

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

題目(和文)	高出力VCSELビームスキャナに関する研究
Title(English)	Study on high-power VCSEL-based beam scanners
著者(和文)	許在旭
Author(English)	Zeuku Ho
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11928号, 授与年月日:2021年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小山 二三夫,浅田 雅洋,植之原 裕行,中村 健太郎,宮本 智之,森戸 健
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第11928号, Conferred date:2021/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

DOCTOR DISSERTATION

博士 論文

高出力 VCSEL ビームスキャナに関する研究  
(Study on high-power VCSEL-based beam scanners)

by

**Zeuku Ho**

許 在旭



Department of Electrical and Electronic Engineering  
School of Engineering  
Tokyo Institute of Technology

Adviser

Professor Fumio KOYAMA

小山 二三夫 教授

July 2020

# 目次

第1章 序論.....	3
1.1 近年の光分野の動向.....	3
1.2 自動運転技術.....	5
1.3 光偏向器.....	7
1.4 面発光レーザ.....	9
1.5 面発光レーザ増幅器.....	10
1.6 本研究の目的.....	11
1.7 論文構成.....	11
Reference.....	13
第2章 VCSEL 増幅器長尺化のための構造設計.....	18
2.1 VCSEL 増幅器の動作原理.....	18
2.1.1 スローライト導波路.....	18
2.1.2 VCSEL 増幅器.....	20
2.2 導波モードのカットオフ構造.....	21
2.2.1 導波モードによる増幅自然放出光の発生.....	21
2.2.2 FIMMWAVE による電磁界分布計算.....	24
2.3 デバイス作製.....	28
2.4 導波モードカットオフ効果の測定.....	32
2.4.1 導波モードの測定.....	32
2.4.2 増幅器の近視野像測定.....	35
Reference.....	37
第3章 長尺増幅器による高ビーム品質化.....	38
3.1 長尺増幅器によるビーム拡がり角の狭窄化.....	38
3.2 遠視野像の測定結果.....	39
3.3 注入電流均一化の検討.....	43
3.3.1 不均一分布によるビーム分裂.....	43
3.3.2 ビーム品質改善のための検討.....	46
Reference.....	50
第4章 長尺増幅器によるビーム掃引.....	51
4.1 VCSEL 増幅器によるビーム掃引の原理.....	51
4.2 ビーム掃引特性の評価方法.....	52
4.3 VCSEL 増幅器によるビーム掃引特性.....	54
第5章 長尺増幅器による高出力動作.....	63

5.1 VCSEL 増幅器による高出力化の原理 .....	63
5.2 CW 特性 .....	65
5.3 パルス特性 .....	68
第 6 章 高出力・高ビーム品質動作のための検討 .....	75
6.1 VCSEL 増幅器の利得平坦化の提案 .....	75
6.2 計算結果 .....	77
6.3 斜め入射を考慮した誘電体構造の検討 .....	81
Reference .....	85
第 7 章 将来展望 .....	86
7.1 長尺 VCSEL 増幅器の極限追及 .....	86
7.2 2 次元構造による高出力化 .....	88
7.3 VCSEL との集積化 .....	89
7.4 LiDAR 測定 .....	91
Reference .....	92
第 8 章 結論 .....	93
本研究に関する発表 .....	95
謝辞 .....	97

# 第 1 章 序論

## 1.1 近年の光分野の動向

1990 年代から普及し始めたインターネットは、現在に至るまで目覚ましい発展を遂げてきた。パソコンやスマートフォンなどのインターネット通信機器が 1 人 1 台以上持つほど普及したり、SNS や動画配信サービスの増加なども相まって、インターネットトラフィックは年を追うごとに指数関数的に増大している。Fig.1-1 は総務省発行の日本国内におけるダウンロードトラフィックの推移を示しており、2018 年から 2019 年の 1 年の間で 15%増加している [1-1]。これに対応するべく大容量伝送を可能とする通信システムが要求されている。光通信を構成する要素技術はレーザー光源や光ファイバ、光変調器などが挙げられるが、高速・大容量化の要求に応えるために各々の要素技術で様々な取り組みが行われてきた。光通信に用いられる光源には安定した単一モード動作が求められており、1960 年に世界初のレーザー発振となるルビーレーザーが発表されたのを機に、ダブルヘテロ構造を用いた GaAs/AlGaAs の半導体レーザーによる室温連続発振や、光ファイバ内で低損失特性が得られる 1.5 $\mu\text{m}$  帯の GaInAsP/InP 系の半導体レーザー、InGaN/GaN による青色半導体レーザーの発振など様々な材料・波長帯で半導体レーザーの開発が進んだ [1-2~1-5]。モード特性の改善のための取り組みとしては、共振器内部に回折格子構造を有する分布帰還型 (DFB : Distributed Feedback) レーザや、導波路上に回折格子構造を取り入れた分布反射型 (DBR : Distributed Bragg Reflector) レーザ、後述する面発光レーザーなどが提案された [1-6,1-7]。また外部共振器や DFB レーザアレイ、MEMS などを用いた波長可変レーザーの開発は、光通信モジュールの実装コストの低減や光波長多重通信への適用に貢献している [1-8,1-9]。長距離光通信の実現を担う光ファイバは 1970 年に発明されて以来、伝搬損失の低損失化が進み、現在では 0.1dB/km オーダーの低損失ファイバが実現している [1-10]。また近年では大容量通信に向けたマルチコアファイバの実用化に関心を集めており、Tbit~Pbit/s の大容量光伝送が報告されている [1-11,1-12]。このような発展を経て光通信技術は現在進行形で進化している。インターネットは 4G から 5G に移行しつつあり、モノとインターネットが繋がる IoT (Internet of Things) が今後さらに広まると予想される。機械学習をはじめとした人工知能技術 (AI : Artificial Intelligence) は IoT などのインターネット技術との親和性が高く、世界的に最も注目を集めている研究分野である。AI index 2018 Report [1-13] によると、Fig.1-2 の年間の AI に関する論文発行数が示すように 2000 年前後から 2017 年までの間に AI に関する研究数が急激に増大している。特に中国では 2007 年から 2017 年の 10 年間の間で論文数は 1.5 倍まで増加している。

この時代背景のもと、日本国内では Society 5.0 [1-14] が提唱され、インターネット技術を活用した次世代社会が構想されている。Society 5.0 とは AI を用いてビッグデータなどの

膨大なデータを解析し、それを誰もがどこにいても活用できるような社会システムを整備することで、老若男女や場所による情報格差をなくしインクルーシブな社会を目指すというものである。この社会構想を実現するための重要な鍵となるのは光分野に関する研究開発である。レーザをはじめとした光分野の技術は通信や医学・教育・エネルギーなど様々な分野で応用される技術である。ユネスコが2018年から毎年5月16日を”国際光デー”という記念日にするという制定をしたように世界的にも注目度が高い[1-15]。Society 5.0が構想する分野の中で特にレーザ技術が注目を集めている分野は、自動運転技術とレーザ加工技術である。自動運転を実現するにはセンサで取得した情報をビッグデータで解析し、瞬時にフィードバックする必要がある。高速・大容量かつ同時他接続が可能になるとされる5Gならではの新規分野である。またレーザ加工技術もAIとの親和性が高い。これまで加工条件の最適化は職人技であったところをAIによるシミュレーションによって誰もが最適条件でレーザ加工できるようになる。これらの背景から自動運転や加工分野における基幹技術であるレーザに関する研究は、次世代社会において最重要課題であることが分かる。現在もNEDOをはじめとして、レーザを研究開発するための支援が国家プロジェクトレベルで実施されており、多くの機関からレーザの高性能化が報告されている[1-16]。しかしビーム品質や実装サイズ、消費電力など課題は多く残されており、レーザ光源の高性能化は次世代社会の実現のためには最重要課題である。

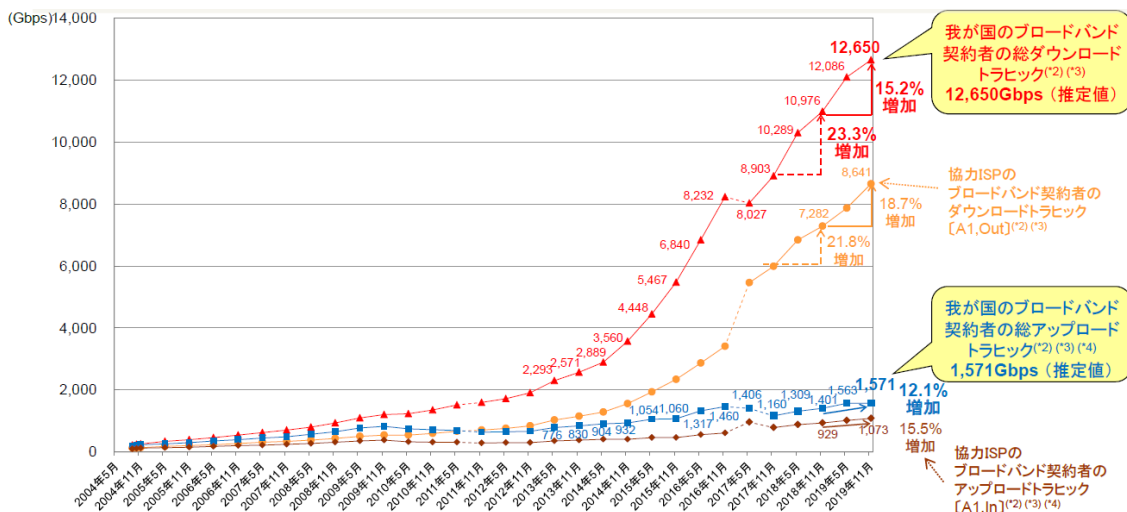


Fig.1-1 Changes in Internet Traffic (Source: Ministry of Internal Affairs and Communications) [1-1]

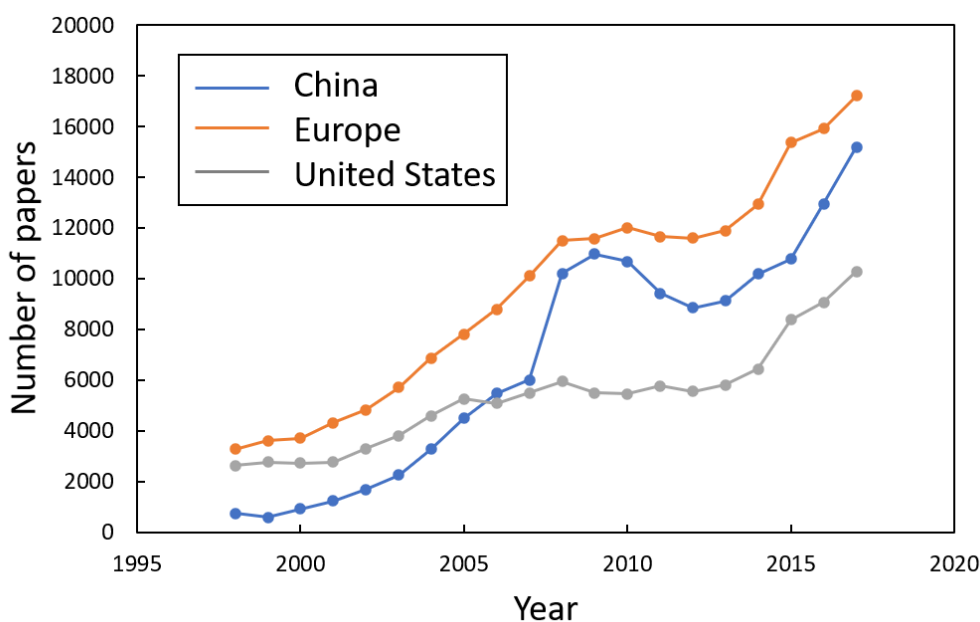


Fig.1-2 Changes in the number of papers on Artificial Intelligence (Source: AI index 2018 report [1-13])

## 1.2 自動運転技術

自動運転技術のレベルは Table.1-1 に示すように、米国 SAE(Society of Automotive Engineers International)によってレベル 0～5 まで区分けされている [1-17]。レベル 0 は完全な手動運転、レベル 1～3 は一部操作を自動化させる自動運転システム、レベル 4～5 はドライバーの関与が不要な完全自動運転である。日本国においては 2025 年までにレベル 4 の実現を目指している [1-18]。この自動運転をなし得るための要素技術は、物体を検知するためのセンサ技術と、その物体を認識させるための処理アルゴリズムである。自動運転に用いられるセンサは代表的なものとしてミリ波レーダ、単眼・ステレオカメラ、LiDAR がある。

ミリ波レーダは波長が mm 単位の電波を用いるセンサで、一般的には FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)と呼ばれる方式でセンシングを行う。FMCW 方式は、周波数チャープを持つ電波を送信し、物体で反射された信号からビート信号を抽出し、それを FFT 解析することで物体までの距離に相当する周波数と物体の速度に相当する周波数を求めることができる [1-19～1-22]。ミリ波レーダの特徴は、物体の距離と速度を同時に検知できることや、夜間や悪天候下でも使用できることが挙げられる。一方反射率の低い物体や小さい物体の検知が困難であるというデメリットを持つ。

単眼カメラによるセンシングは画像認識のアルゴリズムを組めばカメラ 1 台で測定を行えるため、コスト面で非常に優位である。単眼カメラを用いた画像処理方式には、オブジェクトを学習することで認識する手法 [1-23] や、カラーフィルタを用いて画像のぼけから距離

を測定する手法[1-24], 形状モデルベースパターンマッチングを用いたナンバープレートなどの文字認識[1-25]など, 様々な画像処理技術が開発されている. 物体の認識に関しては高い精度を持つが, 距離精度については他のセンサよりも劣る. カメラを 2 台用いるステレオカメラ方式によって距離精度は改善することができ, 2つのカメラの視差を求めてマッチング法を適用することで高い距離精度を得られるという報告もある[1-26]. しかしカメラを用いる場合は夜間や逆光に弱いというデメリットがある.

LiDAR は Light Detection and Ranging の略で波長 900nm 付近の赤外のレーザー光を物体に照射し, 反射光がディテクタに戻ってくるまでの時間を計測することで対象物までの距離を測定する. これは Time of Flight(ToF)法と呼ばれ, ほとんどの LiDAR に採用されている手法[1-27]で, その概略図を Fig.1-3 に示す. 光源から対象物にパルス波を放出し, 反射波を受光素子で観測することで測距を行うが, この時の受光方式には直接 ToF 法と間接 ToF 法の 2 種類がある. 直接 ToF 法はアバランシェフォトダイオードなどで反射光を受光し,  $\text{光速} \times \text{送受信時間} \div 2$  で測距する. 間接 ToF 法は反射波を複数の受光素子で受光し, 各受光素子の蓄積キャリアにより距離を検出する. LiDAR の特徴は夜間でも測距が可能で, また赤外光を用いるため太陽光ノイズの影響を低減することができる[1-28]. またミリ波レーダよりも波長ははるかに短いため, 高い空間分解能を持ち, 小さい物体の検出に対して優位である. また LiDAR の分解能は光源側のレーザーの性能によって決まるため, 解像点数の高いレーザーの開発によって LiDAR の性能を向上させることができる. 自動運転の実例としては, Velodyne 社からは高解像度で 360° 全方位のイメージングを可能にする LiDAR を実現している[1-29]. また LiDAR を用いた応用研究としては, LiDAR から得られた点群データから特徴マップを作成し, 自動車や人, 自転車を LiDAR のみで識別するという研究が行われており, 高いベンチマークが得られたと報告している[1-30]. このように LiDAR は自動運転用センサの中でも特に注目されている技術であるが, レーザ光は雨などによる屈折率変化に弱いため悪天候下では使えなかったり, ミリ波レーダに比べてコストが高いなどの課題がある. いずれのセンサも長所・短所があるため, 自動運転車を実現するためにはどれか 1 つのセンサで完結するということではなく, センサフュージョンする必要がある. そのため各センサは性能の向上のみならず, 実装サイズやコスト削減なども課題となる.

**Table. 1-1 Summary of levels of driving automation for on-road vehicles [1-17]**

Level	Name	Definition
0	手動運転	ドライバーが運転を全て行う
1	運転支援	加速・減速または操縦のいずれかをシステムが行う
2	部分的運転自動化	加速・減速や操縦など複数の運転をシステムが行う
3	条件付運転自動化	全ての運転をシステムが行い、要求に応じてドライバーが操作する
4	高度運転自動化	限定領域内においてシステムが全ての運転を行い、ドライバーは運転に関与しない
5	完全運転自動化	全ての運転をシステムが行う

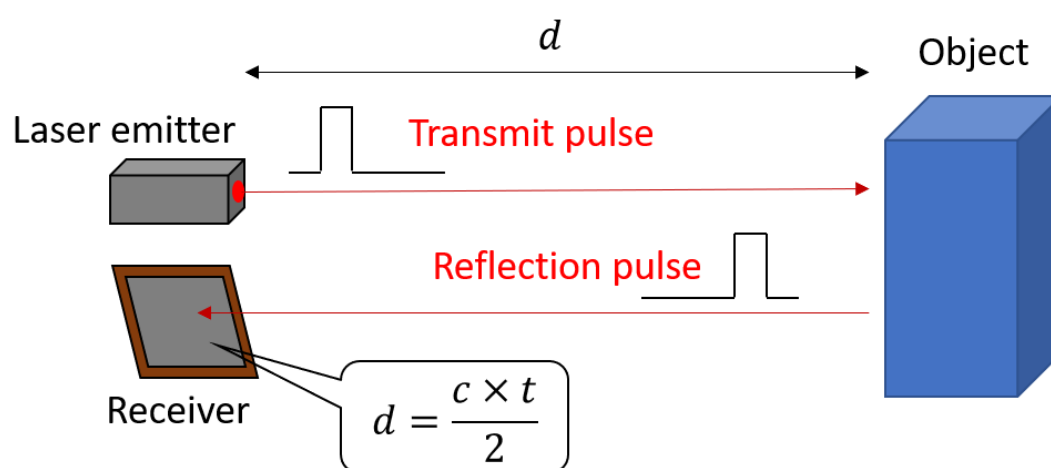


Fig.1-3 Schematic of Time of Flight method

### 1.3 光偏向器

前セクションで説明したように、現在自動運転技術の実現に向けて様々なセンサ技術の研究が行われている。その中でも近赤外光を用いる LiDAR は半導体レーザーの応用先として高い関心を集めている。LiDAR へ応用するために光源に求められる要求は解像点数、検出距離、スキャン速度、実装サイズである。解像点数とはビームの偏向角を拡がり角で割った値で、高いほど広範囲に高い分解能でスキャンできることを意味する。偏向角が広いと1素子で多くの角度をカバーできるため、実装サイズの削減になる。また拡がり角が小さいと遠距離の小さい物体に対しても検出が可能になる。検出距離とスキャン速度は物体を検知してから、その物体との衝突を回避するために重要になる。自動運転において必要な検出距離の指標として TTC(Time to collision) [1-31]がある。これはセンサが物体を検知してから、その物体に到達するまでの時間である。厳密な TTC はまだ決まっていないが、仮に

