを実現する方法として図 4-3-3 に示すように、異なる量子井戸層を積層する<sup>11)</sup>、選択成長法により素子長方向に量子井戸層内の組成を変調させる<sup>12)</sup>、量子ドットを用いて量子井戸層内の組成を変調させる<sup>13)</sup>などの方法をとることが



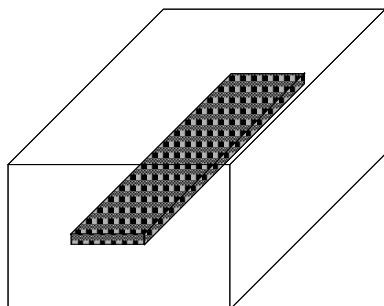
できる。これらの方法により波長の異なる光が素子内で合波され、広帯域化および高出力化が期待できる。ただし誘導放出現象による発光スペクトルの狭帯化を防ぐため、各利得スペクトルの重なり度合いを厳密に制御して過度な誘導放出を抑制する必要がある。構造 a よりも構造 b、そして構造 c のほうがより広帯域化が可能と思われるが、素子作製の難易度があがっていき設計通りの利得スペクトルを実現するのが非常に難しい。そこで本研究では、複数の量子井戸層を積層させる構造 a を用いて、広帯域化および高出力化の両立を目指す検討を行うこととした。



構造 a : 異なる量子井戸層を集積化する



構造 b : 選択成長法により素子長方向に量子井戸層内の組成を変調する



構造 c : 量子ドットの不均一性を利用して量子井戸層内の組成を変調する

図 4-3-3 半導体発光素子における広帯域化手段の概念図

なお図 4-3-3 に示した広帯域化の概念はいずれも InP 材料系での研究報告例があり、目新しいものではない。しかし本研究で使用する GaAs 材料系は、InP 材料系と比較して活性層における光閉じ込め率が高くなる<sup>注 1)</sup>ため、素子設計がより難しくなる。具体的には光閉じ込め率が大きい GaAs 材料系では利得が大きくなるため、誘導放出による波長帯域の狭帯化が生じやすくなる。また各量子井戸層における利得が大きいため個々の量子井戸でのキャリア使用量が大きく、バンドギャップの大きい量子井戸層へのキャリア注入がされにくい。そのため異なるバンドギャップの量子井戸層を多数積層しても高エネルギー側の量子井戸層にキャリアが注入されず、光スペクトルを広帯域化しにくい。

また InP 系における研究報告はデバイス性能が主で、量子井戸構造とデバイス挙動に関する詳細な報告がなされていない。本研究ではこれらの先行研究の状況をふまえて、素子構造が広帯域化と高出力化に与える影響を詳細に評価することとした。

注 1) 「クラッド層/活性層/クラッド層」構造において、活性層が薄い場合には、光閉じ込め率  $\Gamma$  は次のように近似することができる。<sup>14)</sup>

$$\Gamma \propto (d / \lambda)^2 \quad (4-1)$$

ここで  $d$  は活性層の膜厚、 $\lambda$  は発光波長である。このため GaAs 系発光材料（波長範囲 0.65~1.20 $\mu\text{m}$ ）は InP 系発光材料（波長範囲 1.3~1.55 $\mu\text{m}$ ）よりも光閉じ込め率が高くなる。もし素子構造が同じで、発光波長が 1.05 $\mu\text{m}$  と 1.3 $\mu\text{m}$  の素子を比較した場合、光閉じ込め率は波長 1.05 $\mu\text{m}$  のほうが約 1.5 倍強まることになる。

## (2) 1.0 $\mu\text{m}$ 帯発光素子

1.0~1.1 $\mu\text{m}$  は GaAs 基板に格子整合した材料系では実現することができない波長帯域である。そのため格子整合系からはずれた「歪み量子井戸層」を用いる必要が

ある<sup>15-18)</sup>。井戸層に含まれる歪みを大きくすればするほど長波長化することができる。しかし歪みが臨界応力を超えると結晶中に欠陥（転位）が発生し、素子は急激に劣化してしまう。このためにこの波長帯域での発光素子の作製は非常に難しいとされている（詳細は5.3節を参照のこと）。具体的には波長1.1 $\mu\text{m}$ まではCW動作における報告があるが、波長1.2 $\mu\text{m}$ ではパルス動作の報告しかされていない。本研究ではこれら先行研究をふまえて、歪みInGaAs量子井戸活性層の成長条件検討を行った。詳細については寿命性能の観点も含め、第5章で述べる。

#### 4.4 広帯域半導体発光素子の素子構造と作製方法

本研究では異なる発光波長をもつ発光層（量子井戸層）を2層積層する構造を用いた<sup>19-23)</sup>。これにより光スペクトル（利得スペクトル）が異なる光が素子内部で合波されて広帯域化される<sup>24-26)</sup>ほか、高出力化も期待できる。ただし誘導放出現象による発光スペクトルの狭帯化を防ぐため、各発光層の発光スペクトルの重なり具合を厳密に制御する必要がある。詳細は4.5節にて詳細に述べる。

次に素子の作製方法について述べる。結晶成長には有機金属気相成長（MOCVD）法を用いた。基板にn型GaAs基板を用い、その上に成長温度635 $^{\circ}\text{C}$ 、成長圧力10.1kPaにてn型GaAsバッファ（0.2 $\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $7 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ）、n型Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Pクラッド層（1.8 $\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $7 \times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ ）、i-GaAs光ガイド層（0.11 $\mu\text{m}$ ）、InGaAs多重量子井戸活性層（DQW、各60 $\text{\AA}$ ）、i-GaAs光ガイド層（0.11 $\mu\text{m}$ ）、p型第一Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Pクラッド層（0.2 $\mu\text{m}$ ）、n型GaInP電流狭窄層（0.5 $\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ）、n型GaAsキャップ層（100 $\text{\AA}$ 、ドーピング濃度 $5 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ ）を積層した。その後、エッチングにより光導波路となる領域のキャップ層および電流狭窄層の除去を行った。なお、この素子の光導波路幅は3 $\mu\text{m}$ とし、端面の垂直方向

に 6 度傾斜させた。

その後、2 回目の結晶成長として p 型第二  $\text{Al}_{0.33}\text{Ga}_{0.67}\text{As}$  クラッド層 ( $1.5\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度  $1 \times 10^{18}\text{cm}^{-3}$ )、p 型 GaAs コンタクト層 ( $0.2\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度  $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ ) を積層した。その後、全体の厚みが  $100\mu\text{m}$  程度になるまで基板研磨を行った。最後に n 型電極材料である AuGe/Ni/Au を基板裏面に、p 型電極材料である Ti/Pt/Au をコンタクト層上に蒸着し、さらに熱処理を行って電極を形成した。このウェハから素子長  $1.5\text{mm}$  となるバーを劈開により切り出し、端面には反射防止膜をコーティングしている。チップ化された素子は放熱効果を高めるために AlN サブマウントにジャンクションアップ形態で実装し、最後に図 4-4-1 に示すようなキャリア上に取り付けた。

ここで用いた素子構造は内部ストライプ構造と呼ばれるものである。その構造図を図 4-4-2 に示す。また検討に用いた素子構造のエネルギーバンド概念図を図 4-4-3 に示した。また本研究で用いた素子設計値、プロセスにて特に重要なものについて、以下に詳細に述べる。

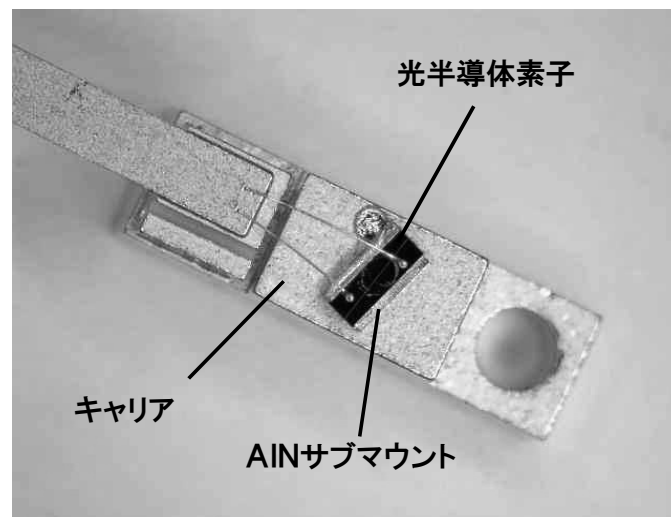


図 4-4-1 作製した広帯域  $1.0\mu\text{m}$  帯発光素子

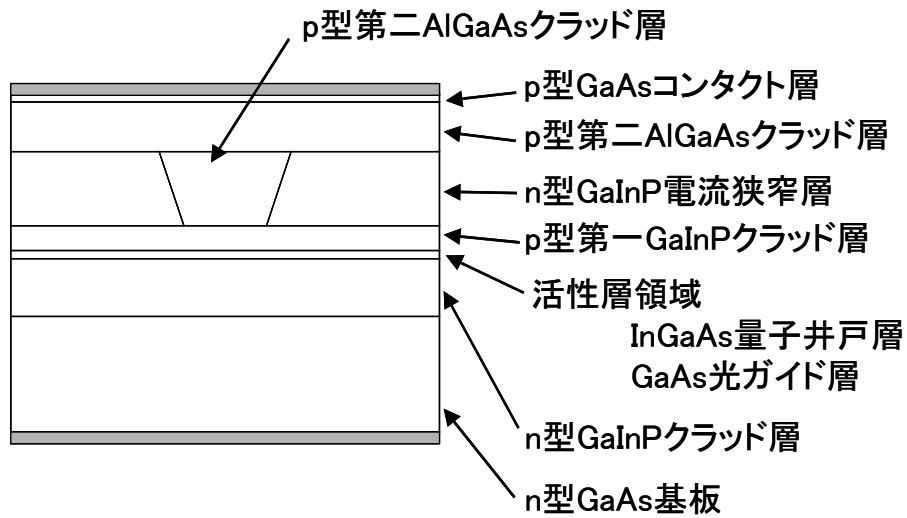


図 4-4-2 広帯域 1.0 $\mu\text{m}$  帯発光素子の構造図

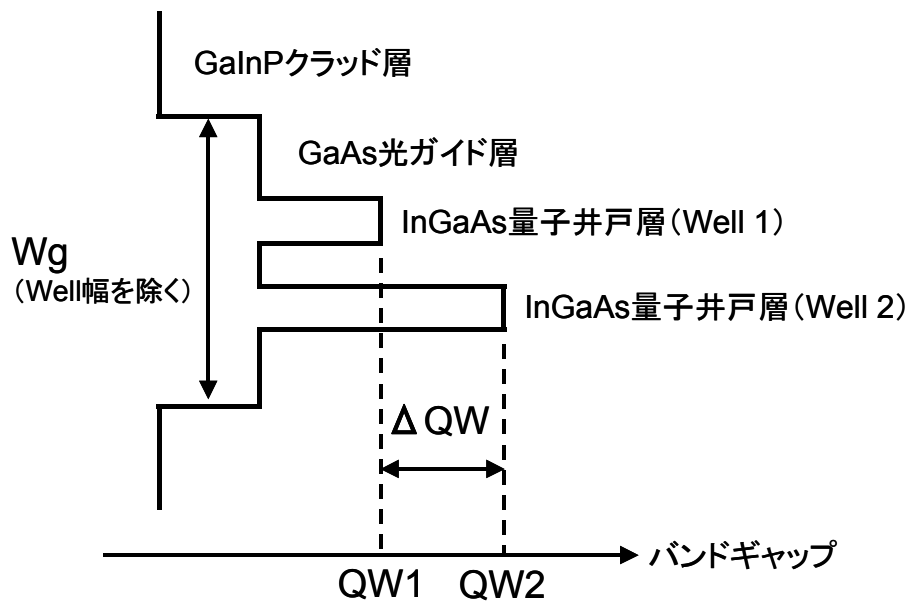


図 4-4-3 広帯域 1.0 $\mu\text{m}$  帯発光素子のエネルギーバンド概念図

#### (1) 横モード制御技術

本素子は 1.0~1.1 $\mu\text{m}$  の広帯域に渡ってシングルモード性を保持する設計として  
 いる。これはシステム構築上、本素子から出射された光を光ファイバーに結合する

ことを想定したためである。これを実現するための素子設計（光閉じ込めのための屈折率設計）を等価屈折率法による近似値計算<sup>27-29)</sup>を用いて行った。図 4-4-4 は今回用いた内部ストライプ構造の実効屈折率差  $\Delta n_{\text{eff}}$  を p 型第二クラッド層組成に対してプロットしたものである。 $\Delta n_{\text{eff}}$  が高くなると高次モードが発生するため、空間的ホールバーニングによる屈折率上昇<sup>30)</sup>も考慮して  $\Delta n_{\text{eff}}$  は  $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$  とすることが望ましいとされている。（一般的に  $0.98 \mu\text{m}$  帯半導体レーザは  $5 \times 10^{-3}$  程度である<sup>31-34)</sup>）。そこで  $\Delta n_{\text{eff}}$  が波長帯域  $1.0 \sim 1.1 \mu\text{m}$  の範囲にて  $\Delta n_{\text{eff}}$  が  $2 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$  の範囲に収まるようにするために p-AlGaAs クラッド層の Al 組成を 33% とした。

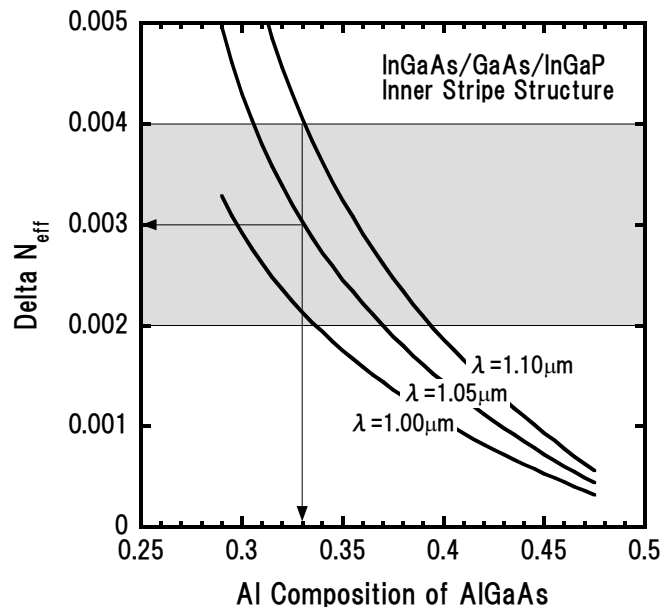


図 4-4-4 等価屈折率段差の波長依存性（計算）

## (2) 端面反射防止技術

素子内部でのレーザ発振を抑制するためには発光帯域全域（ $1.0 \sim 1.1 \mu\text{m}$ ）に渡って反射率を 0.1% 以下とすることが必要である。この条件を満たす反射防止膜を再現性よく成膜することは、生産技術の観点から非常に難しい。そこで本研究では斜め導波路構造と反射防止膜を併用することでこの問題を解決している。光導波路を

