

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	レンズ集積型面出射半導体レーザーに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	足立光一郎
Author(English)	Koichiro Adachi
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第10535号, 授与年月日:2017年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小山 二三夫,淺田 雅洋,植之原 裕行,渡辺 正裕,宮本 智之
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10535号, Conferred date:2017/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

レンズ集積型面出射半導体レーザーに関する
研究

平成 29 年 (2017 年) 2 月

指導教員 小山 二三夫 教授

提出者

東京工業大学総合理工学研究科

物理電子システム創造専攻

足立 光一郎

第1章 序論.....	4
1.1 研究背景.....	4
1.2 本研究の目的.....	12
1.3 本論文の構成.....	14
参考文献.....	16
第2章 レンズ集積型面出射半導体レーザー (LISEL) の提案及び作製方法.....	18
2.1 はじめに.....	18
2.2 LISEL の基本構造.....	19
2.2.1 DFB レーザの基礎.....	19
2.2.2 LISEL 構造の提案.....	22
2.3 集積ミラーの設計及び作製方法.....	23
2.3.1 全反射条件の確認.....	24
2.3.2 ミラー作製方法の比較・提案.....	24
2.3.3 ミラーの試作結果.....	27
2.4 集積レンズの設計及び作製方法.....	29
2.4.1 レンズ寸法の設計.....	29
2.4.2 レンズ作製方法の検討.....	32
2.5 LISEL の基本特性.....	38
2.5.1 素子設計.....	38

2.5.2 試作結果	39
2.6 まとめ	42
参考文献.....	43
第3章 レンズ集積型面出射半導体レーザと光ファイバの結合特性.....	46
3.1 はじめに.....	46
3.2 高効率レンズの設計	47
3.3 LISEL と SMF の直接光結合.....	52
3.4 まとめ	58
参考文献.....	59
第4章 レンズ集積型面出射半導体レーザの高速化検討.....	60
4.1 はじめに.....	60
4.2 直接変調型レーザの高速化	61
4.3 フリップチップ構造の設計	63
4.4 高速動作向け LISEL の作製方法	66
4.5 高速 LISEL の動作特性.....	68
4.5.1 CW 動作特性	68
4.5.2 周波数応答特性	68
4.6 まとめ	72
参考文献.....	73
第5章 新活性層材料による高温高速特性の改善.....	75
5.1 はじめに.....	75

5.2	新活性層材料 GaInNAs	75
5.3	GaInNAs 結晶の高品質化.....	76
5.4	GaInNAs レーザの動作特性	79
5.5	まとめ	82
	参考文献.....	83
第 6 章	端面フリー型 LISEL の基礎検討.....	85
6.1	はじめに.....	85
6.2	端面フリー型 LISEL の素子構造	87
6.2	端面フリー型 LISEL の共振器設計.....	88
6.3	端面フリー型 LISEL 実現に向けた基礎検討	91
6.4	今後の展望.....	94
6.5	まとめ	95
	参考文献.....	96
第 7 章	結論	98
	本研究に関する発表	102
	謝辞.....	106

第1章 序論

1.1 研究背景

日本におけるインターネット利用者数は2014年に1億人を突破し、総人口の約8割に到達した[1]。2000年初頭には、3割程度であった利用者数がここまで増大した背景にはブロードバンドサービスの発達が大きく寄与している。特に、近年では、ブロードバンドサービスのなかでも、一般宅に光ファイバを引き込むFTTH（Fiber to the home）の普及が急速に進んでおり、家庭でも1 Gbpsの高速アクセスが可能となっている。この結果、インターネットのデータ通信量は爆発的に増大を続けている。図1.1.1は、国内ブロードバンドのダウンロードにおける総トラフィック量の年次推移を示している[2]。

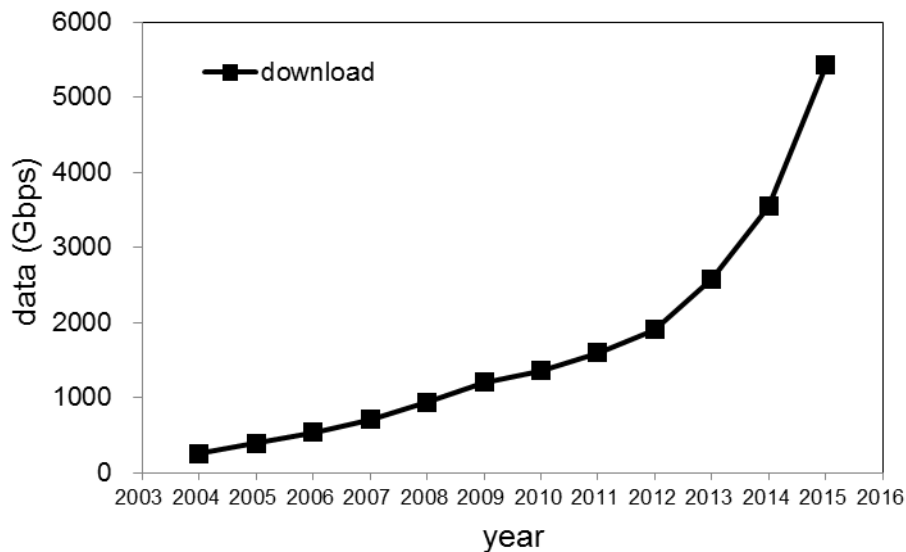


図1.1.1 データトラフィックの年次推移(総務省情報通信統計データベース “我が国のインターネットにおけるトラフィックの集計・試算” より)

データ通信量は継続的に増加しており、2015年には5Tbpsを突破した。特に2012年以降の増加は著しく、年率130%を超える割合で大幅に増大している。また、近年、プロ

ードバンドの利用と並んで、インターネットデータ量増加の一因を担っているのが、スマートフォンに代表されるモバイル端末の普及である。スマートフォンは、時間や場所を選ばず簡易にインターネットが利用できる利便性によって、データ配信サービスの利用を爆発的に増加させた。特に、電子書籍、音楽・動画配信、ソーシャルネットワークなどのメディア利用サービスや電子決済の急速な拡充により、今では必要不可欠な社会基盤としての地位を確立するに至っている。今後、世界のスマートフォンユーザー数は2020年時点で総人口の約7割にあたる55億人まで拡大し、また同年には携帯電話の利用者数が電気や水道といったインフラや自動車の利用者数を上回る見込みと予想されている[3]。

こうしたトレンドから、今後もデータ通信量は、増大し続けることが予想され、より大容量なデータ通信を可能とする光通信システムの構築が必要とされている。

図1.1.2は、光通信システムの概念図である。光通信システムは、層構造を特徴としており、階層ごとに速度や伝送方式が異なる。FTTHの普及により、基地局と家庭・オフィスをつなぐアクセス網における大容量化が急速に進展した。この結果、コア網及びメトロ網における大容量化の要求が高まった。地域間を接続するコア網では、高密度波長多重(DWDM: Dense Wave Division Multiplexing)伝送システム[4]や光クロスコネクタ(OXC: Optical Cross Connect)[5]の導入により高速大容量化が需要に見合う速度で進展した。しかしながら、メトロ網においてはアクセス網で急増するデータ容量を処理できる十分な能力を有するネットワークの構築が遅れており、メトロ網が通信トラフィックのボトルネックとなる状況が深刻な問題となっていた[6]。特に、アクセス網と接続される10-40km程度の伝送における容量拡大が急務となっていた。こうした要求に対して、2010年にIEEE802.3baにより100ギガビットイーサネット(100GbE)が策定された[7]。表1.1.1に100GbEの仕様を示す。メトロ網をカバーするため、シングルモードファイバ(SMF: Single Mode Fiber)を使用する10kmと40kmの2つの長距離仕様が規定されている。従来の10ギガビットイーサネット[8]では、1つの光モジュールから1チャンネルの10Gbps光信号を出力していた。これに対して100GbEは、WDMを利用した多チャンネル化が特徴となっている。

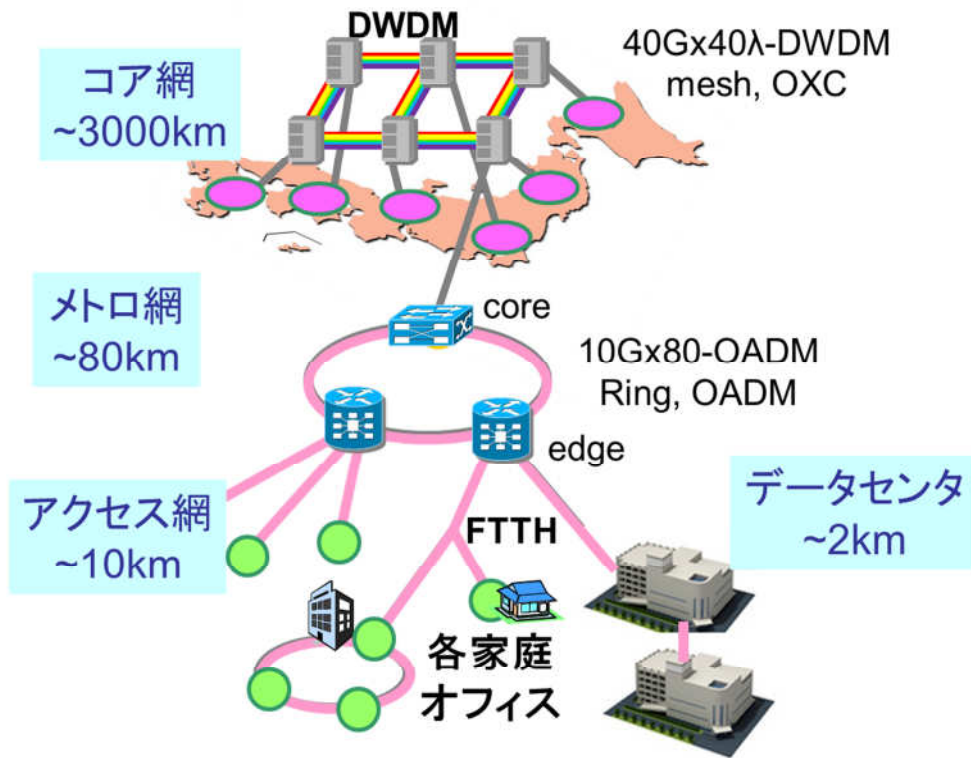


図1.1.2 光通信システム概念図

即ち、100GbEでは1チャンネル当りの速度を25Gbpsとし、これを4チャンネル実装することで100Gbpsの容量を実現している。更に、各チャンネルには異なる波長が割り当てられており、これらを光合波器で集約することで1本のSMFで100Gbpsを伝送する。この構成は、電気信号と光信号双方において100Gbpsを1チャンネルで実現することが技術的に難しく、双方のチャンネル当りの現実的な速度として25Gbpsが選択されたためである。

一方で、近年、データ配信サービスの拡大に伴い、データセンタ内の機器間もしくは機器内接続(光インタコネクタ)においても100Gbps級の光通信の導入が強く要求されている[9]。更に、Google、Facebook、Amazonなど膨大なデータを管理するサービス会社のデータセンタは大規模化が進んでおり、センタ内においても最大2km程度の通信距離が必要と言われている[10]。従来、光インタコネクタには、主としてVCSEL(VCSEL: Vertical-cavity surface-emitting laser)とマルチモードファイバ(MMF: Multi-mode Fiber)を用いたAOC(Active Optical Cable)が使用されてきた[11]。AOCは、VCSELとMMFの利用により、電力とコストを抑えられる優位点があるが、レーンあたり25Gbpsの高速伝送に

において実用的な伝送距離は100m程度に留まっている。これは主としてモード分散等に起因するMMFの帯域によって制限されている。近年では、広帯域なMMFの開発などにより、この制限を打破する開発が盛んに進められているものの実用化には至っていない[12]。加えて、後述のようにデータセンタではコストが重要視されるため、MMFより安価なSMFへの要求が高い。このような背景のもと、データセンタ内においてもSMFを使用した100Gbps級伝送システムへの要求が高まっている。

表1.1.1 100GbE仕様

Standard / MSA	Wave-length	Speed /lane	Fiber	Reach	O-MUX DMUX	TEC	Note
ER4	1.3μm	25G	SMF	40km	Required	Required	- cooled EML
LR4	1.3μm	25G	SMF	10km	Required	None	- uncooled DML
SR10	850nm	25G	MMF	100m	None	None	-VCSEL

表1.1.2はデータセンタ向け100GbEの仕様である[13、14]。これらは、IEEEでの標準化には採用されなかったものの、データセンタ内での需要拡大が見込まれた結果、光モジュールベンダ間で推進する業界標準として用いられている。

大規模化が進むデータセンタでは、使用する通信機器が膨大な数に上るため、運用コストの低減が大きな課題となる。このため、使用される光モジュールも、製造コストの低減や省電力性が重要視された仕様とされている。例えば、全仕様において、温度調節機能を必要としないアンクルド動作が要求されている。また、長距離系(10km, 40km)の100GbEには存在しない、4本のSMFを用いたパラレル伝送規格(PSM4)が加えられている点も大きな特徴である。光合波器を無くすことで抜本的な低コスト化を狙っているが、アレイSMFへの光結合という新たな実装の課題が発生している。

表1.1.1及び表1.1.2は、光モジュールの構成仕様を規定したものである。これに対して、モジュール筐体のサイズ、消費電力、コネクタ配置といったフォームファクタの規格が

MSA(MSA: Multi-source agreement)とよばれる業界標準として規定されている[15].

表1.1.2 データセンタ向け100GbE仕様

Standard / MSA	Wave-length	Speed /lane	Reach	O-MUX DMUX	TEC	FEC	Note
CLR4	1.3 μ m CWDM	25G	2km	Required	None	None/ Required	Low power consumption - Uncooled DML
CWDM4	1.3 μ m CWDM	25G	2km	Required	None	Required	- Low power consumption - Uncooled DML
PSM4	1.3 μ m Parallel	25G	500m	None	None	Required	- Low power consumption - Uncooled DML
SR4	850nm	25G	100m	None	None	Required	- VCSEL

表1.1.3に100GbE用フォームファクタのMSAをまとめた。比較のため10GbEの最小規格であるSFP+も記載した。100GbEのフォームファクタはローマ数字の100を表すCを頭文字に取りCFPと呼ばれている。

第一世代のCFP(CFP:Centum Form-factor Pluggable)は、SFP+と比較してサイズ、消費電力ともに格段に大きい。これは、10GbEで培われた従来技術の流用を想定しているためである。一方で、幅1インチ当たりの伝送密度はSFP+の19.52Gbps/inchに対して、CFPでは31.94Gbps/inchと約1.6倍となっており、従来技術を活用しつつ通信機器の伝送密度を増大可能な仕様に設計されている。しかしながら、増大を続けるデータの大容量化に対応して行くためには、通信機器あたりの更なる容量増大が必須である。このため、CFPより小型な次世代・次々世代フォームファクタのロードマップが策定されている。

第三世代のCFP4では、SFP+に対して体積比で3倍程度の小型パッケージの中に10倍の伝送容量を実現することが要求されている。また、CFPと比較すると、約1/10の体積に同じ100Gbpsの伝送容量を収容することが求められる。図1.1.3に、CFPとCFP4のサイズ比較を示す。CFPでは、送信、受信ともにそれぞれ4つのサブアセンブリが実装された構成が一般的である。ここで、制御ICや波長合分波器を考慮したサブアセンブリのサイズは一例として、高さ6mm以下、幅6mm以下、長さ24mm以下程度である[16]。表1.1.3に示すようにCFP4の横幅は21.4mmと、CFPの82.0mmの約1/4である。このサイズ制約か

ら、CFP4ではCFP内の1つのサブアセンブリとほぼ同一サイズの中に4チャンネル分の部品を収める必要がある。つまり、実装密度としては4倍となる。サブアセンブリ内の主要な構成部品は、光源である半導体レーザ(或いはフォトダイオード)、レーザを駆動するドライバIC(或いはフォトダイオード用の増幅IC)、光素子と光ファイバを光学的に結合するためのレンズである。これらの部品をいかに高密度に収容するかが課題であり、新しい実装・集積技術の開発が求められる。一方、データセンタ向け100GbEにもCFP4とほぼ同一サイズの小型フォームファクタであるQSFP28[17]の適用が想定されている。

以上のように、長距離から短距離に至る全てのアプリケーションにおいて、多チャンネル構成を小型パッケージで実現する新技術の開発が強く求められている。これと併せて、データ当りのコストや電力の低減も重要課題である。4倍の高密度化が4倍の製造コストや消費電力で実現できても、運用コスト低減の観点からは利用価値が低い。このため次世代の光モジュールでは、容量のn倍化に対して運用コストをn倍よりも小さく抑える技術が必要不可欠である。

表1.1.3 フォームファクタ比較

フォームファクタ	高さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	対CFP体積比 (%)	伝送容量 (Gbps)	消費電力 (W)	密度 (Gbps/inch)	密度 (Gbps/15 inch)
SFP+	8.5	13.4	56.2	3.85	10.3	1/1.5	19.52	292.9
CFP	14.0	82.0	145.0	100.00	103.1	8/16/24/32	31.94	479.0
CFP2	12.0	41.5	108.0	32.31	103.1	3/6/9/12	63.10	946.5
CFP4	10.0	21.4	88.0	11.31	103.1	1.5/3/4.5/6	122.37	1835.6

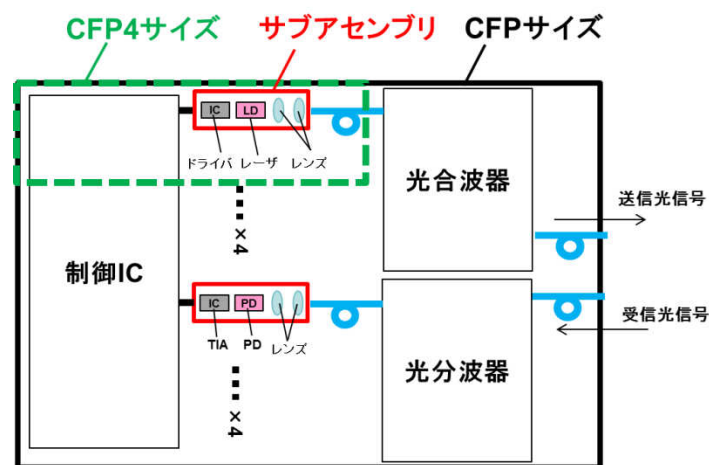


図1.1.3 CFPモジュールのサイズ比較

チャンネル数の増加と小型化は、100GbE以降の世代においても標準的な考え方になって行くことは想像に難くない。既に次世代規格の400GbEでは、チャンネルあたりの伝送容量を50Gbpsとし、8チャンネル（8波長）を用いて400Gbpsを実現する伝送方式の採用が決定している[18]。フォームファクタには、第一、第二世代でそれぞれCFP2、CFP4とほぼ同等のサイズが望まれており、100GbE以上の高密度化が必要である。更に、400GbEより先の世代では高密度化要求はさらに厳しくなると考えられる。例えば、100GbEの次世代として4倍の400GbEが提案されたように、更に次の世代として400の4倍である1.6Tbpsを仮定してみよう。最も単純な構成として、400GbEの50Gbps×8チャンネルを4セット並べることが考えられる。この場合、32チャンネルが必要となる。或いは、デバイスや高周波技術の進展によりチャンネル当り100Gbpsまで高速化が実現された場合でも、1.6Tbpsの伝送には16チャンネルが必要となる。このように、多チャンネルを小型パッケージに收容し、且つこれを低いコストで製造する技術は今後益々重要になると考えられる。

図1.1.4に、次世代100GbEで必須となる4チャンネルをひとつのサブアセンブリに收容する送信モジュールの構成を例に取り、小型化、低コスト化に向けた指針をまとめた。最も単純な構成は、4つの半導体レーザと4つのレンズと光合波器をそれぞれ個別に並べる構成である（図1.1.5の#1）。しかしながら、この構成では、チャンネル数に単純比例して部品数が増大して行く。また、小型化のためにはチャンネル間を狭ピッチに維持しつつ、チャンネル毎に、レーザ、レンズ、光合分波器間の光学アライメントが必要であり、狭い領域で高精度にアライメントする技術が必要となる。これに対してレンズ位置をサブミクロンでアライメント可能な技術が開発されている[19]。しかし、特殊な部品や装置が必要であり、内部構成や製造工程が複雑化する。このため、より低コストな新しい構成が必要である。光モジュールの低コスト化には一般に以下のアプローチが考えられる。

1. 部品点数の削減
2. 組み立て工程の簡易化
3. 部品製造コストの削減

部品数低減に向けて、半導体レーザ以外の構成部品の削減を検討した。図1.1.5の#2は、

レンズをアレイ化した構成例である。この構成では、部品数を低減可能であり、更にレンズがアレイとなっているため光学アライメントの工数低減も期待できる。但し、レンズ位置を各レーンに対して個別に調整することができないため、4つの個別半導体レーザを光合波器もしくはファイバアレイに結合させるための光学設計が鍵になると考えられる。図1.1.5の#3は、半導体レーザを一体のアレイレーザとした構成であり、部品数の大幅低減が可能である。アレイレーザとしては、半絶縁基板上に形成したDFBレーザアレイが開発されている[20]。一方で、光結合の簡易化技術が課題となる。

これらの構成に対して、SMFと直接光結合が可能な半導体レーザアレイは、小型・低コストな多チャンネル光モジュール光源として最も有望と考えられる（図1.1.4の#4）。レンズ機能として出射部にスポットサイズコンバータ（SSC: Spot Size Converter）を集積した半導体レーザアレイが開発されている[21]。SSCの集積によって、外部レンズを介さずにSMFへの光結合効率を高めることができるが、光出力の損失やレーザ特性との最適化が課題となる。このため、レンズ機能部とレーザ部分は独立した構造であることが望ましい。レンズ機能を素子に集積した2次元アレイ型のレーザとして、レーザ光を基板裏面側に出射し、出射部にレンズを集積した2次元アレイ型のVCSELが開発されている[22]。横モードがマルチモードであるためSMFとの光結合には課題があるが、レンズを用いるためレーザ特性と無関係に出射ビームの制御が可能な構造である。

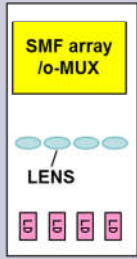
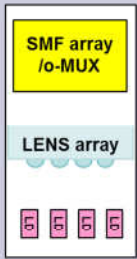
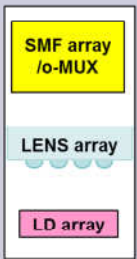
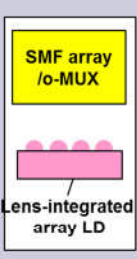
#	1	2	3	4
configuration				
component #	9	6	3	2
size	middle	middle	small	very small

図1.1.4 小型・低コストモジュールの構成例

1.2 本研究の目的

本研究では、将来の超小型・大容量光モジュールに向けて、SMFと直接光結合が可能であり、高温下において25Gbps以上で動作可能な1.3 μ m波長帯の高密度(2次元)アレイ型の新構造面出射半導体レーザの開発を目的とする。

基本となるレーザ構造として、高密度な面型アレイ構造という観点では、VCSELが有望である。VCSELは共振器がウェハに垂直方向に形成されるため、アレイ化が容易である。また、光を基板裏面側に出射することで、基板にレンズを集積することも可能である[22]。しかしながら、横モードがマルチモードであるため、SMFとの結合に課題がある。また、材料系の問題から、1.3 μ m～1.55 μ m波長帯における高温での高速動作には未だ課題が残る[23]。

一方で、長距離伝送用光源として使用されているDFBレーザは、1.3 μ m～1.5 μ m波長で開発が進められており、SMF伝送に利用されている。近年、高速高温動作の進展は著しく、85 $^{\circ}$ Cでの40Gbps動作や55 $^{\circ}$ Cでの56Gbps動作が実現されている[24]。DFBレーザは発振横モードがシングルモードであることからSMFでの伝送に適している。しかしながら、レーザ光の広がり角である遠視野像(FFP:Far-field Pattern)は通常20 $^{\circ}$ ～30 $^{\circ}$ と大きく、SMFに高効率に光結合するためには、1～2個の外部レンズが必要不可欠である。また、ウェハ面に対して水平方向に共振器が形成され、劈開端面からレーザ光を出射するため、2次元アレイ化は困難である。

従って、VCSELのような面型構造、レンズ集積簡易性や、DFBレーザの横単一モード性、高温高速特性の全てを併せ持つ光源が望まれる。DFBレーザの面出射化は、他機関により検討されているが、高効率な光結合と高温高速動作の両立は未だ実現されていない。

本研究では、上記要求を全て満たす新型レーザとして、レンズ集積型面出射半導体レーザLISEL(LISEL:Lens-integarte Surface-emitting DFB Lasr)を提案する。LISELは、DFBレーザの光出射端に光を折り曲げる45 $^{\circ}$ ミラーを一体集積し、更に折り曲げられた光の出射面に基板を加工することでレンズを集積した面出射レーザである。

本研究の第1の目的は、DFBレーザに45 $^{\circ}$ ミラー、レンズを集積する技術を開発し、面

出射構造実現の基礎技術を確立することである。窓構造を利用した45°ミラーの形成と基板加工によるレンズ形成技術を提案し、DFBレーザの特性を劣化させることなく面出射が可能な技術を提案する。

第2の目的は、SMFとの高効率な直接光結合が可能な集積レンズを設計し、これを実証することである。素子の作製尤度を考慮し、高い歩留りで高効率な光結合を実現可能なレンズ設計・試作し、従来のDFBレーザとSMFに対する光結合特性を比較することで、本研究のレーザの有用性の実証を目指す。

第3の目的は、LISEL構造において、高温25Gbps動作を実現することである。短共振器構造の適用による帯域拡大を図り高温化でも安定な25Gbps動作の実現を目指す。更にワイヤ不要なフリップチップ構造を提案し、低コスト実装可能な構造を実現する。

第4の目的は次世代の大容量化に向けて、高速特性の更なる改善を実現するための新活性層材料の検討を第4の目的とする。従来の活性層よりも高利得であり高温特性の向上が期待されるGaInNAs材料を研究対象として、高品質な結晶作製技術と1.3 μm 波長への長波長化技術を確立し、実用に十分な低いしきい電流値で1.3 μm 波長帯でのレーザ発振の実証を目的とする。

第5の目的は、端面フリーのLISEL構造の実現することである。端面フリー化により、2次元アレイ構造の実現が可能になる。更に、ウェハレベルでの検査が可能となるため、製造コスト低減が可能となり、部品価格の低減につなげることが可能である。

1.3 本論文の構成

本論文は以下の7章から成る．全体構成及び各章の関係を図1.1.6にまとめる．

第1章 序論

第2章 レンズ集積型面出射半導体レーザ (LISEL) の提案及び作製方法

第3章 レンズ集積型面出射半導体レーザと光ファイバの光結合特性

第4章 レンズ集積型面出射半導体レーザの高速化検討

第5章 新活性層材料による高温高速特性の改善

第6章 端面フリー型 LISEL の基礎検討

第7章 結論

第2章では、レーザ特性を劣化させることなく、面出射化と高効率な光結合が可能な構造として、45°ミラーとレンズを集積した新レーザ構造LISELについて述べている．コア技術となる45°ミラーとレンズの作製方法について検討し、安定な45°ミラーの実現手法と集積レンズ形状の制御技術を確立し、試作した素子を評価して、本構造の有用性を実験的に確認している．

第3章では、素子構造の観点からLISEL出射光の設計手法を確立し、SMFと高効率に光結合が可能なレンズを設計している．この際、素子の作製尤度とアライメントの簡易性を考慮している．試作したLISELとSMFの直接光結合を評価することで、光結合におけるLISELの有用性を明らかにする．

第4章では、短共振器構造を適用によるLISELの高速特性の向上を検討し、25Gbps動作を実証する．

第5章では、高速特性の更なる改善を目指し、新活性層材料を検討した．高温特性の改善が期待できる新材料GaInNAsの高品質な結晶作製方法と1.3 μm への長波長化に取り組み、GaInNAsを活性層に用いたレーザにおいて、実用に十分な低いしきい電流でのレーザ発振を実証している．

第6章では、端面フリー型LISELの基礎検討の内容について述べている．LISEL構造では、光出射側は既に端面フリー構造が実現されている．このため、素子後側に分布ブラ

ック反射鏡(DBR:Distributed Bragg Reflector)とモニタ用途を兼ねる光吸収体を一体集積した後端面フリー化構造を提案する。本構造を従来のDFB型LISELと比較して、端面フリー型LISELの実現可能性を示す。更に今後の展望として、100GbEの次の400GbE、もしくはその更に先の大容量化を視野に入れ、上記DBR集積構造を利用した25Gbpsを超える高速化について述べる。

第7章で本研究の成果をまとめる。

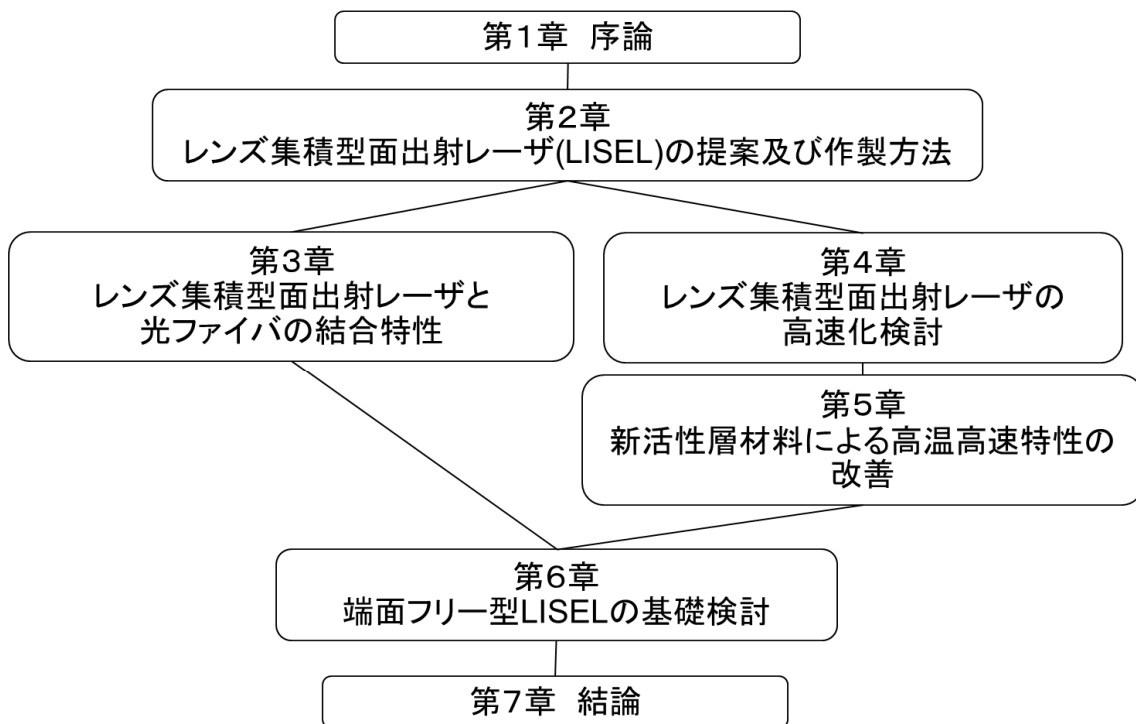


図1.1.6 本論文の構成

参考文献

- [1] 総務省情報通信統計データベース”インターネット利用人口の推移”
- [2] 総務省情報通信統計データベース”我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算”
- [3] Cisco® Visual Networking Index (VNI) Complete Forecast for 2015 to 2020:
<http://www.cisco.com/web/JP/solution/isp/ipngn/connlife/vni.html>.
- [4] H. Ishio, J. Minowa, and K. Nosu, “Review and status of wavelength-divisin multiplexing technology and its application,” J. Lightwave Teechnol., Vol. 2, No. 4. pp. 4480463, 1984.
- [5] S. Okamoto and K. Sato, “Optical Path Cross-Connect Node Architectures for Photonic Transport Network,” J. Lithgwave Technol., Vol. 14, No. 6, pp. 1410-1422, 1996.
- [6] M. D. Vaughn and R. E. Wagner, “Metropolitan Network Traffic Demand Study,” in proc. LEOS, MK4, 2000.
- [7] <http://www.ieee802.org/3/purchase/index.html>.
- [8] <http://www.ieee802.org/3/ae/index.html>.
- [9] C.Kachris and I. Tomkos, “Optical interconnection networks for data centers,” in proc. Optical Network Design and Modeling 2013 17th International Conference, pp. 19-20, 2013.
- [10] C. Cole, “100Gb/s SMF PMD Observations,” 40Gb/s and 100Gb/s Fiber Optic Task Force IEEE 802.3 Plenary Session, 2012.
- [11] T. Tokoro, Y. Ishigami, K. Tamura, and L. Marra, “Engineering a 150 Gbit/s Optical Active Cable to Meet the Needs of the Data Center Environment,” in proc. OFC, OTuQ6, 2011.
- [12] K. Nagashima, T. Kise, Y. Isikawa, and H. Nasu, “A Record 1-km MMF NRZ 25.78-Gb/s Error-Free Link Using a 1060-nm DIC VCSEL,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 28, No. 4, pp. 418-420, 2016.
- [13] <http://www.psm4.org/>
- [14] <https://www.clr4-alliance.org/100g-clr4-final-technical-specifications>
- [15] <http://www.cfp-msa.org/>
- [16] 津村, “40/100GbE 光トランシーバの最新動向とその展望,” 第11回光通信技術展, FOE-10, 2011.
- [17] <http://www.snia.org/sff/specifications/SFF-8665.pdf>
- [18] <http://www.ieee802.org/3/bs/>
- [19] T. Murao, N. Yasui, K. Mochizuki, M. Shimono, H. Kodera, D. Morita, T. Yamatoya, and H. Aruga, “Lens Alignment Technique Using High-Power Laser for Hybrid Integrated Multi-Channel Transmitter Optical Sub-Assemblies,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 25, No. 20, pp. 1958-1960, 2013.