100km/h で走行中の自動車の TTC を 5 秒とすると、140m の検出距離が必要になる。この TTC の基準をクリアするために高速ビームスキャンと高いパルス出力が要求される。最後にセクション 1.2 で述べたように将来の自動運転のためにはセンサフュージョンが不可欠である。そのため 1 つ 1 つの実装サイズを小型化する必要がある。

LiDAR への要求を満たすための光偏向器のアプローチには様々なものがある。光偏向器は大きく分けて機械式と非機械式の 2 種類に分類される。機械式光偏向器の代表例は Fig.1-4(a)に示すようにポリゴンミラーやガルバノミラーを高速に回転させてビームを掃引する方式である [1-32,1-33]。機械式の大きな特徴は高い解像点数を得られることである。しかし掃引速度が数 kHz 以下と遅く、またミラーを可動させるためのモータ部を要するため物理的サイズが大きくなる。そのため小型実装や高速スキャンを実現するためには非機械式の方が望ましい。

非機械式は Fig.1-4(b)のようにミラー可動部が不要の光偏向器で、小型実装や高速スキャンを可能にする。代表的な研究例として、EO ポリマー導波路を用いた光フェーズドアレイ [1-34]、高屈折率差サブ波長格子(HCG)を用いたフェーズドアレイ [1-35,1-58]、MEMS 構造 [1-36]、KTN 結晶を用いた光偏向器 [1-37,1-38] などがある。いずれも小型実装かつ数百 kHz の高速ビーム掃引が可能であるが、偏向角が数度程度しか取れないため高い解像点数を得ることが困難である。このように機械式と非機械式の特徴は対照的な関係となっている。しかし近年は非機械式でも高い解像点数が得られる偏向器があわられて来ており、フォトニック結晶導波路によって  $27^\circ$  の偏向が得られ [1-39]、プリズムレンズを用いることで  $\pm 20^\circ$ 、解像点数 4,000 点以上の 2 次元ビームスキャンが報告されている [1-40]。しかしパッシブ動作させているため出力に課題がある。

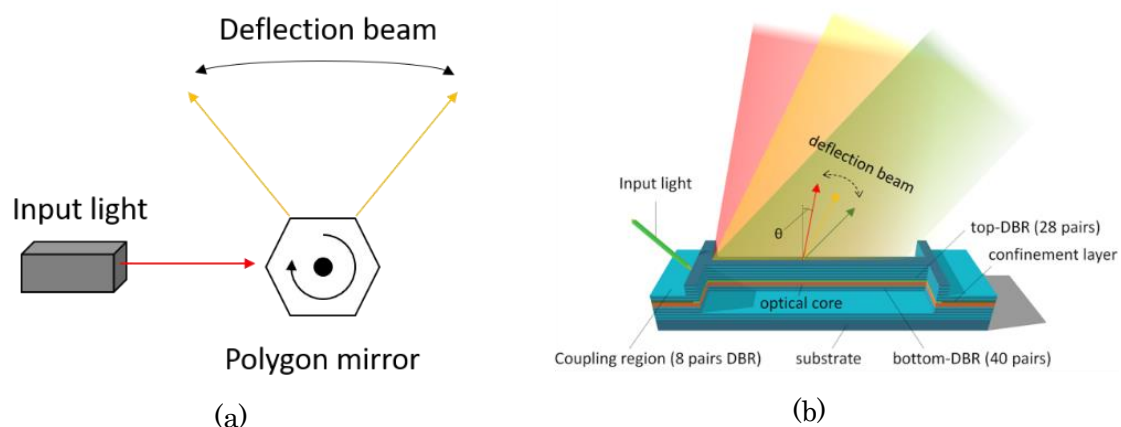


Fig.1-4 Schematic of beam steering device (a) mechanical and (b) non- mechanical

本セクションをまとめると、LiDAR に要求される性能は、高出力・高解像スキャン(高ビーム品質、広範囲掃引)、スキャン速度、小型化である。機械式、非機械式ともにさまざまなアプローチが行われているが、全てを満足するデバイスはまだ存在していない。そこで本

研究では次セクション以降で説明する面発光レーザを用いて、これらの要求を満たす高性能な光偏向器の実現を目指す。

## 1.4 面発光レーザ

面発光レーザ(VCSEL : Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)は東京工業大学から発明された半導体レーザの1種である。VCSELは1978年に初めて発表され[1-41], 1979年に初めてレーザ発振が確認され[1-42], 1988年には室温連続動作を達成した[1-43, 1-44]。その後はMEMSによる波長掃引機能[1-45]や温度無依存レーザ[1-46]などさまざまな新機能を有するVCSELが開発された。このような進化を経て、VCSELは現在では光インターコネクトやデータコム, レーザプリンタ, レーザディスプレイ, マウス, 医療機器など, 光通信をはじめ様々な分野で広く使われている[1-47]。Fig.1-5にVCSELの概略図を示す。VCSELの特徴は垂直方向に共振器を形成していることである。1層の光学厚さが $\lambda/4$ の半導体材料を積層することで高い反射率を得ることができ, 従来の端面出射型レーザに比べてその共振器長は1/100以下という非常に小さなレーザを形成できる。そのほかにも, 良好な単一モード特性, 低しきい値電流, 大量生産が可能, モノリシック集積が容易, といった独特な特徴を持つ。しかし活性体積が小さいため光出力は数mWにとどまっている。セクション1.1で述べたように近年はLiDARをはじめとした3Dセンシング技術の需要が高まってきており, 同時にVCSELの高出力化への要望も強くなっている。VCSELの高出力化としてよく使われる手法は2次元アレイ化で[1-48~1-50],  $5 \times 5$ のVCSELアレイではkWクラスの高出力化を達成している。アレイ化による高出力VCSELも様々な分野で使われており, 高速レーザプリンタ[1-51]や光無線給電[1-52]などに応用されている。

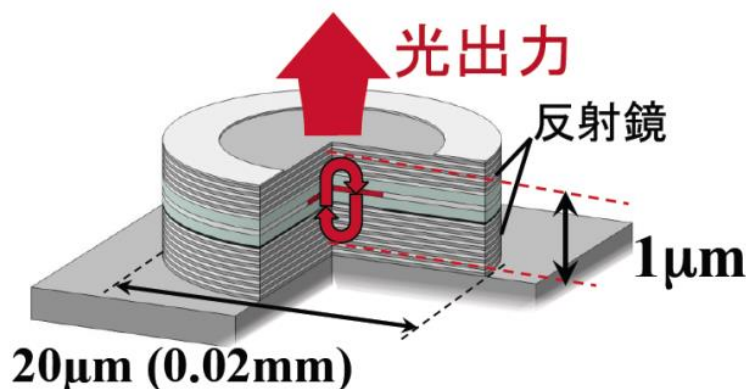


Fig.1-5 Schematic of Vertical-cavity surface-emitting laser

しかしVCSELアレイは1つ1つのVCSELから放射される光の位相を正確に揃えることが困難である。そのため高いビーム品質を要求されるLiDARやレーザ加工に応用するためには別の方法で高出力化する必要がある。

## 1.5 面発光レーザー増幅器

我々のグループは高出力・高ビーム品質の両立が可能な光源として面発光レーザー増幅器を提案した。詳細の原理は2章で説明するが、本増幅器は Fig.1-6 に示す分布ブラッグ反射鏡(DBR: Distributed Bragg Reflector)によるスローライト導波路が基となっている。このスローライト導波路は通常の VCSEL ウェハに導波路構造のメサを形成することで作製されたもので、この導波路に種光源を結合させるとスローライトが生成され、光スイッチ[1-53]や WSS(Wavelength Selective Switch)[1-54]などさまざまな機能を実現できる。また波長掃引することでビームのスキャン動作を行うことができ、解像点数 1,000 点を超える非機械式ビーム掃引デバイスを達成した[1-55]。この導波路に電極を蒸着することで導波路が増幅器となりアクティブ動作を可能にする。この増幅器は VCSEL ウェハ上に作製することから、我々はこれを VCSEL 増幅器と呼んでいる。Fig.1-7 は 1mm 長の VCSEL 増幅器を示している。パルス出力は 250mW[1-56]、CW の FFP のビーム拡がり角は最小で  $0.08^\circ$  が得られた[1-57]。VCSEL 増幅器はその動作原理から、増幅器長を長くすることでさらに光出力が増加し、ビーム拡がり角が狭窄化される。つまり長尺な VCSEL 増幅器の実現によって高出力と高ビーム品質を両立する非機械式のビームスキャナを実現できる可能性がある。

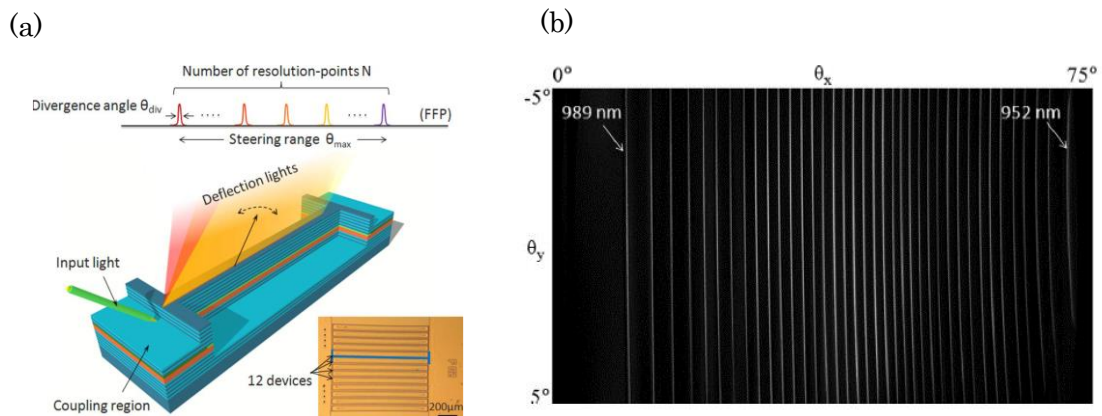


Fig.1-6 (a) Slow light waveguide with distributed Bragg reflector, (b) Non-mechanical beam steering [1-53].

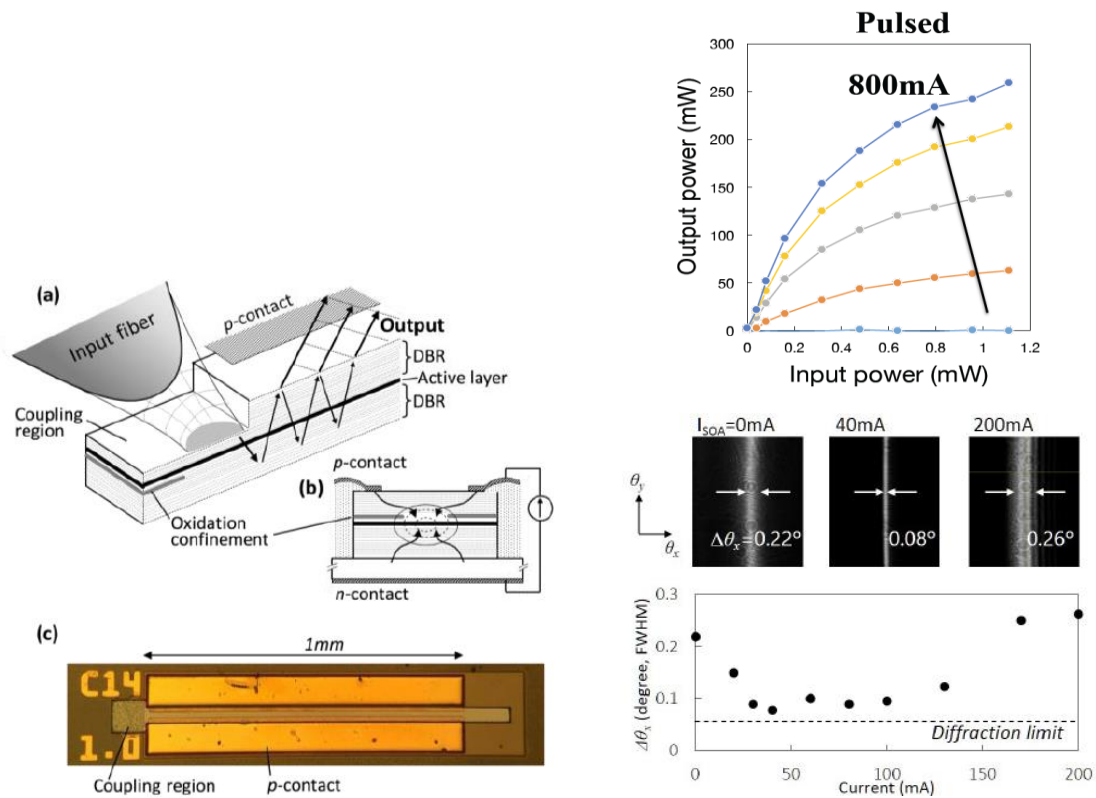


Fig.1-7 1 mm long VCSEL amplifier [1-54,1-55]

## 1.6 本研究の目的

以上の研究背景より、本研究の研究目的は高出力・高ビーム品質を両立した VCSEL ビーム掃引デバイスの実現である。これを実現するための目標は下記に集約される。

- ・長尺 VCSEL 増幅器の製作
- ・高解像高出力ビーム掃引機能の実証
- ・ワットクラスの単一モード高出力動作の実証

## 1.7 論文構成

本論文の構成を Fig.1-8 に示す。

第2章では VCSEL 増幅器の原理を述べるとともに、長尺化のための ASE 抑圧構造を設計し、実験によりその有効性を示す。

第3章では素子長に応じたビーム拡がり狭窄化を実証し、さらにビーム品質を向上させるための検討を行う。

第4章では長尺素子を用いて高解像ビームスキャン動作の実証を行う。

第5章では長尺素子のCW特性およびパルス特性を示し、高出力動作を実証する。

第6章ではこれまでの測定結果を踏まえ、高出力・高ビーム品質を両立する構造を検討する。

第7章ではVCSEL増幅器の展望として、極限追及と今後の目標、VCSELとの集積構造、2次元レイアウトによる長尺化、LiDAR測定について述べる。

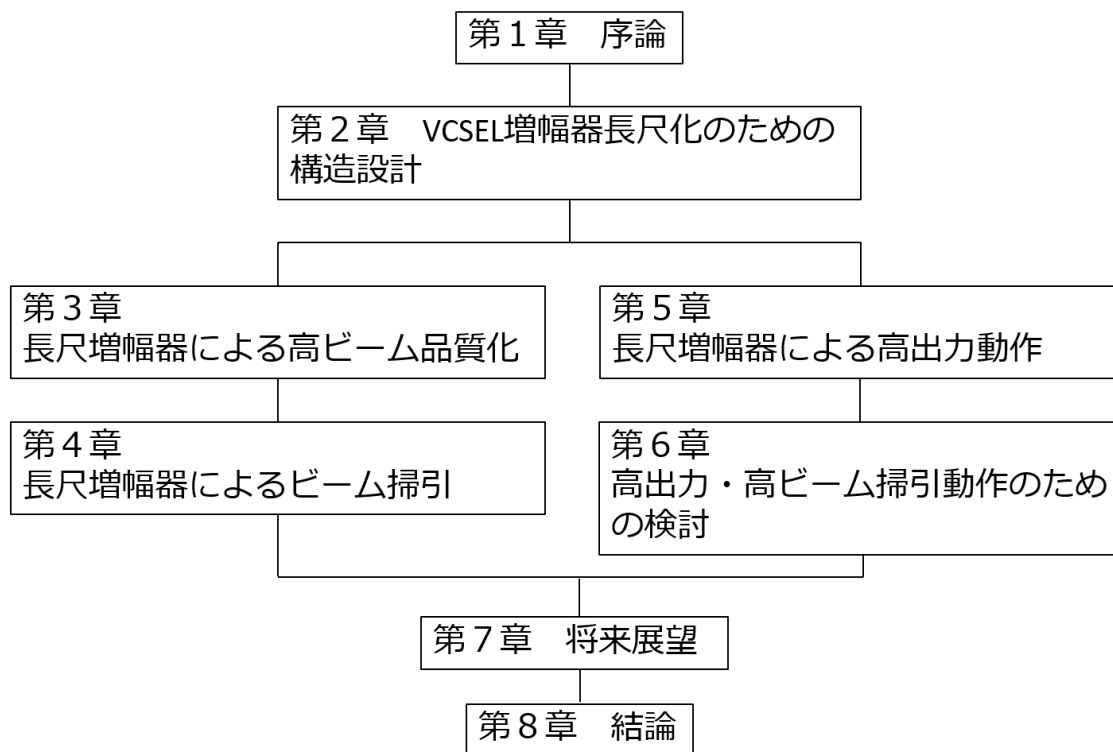


Fig.1-8 Composition of this thesis

## Reference

- [1-1] 総務省, "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(2019年11月時点)": [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000671256.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000671256.pdf)
- [1-2] T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby," *Nature*, vol. 187, pp.493-494, (1960).
- [1-3] I. Hayashi, P. B. Panish, P. W. Foy, and S. Sumski, "Junction lasers which operate continuously at room temperature," *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 17, pp. 109-111, (1970).
- [1-4] J. J. Hsieh, J. A. Rossi, and J. P. Donnelly, "Room-temperature cw operation of GaInAsP/InP double-heterostructure diode lasers emitting at 1.1  $\mu\text{m}$ ," *Appl. Phys. Lett.* 28, 709 (1976).
- [1-5] S. Nakamura, M. Senoh, S. Nagahama, N. Iwase, T. Yamada, Y. Sugimoto, and H. Kiyoku, "Room-temperature continuous-wave operation of InGaN multi-quantum-well structure laser diodes," *Appl. Phys. Lett.* 69, 4056 (1996).
- [1-6] Y. Tohmori, H. Oohashi, T. Kato, S. Arai, K. Komori, and Y. Suematsu, "Wavelength stabilization of 1.5  $\mu\text{m}$  GaInAsP/InP bundle-integrated-guided distributed-Bragg-reflector (BIG-DBR) lasers integrated with wavelength tuning region," *Electronics Letters*, vol. 22, no. 3, pp. 138-140, (1986).
- [1-7] H. Kogelnik and C. V. Shank, "STIMULATED EMISSION IN A PERIODIC STRUCTURE," *Appl. Phys. Lett.* 18, 152, (1971).
- [1-8] Thorlabs, "外部共振器の設計":  
<https://www.thorlabs.co.jp/tutorials.cfm?tabID=F7DFA931-5AFA-441B-8176-292D8735B143>
- [1-9] H. Ishii, K. Kasaya, and H. Oohashi, "Spectral Linewidth Reduction in Widely Wavelength Tunable DFB Laser array," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, no. 3, pp. 514-520, (2009).
- [1-10] K. Nagayama, M. Kakui, M. Matsui, T. Saitoh, and Y. Chigusa, "Ultra-low-loss (0.1484 dB/km) pure silica core fibre and extension of transmission distance," *Electronics Letters*, vol. 38, no. 20, pp. 1168-1169, (2002).
- [1-11] R. S. Luis et al., "1.2 Pb/s Transmission over a 160  $\mu\text{m}$  Cladding, 4-Core, 3-Mode Fiber, Using 368 C+L band PDM-256-QAM Channels," 2018 ECOC, pp.1-3, (2018).
- [1-12] J. Sakaguchi et al., "19-core fiber transmission of  $19 \times 100 \times 172$ -Gb/s SDM-WDM-PDM-QPSK signals at 305 Tb/s." *OFC, PDP5C.1*, (2012).
- [1-13] Y. Shoham, R. Perrault, E. Bryunjolsson, J. Manyika, J. C. Niebles, T. Lyons, J. Etchemendy, B. Grosz and Z. Bauer, "The AI Index 2018 Annual Report," *AI Index Steering Committee*, (2018).