端面の垂直方向に対して傾けていくと実効的な端面反射率が低下し、6度傾斜では0.2%程度にまで反射率が低下する<sup>35)</sup>。これに加えて無反射（AR：anti-reflective）コーティングを端面に行うことで全帯域に渡り端面反射率が0.1%以下になるように設計した。

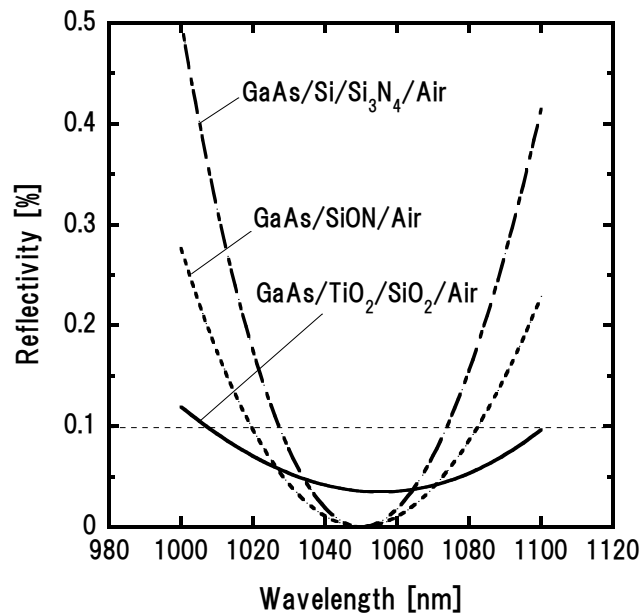


図 4-4-5 反射防止膜のシミュレーション結果

AR コーティングには GaAs/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>/Air (d=830nm/4) となる 2 層構造を用いた。設計にあたり 2 層以上の多層膜設計も検討したが、要求される膜厚精度が厳しくなる（膜厚にして 1/10000~1/100000 の精度が必要）こと、また実際には膜と膜との間に変質層が生じてしまい設定通りの性能が得られないことが懸念されることから候補から外した。今回用いた AR 膜の理論反射スペクトルを図 4-4-5 に示す。今回使用した膜設計は他の 2 層構造膜と比べて、波長 1.05μm において反射率が 0% にはならないものの、波長 1.0~1.1μm 全域にわたりほぼ 0.1%以下の反射率を実現できることが分かる。

AR コーティングおよび斜め導波路構造による反射防止効果を調べるため、同一

素子に対して以下のように端面処理方法を変えて、その効果を調べた。その結果を図 4-4-6、図 4-4-7 に示す。

- a) 直線導波路、コーティングなし（端面反射率～30%）
- b) 直線導波路、AR/AR コーティング
- c) 斜め導波路（傾斜角 6 度）、コーティングなし
- d) 斜め導波路（傾斜角 6 度）、AR/AR コーティング

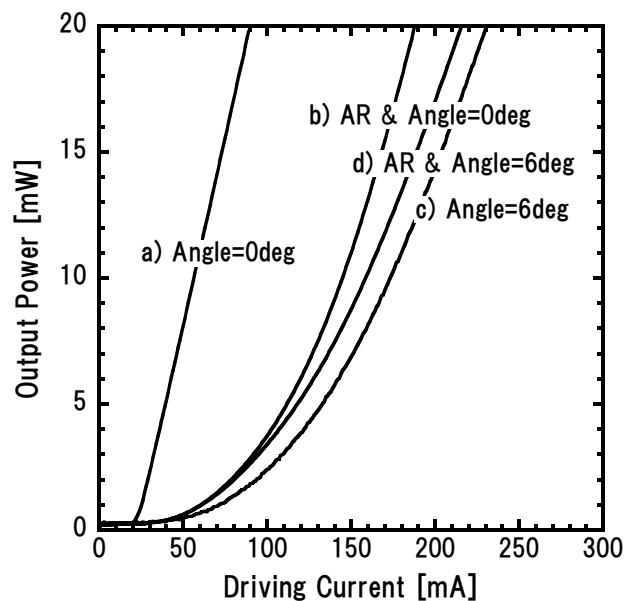


図 4-4-6 異なる端面処理を行った素子の IV 特性比較

素子 a は半導体レーザ構造となり、電流閾値をもつ典型的な駆動電流—光出力特性を示し、最もスロープ効率が高くなる。この素子端面に AR コーティングを形成すると素子 b のように電流閾値をもたずに緩やかに光出力が立ち上がるようになる。上記 4 つのうち最も光出力が低いのは素子 c である。しかし図 4-4-7 から素子 c は駆動電流値の上昇とともに発光スペクトルが狭帯化していくのが分かる。これは端面の残留反射率により生じる迷光（斜め導波路の端面で反射されて素子内部に戻ってくる光）の影響だと思われる。つまり駆動電流値を増やすことで活性層を横



切る迷光が増え、誘導放出により光スペクトルが狭帯化したと考えている。光出力が最も低くなるのは、素子 d に比べて素子内部への反射光が存在するためと考えられる。これらの結果から、本研究では斜め導波路構造と AR コーティングの両方(構造 d) を採用することとした。

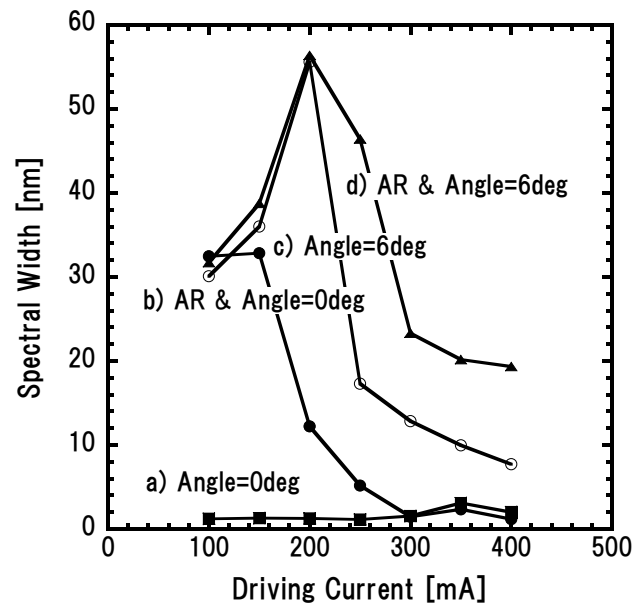


図 4-4-7 異なる端面処理を行った素子の光スペクトル幅比較

#### 4.5 発光領域の多重化による広帯域化と高出力化の両立

発光領域の多重化が波長帯域と出力特性に与える効果を明らかにするため、図 4-4-3 における量子井戸層間の発光波長差 ( $\Delta QW = QW_2 - QW_1$ ) の依存性を評価した。ここで  $\Delta QW$  値を変化させるにあたり、 $QW_2$  は発光ピーク波長  $1.08\mu\text{m}$  で一定とした。スペクトル幅 (-3dB 帯域幅) の注入電流依存性を図 4-5-1 に示す。比較のため、単一量子井戸構造をもつ素子の特性 (図中、SQW) も示した。このときの発光波長は  $QW_2$  と同一である。その発光特性は明らかに  $\Delta QW$  値と関係があり、 $\Delta QW$  値が  $75\text{nm}$  のときに最もスペクトル幅が広がっているのが分かる。

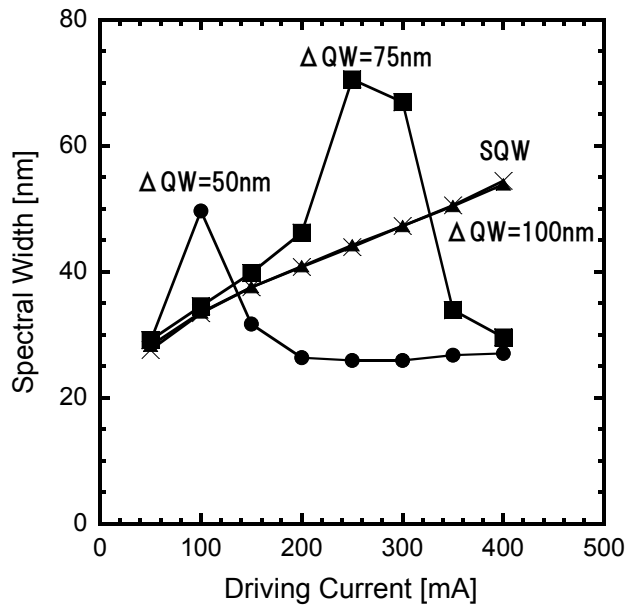


図 4-5-1 異なる  $\Delta QW$  値をもつ素子の電流-スペクトル幅特性

$\Delta QW$  値が広い場合（ここでは  $\Delta QW=100\text{nm}$ ）、短波長側の量子井戸層は発光に寄与せず、長波長側の量子井戸層のみの単一量子井戸構造素子と同一の傾向を示した。また  $\Delta QW$  値が狭い場合（ここでは  $\Delta QW=50\text{nm}$ ）では駆動電流が  $50\text{mA}$  程度から短波長側の量子井戸層からの発光がスペクトル幅に寄与しはじめ、SQW 素子に比べて広帯域化していることが分かる。しかし駆動電流値が  $100\text{mA}$  以上では逆に SQW 素子よりもスペクトル幅が狭帯化する傾向が見られた。

このように短波長側の量子井戸層からの発光によりスペクトル幅の狭帯化が生じるのは、半導体素子における光閉じ込め率の波長依存性を反映したものと推察している。図 4-5-2 は  $\text{InGaAs}/\text{GaAs}/\text{InGaP}$  構造における光導波パターンを計算により求めたものである。波長範囲  $1.0\sim 1.1\mu\text{m}$  において短波長ほど発光層（横軸 0 に相当）における光強度が強いことが分かる。このことから、短波長ほどより誘導放出が生じやすく光スペクトル幅の狭帯化が生じたものと思われる。

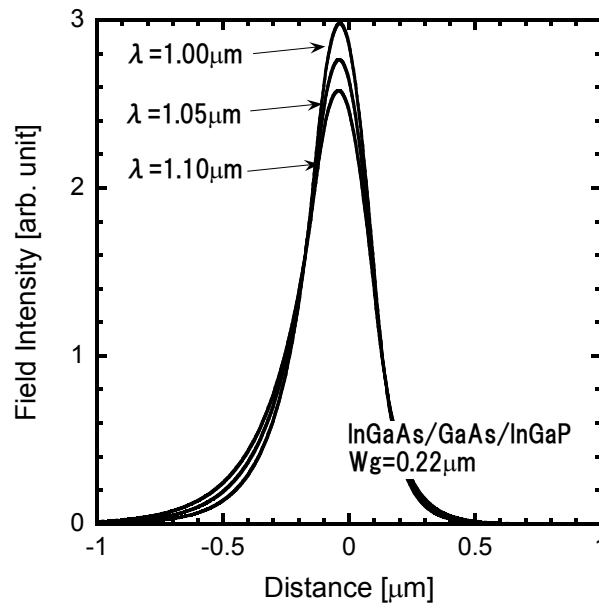


図 4-5-2 素子内部の光導波パターンの波長依存性（計算）

一方、両者の中間に位置する  $\Delta QW$  値（ここでは  $\Delta QW=75\text{nm}$ ）では、駆動電流値  $200\text{mA}$  までは長波長側の Well 2 からの発光が支配的であるが、 $200\text{mA}$  から短波長側の Well 1 が発光に寄与をはじめ、駆動電流値  $250\text{mA}$  にてスペクトル幅が最大となることが分かった。

次に電流-光出力特性を図 4-5-3 に示す。 $\Delta QW=100\text{nm}$  と SQW 素子ではキャリアのオーバーフローによるものと思われるロールオーバー現象が駆動電流値  $200\text{mA}$  より見られ、出力が約  $400\text{mA}$  にて飽和する。 $\Delta QW=50\text{nm}$  と  $75\text{nm}$  では、光出力のロールオーバー現象が駆動電流値  $400\text{mA}$  でも見られていない。また  $\Delta QW=50\text{nm}$  の素子は  $\Delta QW=75\text{nm}$  と比較して高い光出力特性を示している。これは図 4-5-1 に示したスペクトル幅の注入電流依存性の挙動とよく一致している。

これらの結果は  $\Delta QW$  値に最適設計値が存在していることを示しているとともに、設計により広帯域化と高出力化が両立できることを示している。

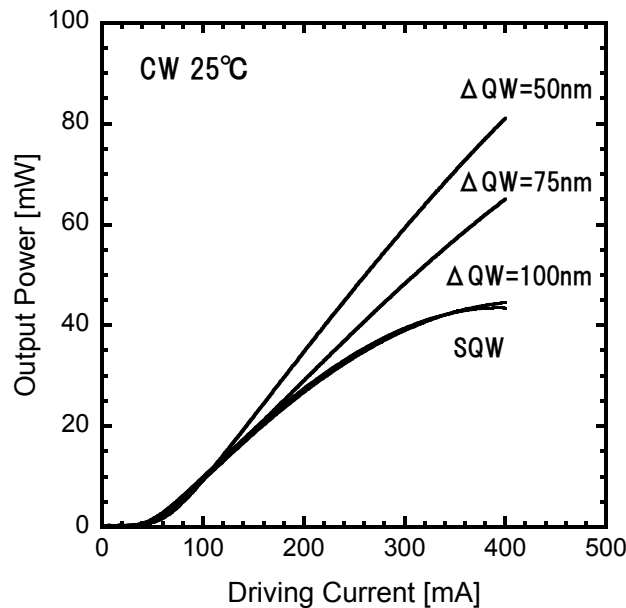


図 4-5-3 異なる  $\Delta QW$  値をもつ素子の電流-光出力特性

#### 4.6 光閉じ込め率の効果

素子内部の誘導放出度合いは素子長だけでなく、光閉じ込め率にも影響を受けると考えられる。そこで「2 つの異なる量子井戸層を積層した発光素子」を用いて、その影響を評価した。光閉じ込め率を変えるにあたり、図 4-4-3 に示した光ガイド層厚み  $W_g$  を変化させた。その際、量子井戸層の幅は一定とし、 $\Delta QW$  値は 100nm とした。図 4-6-1 は  $W_g$  値を  $0.22 \sim 0.26 \mu\text{m}$  の範囲で変化させたときの発光スペクトル幅 (-3dB 帯域幅) の注入電流依存性を示したものである。図における  $\Gamma$  は光閉じ込め率を示している。光閉じ込め率は長波長側の発光波長である  $1.08 \mu\text{m}$  を仮定して計算を行った。この計算結果から  $W_g$  が薄くなるとともに光閉じ込め率が低下することが分かった。また図 4-6-1 から  $W_g$  が薄くなるとともに短波長側の量子井戸層が発光に寄与しはじめる傾向が見られた。この両者の結果から光閉じ込め率の効果を下のように考察した。