- [20] M. Matsuda, A. Uetake, T. Simoyama, S. Okumura, K. Takabayashi, M. Ekawa, and T. Yamamoto, "Simultaneous 40-Gbps Direct Modulation of 1.3- μ m Wavelength AlGaInAs Distributed-Reflector Laser Arrays on Semi-Insulating InP Substrate," *proc. of IPRM2013, TuD2-2*, 2013.
- [21] 大山貴晴, 土居芳行, 小林亘, 金澤慈, 高畑清人, 神田淳, 黒崎武志, 田中拓也, 大野哲一郎, 三条広明, 橋本俊和, "LDアレイとAWGの直接光結合による100Gbit/s用TOSA," 電子情報通信学会エレクトロニクスソサエティ大会, C-3-45, 2015.
- [22] C. Lin, A. Tandon, K. Djordjev, S. W. Corzine, and M. R. T. Tan, "High-Speed 985 nm Bottom-Emitting VCSEL Array for Chip-to-Chip Parallel Optical Interconnects," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, Vol. 13, No. 5, pp. 1332-1339, 2007.
- [23] M. Ortsiefer, B. Kogel, J. Roskopf, M. Gorblich, Y. Xu, C. Greus, and C. Neumeyr, "Long Wavelength High Speed VCSELs for Long Haul and Data Centers," in *proc. OFC2014, W4C.2*, 2014.
- [24] W. Kobayashi, T. Ito, T. Yamanaka, T. Jujisawa, Y. Shibata, T. Kurosaki, M. Kohtoku, T. Tadakoro, and H. Sanjoh, "50-Gb/s direct modulation of 1.3- μ m InGaAlAs-based DFB laser with ridge waveguide structure," *J. Select. Topic Quantum Electron.*, Vol. 19, No. 4, 2013.

第2章 レンズ集積型面出射半導体レーザ (LISEL) の提案 及び作製方法

2.1 はじめに

DFBレーザを面出射化し、レンズを一体集積した光源は、多チャンネル大容量光モジュールを低コストに実現するソリューションとして有望と考えられる。

端面出射型半導体レーザを面出射化する研究は、1990年頃から複数の機関で実施されてきた。代表的なものとして、レーザ共振器の一方の端面を45°の傾斜面に加工することで光路変換ミラーを形成し、光をウェハ表面へ出射する構造が報告されている[1、2]。しかし、共振器の反射面そのものを傾斜させるため、実効的なミラー損失が増大するなど発振特性への影響が課題となる[3]。また、表面電極との干渉により出射面に十分なスペースを確保できず、レンズを集積することは難しい。

また、基板裏面に光を出射し、出射面にレンズを集積した構造が報告されている[4]。本構造はレンズを集積可能だが、DFB共振器の片端面を基板面に対して斜めにエッチングしてミラーを形成しているため、端面からの反射成分に起因するレーザ特性の劣化が懸念される。実際に、FFPが多ピークになる、電流光出力にキックが発生するなどの評価結果が報告されている。更に、レーザ光の出射角度が20°と大きくミラー角度の制御性が課題となっている。

そこで、本章では、

1. レーザ特性やモード形状を劣化させずに光路変換ミラーを集積できること、
2. ミラー角度が精密に制御できること
3. レンズを集積できること
4. レンズ形状が精密に制御できること

を条件として、新しい面出射型DFBレーザの構造を提案し、これを実現するコア技術

であるミラー及びレンズ作製方法の確立を目的とする。また、試作したLISELの光出力特性とビーム広がり角FFP(FFP: Far-field pattern)を評価し、これを従来のDFBと比較することで上記を満たすLISELが実現できたことを実証する。

2.2 LISEL の基本構造

本節では、最初にDFBレーザの基本的な構造と特性を概説し、レーザ特性を劣化させることなく面出射が可能な構造を提案する。

2.2.1 DFB レーザの基礎

DFBレーザの基本原理は1971年にKogelnikらによって提唱された[5]。その後、室温発振が1975年頃に報告された[6、7]。DFBレーザは、高速変調時でも安定に単一モード発振するため、動的単一モードレーザとも呼ばれる[8]。近年では、長中距離光通信用途として1.3 μm 波長帯において50Gbpsを超える高速動作が報告されており[9、10]、更なる高速化・低消費電力化が活発に研究されている[11]。図2.2.1にDFBレーザの基本構造を示す。素子内部に周期的な凹凸を有する回折格子が集積されている。凹部と凸部では、屈折率が異なっているため、紙面左右方向に屈折率の周期的分布が形成される。

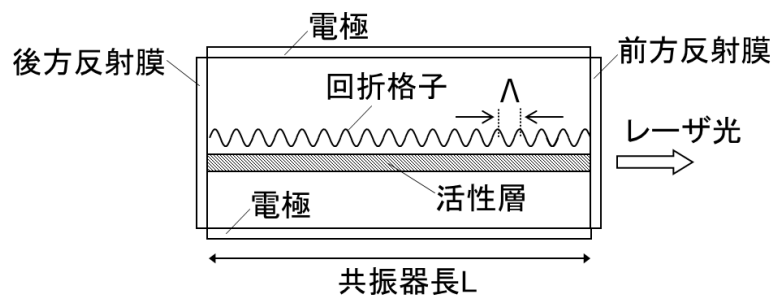


図2.2.1 均一回折格子型DFBレーザの模式図

この結果、光の反射が生じ、紙面左右方向に共振器が成され、レーザ発振が可能となる。この時反射される光の波長 λ_b は、ブラッグ波長と呼ばれ、導波路内部の等価屈折率を n_{eff} 、回折格子の周期を Λ とすると(2.2.1)式により決定される。 m は整数であり、回折格子の周期を変更することで発振波長を制御できることが分かる。

$$\lambda_b = 2n_{eff} \cdot \Lambda \cdot m \quad (2.2.1)$$

また、屈折率分布がsin関数で近似できるとき、凹部と凸部の屈折率差を Δn とすると、回折格子の単位長さあたりの反射係数 κ は、近似的に(2.2.2)式で表される [12]。従って、凹凸間の屈折率差が大きいほど共振器の反射率を大きくできる。

$$\kappa = \frac{\pi \cdot \Delta n}{\lambda_b} \quad (2.2.2)$$

図2.2.2に、代表的なDFBレーザの発振スペクトルの模式図を示す。(a)は回折格子の形状が素子内で均一であり、素子の両端面を無反射(AR: Anti-reflecting)コーティングした構造図である。両端面に反射が存在しないため、スペクトルは回折格子の形状にのみ依存して一義的に決まり、ブラッグ波長 λ_b を挟んで、対称な2モード発振となる。この2モード間は発振モードが存在しないことから、ストップバンドと呼ばれる。実験的にはこのストップバンドの幅から結合係数 κ を見積もることができる。

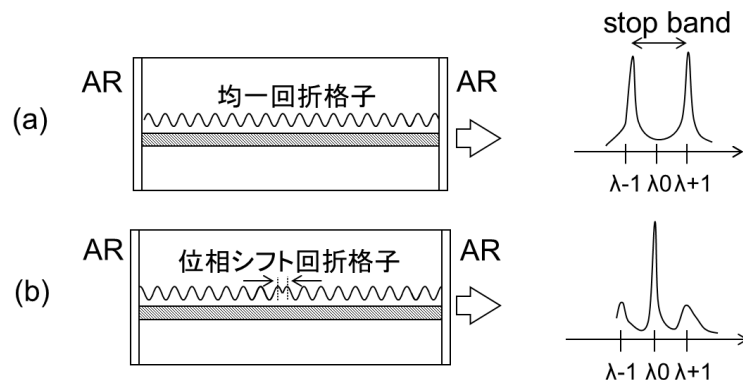


図2.2.2 DFBレーザの構造と発振スペクトル模式図
(a)AR/AR均一回折格子型、(b)AR/AR位相シフト型回折格子型

図2.2.2(b)は、両端面にARコーティングし、素子の中央部で回折格子に $\lambda_b/4$ 分の位相シフトを導入した場合である[13]。この構造では、図に示すようにブラッグ波長 λ_b において単一モード発振が得られるため、実用上優れた構造である。

素子端面に反射がある場合、端面からの反射と回折格子による反射の両方が混在するため両端面ARコーティングの場合とは発振スペクトルが異なる。更に、実際の素子作製では劈開によって端面を形成するため、素子端面における回折格子の位相は素子毎にランダムに変化する。この結果、素子内部での反射状態もランダムに変化するため、発振スペクトルが一意には決定しない。また、反射状態によっては単一モード発振が得られない場合もあるため、単一モード発振に歩留りが生じる[14]。一方で、端面反射を設けることでスペクトル以外の発振特性を向上させることが可能である。図2.2.3に、結合波理論[15]に基づいて計算した各種DFB構造のしきい利得と発光効率を示す。 $\lambda/4$ シフト型回折格子のDFBレーザにおいて、端面の反射構造と κ のみをパラメータとした。ARコーティングと高反射(HR:High-reflecting)コーティングの反射率はそれぞれ、0.1%、90%とした。共振器長やその他のパラメータは全て共通とした。両端面がARコーティングで $\kappa L=2$ の構造(◆)に対して、 κL を3に増大することで、しきい利得を低減できるが、発光効率がやや低下する(■)。

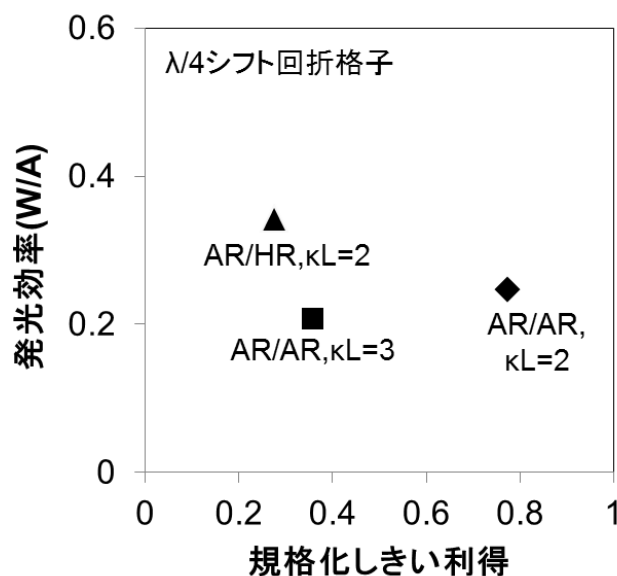


図2.2.3 各種DFBレーザのしきい利得と発光効率の計算例

これに対して、片端をHRコーティングすることで、しきい利得の低減と発光効率向上が両立できると分かる(▲). しかしながら、端面で反射が発生するため単一モード発振の歩留りは低下することが予想される. いずれの構造を用いるかは、仕様によって決定される.

以上のように、DFBレーザでは、発振スペクトル特性が回折格子の構造と両端面反射率の関係に敏感に依存する. 従って、光出射端にミラーを集積する場合、ベースとなるDFBレーザと同等の端面反射状態を維持できる構造が必要となる.

2.2.2 LISEL 構造の提案

図2.2.4に本研究で提案するLISELの構造図を示す. 本研究では、AR/HRのDFBレーザを基本構造に用いている. DFBレーザの出射端に、InPの単一材料から成る埋め込み構造を集積し、これをエッチングすることで45°ミラーを形成している. InPのバンドギャップは1.3 μm 波長のエネルギーより十分に大きいため、レーザ光は損失無く透過する. このように、レーザ光に対して透明な材料を光出射端に形成した構造は光を透過することから窓構造と呼ばれる. 一般には、DVDなどに用いられる高出力レーザの端面におけるエネルギー集中を緩和する目的で使用されることが多い [16、17].

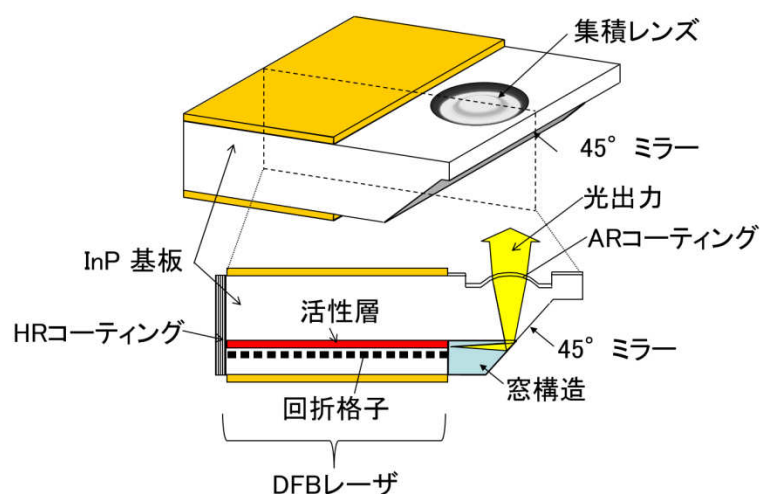


図2.2.4 LISELの模式図

或いは、DFBレーザの端面反射の影響を低減する目的でも使用されている [18、19]。活性層材料として用いられる代表的な4元材料であるInGaAlAs、InGaAsPとInPの屈折率差は小さく、両者の境界での反射率は0.2%以下である。

従って、DFB端と窓構造の境界はほぼ理想的なARコーティング面となり、AR/HRのDFBレーザを構成している。更に、窓構造は光閉じ込め機能を有しないため、光は放射モードとなって伝搬する。このため、ミラー及びレンズ形成部分は、レーザ発振特性に影響を与えることのないパッシブな部品として集積することが可能である。

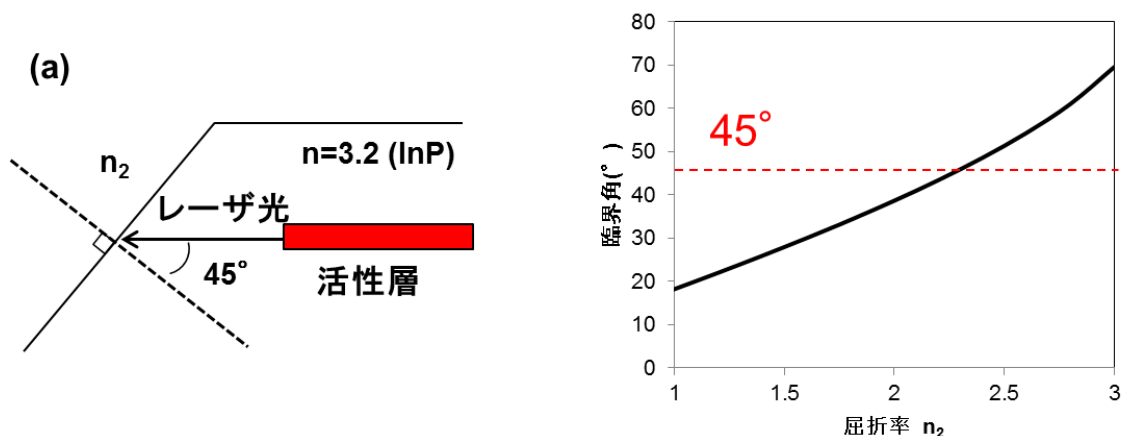
作製プロセスの観点では、ミラーを形成する部位を単一材料に限定することで、エッチング難易度の緩和や精度の向上が期待できる。また、これらミラーとレンズは、ウェハプロセスの合せ精度で位置合わせが可能であるため、外部光学素子を実装する場合と比較して高精度な位置合わせが期待できる。

2.3 集積ミラーの設計及び作製方法

本節では、窓構造部分のInPをエッチングして45°ミラーを形成する技術の確立を目的とする。最初に、InPを用いた表面における全反射条件をスネルの法則から理論的に確認する。続いて、結晶面方位の性質を利用した尤度の広いミラー作製方法を提案する。作製したミラー角度を、走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscopy)により計測し、提案手法により安定した45°ミラーが形成できることを実証する。

2.3.1 全反射条件の確認

図2.3.1(a)に提案したミラー集積構造における、活性層からミラー面までの光路の模式図を示す。活性層から出射した光は窓構造内を伝搬し、ミラー面の法線に対し 45° の角度でミラーに入射する。この時に、ミラー面で光が全反射されるかどうかを確認した。図2.2.5は、InPから屈折率 n_2 の媒質へ光が入射する時の臨界角をスネルの法則により見積もった結果である。臨界角が 45° より小さい場合、活性層から出射した光はミラー面で全反射される。同図から分かるように、 $n_2 \leq 2.3$ の時、臨界角は 45° よりも小さい。従って、ミラーの外側を空気 ($n_2=1.0$) とすると十分な尤度を以て全反射することが分かる。以上の理論検討から、ミラー表面はInP表面をそのまま利用することとした。



2.3.1 InP集積ミラーの全反射条件検討結果

2.3.2 ミラー作製方法の比較・提案

InPを傾斜面にエッチングする方法としては、治具を用いてウェハを斜めに設置してドライエッチングする手法 [20]や、予め階段状にエッチングした後、高温下に放置しマストランスポート現象により傾斜面を形成する方法などがある [21]。しかし、いずれの手法も角度の制御性は数 $^\circ$ 以上である。ミラーの角度が 45° から変化すると、出射光の向きがも垂直からずれる。(ミラー角度が 1° ずれると反射光は 2° ずれる)。このため、

精密な角度制御と広い作製尤度をもつエッチング手法が必要である。角度の制御性の観点では、半導体結晶の面方位の利用が有効である。これは、InPのような閃亜鉛鉱構造を持つ半導体結晶では、ウェットエッチング時に特定の角度を有する平面が現れる現象が知られているからである [22]。

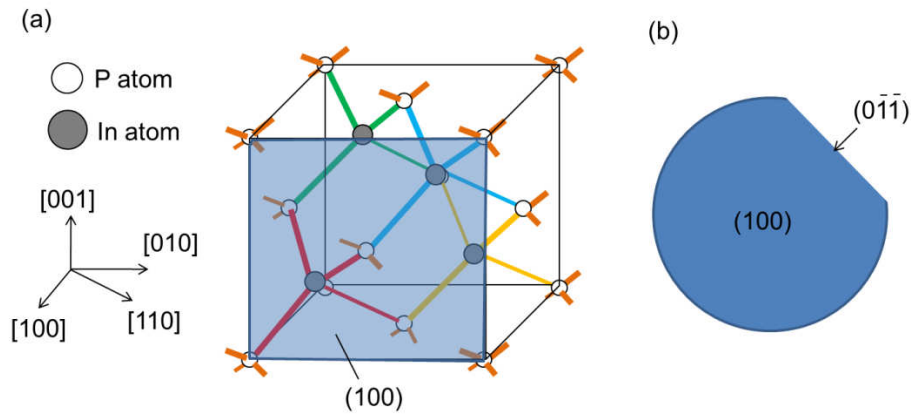


図2.3.2 (a)閃亜鉛鉱構造結晶構造、(b)ウェハと面方位の関係

図2.3.2(a)に閃亜鉛鉱構造の結晶構造を示す。結晶内の面は、座標軸の逆数に分母の最小公倍数を乗算して整数化した数字の組(ミラー指数)で表され [23]、例えば、図2.3.2(a)のハッチング面は(100)面と呼ばれる。一般的なInPウェハは、図2.3.2(b)に示すように(100)面が表面となるように形成されている。本研究においても同様のInP基板を用いる。

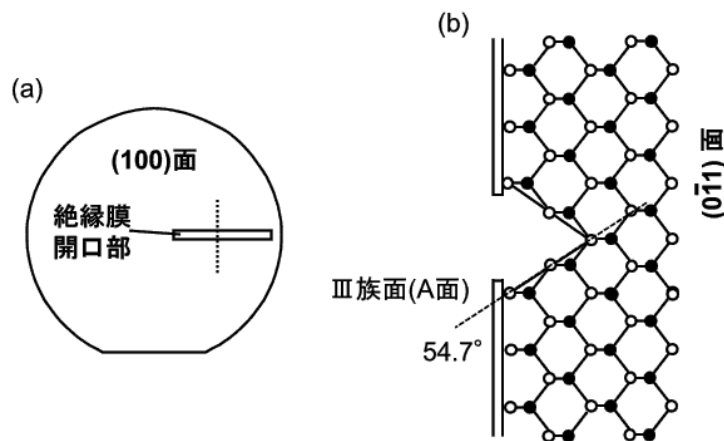


図2.3.3 (a)ウェハ上の面方位、(b)(0-11)断面のエッチング模式図

InPの結晶構造は、In原子を中心として正四面体の各頂点にP原子が配置された単位構造が繰り返し配列されている。このため、特定の角度でIn原子もしくはP原子のみが存在する平面が存在する。例えば、図2.3.3(a)に示す向きに開口部を設けて、ウェットエッチングを実施した後、点線の断面を観察すると、図2.2.7(b)に示すようなV字形状が確認できる。このV字面は、Ⅲ族原子のみが存在する面であり、(111)A面として知られており、ウェハ表面（(100)面）に対して必ず54.7°の角度を持つ平面となる。このような面が現れる理由は以下のように理解されている。一般に、Ⅲ—V族化合物半導体では、Ⅲ族原子とV族原子は、V族原子に由来する非共有電子対で結合されている。この結合は他の共有電子対に比べて結合力が弱くエッチングされ易い。この結果、Ⅲ族のみが存在する特定の面が現れる [24]。 (111)A面以外の代表的な面方位としては、(211)面が知られており、ウェハ表面に対する角度は34°である。このような結晶構造に由来する面が利用できれば、正確に同じ角度が再現でき、精密な角度制御が可能と考えられる。

しかしながら、(100)のInPウェハでは、45°に相当する結晶面を利用することができない。このため、(111)面と(211)面を形成するエッチング液の混合液を用いることで45°の面を形成する試みが報告されている [25]。これらの検討では、(111)面を形成するエッチング液として、HBrを用い、(211)面を出すエッチング液としてHClを用いており、HBr:HCl=2:1の比率で混合することで45°の傾斜面を実現している。しかしながら、このエッチング液では、HCl比率が1%変化した時に形成される傾斜面の角度変化が0.19°であり、10%あたりでは1.9°と大きい。そこで、本研究ではHClとHBrの混合液をベースにより安定にミラー角度を制御できるエッチング液を検討する。

2.3.3 ミラーの試作結果

ミラーの形成プロセスは以下の通りである。(1)ウェハ前面に誘電体膜を形成する。(2)図2.3.3(a)に示すようにミラー形成部位の誘電体マスクをホトリソグラフィー等で開口する。(3)ウェハを所定時間エッチング液に浸漬する。

ここで、本工程では、エッチング液として、HBrとHClの混合液に希釈剤を混合したものをを用いた。以上の工程を用いて試作した45°ミラーのSEM像を図2.3.4に示す。SEM観察により読み取ったミラー角度は44.9°であり、ほぼ目標通りの45°傾斜面を形成できた。図2.3.5はHCl濃度を10%ずつ変化させた時のミラー角度の変化を示す。なお、横軸のHCl濃度は相対値を記載している。

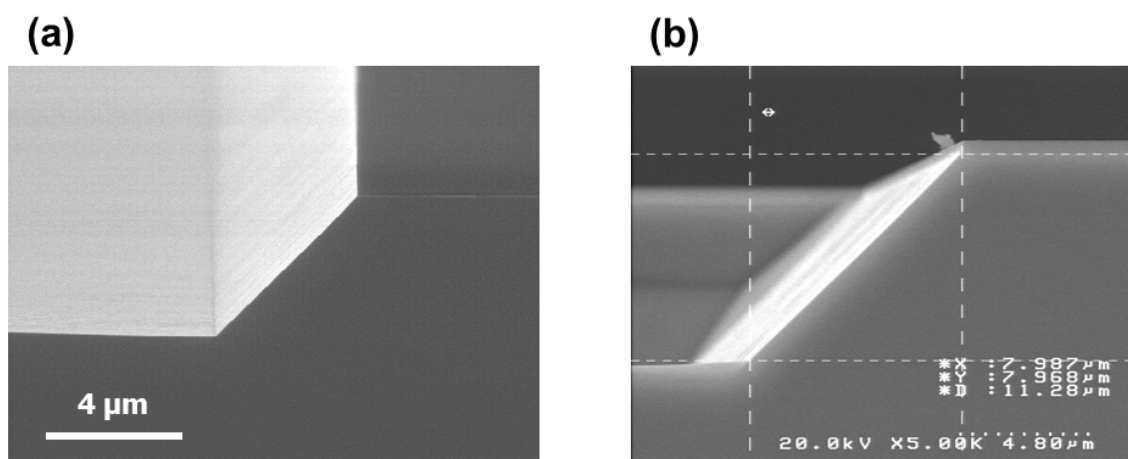


図2.3.4 試作したミラーのSEM写真 (a)写真鳥瞰図、(b)断面図

グラフを線形近似した時の傾きから、HCl濃度1%変化あたりの角度変化は0.061°であり、従来のHClとHBrからなるエッチング液と比べて角度再現性の高いエッチング技術を確立した。試作したウェハからランダムに抽出した19点のミラーの傾斜角度を断面SEM写真から評価した結果を図2.3.6に示す。この結果、ミラー角度のバラつきは45°±0.3° (標準偏差値)と高い均一性が得られた。このように高い均一性が得られた理由は、本技術がウェットエッチング時の結晶面方位の依存性を利用していることと、従来のHCl/HBrエッチングと比較して角度再現性の高い新エッチング液を用いているためである。また、表2.3.1には、同一エッチング液で、枚葉処理にて異なる3枚のウェハをエッチン

グ後の各ウェハにおけるミラー角度の評価結果を示す。各ウェハ内で無作為に4~5点を評価している。この結果より、異なるウェハ間においても、バラつきの小さい安定したミラー角度を実現できていることが分かる。

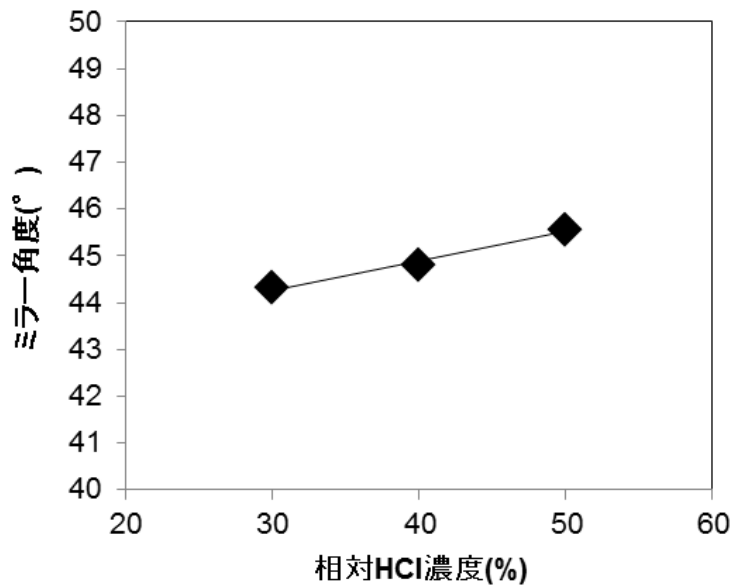


図2.3.5 ミラー傾斜角度のHCl濃度依存性

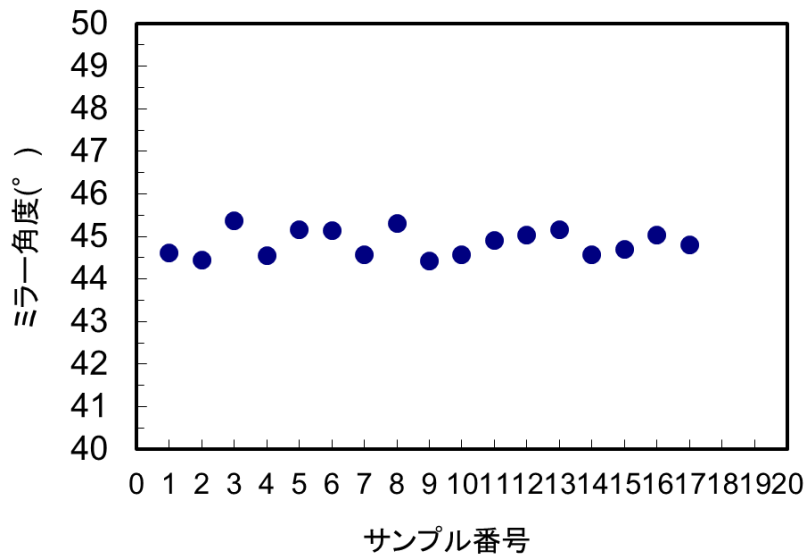


図2.3.6 ミラー傾斜角度のウェハ面内バラつき評価結果

表2.3.1 ウェハ間のミラー角度バラつき

	ウェハ1	ウェハ2	ウェハ3
平均値(°)	45.2	45.5	45.1
σ	0.65	0.45	0.58

2.4 集積レンズの設計及び作製方法

前節では、窓構造を用いた45°ミラーを提案し、その作製技術を確立した。本研究のLISELは45°ミラーによりビームを折り返し基板側へ出射する。このため、広い基板面を利用してレンズの集積が可能である。本節では、基板を加工してレンズを集積する技術の確立を目的とする。最初にガウシアンビームの伝搬光学を用いて、レンズ通過後のFFPを計算し、作製するレンズの寸法を見積もる。次にドライエッチングとウェットエッチングを組み合わせたレンズ形成方法においてエッチング中のレンズの形状変化を詳細に調べることで、高精度に形状制御が可能なエッチング手法を確立する。

2.4.1 レンズ寸法の設計

本章ではレンズ形状とFFP評価を指標として、レンズ機能の実証を目指している。そこでまず、レンズ通過後のFFPの理論値を求める。ガウシアンビームの伝搬光学によると、入射ビームのスポットサイズが ω_1 であるとき、距離 d_1 の位置にある焦点距離 f のレンズを通過した後の、スポットサイズ ω_2 、そのレンズからの距離 d_2 は以下の関係式で表される[26]。

$$\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 = \frac{n^2}{\left(\frac{\pi\omega_1^2}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{1}{f}\right)^2 + \left(n - \frac{d_1}{f}\right)^2} \quad (2.4.1)$$

$$d_2 = \frac{\left(\frac{\pi\omega_1^2}{\lambda}\right)^2 \frac{1}{f} - d_1 \left(n - \frac{d_1}{f}\right)}{\left(\frac{\pi\omega_1^2}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{1}{f}\right)^2 + \left(n - \frac{d_1}{f}\right)^2} \quad (2.4.2)$$

ここで、 λ は光の波長、 n は伝搬する媒質の屈折率を表す。また、レンズ焦点距離は、入射媒質の屈折率を n_1 、出射側媒質の屈折率を n_2 、レンズの曲率半径をROC (ROC: Radius of Curvature) とすると、

$$f = \frac{n_2 \cdot ROC}{n_2 - n_1} \quad (2.4.3)$$

で与えられ、図2.4.1にLISELの各部位に対してこれらの関係を当て嵌めた場合の概念図を示す。入射ビームのスポットである ω_1 は活性層端でのニアフィールド径に相当し、活性層端からレンズ表面までの距離が d_1 となる。 ω_1 は、活性層の多層構造とレーザの閉じ込め構造により決定する定数となる。 d_1 は素子の厚さにより調整が可能である。入射側媒質はInPであり、出射側媒質は空気中であるから $n_1=3.2$ 、 $n_2=1.0$ でありレンズの焦点距離はROCを選ぶことで制御できる。従って、同一のレーザ構造に対して、 d_1 (\propto 素子厚) とROC (レンズ形状) の2つのパラメータを制御することで出射ビームを制御できる。

ここで、 d_2 は正負いずれの値も取り得ることを注意したい。 $d_2>0$ の時、出射ビームはレンズから d_2 の位置で ω_2 のスポットサイズに結像される集光系となる(図2.4.1(a))。一方、 $d_2<0$ である場合、出射ビームは、 ω_2 のビームウェストがレンズよりも d_2 だけ活性層側に配置され、このスポットから光が放射される場合と同じ軌跡となる。従って、この場合、レンズ通過後のレーザ光は発散系となる(図2.4.1(b))。

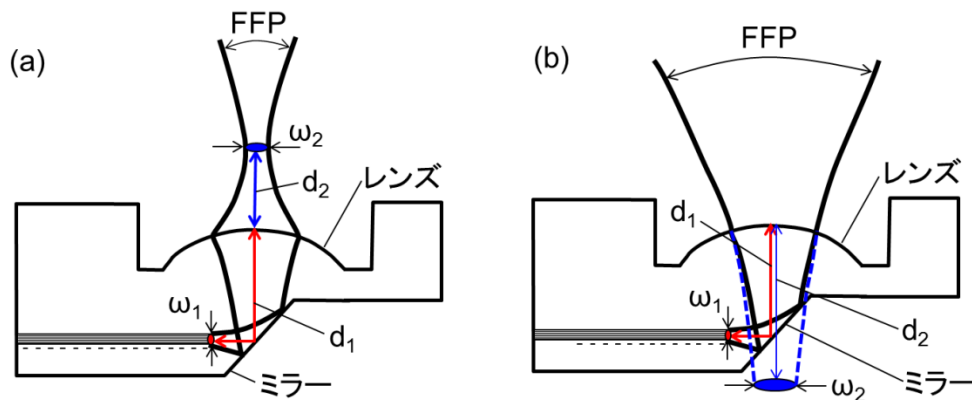


図2.4.1 ガウシアンビーム伝搬光学によるLISEL内部の光学系の概念図

(a) 集光系、(b) 発散系

このことは、 d_1 とROCの制御により、LISELからの出射ビームを発散から集光まで任意に制御できることを意味している。出射ビームの広がり角であるFFPは、ガウシアンビームの伝搬光学により、スポットサイズ ω を用いて (2.4.4) 式で表される[26].