- [1-14] 内閣府, "Society 5.0 - 科学技術政策": [https://www8.cao.go.jp/cstp/society5\\_0/index.html](https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html)
- [1-15] UNESCO, "International Day of Light": <https://www.lightday.org>
- [1-16] NEDO, "focus NEDO 2018 No.68": <https://www.nedo.go.jp/content/100876469.pdf>
- [1-17] SAE, "Summary of levels of driving automation for on-road vehicles in Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems", SAE J3016 (2014).
- [1-18] 高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部, "官民 ITS 構想・ロードマップ 2019", <https://www.kantei.go.jp/jp/singi/it2/kettei/pdf/20190607/siryou9.pdf>
- [1-19] S.Tokoro, K. Kuroda, A. Kawakubo, K. Fujita, and H. Fujinami, "Electronically Scanned Millimeter-wave Radar for Pre-Crash Safety and Adaptive Cruise Control System," IEEE International Conference on IV, pp.304-309, (2003).
- [1-20] A. G. Stove, "Linear FMCW radar techniques," IEE Proceedings F - Radar and Signal Processing, Vol. 139, pp. 343-350, (1992).
- [1-21] E. Hyun, S. Kim, C. Park, and J. Lee, "Automotive FMCW Radar with Adaptive Range Resolution," Second International Conference on Future Generation Communication and Networking Symoposia, pp. 130-133, (2008).
- [1-22] H. Mizuno, N. Tomioka, A. Kawakubo, T.Kawasaki, "A Forward-looking Sensing millimeter-wave Radar," JSAE Annual Congress, pp. 5-8, (2004).
- [1-23] S. J. H. Pizada, E. U. Haq, and H. Shin, "Single Camera Vehicle Detection Using Edge and Bag-of-Features," Computer Science and Convergence. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 114, pp. 135-143, (2012).
- [1-24] 三島直, 佐々木貴之, "単眼カメラで撮影した1枚の画像から精度よく距離計測できるカラー開口撮像技術," 東芝レビュー, 73巻, 1号, pp. 39-43, (2018).
- [1-25] 五十部宏幸, 中村靖, "単眼車載カメラ画像を利用した自動車運転支援," 広島工業大学紀要 43, pp.317-322, (2009).
- [1-26] 志磨健, 的野春樹, 掛川晋司, 門司竜彦, "自動車向け画像認識技術とステレオカメラによる距離計測," 光学, 41(5), 287-291, (2012).
- [1-27] T. Fersch, R. Weigel, and A. Koelpin, "A CDMA Modulation Technique for Automotive Time-of-Flight LiDAR Systems," IEEE Sensors Journal, vol. 17, no. 11, pp. 3507-3516, (2017).
- [1-28] M. Kutila, P. Pyykonen, H. Holzhuter, M. Colomb, and P. Duthon, "Automotive LiDAR performance verification in fog and rain," 21<sup>st</sup> International Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 1695-1701, (2018).
- [1-29] Velodyne 社ホームページ: <https://velodynelidar.com/>
- [1-30] Y. Zhou and O. Tuzel, "VoxelNet: End-to-End Learning for Point Cloud Based 3D object Detection", arXiv, 1711.06396v1, (2017).

- [1-31] Y. Chen, K. Shen, S. Wang, "Forward collision warning system considering both time-to-collision and safety breaking distance," IEEE 8<sup>th</sup> Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 972-977, (2013).
- [1-32] T. Matsuda, F. Abe, and H. Takahashi, "Laser printer scanning system with a parabolic mirror," Appl. Opt., vol. 17, pp. 878-884, (1978).
- [1-33] K. Seki, M. Iwasaki, "Improvement of Bending Vibration Suppression Performance for Galvano Mirror by Self-Sensing Actuation,"
- [1-34] Y. Hirano, Y. Motoyama, K. Tanaka, K. Machida, T. Yamada, A. Otomo, and H. Kikuchi, "Demonstration of an optical phased array using electro-optic polymer phase shifters," 8 Jpn. J. Appl. Phys. 57, (2018).
- [1-35] B. W. Yoo, M. Megnes, T. K. Chan, T. Sun, W. Yang, D. A. Horsley, C. J. Chang-Hasnain, and M. C. Wu, "32×32 Optical phased array with ultra-lightweight high-contrast-grating mirrors," Transducers & Eurosensors XXVII, pp.2505-2508, (2013).
- [1-36] T. K. Chan, M. Megens, B. W. Yoo, J. Wyras, C. J. Chang-Hasnain, M.C. Wu, and D. A. Horsley, "Optical beam steering using an 8×8 MEMS phased array with closed-loop interferometric phase control," Opt. Express 21(3), 2807-2815 (2013).
- [1-37] T. Sakamoto, S. Toyoda, M. Ueno, and J. Kobayashi, "High-Speed Optical Beam Scanning Using KTN Crystal," CPMT symposium Japan, pp. 173-176, (2014).
- [1-38] S. Kawamura, T. Imai, and T. Sakamoto, "Optical devices using KTN single crystals and their applications," Journal of the Japanese Association for Crystal Growth, Vol. 43, pp. 155-160, (2016).
- [1-39] H. Abe, M. Takeuchi, G. Takeuchi, H. Ito, T. Yokokawa, K. Kondo, Y. Furukado, and T. Baba, "Two-dimensional beam-steering device using a doubly periodic Si photonic-crystal waveguide," Optical express, Vol. 26, No. 8, pp. 9389-9397, (2018).
- [1-40] H. Ito, Y. Kusunoki, J. Maeda, D. Akiyama, N. Kodama, H. Abe, R. Tetsuya, and T. Baba, "Wide beam steering by slow-light waveguide gratings and a prism lens", Optica Vol.7, Issue 1, pp. 47-52, (2020).
- [1-41] 伊賀健一, 上林利生, 北原知之: "面発光形 GaInAsP/InP レーザー(1)," 第 25 回応用物理学関係連合講演会, 27-p-11, p.63, (1978).
- [1-42] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, "GaInAsP/InP surface emitting injection lasers," Jpn. J. Appl. Phys, vol. 18, pp. 2329-2330, (1979).
- [1-43] F. Koyama, S. Kinoshita, and K. Iga, "Room-temperature cw operation of GaAs vertical cavity surface emitting laser," Trans. IEICE, Vol. E71, No. 11, pp. 1089-1090, (1988).
- [1-44] F. Koyama, S. Kinoshita, and K. Iga, "Room-temperature continuous wave lasing characteristics of GaAs vertical cavity surface-emitting laser," Appl. Phys. Lett. Vol. 55, (3), 17, pp. 221-222, (1989).

- [1-45] M. S. Wu, E. C. Vail, G. S. Li, Y. W. Yuen, and C. J. Chang-Hasnain, "Tunable micro-machined vertical cavity surface emitting laser," *Electronics Letters*, Vol. 31, No. 19, pp. 1671-1672, (1995).
- [1-46] M. Nakahama, H. Sano, S. Inoue, T. Sakaguchi, A. Matsutani, M. Ahmed, A. Bakry, and F. Koyama, "Wavelength tuning and controlled temperature dependence in vertical-cavity surface-emitting lasers with a thermally and electrostatically actuated cantilever structure," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 1, pp. 010303-1-3, (2013).
- [1-47] K. Iga, "Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: Its Conception and Evolution," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 47, 1-10 (2008).
- [1-48] D. Zhou, J. Seurin, G. Xu, P. Zhao, B. Xu, T. Chen, R. van Leeuwen, J. Matheussen, Q. Wang and C. Ghosh, "Progress on high-power, high-brightness VCSELs and applications," *Photonics West 2015, Proc. of SPIE Vol. 9381 93810B-1* (2015).
- [1-49] M. Miller, M. Grabherr, R. Jager, and K. J. Ebeling, "High-power VCSEL arrays for emission in the watt regime at room temperature," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, no. 3, pp. 173-175, (2001).
- [1-50] L. Zou, M. Cryan, and M. Klemm, "Phase change material based tunable reflectarray for free-space optical inter/intra ship interconnects," *Opt Express* vol. 22, Issue. 20, 24142-24148 (2014).
- [1-51] N. Ueki, "Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Diode Array as A Light Source for High-Speed Laser Printing System," *The Review of Laser Engineering*, Col. 37, pp. 667-672, (2009).
- [1-52] T. Miyamoto, "Optical wireless power transmission using VCSELs," *Proc. SPIE 10682, Semiconductor Lasers and Laser Dynamics VIII*, 1068204, (2018).
- [1-53] A. Fuchida, A. Matsutani, M. Ahmed, A. Bakry, and F. Koyama, "Low-polarization dependent thermo-optic phase shift in slow light Bragg reflector waveguide for beam steering and optical switching," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 1, 010306-1-3, (2013).
- [1-54] X. Gu, K. Suzuki, Y. Ikuma, K. Seno, H. Tanobe, A. Matsutani, and F. Koyama, "Compact Wavelength Selective Switch Using a Bragg Reflector Waveguide Array with Ultra-Large Number of Output Ports," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33, Issue 7, pp. 1358-1364, (2015).
- [1-55] X. Gu, T. Shimada, A. Matsutani, and F. Koyama, "Miniature Nonmechanical Beam Deflector Based on Bragg Reflector Waveguide With a Number of Resolution Points Larger Than 1000," *IEEE Photonics Journal*, Col. 4, No. 5, pp. 1712-1719, (2012).
- [1-56] M. Nakahama, X. Gu, A. Matsutani, T. Shimada, and F. Koyama, "Slow light VCSEL Amplifier for High-resolution Beam Steering and High-power Operations," *Conference on Lasers and Electro-Optics, SF1L.5*, (2016).

- [1-57] M. Nakahama, X. Gu, A. Matsutani, T. Sakaguchi, and F. Koyama, "High power non-mechanical beam scanner based on VCSEL amplifier," 21<sup>st</sup> OptoElectronics and Communications Conference, pp. 1-3, (2016).
- [1-58] C. V. Poulton, M. J. Byrd, P. Russo, E. Timurdogan, M. Khandaker, D. Vermeulen, M. R. Watts, "Long-Range LiDAR and Free-Space Data Communication With High-Performance Optical Phased Arrays," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 25, no. 5, pp. 1-8, (2019).

## 第2章 VCSEL 増幅器長尺化のための構造設計

### 2.1 VCSEL 増幅器の動作原理

#### 2.1.1 スローライト導波路

VCSEL の内部構造は分布ブラッグ反射鏡(DBR)と呼ばれる屈折率の異なる2つの材料を交互に積層した多層膜構造を有している。本研究で取り扱う VCSEL 増幅器は、VCSEL ウェハ上に光導波路を形成し、DBR 導波路によるスローライト伝搬を利用した増幅器である。本章では DBR による多重反射の原理、およびスローライト伝搬の原理について説明する。

まず DBR による反射の原理を Fig.2-1 を用いて説明する。この図は高屈折率層と低屈折率層が交互に周期的に積層された様子を模式的に示している。光が屈折率の高い層から低い層へ入射される時、その境界面では一部の成分は透過し残りの成分は反射されるが、このとき反射波は自由端反射になるため位相がずれずに反射される。一方で屈折率の低い層から高い層へ入射される時は、その反射波は固定端反射となるため、位相が $\pi$ ずれる。つまり各層の光学的厚さを $\lambda/4$ にすることで、Fig.2-1 の赤線が示すように反射波の位相が揃う。よって DBR のペア数を増やし入射波を多重反射させることで高い反射率を得ることができる。VCSEL に用いられる代表的な DBR 材料として AlGaAs がある。AlGaAs は Al 組成によって屈折率が変わるため、Al 組成を変えた2種類の AlGaAs を積層することで反射鏡を構成できる。この場合およそ 20 ペア程度で 99%以上の高い反射率を得ることができるため、厚さ数  $\mu\text{m}$  程度の極薄の反射鏡を形成できる。

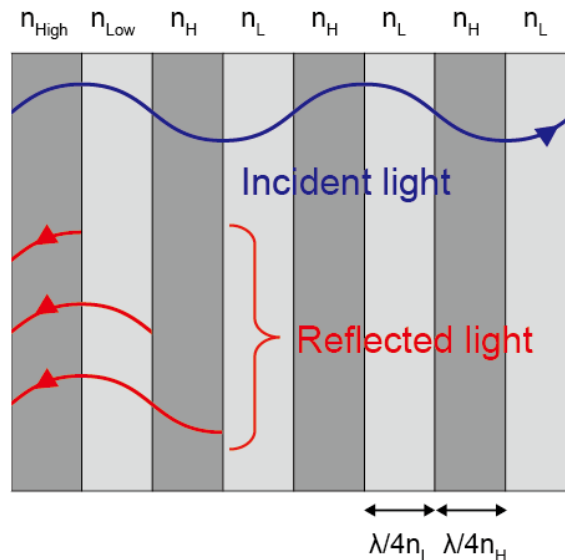


Fig.2-1 Principle of DBR reflection

次に上述の DBR を用いた DBR 導波路について説明する。比較のための一般的なスラブ型導波路を Fig.2-2(a)に示す。スラブ型導波路は高屈折率材料のコア層を低屈折率材料のクラッド層で挟み込む構造をしている。光伝搬の原理は境界面における全反射である。そのため伝搬角は臨界角によって制限される。一方 Fig.2-2(b)に示すような DBR 導波路は多重反射によって光伝搬を行うため、垂直に近い非常に小さな伝搬角を得ることができる。この場合、光の群速度はスラブ導波路と比較して劇的に遅くなるため、この伝搬光はスローライトと呼ばれる。ここで Fig.2-2(b)の挿入図に示されるように、伝搬光の伝搬定数を $\beta$ 、波数を $k$ 、伝搬角を $\theta_i$ とおき、スローライトの特性を調べる。まず伝搬定数 $\beta$ は次式で表される。

$$\beta = k \cdot n_{core} \cdot \sin \theta_i \quad (2.1)$$

ここで $n_{core}$ は活性層の屈折率である。また波数は伝搬光の波長 $\lambda$ を用いて $k = 2\pi/\lambda$ と表されるため、式(2.1)は

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_{core} \cdot \sin \theta_i \quad (2.2)$$

と書き換えられる。伝搬光の角周波数を $\omega$ とおくと、伝搬光の群速度 $v_g$ は

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad (2.3)$$

である。また光速に対する群速度の比率をスローダウンファクタ $f$ とすると、

$$f = \frac{c}{n_{core} \cdot v_g} \quad (2.4)$$

と定義される。伝搬角が $0^\circ$ 、すなわち伝搬定数が $0$ になるような波長を我々はカットオフ波長と呼ぶが、式(2.2)~(2.4)より、伝搬光の群速度およびスローダウンファクタは伝搬光の波長とカットオフ波長の差によって決定されることが分かる。上式により求めたスローダウンファクタを Fig.2-3 に示す[2-1]。この図が示すようにカットオフ波長近傍ではスローダウンファクタが急激に増加していることが分かる。これはカットオフ波長近傍では大きな構造分散を得ることができることを示している。この特性は伝搬角が制限されるスラブ導波路では実現不可能であり、このスローライト効果によってもたらされるメリットは主に次の2つである。

1. 広範囲にわたる偏向特性を可能にする
2. 単位面積あたりの活性層を通る回数を増加させる

1について、デバイス表面から出射される光の角度はスネルの法則により決まるため伝搬角に依存する。カットオフ波長近傍で大きな構造分散が得られるということは、すなわちカットオフ近傍においては小さい波長掃引で大きな偏向特性を得られることを意味する。詳細については4章にて記述する。また2については、セクション2.1.2にて後述するように本スローライト導波路は電極を蒸着することでアクティブ動作を可能にする。この場合伝搬

光が活性層を通るたびに光が誘導放出によって増幅されるため、スローダウンファクタが大きくなるほど短い素子長で同等の増幅特性を得ることができる。

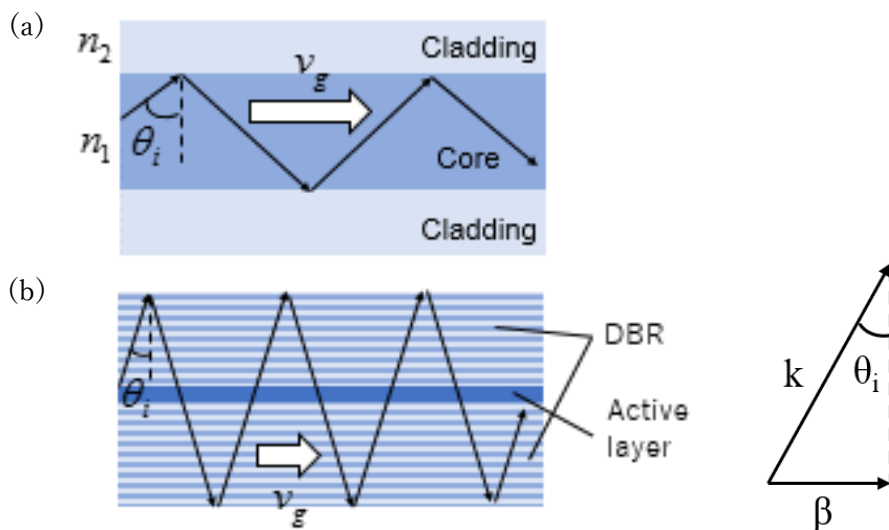


Fig.2-2 Schematic of waveguide (a) slab waveguide, (b) DBR slow light waveguide.