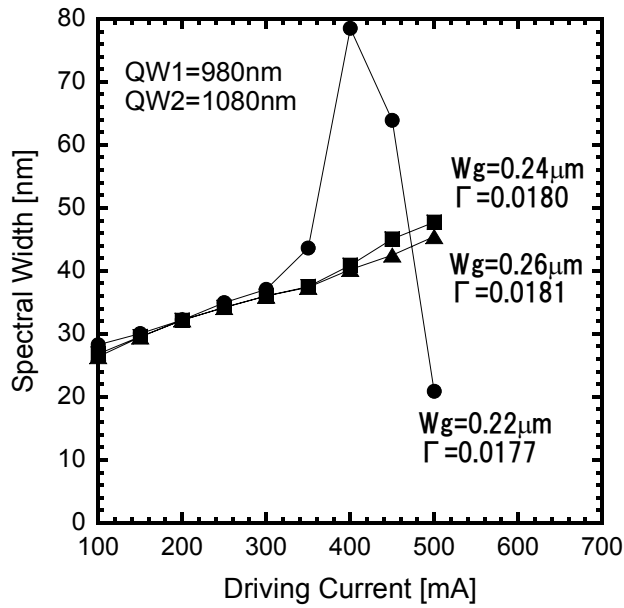


図 4-6-1 異なる光閉じ込め率における光スペクトル幅特性

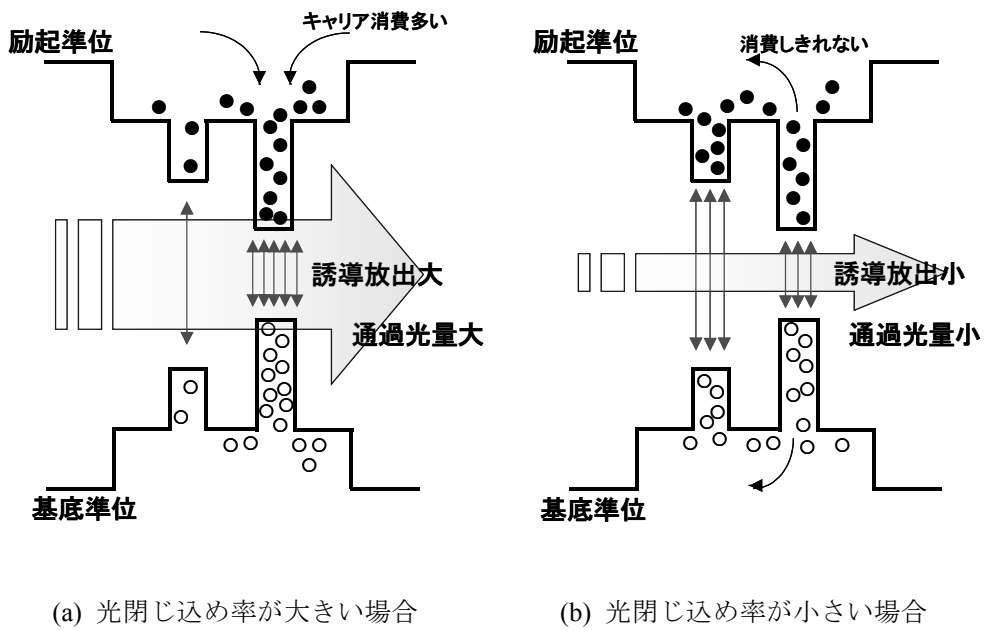


図 4-6-2 光閉じ込め率がキャリア注入に与える効果

$W_g$  が薄くなることによって光閉じ込め率が減少し、それにより誘導放出の割合が低下する。そのため長波長側の量子井戸層でのキャリア消費量が減少し、結果として短波長側の量子井戸層へキャリアが注入され、低い電流値においても発光に寄

与したものと考えられる。(概念図を図 4-6-2 に示す。) この結果は「2つの異なる量子井戸層を積層した発光素子」において広帯域化、高出力化を実現するためには  $\Delta QW$  値の設計のほか、光閉じ込め率の制御が重要であることを示している。

#### 4.7 素子性能

これまでの検討結果をふまえて、 $\Delta QW$  値と光閉じ込め率を最適化し、最も広帯域な発光スペクトル特性が得られた素子の発光特性を図 4-7-1 に示す。光出力 33.4mW、光スペクトルの半値幅は 77.5nm である。

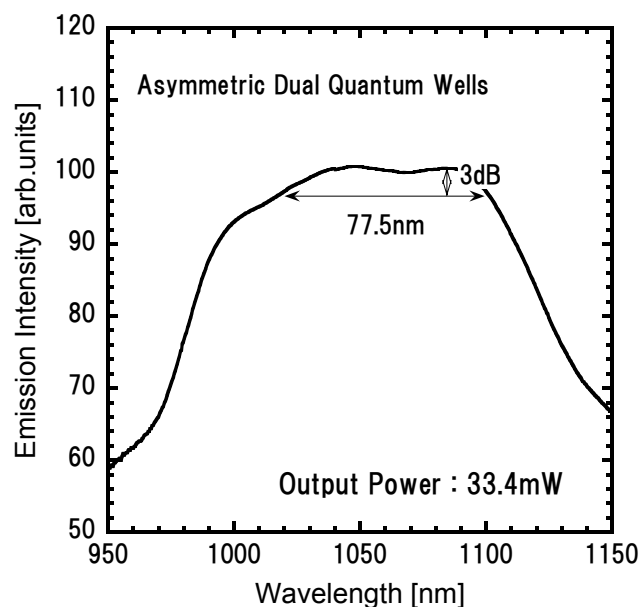


図 4-7-1 異なる量子井戸層を積層した素子の発光特性

図 4-7-2 は同一素子長  $L_c=1.5\text{mm}$  をもつ単一量子井戸層における発光特性を示したものであるが、これと比較すると図 4-7-1 の結果は光出力で 1.65 倍、スペクトル幅が 1.4 倍増加に相当している。この結果を図 4-3-1 に示した光出力と光スペクトル幅とのトレードオフの関係を示した図に追記した。これを図 4-7-3 に示す。この図から、トレードオフを超える性能が「発光層の多重化」により得られたことが分

かる。

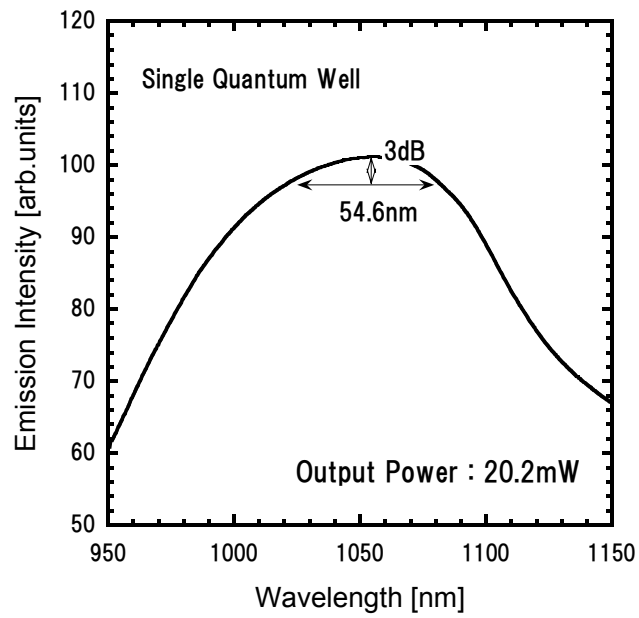


図 4-7-2 単一量子井戸層をもつ素子の発光特性

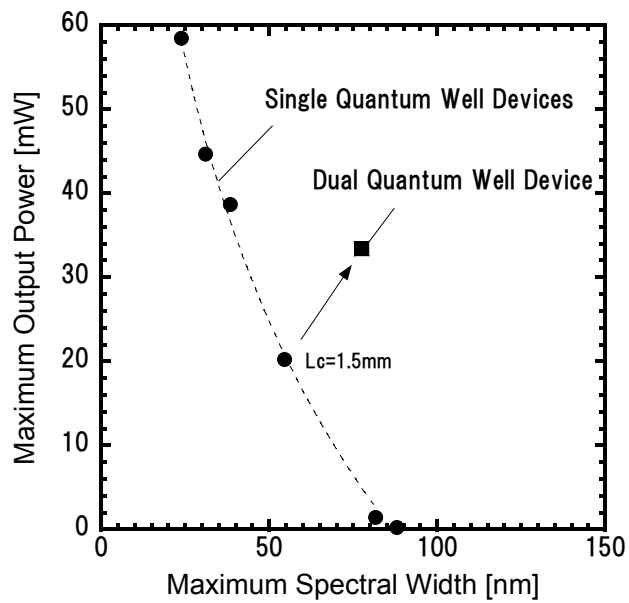


図 4-7-3 光出力と発光スペクトル幅との関係

#### 4.8 まとめ

医療診断用光センシング用光源としての応用を念頭に、1.0 $\mu\text{m}$  帯スーパールミネッセントダイオードの「高出力化」と「光スペクトル幅の広帯域化」の両立を目指した検討を行った。この両者はトレードオフの関係にあるが、異なる波長で発光する量子井戸層を 2 つ積層することでトレードオフを上回る性能を得ることができた。この素子の発光特性は「活性層中の光閉じ込め率」および「2 つの量子井戸層のバンドギャップエネルギー差」に強く影響をうけることを明らかにし、それを最適化することで単一量子井戸構造をもつ素子と比較して、光出力で 1.65 倍、光スペクトル幅で 1.4 倍の値を得ることができた。



#### 第4章の参考文献

- 1) D. Huang, E. A. Swanson, C. P. Lin, J. S. Schuman, W. G. Stinson, W. Chang, M. R. Hee, T. Flotte, K. Gregory, C. A. Puliafito, and J. G. Fujimoto, "Optical coherence tomography", *Science*, Vol.254, No.5035, pp.1178-1181 (1991)
- 2) J.M. Schmitt, "Optical coherence tomography (OCT) : a review", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, Vol.5, pp.1205-1215 (1999)
- 3) Y. Yasuno, Y. Hong, S. Makita, M. Yamanari, M. Akiba, M. Miura, and T. Yatagai, "In vivo high-contrast imaging of deep posterior eye by 1- $\mu$ m swept source optical coherence tomography and scattering optical coherence angiography", *Opt. Express.*, Vo.,15, pp.6121-6139 (2007)
- 4) K. Maruo, T. Oota, M. Tsuruhi, T. Nakagawa, H. Arimoto, M. Hayakawa, M. Tamura, Y. Ozaki, and Y. Yamada, "Noninvasive Near-Infrared Blood Glucose Monitoring Using a Calibration Model Built by a Numerical Simulation Method: Trial Application to Patients in an Intensive Care Unit", *Applied Spectroscopy*, Vol.60, pp.1423-1431 (2006)
- 5) M. S. Patterson, B. C. Wilson, D. R. Wyman, "The propagation of optical radiation in tissue. 2 : Optical properties of tissues and resulting fluence distributions", *Lasers in Medical Science*, Vol.6, pp.379-390 (1991)
- 6) F. G. Omenetto, N. A. Wolchover, M. R. Wehner, M. Ross, A. Efimov, A. J. Taylor, V. V. R. K. Kumar, A. K. George, J. C. Knight, N. Y. Joly, and P. St. J. Russell, "Spectrally smooth supercontinuum from 350 nm to 3  $\mu$ m in sub-centimeter lengths of soft-glass photonic crystal fibers", *Optics Express*, Vol.14, pp.4928-4934 (2006)
- 7) L. N. Kurbbatov, S. S. Shakhidzhanov, L. V. Bystrova, V. V. Krapukhin, and S. I. Kolonenkova, "Investigation of superluminescence emitted by a gallium arsenide diode", *Sov. Phys. Semicond.*, Vol.4 pp.1739-1744 (1971)

- 8) G. M. Hale and M. R. Querry, "Optical constants of water in the 200-nm to 200- $\mu\text{m}$  wavelength region", *Appl. Opt.* Vol.12, pp.555-563 (1973)
- 9) Y. Wang, Z. C. J. Nelson, B. Reiser, R. Chuck, and R. Windeler, "Optimal wavelength for ultrahigh-resolution optical coherence tomography", *Opt. Exp.*, pp.1411-1417 Vol.11 (2003)
- 10) G. Nishimura, "Near-infrared Spectroscopy in a 1- $\mu\text{m}$  Wavelength Region : Current and Future", *J. Jpn. Coll. Angiol*, Vol.49, pp.139-145 (2009)
- 11) C. -F. Lin, Y. -S. Su, and B. -R. Wu, "External-Cavity Semiconductor Laser Tunable From 1.3 to 1.54  $\mu\text{m}$  for Optical Communication", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol.14, pp.3-5 (2002)
- 12) Y. Morishima, J. Yaguchi, A. Mukai, T. Ohgoh, H. Asano, "Longitudinal bandgap modulated broadband ( $> 150 \text{ nm}$ ) InGaAs/GaAs MQWs Superluminescent diodes by selective area MOVPE growth", *Electron. Lett.*, Vol.45, pp.521-522 (2009)
- 13) M. Rossetti, A. Markus, A. Fiore, L. Occhi, and C. Velez, "Quantum Dot Superluminescent Diodes Emitting at 1.3  $\mu\text{m}$ ", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol.17, pp.540-542 (2005)
- 14) 平田照二, "わかる半導体レーザの基礎と応用", 第2章 (p.52) ,CQ 出版社 (2001)
- 15) T. Fukunaga, M. Wada, and T. Hayakawa, "Reliable operation of strain-compensated 1.06  $\mu\text{m}$  InGaAs/InGaAsP/GaAs single quantum well lasers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.69, pp.248-250 (1996)
- 16) H. Asano, M. Wada, T. Fukunaga, and T. Hayakawa, "Temperature-insensitive operation of real index guided 1.06  $\mu\text{m}$  InGaAs/GaAsP strain-compensated single-quantum-well laser diodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.74, pp.3090-3092 (1999)
- 17) F. Akinaga, T. Kuniyasu, K. Masumoto, T. Fukunaga, and T. Hayakawa, "350 mW reliable operation in fundamental transverse-mode InGaAs ( $\lambda=1.05\mu\text{m}$ )/GaAsP strain-compensated laser diodes", *Electron. Lett.*, Vol.39, pp.55-57 (2003)