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\lambda}{\pi\omega}\right) \quad (2.4.4)$$

従って、レンズにより変換後のスポットサイズ ω_2 を求めることで、レンズ通過後のFFPを計算できる。なお、(2.4.4)式の広がり角は、ガウシアンビームの強度がピークから $1/e^2$ になるときの広がりを表すことに注意したい。

以上から、 d_1 とROCをパラメータとしてLISELのFFPを理論的に見積もった。図2.4.2に結果を示す。

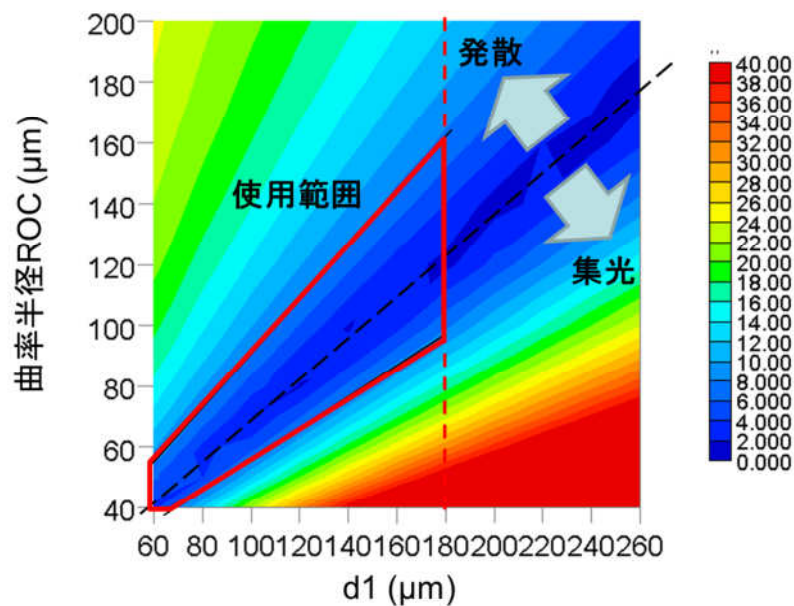


図2.4.2 FFPの d_1 、ROC依存性の計算結果

FFPはROCと d_1 の組み合わせにより様々な値が可能であると分かる。そこで、ここでは試作・評価するレンズRCOの範囲を以下のように決定する。まず、作製可能な素子の厚さを考慮して $d_1 \leq 180 \mu\text{m}$ とする。次に、一般的なDFBレーザのFFP ($30^\circ \sim 40^\circ$) よりも狭搾したFFPとして 10° 以下を選択する。以上の制約から、本試作で検討するレンズのROCを $140 \sim 160 \mu\text{m}$ 以下に選んだ。次に実際のレンズの直径の目標を決定する。

市販されているファイバアレイの標準的なピッチは $250\mu\text{m}$ である。従って、アレイ化する際の素子ピッチもこれに合わせて $250\mu\text{m}$ とするのが望ましいため、素子幅は $250\mu\text{m}$ となる。従って、チャンネル間のマージンを考慮するとレンズの直径は $200\mu\text{m}$ 以下程度とするのが適当と思われる。以上から、直径が $200\mu\text{m}$ 以下において、ROCが $140\sim 160\mu\text{m}$ 以下の範囲でROCの精密な形状制御が可能なレンズ作製プロセスを検討する。

2.4.2 レンズ作製方法の検討

半導体を加工してレンズ形状を形成する方法は、様々な手法が存在する。例えば、表面張力や熱膨張を利用することでレジストをレンズ形状に形成し、ドライエッチングを用いてウェハに転写する方法が報告されている [27]。しかし、この手法は、レンズの曲率制御にレジストの表面張力や熱膨張を利用するため、安定したレンズ形成が難しいと思われる。また、同様の方法で、ナノインプリント技術を用いて、レジストをレンズ形状に形成する手法が報告されている[28]。この場合、安定した形状制御が可能であるものの、レンズ形状やパターン配置を変えるためには、都度、百万円オーダーの高価なモールドを専用に作製する必要がある。

これらに対して、ドライエッチングとウェットエッチングを組み合わせることでレンズを形成する手法が報告されている[20]。図2.4.2にプロセスフローを示す。また、以下にプロセス手順を説明する。

1. 基板上に誘電体膜（例として SiO_2 や SiN 等）を堆積デポし、ホトリソグラフィとエッチングによってドーナツ状のパターンを形成する。
2. ドライエッチングにより円柱形状を形成する。
3. 円柱頭の誘電体膜を除去する。
4. 3のウェハをウェットエッチングすることで円柱を球面形状に加工する。

この手法では、ホトリソグラフィとエッチングによるパターン形成によって形状を制御しているため、レジストの形状制御を用いる手法と比較して高精度な制御が期待できる。また、パターン配置や形状変更が比較的容易である点から応用上優位であると思われる。

そこで、以下では、上記手法をベースとして、高い再現性でレンズが形成できるエッチング条件を検討する。

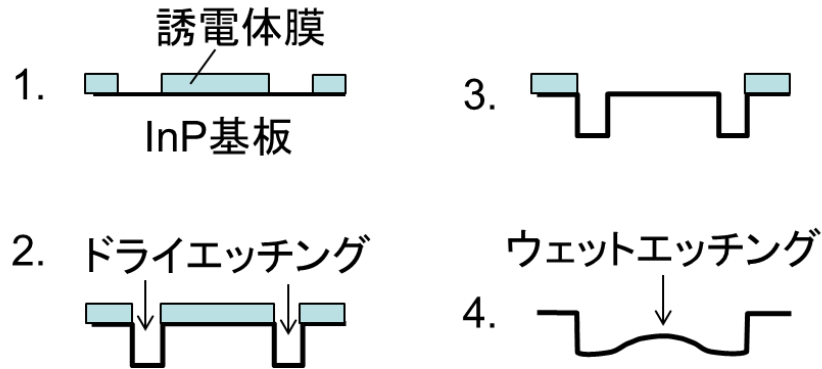


図2.4.3 レンズ形成プロセスフロー

上記手法において、レンズ形状の制御因子は図2.4.4に示すように、ドライエッチングにより形成される円柱直径 D 、円柱の外周部溝幅 T 、ドライエッチング深さ Z 、これに加えて、ウェットエッチング時間の5つである。

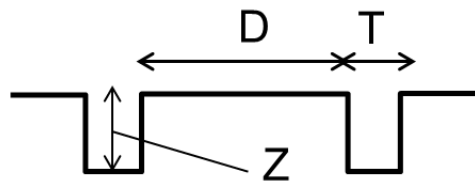


図2.4.4 レンズ形状の制御因子

ここでは、検討を単純化するため、 Z と T は一定値とし、 D に対するレンズ形状の依存性を検討する。まず、エッチング工程におけるROCの変化を机上検討した。図2.4.5に示すようにウェットエッチングの進行に対して、円柱はレンズ形状へと変化し、更にエッチングを進行させるとレンズが消失し平面になると考えられる。従って、エッチング時間に対して、ROCは極小点を有する変化を示すと考えられる。この時、極小点近傍でレンズを形成することで、エッチングに対する尤度を大きくできると考えられる。

上記を検証するため、 D を $65\mu\text{m}$ 、 $70\mu\text{m}$ 、 $75\mu\text{m}$ としたそれぞれの場合に対して、レンズ形状がなくなるまでウェットエッチングを続行した時のウェットエッチング時間とレンズ曲率波形ROCの相関を実験的に確認した。レンズ形状の評価は、レーザ顕微鏡に

てレンズの3次元形状のデータを計測し、(2.4.5)式のレンズの表式でフィッティングすることでROCを算出した。ここで、ROCは曲率 c の逆数であり $ROC=2/c$ の関係があるためこれを用いた。ガウスビームの伝搬光学ではレンズ形状はコーニック定数が0の球面レンズである。しかし、直径 $200\mu\text{m}$ 以下の範囲では、コーニック定数が-1の放物面と球面の差が小さいことから、ここでは、コーニック定数を-1とした。また、同様の理由から高次項の影響は小さいと仮定し無視した。

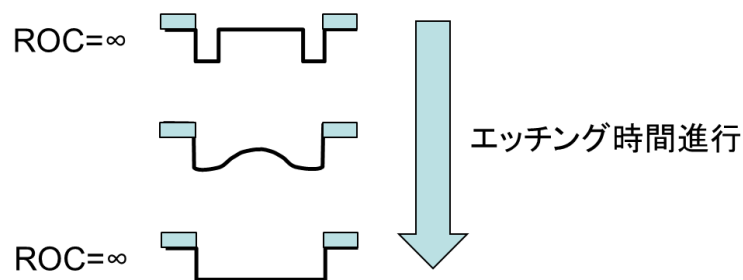


図2.4.5 ウェットエッチングにおけるレンズ形状変化の予測

$$y = \frac{cx^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2x^2}} + \text{高次項} \quad (2.4.5)$$

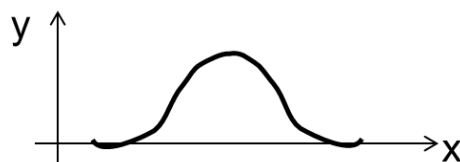


図2.4.6 レンズ形状とレンズの表式の関係

図2.4.7にウェットエッチング結果を示す。時間と曲率半径ROCの評価結果を示す。ここで、V、H方向はそれぞれ、レーザーライブに垂直、水平な方向を表す。いずれのDにおいてもROCは、ウェットエッチング時間に対して、極小値を持つように変化している。また、極小点のROCはDが大きいほど大きい。これを定量的に評価するため、極小点におけるレンズ形状を評価した。図2.4.8はレンズ頂点を通るV、H方向の2方向の

形状プロットである。D=65 μm のROCはV方向72 μm 、H方向70 μm 、D=70 μm のROCはV方向88 μm 、H方向92 μm 、D=70 μm のROCはV方向108 μm 、H方向118 μm であった。V方向と比較してH方向のROCが大きい傾向である。この理由として、H方向の垂直な円柱側壁に結晶面が現れ、側壁のエッチング速度が遅くなると考えられる。この結果、円柱のH方向はV方向よりもエッチングの進行が速くなり、より平坦に近づくためROCが大きくなると考えられる。なお、レンズ形状の応用として、この性質を積極利用することで、楕円型のレンズを作製することも可能である。レンズに入射するビームプロファイルが楕円形状である場合などに有用と考えられる。

これら極小点の値を円柱直径Dに対してプロットした結果を図2.4.8に示す。この結果、極小点でのROCの値は、Dの値にほぼ線形に比例することが明らかになった。図2.4.8の結果から、Dに対するROCの変化率は約4.0 μm であり、Dを1 μm 単位で制御することでROCを5%以下の高精度で調整できることが期待できる。以上の検討から、ROCを安定かつ精密に制御できる見通しを得た。

また、レンズの有効径はROCと同時に変化すると考えられる。このため、任意のレンズ形状を所定の有効径で実現するためには新たな制御パラメータを導入する必要がある。ウェットエッチング工程においてレンズのROCは円柱周辺部の溝幅Tによっても変化すると考えられる。これは、周辺部面積が変化すると、円柱の横方向からのエッチングのされ方が変化するためである。そこで、有効径も考慮したレンズ形状の制御方法として、Dと併せて溝幅Tをパラメータに加えることで、広い範囲のレンズ形状が実現可能と考えられる。また、ROCは周辺部溝の深さによっても変化する。ただし作製工程上、溝深さは極力浅い方が望ましいため、溝深さはできるだけ浅く一定値に保ちつつDと溝幅によりROCを制御することが望ましい。

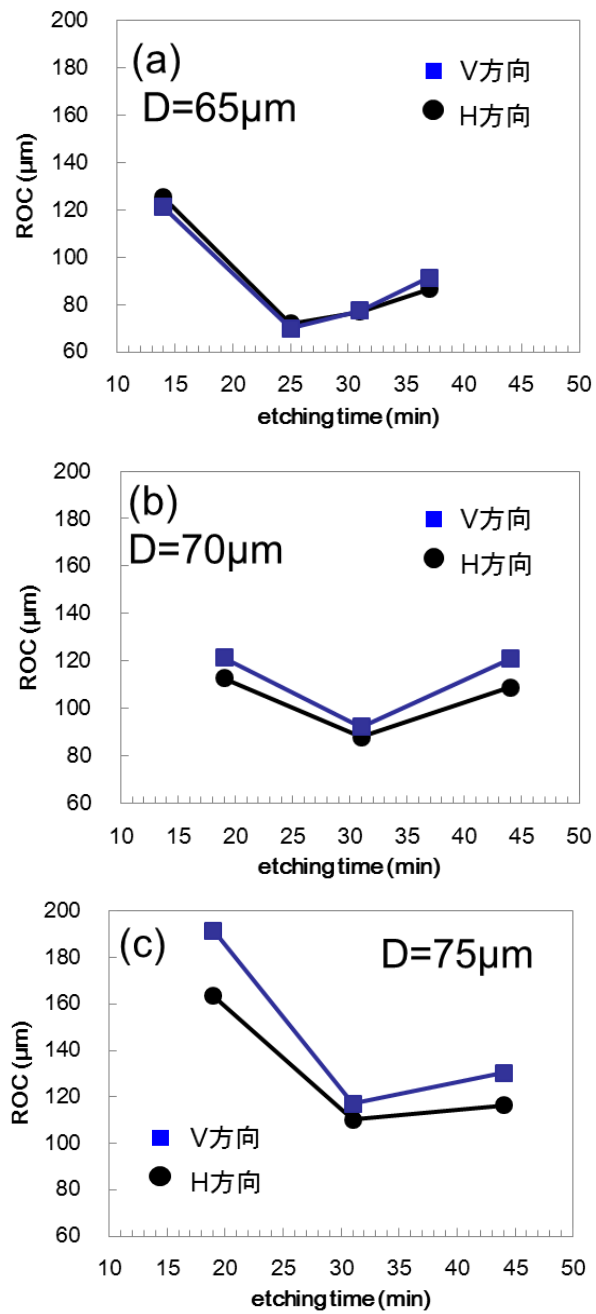


図2.4.7 エッチング時間とレンズ曲率半径ROCの関係
 円柱直径D : (a) $65\mu\text{m}$ 、 (b) $60\mu\text{m}$ 、 (c) $75\mu\text{m}$

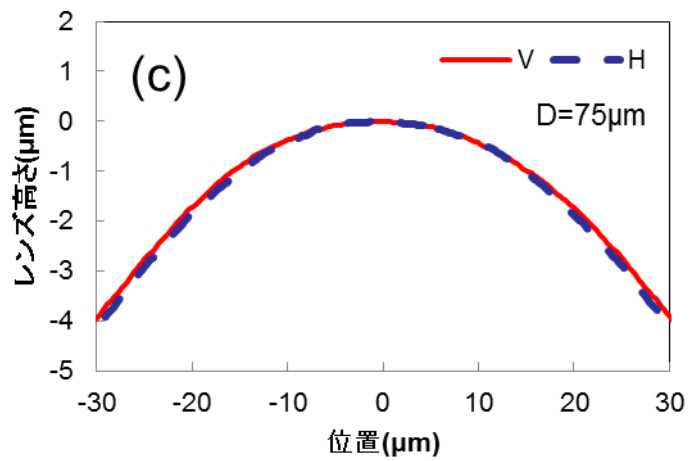
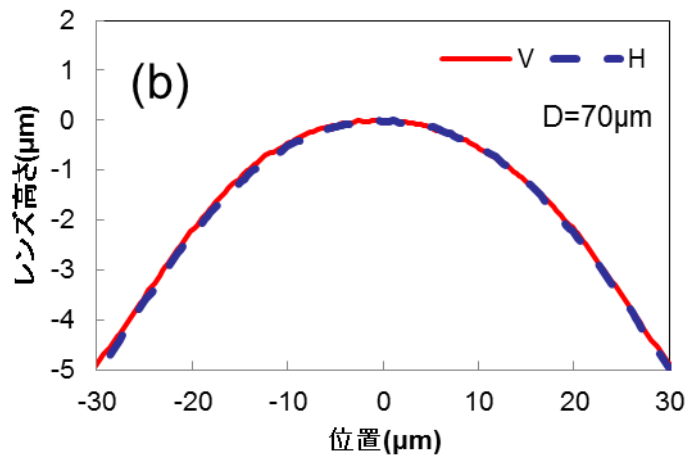
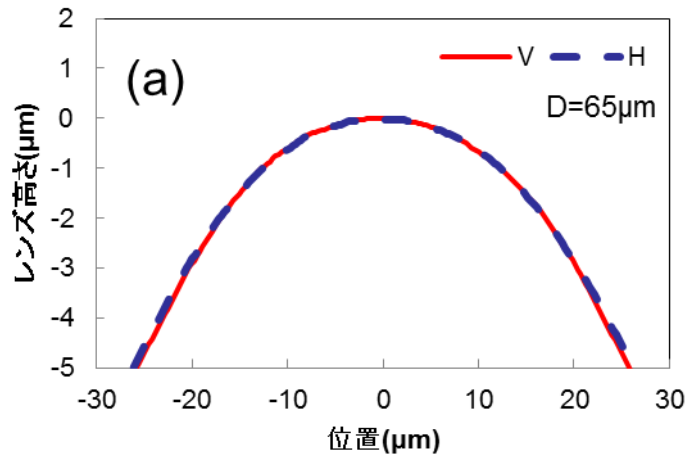


図2.4.8 極小点でのレンズ形状

円柱直径D : (a) $65\mu\text{m}$ 、 (b) $60\mu\text{m}$ 、 (c) $75\mu\text{m}$

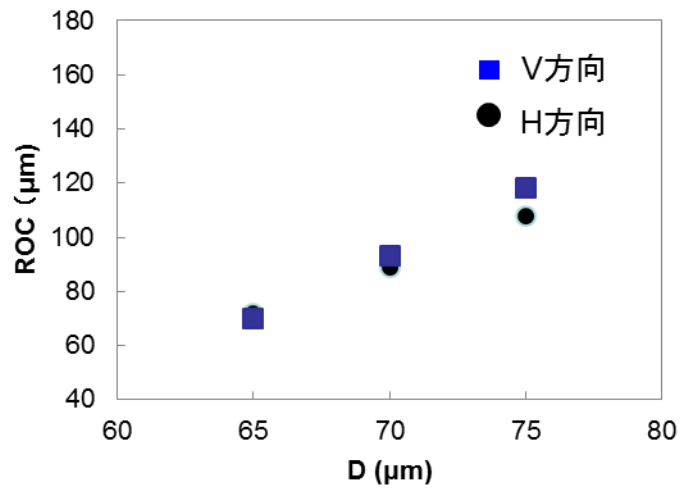


図2.4.9円柱直径Dと極小点におけるROCの関係

2.5 LISEL の基本特性

前節までの検討においてミラーとレンズの形状を安定に制御するプロセス技術を確立した。本節では、これらの検討結果に基づいてLISELを試作し、従来のDFBと出力特性とFFPを比較することで、ミラーとレンズの機能を評価する。

2.5.1 素子設計

本検討で試作したLISELの設計値を表2.5.1にまとめる。レーザ部分はDFBレーザである。また、レンズはFFPが発散型で 2.1° となるように設計している。

表2.5.1 試作したLISELの設計値

構造	値
導波路横構造	リッジ型
DFB回折格子構造	均一構造

共振器長	200 μm
後端面コーティング反射率	98%
レンズ曲率半径	90 μm
レンズ表面コーティング反射率	< 1%
活性層端からレンズ表面までの距離 d_1	125 μm

2.5.2 試作結果

作製プロセスの概要は以下である。第一多層成長後、電子ビーム露光法とエッチング工程によって回折格子を形成する。その後、窓構造を形成する部分の活性層を除去し、第二多層成長を実施する。この時、活性層の先端部がInPで埋め込まれ窓構造が形成される。その後、リッジ導波路を形成するまでは通常のDFBと同様の作製方法である。リッジ形成後、前節の手法により窓構造部に45°ミラーを形成した。続いて、p型電極を形成後、ウェハをガラス基板に貼り付け所定の厚さまで研磨する。次に前節の手法を用いてレンズを形成する。最後にレンズ表面にARコーティングを施した。

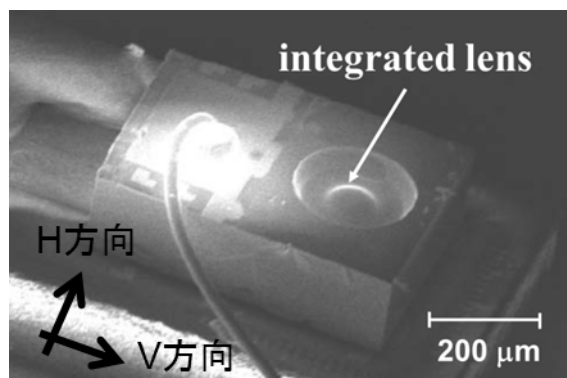


図2.5.1 試作したLISELのSEM像

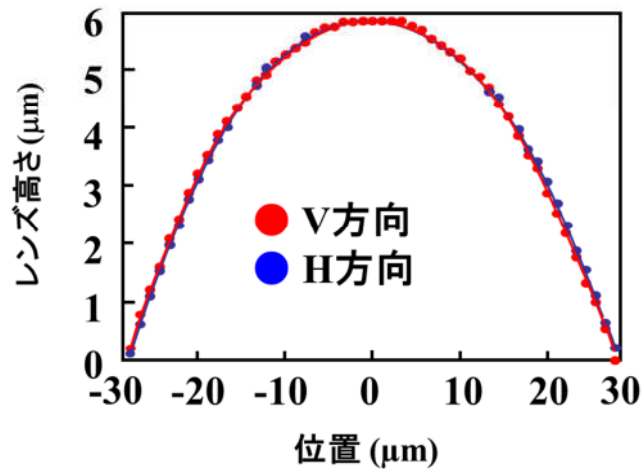


図2.5.2 レンズ形状評価結果

図2.5.1に以上の工程で試作したLISELのSEM像を示す。InP出射部にレンズが形成できていることが確認できる。素子は裏面出射であるため、ジャンクションダウンで基板に実装している。また、基板裏面に形成したn型電極には通電のための金ワイヤを実装している。

図2.5.2はレンズの形状評価結果である。共振器に水平・垂直方向でほぼ同一のレンズ形状が得られている。また、(2.4.5)式をフィッティングすることで得られたROCはV方向88.9 μm 、H方向87 μm であり、ほぼ設計通りのレンズ形状を得ることができた。これは、前節で検討した、レンズ形成プロセスを用いた結果である。

図2.5.3 (a) は、LISELの電流光出力特性の評価結果である。図には、同じウェハ内に作製したDFBレーザの結果を併記した。LISELとDFBの結果はほぼ一致しており、面出射と端面出射でほぼ同一の発振特性が得られている。面出射化による大幅な出力劣化は無く、集積した45°ミラーでの損失は無視できるレベルにあり、全反射ミラーとして機能していることを実証できた。

図2.5.3(b)はLISELの発振スペクトルである。25°C、85°C共に、1.3 μm 波長帯において、良好な単一モード発振が得られており、活性層端と窓構造の境界において発振特性に悪影響を及ぼす反射成分は無視できる程度であると考えられる。以上の結果より、良好な面出射とAR/HRのDFBレーザ発振特性が両立できた。

図2.5.4にFFPの評価結果を示す。比較のために併記したDFBレーザのFFPが28°×29°で

あるのに対して、LISELのFFPは共振器に水平方向、垂直方向それぞれ2.5°、1.9°でありレンズが機能していることが確認できる。また、設計値2.1°に対してほぼ設計通りのビームプロファイルが得られた。

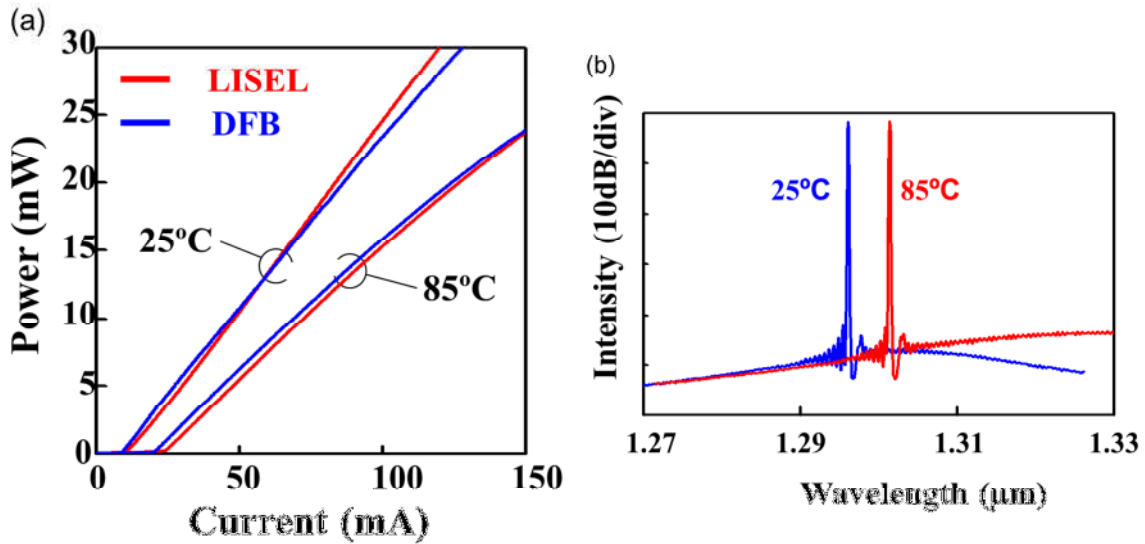


図2.5.3 レーザ特性の測定値

(a)電流光出力特性、(b)発振スペクトル

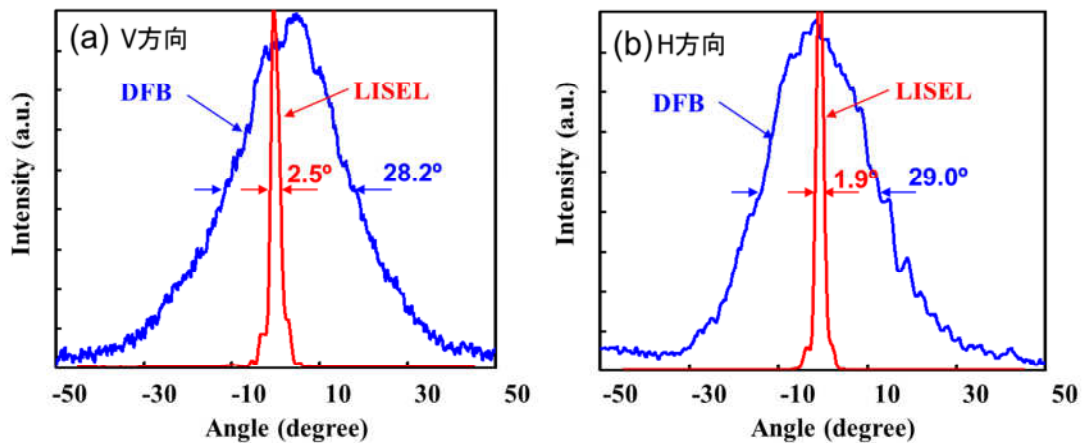


図2.5.4 FFP測定結果

(a)共振器水平方向 (Vertical) 、(b)共振器垂直方向(Horizontal)