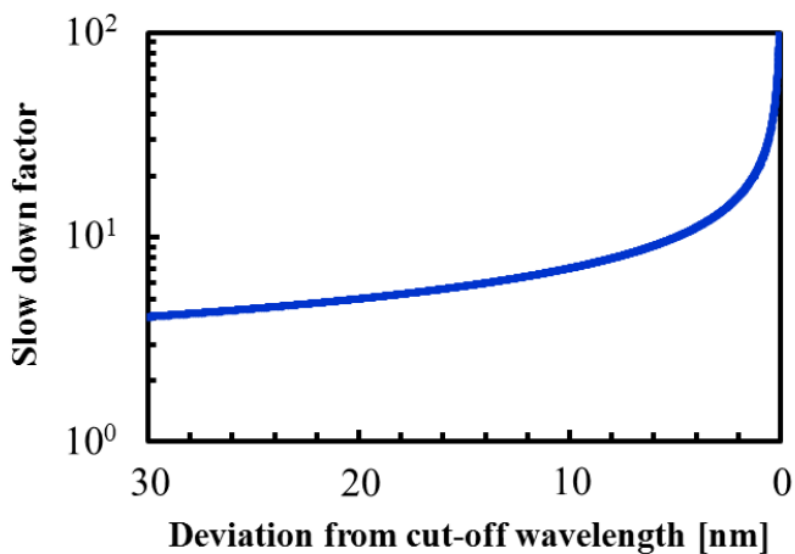


Fig.2-3 Wavelength dependence of slow down factor [2-1]

### 2.1.2 VCSEL 増幅器

VCSEL 増幅器の概略図を Fig.2-4 に示す。本構造はセクション 2.1.1 で述べたスローライト導波路がベースになっている。本素子は種光源の結合領域と増幅器領域の 2 つの領域に分けられている。まず結合領域は上部 DBR を数ペアエッチングさせることで形成する。レ

ソッドファイバを近接させることで外部光源を増幅器に結合させることができる。この図では外部光源を種光源として用いるが、直接 VCSEL を種光源として用いる VCSEL 集積型もある[2-2]。結合された光は増幅器領域内をスローライト伝搬する。このとき伝搬光は量子井戸での吸収損失および反射鏡の放射損失によって、その強度は指数関数的に減衰する。そこで素子の表面と裏面に p 型および n 型の電極を蒸着することで、増幅器に電流を注入できる構造を作る。発振しきい値以上の電流を注入することで、伝搬光が活性層を通るたびに誘導放出によって増幅されるため、吸収および放射損失を補償しながら増幅器終端まで種光源を伝搬させることができる。上部 DBR のペア数を下げ反射率を低下させることで、増幅器内部を伝搬する光の一部を自由空間に順次放射させることで光を取り出す。この時取り出される光は誘導放出によって増幅された光のためコヒーレント光になる。またしきい値以上の電流を注入している時、放射光の強度は均一になる。この場合光出力は増幅器長に比例して増加する。またビーム拡がり角は増幅器長に反比例して狭くなる。つまり、VCSEL 増幅器を長尺化することで高出力化と高ビーム品質化を同時に満たすことができる。高出力化および高ビーム品質化の詳細な議論についてはそれぞれ 5 章および 3 章にて行う。

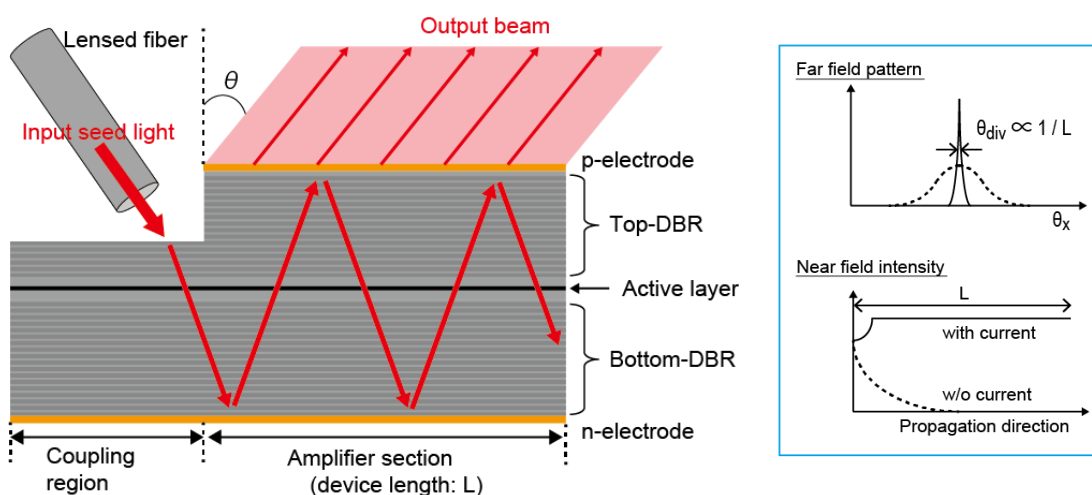


Fig.2-4 Schematic of VCSEL Amplifier

## 2.2 導波モードのカットオフ構造

### 2.2.1 導波モードによる増幅自然放出光の発生

前章にて VCSEL 増幅器を長尺化することで高出力と高ビーム品質の両立が可能であることを説明した。長尺な増幅器を実現するための課題として増幅自然放出光(ASE: Amplified spontaneous emission light)による増幅器の飽和がある。本章では過去に作製した

ASEによって特性が劣化する VCSEL 増幅器を見せたのち、ASE の発生原理およびその抑圧手法の提案を行う。

Fig.2-5(a)に従来の VCSEL ウェハを用いて作製した 1mm 長の増幅器を示す。(b), (c)は 300mA の電流注入時における素子の先端および終端の近視野像を示している。素子の端面に強い散乱光が生じていることが確認できる。これは導波モードの端面反射による寄生発振が生じていることを示している。(d)に示すように導波路端面を導波モードの進行方向に対して斜めになるようにメサを形成し、素子端面における反射率を落とすことで(e)に示すように散乱が無くなり、寄生発振を抑圧できた。Fig.2-6 は寄生発振抑圧前と抑圧後の I-L 特性を示している。結合光波長は 970nm である。この図が示すように寄生発振を抑圧することで特性の改善が見られた。1mm 長という短い素子の場合には端面の構造によって ASE の影響を抑えることができるが、より長尺になると導波路中での ASE の成長が支配的になり、ASE の影響が無視できなくなる。そのためエピタキシャル構造の段階から ASE を抑圧する構造を考慮する必要がある。

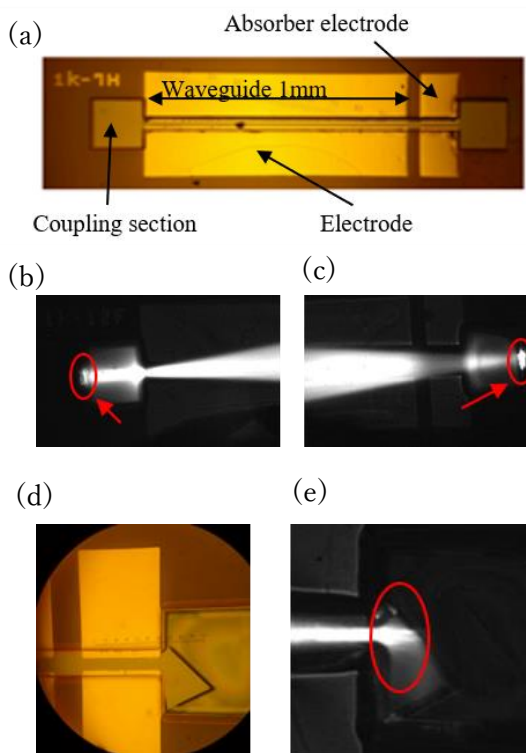


Fig.2-5 1mm long amplifier fabricated using a conventional VCSEL wafer, (a) top view, (b)-(c) NFP of amplifier with lateral parasitic oscillation, (d)-(e) NFP of amplifier with 45° etched facet for avoiding lateral parasitic oscillation.

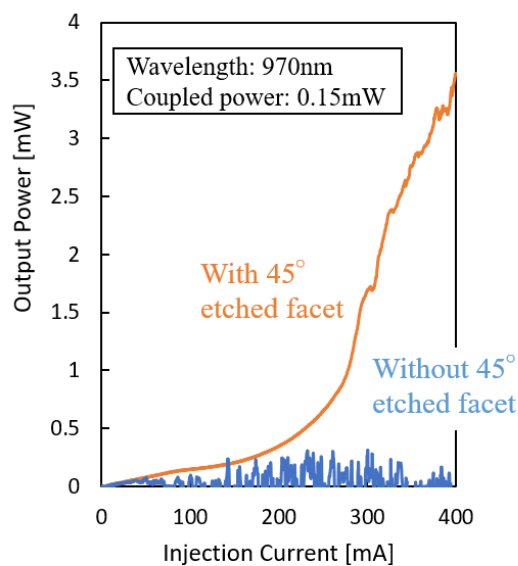


Fig.2-6 I-L characteristics of 1 mm long VCSEL amplifier with and without 45° etched facet.

VCSEL 増幅器は酸化狭窄型 VCSEL ウェハを用いて作製するが、通常の VCSEL のエピタキシャル構造には分離閉じ込めヘテロ構造 (SCH : Separate Confinement Heterostructure) が取り入れられている。SCH 構造とは Fig.2-7 に示すように活性層の両サイドに上下の DBR よりも屈折率が高いガイド層を取り入れた構造である。本研究ではこのガイド層を SCH 層と呼ぶ。SCH 層によって活性層の実効的な厚さを増やすことができるため、光の閉じ込め効果が強くなり低しきい値電流化を可能にする。ここで増幅器のような導波路構造に SCH 層を取り入れる場合を考える。この時 SCH 層を含むコア層は導波モードが発生する十分な厚さを持つため、上下の DBR がクラッド層として働き、Fig.2-8(a) に示すようなコア-クラッド間を全反射する導波モードが発生する。この状態で素子を長尺化すると、増幅器内で発生した自然放出光が導波モードで伝搬し、利得を得た自然放出光が ASE となり、Fig.2-8(b) に示すようにその強度は素子長に対して指数関数的に増大する。導波モードの群速度はスローライトモードよりも速いため、スローライトモードが十分な利得を得る前に増幅器が飽和してしまう。この ASE の成長を阻止するためには導波モードをカットオフする必要がある。本研究の提案は Fig.2-9 に示すように上下 DBR のクラッド層と SCH 層を含むコア層の実効屈折率を同等化することである。これによってコアとクラッド間で屈折率差が無くなるため全反射が起こらなくなり、導波モードがカットオフされる。一方でスローライトモードは DBR の多重反射を原理として発生するため、コアとクラッド間の屈折率差がない状態でも光伝搬を可能にする。つまりこの手法によって導波モードで伝搬する ASE のみを一方的に抑圧することができる。具体的には DBR の屈折率を上げる、または SCH 層の屈折率を下げることでこの構造を実現できる。本研究では後者の SCH 層の屈折率を下げる方式で検討を行った。

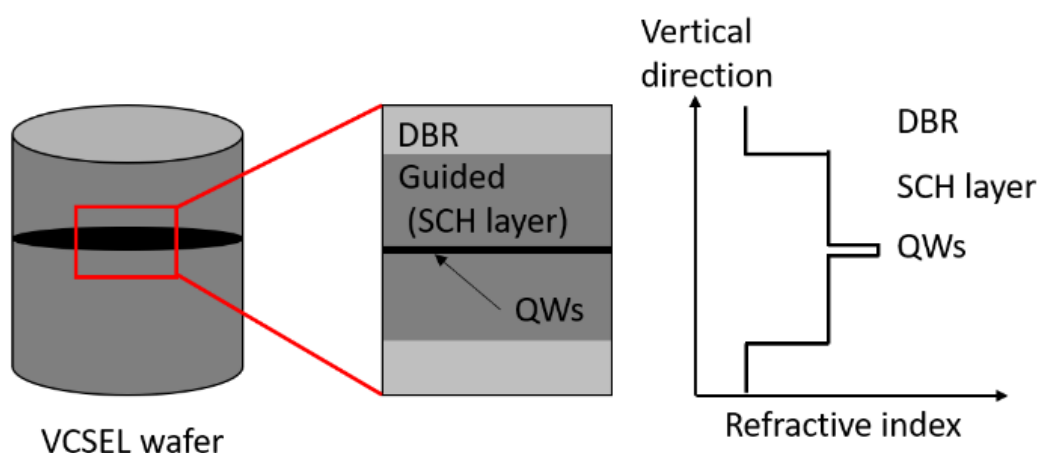


Fig.2-7 Illustration of SCH structure

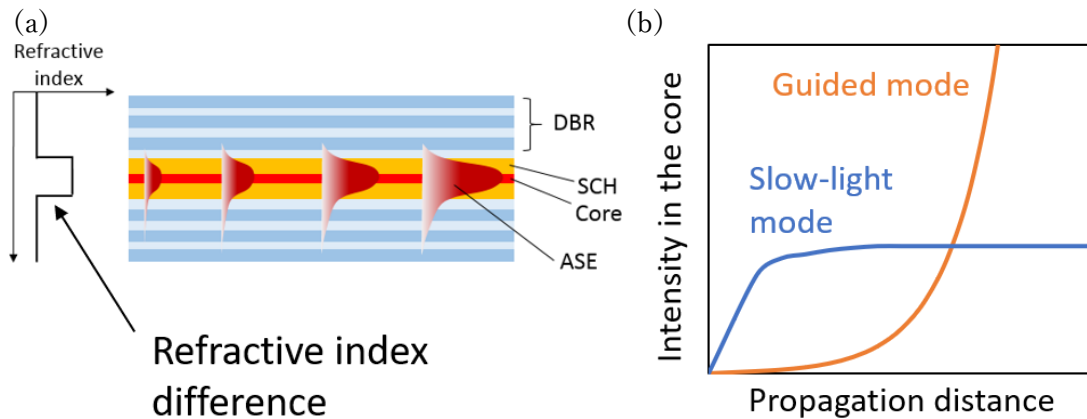


Fig.2-8 (a) Schematic of DBR waveguide with a refractive index difference between core and cladding, (b) Schematic of intensity of guided mode and slow light mode

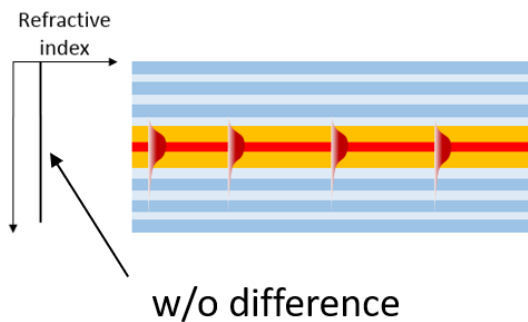


Fig.2-9 Schematic of DBR waveguide without a refractive index difference

## 2.2.2 FIMMWAVE による電磁界分布計算

Photodesign 社の FIMMWAVE によるフィルムモードマッチング法[2-3]を用いて電磁界分布を計算することで伝搬光のモード解析を行った。本研究では量子井戸が  $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}/\text{GaAs}$  で構成される 980nm 帯 VCSEL ウェハ及び  $\text{GaAs}/\text{Al}_{0.3}\text{GaAs}$  で構成される 850nm 帯 VCSEL ウェハを対象に計算を行った。各計算モデルの概略図を Fig.2-10(a),(b) に示す。DBR のペア数は両構造ともに上部が 20 ペア、下部が 40 ペアとした。また量子井戸は 3 重量子井戸と仮定し、共振器長(SCH 厚+量子井戸厚)は光学厚さが  $\lambda$  になるように設計した。980nm 帯および 850nm 帯の酸化狭窄型 VCSEL はともに SCH 層として Al 組成が 0.3 の AlGaAs を用いるのが一般的であるため、本計算でも Al 組成 0.3 を基準として、Al 組成をさらに上げた時の電磁界分布を計算した。AlGaAs の屈折率は波長依存性を持つため、Adachi モデル[2-4]を用いて両波長における AlGaAs の屈折率を計算した。Al 組成を関

数としたときの AlGaAs の屈折率を Fig.2-11 に示す。この図が示すように Al 組成を上げることで SCH 層の屈折率を低減できる。

次に Al 組成を 0.01 ずつ増やした時の導波モードおよびスローライトモードの電磁界分布を計算した。980nm 帯における計算の 1 例を Fig.2-12 に示す。Fig.2-12(a)は SCH 層の Al 組成が 0.3 の時と 0.7 の時の屈折率分布を示しており、(b)は活性層近傍の拡大図である。縦軸は屈折率、横軸は VCSEL ウェハの深さ方向の距離である。SCH 層の屈折率は Al 組成が 0.3 のとき 3.362、Al 組成が 0.7 のとき 3.139 であった。Fig.2-12(c)および(d)は導波モードおよびスローライトモードの電磁界分布を示す。(c)の導波モードの電磁界分布に着目すると、Al 組成が 0.3、すなわち従来の VCSEL 構造では活性層内にちょうど閉じこもっている様子が確認できる。一方 Al 組成を 0.7 まで上げると導波モードの閉じ込めが弱くなり、導波モードがカットオフされていることが分かる。Al 組成が 0.7 の時に下部 DBR に強度分布が生じているが、これは計算領域における反射によって生じてしまっている強度であり、実在する強度分布ではないことに留意されたい。(d)のスローライトモードの計算結果を見ると、Al 組成を上げることでわずかに強度が減少しているが、活性層内への光閉じ込めを維持していることが確認できる。これは先述した通りスローライトモードは DBR の多重反射によって伝搬するためである。850nm 帯 VCSEL においても同様の傾向が見られた。

次に導波モードおよびスローライトモードの光閉じ込め効果を定量的に評価するために、光閉じ込め係数の観点から比較した。ここで強度分布を  $|E(z)|^2$  とすると、光閉じ込め係数  $\Gamma$  を次式のように定義した。

$$\Gamma = \frac{\int_{Active\ layer} |E(z)|^2 dz}{\int_{All\ region} |E(z)|^2 dz} \quad (2.5)$$

この式は活性層内の強度の積を全領域における強度の積で割った値である。Fig.2-13 に (a)980nm 帯 VCSEL における光閉じ込め係数、(b)850nm 帯 VCSEL における光閉じ込め係数の計算結果のプロットを示す。この図から明らかに分かるように、SCH 層の Al 組成を上げると導波モードの光閉じ込め係数は劇的に減少し、一方スローライトモードの光閉じ込め係数は維持されている。980nm 帯の場合は Al 組成が 0.7 以上の時、850nm 帯の場合は Al 組成が 0.55 以上の時に導波モードの光閉じ込め係数が 0 となった。よって実際にエピタキシャル構造を設計する場合は SCH 層の Al 組成をこの数値以上に設定することで導波モードを抑圧することができ、長尺な VCSEL 増幅器を実現することができる。なおこの計算は 3 重量子井戸における結果であり、井戸数がより多くなると(例えば 5 重量子井戸)、活性層厚さが増加するため導波モードの閉じ込めが強くなる。そのため井戸数を変える場合はその都度適切に計算する必要がある。