- 18) M. Yuda, T. Sasaki, J. Temmyo, M. Sugo, and C. Amano, "High-power highly reliable 1.02-1.06  $\mu\text{m}$  InGaAs strained-quantum-well laser diodes", *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.39, pp.1515-1520 (2003)
- 19) S. Ikeda, A. Shimizu, and T. Hara, "Asymmetric dual quantum well laser – wavelength switching controlled by injection current", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.55, pp.1155-1157 (1989)
- 20) K. J. Beernink, D. Sun, R. L. Thornton, and D. W. Treat, "Dual-wavelength AlGaAs/GaAs laser by selective removal of a quantum well in an asymmetric dual quantum well structure", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.68, pp.284-286 (1996)
- 21) A. Shimizu, and S. Ikeda, "Theory of asymmetric dual quantum well lasers", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.59, pp.765-767 (1991)
- 22) B. –L. Lee, and C. –F. Lin, "Wide-range tunable semiconductor lasers using asymmetric dual quantum wells", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol.10, pp.322-324 (1998)
- 23) C. –F. Lin, B. –L. Lee, and P. –C. Lin, "Broad-band superluminescent diodes fabricated on a substrate with asymmetric dual quantum wells", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol.8, pp.1456-1458 (1996)
- 24) O. Mikami, H. Yasaka, and Y. Noguchi, "Broader spectral width InGaAsP stacked active layer Superluminescent diodes", *Appl. Phys. Lett.*, Vol.56, pp.987-989 (1990)
- 25) C. –F. Lin, B. –R. Wu, L. –W. Laih, and T. –T. Shih, "Sequence influence of nonidentical InGaAsP quantum wells on broadband characteristics of semiconductor optical amplifiers – Superluminescent diodes", *Opt. Lett.*, Vol.26, pp.1099-1101 (2001)
- 26) C. –F. Lin, Y. –S. Su, C. –H. Wu, and G. S. Shmavonyan, "Influence of separate confinement heterostructure on emission bandwidth of InGaAsP superluminescent diodes / semiconductor optical amplifiers with nonidentical multiple quantum wells", *IEEE Photonics Technol. Lett.*, Vol.16, pp.1441-1443, (2004)

- 27) W. T. Tsang, R. A. Logan, "GaAs-Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As strip buried heterostructure lasers", IEEE J. Quantum Electron., QE-15 pp.451-469 (1979)
- 28) W. Streifer, E. Kapon, "Application of the equivalent-index method to DH diode lasers", Appl. Opt., Vol.18, pp.3724-3725 (1979)
- 29) O. Imafuji, T. Takayama, H. Sugiura, M. Yuri, H. Naito, M. Kume, and K. Itoh, "600 mW CW Single-Mode GaAlAs Triple-Quantum-Well Laser with a New Index Guided Structure", IEEE J. Quantum Electron., Vol.29, pp.1889-1894 (1993)
- 30) F. R. Nash, "Mode guidance parallel to the junction plane of double-heterostructure GaAs lasers", Vol.44, pp.4696-4704 (1973)
- 31) H. Asonen, A. Ovtchinnikov, G. Zhang, J. Nappi, P. Savolainen, and M. Pessa, "Aluminum-free 980-nm GaInP/GaInAsP/GaInP pump lasers", IEEE J. Quantum Electron. Lett., Vol.30, pp.415-423 (1994)
- 32) A. Kasukawa, M. Ohkubo, T. Namegaya, T. Ijichi, Y. Ikegami, N. Tsukiji, S. Namiki, and Y. Shirasaki, "980 nm and 1480 nm high power laser modules for Er-doped fiber amplifiers", Optoelectron. Device & Technol., Vol.9, pp.219-230 (1994)
- 33) S. Ishikawa, K. Fukagai, H. Chida, T. Miyazaki, H. Fujii, K. Endo, "0.98-1.02 μm strained InGaAs/AlGaAs double quantum-well high-power lasers with GaInP buried waveguides", IEEE J. Quantum Electron., Vol.29, pp.1936-1942 (1993)
- 34) A. Shima, H. Kizuki, A. Takemoto, S. Karakida, M. Miyashita, Y. Nagai, T. Kamizato, K. Shigihara, A. Adachi, E. Omura, M. Otsubo, "0.78- and 0.98-μm ridge-waveguide lasers buried with AlGaAs confinement layer selectively grown by chloride-assisted MOCVD", IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., Vol.5, pp.102-109 (1995)
- 35) C. E. Zah, J. S. Osinski, C. Caneau, S. G. Menocal, L. A. Reith, J. Salzman, F. K. Shokoohi, T. P. Lee, "Fabrication and performance of 1.5 μm GaInAsP traveling-wave laser amplifiers

with angled facets”, Electron. Lett., Vol.23, pp.990-992 (1987)

## 第5章 1.0 $\mu\text{m}$ 帯半導体発光素子の劣化モード解析と長寿命化

### 5.1 はじめに

第4章にて1.0 $\mu\text{m}$ 帯半導体発光素子の広帯域化と高出力化を両立させるための設計指針について述べた。その結果、従来の単一量子井戸層をもつスーパーluminescentダイオードと比べて光出力1.65倍、光スペクトル幅1.4倍の性能を実現するに至った。本章では、この素子の長寿命化を目的とした劣化モード解析と、その結果をふまえた素子設計、及び寿命性能について述べる。

この素子の寿命特性における懸念点の1つはInGaAs量子井戸層の結晶品質である。1.0~1.1 $\mu\text{m}$ で発光するInGaAs量子井戸層はGaAs基板よりも大きな格子定数を有し、圧縮歪み<sup>1)</sup>を受ける。量子井戸層における発光波長と歪みについて簡単に説明する。量子井戸層の発光波長は電子遷移エネルギーにより決まり、バンドギャップエネルギー( $E_g$ )、結晶歪みによる変形ポテンシャルエネルギー( $E_s$ )、および量子構造による量子化エネルギー( $E_q$ )の和として表すことができる。長波長化のためにはこの電子遷移エネルギーの低減が必要であり、GaAs基板上のInGaAs発光層を用いて1.0~1.1 $\mu\text{m}$ 帯を発光させるためには、In組成を増加させて $E_g$ を低減させる必要がある。しかしInGaAs結晶中の歪みが増加し、 $E_s$ が増加(波長としては短波化)してしまう。そのため更にIn組成を増やす必要があるが、より強い結晶歪みが生じるため良好な結晶品質を得ることのできる上限膜厚(臨界膜厚<sup>2,3)</sup>)が低下してしまう。 $E_q$ は膜厚が厚いほど小さくなるが、In組成が大きい場合、臨界膜厚により厚みが制限されてしまい、長波長化が難しくなる。そのためInGaAs量子井戸層の場合、波長1.2 $\mu\text{m}$ 程度が長波長側の限界とされている。このような限界波長に近い1.0~1.1 $\mu\text{m}$ で発光するInGaAs量子井戸層もまた良質な品質が得られにくく、半導体発光素子としての寿命性能が劣ると推察される。

懸念点の2つめは、スーパーluminescentダイオードの性質に関するものであ

る。半導体レーザと比較して電力-光出力変換効率が低い(表 4-3-1 参照)ことから、素子内部の温度上昇が大きく、活性層内部の結晶欠陥の増殖が早いと推察される。これもまた寿命性能を低下させる原因となる。

これらをふまえて、まず作製した広帯域スーパーluminescentダイオードの劣化モードを明らかにし、その結果を素子設計に反映させることで、寿命性能の改善を試みることにした。

## 5.2 本章の目的

本章では、第 4 章で述べた広帯域スーパーluminescentダイオードを長寿命化することを目的として研究を行った。医療診断システム用光源としての使用を想定し、その目標を 25°C、30mW 駆動条件にて寿命 3000 時間とした。

## 5.3 従来技術における InGaAs 発光素子の寿命性能

### (1) InGaAs 量子井戸層を用いた半導体レーザ

1.0~1.1 $\mu\text{m}$  帯は GaAs 基板に格子整合した材料系では実現できない波長帯域である。そのため格子整合系から外れた「歪み量子井戸層<sup>4,5)</sup>」を用いる必要がある。しかし歪みが臨界膜厚をこえると結晶中に欠陥(転位)が発生し、素子特性は急激に劣化してしまう<sup>6)</sup>。このためこの波長帯での発光素子の作製は非常に難しいとされている。この波長帯域における半導体レーザの開発状況<sup>7-14)</sup>を表 5-3-1 に示す。波長 1.1 $\mu\text{m}$  までは CW 動作が報告されているが、波長 1.2 $\mu\text{m}$  ではパルス動作での報告しかされていない。これは 1.1 $\mu\text{m}$  より長波長の強歪み InGaAs 量子井戸レーザの技術的困難さを明確に表している。

表 5-3-1 発振波長が異なる歪み InGaAs 量子井戸層レーザの報告例

発振波長(μm)	駆動方法	成長温度	文献
1.02	CW	700-760°C	7
1.1	CW	625°C	8
1.1	CW	625°C	9
1.12	CW	530°C	10
1.17	pulse	-	11
1.17	pulse	550°C	12
1.18	pulse	550°C	13
1.2	pulse	525°C	14

一方、0.98μm で発光する InGaAs 量子井戸層レーザは、光通信における Er ドープファイバ増幅器 (Erbium-doped Fiber Amplifier : EDFA)<sup>15)</sup>の励起用レーザとして開発され、高出力化を目的とした研究開発が盛んに行われている。波長 0.98μm で発光する InGaAs 層は GaAs 基板よりも大きな格子定数を有するため結晶中に圧縮歪が生じるが、歪量が大きくないため InGaAs 層を薄膜化することにより結晶欠陥を生じることなく活性層を成膜することができている。

また 0.98μm レーザで初めて用いられた歪量子井戸層の概念はレーザ特性を大きく改善<sup>16-19)</sup>させ、他の波長帯レーザにおいても広く用いられることになった。量子井戸層をレーザの活性層に用いた場合、量子井戸構造により形成された量子ポテンシャル中の量子化準位に注入キャリアが有効に閉じ込められるため、少ない電流で高い利得が得られる。更に歪量子井戸構造では価電子帯のバンド構造に変化が生じる。圧縮歪みでは発光に寄与する正孔の有効質量が軽くなり、更に少ない電流で高い利得が得られる。

0.98μm 半導体レーザは光ファイバ励起用光源として用いるため、基本横モード発振し単一モード光ファイバへ高結合できる素子設計を採用している。半導体レーザにおける CW 駆動時の最大光出力は、熱および無効電流増加による飽和現象<sup>20)</sup>と瞬時にレーザ発振が停止してしまう現象 (COMD)<sup>21)</sup>により制限され、横モード



制御された  $0.98\mu\text{m}$  半導体レーザの場合、主に後者により出力が制限される。また COMD レベルは半導体レーザの動作時間とともに低下することが知られており、その寿命を律速する要因でもある。COMD は端面近傍での光吸収と局所的な温度上昇の正帰還によるものであることから、端面領域の欠陥不活性化<sup>22)</sup>や、端面近傍のバンドギャップを広げて光吸収を抑制する「窓構造」の採用<sup>23)</sup>により長寿命化がはかられている。

## (2) スーパーluminescentダイオードの劣化モード

スーパーluminescentダイオードの劣化モードに関する検討はあまりなされておらず、劣化モードや推定寿命も明らかになっていないのが現状である。これは実用化されているスーパーluminescentダイオードの多くが InP 系材料(波長  $1.3\sim 1.55\mu\text{m}$ )のものであり、比較的容易に高い寿命性能を達成できるためと思われる。ここではスーパーluminescentダイオードの劣化モードを類推できるデータとして、半導体光アンプの自然放出光の経時変化についての研究報告<sup>24, 25)</sup>を紹介する。半導体光アンプは半導体に蓄積されたキャリアの誘導放出によって光信号を増幅するデバイスであり、両端面が無反射構造となっている部分を含めてスーパーluminescentダイオードと素子構造が類似している。文献では寿命試験により、自然放出光の出力が徐々に低下する緩慢劣化モードが生じたことが述べられており、この劣化はキャリア密度の低下によるものとされている。ただしこの文献で述べられているデバイスは InP 系材料のものであり、本研究で用いる GaAs 系材料における劣化モードとは異なる可能性がある。

#### 5.4 1.0 $\mu\text{m}$ 帯半導体発光素子の素子構造と作製方法

本研究は第4章で述べた1.0 $\mu\text{m}$ 帯広帯域発光素子に対する長寿命化検討であり、基本的に素子構造は第4章のもの(図4-4-2)と同じである。素子構造は内部ストライプ構造を採用し、発光層にInGaAs多重量子井戸層、光ガイド層に(In)GaAs(P)、クラッド層にはInGaP層を用いている。なお第4章での研究では光ガイド層にGaAsを用いたが、本章では長寿命化検討のため $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}_{0.8}\text{P}_{0.2}$ 光ガイド層( $E_g=1.5\text{eV}$ )も使用した。なお光ガイド層の種類に関わらず、本章で報告する素子は出力30mWにて発光スペクトル幅が約70nmになるよう多重量子井戸層の構造を最適化している。