2.6 まとめ

多チャンネル大容量光モジュールを低コストに実現する光源として、レンズ集積型面出射レーザLISELを提案した。窓構造を利用した45°ミラーを用いることでレーザ特性に影響を与えない面出射化を提案した。また、結晶方位を利用して傾斜面を形成することで、目標値45°に対して、 $45^\circ \pm 0.3^\circ$ の高精度且つ再現性の良いミラーを実現した。ドライエッチングとウェットエッチングを組み合わせたレンズ形成手法において、エッチング中のレンズ形状の変化を机上検討により予測し、これを実験的に確認することで、形状変化の小さいエッチング領域を見出した。これにより、安定かつ歩留りの良いレンズ形成技術を確立した。

試作したLISELは、同じ設計のDFBレーザと同等の光出力特性・発振スペクトル特性を示し、本構造を用いることでレーザ特性の劣化が無く面出射化が可能であることを実証した。FFPを評価した結果、設計とほぼ同等の狭搾ビームを得ることができた。

以上により、多チャンネル大容量光モジュールを低コストに実現する光源として、レンズ集積型面出射レーザLISELを実現するためのコア技術となる、ミラーとレンズの形成技術を確立した。

参考文献

- [1] T. Murao, N. Yasui, K. Mochizuki, M. Shimono, H. Kodera, D. Morita, T. Yamatoya, and H. Aruga, "Lens Alignment Technique Using High-Power Laser for Hybrid Integrated Multi-Channel Transmitter Optical Sub-Assemblies," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 25, No. 20, pp. 1958-1960, 2013.
- [2] M. Green, A. Behfar, A. Morrow, A. Schremer, C. Stagarescu, "Horizontal Cavity Vertical Emitting Lasers with Integrated Monitor Photodiodes," in *proc. of APOC2006*, 2006.
- [3] C.-P. Chao, G. -J. Shiau, and S. R. Forrest, "1.3- μm Wavelength, InGaAsP-InP Folded-Cavity Surface-Emitting Lasers Grown by Gas-Source Molecular-Beam Epitaxy," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 6, No. 12, pp. 1406-1408, 1994.
- [4] C. -P. Chao, D. Z. Garbuzov, G. -J. Shiau, S. R. Forrest, L. A. DiMarco, and M. G. Harvey, "Low-Threshold, High-Power, 1.3- μm Wavelength, InGaAsP-InP Etched-Facet Folded-Cavity Surface-Emitting Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 7, No. 8, pp. 836-838, 1995.
- [5] B. Stegmuller, H. Westermeier, W. Thulke, G. Franz, and D. Sacher, "Surface Emitting InGaAsP/InP Distributed Feedback Laser Diode at 1.53 μm with Monolithic Integrated Microlens," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 3, No. 9, pp. 776-778, 1991.
- [6] H. Kogelnic and C. V. Shank, "STIMULATED EMISSION IN A PERIODIC STRUCTURE," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 18, No. 4, pp. 152-154, 1971.
- [7] M. Nakamura, A. Yariv, W. Yen, S. Somekh, and H. L. Garvin, "Optically pumped GaAs Surface laser with corrugation feed-back," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 22, pp. 515-516, 1973.
- [8] H. C. Casey, Jr., S. Somekh, and M. Ilegens, "Room-temperature operation of low-threshold separate-confinement heterostructure injection laser with distributed feedback," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 27, pp. 142-144, 1975.
- [9] Y. Suematsu, S. Arai, and K. Kishino, "Dynamic Single-Mode Semiconductor Lasers with a Distributed Reflector," *J. of Lightwave. Technol.*, Vol. LT-1, No. 1, pp. 161-176., 1983.
- [10] Y. Matsui, T. Pham, T. Sudo, G. Carey, B. Young, J. Xu, C. Cole, and C. Roxlo, "28-Gbaud PAM4 and 56-Gb/s NRZ performance comparison using 1310-nm Al-BH DFB laser," *J. of Lightwave. Technol.*, Vol. 34, No. 11, pp. 2677-2683.
- [11] K. Nakahara, Y. Wakayama, T. Kitatani, T. Taniguchi, T. Fukamachi, Y. Sakuma, and S. Tanaka, "56-Gb/s Direct Modulation in InGaAlAs BH-DFB Lasers at 55°C," in *proc OFC, Th3A*, 2014.
- [12] S. Matsuo, T. Fujii, K. Hasebe, K. Takeda, T. Sato, and T. Kakitsuka, "Directly Modulated DFB Laser on SiO₂/Si Substrate for Datacenter Network," *IEEE J. of Lightwave. Technol.*, Vol. 33, No. 6, pp. 1217-1222, 2015.
- [13] J. Carroll, J. Whiteaway, and D. Plumb, "Disubtributed feedback semiconductor lasers," SPIE PRESS,

- 1998.
- [14] H. Haus, and C. V. Shank, "Antisymmetric taper of distributed feedback lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 12, no. 9, pp. 532-539, 1976.
 - [15] T. Matsuoka, H. Nagai, Y. Noguchi, Y. Suzuki, and Y. Kawaguchi, "Effect of the grating phase and the cleaved facet of DFB laser properties," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 23, No. 3, pp. 138-140, 1984.
 - [16] H. Kogelnic and C. V. Shank, "Coupled-Wave Theory of Distributed Feedback Lasers," *J. Appl. Phys.*, Vol. 43, No. 5, pp. 2327-2335, 1972.
 - [17] K. Isshiki, T. Kamizato, A. Takami, A. Shima, S. Karakida, H. Matsubara, and W. Susaki, "High-Power 780 nm Window Diffusion Stripe Laser Diodes Fabricated by an Open-Tube Two-Step Diffusion Technique," *IEEE J. of Quantum. Electron*, Vol. 26, No. 5, pp. 837-842, 1990.
 - [18] M. Watanabe, K. Tani, K. Takahashi, K. Sasaki, H. Nakatsu, M. Hosoda, S. Matui, O. Yamamoto, and S. Yamamoto, "Fundamental-Transverse-Mode High-Power AlGaInP Laser Diode with Window Grown on Facets," *IEEE J. of Select. Topic. Quantum. Electron*, Vol. 1, No. 2, pp. 728-733, 1995.
 - [19] S. Hirata, K. Tamamura, C. Kojima, " $\lambda/4$ -shipted AlGaAs/GaAs DFB Lasers with Double Window Structure," *Electron. Lett.*, Vol. 23, No. 12, pp. 627-628, 1987.
 - [20] K. Utaka, S. Akiba, K. Sakai, and Y. Matushima, "Effect of Mirror Facets on Lasing Characteristics of Distributed Feedback InGaAsP/InP Laser Diodes at 1.5 μm Range," *IEEE J. of Quantum Electron.*, Vol. QE-20, No. 3, pp. 236-245, 1984.
 - [21] K. Mutoh, S. Wakabayashi, Y. Toyoda, and M. Nakajima, "Simultaneous Fabrication of Vertical and 45°Mirror of InP for Surface-Emitting Lasers Using Inclined Cl Ion Beams," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 30, No. 1, pp. 67-71., 1991.
 - [22] Z. L. Liao and J. N. Walpole, "Surface-emitting GaInAsP/InP Laser with low threshold current and high efficiency," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 46, No. 2, pp. 115-117, 1985.
 - [23] P. J. Verpoort, I. E. Vermeir, and W. P. Gomes, "Fundamental Study on the Selective Etching of Al_{0.25}Ga_{0.75}As Versus GaAs in Acidic Iodine Solutions," *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 142, No. 10, pp. 3589-3595, 1995.
 - [24] 上村洗, 中尾憲司 著, 「電子物正論」, 培風館, 1995.
 - [25] 篠田和典, 「化合物半導体ウェット・ドライエッチングの基礎と光デバイス作製プロセスへの応用」, 技術セミナー, 技術情報教会, 2006.
 - [26] S. Adachi, Y. Noguchi, and H. Kawaguchi, "Chemial Etching of InGaAsP/InP DH Wafer," *J. Electorochem. Soc.*, Vol. 129, No. 5, pp. 1053-1062, 1982.
 - [27] 河野健治 著, 「光デバイスのための光結合系の基礎と応用」, 現代工学社, 1990.
 - [28] X. Zhang, Q. Tang, X. Y. Z. Zhang, X. Pei, "Cylindrical microlens array fabricated by argon ion-beam etching," *Opt. Eng.* Vol. 39, No. 11, pp. 3001-3007, 2000.

- [29] L. Li, K. Ishii, Y. Tsutsui, S. Shoji, and J. Mizuno, "Development of roll press UV imprint process for replication of micro lens array on the large and thin quartz substrate," in *proc. NEMS*, pp. 27-30, 2012.

第3章 レンズ集積型面出射半導体レーザと光ファイバの 結合特性

3.1 はじめに

光モジュールにおいて、シングルモードファイバ(SMF: Single Mode Fiber)と半導体レーザの高効率且つ簡易な光結合の実現は最重要課題の一つである。特に、近年の多チャンネル光モジュールでは、その重要性は以前にも増して大きな課題となっている[1、2、3、4]。外部光学部品を介さずにSMFと高効率な光結合が可能な光素子は、これを解決する有望な手段のひとつである。スポットサイズコンバータを集積することで、SMFとの高効率な直接光結合が実現できるが、光出力の損失やレーザ特性との最適化が課題となる[5、6]。一方、レンズによるビーム変換は一般に損失やレーザ特性の劣化を伴わないが、素子へのレンズ集積が課題であった[7]。

本論文の著者は、2章において、DFBレーザに45°ミラーを集積とレンズを集積した新型の面出射レーザLISELを提案し、試作したLISELにおいてレーザ特性の劣化無く、出射ビームを制御可能なことを実証した。そのため、LISELはSMFと高効率な直接光結合可能な次世代光モジュール用光源として期待されている。

本章では、SMFとの高効率結合という観点からLISELに集積するレンズを設計する。続いて、設計に基づいて試作したLISELとSMFの直接結合実験を実施し、外部レンズが無くても良好な光結合効率が得られることを実証する。以上の検討により、LISELの光結合に対する有用性を示す。

3.2 高効率レンズの設計

本節では、ガウスビーム伝搬光学を用いて、LISELから出射したレーザ光がSMFに入射する時の結合効率を計算によって求め、高効率結合を実現する集積レンズの設計を行う。計算モデルを図3.2.1に示す。

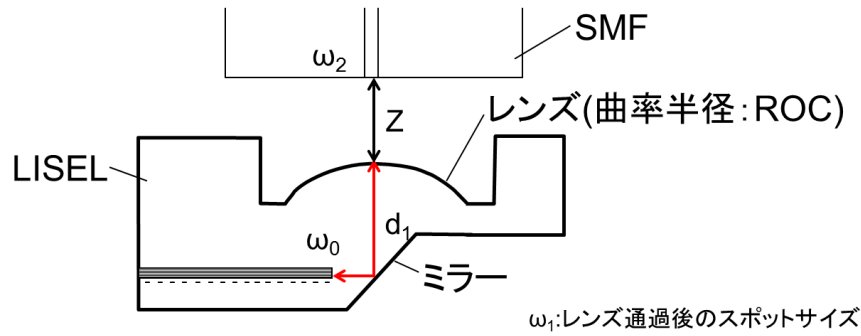


図3.2.1 LISEL-SMF結合効率の計算モデル

直接結合系であるため、LISELの直上にSMFを配置している。集積レンズからSMFまでの距離はZである。

ガウスビームの伝搬光学によれば、入射ビームのスポットサイズを ω_1 、受光面のスポットサイズを ω_2 、2つのスポット間の距離をZとするとき、これらの結合効率 η は(3.2.1)式で表される [8]。ここで、 x は2つのビームの平面方向 (Z軸に垂直面内) の位置ズレ、 θ は角度ズレである。

$$\eta = C \cdot \exp \left[-C \left\{ \frac{x^2}{2} \left(\frac{1}{\omega_1^2} + \frac{1}{\omega_2^2} \right) + \frac{\pi^2 \theta^2}{2\lambda^2} (\omega_1^2(z) + \omega_2^2) - x\theta \frac{Z}{\omega_1^2} \right\} \right] \quad (3.2.1)$$

$$C = \frac{4\omega_1^2 \omega_2^2}{(\omega_1^2 + \omega_2^2)^2 + \lambda^2 Z^2 / \pi^2} \quad (3.2.2)$$

$$\omega_1(Z) = \omega_1 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi \omega_1^2} \right)^2} \quad (3.2.3)$$

また、Cと $\omega_1(Z)$ はそれぞれ、(3.2.2)式、(3.2.3)式で表される。Cは、平面ズレ、角度ズレ

が無い場合 ($x=0$, $\theta=0$) のスポット間距離 Z における結合効率であり、 $\omega_1(Z)$ は受光面における入射ビームのスポットサイズである。

結合効率の計算手順は以下である。2.4.1節で説明したように、まず活性層端でのスポットサイズ ω_0 から、レンズ通過後のスポットサイズ ω_1 を算出する。次に ω_1 とSMFのスポットサイズ ω_2 を用いて(3.2.1)~(3.3.3)式から結合効率を求める。

以上の手順により得られた結合効率の計算結果を図3.2.2に示す。ここでは、各 d_1 とROCの組み合わせに対して最大結合効率を見積もっている。光軸に垂直な平面内の位置ズレ、ファイバの角度ズレはそれぞれ無い ($x=0$, $\theta=0$) と仮定し、(3.2.2)式により最大結合効率を求めた。また、結合効率が-10dB以上となる点をプロットしている。

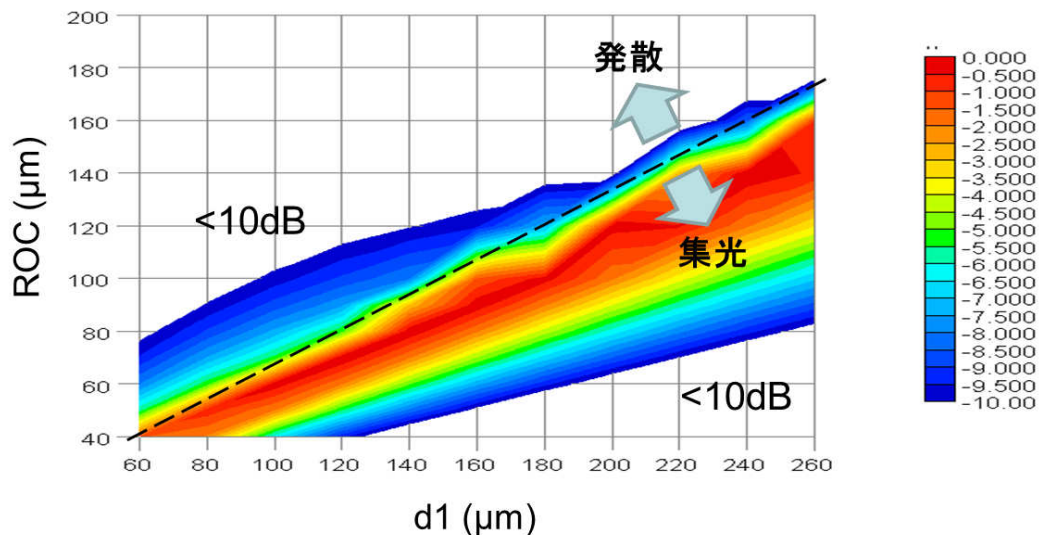


図3.2.2 結合効率のROCと d_1 依存性計算値

LISELからの出射光を集光型とすることで発散型より高い結合効率を得られると分かる。これは集光することでSMF受光面における出射光のスポットサイズをSMFのスポットサイズに合致させられるためである。更に、最大結合効率は0dBが得られており、集積レンズを最適化することでLISELとSMFの高効率な直接光結合が可能であることが理論的に示されている。また、同一結合効率の領域が右上がりに分布している。これは、集光点において同一の ω_1 が得られる d_1 とROCの組み合わせが複数存在することを示している。ただし、レンズのROCが異なると焦点距離も異なるため、集光点のZ方向位

置(集光距離)は各々異なる。

実際のモジュールではレーザ素子とSMFの相対位置は、光結合させながら調芯するアクティブアライメントにより実装される。レーザ素子とSMFの距離 Z は結合効率と実装精度により決定するある範囲内に規定する必要がある。一方、組み立てコスト低減の観点からは、アクティブアライメントの調芯軸は少ない方が有利である。例えば、 Z 方向は、ファイバコネクタをスペーサ上に配置することで、スペーサの寸法精度で決まる距離に固定し、平面方向のみアクティブアライメントを適用する方法が挙げられる。

そこで、次に Z を定数とした場合の結合効率を計算し、良好な結合効率を実現できる Z の範囲と d_1 、ROCの組み合わせを検討する。

図3.2.3(a)～(f)に Z を $1000\mu\text{m}$ から $80\mu\text{m}$ に固定した時の結合効率の d_1 、ROC依存性を示す。先ほどと同様に結合効率が -10dB 以上の点をプロットしている。

マップの特徴として、 d_1 、ROCが大きいほど、結合効率 -10dB 以上となる領域が広い。これは、 d_1 とROCが大きいほど、LISELからの出射光の集光距離が長くコリメート光に近くなるためである。 d_1 とROCが小さい領域では集光距離が短く、ビームは集光した後再度広がり Z が長い位置では結合が取れなくなる。例えば、 $Z=1000\mu\text{m}$ では、結合効率 -10dB 以上の領域が存在しない。以上の出射光の挙動により、マップは結合効率 -10dB 以上の領域が右上に広がっていく分布となる。このため、広義には d_1 とROCは絶対値が大きい領域(集光距離が長い出射光)であるほど高結合効率が取れる組み合わせが多く、この点で有利と言える。ただし、 Z が極端に短い場合($Z=80\mu\text{m}$)、集光距離より前にSMFが配置されるため、 -10dB 以上の領域は広いが分布全体における結合効率は著しく低下する。

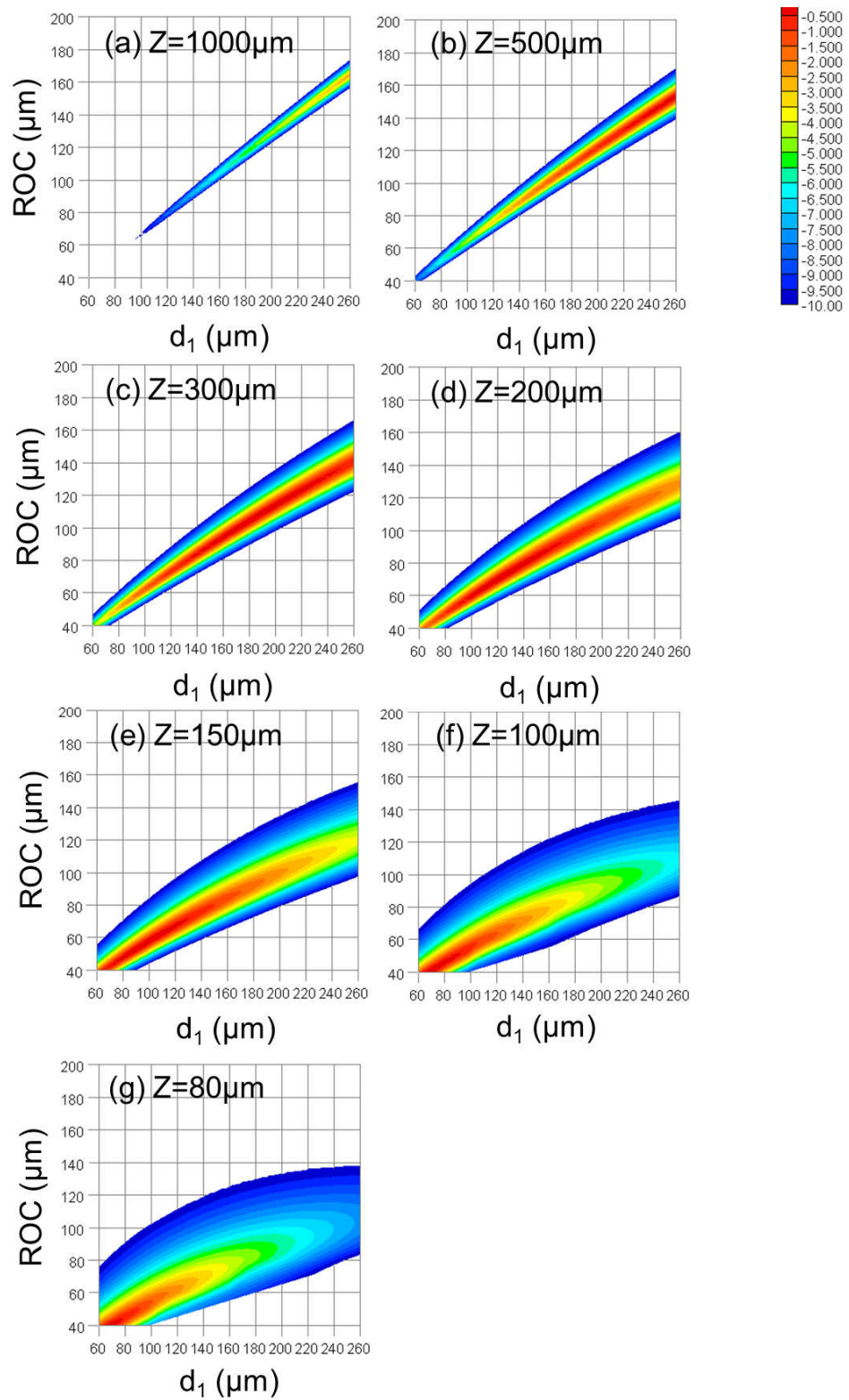


図3.2.3 結合効率の d_1 とROC依存性(a) $Z=1000\mu\text{m}$ 、(b) $Z=500\mu\text{m}$ 、(c) $Z=300\mu\text{m}$ 、
(d) $Z=200\mu\text{m}$ 、(e) $Z=150\mu\text{m}$ 、(f) $Z=100\mu\text{m}$ 、(g) $Z=80\mu\text{m}$

Z=1000 μ mでは、マップの赤色で示される高効率合領域が存在しない。一方でZ=500 μ mでは高効率結合の領域が存在する。このことから、計算した d_1 とROCの範囲においては、集光距離の最大値は $500\mu\text{m} \leq Z \leq 1000\mu\text{m}$ の領域に存在している。また、 $Z \leq 300\mu\text{m}$ では、高効率結合領域が広いことから、集光距離が300 μ m以下の範囲に分布する。

一方で、Zが極端に短くなると（Z=80 μ m）、結合が取れる領域は広がるが、結合効率の絶対値は低下する。これは、集光系においても、LISEL出射光のスポットサイズがファイバスポットサイズよりも小さくなること、SMFが集光点よりも素子側に位置するためである。以上の傾向から、Z=150~200 μ mにSMFを配置することで、 d_1 とROCの変化に対して、ある程度の尤度を以て良好な光結合が実現できる実装が可能と考えられる。

従って、Z=150、200 μ mのマップにおいて、実現可能な素子厚から $d_1 \leq 180\mu\text{m}$ を考慮し、この中で結合効率が高い領域を選択し、更にその領域内で d_1 とROCの値が大きい組み合わせを選ぶことで、素子の形状バラつきに対して尤度があり、高い結合が得られると考えられる。

実際のモジュールでは、LISELとSMF(或いはSMFコネクタ)間距離は、スペーサ等の部材により一定値に保つことができるが、スペーサにも公差が存在する。これを考慮して、本検討では、 $150\mu\text{m} \leq Z \leq 200\mu\text{m}$ において、結合効率が等しく、Zが異なる2つのROCと d_1 の組み合わせを採用する。図3.2.4にROCと d_1 に対する集光距離の計算結果を示す。図3.2.2に示した、結合効率のROC、 d_1 依存性と図3.2.4より上記を満たすROCと d_1 として、(ROC, d_1)=(70,130)(Z=150 μ m)、(90,170)(Z=180 μ m)を選択する。また、これらのレンズ設計におけるピーク結合効率の設計値は-1.0dBである。

以上の実装形態ではLISELとSMFの直接結合を想定している。一方、WDMの構成では半導体レーザとSMFの間に光合分波が挿入される。また、光合分波器内での光伝搬距離は一般に数mmと長くなるため、コリメート光が必要となる。そこで、本検討では、コリメート光検討の一環として、FFPが3~4°と狭い発散型ビームのLISELも試作する。レンズの形状(ROC)変化によるビーム出射角制御の設計検証を目的として、集光型と同じ d_1 で、ROCのみ変化させて発散ビームとなる設計とした。上記を満たすレンズ設計として(d_1 , ROC)=(120, 90)を選択する。以上の点を最大結合効率のマップ（図3.2.4）にまとめた。

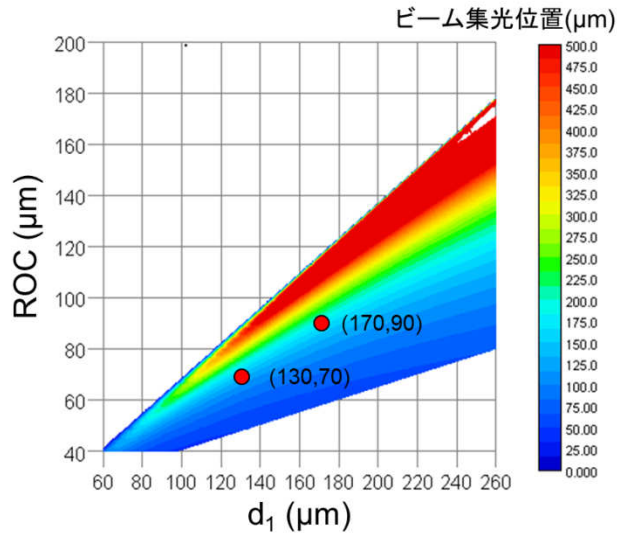


図3.2.4 ビーム集光距離のROCと d_1 依存性計算結果

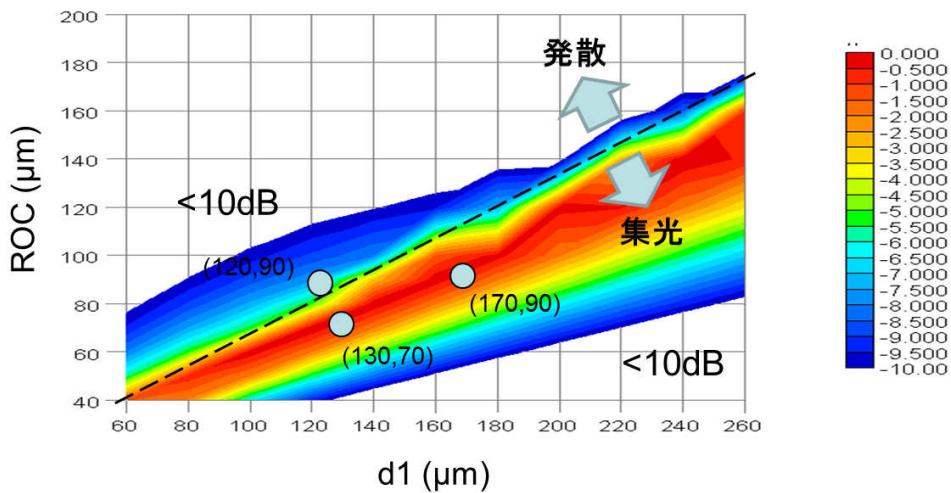


図3.2.5 結合効率マップにおける試作するレンズ

3.3 LISEL と SMF の直接光結合

本節では、3.2の検討に基づいて決定したレンズを集積したLISELを用いて、SMFとの直接結合実験を実施し、LISELを用いることでSMFが高効率な光結合が可能なことを実証する。

素子の仕様はレンズ設計と素子厚を除いて第2章と同様であるため、ここでは、レン

ズの結果のみを示す。図3.3.1には試作したレンズの形状評価結果を示す。ROC=70 μm 設計に対して、V方向：64.9 μm 、H方向：67.8 μm 、ROC=90 μm 設計に対して、V方向：82.2 μm 、H方向：89.4 μm であり、いずれの仕様方向においても設計値からの乖離が10%以下のレンズ形状が得られた。次に、試作した素子を用いてSMFとの直接結合実験を実施した結果を示す。図3.3.2に測定系の概略図を示す。

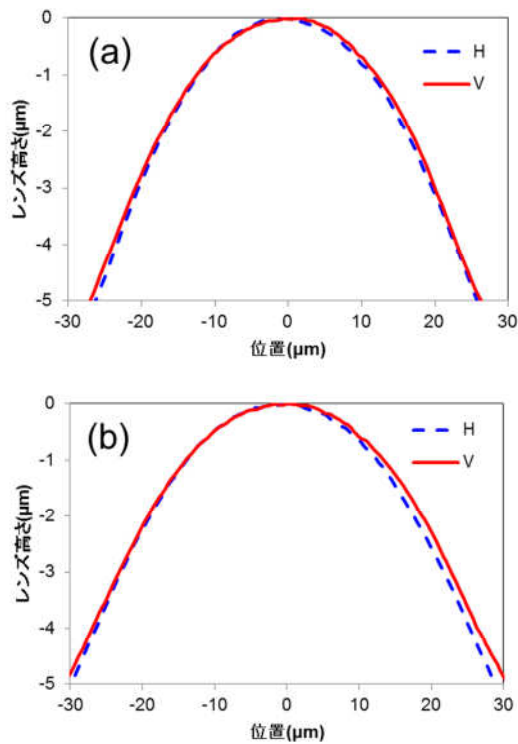


図3.3.1 レンズ形状評価結果：(a)ROC=70 μm 設計、(b)ROC=90 μm 設計

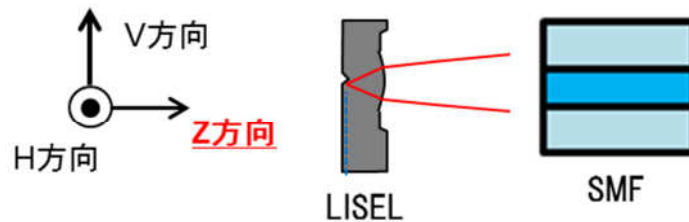


図3.3.2 LISEL-SMF直接結合実験系略図

図3.3.3に各LISELにおける直接結合実験のZ方向依存性を示す。それぞれのグラフにはガウスビームの伝搬光学を用いた計算結果を併記している。図3.3.3(a)、(b)はそれぞれ、集光型のROC=70 μm 設計、ROC=90 μm 設計素子の結果である。Z方向のプロファイルがピークを有することから、設計通りレンズによって出射ビームが集光されていることを実験的に確認できる。また、ピーク結合効率は、ROC=70 μm 設計素子で-3.8dB、ROC=90 μm 設計素子において-4.1dBであり、良好な値であるが、結合効率の設計値-1.0dBから乖離している。この原因として、まず、レンズ形状が設計値からずれたことが考えられる。図3.3.3(a)、(b)の点線と実線はそれぞれ、レンズROCが設計値の場合と実測値の場合の計算結果である。なお、ROCの実測値を用いた計算では、V方向、H方向個別に結合効率を計算した後、これらの平均値を計算し、プロットしている。

いずれのグラフにおいても実測値と実線が比較的良好に一致することから、結合効率の実測と理想計算のズレの主要因はレンズ形状のズレと考えられる。また、実測値と実線にも乖離が見られるが、これは今回の計算では考慮していないレンズの非球面成分の影響と考えられる。ROC=90 μm 設計の結果と比較して70 μm の乖離が大きい。これは、70 μm の方がレンズ形成時の円柱直径が小さく、レンズ有効径が小さくなるため、非球面成分の割合が大きくなるためと考えられる。以上の結果より、結合効率の改善には、レンズROCの設計からのズレを10%よりも小さくすること、レンズの非球面成分を無くすことが必要と考えられる。