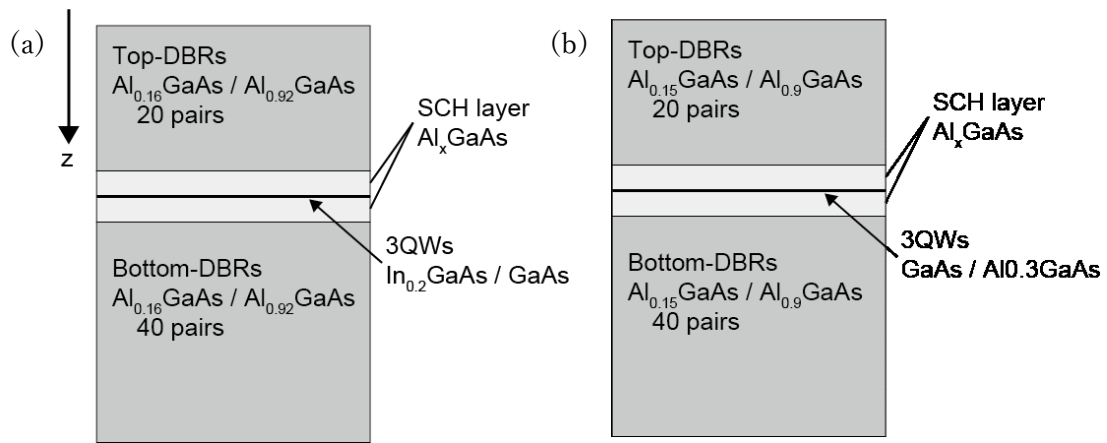


Fig.2-10 Schematic of calculation model (a) 980 nm band, (b) 850 nm band

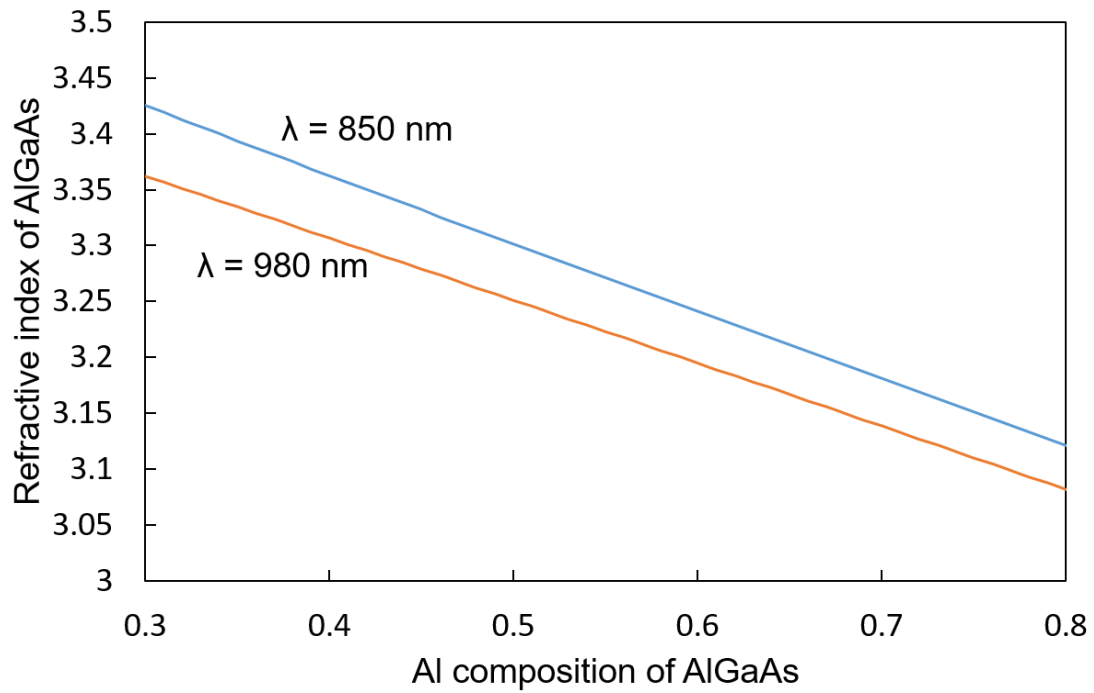


Fig.2-11 Al composition dependence of the refractive index of AlGaAs

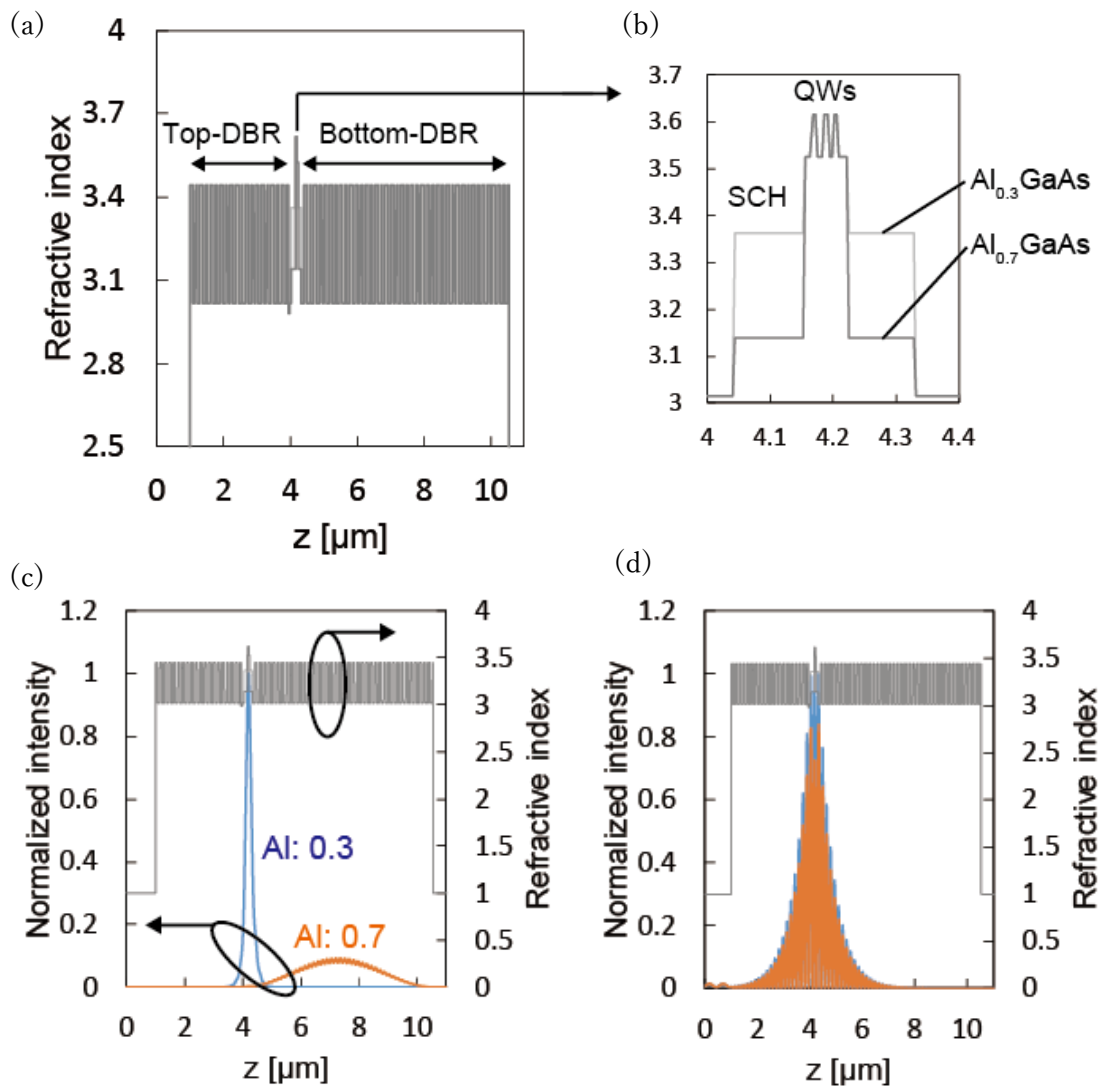


Fig.2-12 (a) Refractive index of the calculation model with SCH's Al composition of 0.3 and 0.7, (b) enlarged view near the active layer, (c) intensity distribution of the guided mode, (d) slow light mode.

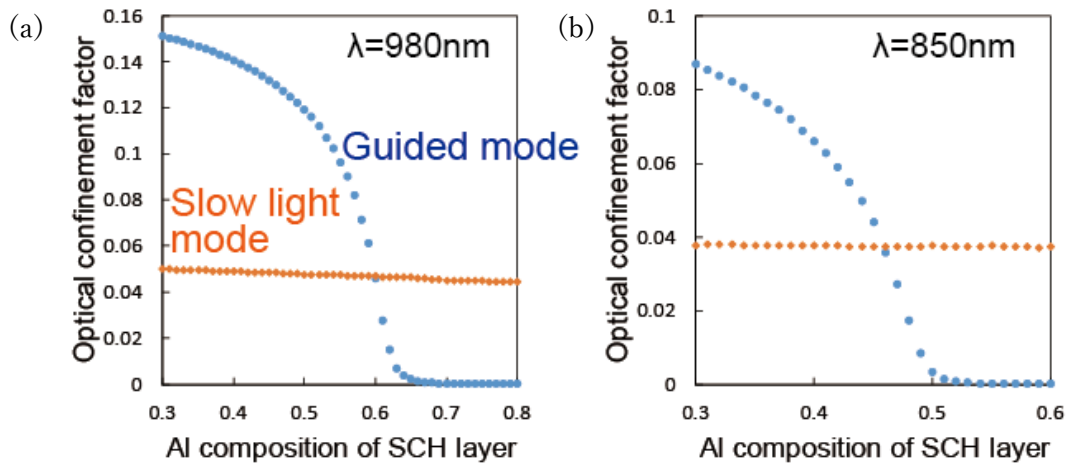


Fig.2-13 Calculated optical confinement factor for guided mode and slow light mode, (a) 980 nm band, and (b) 850 nm band.

## 2.3 デバイス作製

VCSEL 増幅器の作製プロセスを下記に記す。プロセスフローはよく知られる酸化狭帯型 VCSEL [2-5] と同様であるが、一部従来のプロセスとの変更点があるため、大きな変更点には下線を引いた。

- ① ウェハのへき開
- ② ICP-RIE によるメサ形成
- ③ 水蒸気酸化
- ④ ウェットエッチングによる結合領域形成
- ⑤ 絶縁ポリマー塗布
- ⑥ 裏面電極蒸着
- ⑦ 表面電極蒸着 1 回目
- ⑧ 表面電極蒸着 2 回目

### ① ウェハのへき開

エピタキシャル成長された VCSEL ウェハに約 150nm 厚さの  $\text{SiO}_2$  をスパッタリングした後、1.5cm 角にへき開した。後に増幅器長による特性の違いを観測するため、この 1.5cm 角の同一チップ内に増幅器長 1mm~10mm のデバイスを作製した。

### ② ICP-RIE によるメサ形成

Fig.2-14 の概略図に示すように、誘導結合プラズマ反応性イオンエッチング(ICP-RIE : Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching)によって導波路のメサを形成した。この時のメササイズは、のちの酸化プロセス時に酸化距離が  $20\mu\text{m}$  となるように、所望の酸化アパチャ幅 $+40\mu\text{m}$  と設計した。またエッチング深さは酸化層が十分に露出するように上部 DBR +下部 DBR10 ペア分をエッチングした。上部 DBR ペア数が 20 ペアの場合、深さは  $5\sim 6\mu\text{m}$  である。感光性フォトリソのパターン条件およびエッチング後のレジスト剥離の条件を Table.2-1, 2-2 に示す。

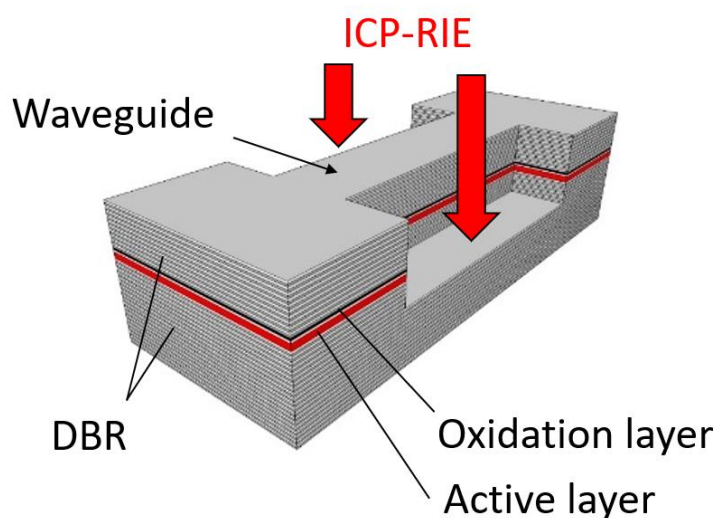


Fig.2-14 Schematic of waveguide formation by ICP-RIE.

Table. 2-1 ICP-RIE 用フォトリソのパターニング条件

プロセス	条件
ウェハ洗浄	アセトン 5分@ $80^{\circ}\text{C}$ , メタノール 5分@ $80^{\circ}\text{C}$
OAP 塗布	スピコート 40秒@4,000 rpm, プリベーク 90秒@ $110^{\circ}\text{C}$
Az-5200NJ 塗布	スピコート 40秒@4,000 rpm, プリベーク 90秒@ $100^{\circ}\text{C}$
コンタクト露光	$25\text{mW}/\text{cm}^2$ (i線リソグラフィ), 6秒
現像	Az-Developer 60秒, ポストベーク 90秒@ $120^{\circ}\text{C}$
$\text{SiO}_2$ エッチング	BHF 60秒

Table. 2-2 レジスト剥離条件

プロセス	条件
レジスト軟化	アセトン >60分@ $80^{\circ}\text{C}$
レジスト剥離	剥離液 502A 30分@ $150^{\circ}\text{C}$
剥離液リンス	キシレン 5分@ $120^{\circ}\text{C}$
ウェハ洗浄	アセトン 5分@ $80^{\circ}\text{C}$ , メタノール 5分@ $80^{\circ}\text{C}$

### ③水蒸気酸化

水蒸気酸化によって Al 組成比の高い酸化層を酸化させ、導波路の酸化アパチャを形成した。均一な酸化距離を得るためにはメサ側面の酸化膜を除去する必要がある。従来は希釈した BFH によって除去を行っていたが、その際にコンタクト層上の SiO<sub>2</sub> がエッチングされると後のプロセスの O<sub>2</sub> プラズマエッチング時にコンタクト層にダメージが入る可能性が示唆されている。そのため酸化膜の除去は NH<sub>3</sub> と純水を 10ml : 10ml で希釈したアンモニア水溶液を用いて行った。30 秒のエッチング後に純水でリンスを行った。

水蒸気酸化は酸化温度 470°C、ステージ回転数 10rpm の条件で行った。酸化はモニタリングしながら行うが、酸化距離が 20μm の場合、酸化層の Al 組成が 0.98 の場合は約 25 分、Al 組成が 1 の場合は約 16 分程度で酸化が完了する。

### ④ウェットエッチングによる結合領域形成

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> : H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> : H<sub>2</sub>O = 1 : 8 : 80 で希釈した硫酸を用いて Fig.2-15 に示すようにウェットエッチングによって結合領域を形成した。エッチング後の上部 DBR の残留ペア数が 6~8 ペアになるようにモニタリングしながら行った。フォトレジストのパターニング条件はほぼ Table.2-1 と同じだが、メサが硫酸によってエッチングされないようにレジストで完全に保護する必要がある。そのためフォトレジストとして膜厚がより厚い Az-4620 を使用した。

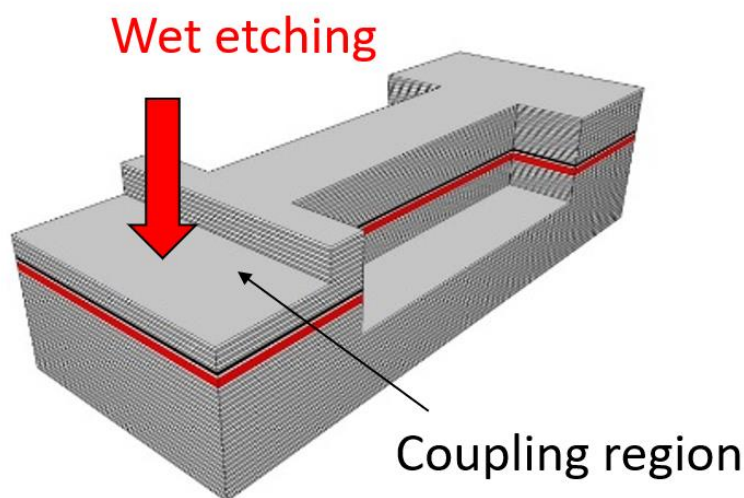


Fig.2-15 Schematic of coupling region formation by wet etching.

### ⑤絶縁ポリマーの塗布

絶縁ポリマー材料は Fig.2-16 に示すようにメサ側面を保護することと、電極パッドの下地を形成するために使われる。ポリマー材料としてポリイミドを使用した。その塗布の条件を Table.2-3 に示す。

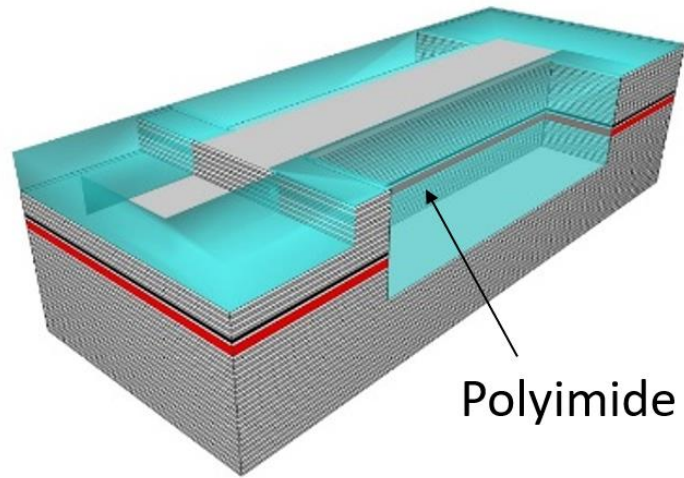


Fig.2-16 Schematic of polyimide coating.