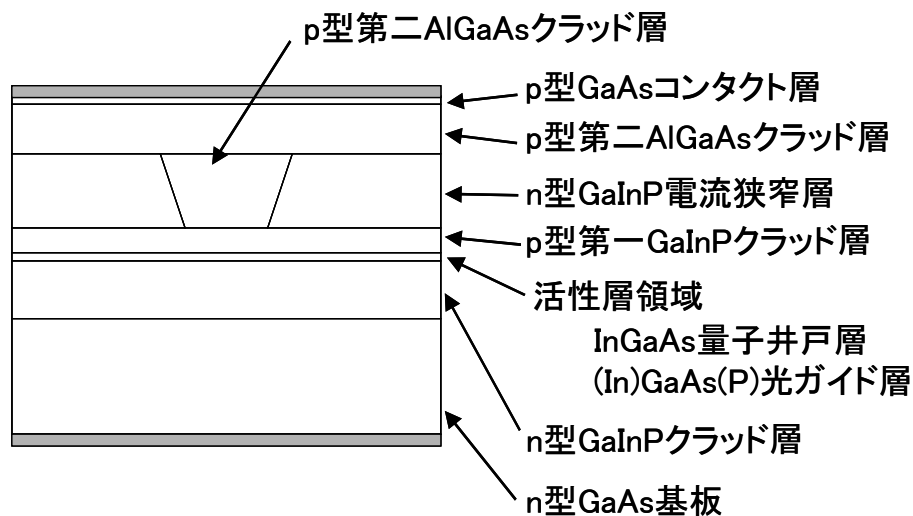


図 5-4-1 広帯域 1.0 $\mu\text{m}$  帯発光素子の構造図

次に素子の作製方法について述べる。結晶成長には有機金属気相成長(MOCVD)法を用いた。成長圧力10.1kPa、成長温度635 $^{\circ}\text{C}$ にてn型GaAs基板上にn型GaAsバッファ(0.2 $\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $7\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ )、n型GaInPクラッド層(1.8 $\mu\text{m}$ 、ドーピング濃度 $7\times 10^{17}\text{cm}^{-3}$ )、i-(In)GaAs(P)光ガイド層(GaAsの場合110nm、InGaAsP

の場合 65nm)、InGaAs 多重量子井戸活性層 (DQW、各 60Å)、i-(In)GaAs(P)光ガイド層 (GaAs の場合 110nm、InGaAsP の場合 65nm)、p 型第一 GaInP クラッド層 (0.2μm)、n 型 GaInP 電流狭窄層 (0.5μm、ドーピング濃度  $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ )、n 型 GaAs キャップ層 (100Å、ドーピング濃度  $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ ) を 1 回目の結晶成長にて積層した。その後、エッチングにより光導波路となる領域のキャップ層および電流狭窄層の除去を行った。光導波路の幅は 3μm とし、端面の垂直方向に 6 度傾斜させた。その後、2 回目の結晶成長により p 型第二  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  クラッド層 (GaAs ガイド層の場合  $x=0.33$ 、InGaAsP ガイド層の場合  $x=0.48$ 、厚み 1.5μm、ドーピング濃度  $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ )、p 型 GaAs コンタクト層 (0.2μm、ドーピング濃度  $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ) を積層した。その後、全体の厚みが 100μm 程度になるまで基板の研磨を行い、最後に n 型電極である AuGe/Ni/Au を基板裏面に、p 型電極である Ti/Pt/Au をコンタクト層上に蒸着、熱処理により形成した。このウェハから素子長 1.5mm となるバーを劈開により切り出し、反射防止膜を端面にコーティングしている。チップ化された素子は放熱効果を高めるため AlN サブマウントにジャンクションアップ形態で実装した。

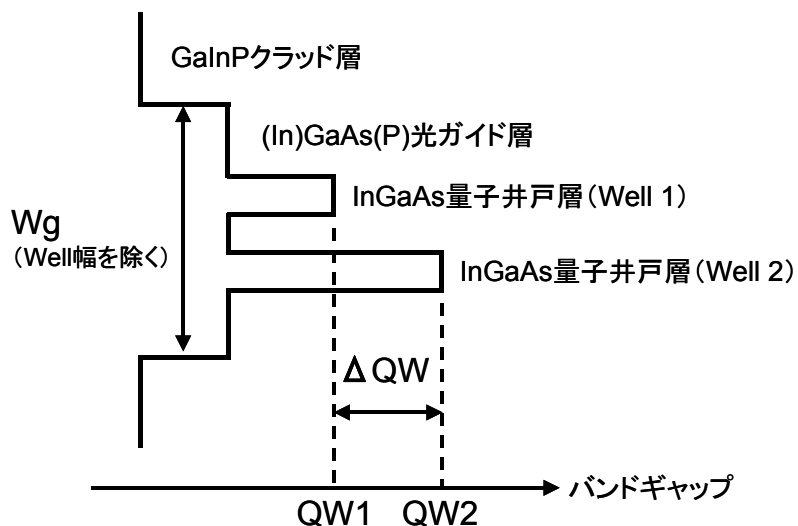


図 5-4-2 広帯域 1.0μm 帯発光素子のエネルギーバンド概念図

本素子のエネルギーバンド概念図を図 5-4-2 に示す。また一部の実験ではスーパーluminescentダイオードではなく半導体レーザを用いた。半導体レーザの場合は、前述したプロセスにおいて斜め導波路および無反射コーティングを用いていない点異なる。

## 5.5 1.0 $\mu\text{m}$ 帯 InGaAs 量子井戸レーザの長寿命化

本節では強歪み InGaAs 量子井戸層の成長条件とその長寿命化検討について述べる。InGaAs 量子井戸層の発光波長は In 組成を変えることで制御することができる。ただし長波長化の限界は臨界応力を発生させる歪み量と膜厚、すなわち臨界膜厚によって決まる。この臨界膜厚は成長温度と関係があり、成長温度が低いほど臨界膜厚が厚くなることが知られている。図 5-5-1 は In 原料である TMI（トリメチルインジウム）の供給量とフォトルミネッセンス（PL）波長との関係を示したものである。用いたサンプルは InGaAs 単一量子井戸層を光ガイド層およびクラッド層で挟んだ構造で、かつ量子井戸層の厚みを一定としたものである。TMI 流量を増やすと PL 波長は長波長化していくが、成長温度が高いほど途中で発光が観測されなくなってくる。これは成長温度が高いほど臨界膜厚が薄いことを示している。この結果から成長温度が低いほど長波長発光が得られやすいことが分かる。

その一方で、量子井戸層の結晶品質向上にはある程度の高温度成長が必要となる。成長温度と臨界膜厚以下の量子井戸層の結晶品質（PL 強度）との関係を図 5-5-2 に示す。この図から 585 $^{\circ}\text{C}$ より低い温度領域では温度が高いほど PL 強度が高くなっており、結晶品質が向上していることが分かる。これは成長界面における原子の表面拡散が促進され、最適な格子サイトに落ち着くことができる原子が多くなるために結晶性が向上したものと解釈できる。逆に 585 $^{\circ}\text{C}$ 以上にて PL 強度が低下する理由は文献から、臨界膜厚に近づくとつれて結晶成長モードが 2 次元成長 (layer by

layer) から3次元島成長 (island formation) へと変わり、過剰投与された In が結晶内で偏析しはじめるためと推定<sup>26-29)</sup>できる。

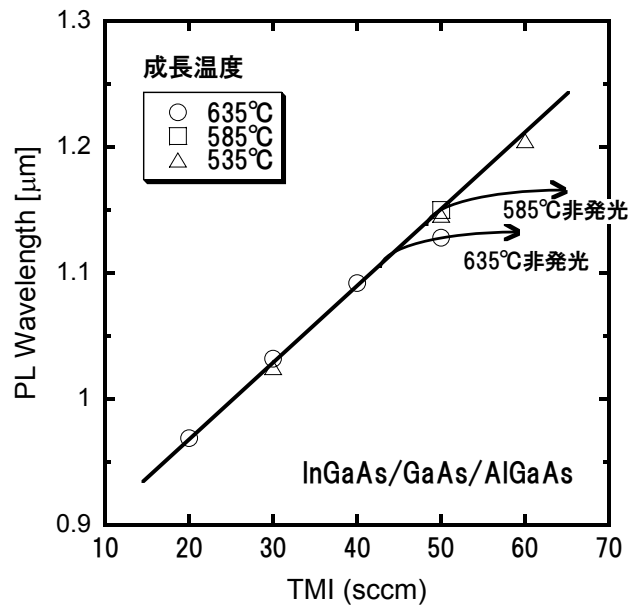


図 5-5-1 TMI 流量とフォトルミネッセンス波長との関係

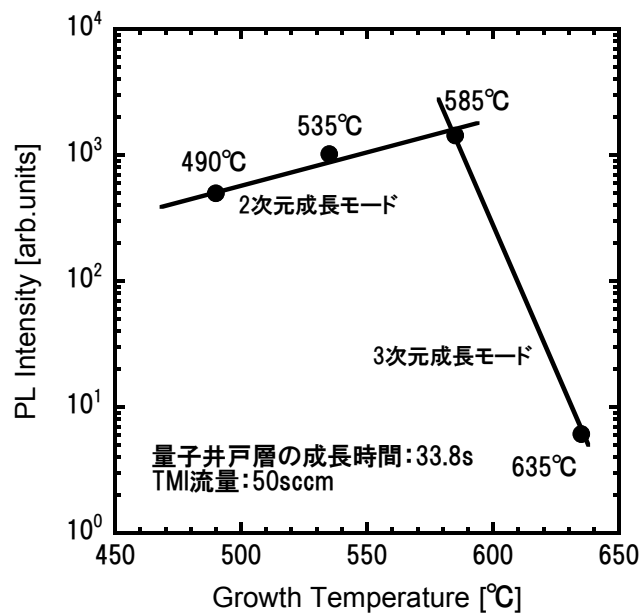


図 5-5-2 結晶成長温度とフォトルミネッセンス強度との関係

以上の結果から InGaAs 量子井戸層の成長は、2次元成長モードが維持できる範囲で、かつ最も高い温度で行うことが望ましいことが分かった。この知見をもとに結晶成長条件を最適化し、InGaAs 量子井戸層で発光できる最長波長とされる  $1.2\mu\text{m}$ <sup>30)</sup>での CW 発振を試みた。試作した  $1.2\mu\text{m}$  半導体レーザの電流—光出力特性を図 5-5-3 に示す。量子井戸層は 1 層である。比較のため同構造で発振波長が  $1.04\sim 1.08\mu\text{m}$  の半導体レーザの特性も示した。 $1.04\sim 1.08\mu\text{m}$  レーザと比べて電流閾値が高いものの、CW 駆動にて波長  $1.2\mu\text{m}$  での発振 (図 5-5-4) が確認できた。

電流閾値が増えた理由は、長波長化による結晶品質の低下が最も大きいと考えている。また図 5-5-3 から波長  $1.04\sim 1.08\mu\text{m}$  の範囲でほぼ波長依存性のない電流—光出力特性が得られており、この波長範囲であれば InGaAs 量子井戸層の歪み量がレーザ特性に与える影響が少ないことを示している。

次に InGaAs 量子井戸層の成長条件が素子寿命に与える影響について評価を行った。まず静特性での検討結果をもとに成長モード (In の偏析度合い) と寿命性能との関係性を評価した。図 5-5-5 は In 原料である TMI 供給量と単一量子井戸レーザの発振波長との関係をプロットしたものである。量子井戸層の膜厚は  $50\text{\AA}$  で一定とした。 $48\text{sccm}$  までは TMI 流量の増加にともない発振波長が長波長化していくが、途中で飽和してしまい波長が変化しなくなる。これは前述したように結晶成長モードが変化し、過剰投与された In が結晶内で偏析し、InGaAs 組成変化に寄与しなくなるためと思われる。図 5-5-5 において、条件 A と条件 B の発振波長はいずれも  $1.08\mu\text{m}$  であるが、偏析の度合いが異なっているものと予想される。

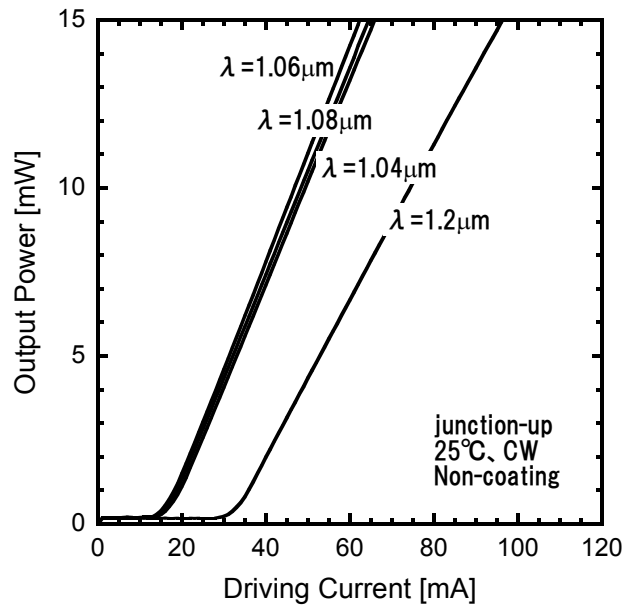


図 5-5-3 異なる発振波長レーザの電流—光出力特性

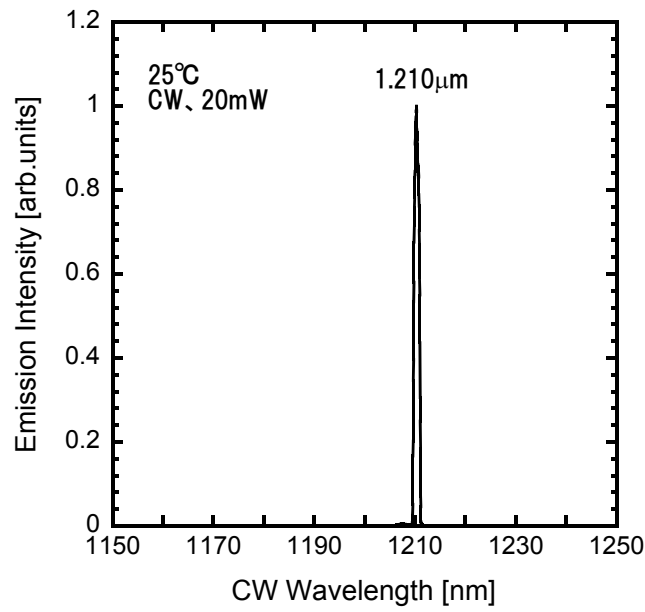


図 5-5-4 発振波長 1.2μm レーザの光スペクトル

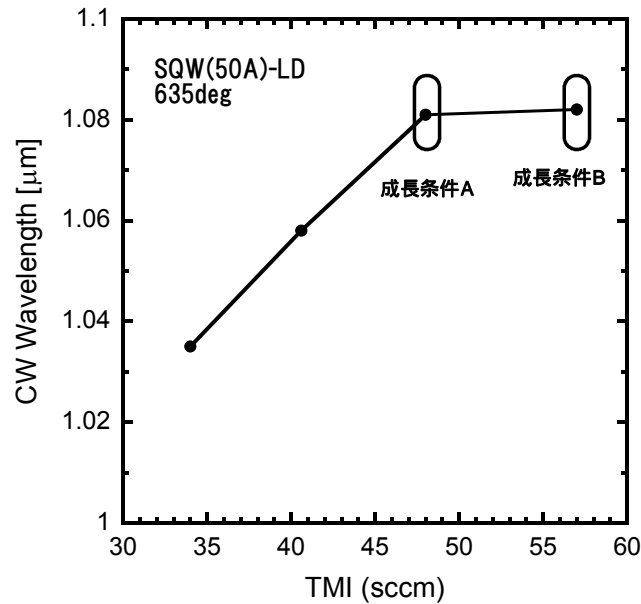


図 5-5-5 TMI 流量と CW 駆動時のレーザ発振波長

そこで InGaAs 量子井戸層の成長条件 A および B にて半導体レーザを作製し、寿命試験を行った。その結果を図 5-5-6 に示す。条件 B の素子は駆動開始後、10 時間以内に全ての素子が故障したのに対して、条件 A の素子は条件 B の素子よりも駆動条件が厳しい（駆動出力が 1.5 倍）にもかかわらず大きな素子劣化が生じないことが分かった。この結果は InGaAs 結晶の成長条件が素子寿命に大きな影響を与えることを示している。