続いて、発散型のROC=90 μm 設計素子では、結合効率のZ方向依存性の実験値が理論値とよく一致しており、単調に減少している。発散型のROC=90 μm 設計素子では、 d_1 の値が120 μm と集光系に対して短いことから、レンズ面において光スポットがレンズの中心付近を通過するため、理論値とよく一致したプロファイルが得られたと考えられる。

以上の結果より、集光レンズを用いることでSMFとの結合効率を向上できることを実験的に確認した。

続いて、各素子の結合効率のV、H方向位置依存性の測定結果を図3.3.4から3.3.6に示す。図3.3.4と図3.3.5はそれぞれ、集光型のROC=70 μm 設計素子、ROC=90 μm 設計素子を用いて結合損失のV、H方向位置依存性の過剰損失の測定結果である。これらの素子では、図3.3.3に示したZ方向のピーク位置において、V、H方向へSMFをスキャンすることでそれぞれの依存性を測定した。集光系では、ピーク結合効率は高いが、ビームが集光

されているため、V、H方向のトレランスは小さい。最大結合効率から1dBロスが発生時のトレランスは、 $\pm 2.0\mu\text{m}$ 程度である。

これに対して、図3.3.6に示すように発散系では、最大結合効率から1dBロスが発生時のトレランスは、 $\pm 5.5\mu\text{m}$ であり広いトレランス特性が確認できた。以上の振る舞いは理論計算とよく一致しており、レンズが設計通りに機能していることを実証した。

これらの結果から、トレランス拡大には、出射ビームのFFPを広げることが有効である。また、集光ビームにおいて、ビーム集光位置からファイバ位置をずらす(でフォーカス)することでも同様の効果が得られる。しかしながら、これらの手法ではトレランスと最大結合効率はトレードオフの関係となるため、実際のモジュールでは、光出力の仕様と実装精度の両方を考慮した設計が重要となる。

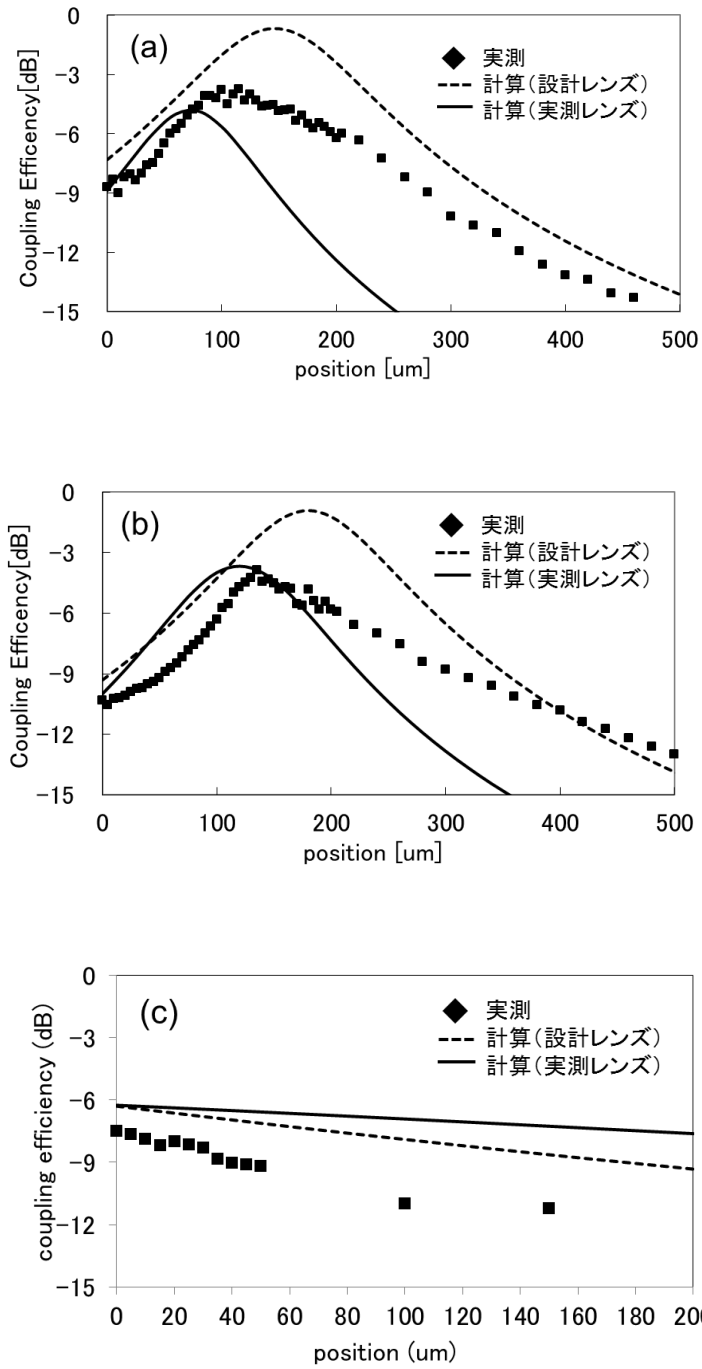


図3.3.3 LISEL-SMF直接結合実験結果(Z方向依存性):(a)ROC=70 μm 設計、(b)ROC=90 μm 設計、(c)ROC=90 μm 設計(発散型)

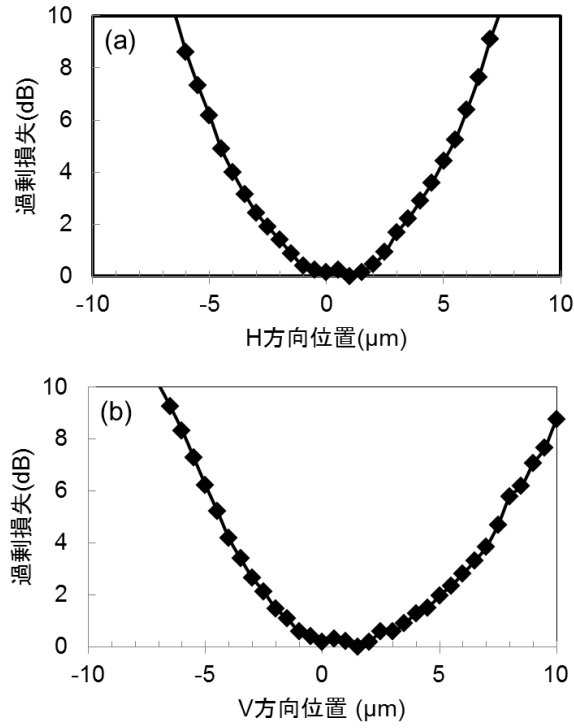


図3.3.4 LISEL-SMF直接結合実験結果(ROC70 μm 設計 V、H方向依存性)

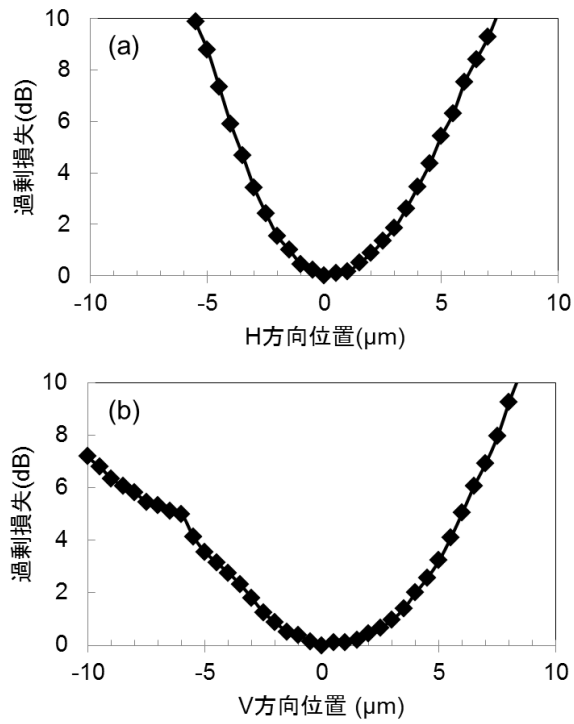


図3.3.5 LISEL-SMF直接結合実験結果(ROC=90 μm 設計(集光)、V、H方向依存性)

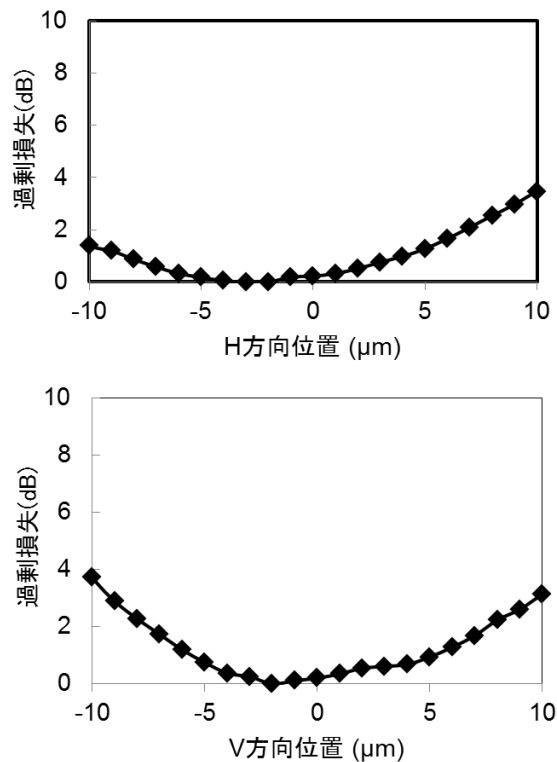


図3.3.6 LISEL-SMF直接結合実験結果(ROC=90μm設計(発散)、V、H方向依存性)

3.4 まとめ

本章では、SMFと高効率で結合可能なレンズを設計し、試作したLISELとSMFの光結合実験を行い、LISELの光結合における優位性を実証した。LISELとSMFの直接光結合実験の結果から、集光型の出射ビームのLISELが実現できることを確認した。レンズ曲率半径ROCが70μmの集光型高曲率レンズを試作し、SMFとの直接結合にて、結合効率-3.8dBを得た。以上の結果から、LISELが低コストに光結合可能なデバイスとして有用であることを実証した。

参考文献

- [1] H. Ishio, J. Minowa, and K. Nosu, "Review and status of wavelength-division multiplexing technology and its application," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 2, No. 4, pp. 448-463, 1984.
- [2] T. Ohyama, Y. Doi, W. Kobayashi, S. Kanazawa, K. Takahata, A. Kanda, T. Kursaki, T. Tanaka, T. Ohno, H. Sanjoh, and T. Hashimoto, "Compact Hybrid Integrated 100-Gb/s Transmitter Optical Sub-Assembly Using Optical Butt-Coupling Between EADFB Lasers and Silica-Based AWG Multiplexer," *J. of Lightwave Technol.* Vol. 34, No. 3, pp. 1038-1046, 2016.
- [3] Y. Baek, Y. T. Han, C. W. Lee, D. H. Lee, O.K. Kwon, J. W. Shin, S. H. Park, and Y. H. Leem, "Optical components for 100 G ethernet transceivers," in *proc. OECC*, pp. 218-219, 2012.
- [4] T. Murao, N. Yasui, T. Shinada, Y. Imai, K. Nakamura, M. Shimono, H. Koderu, Y. Morita, A. Uchiyama, H. Koyanagi, and H. Aruga, "Integrated spatial optical system for compact 28-Gb/s $\times 4$ -lane transmitter optical subassemblies," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 26, No. 22, pp. 2275-2278, 2018.
- [5] S. Ristic, M. Florjanczyk, and M. Leiby, "Optoelectronic Integrated Circuit (OEICs) for 100G Ethernet and Coherent Networks Based on Multi-Guide Vertical Integration Platform," *proc of OFC2014*, Tu3H, 2014.
- [6] T. Ohyama, A. Ohki, K. Takahata, T. Ito, N. Nunoya, H. Mawatari, T. Fujisawa, S. Kanazawa, R. Iga, and H. Sanjoh, "Transmitter Optical Subassembly Using a Polarization Beam Combiner for 100 Gbit/s Ethernet over 40-km Transmission," *J. of Lightwave Technol.* Vol. 33, No. 10, pp. 1985-1992, 2015.
- [7] S. W. Park, J. H. Han, Y. T. Han, S. S. Park, B. Y. Yoon, B. K. Kim, H. K. Sung, and J. I. Song, "Two-Step Laterally Tapered Spot-Size Converter 1.55- μ m DFB Laser Diode Having a High Slope Efficiency," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 18, No. 20, pp. 2138-2140, 2006.
- [8] B. Stegmüller, H. Westermeier, W. Thulke, G. Franze, and D. Sacher, "Surface Emitting InGaAsP/InP Distributed Feedback Laser Diode at 1.53 μ m with Monolithic Integrated Microlens," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 3, No. 9, pp. 776-778, 1991.
- [9] 河野健治 著, 「光デバイスのための光結合系の基礎と応用」, 現代工学社, 1990.

第4章 レンズ集積型面出射半導体レーザの高速化検討

4.1 はじめに

前章までで、本研究で提案するLISELがSMFと高効率な直接光結合が可能であることを実証した。本章では、LISELの高速動作化を検討する。近年の主流な光通信規格である100GbEではチャンネルあたりの速度は25Gbpsであり、これを4チャンネル使用して100Gbpsの伝送速度を実現している。これに対して、近年25Gbps以上で動作するレーザの開発が活発に進められている[1、2、3、4、5]。そこで、本章では、前章で検討したLISEL構造における25Gbps動作化を検討する。LISELはDFBレーザをベースとしているため、高速化には従来のDFBと同じ手法が適用できる[6]。そこで、本章では、DFBレーザ部分の短共振器化により緩和振動周波数増大を図り、LISELの高速特性向上を検討する。また、簡易実装が可能なフリップチップ実装構造において、低インダクタンスな構造を検討する。以上によりLISELの25Gbps動作を目指す。

4.2 直接変調型レーザの高速化

LISELのレーザ共振器は通常のDFBレーザと同一の構造を採用している．このため、LISELはDFBレーザ同じ手法により高速化が可能である．そこで、まず本節では、DFBレーザに代表される直接変調レーザの高速化について述べる．直接変調レーザの変調帯域は、素子に注入する電流量に比例して増加する．これは、変調帯域を決定する要因のひとつである緩和振動周波数 f_r が(1)式の関係で表されるためである[7]．

$$f_r = \sqrt{\frac{v_g}{qL_c} \frac{\Gamma_{MQW}}{N_w L_w W_a} \eta_i \frac{dg}{dN} (I - I_{th})} \quad (4.2.1)$$

ここで、 I は注入電流、 I_{th} はしきい電流値、 v_g は群速度、 q は素電荷、 L_c は共振器長、 Γ_{MQW} は活性層の光閉じ込め係数、 N_w 、 L_w はそれぞれ活性層量子井戸の層数、および層厚さ、 η_i は内部量子効率、 dg/dN は微分利得である．

(4.2.1)式から注入電流がしきい電流値以上の時、 f_r は注入電流の平方根に比例して増加する．この比例係数 $f_r/(I - I_{th})^{1/2}$ を緩和振動周波数効率 η_{fr} と定義すると、同一電流で f_r を増大するためには η_{fr} を増大すればよいと分かる．従って、高速動作の低電力化のためには η_{fr} の増大が有効な手段である．また (4.2.1)式から、任意の活性層に対し、共振器長 L_c を短くすることで η_{fr} を増大できると分かる．以上から、本報告では短共振器化を指針として高速特性向上を検討する．レーザの共振器長を変化させると共振器のミラー損失が変化するため、光出力も変動する．このため、短共振器化する場合には共振器の反射率も同時に考慮する必要がある．DFBレーザの反射率は、モード結合理論により求められる単位長さ当りの反射率 κ と共振器長 L_c の積 κL_c と比例関係にある[8]．そこで、共振器長と κL_c をパラメータとして、雰囲気温度 85°C における η_{fr} と最大光出力を計算し、各々の最適値を検討する．

レーザ横構造は、2章と同様にリッジ導波路型とする．また、一般に短共振器化すると、素子抵抗が大きくなるため光出力の熱飽和が顕著になる．そこで計算では、電流増加時の自己発熱としきいキャリア密度の温度依存性を考慮した収束計算を実施し、各電流値において温度安定する時の光出力と η_{fr} を算出することで熱飽和の効果を取り入れる．

最初に最大光出力の観点から、最適共振器長範囲を検討する。図4.2.1(a)に85°Cにおける最大光出力の計算結果を示す。最大光出力は短共振器化に伴い減少する。実際の光モジュールでは、モジュール光出力が規格によって定められているが、レーザチップの光出力はモジュール内光学系の光損失に依存するため明確な規定は存在せず、ベンダー毎に異なる。そこで本章では、25Gbps動作が報告されているリッジ導波路型のDFBレーザを参考とする[9]。このDFBレーザでは85°Cにおいて駆動条件下での光出力は10mW前後である[9]。そこで、ここでは、光出力の目標値を10mW前後に設定する。図2.4.1(a)から、これを達成するためには、共振器長 $\geq 100\mu\text{m}$ が必要であると分かる。

図2.4.1(b)は、85°Cにおける η_{fr} の共振器長依存性である。 η_{fr} は短共振器化に伴い増加する。また、共振器長が同じ時 κL_c が大きいほど η_{fr} も増加する。これは以下のように理解できる。 κL_c が増大するとミラー損失が低減するため、しきいキャリア密度が低くなる。一方、量子井戸レーザでは、利得がキャリア密度に対して対数関数的に増大する[10]。このため、キャリア密度が低いほど微分利得は大きくなる。従って、 κL_c 増大に伴い微分利得が増大し、 η_{fr} が増大する。

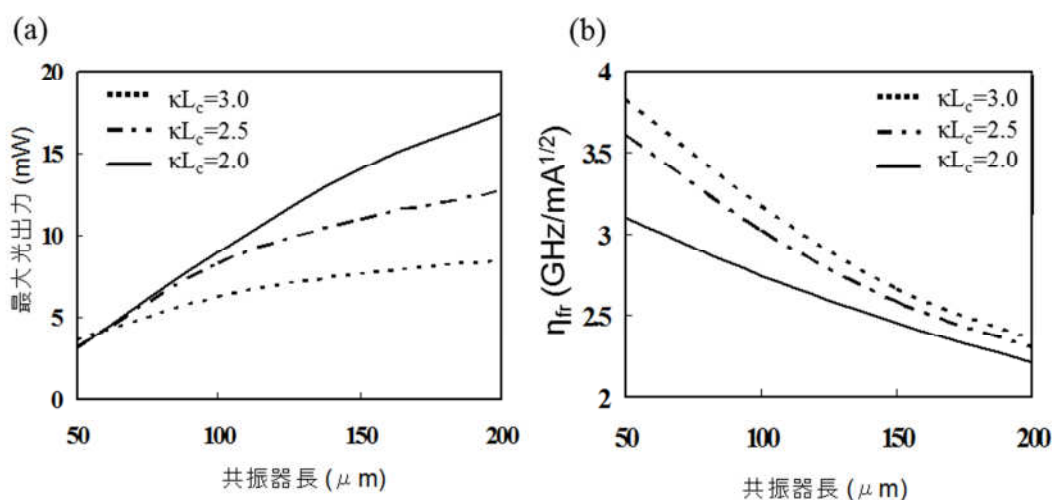


図4.2.1 (a)最大光出力の共振器長依存性、(b) η_{fr} の共振器長依存性

続いて、25Gbps動作に必要な η_{fr} の目標値について考察する。既に本素子と同様のリッジ導波路型のDFBレーザにおいて95°Cでの25Gbps動作が実証されている[9]。このDFBレーザは $\kappa L_c = 1.6$ 、 $L_c = 160\mu\text{m}$ であり、95°Cでの η_{fr} は2.0GHz/mA^{1/2}が得られている。また、95°C、25Gbps動作時の中心バイアス電流は60mAである。従って、 $L_c = 160\mu\text{m}$ 、 $\eta_{\text{fr}} \geq 2.0 \text{ GHz/mA}^{1/2}$ とすることで中心バイアスを上記DFBレーザよりも低減しつつ25Gbps

動作が実現可能と考えられる。 η_{lr} が大きい程動作電力を低減できる。 以上より、 L_c をほぼ一定に保ったまま κ の増加を図るのが良いと考えられる。 しかし、 $\kappa > 200 \text{ cm}^{-1}$ では回折格子厚さを 70 nm 以上と厚くする必要があり、 p クラッド層を再成長した際の結晶表面状態の劣化といったプロセス上の課題が発生すると懸念される。 以上の検討から本研究では共振器長 $150 \mu\text{m}$ 、 $\kappa L_c = 3.0 (\kappa = 200 \text{ cm}^{-1})$ とする。

4.3 フリップチップ構造の設計

本研究で試作した素子の構造図を図2に示す。 低容量フリップチップ実装の観点から、素子表面のレイアウトを検討した。 従来の素子は、表面のメサ上部に p 電極、裏面に n 電極を配置する構造である。

フリップチップ化のためには、電極を表面に形成する必要がある。 また、次に進めるべきアレイ化を考慮すると、チップの幅はリボンファイバのピッチ間隔に合わせた $250 \mu\text{m}$ とする必要がある。

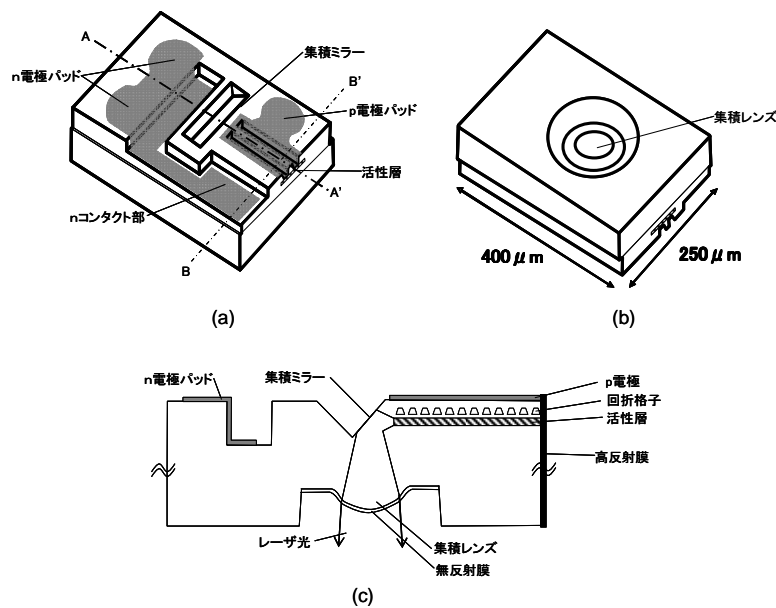


図4.3.1 フリップチップ型LISELの模式図

この条件のもと、p電極からn電極間の抵抗を低減するには、n電極をレーザ共振器と並行で近接して配置する必要がある。さらに、p電極パッドの浮遊容量を極力削減する必要がある。

以上の検討から、図4.3.1(a)に示すような電極配置を採用した。チップが基板面に並行に実装されるよう、n型電極パッドは2か所設け、3点支持構造とした。なお、図4.3.1(a)のp、nパッドの寸法は $80\mu\text{m}\phi$ の金バンプで実装可能な最小の大きさとした。集積ミラー部分を回避するためにn電極はDFB共振器部分の周りに引き回した。

また、全体の素子長は $400\mu\text{m}$ とした。n電極はpクラッドをn基板に達する深さにエッチングした後、露出したnクラッド層にコンタクトした。図4.3.1(c)の素子断面図に示すように、ミラーで折り曲げられたレーザ光の出射する位置には基板をエッチングしてレンズを集積した。

次に上記構造において、実装時の素子の電気応答帯域 f_{CR} を等価回路解析により調べ、高速動作化の可能性を検討する。図4.3.2に作成した等価回路図を、表2には用いたパラメータを示す。なお、ここでは、シミュレーションにおいてサブマウントの材料にはAINを仮定した。また、フリップチップ実装の効果検証のためワイヤボンディングで実装した場合のシミュレーションも実施した。フリップチップ実装型とワイヤボンディング実装型の違いは回路図上で実装インダクタンス L_n の値として反映させた。半導体レーザでは活性層への電流注入により光を発生させることから、シミュレーションでは活性層部分直列抵抗 R_{j1} での周波数応答を調べた。

図4.3.3にシミュレーションの結果を示す。図中の $L_n=800\text{pH}$ 、 400pH はそれぞれ、ワイヤ長が 1mm 、 0.5mm のワイヤボンディング実装の結果であり、 $L_n=100\text{pH}$ はフリップチップ実装の場合である。同図より、実装インダクタンスが小さいほど f_{CR} は大きくなり、高速動作に有利であることが分かる。本研究のフリップチップ実装構造では $f_{\text{CR}}=8\text{GHz}$ となった。緩和振動周波数のピーキング効果を併用すれば、 $f_{\text{CR}}\geq 8\text{GHz}$ であれば素子全体の帯域を 20GHz 近くに延ばせるため 25Gbps 動作の可能である。このことから、図4.3.1の構造で本検討を進めることとする。

記号	構造	値	単位
R_{s1}	活性層直列抵抗	7.66	Ω
R_{s2}	p電極パッド下抵抗	0.84	Ω
R_{s3}	n電極パッド下抵抗	0.1	Ω
R_{cn}	nコンタクト抵抗	0.18	Ω
R_{sub}	n基板抵抗	0.066	Ω
C_{j1}	活性層接合容量	1.06	pF
C_{j2}	p電極パッド下接合容量	1.19	pF
C_{j3}	n電極パッド下接合容量	2.89	pF
C_{p1}	p電極パッド下絶縁膜容量	0.07	pF
C_{p2}	n電極パッド下絶縁膜容量	3.89	pF
C_{sbm1}	素子空間結合容量	0.73	pF
C_{sbm2}	サブマウント容量	0.04	pF
L_p	信号線インダクタンス	100	pH
L_n	設置部インダクタンス	パラメータ	pH

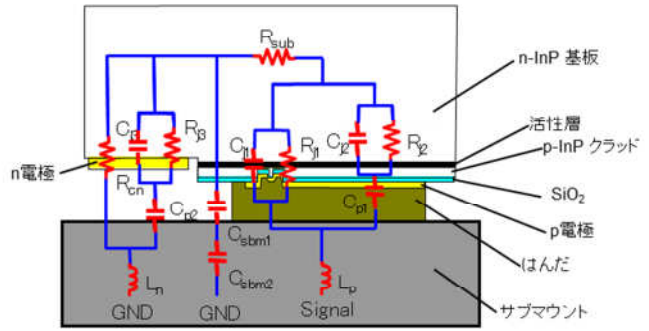


図4.3.2 電気応答の等価回路モデル

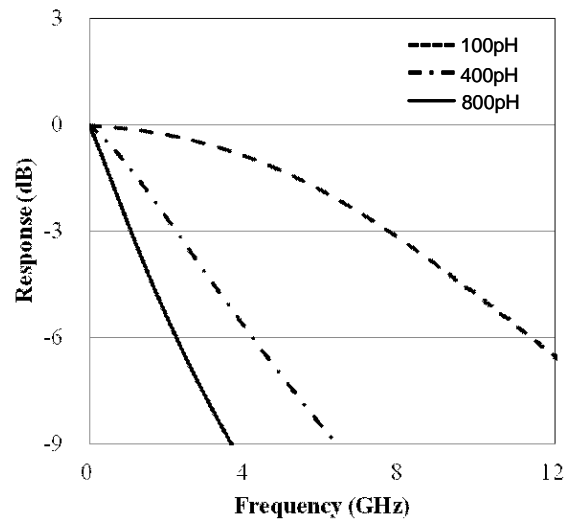


図4.3.3 LISL等価回路モデルの電気応答計算値

4.4 高速動作向け LISEL の作製方法

次に図5に示す作製フロー概略を用いて本素子の作製手順を説明する．まず有機金属気相成長法(MOVPE: Metal Organic Vapor Phase Epitaxy)を用いてn型(100)基板に第一多層(InGaAlAs引張歪MQW活性層、InGaAsP回折格子層、InP保護層)を形成する(図4.4.1(1))．続いて、レジストマスクを用いて保護層及び回折格子層を部分的に除去した．その後、EB描画工程とドライ及びウェットエッチング工程を用いて回折格子パターンを形成する(図4.4.1(2))．回折格子は安定な縦単一モード発振が得られるように $\lambda/4$ シフト構造を用いている．続いて、第二多層(InPクラッド層、コンタクト層)を再成長する．再成長時に、活性層先端にミラーを形成するためのInP窓構造を形成する(図4.4.1(3))．次にリッジ導波路を形成する．リッジ形成と同時に後の工程でn電極を形成する位置のpクラッド層も同時にエッチングする．その後、素子の寄生容量低減のため、活性層の一部を電氣的に分離するためのアイソレーション溝を形成する[12]．

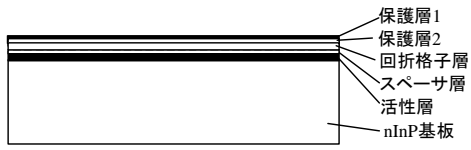
リッジ導波路構造の側壁にはSiO₂からなる保護膜を形成した．続いて、このパッシベーション膜をマスクとして2章で検討したウェットエッチングすることにより45°に傾斜したInPミラー面を形成する．ミラーエッチング工程に続いてp電極とn電極とそれぞれリフトオフ法を用いて形成する．続いてp、n電極上に放熱性向上のため厚さ3.0 μ m前後の金メッキを施している(図4.4.1(4))．

以上の表面工程の後、素子裏面に2章と同様の方法で集積レンズを形成した．最後にレンズ表面に反射率約1%のARコーティングを施してウェハ工程が完了する(図4.4.1(5)、(6))．

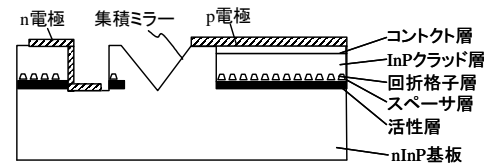
以上の工程により作製したLISELウェハの表裏面写真を図4.4.2に示す．同図中には黒枠で1素子分の領域を示した．

次に劈開により素子が横一列に並んだバーを切り出し、素子の後端面に反射率98%以上の高反射コーティングを施す．その後、バーからチップを切り出す．完成した素子はマイクロストリップラインを有するステム上にジャンクションダウンでフリップチップ実装する．