Table.2-3 ポリイミドの塗布条件

プロセス	条件
ウェハ洗浄	アセトン 5分@80°C, メタノール 5分@80°C
ポリイミド塗布	原液 3,000rpm~4,000rpm, プリベーク 4分@100°C
コンタクト露光	25mW/cm <sup>2</sup> , 40秒
PEB	室温 60分以上
現像	シクロペンタノン 1分
キュア	60分@350°C
プラズマアッシング	>5分

#### ⑥裏面電極蒸着

本研究で使用した VCSEL ウェハは n 型半導体を基板としているため、ウェハ裏面には AuGe 1,000 Å / Au 2,000 Å を蒸着した。アニールは 2分@420°Cで行った。

#### ⑦表面電極蒸着 1回目

1回目の表面電極として Au 200 Å / Zn 600 Å / Au 1,500 Å を蒸着し、2分@420°Cでアニールした。ポリマー材料であるポリイミドは高温処理によって収縮する特性があり、Au/Zn/Au の電極パッドをポリイミド上に形成すると電極剥離が起こる。そのため Fig.2-17 に示すように 20µm 幅の微小な領域に 1回目の表面電極を蒸着した。

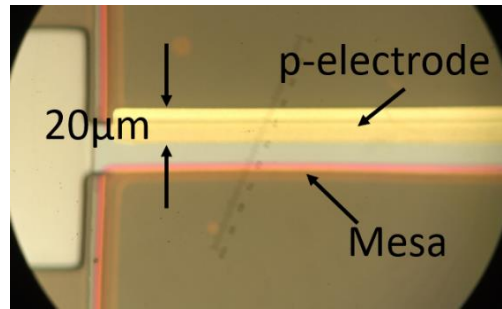


Fig.2-17 First evaporation of surface p-electrode.

#### ⑧表面電極蒸着 2 回目

電極パッドを形成するために 2 回目の p 型電極を蒸着した。蒸着の条件は Cr 300 Å / Au >1μm で行った。長い素子に対して均一に電流注入を行う場合電極は厚いほうが望ましい。またワイヤボンディングを行う場合 Au の厚さを 1μm 以上にしないとボンディング時に電極の剥離が起こる。そのため本研究では Au の厚さが 1.3~1.5μm になるように蒸着を行った。Cr/Au 蒸着の場合アニールが不要になるため、ポリイミド上に蒸着しても電極の剥離が起こらない。

以上が VCSEL 増幅器の作製プロセスである。作製した 3mm 長の VCSEL 増幅器の光学顕微鏡写真を Fig.2-18 に示す。

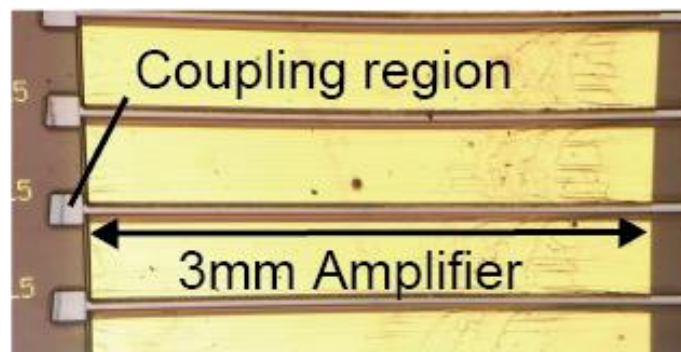


Fig.2-18 Top-view of the fabricated 3 mm long VCSEL amplifier

## 2.4 導波モードカットオフ効果の測定

### 2.4.1 導波モードの測定

セクション 2.2 で計算した導波モードのカットオフを確認するために VCSEL ウェハの端面から出射される光の強度を測定した。測定方法は、Fig.2-18 のような作製した増幅器の両

端をへき開することで端面を露出させ、へき開導波路に電流注入することで端面からの出射光を測定した。測定系の概略図を Fig.2-19 に示す。治具にセットされたデバイスの真横に InGaAs のフォトディテクタを配置して出力を測定した。この時、フォトディテクタの直径は 5mm で、ディテクタを近接させたときに導波路の斜め出射成分を拾わないように素子から約 5mm 離れた位置にディテクタを置いた。Fig.2-20 が 2mm 長のへき開導波路をセットした測定写真である。測定は 2 種類の VCSEL ウェハを用いて行った。どちらも In<sub>0.2</sub>GaAs/GaAs の 3 重量子井戸を持つ 980nm 帯 VCSEL ウェハで、片方は SCH 層の Al 組成が 0.3 の従来構造で、もう一方は Al 組成が 0.7 の導波モードをカットオフにできる VCSEL ウェハである。素子長 1~3mm のへき開導波路の端面出射の I-L 特性を Fig.2-21 に示す。従来構造の VCSEL ウェハは素子の長尺化に伴って光出力が増大した。これは導波モードが抑圧されていないため ASE が成長していることを示している。一方で提案構造の 2~3mm 長導波路は端面から出射される光の強度はほぼ 0mW であった。端面から光が出射されないということは導波モードが生じていないことを意味するため、導波モードが適切にカットオフされていることを示す。また Fig.2-22 は従来の VCSEL ウェハを用いて作製した 2mm 長導波路の端面出射のスペクトルを示しており、電流値の上昇に伴って ASE ピーク付近のスペクトルが急峻になっている。導波モードが導波路端面で反射されるため共振が起き、レーザ発振している。これは Fig.2-5(b),(c)の寄生発振を再現しており、寄生発振の原因が導波モードによる影響であることを示す。一方導波モードのカットオフ構造では端面からの出力が低いため、スペクトルを観測することができなかった。この結果より、本提案によって ASE や寄生発振に律速されずに増幅器を長尺化できることが示された。

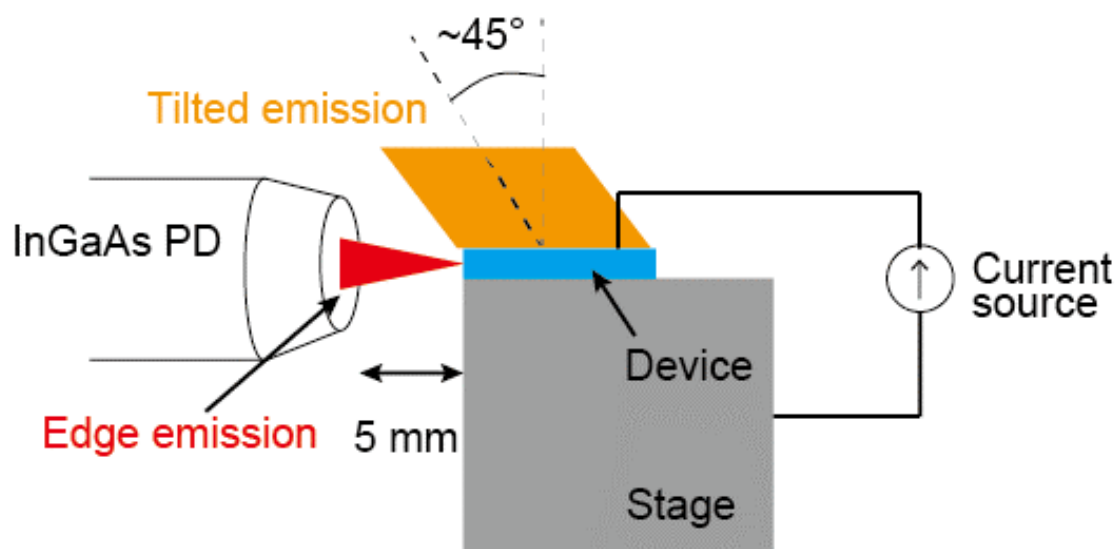


Fig.2-19 Schematic of edge emission power measurement

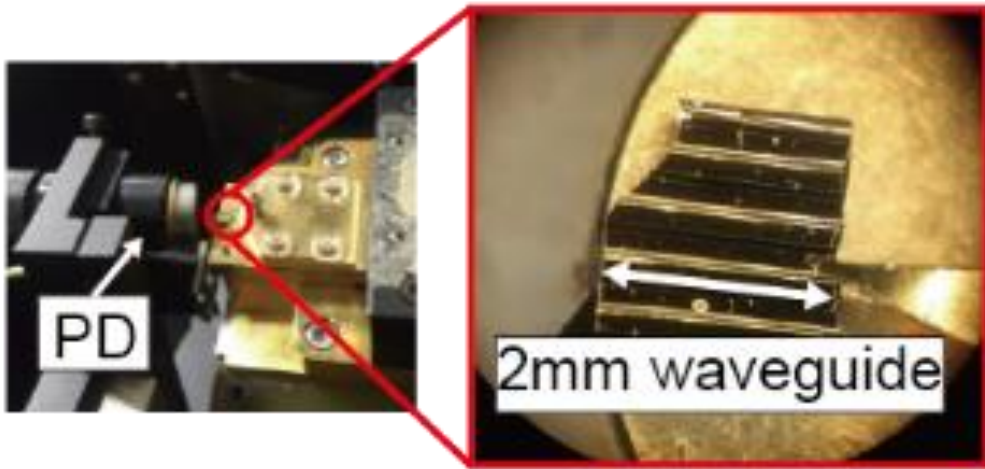


Fig.2-20 Edge emission power measurement set up and 2 mm long cleaving device

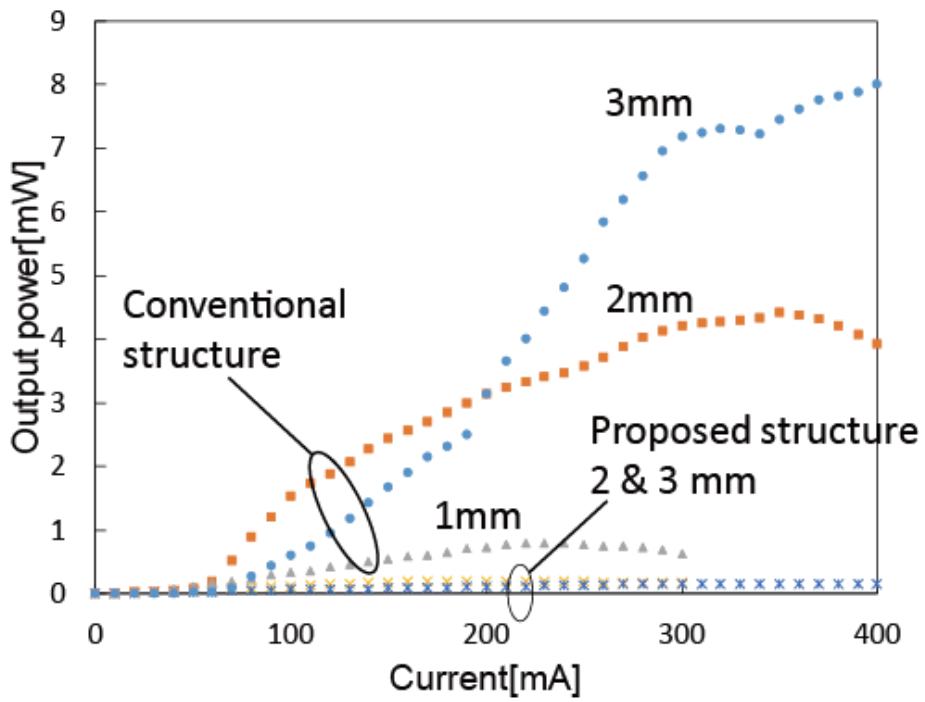


Fig.2-21 Edge emission power of the 1 to 3 mm long device for conventional VCSEL wafer and proposed VCSEL wafer.

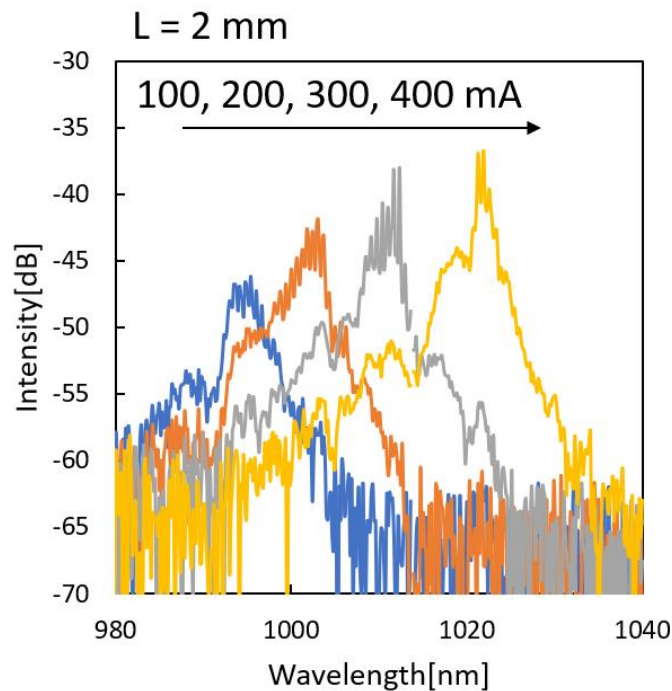


Fig.2-22 Edge emission spectrum of 2 mm long conventional VCSEL wafer

## 2.4.2 増幅器の近視野像測定

本章の最後に増幅器に種光源を結合させたときの近視野像(NFP: Near-Filed Pattern)を評価した。比較のために従来構造と導波モードのカットオフ構造の2ウェハを用いて測定を行った。測定系の構成をFig.2-23に示す。電流注入のためのプローブは素子中央に刺し、レンズドファイバを45°方向に傾けて結合領域に近接させた。CCDカメラはスローライト伝搬の様子が確認できるように垂直方向から斜め45°に傾けている。結合光波長は953nmでCW電流を300mA増幅器に注入した。Fig.2-24(a)に従来構造の1mm長素子と3mm長素子のNFPの結果を示す。1mm長素子は終端まで結合光が伝搬する様子が確認できた。一方3mm長素子は結合領域付近で結合光が減衰し、伝搬しなかった。Fig.2-21に示されるように3mm長素子の導波モード出力は注入電流300mAの時点で1mm長素子の7倍以上ある。つまり結合光が伝搬しない原因は導波モードの増幅が支配的になっているからであるとわかる。Fig.2-24(b)は導波モードカットオフ構造の3mm長増幅器である。この図が示すように素子の終端まで伝搬することが確認できた。Fig.2-21より導波モードが生じないためASEに邪魔されずに結合光が増幅されているためである。これまでの本グループの研究ではVCSEL増幅器の長さは1mm長が最高であったため、本提案構造によりその限界を打破し、より長尺な素子を作製できることが示された。

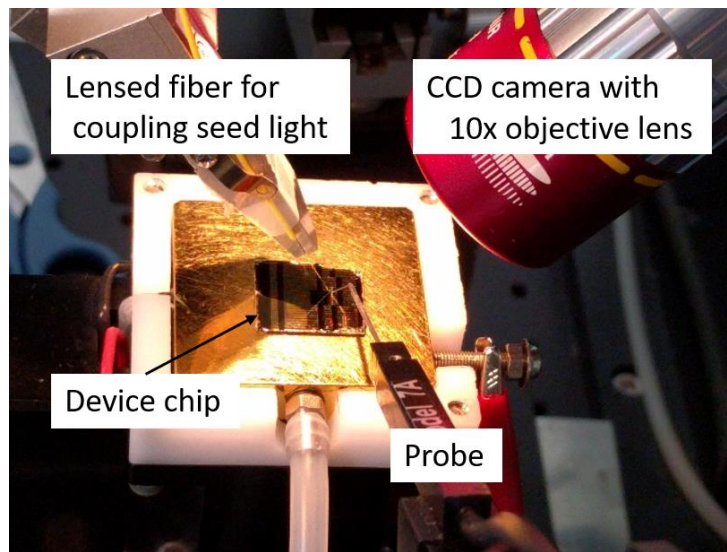


Fig.2-23 NFP and FFP measurement setup

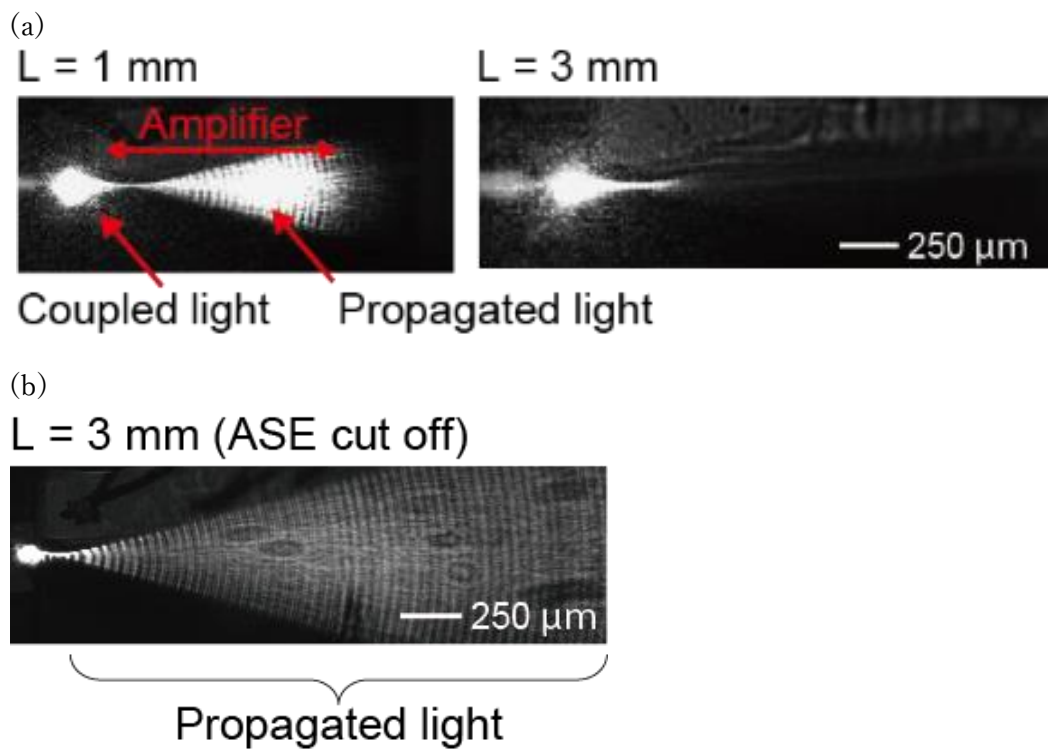


Fig.2-24 Near-field pattern with coupled light of 950 nm wavelength and injection current of 300 mA, (a) 1- and 3- mm long amplifiers of conventional VCSEL wafer, (b) 3 mm long of ASE cut off structure.