これまでの結果をふまえ、偏析を生じさせない InGaAs 成長条件を用いて発振波長が異なる半導体レーザを作製し、寿命特性の波長依存性を評価した。寿命試験は光出力 20mW、環境温度 25°C、APC 駆動にて行った。試験に用いた素子は共振器長 1.5mm で、端面コーティングは行わなかった。この結果を表 5-5-1 に示す。表における推定寿命は、初期駆動電流値から 1.2 倍上昇した時点を見なしたときの時間である。どの波長においても数万時間以上の推定寿命が得られ、発振波長に対する大きな依存性は見られなかった。この結果から成長条件を最適化することで波長依存性の少ない（歪み量に依存しない）寿命特性を実現できることが分かった。



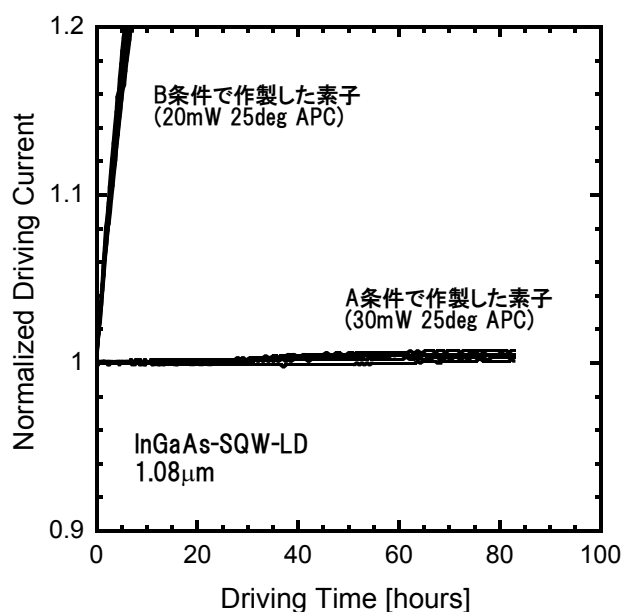


図 5-5-6 異なる成長条件で成膜した InGaAs レーザの寿命性能

表 5-5-1 異なる波長の InGaAs レーザの推定寿命

Wavelength	1.035μm	1.060μm	1.080μm
Degradation rate (1/hour)	4.27E-06	4.60E-06	4.28E-06
	7.90E-07	1.55E-06	2.08E-06
	6.10E-06	8.65E-06	1.87E-06
	9.87E-06	6.93E-06	7.08E-06
	6.83E-06	1.13E-05	5.12E-06
Estimated Lifetime (hours)	1.97E+05	1.73E+05	2.80E+05

## 5.6 1.0μm 帯 InGaAs スーパーluminescentダイオードの長寿命化

5.5 節にて得られた結果をもとに、1.0μm 帯スーパーluminescentダイオードを作製し、寿命試験を行った。用いた素子構造は InGaAs 量子井戸層/GaAs 光ガイド層/InGaP クラッド層で、試験条件は環境温度 25℃、出力 30mW、APC 駆動である。試験前のスクリーニングは行っていない。図 5-6-1 はその結果の一例である。ここで示した素子は 582 時間で故障していることが分かる。

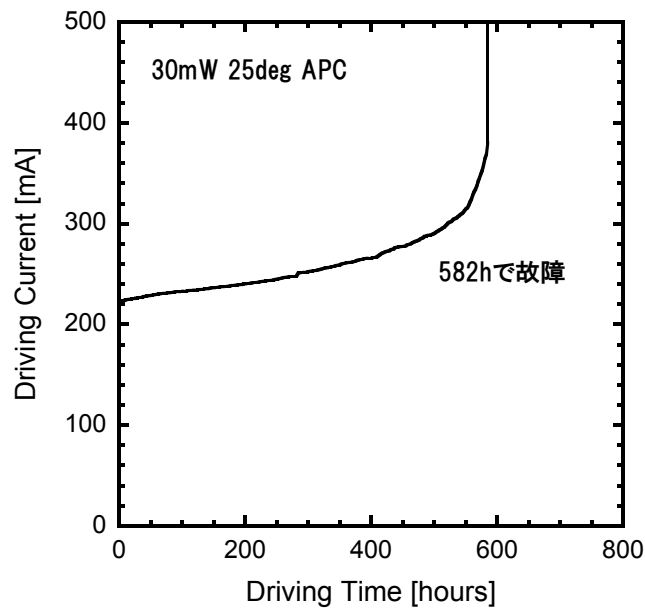


図 5-6-1 1.0 $\mu\text{m}$  帯広帯域発光素子の寿命試験結果

この素子の電流—光出力特性の経時変化を図 5-6-2 に示す。その最大光出力は熱飽和にて制限され、初期状態では 50mW 以上が得られているが、580 時間後では 30mW 程度にまで低下していることが分かる。このことから経時とともに最大光出力が低下していき、最大光出力が駆動出力値と一致した時点で故障したと推測できる。またこの結果は、この素子の劣化モードが 0.98 $\mu\text{m}$  半導体レーザにて見られる衝撃劣化（端面劣化）ではなく、緩慢劣化（バルク劣化）であることを示している。

バルク劣化は活性層材料中に存在する結晶欠陥が通電により増殖することで生じる<sup>31)</sup>。結晶欠陥の増殖速度は活性層の駆動状態により左右されると考え、最も影響を受けると思われる活性層における光閉じ込め率との関係性を評価した。用いた素子構造はさきほどと同じく InGaAs 量子井戸層/GaAs 光ガイド層/InGaP クラッド層である。図 5-6-3 は計算により算出した光閉じ込め率と素子の劣化率との関係をプロットしたものである。この実験では光閉じ込め率を変化させるにあたり、光ガイド層厚み及び発光ピーク波長を変えている。寿命試験は環境温度 25 $^{\circ}\text{C}$ において駆動出力 30mW および 20mW の 2 水準で行った。この図から光閉じ込め率が増加す

ると素子の劣化率が大きくなっていることが分ける。特に光出力 30mW での動作にてそれが顕著である。この結果は素子の劣化率が活性層における光閉じ込め率に大きく影響されることを示しているとともに、光閉じ込め率を下げることで長寿命化が可能であることを示唆している。

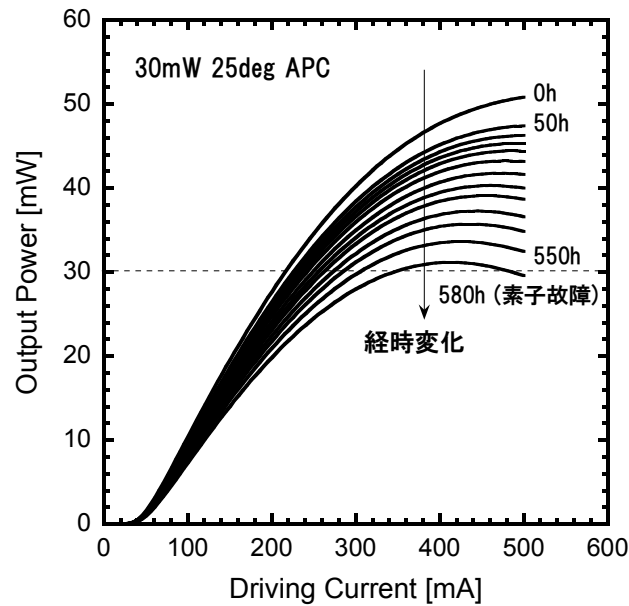


図 5-6-2 1.0 $\mu\text{m}$  帯広帯域発光素子における IL 特性の経時変化

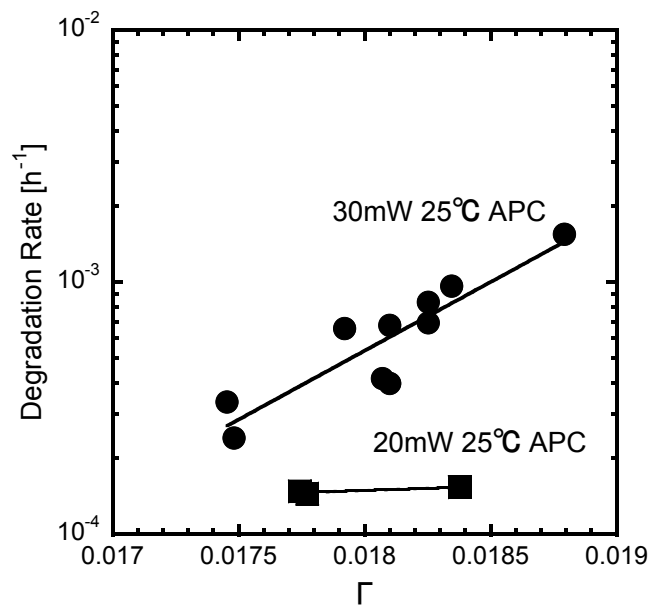


図 5-6-3 光閉じ込め率  $\Gamma$  と劣化率との関係

そこで光閉じ込め率を下げるため、光ガイド層に GaAs ではなく InGaAsP ( $E_g=1.50\text{eV}$ ) を用いた素子を作製して評価を行った。素子から出射される光のビーム径を合わせるため、InGaAsP ガイド層の厚みは片側 65nm とした。光ガイド層の違いが光導波路のビームプロファイルに与える影響を計算により求めたのが図 5-6-4 (GaAs ガイド層、厚み  $W_g=0.22\mu\text{m}$ ) と図 5-6-5 (InGaAsP ガイド層、厚み  $W_g=0.13\mu\text{m}$ ) である。横軸は距離を表しており、距離 0 が量子井戸活性層の中心を示している。この図から InGaAsP ガイド層を用いることで GaAs ガイド層よりも量子井戸層における光パワー密度を低下できていることが分かる。

それぞれの光閉じ込め率を波長  $1.05\mu\text{m}$  で計算すると、InGaAsP ガイド層で  $\Gamma=0.0175$ 、GaAs ガイド層で  $\Gamma=0.0185$  となる。これらの素子を用いて光出力 30mW、環境温度  $25^\circ\text{C}$ 、APC 駆動にて寿命試験を行った。素子の発光中心波長は  $1.05\mu\text{m}$  で、事前のスクリーニングは行っていない。この結果を図 5-6-6 に示す。GaAs ガイド層の素子における初期駆動電流値は約 210mA で、InGaAsP ガイド層の素子の約 360mA と比較して大幅に小さいが、寿命性能としては明らかに InGaAsP ガイド層の素子のほうが上回っていることが分かる。GaAs ガイド層の素子が 1000 時間以内にすべて故障したのに対して、InGaAsP ガイド層の素子は 4500 時間を超えても安定して動作することが分かった。この結果は、当初の予測通り光閉じ込め率を制御することで素子内部の劣化を抑制でき、長寿命化できることを示している。

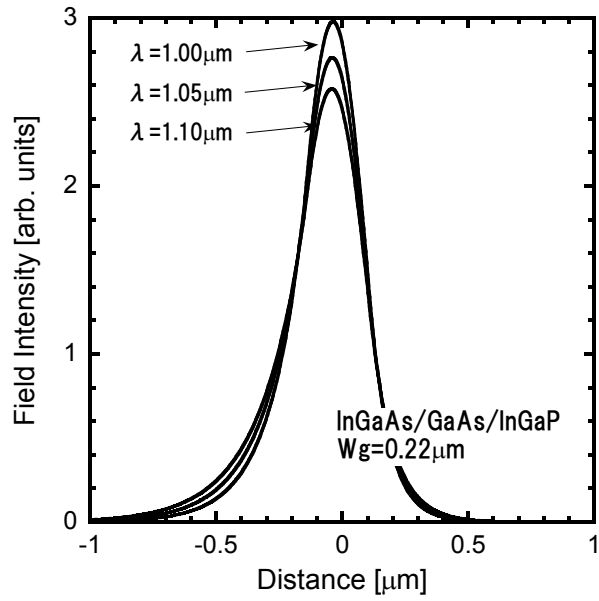


図 5-6-4 GaAs ガイド層における光導波パターン

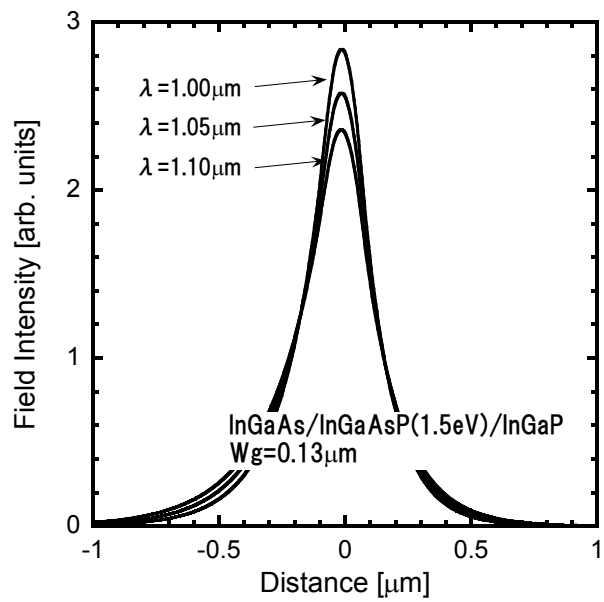


図 5-6-5 InGaAsP ガイド層における光導波パターン

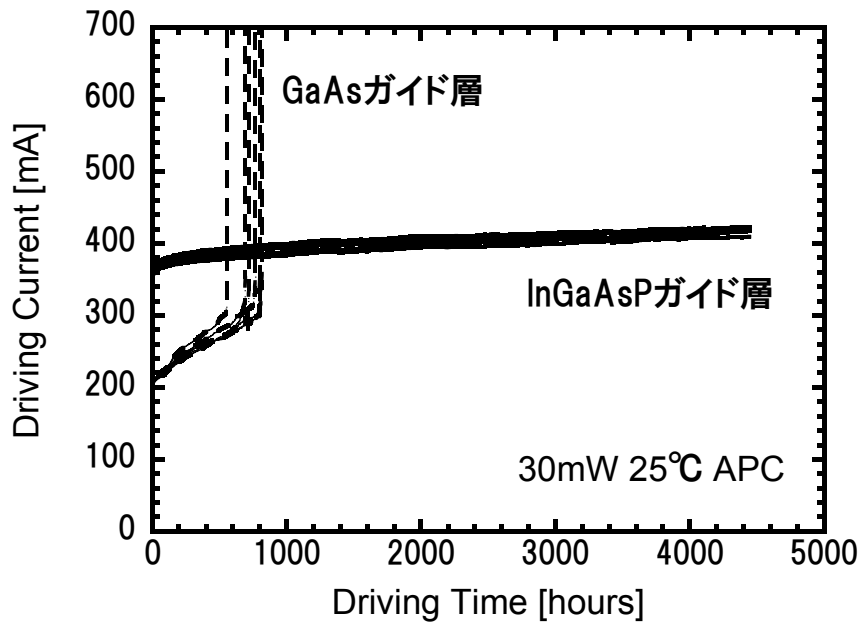


図 5-6-6 ガイド層違いにおける寿命試験結果

## 5.7 まとめ

1.0 $\mu\text{m}$  帯広帯域スーパーluminescentダイオードの高信頼性化に取り組み、InGaAs 量子井戸層における光閉じ込め率を低減させることで寿命性能を改善できることを明らかにした。光出力 30mW、環境温度 25 $^{\circ}\text{C}$ 、APC 駆動条件において駆動電流値が 400mA 程度と非常に大きいにもかかわらず、4500 時間以上の安定動作が確認できた。これは目標とした 3000 時間を大幅に超える値である。