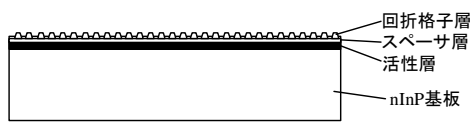
(1) 第一多層成長



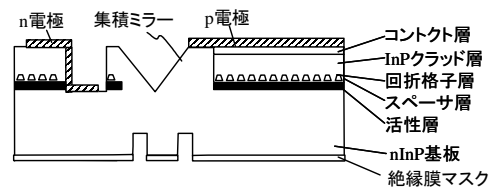
(4) リッジ, ミラー, 電極形成



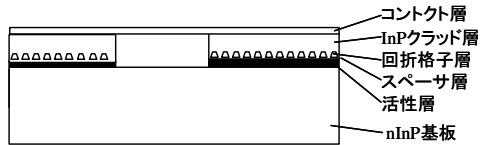
(2) 回折格子形成



(5) 裏面レンズ形成①



(3) 第二多層成長



(6) 裏面レンズ形成②

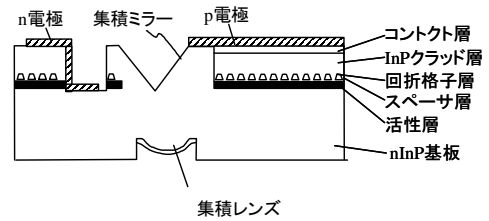


図4.4.1 フリップチップ型LISELのプロセスフロー

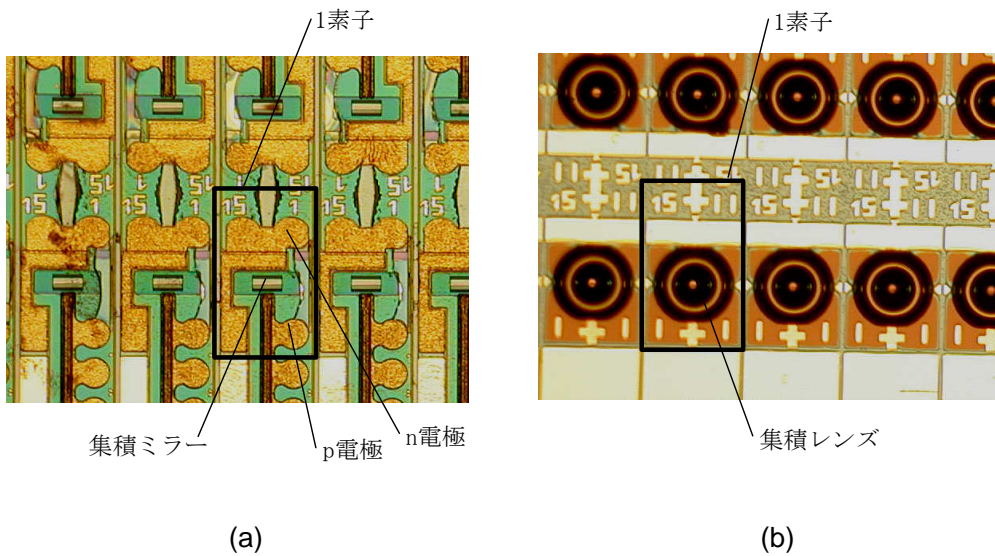


図4.4.2 試作したフリップチップ型LISELの写真

4.5 高速 LISEL の動作特性

4.5.1 CW 動作特性

試作した素子のCW条件での電流光出力特性の典型例を図4.5.1(a)に示す。発振しきい電流値は25°C、85°Cでそれぞれ6.4mA、13.8mAであり、良好な低しきい値発振を示している。また、85°Cにおける最大光出力は10mWを上回り目標値を達成した。しかし、実駆動電流(50~60mA)における光出力は約5~6mWであることから、実用化に向けては更なる光出力の改善が必要である。

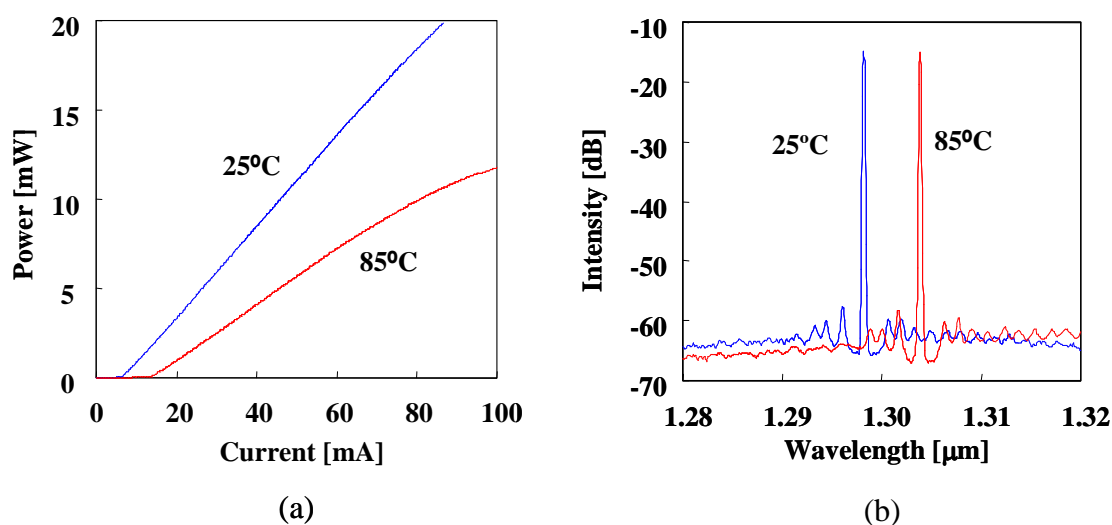


図4.5.1 フリップチップ型LISELのDC特性：(a)光出力特性、(b)スペクトル

4.5.2 周波数応答特性

試作した素子の25°C、85°Cにおける小信号周波数応答特性のバイアス電流依存性を図4.5.2に示す。25°Cにおいて、30mAの低バイアス電流で3dB周波数帯域 f_{3dB} は14.5GHzを

得た. また、85℃の高温下においても40mAの低バイアス電流にて $f_{3dB}=14.5\text{GHz}$ を得ることができた. 更に重要な点は、高速変調時に実際に使用されるバイアス電流30~40mAにおいて温度上昇時の f_{3dB} 劣化が少ないことである. このことから、広い温度範囲において低電力な動作が期待できる. なお、今回の測定結果では15GHz近傍に特異なディップが現れているが、これは評価系に起因するものと考えられる. ディップ近傍を除いてフィッティングし、ディップの影響を除外すると、25℃、85℃それぞれにおいて30 ~ 40mAのバイアス下で f_{3dB} は約17GHzである.

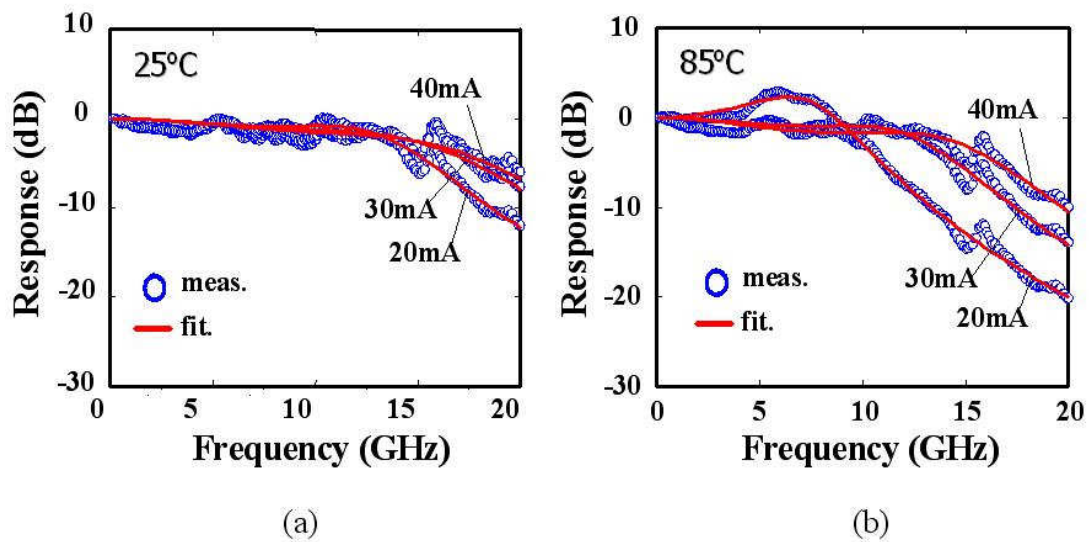


図4.5.2 フリップチップ型LISELの周波数応答特性(a)25℃、(b)85℃

次に周波数応答特性から高速動作に関わる種々のレーザ特性を解析した. 直接変調レーザの周波数応答特性 F は一般に(4.5.1)式で表わされる[11]. ここで、 f_r は緩和振動周波数、 Γ は素子に固有のダンピング項、 C 、 R はそれぞれ素子の寄生容量と直列抵抗である.

$$F = \frac{f_r^4}{(f - f_r)^2 + \left(\frac{\Gamma}{2\pi} f\right)^2} \cdot \frac{1}{1 + (2\pi CRf)^2} \quad (4.5.1)$$

測定した周波数応答特性のデータを(4.5.1)式でフィッティングすることにより、素子の f_r と電気応答帯域 f_{CR} を算出できる. 図4.5.3(a)は25℃でのバイアス電流10~50mAの範

図4.5.3(b)における f_{CR} の算出結果である。同図から f_{CR} は8~10GHzであり、等価回路シミュレーションでの結果の8GHzと比較的よく一致した。ここで、今回試作したLISELの周波数応答の制限要因について考察する。式(4.5.1)の Γ は $\Gamma=Kf^2+1/\tau_n$ で表される。ここで、 τ_n はキャリアライフタイム[11]、比例係数 K は K 因子と呼ばれ、素子の非線形利得や微分利得によって決まる定数である。従って、周波数応答は f_r 、 K 、 CR により決定すると分かる。一般に、 f_r 、 K によってのみ決まる周波数応答帯域の最大値はそれぞれ、 $F_{max}(f_r)=\sqrt{(1+\sqrt{2})}f_r$ [12]、 $F_{max}(K)=2\sqrt{2}/K$ [13]で表されることが知られている。表5.4.1には、式(4.5.1)とこれらの関係から求めた各要素に依存する周波数応答帯域の解析結果をまとめる。同表から $F_{max}(f_r)$ は25°C、85°Cでそれぞれ、28.4GHz、25.5GHz、 $F_{max}(K)$ は、25°C、85°Cでそれぞれ、33.4GHz、21.8GHz、であり、一方、 CR 帯域は、8.6GHzである。これらの結果より、素子の帯域を制限している要素は CR であると言える。従って、素子の寄生容量低減により更に帯域を拡大することが可能である。容量低減対策としては、電極パッド下に厚保膜の有機物を挿入する、活性層体積を低減するなどが考えられる。

さらに、将来の50Gbps超動作に向けた、 f_r の拡大に関して、共振器長を100 μm 以下に小さくすることで $f_{max}(f_r)$ を35GHz程度まで拡大可能との報告されている[14]。ただし、共振器長短縮すると熱飽和による f_r 飽和が顕著になるため、放熱構造も考慮したレーザ設計が重要となる。

図4.5.3(b)は f_r の駆動電流依存性である。同図より25°Cでの η_{fr} は3.6GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ であり、リファレンスの端面出射型レーザ3.0GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ に比べ約20%改善した。また、85°Cにおける η_{fr} は3.2GHz/ $\text{mA}^{1/2}$ でありこの値は85°Cでの1.3 μm 波長帯レーザのトップデータである。これらの良好な f_r 特性は高 κ 回折格子導入により活性層内部での光密度を適切に増大することができたためと考えられる。また、本素子では高温下での高速特性劣化が比較的小さい傾向にある。これは金メッキなどにより放熱特性が向上したためと考えられる。

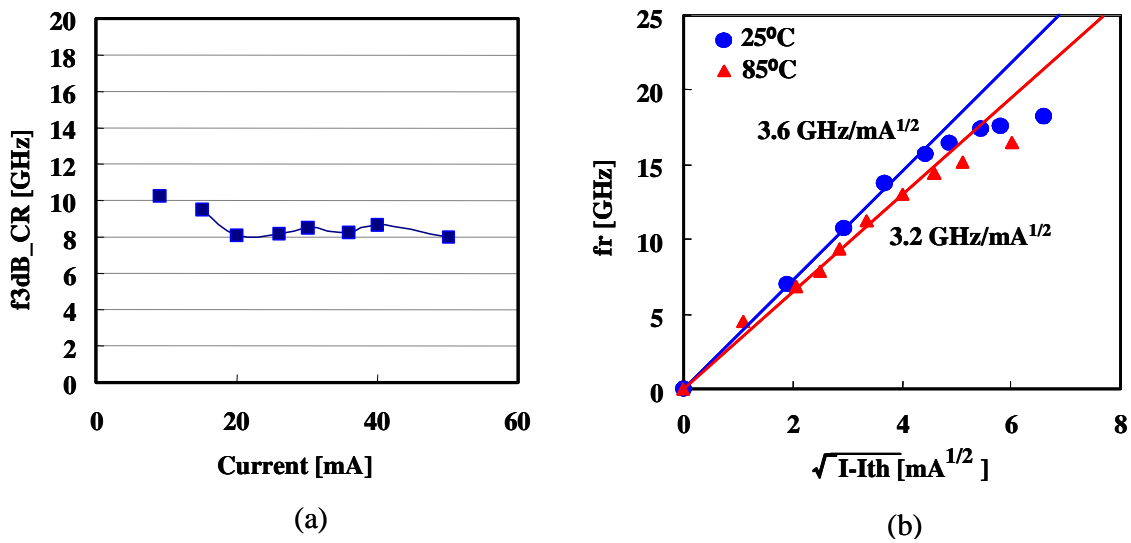


図4.5.3 (a) CR特性の解析結果、(b)緩和振動周波数の駆動電流依存性

次に種々の温度における25Gbpsでの変調動作特性を評価した。信号には $2^{31}-1$ の疑似ランダム信号(PRBS: Pseudo-random bit sequence)を用いた。図4.5.4に25Gbps動作時のアイパターンを示す。同図に示すように本素子において100°Cでの25Gbpsアイ開口を達成した。これは1.3 μ m帯の面型レーザでは世界初の成果である。また、 κ の増大により25°C、85°Cにおける25Gbps動作時の中心バイアス電流は25mA、40mAであり、従来の端面出射型レーザと比較して約30%低減することができた[9]。また、25°CにおいてはCMOS駆動可能な低電流(バイアス電流25mA、振幅電流37mA_{pp})での25Gbps動作を達成しており[14]、本素子が省電力高速動作光源として有望であることを示した。一方で、85°Cにおける25Gbps駆動条件はバイアス電流40mA、振幅電流41mA_{pp}であり、高温下でCMOS駆動するためには更なる低電力化が必要である。

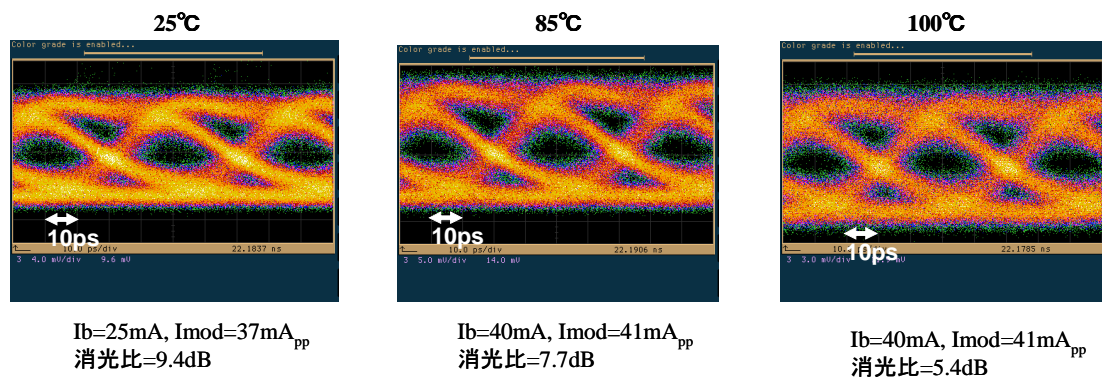


図4.5.4 25Gbpsアイ波形評価

4.6 まとめ

本章では、LISELの高速動作化に取り組んだ。省電力で25Gbps動作可能な面出射レーザとして、高κ回折格子を有し、フリップチップ実装の可能なレンズ集積型面出射レーザ(LISEL)の初期検討を行い、以下の結果を得た。

- 1) 85°Cでの高光出力発振 ($\geq 10\text{mW}$) 及び、25°Cから85°Cの広い温度範囲で副モード抑圧比 $\geq 40\text{dB}$ の安定な縦単一モード発振を確認した。
- 2) 25°Cでの $f_{3\text{dB}}$ は14.5GHzであり、この時バイアス電流は30mAであった。85°Cにおいて同じ $f_{3\text{dB}}$ を得るために必要なバイアス電流は40mAであり、高κ回折格子の効果を反映し、高温下においも低バイアスで良好な $f_{3\text{dB}}$ を得た。
- 3) レーザの周波数応答より見積もった緩和振動周波数の電流効率 η_{fr} は25°Cで $3.6\text{GHz}/\text{mA}^{1/2}$ 、85°Cで $3.2\text{GHz}/\text{mA}^{1/2}$ の良好な結果を得た。
- 4) 25°C~100°Cで25Gbpsアイ開口を確認した。

以上より、LISELが次世代の高速光モジュールの光源として有望であることを実証した。

参考文献

- [1] A. K. Verma, M. Steib, Y. L. Ha, T. Sudo, "25Gbps 1.3 μ m DFB Laser for 10-25km Transmission in 100GBE System," proc of OFC2009, OThT2, 2009.
- [2] G. Sakaino, T. Takiguchi, H. Sakuma, C. Watatani, T. Nagira, D. Suzuki, T. Aoyagi, and T. Isikawa, "25.8Gbps direct modulation of BH AlGaInAs DFB Lasers with p-InP substrate for low driving current," proc of ISLC2010, ThB5, 2010.
- [3] Y. Yamasaki, N. Kaida, T. Takeuchi, T. Hasegawa, N. Okada, K. Akiyama, G. Chifune, Y. Onishi, K. Uesaka, N. Ikoma, T. Fujii, and T. Nakabayashi, "High Reliability 1.3- μ m Buried Heterostructure AlGaInAs-MQW DFB Laser operated at 28-Gbit/s Direct Modulation," proc of ISLC2012, TuB2, 2012.
- [4] W. Kobayashi, S. Kanazawa, Y. Ueda, T. Fujisawa, H. Sanjoh, and M. Itoh, "4 \times 25.8Gbit/s (100 Gbit/s) simultaneous operation of InGaAlAs based DML array monolithically integrated with MMI coupler," Electron. Lett., Vol. 51, No. 19, pp. 1516-1517, 2015.
- [5] M. Matsuda, T. Simoyama, A. Uetake, S. Okumura, M. Ekawa, and T. Yamamoto, "Uncooled, low-driving-current 25.8 Gbit/s direct modulation using 1.3 μ m AlGaInAs MQW distributed-reflector lasers," Electron. Lett., Vol. 48, No. 8, pp. ,2012.
- [6] K. Uomi, T. Tsuchiya, M Komori, A. Oka, K. Shinoda, and M. Aoki, "Extremely low threshold (0.56mA) operation in 1.3 μ m InGaAsP/InP compressive-strained-MQW lasers," Electron. Lett., Vol. 30, No. 24, pp. 2037-2038, 1994.
- [7] K. Y. Lau, N. Bar-chaim, I. Ury, C. Harder, and A. Yariv, "Direct amplitude modulation of short-cavity GaAs lasers up to X-band frequencies," Appl. Phys. Lett. Vol. 43, no. 1, pp. 1-3, 1983.
- [8] J. Carroll, J. Whiteaway, and D. Plumb, "Disubstituted feedback semiconductor lasers," SPIE PRESS, 1998.
- [9] T. Fukamachi, T. Shiota, K. Kitatani, T. Ban, Y. Matsuoka, R. Mita, T. Sugawara, S. Tanaka, K. Shinoda, K. Adachi, and M. Aoki, "95 $^{\circ}$ C Uncooled and High Power 25-Gbps Direct Modulation of InGaAlAs Ridge WaveGuide DFB Laser," proc. of ECOC2009, paper 8.1.5, 2009.
- [10] 栖原敏明 著, 「半導体レーザの基礎」, 共立出版株式会社, 1994.
- [11] R. Olshansky, P. Hill, V. Lanzisera, and W. Powazinik, "Frequency response of 1.3 μ m InGaAsP high speed semiconductor lasers," IEEE J. Quantum Electron., Vol. QE-23, No. 9, pp. 1410-1418, 1987.
- [12] J. E. Bowers, B. R. Hemenway, A. H. Gnauck, and D. P. Wilt, "High-speed InGaAsP Constricted-Mesa Lasers," IEEE J Quantum Electron., Vol. QE-22, No. 6, pp. 833-843, 1986.
- [13] R. Olshansky, P. Hill, V. Lanzisera, and W. Powazinik, "Frequency Response of 1.3 μ m InGaAsP High Speed Semiconductor Lasers," IEEE J Quantum Electron., Vol QE-23, No. 9, pp. 1410-1418,

1987.

- [14] Y. Matsui, T. Pham, T. Sudo, G. Carey, B. Young, J. Xu, C. Cole, and C. Roxlo, "28-Gband PAM4 and 56-Gb/s NRZ Performance Comparison Using 1310-nm AL-BH DFB Laser," *J. Lightwave Technol.*, Vol. 34, No. 11, pp. 2677-2683, 2016.
- [15] T. Takemoto, H. Yamashita, T. kamimura, F. Yuki, N. Masuda, H. Toyoda, N. Chujo, K. Kogo, Y. Lee, S. Tsuji, and N. Nishimura, "A 25-Gb/s 2.2-W Optical Transceiver Using an Analog FE Tolerant to Power Supply Noise and Redundant Data Format Conversion in 65-nm CMOS," in *proc. VLSIC*, pp. 106-107, 2012.

第5章 新活性層材料による高温高速特性の改善

5.1 はじめに

高温下でも高速動作する半導体レーザは、冷却素子が不要であるため、モジュールコストの低減が可能である。本章では、高温での高速特性の改善が期待される新材料 GaInNAs を活性層に用いた半導体レーザ実現に向けて、GaInNAs結晶の高品質化に取り組む。まず、GaInNAs材料の概要について述べる。続いて、高品質化の課題と本研究での取り組みについて言及する。結晶品質の評価指標として電流密度を用い、本検討による電流密度の低減を実証する。最後に、本研究で得られた高品質なGaInNAsを活性層に用いたレーザの評価結果を示す。

5.2 新活性層材料 GaInNAs

GaInNAsは、InGaAsPやInGaAlAsと比較して、高い微分利得有するため次世代の超高速レーザの活性層材料に有望と考えられている[1]。更に従来 material と比較して大きなバンドギャップを有することが理論的に実証されており[2]、高温における高速動作が改善できる新材料として期待されている。実際に、GaInNAsを活性層に用いたレーザにおいて、広い温度範囲でのレーザ動作が報告されている[3、4、5、6]。更に、結晶中のNやInの組成を最適化することで、1.3 μm 帯での発振が可能なことから、光通信用の半導体レーザへの応用が期待されている[7、8、9]。しかしながら、原子半径の小さいN原子を構成原子として数%含んでいることに起因して、材料分離し易く、高品質な結晶を成長することが難しいことが課題となっている[10]。

5.3 GaInNAs 結晶の高品質化

これまでGaInNAs結晶では材料分離し易いため、結晶成長の余裕度が小さく、高品質化への手法が確立されていなかった。これに対して、有機金属気層法（MOCVD）で成長したGaInNAsにAlが混入することで結晶が劣化するとの報告がなされた[11、12、13]。GaInNAs層の前に成長したAlGaAs層や、AlAs層の成長で使用したAl原料が配管に残存し、これが混入していると説明されている。そこで、分子線エピタキシー(MBE:Molecular Beam Epitaxy)法で成長していた本研究においても過去に試作したGaInNAs結晶のAlのSIMS分析を実施した。図5.3.1(a)に結果を示す。

図から分かるように GaInNAs 層への Al 混入が確認されている。しかしながら、MBE法では原理的に、残存材料による混入は発生しない。このことから、チャンバー内壁に付着している Al が GaInNAs 内へ混入していると考えられる。そこで、混入を極力阻止する為に、真空内面に特殊加工を施した MBE 成長室を導入した。更に、Al の混入を極力抑えるため、クラッド層を従来の AlGaAs から GaInP へ変更した。図 5.3.2(b)に新規チャンバーで成長した GaInNAs 結晶の Al の SIMS 分析結果を示す。GaInNAs 結晶中の Al 混入は検出限界レベル以下であり、真空内面に特殊加工を施した新 MBE 成長室を用いることで、懸案の不純物である Al の濃度を問題がないレベルまで低減することができた。

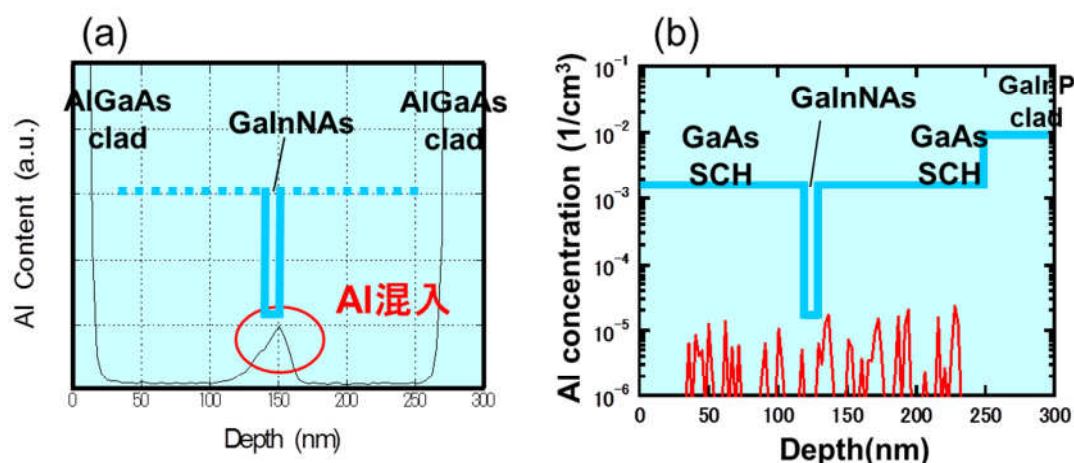


図5.3.1 GaInNAs結晶のAl濃度のSIMS分析結果：(a)Alフリー化前のMBEで成長した結晶、(b)AlフリーMBEを用いた結晶

次に、成長した単一量子井戸結晶をフォトルミネッセンス (Photoluminescence : PL) 法により評価した。PL 測定は顕微フォトルミネッセンス装置を用いて室温で行った。分光器の焦点距離は 32cm であり、分光した光を液体窒素冷却の Ge 検出器を用いてロックイン検出した。励起波長は Ar イオンレーザの 514.5nm と YAG レーザの 1064nm であり、励起強度はレーザの出射端でそれぞれ 50mW と 80mW とした。GaInNAs/GaAs 量子井戸をこれらの波長の光で励起すると、514.5nm 励起では井戸層と障壁層の両方でキャリアが励起されるが、1064nm 励起では井戸層のみで励起される。一般に、井戸層励起では PL 強度が弱くなるが、再結合するキャリアの量が主に井戸層のみに依存するために、井戸層の結晶性に関する定量的な議論ができる。そこで、レーザ構造結晶の PL 測定については、励起波長として 1064nm を採用し、PL 強度の低下を開口数の大きい赤外対物レンズ(NA=0.8)を使った顕微測定で補った。一方、PL 強度が弱いものも含む成長条件の最適化では、励起光のスポットサイズが数 100 μm になるマクロ測定法で PL 測定を行い、励起波長を 514.5nm とした。図 5.3.2 に評価結果を示す。リファレンスとして、Al フリー化前の GaInNAs 結晶と GaInAs の結果を併記した。PL 強度は Al フリー化によって、従来よりも約 10 倍強度が増加し、GaInAs と同等の強度が得ることができた。

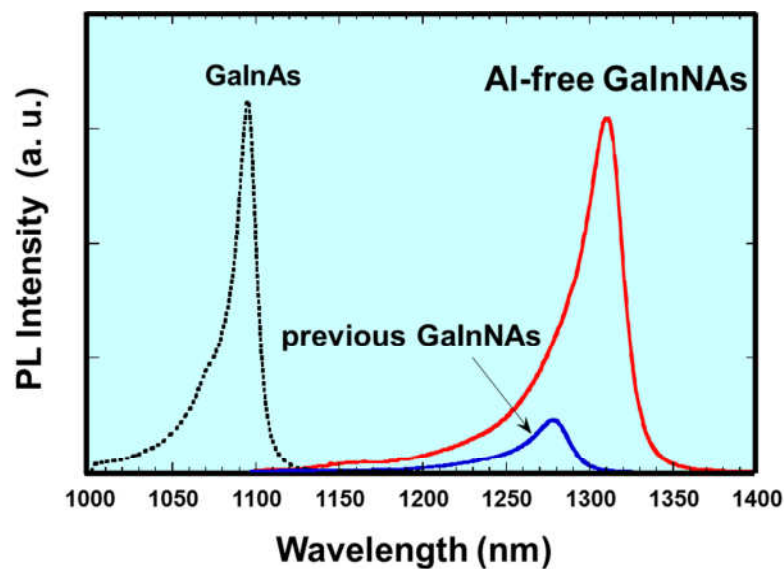


図 5.3.2 各結晶における PL 評価結果

以上の検討から、GaInNAsの結晶劣化の要因として、Alの混入が関係していることを実験的に明らかにし、Alを除去することで結晶高品質化できることを実証した。

しかしながら、この結晶を用いてブロードエリア(BA)レーザを作製し、しきい電流密度を評価したところ、 $700\text{A}/\text{cm}^2$ であり、現在の世界最小値の約3倍の大きさであり、更なる結晶品質の改善が必要であることが分かった。結晶品質が不十分であった理由として、成長温度が最適化されていなかったと考えられる。そこで、次にGaInNAsの成長温度の最適化を検討した。成長温度を変えて作製したいくつかのGaInNAs結晶に対してPLスペクトルを評価し、成長温度とピーク強度の相関を調べた。図5.3.3に結果を示す。この結果、成長温度 440°C 付近でPLピーク強度が最も高く、GaInNAsの最適な成長温度は 440°C であることが明らかになった。

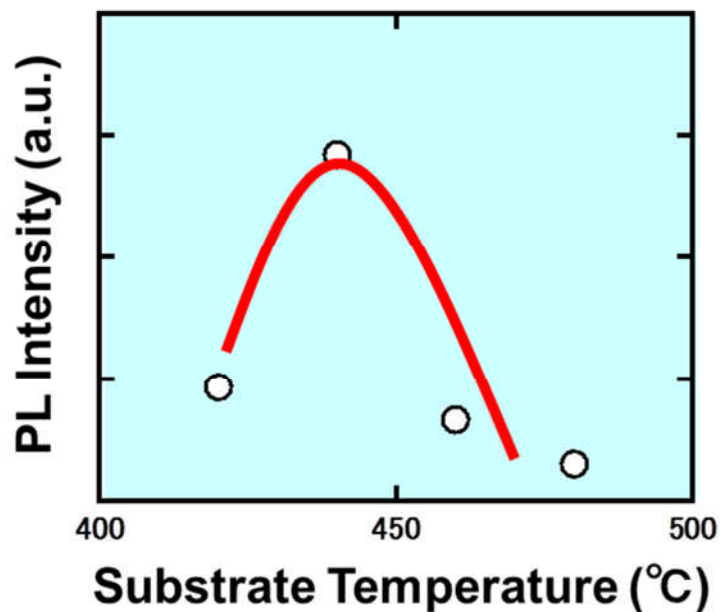


図5.3.3 PLピーク強度の成長温度依存性

5.4 GaInNAs レーザの動作特性

次に、高品質化された GaInNAs 結晶を活性層に用いてレーザを試作し、動作特性を評価した。図 5.4.1 は今回作製した GaInNAs-SQW レーザの構造断面図である。リッジ導波路型のファブリーペローレーザとした。クラッド層は活性層への Al 混入を防止するために GaInP を用いた。前後端面にそれぞれ反射率 70% と 90% の高反射コーティングを施したメサ幅 $2\mu\text{m}$ 、共振器長 $200\mu\text{m}$ の RWG レーザを作製した。また、しきい電流密度を評価するために同一ウェハ内にメサ幅が $80\mu\text{m}$ の BA レーザを作製した。

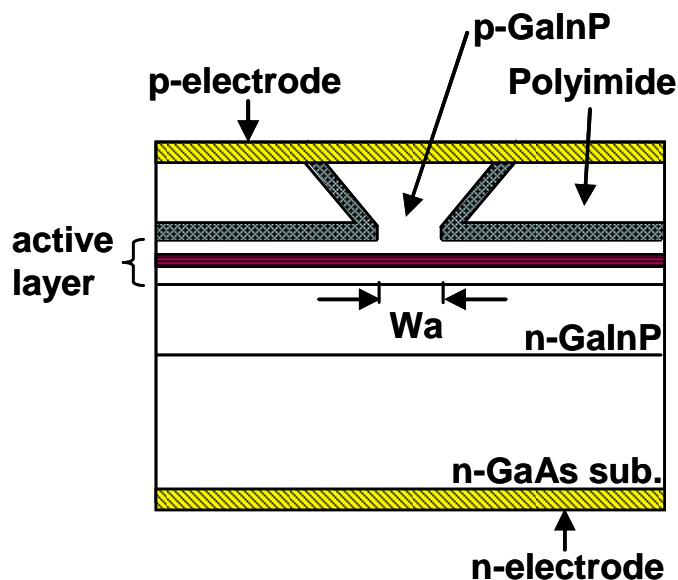


図5.4.1 GaInNAsレーザの断面図

最初に、BA レーザを用いてしきい電流密度を評価した。図 5.4.2 は BA レーザから得られたしきい電流密度と共振器長の逆数の関係である。測定されたしきい電流密度の最小値は共振器長 $1600\mu\text{m}$ の素子にて $280\text{A}/\text{cm}^2$ であった。また、図 5.4.2 のグラフから外挿して得られた共振器長無限大でのしきい電流密度は $200\text{A}/\text{cm}^2$ であった。今回得られたしきい電流密度は現在報告されている MBE 成長 GaInNAs レーザの世界最小の値と同等である[14]。また、図 5.4.2 のグラフの傾きから算出された利得定数は 1900cm^{-1} であった。この値はこれまで報告されている GaInNAs SQW の結果と比較して 10% 程度

大きいものである[15]. これらの良好な特性は Al フリー-MBE の導入により GaInNAs の結晶性が大幅に改善した結果である.