## Reference

- [2-1] 島田 敏和, “面発光レーザとスローライトデバイスの集積化に関する研究”, PhD Thesis, 東京工業大学, 2014
- [2-2] X. Gu, M. Nakahama, A. Matsutani, and F. Koyama, “VCSEL-integrated Bragg reflector waveguide amplifier with single-mode output power over 10 mW,” OECC, pp.1-3, (2016).
- [2-3] A. S. Sudbo, “Film mode matching: a versatile numerical method for vector mode field calculations in dielectric waveguides,” Pure Appl. Opt. vol.2, pp.211-233, (1993).
- [2-4] S. Adachi, “GaAs, AlAs, and  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ : Material parameters for use in research and device applications,” Journal of Applied Physics 58, R1-R29, (1985).
- [2-5] X. Gu, T. Shimada, A. Fuchida, A. Matsutani, A. Imamura, and F. Koyama, “Beam steering in GaInAs/GaAs slow-light Bragg reflector waveguide amplifier,” Appl. Phys. Lett. 99, 211107 (2011).

## 第3章 長尺増幅器による高ビーム品質化

### 3.1 長尺増幅器によるビーム拡がり角の狭窄化

2章で述べたように VCSEL 増幅器にしきい値以上の電流を注入したとき、増幅器表面から出射される光の強度は増幅器長に対して均一になる。よって増幅器長が $L$ の増幅器から出射される光は開口径 $D = L$ のスリットから放射される平面波とみなすことができる。これを模式的に Fig.3-1 のように表現する。この時スリットから放射される光の回折の理論値、すなわち回折限界は次式の近似式で表される。

$$\theta_{div} \approx \frac{\lambda}{D} \quad (3.1)$$

ただしこれはスリットに対して垂直方向に出射される場合である。我々が扱う VCSEL 増幅器はカットオフ波長より短波長の種光源を結合させ、出射光の角度は垂直方向から斜めに傾くため、垂直方向に対して $\theta$ 方向にビームが出射されるとすると式(3.1)は次式のように書き換えられる

$$\theta_{div} \approx \frac{\lambda}{D \cdot \cos\theta} \quad (3.2)$$

この式が示すようにビーム拡がり角は素子長に反比例して狭くなる。つまり素子長が長いほど、拡がり角が小さい非常に細いビームを得ることができる。ここで式(3.2)を用いて $\lambda=950\text{nm}$ 、 $840\text{nm}$ の時の回折限界を計算すると、その結果は Fig.3-2 のようになる。ここでビームの出射角度は垂直方向から $40^\circ$ と仮定した。この図が示すように $10\text{mm}$ 以上の非常に長い増幅器を用いることで回折限界が $0.001^\circ$ 以下の非常に狭い発散角のビームを得ることができる。本章では $1\text{mm} \sim 10\text{mm}$ 長の VCSEL 増幅器を作製し、それぞれの素子に対するビーム拡がりの評価を行う。同時にビーム品質を改善するための検討も行った。

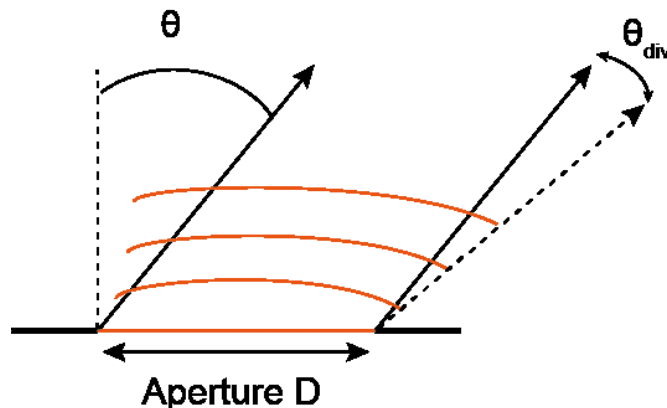


Fig.3-1 Schematic of light diffraction

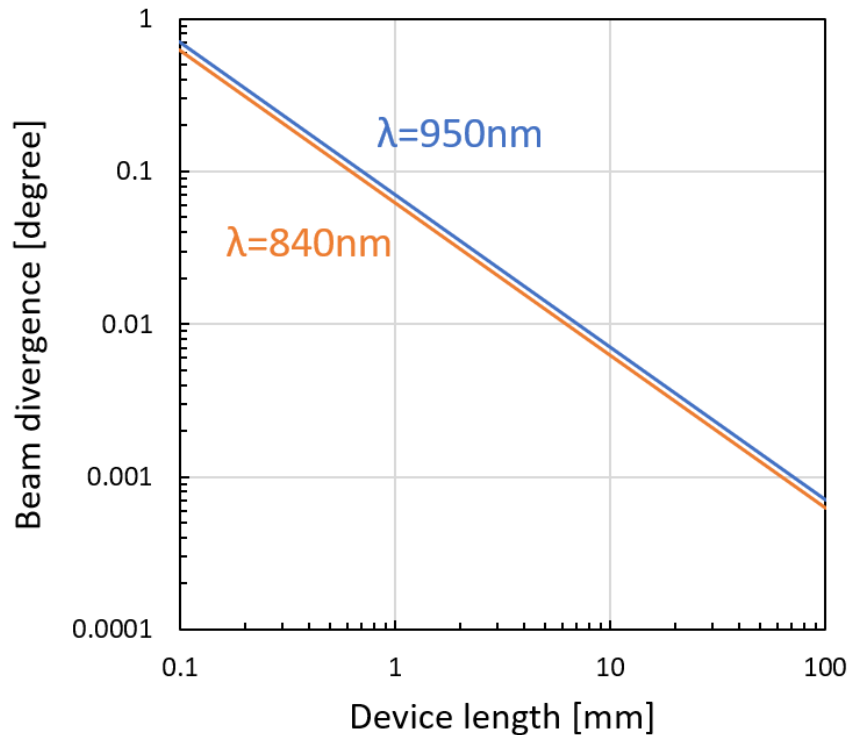


Fig.3-2 Diffraction limits of 840 nm and 950 nm, assuming the beam is emitted in the direction of  $40^\circ$  from the vertical direction.

## 3.2 遠視野像の測定結果

まずは注入電流量に対するビーム拡がり角の変化について測定を行った。Fig.3-3(a)はFig.3-3(b)に示す 1mm 長素子の FFP の結果を示す。このデバイスは 980nm 帯の VCSEL ウェハを使用しており、結合光波長は 965nm である。電流値を 0mA から 140mA まで 10mA 刻みで増加させたときの FFP の拡がり角をプロットした。このグラフが示すように注入電流量が低い領域では発散角が広がる。これは伝搬光の損失を補償できるほどの十分な電流注入が行えておらず、NFP が増幅器長に対して減衰しているからである。電流量が 90mA 近くになると、回折限界に近い値まで発散角が狭まった。この領域は増幅器の発振しきい値近傍の電流値で、NFP の強度が矩形に近い状態である。一方電流値をさらに増加すると発散角は広がった。この現象については 3.3 章にて取り扱うが、これは発熱および注入電流の不均一性によって引き起こされる。このグラフが示すようにヒートシンクにボンディングしていない状態の増幅器は注入電流量を上げすぎるとビーム品質が劣化する。そのため、本章で報告する実験はビーム拡がり角が最も狭くなる電流値に最適化して測定を行った。

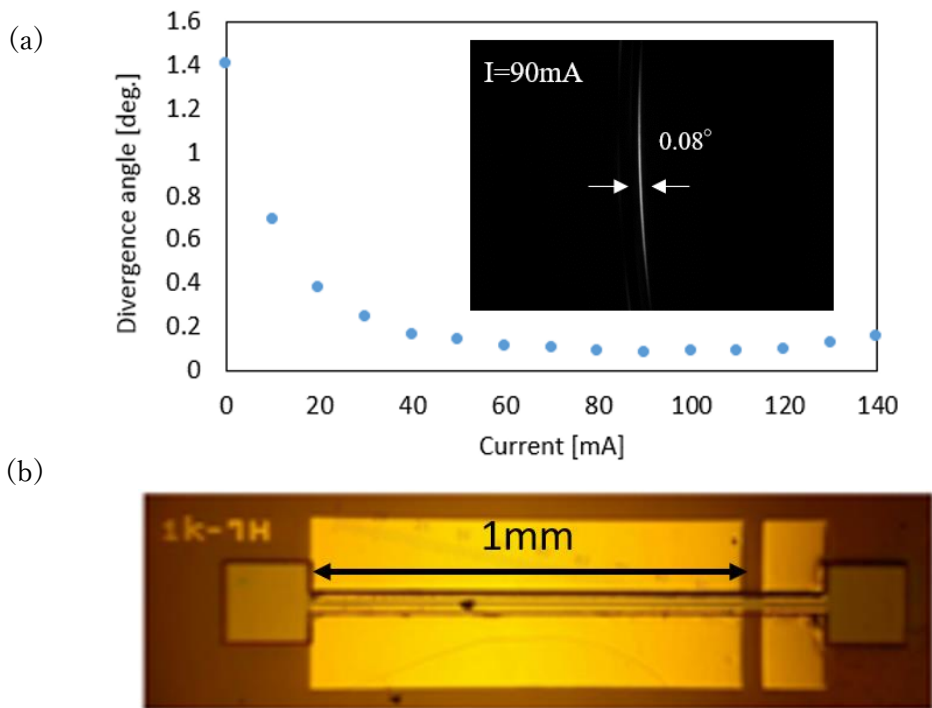


Fig.3-3 (a) Relationship between injection current and beam divergence angle of 1 mm long amplifier, (b) measurement device.

次に 1mm から 6mm 長までの増幅器を用いて FFP の測定を行った。なおデバイス作製に使用したウェハはカットオフ波長が 975nm で導波モードが抑圧されるように SCH 層の Al 組成が 0.7 に設計されている。Fig.3-3 の素子とは別の素子である。Fig.3-4 に各長さにおける FFP を示す。結合光波長は 953nm で電流値は 1~6mm までそれぞれ 90mA, 150mA, 200mA, 450mA の CW 電流を注入した。Fig.3-4(a)は 1mm 長素子の FFP を示している。左の図は 10 倍対物レンズを使用して FFP を観測した結果を示しており、垂直方向から約  $45^\circ$  の方向にビームが出射されている。10 倍対物レンズを用いる場合、CCD カメラの分解能が  $0.02^\circ$  程度しか取れないため、より厳密にビーム拡がり角を調べるため分解能が  $0.00389^\circ$  の光学系にて測定を行った。Fig.3-4(a)の右側のグラフおよび(b)~(d)の FFP は高分解能モードで測定を行った結果である。グラフは FFP 画像と中心部における強度プロファイルを示している。それぞれビーム拡がり角は  $0.071^\circ$  ,  $0.055^\circ$  ,  $0.038^\circ$  ,  $0.026^\circ$  という結果が得られ、素子長に対して拡がり角が狭くなっていることが確認できた。各素子長の回折限界は Fig.3-2 より、 $0.071^\circ$  ,  $0.036^\circ$  ,  $0.023^\circ$  ,  $0.012^\circ$  である。回折限界との比率は 1mm から順に 1.0 倍, 1.5 倍, 1.7 倍, 2.2 倍と素子長が長くなるにつれ回折限界から遠ざかる傾向が見られた。これは長い素子長に対して単一のプローブ経路で電流注入を行っていることが原因であると考えられる。この場合注入電流や発熱がプローブ付近に集中し、それが伝搬損失を生み出し、ビーム品質の劣化を引き起こしている可能性がある。また同チップ上の 10mm 長素子の FFP を Fig.3-5 に示す。結合光波長は 949nm で注入電流量は

750mA である。ビーム拡がり角は  $0.032^\circ$  で 6mm 長素子よりも広がった。この原因も同様に注入電流の不均一性によるものだと考えられるため、これらの結果から電流の均一化は高ビーム品質動作を得るうえで重要な課題であると言える。

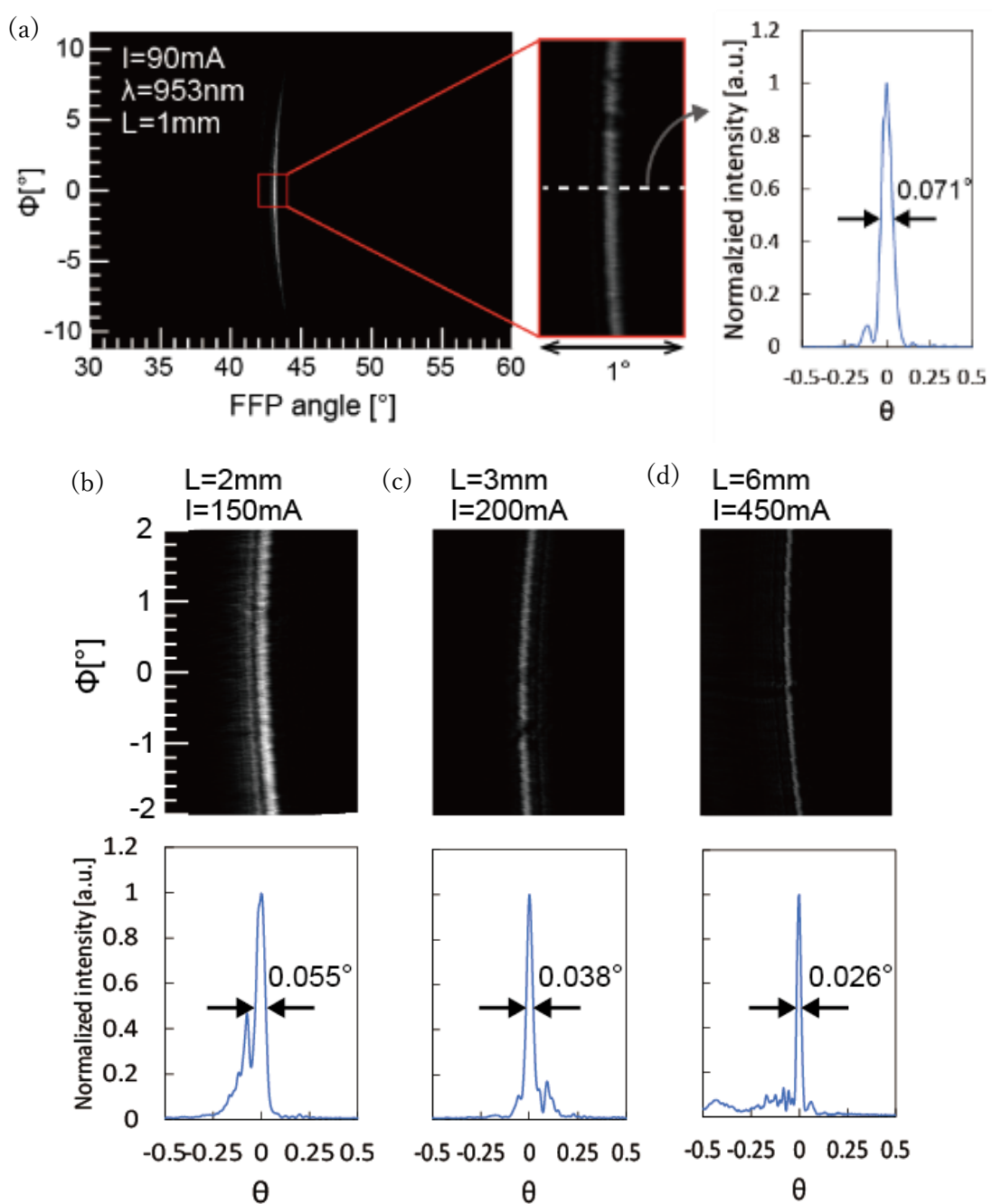


Fig.3-4 Far-field patterns for different amplifier length at  $\lambda = 953 \text{ nm}$  under CW operation. (a) – (d) 1, 2, 3, and 6 mm long amplifier respectively.

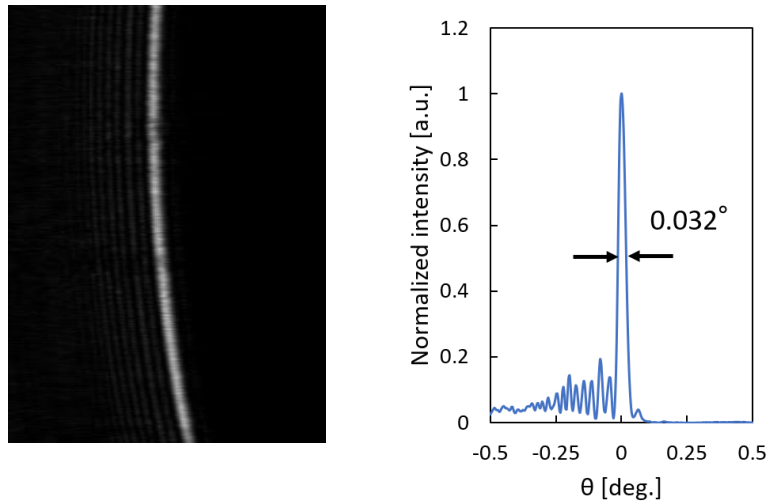


Fig.3-5 FFP and its profile of 10 mm long amplifier. Injection current is 750 mA and coupled wavelength is 949 nm.

次に Fig.3-4 の 6mm 長素子における FFP の実験値を理論値と比較した。理論値はフラウンホーファ回折積分式を用いて、放射光が素子長手方向に対して矩形に均一に出射されていると仮定してフーリエ変換を行った。Fig.3-6 はその比較画像を示しており、理論値の半値全幅は約  $0.001^\circ$  でピークより 20%の位置にサイドローブが見られた。一方実験値の半値全幅は理論値の約 2 倍で、またサイドローブはピーク値の 10%の位置に見られた。これは先述した通り、注入電流の不均一性によって実際の NFP 強度が均一になっていないからであると考えられる。今回の実験は増幅器の中央、結合領域より 3mm 先の位置にプローブを刺して電流注入を行ったため、Fig.3-7 に示すように増幅器の中央を起点として出射光強度が減衰していると仮定すると、そのフーリエ変換像は矩形波に比べてメインピークの幅が広がる代わりにリップルが小さくなるため、Fig.3-6 のような FFP が得られたと考えられる。つまり NFP 強度の均一化はビーム拡がり角を改善できる可能性があり、3.3 章にて改善の検討を行った。

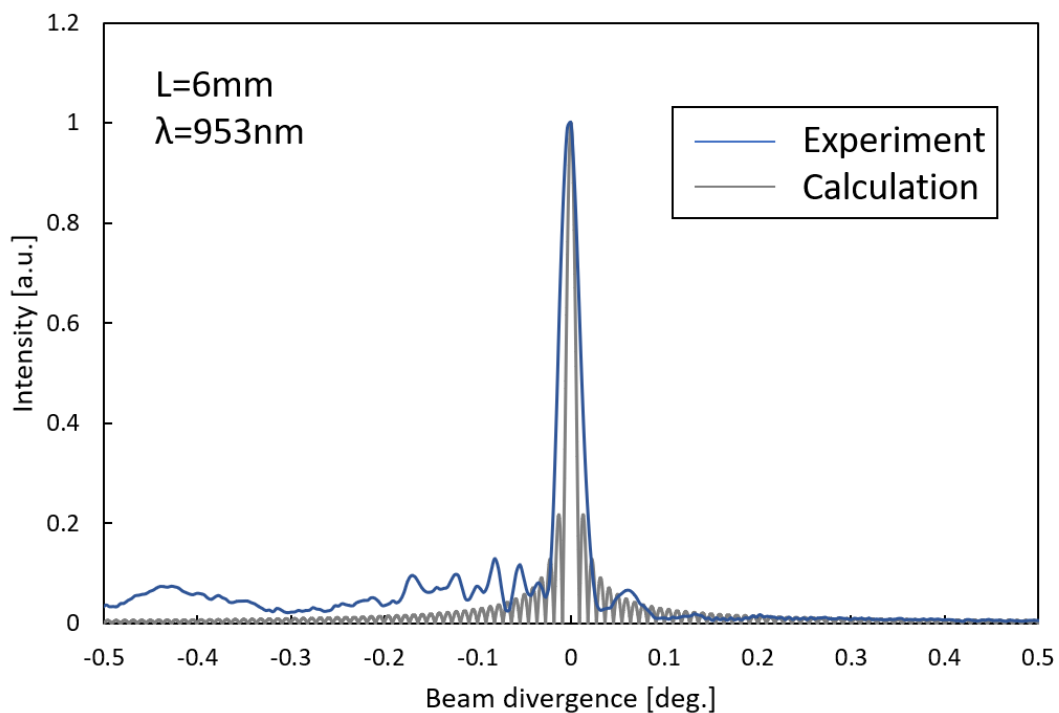


Fig.3-6 Calculation and measured results of FFP profile of 6 mm long amplifier.