## 第5章の参考文献

- 1) J. J. Coleman, "Strained-Layer InGaAs quantum-well heterostructure Lasers", IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., Vol.6, No.6, pp.1008-1013 (2000)
- 2) J. W. Matthews, A. E. Blakeslee, "Defects in epitaxial multilayers : I. Misfit dislocations", J. Crystal Growth, Vol.27, pp.118-125 (1974)
- 3) R. People, J. C. Bean, "Calculation of critical layer thickness versus lattice mismatch for  $\text{Ge}_x\text{Si}_{1-x}/\text{Si}$  strained-layer heterostructure", Appl. Phys. Lett., Vol.47, pp.322-324 (1985)
- 4) E. Yablonovitch, E. O. Kane, "Reduction of lasing threshold current density by the lowering of valence band effective mass", J. Lightwave Technol., Vol.4, pp.504-506 (1986)
- 5) A. R. Adams, "Band-structure engineering for low-threshold high-efficiency semiconductor lasers", Electron. Lett., Vol.22, pp.249-250 (1986)
- 6) K. J. Beernink, P. K. York, J. J. Coleman, R. G. Waters, J. Kim, C. M. Wayman, "Characterization of InGaAs-GaAs strained-layer lasers with quantum wells near the critical thickness", Appl. Phys. Lett., Vol.5, pp.2167-2169 (1989)
- 7) S. Ishikawa, K. Fukagai, H. Chida, T. Miyazaki, H. Fujii, and K. Endo, "0.98-1.02  $\mu\text{m}$  strained InGaAs/AlGaAs double quantum-well high-power lasers with GaInP buried waveguides", IEEE J. Quantum Electron., Vol.29, No.6, pp.1936-1942 (1993)
- 8) R. G. Waters, P. K. York, K. J. Beernink, and J. J. Coleman, "Viable strained-layer laser at  $\lambda = 1100\text{nm}$ ", J. Appl. Phys., Vol.67, pp.1132-1134 (1990)
- 9) S. L. Yellen, R. G. Waters, P. K. York, K. J. Beernink, J. J. Coleman, "Reliable InGaAs quantum well lasers at 1.1  $\mu\text{m}$ ", Electron. Lett., Vol.28, pp.552-553 (1991)
- 10) F. Bugge, G. Erbert, J. Fricke, S. Gramlich, R. Staske, H. Wenzel, U. Zeimer, "12W continuous-wave diode lasers at 1120 nm with InGaAs quantum wells", Appl. Phys. Lett., Vol.79, pp.1965-1967 (2001)

- 11) D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. Chen, F. Koyama, "1.17- $\mu\text{m}$  highly strained GaInAs-GaAs quantum-well laser", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.11, No.8, pp.946-948 (1999)
- 12) N. Tansu, and L. J. Mawst, "High-performance strain-compensated InGaAs-GaAsP-GaAs ( $\lambda = 1.17\mu\text{m}$ ) quantum-well diode lasers", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 13, No.3, pp.179-181 (2001)
- 13) Z. Chen, D. Schlenker, T. Miyamoto, T. Kondo, M. Kawaguchi, F. Koyama, and K. Iga, "High temperature characteristics of nearly 1.2 $\mu\text{m}$  GaInAs/GaAs/AlGaAs lasers", Jpn. J. Appl. Phys. Vol.38, pp.L1178-1179 (1999)
- 14) W. -J. Choi, P. D. Dapkus, and J. J. Jewell, "1.2- $\mu\text{m}$  GaAsP/InGaAs strain compensated single-quantum-well diode laser on GaAs using metal-organic chemical vapor deposition", IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.11, No.12, pp.1572-1574 (1999)
- 15) S. B. Poole, D. N. Payne, M.E. Fermann, "Fabrication of low-loss optical fibres containing rare-earth ions", Electron. Lett., Vol.21, pp.737-738 (1985)
- 16) G. C. Osbourn, "Strained-layer superlattices from lattice mismatched materials", J. Appl. Phys., Vol.53, pp.1586-1589 (1982)
- 17) T. Katsuyama, Y. J. Yang, S. M. Bedair, "Lifetime test for high-current-injection strained-layer superlattice light-emitting diode", IEEE Electron. Device Lett., Vol.8, pp.240-242 (1987)
- 18) S. E. Fischer, R. G. Waters, D. Fekete, J. M. Ballantyne, Y. C. Chen, and B. A. Soltz, "Long-lived InGaAs quantum well lasers", Appl. Phys. Lett., Vol.54, pp.1989-1990 (1989)
- 19) R. M. Kolbas, N. G. Anderson, W. D. Laidig, Y. Sin, Y. C. Lo, K. Y. Hsieh, and Y. J. Yang, "Strained-layer InGaAs-GaAs-AlGaAs photopumped and current injection lasers", IEEE J. Quantum Electron., Vol.24, No.8, pp.1605-1613 (1988)
- 20) H. Horie, Y. Yamamoto, N. Arai, and H. Ohta, "Thermal rollover characteristics up to



- 150 °C of buried-stripe type 980-nm laser diodes with a current injection window delineated by a SiN<sub>x</sub> layer”, IEEE Photon. Technol. Lett., Vol.12, No.1, pp.13-15 (2000)
- 21) M. Fukuda, M. Okayasu, J. Temmyo, and J. Nakano, “Degradation behavior of 0.98- $\mu$ m strained quantum well InGaAs/AlGaAs lasers under high-power operation”, IEEE J. Quantum Electron., Vol.30, No.2, pp.471-476 (1994)
- 22) H. Horie, H. Ohta, T. Fujimori, “Reliability improvement of 980-nm laser diodes with a new facet passivation process”, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., Vol.5, No.3, pp.832-838 (1999)
- 23) J. Hashimoto, N. Ikoma, M. Murata, and T. Katsuyama, “A highly reliable GaInAs-GaInP 0.98 $\mu$ m window laser”, IEEE J. Quantum Electron., Vol.36, No.8, pp.971-977 (2000)
- 24) H. Mawatari, M. Fukuda, K. Magari, Y. Suzuki, N. Yoshimoto, Y. Kondo, H. Takeuchi, Y. Tohmori, “Reliability and degradation behavior of semiconductor optical amplifiers integrated with spot-size converters”, CLEO/Pacific Rim’99, Vol.4, pp.1157-1158 (1999)
- 25) H. kamioka, H. Oohashi, M. Okamoto, K. Magari, T. Ito, and Y. Tohmori, “Relationship between ASE and gain during the degradation for a semiconductor optical amplifier with spot-size converters (SS-SOA)”, Optical Amplifiers and Their Applications. Optical Society of America, pp.128-130 (2001)
- 26) D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. Chen, F. Koyama, K. Iga, “Growth of highly strained GaInAs/GaAs quantum wells for 1.2 $\mu$ m wavelength lasers”, J. Crystal Growth, Vol.209, pp.27-36, (2000)
- 27) F. Bugge, U. Zeimer, M. Sato, M. Weyers, G. Trankle, “MOVPE growth of highly strained InGaAs/GaAs quantum wells”, J. Crystal Growth, Vol.183, pp.511-518, (1998)
- 28) I. Rechenberg, A. Klehr, U. Richter, W. Erfurth, F. Bugge, A. Klein, “Interdiffusion-induced degradation of 1017 nm ridge waveguide laser diodes”, J. Crystal Growth, Vol.210,

- pp.307-312, (2000)
- 29) F. Bugge, U. Zeimer, H. Wenzel, G. Erbert, M. Weyers, “Interdiffusion in highly strained InGaAs-QWs for high power laser diode applications”, *J. Crystal Growth*, Vol.272, pp.531-537, (2004)
- 30) D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. B. Chen, M. Kawaguchi, T. Kondo, E. Gouardes, F. Koyama, K. Iga, “Critical layer thickness of 1.2- $\mu\text{m}$  highly strained GaInP/GaAs quantum wells”, *J. Crystal Growth*, Vol.221, pp.503-508, (2000)
- 31) K. Kondo, O. Ueda, S. Isozumi, S. Yamakoshi, K. Akita, and T. Kotani, “Positive feedback model of defect formation in gradually degraded GaAlAs light emitting devices”, *IEEE Trans. Electron Devices*, ED-30, pp.321-326 (1983)

## 第6章 結言

この章では、本論文の総括と今後の展開について述べる。本研究は GaAs 系半導体発光素子の応用範囲を広げるため、従来の赤色半導体レーザ、赤外半導体レーザに新たな「機能」を付加し、さらに実用化に耐えうる「寿命性能」を実現することを目的に行ったものである。

本研究の成果の1つは、プラスチック光ファイバ通信用の光源として高信頼性と高速変調特性を同時に満たした赤色半導体レーザを開発したことである。高信頼性については、まず目標性能である寿命 10 万時間に対して劣化モードが COMD による衝撃劣化ではなく、緩慢劣化であることを示した。また赤外半導体レーザ（波長  $0.94\mu\text{m}$ ）と比べて赤色半導体レーザ（波長  $0.66\mu\text{m}$ ）の寿命時間が、駆動電流密度に対して依存性が大きいことを明らかにした。そこで駆動電流密度を低減させるため、結晶品質の改善に取り組んだ。まず AlGaInP クラッド層の結晶品質を改善することで、 $60^\circ\text{C}$ 、 $5\text{mW}$  駆動にて目標寿命性能である 10 万時間を超える推定平均寿命 80 万時間を達成した。この性能は故障率 1%換算においても推定寿命 20 万時間に相当する。さらに GaInP 量子井戸層の結晶品質を改善することで  $90^\circ\text{C}$ 、 $5\text{mW}$  駆動においても 10 万時間を超える推定平均寿命が得られた。一方、高速変調特性についても半導体レーザ内部の寄生容量を電氣的に分離する構造を採用することで、 $1.25\text{Gbps}$  の変調特性を実現させた。これらの結果はこれまで InP 系材料のみでしか実現しえなかった通信用光源に必要な性能を GaAs 系の赤色半導体レーザにて実現できることを示したものである。

また2つ目の成果は、 $1.0\mu\text{m}$  帯赤外半導体素子を用いて「発光スペクトルの広帯域化」と「高出力化」を両立させたことである。この「広帯域化」と「高出力化」は半導体の発光原理からトレードオフの関係にあるが、異なる波長で発光する量子井戸層を2つ素子内部に集積することで、トレードオフを上回る性能を得ることが

できた。具体的には従来の単一量子井戸構造の素子と比較して、波長帯域幅で 1.4 倍、光出力で 1.65 倍の値が得られている。また本素子の長寿命化に取り組み、量子井戸層における光閉じ込め率と寿命時間との間に相関があることを明確にした。その結果を受けて、光ガイド層の材質を GaAs から InGaAsP へと変更を行い、光閉じ込め率を低減させることで 25°C、30mW 駆動にて 4500 時間以上の安定動作を実現させた。

この研究を通して得られた素子構造設計技術、結晶成長技術、劣化モード解析技術は赤色半導体レーザ、赤外半導体発光素子など波長帯に限定されるものではなく、今後の GaAs 系半導体発光素子の高機能化に寄与するものと考えている。

今後は半導体発光素子単体での高機能化だけではなく、外部に設けられた光学素子と組み合わせてデバイスを構成し、従来得ることができなかった機能を実現していくことが必要と考えている。例えば図 6-1-1 は、第 4 章で作製した広帯域半導体発光素子を利得媒体としてリングレーザ型外部共振器レーザを構成したものである。リングレーザを構成している各部品は光ファイバにより接続されており、波長フィルタには誘電体多層膜フィルタ（波長可変は手動にて行う）を用いている。このレーザの原理は次のようになる。半導体発光素子から放出された広帯域な光は波長フィルタによって特定の波長光だけが透過し、リングを周回することで再び半導体発光素子へと戻される。戻ってきた光は半導体発光素子により増幅され、再びリングレーザ内を周回する。これを繰り返し、共振器内の損失と光半導体素子の利得がつりあった時点でレーザ発振が生じる。このレーザ光は光カップラにより取り出すことができる。そして波長フィルタの透過波長を変えることでレーザ光の波長を変えることができる。図 6-1-2 に試作した波長可変レーザの波長可変特性を示す。半導体発光素子を環境温度 25°C、電流値 400mA にて駆動させ、1mW 出力以上を波