図 5.4.3 は RWG レーザから得られた CW 発振時の電流と光出力の関係である. しきい電流は 25°C で 5.2mA、85°C で 10.2mA であった. これらは報告されている GaInNAs-SQW RWG レーザの中で最小である. また、長波長帯で一般的な InGaAsP や InGaAlAs 系レーザと比較しても低い値を達成した[16]. 25°C から 85°C の範囲での特性温度は 92K であった. この値は SQW においては高い値であり、本レーザの良好な温度安定性が分かる. 図 5.4.4 は RWG レーザの 25°C における CW 動作時の発振スペクトルである. 発振ピーク波長は 1.31 μ m であった. 従って、光通信用ファイバに適合する長波長化を低しきい値にて実現した.

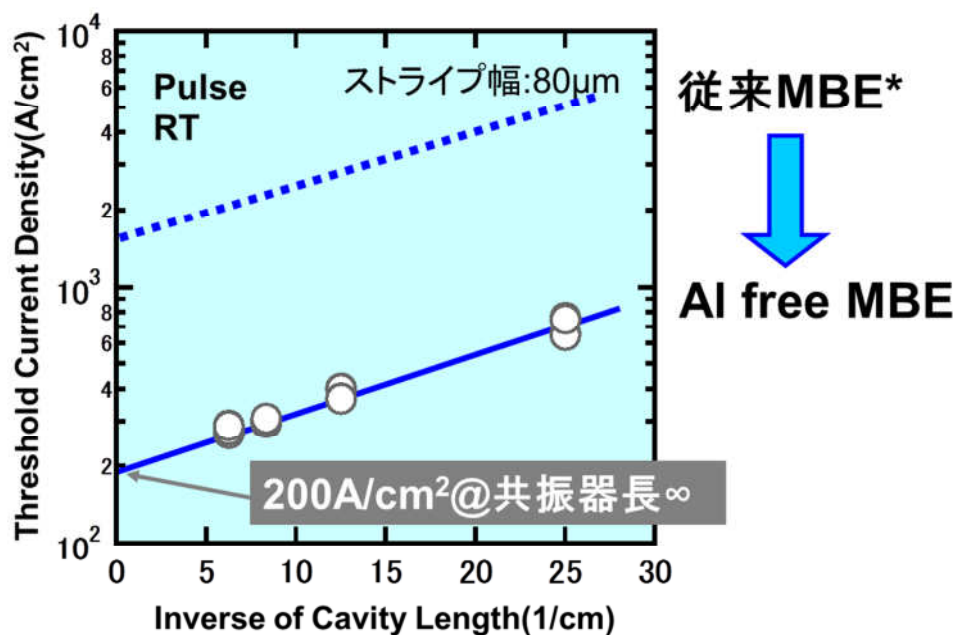


図 5.4.2 しきい電流密度と共振器長の逆数の関係

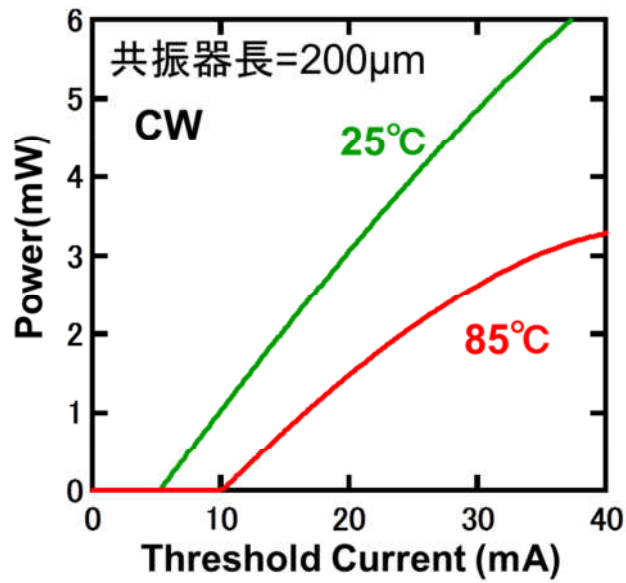


図 5.4.3 GaInAs レーザの電流光出力特性

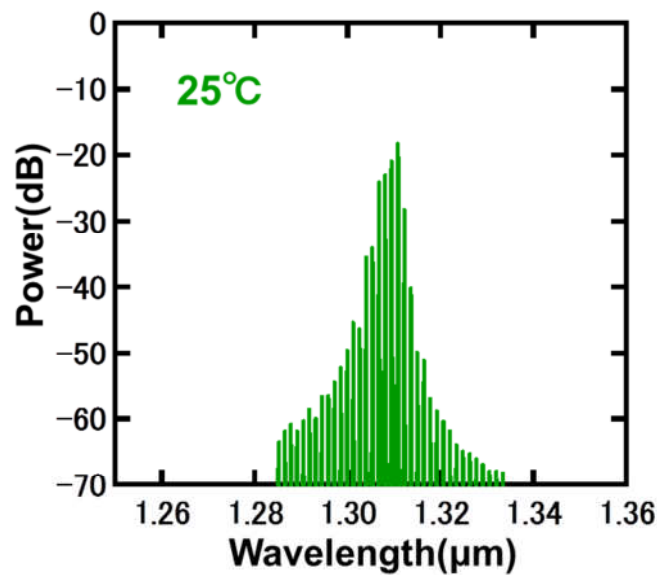


図 5.4.4 発振スペクトル特性

最後に本研究で作製した RWG レーザの高速性について述べる。図 5.4.6 は RWG レーザから得られた 25°Cでの緩和振動周波数と駆動電流の平方根の関係である。緩和振動周波数は 12GHz と高い値を得られた。また、高速動作特性の重要な指標である図 5.4.6 のグラフの傾きは $1.8\text{GHz}/\text{mA}^{1/2}$ であり、本レーザの良好な高速動作性が示された。

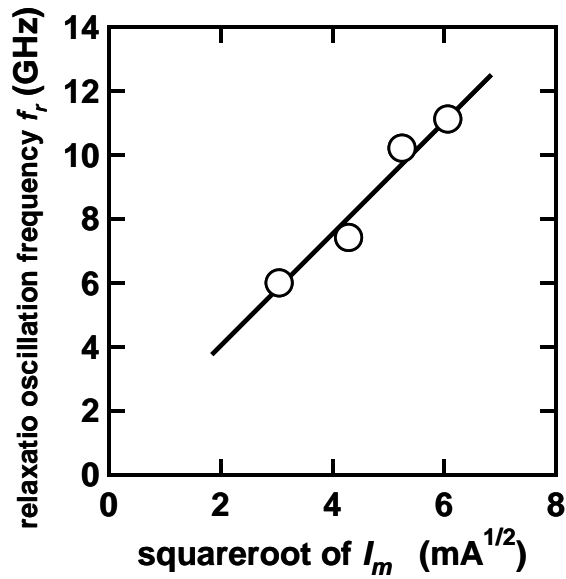


図 5.4.5 緩和振動周波数と駆動電流の関係

5.5 まとめ

高温下での高速特性の更なる改善に向けて、GaInNAs 量子井戸結晶の高品質化に関する研究を行なった。本研究では、GaInNAs 結晶を劣化させる原因の一つと考えられる Al の混入を避けるために、原料として Al を含まない MBE 装置を導入し、高品質化に関する検討を進めた。以下に、この Al フリー-MBE 装置を用いた GaInNAs 量子井戸結晶の高品質化に関する検討の結果をまとめる。まず、レーザ構造結晶に必須であるクラッド材料として GaInP を選定し、その MBE 成長技術を確立した。単一量子井戸結晶の成長温度条件最適化を行ったところ、PL 評価からその結晶性が向上したことが分かった。以上の検討により、ブロードエリアレーザから算出した数居電流密度は世界最小と同等値を実現した。また、この結晶性向上により、実用に十分なレベルのしきい電流の低いレーザ発振を実現した。さらに、高速特性の指標である緩和振動周波数の傾きは実用化されているレーザと同等レベルの値を確認した。以上の検討により、GaInNAs 結晶を実用化レベルまで高品質化できた。

参考文献

- [1] M. Kondow, M. Aoki, S. Nakatsuka, T. Kitatani, and S. Tsuji, "High-Speed Operation of GaInNAs Edge Emitting Lasers," in *proc. ISLC, TuC1*, 2002.
- [2] M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Wtahi, and Y. Yazawa, "GaInNAs: A Novel Material for Long-Wavelength-Range Laser Diodes with Excellent High-Temperature Performance," *Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 35*, pp. 1273-1275, 1996.
- [3] T. Kitatani, K. Nakahara, M. Kondow, K. Uomi, and T. Tanaka, "A 1.3- μm GaInNAs/GaAs Single-Quantum-Well Laser Diode with a High Characteristic Temperature over 200 K," *Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 39, No. 2A*, pp. L86-L87, 2000.
- [4] S. R. Bank, L. L. Goddard, M. A. Wistey, H. B. Yen, and J. S. Harris, "On the Temperature Sensitivity of 1.5- μm GaInNAsSb Lasers," *IEEE J. of Select. Topic Quantum. Electron., Vol. 11, No. 5*, pp. 1089-1098, 2005.
- [5] B. Dagens, A. Nartinez, D. Make, O. L. Gouezigou, J. -G. Provost, V. Sallet, K. Merghem, J. -C. Harmand, A. Ramdane, and B. Thedrez, "Floor Free 10-Gb/s Transmission With Directly Modulated GaInNAs-GaAs 1.35- μm Laser for Metropolitan Applicatoins," *IEEE Photon. Techol. Lett., Vol. 17, No. 5*, pp. 971-973, 2005.
- [6] J. S. Gustavsson, Y. Q. Wei, M. Sadeghi, S. M. Wang, and A. Larson, "10 Gbps Modulation of 1.3 μm GaInNAs Lasers up to 110 $^{\circ}\text{C}$," *proc. of ISLC2006, ThC6*, 2006.
- [7] C. S. Peng, T. Jouhti, P. Laukkanen, E. -M. Pavelescu, J. Kontinen, W. Li, and M. Pessa, "1.32- μm GaInNAs-GaAs Laser With a Low Threshold Current Density," *IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 14, No. 3*, pp. 275-277, 2002.
- [8] S. Sato, Y. Osawa, T. Saitoh, I. Fujimura, "Room-temperature pulsed operation of 1.3 μm GaInNAs/GaAs laser diode," *Electoron. Lett., Vol. 33, No. 16*, pp. 1386-1387, 1997.
- [9] D. Wu, Z. Niu, S. Zhang, H. Ni, Z. He, Z. Sun, Q. han, and R. Wu, "The role of Sb in the molecular beam epitaxy growth of 1.30-1.55 μm wavelength GaInNas/GaAs quantum well with high indium content," *J. Crystal Growth, Vol. 290*, pp. 494-497, 2006.
- [10] E. Gouardes, T. Miyamoto, M. Kawaguchi, K. Kondo, F. Koyama, and K. Iga, "GaInAs-GaInNAs-GaInAs Intermediate Layer Structure for Long Wavelength Lasers," *IEEE Photo. Technol. Lett., Vol. 14, No. 7*, pp. 896-898, 2002.
- [11] T. Takeuchi, Y. L. Chang, D. Mars, A. Tandon, C. K. Lin, R. Twist, S. Belov, D. Bour, M. Tan, D. Rho, Y. -K. Song, L. Mantese, and H. -C. Luan, "MOCVD growth of InGaAsN QW and 1.3 μm VCSELs," *proc. of LEOS2003, MD1*, 2003.
- [12] T. Takeuchi, Y.-L. Chang, M. H. Leaty, A. Tandon, D. P. Bour, M. R. T. Tan, H. -C. Luan, L. Mantese, Y. -K. Song, S. M. Kim, S. Rho, M. R. Keever, ""in *proc. Photonic West 2003*, pp. 25-32,

2003.

- [13] P. Sundgen, C. Asplund, K. Baskar, and M. Hammar, "Morphological instability of GaInNAs quantum well on Al-containing layers grown by metalorganic vapor-phase epitaxy," *Appl Phys. Lett.* Vol. 82, p. 2431, 2003.
- [14] S. M. Wang, Y. Q. Wie, X. D. Wang, Q. X. Zhao, M. Sadeghi, and A. Larsson, "Very low threshold current density 1.3 μ m GaInNAs single-quantum well lasers grown by molecular beam epitaxy," *J. of Crystal Growth*, Vol. 278, pp. 734-738, 2005.
- [15] T. Ishikawa, T. Higashi, T. Uchida, T. Fujii, T. Yamamoto, H. Shoji, and M. Kobayashi, "EVALUATION OF DIFFERENTIAL GAIN 1.3 μ m AlGaInAs/InP STRAINED MQW LASERS," *proc. in IPRM1998, ThP-55*, 1998.

第6章 端面フリー型 LISEL の基礎検討

6.1 はじめに

光モジュールを低コスト化する手段のひとつに、構成部品の製造コスト低減が考えられる。2.2.1で述べたように、DFBレーザの特性は素子端面の反射状態に応じて敏感に変化する。特に素子端面で反射がある場合、端面における回折格子の位相に応じて特性は複雑に変化する。一般に、DFBレーザは劈開によってチップ形状に切り出されるが、劈開の位置精度は数 μm から数10 μm オーダーである。一方、通信波長に対応した回折格子のピッチは通常200~300nmであるため、素子端面における回折格子の位相を特定の位置に制御することはほぼ不可能と言える。従って、レーザ特性を保障するためには、ウェハ工程が終了した後、チップ化（劈開、端面コーティング）した素子を全数評価・選別しなければならない。このため、現行のDFBレーザは、製造の観点で高コストなデバイスである。

加えて、高湿環境下で端面コーティングが剥離劣化する現象が知られており、素子信頼性の劣化要因となっている[1]。このため、一般に光モジュールのサブアセンブリは、 N_2 ガスなどを封入したハーメチック実装が標準的に用いられている。近年、より簡易で低コストなモジュール構成として、封止無しのノンハーメチック実装が提案されている[2、3、4]。しかし、端面コーティングに起因するDFBレーザの信頼性確保が大きな技術課題である。

このようなDFBレーザに対して、MMF用途の光源であるVCSELは、共振器がウェハ面垂直方向に形成される面出射構造であるため、製造工程から特性チェックまで一貫してウェハ状態（オンウェハ）で実施可能である[5]。オンウェハ評価の導入によってチップ選別工程を大幅に簡略化できるため、VCSELは製造コストの低いデバイスである。更に、端面コーティングを使用しないことから、ノンハーメチック実装に対応する光源

としても有望視されている[6、7].

一方、オンウェハ評価可能なDFBレーザとして、45°ミラーとエッチング端面を利用した、水平共振器面出射レーザが報告されている[8]. しかしながら、これらのレーザにおいても端面と端面コーティングを必要とするため、特性歩留りとノンハーメチック実装への適用には課題が残る. これら課題を鑑みると、面出射構造に加えて、端面を使用しない端面フリー構造を実現できれば、製造コストが低く、高湿環境下でも高信頼なDFBレーザが実現できると考えられる.

端面フリー構造実現には、劈開面とHRコーティングによって提供されている反射機能をウェハプロセスで集積し、且つ素子端面が反射に影響を及ぼさない構造が必要となる. ウェハプロセスで反射機能を集積する構造として、DFBレーザの端面にDBRミラーを集積した分布反射型(DR: Distributed Reflector)レーザが知られている[9]. しかし、DRレーザは残留反射成分を除去するために、DBR端にARコーティングを用いており、端面フリー構造になっていない[10].

以上を背景として本章では、端面フリー型LISELを提案する. 前章までで検討したLISELは後端面に劈開面とHRコーティングを使用しているため、オンウェハ評価に未対応である. 一方、端面コーティングは後方のみであるため、両端が端面コーティングである通常のDFBレーザよりも高湿環境での耐性に有利であるものの、実使用上は完全な端面フリー化が望ましい[11]. 更に、端面フリー化により従来は不可能であった2次元アレイ化が可能となる.

そこで、本章では、LISEL後方を端面フリー化する新構造を提案する. 提案構造を用いて従来のLISELと同等のレーザ特性が得られることを実証し、端面フリー型LISELの基礎技術を確立する. また、端面フリー型LISELを用いたオンウェハ評価を実施し、端面フリー型LISELの製造コスト低減に対する有用性を実証する.

最後に将来展望として、400GbEや更にその先の大容量化を視野に入れた、端面フリー型LISELの25Gbps超への高速化について述べる.

6.2 端面フリー型 LISEL の素子構造

LISELの出射側は、窓構造を利用した45°ミラーによって面出射化されているため、端面フリー構造となっている。そこで、劈開端面とHRコーティングで提供されている後方端面の機能をウェハプロセスで集積する新たな共振器構造を提案する。

図6.2.1に端面フリー型LISELの概念図を示す。DFBレーザの後方に高反射機能を有するDBRミラーと吸収体を隣接して集積し、デバイス端を窓構造で終端している。DBRミラーから漏出したレーザ光は吸収体により吸収される。更に、窓構造では、レーザ光は放射モードとなるため、素子内外からの反射光は導波路に結合しない。或いは、吸収体により吸収される。このため、吸収体と窓構造は、実効的にDRレーザにおいてDBR端に付されていたARコーティングの機能を提供する。更に吸収体をモニタ用のフォトダイオード (PD : photodiode) として利用することも可能である。以上の構造は全てウェハプロセスで形成可能なため、ウェハ状態でレーザ発振が可能である。従って、オンウェハ評価が可能となり製造コスト低減が期待できる。また、素子の終端は窓構造であるため特にコーティングは必要無い。このため、高温環境下でも良好な信頼性が期待できる。

素子が窓構造で終端されているため、チップ化工程において精密な劈開は不要であり、ダイシングやスクライブ等のラフな切断加工でよい。

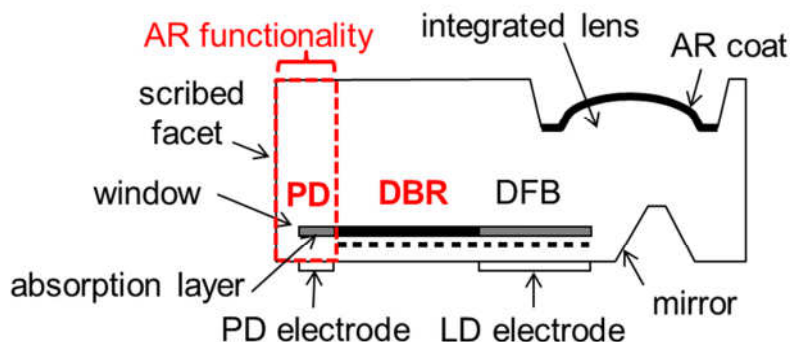


図6.2.1 端面フリー型LISELの概念図

このことはチップの厚さ制限を除去することと同義である。3.2で示したように、出射ビームの焦点距離はレンズのROCの他に、活性層端からレンズ表面までの距離 d_1 によって決定され、 d_1 はほぼ素子厚に等しい。更に、 d_1 が長いほど焦点距離は長くできる。従って、端面フリー構造の導入によって、焦点距離の設計自由度を拡大できる副次的な効果がある。

6.2 端面フリー型 LISEL の共振器設計

本節では、提案した端面フリー構造（以下、端面フリー構造と記載）において単一モード発振を得るための共振器設計を示す。端面フリー構造の共振器部分は、後方にDBRを集積し、両端面にARコーティングを施したDRレーザと同一である。このため、図6.2.1に示すDRレーザのモデルを用いて共振器の設計が可能である。

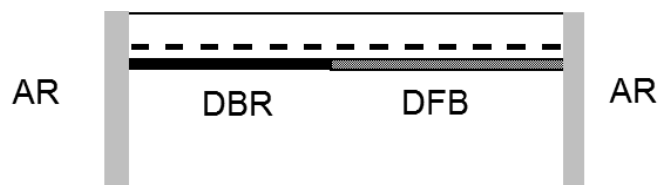


図6.2.1 DRレーザ構造図

DRレーザでは、DBRミラーの波長依存性を考慮した共振器設計が必要である。図6.2.2は $\kappa=80\text{cm}^{-1}$ であるときのDBRミラー反射スペクトルの計算結果を示す。横軸は、DBRのBragg波長からのズレであり、DBR長が異なる4種類の結果を併記している。DBR長が長いほど、DBRミラー内での反射回数が増加するため、ピーク反射率は高くなるが、波長選択性が顕著になるため反射帯域は減少する。図6.2.3は、ピーク反射率の計算結果である。同一DBR長では、 κ が大きいほどピーク反射率は高くなる。従って、 κ とDBR長によって反射スペクトル形状が制御可能であると分かる。更に、反射スペクトルの波長範囲はBragg波長の制御により任意の値に設定できる（図6.2.2のグラフを横方向にシフトするイメージである）。

従って、DBRミラーとDFBレーザの波長関係を適切に選択することで高い歩留りで単一モード発振が得られると考えられる。図6.2.4は、本研究で用いるDBRミラーとDFBレーザの波長関係の概念図である。2.2で述べたように、均一回折格子のDFBレーザは2モードで発振する。そこで、この2つのモードのうち片方のみ（図では長波長側）をDBRミラーの反射帯域内に配置することで、単一モード発振が得られると考えられる。

図6.2.5は、DFBレーザが均一回折格子を有するDRレーザにおいて、結合波理論によって計算した規格化しきい利得である。グラフの横軸はDBRミラーとDFBのBragg波長差 $\Delta\lambda_B$ (=DBRブラッグ波長-DFBブラッグ波長) としている。DBR長、DFB長はそれぞれ、250 μm 、150 μm 、 κ は150 cm^{-1} を用いている。本設計において、DFBレーザの長波長モードがDBRスペクトルのほぼ中央に位置する場合の $\Delta\lambda_B$ は2nmである。この時、規格化しきい利得は従来のDFB型LISELとほぼ同じ値となっている。

以上の結果より、DRレーザ（端面フリー構造の共振器）において、単一モード発振を維持しつつ、従来のLISELと同等の発振特性が得られる見通しを得た。

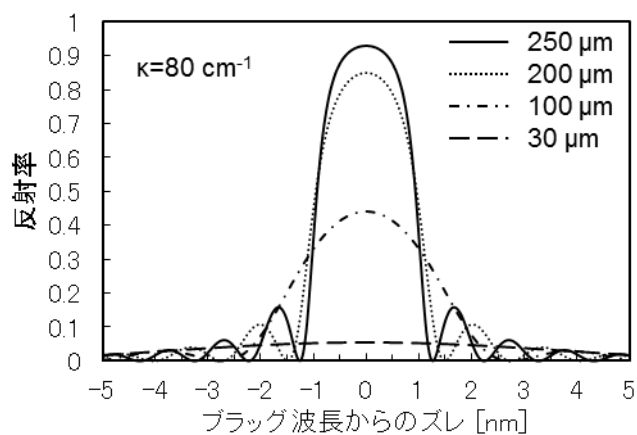


図6.2.2 DBRミラーの反射スペクトル計算結果

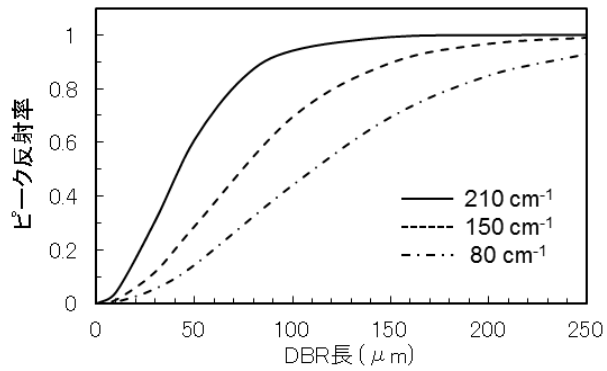


図6.2.3 DBRミラーのピーク反射率

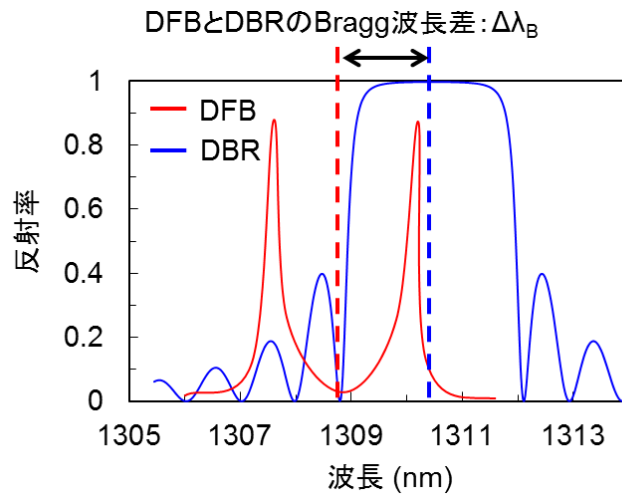


図6.2.4 DRレーザのDBRミラーとDFBレーザのスペクトル関係概念図

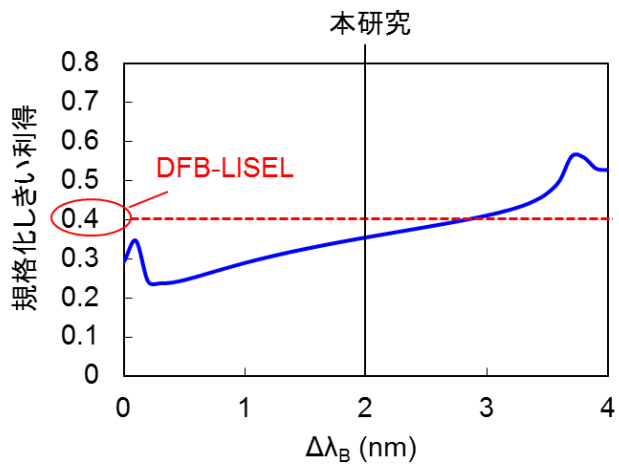


図6.2.5 DRレーザの規格化しきい利得計算値

6.3 端面フリー型 LISEL 実現に向けた基礎検討

本節では、端面フリー型LISELの実現に向け、前節で提案した端面フリー構造の機能検証を行う。図6.3.1に試作したデバイス構造を示す。ここでは、後端面が提案した吸収体(モニタPD)と窓構造から形成される、後端面フリー型DRレーザ（以下デバイス(a)）と、通常のAR/AR型のDRレーザ(以下デバイス(b))を試作し、これらを比較することで端面フリー構造の原理検証する。

レーザ構造は、前節の結果に基づいている。DBR長、DFB長、 κ 、 $\Delta\lambda_B$ は2つのデバイスで共通の値であり、それぞれ、 $250\mu\text{m}$ 、 $250\mu\text{m}$ 、 150cm^{-1} 、 2nm としている。また、デバイス(a)のモニタPDに用いる吸収体には、活性層と同一の多重量子井戸を用い、長さは $50\mu\text{m}$ である。レーザの横構造は前章までのLISELと同じリッジ導波路型である。

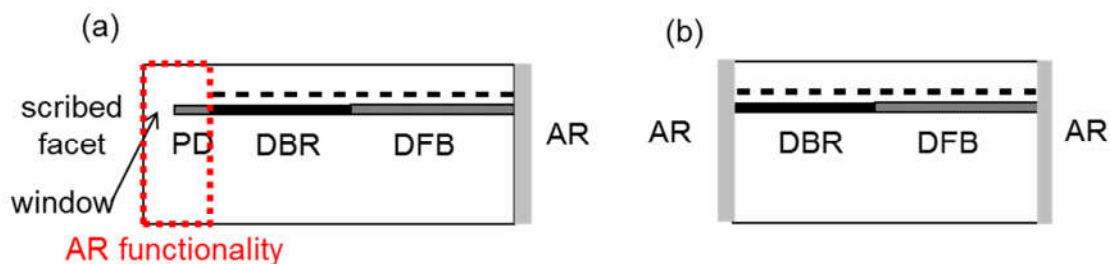


図6.3.1 (a)後端面フリー構造のDRレーザ、(b)従来型DRレーザ

図6.3.2は、試作したデバイスの電流光出力特性である。デバイス(a)とデバイス(b)で、光出力、電圧カーブほぼ重なっており、同等の特性が得られていることが分かる。この結果は、提案した吸収体と窓構造から成る後端面構造がARコーティングと同等の機能を提供していることを意味する。図6.3.3は、デバイス(a)の発振スペクトルである。図より、DFBの片方のモードのみが発振し、単一モード発振が得られていることが分かる。従って、提案した波長設計において、安定な単一モード発振が得られることを実証できた。