長可変幅とした場合で 110nm、10mW 出力以上を波長可変幅とした場合でも 90nm という広い帯域での波長可変特性が得られた。このような性能は半導体発光素子だけでは得られないものであり、外部素子と組み合わせて高機能化を行うことで、更に半導体発光素子の応用範囲を広げられるものと考えている。

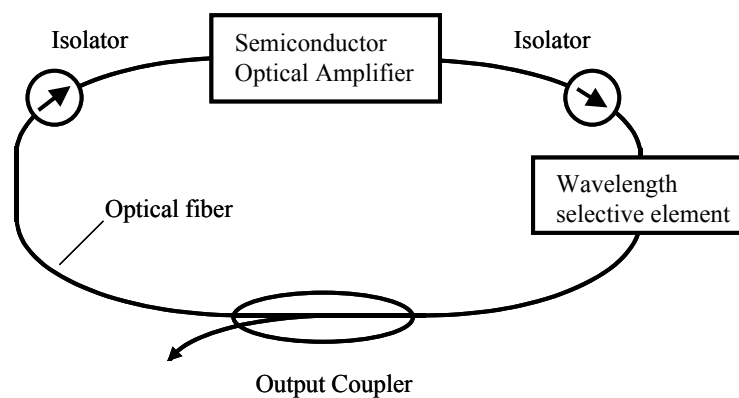


図 6-1-1 リングレーザ型外部共振器レーザの構成

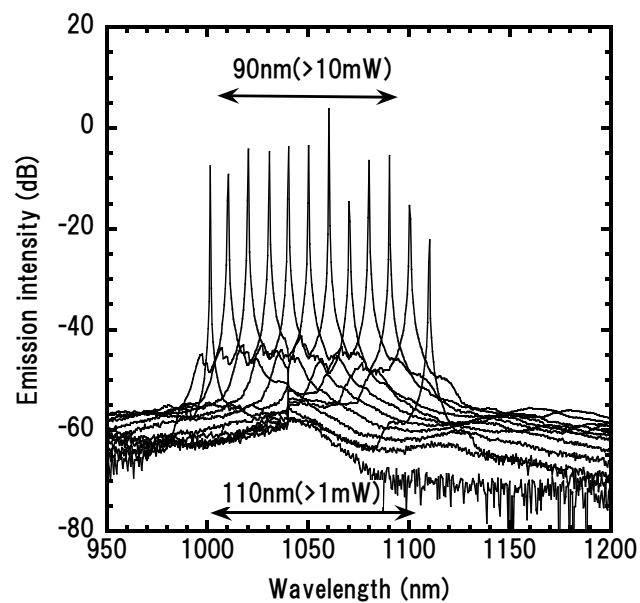


図 6-1-2 波長可変レーザ特性

## 研究業績リスト

### 筆頭論文

- (1) 大郷 毅、和田 貢、山中英生、浅野英樹、国安利明、福永敏明、早川利郎、”広い光導波層を有する 2W 級 InGaAsP/InGaP/AlGaAs 高出力レーザ”、電子情報通信学会技術研究報告(信学技報)、99 巻、pp.13-18 (1999)
- (2) 大郷 毅、福永敏明、早川利郎、”Al フリー高出力半導体レーザとその応用”、電気学会論文誌 C、Vol.125、pp.206-211 (2005)
- (3) T. Ohgoh, A. Mukai, A. Mukaiyama, H. Asano, and T. Hayakawa, “Improved characteristics of 660 nm AlGaInP red laser diodes by precise control of the V/III ratio in metal-organic vapor phase epitaxy”, Appl. Phys. Lett., Vol.89, No.18, pp.181117-1 - 181117-3 (2006)
- (4) T. Ohgoh, A. Mukai, A. Mukaiyama, H. Asano, T. Hayakawa, “Highly reliable operation of 660 nm visible laser diodes at high temperatures”, Electron. Lett., Vol.42, pp.1033-1034 (2006)
- (5) T. Ohgoh, T. Fukunaga, T. Hayakawa, “Technologies and application of Al-free high-power laser diodes”, Electrical Engineering in Japan, Vol.158, pp.53-59 (2007)
- (6) 大郷 毅、向井厚史、向山明博、浅野英樹、早川利郎、”POF データリンク用高信頼性赤色半導体レーザ”、電気学会論文誌 C、Vol.128、pp.717-722 (2008)
- (7) T. Ohgoh, A. Mukai, A. Mukaiyama, H. Asano, T. Hayakawa, “Highly reliable operation of red laser diodes for POF data links”, Electronics and Communications in Japan, Vol.92, pp.13-19 (2009)
- (8) T. Ohgoh, A. Mukai, J. Yaguchi, and H. Asano, “Demonstration of 1.0  $\mu\text{m}$  InGaAs high-power and broad spectral bandwidth superluminescent diodes by using dual quantum well structure”, Appl. Phys. Express, Vol.6, pp.014101-014104 (2013)

- (9) T. Ohgoh, H. Asano, K. Hamamoto, “Reliability improvement of Superluminescent diodes emitting at 1.0  $\mu\text{m}$  band using InGaAsP barrier structure”, *Electron. Lett.*, Vol.49, pp.409-410 (2013)
- (10) 大郷 毅、向井厚史、矢口純也、浅野英樹、”高出力、広帯域特性を両立させた 1 $\mu\text{m}$  帯スーパーluminescentダイオード”、電気学会論文誌C、Vol.133、pp.1437-1442 (2013)

#### 共著論文

- (1) T. Hayakawa, M. Wada, F. Yamanaka, H. Asano, T. Kuniyasu, T. Ohgoh, T. Fukunaga, “Effects of broad-waveguide structure in 0.8  $\mu\text{m}$  high-power InGaAsP/InGaP/AlGaAs lasers”, *Appl. Phys. Lett.*, Vol.75, pp.1839-1841 (1999)
- (2) F. Yamanaka, M. Wada, T. Kuniyasu, T. Ohgoh, T. Fukunaga, T. Hayakawa, “2 W reliable operation in 50  $\mu\text{m}$ -wide InGaAsP/InGaP/AlGaAs ( $\lambda = 810 \text{ nm}$ ) SQW diode lasers with tensile-strained InGaP barriers”, *Electron. Lett.*, Vol.37, pp.1289-1290 (2001)
- (3) L. Krainer, D. Nodop, G. J. Spuhler, S. Lecomte, M. Golling, R. Paschotta, D. Ebling, T. Ohgoh, T. Hayakawa, K. J. Weingarten, and U. Keller, “Compact 10-GHz Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with 0.5-W average output power and low timing jitter”, *Opt. Lett.*, Vol.29, pp.2629-2631 (2004)
- (4) S. Lecomte, M. Kalisch, L. Krainer, G. J. Spuhler, R. Paschotta, M. Golling, D. Ebling, T. Ohgoh, T. Hayakawa, S. Pawlik, B. Schmidt, U. Keller, “Diode-pumped passively mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> lasers with 40-GHz repetition rate”, *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol.41, pp.45-52 (2005)
- (5) Y. Morishima, J. Yaguchi, A. Mukai, T. Ohgoh, H. Asano, “Longitudinal bandgap

modulated broadband (>150 nm) InGaAs/GaAs MQWs superluminescent diodes by selective area MOVPE growth”, Electron. Lett., Vol.45, pp.521-522 (2009)

#### その他、出版物

- (1) 大郷 毅、向井厚史、向山明博、森島嘉克、浅野英樹、早川利郎、”POF 対応高信頼性赤色半導体レーザ”、富士フイルム研究報告、第 51 号、p.76- 79 (2006)  
<http://www.fujifilm.co.jp/rd/report/rd051/index.html#anchor01>
- (2) 大郷 毅、森島嘉克、向井厚史、矢口純也、浅野英樹、”光センシング用広帯域半導体光源”、富士フイルム研究報告、第 54 号、p.47- 50 (2009)  
<http://www.fujifilm.co.jp/rd/report/rd054/index.html#anchor01>

#### 学会発表

- (1) 大郷 毅、和田 貢、山中英生、浅野英樹、国安利明、福永敏明、早川利郎、”InGaAsP/InGaP/AlGaAs 高出力レーザにおけるブロードガイド層の効果”、第 60 回応用物理学会学術講演会（甲南大学）、講演予稿集 3a-ZE-21、p.973 (1999)
- (2) 大郷 毅、山中英生、和田 貢、国安利明、福永敏明、早川利郎、”0.8  $\mu\text{m}$  高出力 InGaAsP/InGaP/AlGaAs レーザの信頼性向上”、第 48 回応用物理学関連連合後援会（明治大学）、講演予稿集 29a-ZT-1、p.1141 (2001)
- (3) 向井厚史、大郷 毅、向山明博、浅野英樹、早川利郎、”高信頼性 POF データリンク用赤色半導体レーザ I”、第 67 回応用物理学会学術講演会（立命館大学）、講演予稿集 30a-ZT-4、p.1055 (2006)
- (4) 大郷 毅、向井厚史、向山明博、浅野英樹、早川利郎、”高信頼性 POF データリンク用赤色半導体レーザ II”、第 67 回応用物理学会学術講演会（立命館大学）、



講演予稿集 30a-ZT-5、p.1055 (2006)

- (5) 大郷 毅、向井厚史、向山明博、浅野英樹、早川利郎、”POF データリンク用高信頼性赤色半導体レーザー”、光・量子デバイス研究会、OQD-06-42、pp.27-32 (2006)
- (6) 大郷 毅、向井厚史、森島嘉克、矢口純也、浅野英樹、”発光領域の多重化によるスペクトルの広帯域化 I”、第 56 回応用物理学関連連合後援会 (筑波大学)、講演予稿集 1p-G-17 (2009)
- (7) 森島嘉克、矢口純也、向井厚史、大郷 毅、浅野英樹、”発光領域の多重化によるスペクトルの広帯域化 II”、第 56 回応用物理学関連連合後援会 (筑波大学)、講演予稿集 1p-G-18 (2009)
- (8) Atsushi Mukai, Yoshikatsu Morishima, Tsuyoshi Ohgoh, Junya Yaguchi, Hideki Asano, “1.0  $\mu\text{m}$  semiconductor light sources with wide bandwidth for optical coherence tomography”, SPIE Photonics West 2009, p.43 (2009)
- (9) 大郷 毅、向井厚史、矢口純也、浅野英樹、”光センシング用広帯域半導体光源”、光・量子デバイス研究会、OQD-11-24、pp.1-5 (2011)

#### 特許出願リスト (筆頭分)

- (1) 特開 2001-267689、”半導体レーザー素子”、2000 年 3 月 16 日出願、大郷 毅、福永敏明
- (2) 特開 2002-217493、”半導体レーザー素子”、2001 年 1 月 15 日出願、大郷 毅、福永敏明
- (3) 特開 2003-017811、”半導体レーザー素子”、2001 年 6 月 29 日出願、大郷 毅、福永敏明
- (4) 特開 2003-023218、”半導体レーザー素子”、2001 年 7 月 6 日出願、大郷 毅

- (5) 特開 2003-069148、”半導体レーザー素子”、2001 年 8 月 27 日出願、  
大郷 毅
- (6) 特開 2003-273465、”半導体レーザー素子”、2002 年 3 月 14 日出願、  
大郷 毅
- (7) 特開 2004-055648、”半導体レーザー素子”、2002 年 7 月 17 日出願、  
大郷 毅
- (8) 特開 2005-236023、”半導体レーザー素子”、2004 年 2 月 19 日出願、  
大郷 毅
- (9) 特開 2005-236024、”半導体レーザー素子”、2004 年 2 月 19 日出願、  
大郷 毅
- (10) 特開 2005-252153、”半導体レーザー素子”、2004 年 3 月 8 日出願、  
大郷 毅
- (11) 特開 2006-269568、”半導体レーザー素子”、2005 年 3 月 23 日出願、  
大郷 毅
- (12) 特開 2006-286870、”半導体レーザーおよびそれを用いた光通信システム”、  
2005 年 3 月 31 日出願、大郷 毅
- (13) 特開 2006-339311、”半導体レーザー”、2005 年 5 月 31 日出願、  
大郷 毅
- (14) 特開 2007-088320、”光源装置および光半導体素子”、2005 年 9 月 26 日  
出願、大郷 毅
- (15) 特開 2007-165689、”スーパーluminescentダイオード”、  
2005 年 12 月 15 日出願、大郷 毅
- (16) 特開 2007-273690、”光半導体素子、及びこれを備えた波長可変光源”、  
2006 年 3 月 31 日出願、大郷 毅

- (17) 特開 2008-032590、”光半導体素子、波長可変光源、および光断層画像化装置”、2006年7月31日出願、大郷 毅
- (18) 特開 2009-049122、”光半導体素子、該光半導体素子を用いた波長可変光源および光断層画像化装置”、2007年8月17日出願、大郷 毅
- (19) 特開 2009-049123、”光半導体素子、該光半導体素子を用いた波長可変光源および光断層画像化装置”、2005年8月17日出願、大郷 毅
- (20) 特開 2009-076640、”半導体発光素子”、2007年9月20日出願、大郷 毅
- (21) 特開 2009-231423、”波長可変光源”、2008年3月21日出願、大郷 毅
- (22) 特開 2009-252960、”光半導体素子の寿命予測方法および光半導体素子の駆動装置”、2008年4月4日出願、大郷 毅
- (23) 特開 2009-289921、”半導体発光素子及び波長可変光源装置”、2008年5月28日出願、大郷 毅

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり契機を与えて頂くとともに、終始、懇切な御指導と御鞭撻を賜りました九州大学大学院総合理工学研究院 浜本貴一教授に厚くお礼申し上げます。

本研究の技術成果に関する大部分は、富士フイルム株式会社 先端コア技術研究所にてなされたものであり、本研究の機会を与えて頂くとともに御指導、御鞭撻を賜りました工学博士 早川利郎 元研究部長（現執行役員）、理学博士 福永敏明 元主席研究員、浅野英樹マネージャーに深く感謝致します。

また研究を進めるにあたり、研究開発の現場で多大なご協力とご助言を頂きました向井厚史マネージャー、森島嘉克様、向山明博様、矢口純也様、神谷希代子様、山口美佳様、小石川結樹様に深く感謝致します。その他にも半導体レーザグループメンバーの方々に惜しみないご協力を頂きました。心からお礼申し上げます。

また現在の多忙な業務の中、本研究をまとめることに対してご理解と暖かいご支援を頂きました浅見正弘 元先端コア技術研究所長（現 R&D 統括本部長）、山根勝敏 研究部長、塚原次郎 研究部長に深謝いたします。

最後に日頃から筆者を支えてくれ、本研究をまとめることに理解を示してくれた家族に深く感謝いたします。