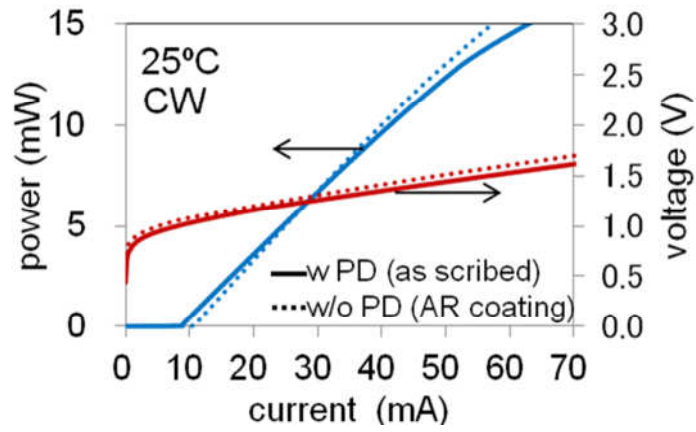


図6.3.2 要素検討デバイスの電流光出力特性

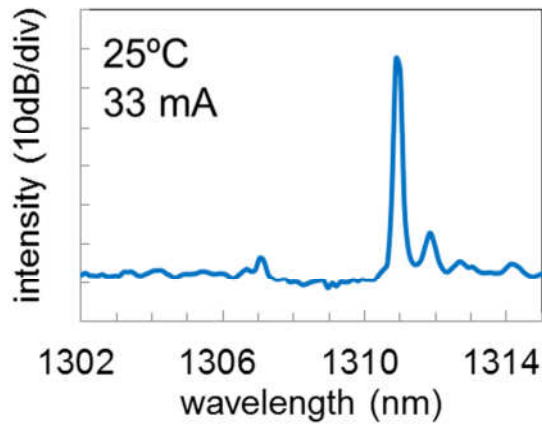


図6.3.3 要素検討デバイスの発振スペクトル

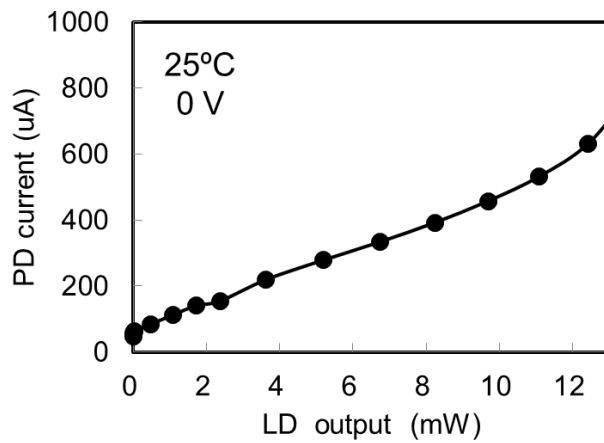


図6.3.4 モニタPDの電流測定結果

図6.3.4はデバイス(a)のモニタPDの電流測定値である。PDの電流値は、光出力に比例していることから、集積した吸収体がモニタPDとして機能することを実証できた。従って、提案した端面フリー構造では、モニタPDも素子に集積可能であり、より高密度な実装が可能である。

以上の検討によって、提案した端面フリー構造において、従来LISELと同等の光出力特性と、安定な単一モード発振が得られることを実証した。最後に、LISELの面出射構造を利用したオンウェハ評価の検討結果を示す。図6.3.5は検討に用いたデバイスの構造と写真である。検討を単純化するため、レンズは集積せず、DFB後方には隣接デバイス間に渡って長さ500 μm の長DBRミラーを集積した。その他の基本的なレーザ構造はデバイス(a)、(b)と同じである。図6.3.6(a)はオンウェハ評価の実験セットアップを示す。ウェハ状態のデバイスをガラス基板上に配置し、ガラス基板下にPDを配置した。図6.3.6(b)はパルス電流による電流-光出力特性の測定結果である。ウェハ内の5素子を測定し、いずれの素子においても光出力特性が取得できている。この結果から、提案した端面フリー構造によって、オンウェハ評価も可能であることを実証した。

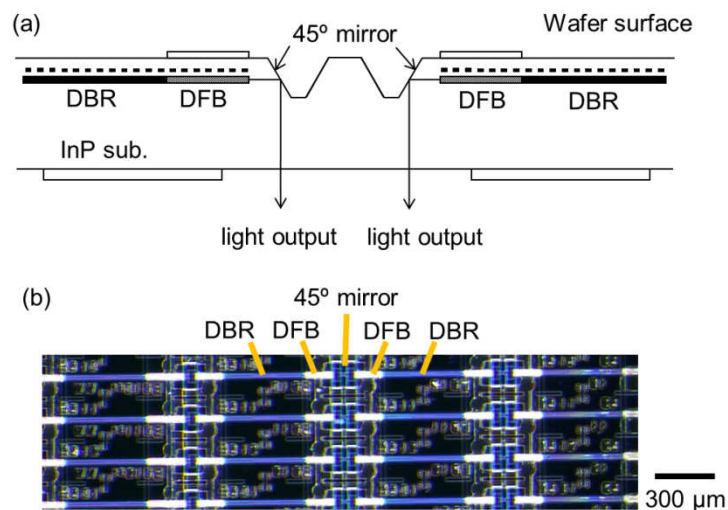


図6.3.5 オンウェハ評価用デバイス(a)断面構造、(b)試作した素子のウェハ写真

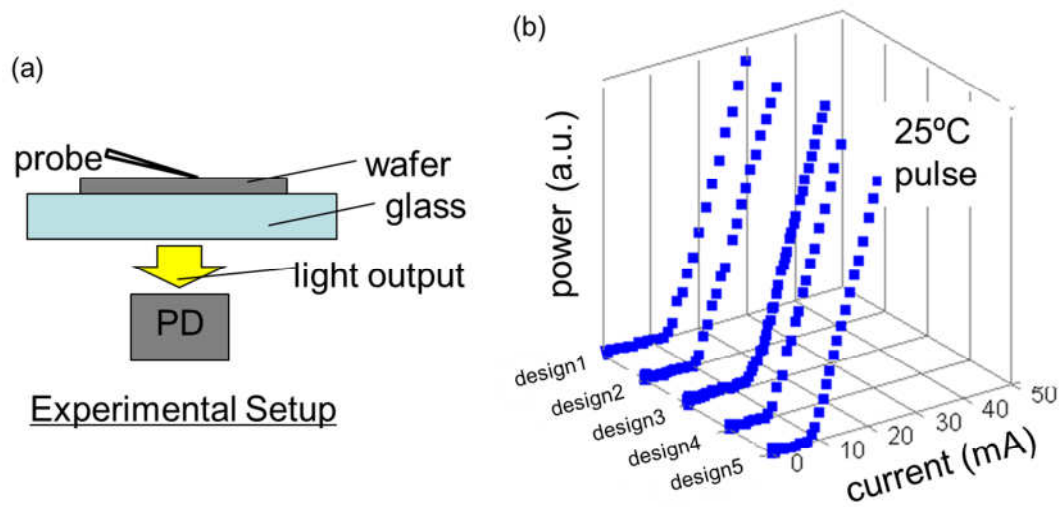


図6.3.6 (a)オンウェハ評価実験セットアップ、(b)オンウェハ評価による電流光出力特性の評価結果

6.4 今後の展望

6.1節から6.3節では、端面フリー型LISELの構造を提案し、直流電流印加時の光出力特性や、オンウェハでの光出力評価などの基礎特性を実証した。本節では、将来展望として、端面フリー型LISELの高速化について述べる。

1章で述べたように、現在の光通信では主として100GbEに準拠した光モジュールが用いられており、これはチャンネル当りの速度が25Gbpsでこれを4チャンネル用いて100Gbpsを伝送する。これに対して次世代の400GbEでは、大きく2つの構成が規定されている。一つは50Gbpsを8チャンネル用いる構成であり、他方は100Gbpsを4チャンネル用いる構成である[12]。また、400GbEの信号フォーマットには4値の振幅多値信号であるPAM4(4-level Pulse Amplitude Modulation)が使用される。PAM4は信号振幅を4つのレベルに分け、これらに00、01、10、11を割り当てることで1シンボルあたりの情報量を2ビットに増やしている。即ち、変調速度の2倍の情報量を伝送できる。例えば、25GbaudのPAM4では、50Gbpsの情報量を伝送可能である。従って、上記の50Gbpsを8チャンネル用いる構成では、25GbaudのPAM4を8チャンネル用いる。この時、光源である半導体

レーザに求められる変調速度は100GbEと同じ25Gbpsである。一方、100Gbpsを4チャンネル用いる構成では、50GbaudのPAM4を4チャンネル用いるため、半導体レーザには50Gbpsの変調速度が求められる。このように、光モジュールの大容量化に伴い、光源となる半導体レーザにもより高速な動作が要求されるようになる。

2章で述べたように、半導体レーザの高速化には周波数帯域の増大が必要であり、本研究では150 μm の短共振器を採用することでLISELの25Gbps動作を実証した。更なる高速化の有効手段の一つとして、150 μm より更に共振器を短縮することが考えられる。しかしながら、6.1で述べたように従来のLISELでは劈開により端面を作製するため、短共振器化に限界がある。即ち、共振器が短くなると、素子の長さと同程度になり、劈開が極端に困難になる。これに対して、本章で採用したDRレーザ型の端面フリー構造では、共振器の長さを劈開の制限無く自由に決定できるため、極短共振器化による高速化が期待できる[13, 14]。今後は、端面フリー型LISELにより150 μm から更に短共振器化することで50Gbps以上の高速動作を実現し、将来の大容量光モジュールへの適用をめざす。

6.5 まとめ

本章では、素子の製造コスト低減に寄与できる端面フリー型のLISELを提案した。完全端面フリー型LISELを実現するため、LISELの後端面にDBRミラー、吸収体(PD)、窓構造を集積した新構造を提案し、この機能を検証するための要素デバイスを試作した。提案構造を後端面に有する提案構造と、通常AR/AR型のDRレーザが同一のレーザ特性を示すことを実験的に確認した。また、LISELの面出射構造を利用したオンウェハ評価の基礎検討を実施し、ウェハ状態において光出力特性が正常に取得できることを実証した。以上の検討により、端面フリー型LISEL実現に向けた基礎技術を確立した。

参考文献

- [1] N. Chand, J. W. Osenbach, T. L. Evansky, R. B. Comizzoli, and W. T. Tsang, "High-Reliability 1.3- μm InP-Based Uncooled Lasers in Nonhermetic Packages," *J. Quantum Electron.*, Vol. 32, No. 9, pp. 1606-1614, 1996.
- [2] S. Madduri, B. G. Sammakia, B. Infantolino, and S. Chaparala, "A REVIEW OF NON-HERMETIC OPTOELECTRONIC PACKAGING," in *proc. ECTC*, pp. 913-919, 2008.
- [3] C. -P. Chao, D. Z. Garbuzov, G. -J. Shiao, S. R. Forrest, L. A. DiMarco, and M. G. Harvey, "Low-Threshold, High-Power, 1.3- μm Wavelength, InGaAsP-InP Etched-Facet Folded-Cavity Surface-Emitting Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 7, No. 8, pp. 836-838, 1995.
- [4] S. Liu, Z. Gan, X. Chen, J. Zhao, and H. Bin, "Non-Hermetic Opto-Electronic Packaging Based On Micro-Machined Silicon Bench Platform," in *proc. ICEPT*, pp. 176-180, 2003.
- [5] J. L. Jewell, J. P. Harbison, A. Scherer, Y. H. Lee, and L. T. Florez, "Vertical-cavity surface-emitting lasers: Design, growth, fabrication, characterization," *J. Quantum Electron*, Vol. 27, No. 6, pp. 1332-1346, 1991.
- [6] S. Xie, R. W. Herrick, D. Chamberlin, S. J. Rosner, S. McHugo, G. Girolami, M. Mayonte, S. Kim, and W. Widjaja, "Failure Mode Analysis of Oxide VCSELs in High Humidity and High Temperature," *J. Lightwave Technol.* Vol. 21, No. 4, pp. 1013-1019, 2003.
- [7] W. S. Ring, T. Thambinayagam, W. Hobson, H. Meehan, P. Silbermann, and M. Liang, "Reliability Concerns and Packaging Issues of Non-Hermetic VCSEL and LED Based Transceivers for the Enterprise Market," in *proc. ECTC*, pp. 186-191, 2004.
- [8] M. Green, A. Behfar, A. Morrow, A. Schremer, and C. Stagarescu, "Horizontal Cavity Vertically, Emitting Lasers with Integrated Monitor Photodiodes," in *proc. APOC*, Vol. 6352, No. 63520U-3, 2006.
- [9] S. Pellegrino, K. Komori, H. Suzuki, K. S. Lee, S. Arai, Y. Suematsu, M. Aoki, "Novel Single-longitudinal-mode 1.5 μm GaInAsP/InP Distributed reflector (DR) Laser," *Electron. Lett.*, Vol. 24, No. 7, pp. 435-436, 1998.
- [10] T. Shimoyama, M. Matsuda, S. Okumura, A. Uetake, M. Ekawa, and T. Yamamoto, "40-Gbps Transmission Using Direct Modulation of 1.3- μm AlGaInAs MQW Distributed-Reflector Lasers up to 70 $^{\circ}\text{C}$," *proc. of OFC2011, OWD3*, 2011.
- [11] T. Suzuki, K. Adachi, A. Takei, K. R. Tamura, A. Nakanishi, K. Naoe, T. Ohtoshi, K. Nakahara, S. Tanaka, K. Uomi, "Cost-effective Optical Sub-Assembly Using Lens-Integrated Surface-Emitting Laser," *J. of Lightwave. Technol.*, Vol. 34, No. 2, pp358-364, 2016.
- [12] <http://www.ieee802.org/3/bs/>.
- [13] Y. Matsui, T. Pham, W. A. Ling, R. Schatz, G. Carey, H. Daghighian, T. Sudo, and C. Roxlo,

“55-GHz Bandwidth Short-Cavity Distributed Reflector Laser and its Application to 112-Gb/s PAM-4,” in proc OFC2016, Th5B.4, 2016.

第7章 結論

7.1 はじめに

次世代の多チャンネル大容量光モジュールの低コスト化に実現に向けて、SMF と直接光結合が可能であり、1.3 μm 波長帯で発振し、高密度(2次元)アレイ構造が可能であり、高温下において 25Gbps 以上で動作可能な新構造面出射半導体レーザを開発した。以下に本研究の主要な成果をまとめる。

7.2 レンズ集積型面出射半導体レーザ (LISEL) の作製技術

本章では、多チャンネル大容量光モジュールを低コストに実現する光源として、レンズ集積型面出射レーザ LISEL を作製する基礎技術を確立した。

1. 窓構造と結晶方位を利用した 45°ミラー作製技術を提案し、45° \pm 0.3°の高精度且つ再現性の良いミラー作製技術を実現した。
2. ドライエッチングとウェットエッチングを組み合わせたレンズ形成手法において、エッチング中のレンズ形状の変化を机上検討により予測し、これを実験的に確認することで、形状変化の小さいエッチング領域を見出した。これにより、安定かつ歩留りの良いレンズ形成技術を確立した。
3. 1、2に基づいて、LISEL を試作し、従来の DFB と同等のレーザ発振特性を確認した。
4. レンズ集積により、水平方向、垂直方向それぞれ 2.5°、1.9°の狭出射ビームを実現した。

7.3 レンズ集積型面出射半導体レーザ (LISEL) と SMF の光結合技術

本章では、SMF と高効率で結合可能なレンズを設計し、試作した LISEL と SMF の光結合実験を行い、LISEL の光結合における優位性を実証した。

1. LISEL と SMF の直接光結合実験の結果から、集光型の出射ビームの LISEL が実現できることを確認した。
2. レンズ曲率半径 ROC が $70\mu\text{m}$ の集光型高曲率レンズを試作し、SMF との直接結合にて、結合効率-3.8dB を得た。
3. 以上の結果から、LISEL が低コストに光結合可能なデバイスとして有用であることを実証した。

7.4 レンズ集積型面出射半導体レーザ (LISEL) の高速化技術

本章では、25Gbps 動作に向けた LISEL の高速化検討を実施した。短共振器構造の採用と低インダクタンスなフリップチップ型実装構造を開発し、LISEL の 25Gbps 動作を実証した。

1. 85°C での高光出力発振 ($\geq 10\text{mW}$) 及び、 25°C から 85°C の広い温度範囲で副モード抑圧比 $\geq 40\text{dB}$ の安定な縦単一モード発振を確認した。
2. 25°C での $f_{3\text{dB}}$ は 14.5GHz であり、この時バイアス電流は 30mA であった。 85°C において同じ $f_{3\text{dB}}$ を得るために必要なバイアス電流は 40mA であり、高 κ 回折格子の効果を反映し、高温下においも低バイアスで良好な $f_{3\text{dB}}$ を得た。
3. $f_{3\text{dB}}$ より見積もった緩和振動周波数の電流効率 η_{fr} は 25°C で $3.6 \text{ GHz}/\text{mA}^{1/2}$ 、 85°C で

3.2GHz/mA^{1/2} の良好な結果を得た.

4. 25°C~100°Cで 25Gb/s アイ開口を確認した.

7.5 高温高速特性改善にむけた新活性層材料 GaInNAs の検討

本章では、高温下での高速特性の更なる改善に向けて、GaInNAs 量子井戸結晶の高品質化に関する研究を行なった. 本研究では、GaInNAs 結晶を劣化させる原因の一つと考えられる Al の混入を避けるために、結晶の Al フリー化を検討した. 更に、成長温度を最適化することで、更なる結晶性の改善を図った.

1. 結晶中への Al 混入を防止することで、PL 強度を従来の 10 倍に改善した.
2. 結晶成長温度の最適化検討を実施し、本研究で用いた MBE 装置における GaInNAs の最適な成長温度は 440°C であることが明らかにした.
3. 高品質化した GaInNAs 結晶を用いてブロードエリアレーザを作製した結果、世界最小と同等のしきい電流密度 200A/cm² を得た.
4. 高品質化した GaInNAs 結晶を用いて共振器長 200μm のリッジ導波路型レーザを作製した結果、しきい電流値は、25°C で 5.2mA、85°C で 10.2mA であり、実用に十分な低しきい電流を得た. また、発振波長 1.3μm を実現した.

7.6 端面フリー型 LISEL の基礎検討

本章では、素子の製造コスト低減に寄与できる端面フリー型の LISEL を提案した. 完全端面フリー型 LISEL を実現するため、LISEL の後端面に DBR ミラー、吸収体(PD)、窓構造を集積した新構造を提案し、この機能を検証するための要素デバイスを試作した.

1. DBR ミラー、吸収体、窓構造を集積した新しい端面フリー構造を提案した.
2. 構造を集積した DR レーザを試作し、従来の AR 端面を用いる DR レーザと同等の光出力特性を確認した.
3. 集積した吸収体がモニタ PD として機能することを実証した.
4. LISEL の面出射構造を利用した、オンウェハ評価可能な素子の予備検討を実施し、ウェハ状態で正常にレーザ特性を取得できることを実証した.
5. 以上の端面フリー構造では、劈開に起因する短共振器化の限界を打破できる. 今後の展望として、 $150\mu\text{m}$ よりも短い極短共振器による 50Gbps 超動作をめざす.

以上から次世代の大容量多チャンネル光モジュールを低コストに実現する、新型光源である、レンズ集積型面出射半導体レーザの基礎技術を確立した. 本研究成果により将来の低コスト光モジュール実現に向けた技術の一端を前進させたと考えられる.

本研究に関する発表

論文

1. K. Adachi, A. Takei, T. Suzuki, S. Tanaka, A. Nakanishi, and K. Naoe, "Large-Tolerant Direct Coupling to an SMF Array With a Lens-Integrated Surface-Emitting Laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 9, pp. 939-942, May 2015.
2. K. Adachi, K. Shinoda, T. Kitatani, T. Fukamachi, Y. Matsuoka, T. Sugawarw, and S. Tsuji, "25-Gb/s Multichannel 1.3- μ m Surface-Emitting Lens-Integrated DFB Laser Arrays," *IEEE J. Lightwave Technol.*, vol. 29, no. 19, pp. 2899-2905, Nov. 2011.
3. K. Adachi, K. Nakahara, J. Kasai, T. Kitatani, T. Tsuchiya, M. Aoki, and M. Kondow, "Low-threshold GaInNAs Single-quantum Lasers with Emission Wavelength over 1.3 μ m," *Electron. Lett.*, vol. 42, no. 23, pp. 1354-1355, Nov. 2006.
4. K. Adachi, T. Suzuki, A. Takei, K. Nakahara, S. Tanaka, A. Nakanishi, and K. Naoe, "Monolithically integrated 4ch \times 25.8 Gbps lens-integrated surface-emitting DFB laser array directly coupled to SMF," *IEICE Electron. Express*, vol. 13, No. 12, 2016.
5. K. Adachi, T. Suzuki, K. Nakahara, S. Tanaka, A. Nakanishi, and K. Naoe, "A facet-free 1.3- μ m Surface-emitting DFB Laser for a low-cost optical module," *IEICE Electron. Express*, vol. 13, No. 21, 2016.

国際会議

1. K. Adachi, T. Suzuki, T. Ohtosh, K. Nakahara, M. Sagawa, A. Nakanishi, K. Naoe, and S. Tanaka, "Facet-free Surface-emitting 1.3- μ m DFB laser," *ECOC2015, We 1.5.4*, Sep. 2015.
2. K. Adachi, Y. Matsuoka, T. Takemoto, T. Suzuki, S. Tanaka, A. Nakanishi, and K. Naoe, "Wide-temperature-range 103.2 (25.8 \times 4)-Gb/s optical link for data-center Interconnects using a 1.3- μ m lens-integrated surface-emitting laser array," *OFC2015, W2A. 54*, Mar. 2015.
3. K. Adachi, A. Takei, T. Suzuki, S. Tanaka, A. Nakanishi, and K. Naoe, "High-efficiency Optical

- Coupling to SMF Array and High-temperature 25-Gb/s Operation of Lens-Integrated Surface-Emitting Laser toward PSM4 Optical Module,” ECOC2014, Tu 1.1.2, Sep. 2014.
4. K. Adachi, A. Takei, T. Suzuki, and S. Tanaka, “Direct Optical Coupling to a SMF Array with a Multi-channel Lens-integrated Surface-emitting DFB Laser for a Low-cost Optical Module,” MOC2013, B-3, Sep. 2013.
 5. K. Adachi, K. Shinoda, T. Kitatani, D. Kawamura, T. Sugawara, and S. Tsuji, “40-Gb/s/ch Operation of 1.3- μ m Four-Wavelength Lens-Integrated Surface-Emitting DFB Laser Array,” ISLC2012, TuB5, Sep. 2012.
 6. K. Adachi, K. Shinoda, T. Kitatani, D. Kawamura, T. Sugawara, and S. Tsuji, “Uncooled 25-Gb/s Operation of a Four-wavelength 1.3- μ m Surface-emitting DFB Laser Array,” IPC2011, TuD3, Oct. 2011.
 7. K. Adachi, K. Shinoda, T. Kitatani, Y. Matsuoka, T. Sugawara, and S. Tsuji, “Lens-integrated surface-emitting DFB laser arrays for short-reach optical links,” SSDM2011, I-1-1, 2011. (Invited)
 8. K. Adachi, K. Shinoda, T. Kitatani, Y. Matsuoka, T. Sugawara, and S. Tsuji, “25-Gb/s Multi-channel 1.3- μ m Surface-emitting Laser” IPRM2011, We-7.2.1, May 2011. (Invited)
 9. K. Adachi, K. Shinoda, D. Kawamura, T. Kitatani, Y. Matsuoka, T. Sugawara, and S. Tsuji, “Multiple-Wavelength 25-Gb/s Surface-Emitting Laser Array for Short-Reach WDM Links,” CLEO2011, CFD6, May 2011.
 10. K. Adachi, K. Shinoda, T. Fukamachi, T. Shiota, T. Kitatani, Y. Matsuoka, D. Kawamura, T. Sugawara, and S. Tsuji, “25-Gb/s Multi-channel 1.3- μ m Surface-emitting Laser for Massive Data Links,” ECOC2010, Th.9.D.2, Sep. 2010.
 11. K. Adachi, K. Shinoda, T. Kitatani, Y. Matsuoka, T. Sugawara, and S. Tsuji, “Uncooled 25-Gb/s 2-km Transmission of a 1.3- μ m Surface-emitting Laser,” ISLC2010, TuC5, Sep. 2010.
 12. K. Adachi, K. Shinoda, T. Shiota, T. Fukamachi, T. Kitatani, Y. Matsuoka, D. Kawamura, T. Sugawara, and S. Tsuji, “100- $^{\circ}$ C, 25 Gbit/s Direct Modulation of 1.3- μ m Surface Emitting Laser,” CLEO2010, CME4, May 2010.
 13. K. Adachi, K. Shinoda, T. Fukamachi, T. Shiota, T. Kitatani, K. Hosomi, Y. Matsuoka, T. Sugawara, and M. Aoki, “A 1.3- μ m Lens-Integrated Horizontal-Cavity Surface-Emitting Laser with Direct and Highly Efficient Coupling to Optical Fibers,” OFC/NFOEC2009, JThA31, Mar. 2009.

国内学会

1. 足立 光一郎、武居 亜紀、鈴木 崇功、田中 滋久、佐々木 博康、桑野 英之、直江 和彦、中西 慧. 光トランシーバの低コスト化に向けたレンズ集積面出射レーザとシングルモードファイバの光結合技術、電子情報通信学会 LQE 研究会、LQE-2014-4、Mar. 2014.
2. 足立 光一郎、篠田 和典、北谷 健、川村 大地、菅原 俊樹、辻 伸二. 1.3 μm 帯面出射DFBレーザの高温28Gbit/s動作、電子情報通信学会2012年総合大会、C-4-2、Mar. 2012.
3. 足立 光一郎、篠田 和典、北谷 健、川村 大地、菅原 俊樹、辻 伸二. 1.3 μm 帯4波長面出射DFBレーザアレイの高温25Gbit/s動作、電子情報通信学会2011年ソサイエティ大会、C-4-19、Sep. 2011.
4. 足立 光一郎、篠田 和典、北谷 健、松岡康信、菅原 俊樹、辻 伸二. 1.3 μm 帯レンズ集積型面出射レーザの高温度範囲25Gbps直接変調動作、電子情報通信学会2011年ソサイエティ大会、C-4-1、Aug. 2010. (招待講演)
5. 足立 光一郎、篠田 和典、塩田 貴支、深町 俊彦、辻 伸二、北谷 健、松岡 康信、菅原 俊樹、青木 雅博. 1.3 μm 帯レンズ集積面出射レーザによる光ファイバへの高効率直接光結合、電子情報通信学会2009年ソサイエティ大会、C-4-11、Sep. 2009.
6. 足立 光一郎、中原 宏治、葛西 淳一、北谷 健、土屋 朋信、青木 雅博. 1.3 μm 帯直接変調GaInNAs 三重量子井戸半導体レーザ、第54回応用物理学会春季学術講演会、28p-SG-8、Mar. 2008.
7. 足立 光一郎、中原 宏治、葛西 淳一、北谷 健、土屋 朋信、青木 雅博. 1.3 μm 低しきい値高速動作GaInNAs 三重量子井戸半導体レーザ、第67回応用物理学会秋季学術講演会、30a-TZ-15、Aug. 2006.
8. 足立 光一郎、中原 宏治、葛西 淳一、北谷 健、土屋 朋信、青木 雅博、近藤 正彦. AlフリーMBE成長による1.3 μm 帯GaInNAs単一量子井戸レーザのしきい電流低減、電子情報通信学会 LQE 研究会、LQE2006-21、Jun. 2006.
9. 足立 光一郎、中原 宏治、葛西 淳一、北谷 健、土屋 朋信、青木 雅博、近藤 正彦. 1.3 μm 極低しきい値GaInNAs単一量子井戸半導体レーザ、第53回応用物理学会春季学術講演会、22a-ZN-4、Mar. 2006.

その他解説記事等

1. 足立 光一郎、鈴木 崇功. レンズ集積型面出射レーザ、レーザー研究第43巻7号、2015

年7月.

本研究に関する受賞等

1. 第21回（2006年秋季）応用物理学会講演奨励賞
2. 平成 22 年度電子情報通信学会学術奨励賞
3. 2013 MICROOPTICS CONFERENCE PAPER AWARD

謝辞

本研究は、筆者が株式会社日立製作所 中央研究所において研究業務として担当した内容をまとめたものであり、多くの方々に御指導と御協力を頂きました。

本論文をまとめるにあたり多大なるご指導、ご鞭撻を賜りました東京工業大学 未来産業技術研究所 フォトニクス集積システム研究コア 小山二三夫 教授に謹んで感謝の意を表します。

また、本論文に対して有益なる御助言、御教示を頂きました、東京工業大学 未来産業技術研究所 フォトニクス集積システム研究コア 植之原裕行 教授、同 宮本智之 准教授、東京工業大学 大学院総合理工学研究科 物理電子システム創造専攻 浅田雅洋 教授、同 渡辺正裕 准教授、東京工業大学 未来産業技術研究所 量子ナノエレクトロニクス研究コア 西山伸彦 准教授に深く感謝申し上げます。

本研究を実施するにあたり株式会社 日立製作所 中央研究所 光デバイス関係者の皆様には多大なるご指導、御協力を頂きました。本研究は以下の皆様のご協力無しには成し得ませんでした。

本研究の機会を与えて頂き、御指導、ご鞭撻を賜りました辻伸二 元主幹研究員(現 国立研究開発法人 科学技術振興機構)、青木雅博 元部長(現 株式会社日立製作所 研究開発グループ テクノロジーイノベーション統括本部 本部長)、井戸立身 元部長(現 株式会社日立製作所 ICT事業統括本部 ITプロダクト統括本部 開發生産統括部 部長)に深く感謝申し上げます。本研究テーマを頂くとともに、論文のまとめ方等に関して直接ご指導頂きました、田中滋久 元主任研究員(現 日本オクラロ株式会社 研究部部長)に深く感謝の意を表します。本研究を進めるに当たり、研究者としての基本的な考え方や、半導体レーザの物理、試作方法、評価方法全般に渡り、直接御指導頂きました、中原宏治 元主任研究員(現 日本オクラロ株式会社 主任研究員)に心より感謝申し上げます。

篠田和典 主任研究員、谷口隆文 研究員、寺野昭久 研究員、武居亜紀 研究員には、クリーンルームの使用方法全般から半導体レーザの試作プロセスに至るまで御指導・ご

協力頂きました。土屋朋信 主任研究員、葛西淳一 研究員、北谷健 元主任研究員（現 日本オクラロ株式会社 主任研究員）には半導体結晶のエピタキシャル成長に関して、有益なご討論、御協力を頂きました。機能集積型半導体レーザのデバイス設計及びプロセス技術また、これらの応用技術に関して有益なる御助言、御協力を頂きました。有本英夫 主任研究員、深町俊彦 主任研究員、牧野茂樹 主任研究員、鈴木崇功 元研究員（現 日本オクラロ株式会社 主任研究員）、藤崎寿美子 研究員、野本悦子 主任研究員には、半導体レーザの信頼性評価に関して、御助言と御協力を頂きました。大歳創 元主任研究員には、半導体レーザの理論計算・設計に関して御助言、ご協力頂きました。以上の方々に心より深く感謝申し上げます。

また、半導体レーザの実装及び高周波設計・評価方法に関して、御指導、ご協力頂きました。菅原俊樹 主任研究員、松岡康信 主任研究員、川村大地 研究員、石山一男 主任研究員、竹本享史 主任研究員、三田玲英子 元研究員に深く感謝申し上げます。

本研究において生産ラインを利用したデバイス試作に関して、日本オクラロ株式会社の皆様に多大なるご指導、御支援を頂きました。直江和彦 部長、元田 勝也 統括主任技師、佐久間康 技師、鷺野隆 技師、中西慧 技師、佐々木博康 統括主任技師、内田憲二 部長、魚身和久 主幹研究員に深く感謝申し上げます。

また、日頃より有意義なご討論と御協力を頂きました。株式会社日立製作所 中央研究所 テクノロジーイノベーション統括本部 情報エレクトロニクス研究部の皆様に深く感謝申し上げます。

最後に本論文執筆にあたり心身ともに支えてくれた家族に感謝します。