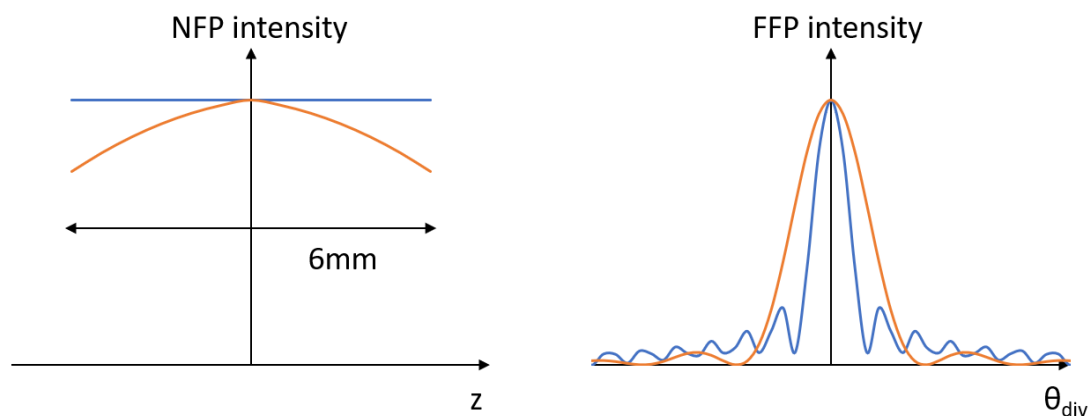


Fig.3-7 Schematic of the relationship between NFP and FFP.

### 3.3 注入電流均一化の検討

#### 3.3.1 不均一分布によるビーム分裂

3.2 章にて電流および発熱の均一化が重要課題であることを述べた。本章ではこの不均一性を改善するための検討を行う。まずは電流・発熱の不均一性によってもたらされるビーム分裂について測定を行った。Fig.3-8 に 2mm 長素子の FFP を示す。本素子は 850nm 帯

VCSEL ウェハ上で作製されており、結合光波長は 850nm である。このグラフでは注入電流が 250mA および 500mA 時の FFP 画像とそのプロファイルを示している。250mA 時は単一モード特性が得られているが 500mA 注入時はビームが分裂するように複数のラインが見られた。Fig.3-9 は同条件におけるスペクトルを示している。スペクトルは増幅器を動作させた状態でマルチモードファイバを素子の中央に 40° 傾けた状態で近接させることで測定した。250mA 注入時は SMSR30dB 以上の単一モードを示した。500mA 注入時はノイズが大きくなっているが SMSR20dB 以上の単一モード特性を示した。よって 500mA 注入時に見られるビームの分裂は多モード発振によるものではないと考えられる。本グループでは過去に屈折率分布をパラメータとした NFP の高速フーリエ変換の計算から、このビーム分裂の原因を解析している [3-1]。導波路の伝搬方向を  $z$  としたとき導波路内の屈折率分布  $n(z)$  を用いると導波路表面から出射される光の NFP の電界分布は次式で定められる。

$$E_{NFP}(z) = \exp[-jn(z)k] \quad (3.1)$$

これを高速フーリエ変換することで FFP の分布  $E_{FFP}(k \cdot Z/X)$  を求めることができる。その結果を Fig.3-10(a)~(c) に示す。各グラフは横軸を伝搬距離として上から屈折率分布、波数分布、電界分布を示している。一番下のグラフは横軸を放射角として上 3 つの関数を考慮した NFP のフーリエ変換、すなわち FFP を示している。計算は(a)~(c)いずれも電界分布は均一と仮定し、(a)では屈折率分布が均一の状態、(b)、(c)は導波路中心の温度が高いと仮定して屈折率分布を付けた状態を示している。このグラフの FFP の結果が示すように導波路間で大きな屈折率差があるとビームの分裂が多く見られることが分かる。Fig.3-8 の FFP の結果と比較すると 500mA の電流注入時は導波路中央と導波路端で大きな屈折率差が生じている可能性が高い。よって以上の実験結果および解析結果より、ビーム品質を向上させるためには排熱や注入電流の均一化が必要であることが分かる。

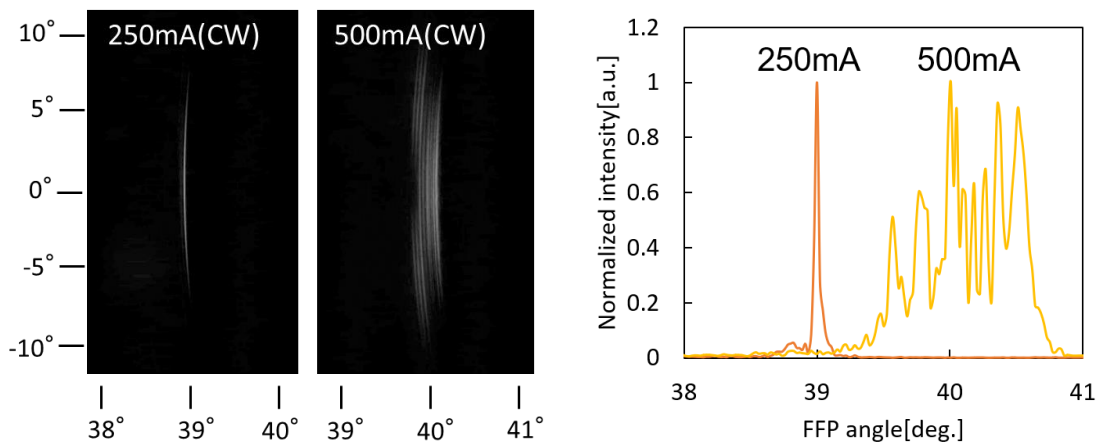


Fig.3-8 FFP and profile of 2 mm long amplifier. The wavelength of the coupled light was 850 nm, and the injection current was 250 mA and 500 mA, respectively. Beam splitting was observed due to excessive current injection.

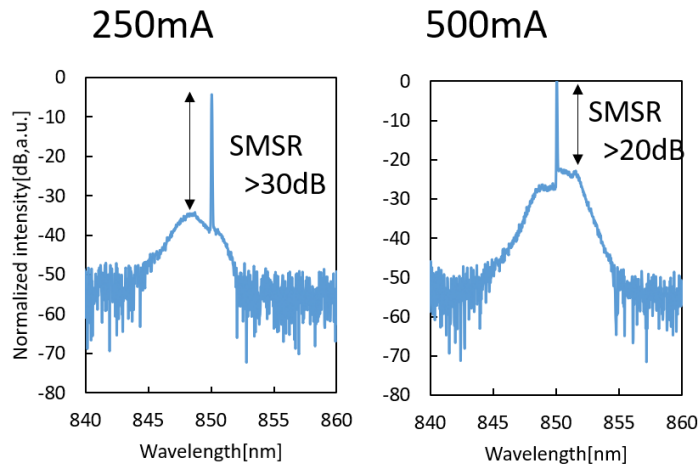


Fig.3-9 The spectrum at the center of the amplifier. The current and the wavelength are the same as in Fig. 3-6.

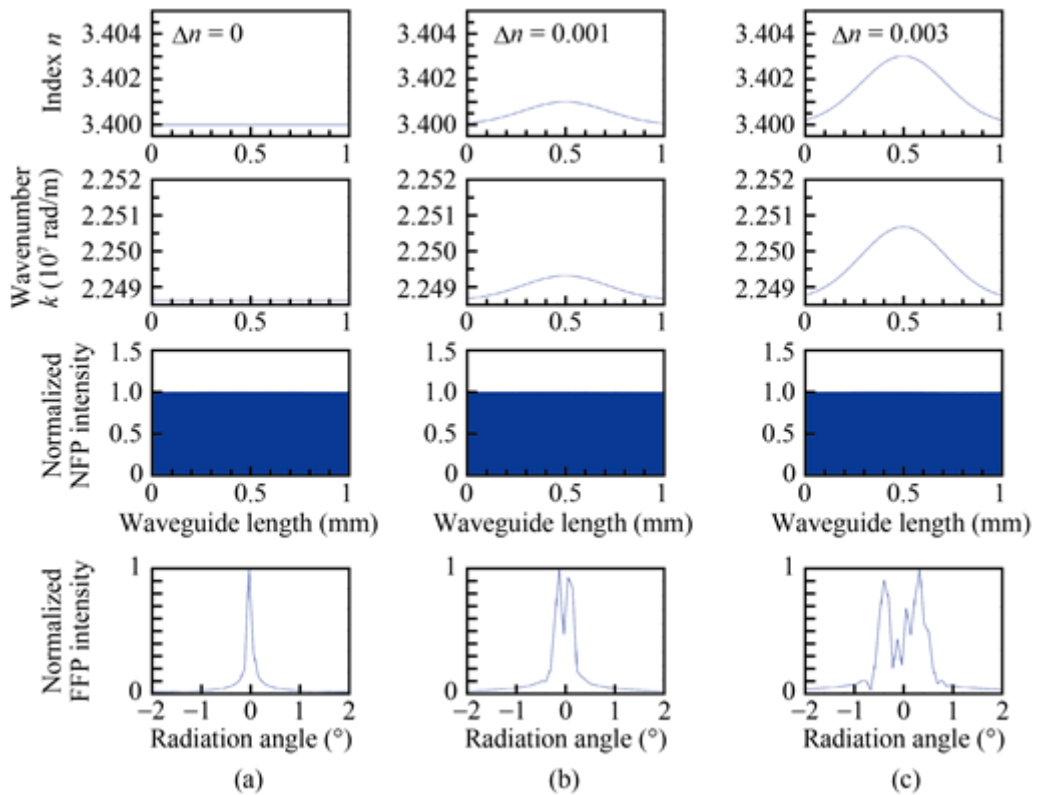


Fig.3-10 Calculation of the beam splitting due to the index distribution. They show the index, the wavenumber of light, and the field intensity in the waveguide as a function of waveguide length, and the FFP beam profile. They are calculated under the condition that the index change at peak is (a) 0, (b) 0.001, and (c) 0.003. [3-1]

### 3.3.2 ビーム品質改善のための検討

本研究では注入電流均一化によるビーム品質改善の取り組みとして下記の2つを行った。

- (1)積層プローブによる多点接触
- (2)ワイヤボンディング配線

#### (1)積層プローブによる多点接触

まず初めに積層プローブを用いることで注入電流の均一化を図った。Fig.3-11 に積層プローブを用いた測定系の写真を示す。測定はカットオフ波長 862nm の VCSEL ウェハを用いて行った。測定素子は素子長 6mm で電極厚さは約 3,000 Å である。積層プローブは横幅 5mm、プローブ間のピッチ幅は 150 $\mu$ m である。比較のために積層プローブを用いる場合と単一プローブで電流注入する場合の2通りで実験を行った。Fig.3-12 に測定結果を示す。同じ素子に対して、(a)は素子の中央に単一プローブを配置し電流注入したときの FFP 画像およびプロファイルで、(b)は積層プローブを用いた時の結果である。結合光波長は両者とも 850nm で、電流値は FFP の拡がり角が最も狭くなる値に固定した。(a)の場合、注入電流 580mA 時に拡がり角が最も狭くなり、拡がり角は 0.024° であった。一方(b)の場合は 480mA の電流注入時、0.015° の拡がり角が得られ、単一プローブを用いる場合と比較して拡がり角が約 40%減少した。回折限界は 0.012° であるため、これは回折限界の約 1.25 倍の拡がりである。またビーム拡がり角が最も細くなる電流値に 100mA の差が出た。これは(a)の場合プローブ付近に電流の分布が生じるため、結合領域付近に十分なキャリアを供給するまでにより多くの電流値を要したからであると考えられる。以上の結果より、積層プローブを用いて多点でコンタクトすることはビーム品質の改善に有効であることが分かった。

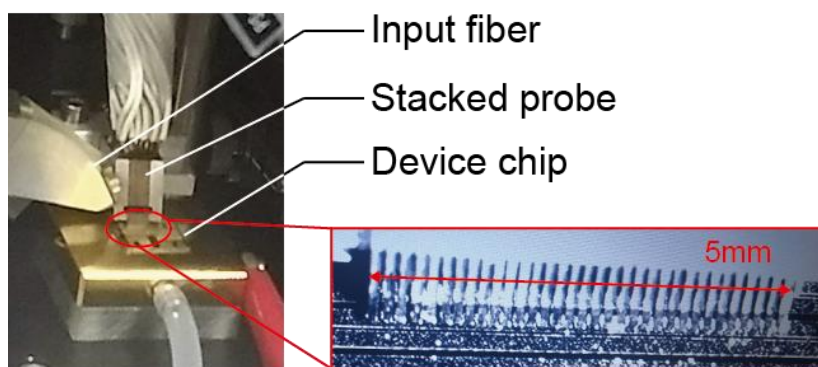


Fig.3-11 Measurement setup using stacked probe

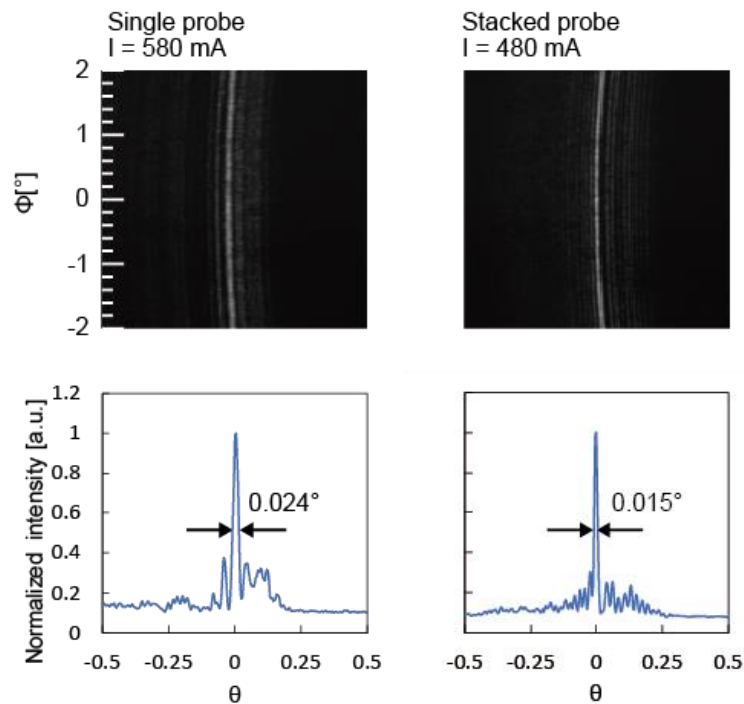


Fig.3-12 FFPs of 6 mm long amplifier on 850 nm band VCSEL wafer. A single probe (left) and a stacked probe (right) were used at  $\lambda = 850$  nm.

## (2) ワイヤボンディング配線

(1)で示した多点プローブによる電流注入はケーブル径が太くなり配線が複雑になるという欠点がある。そこで Au ワイヤを用いてより簡易的な多点接触構造を作ること検討した。ワイヤボンディング構造の概略図を Fig.3-13 に示す。(a)は横方向から見た時の電極の構成を示している。従来我々のグループでは電極蒸着時にパッド部の厚さは約  $3,000 \text{ \AA}$  になるように Au を蒸着してきたが、ワイヤボンディングを行う際は超音波を印加する必要がある、電極厚さが  $3,000 \text{ \AA}$  の場合、電極が破損する。これまでの実験より安定してワイヤボンディングを行うためには最低でも電極厚さが  $1 \mu\text{m}$  必要であることが分かり、今回の実験では Au を  $1.3 \mu\text{m}$  蒸着し、デバイスを作製した。(b)は上面の概略図を示している。提案構造は導波路の各位置に Au ワイヤを接続し、それを1つの電極パッドに集める構造である。Au ワイヤ径は  $50 \mu\text{m}$  で電極厚さより十分に大きいため抵抗が低い。そのため Au ワイヤを経由して電流注入することで、単一プローブを直接コンタクトさせるよりも注入電流が均一化されることが期待できる。Fig.3-14 にワイヤボンディング構造を有する 10mm 長 VCSEL 増幅器の上面写真を示す。本素子は Fig.3-5 と同様の VCSEL ウェハを用い、素子長、アパチャ幅も同様である。Au ワイヤは約  $400 \mu\text{m}$  刻みで 28 本配線した。Fig.3-15 に 950nm の種光源を結合させ、CW 電流を 0.6A から 1A まで 0.1A 刻みで増加させたときの FFP のプロファイルを示す。(a)はワイヤボンディングを行った素子、(b)はボンディングを行っていない

い素子である。(b)の素子は中央に単一プローブを配置して電流注入を行った。(a)の結果より 0.6A の電流注入時に最小ビーム拡がり角  $0.028^\circ$  が得られた。ボンディングを行っていない素子と比較しても拡がり角の観点ではあまり違いが見られなかった。しかし(a),(b)の電流増加による FFP 角度のシフト量を比較すると、ボンディングを行った(a)素子では  $1.9^\circ / A$ 、ボンディングを行っていない(b)素子では  $2.2^\circ / A$  であった。シフト量が  $0.3^\circ / A$  だけ減少したことが確認できた。これは単一プローブで電流を注入すると Fig.3-10(c)のように素子中央に発熱が集中するため、電流値に対する発熱量が大きくなるからだと考えられる。また(b)の結果は 0.7A 以上の電流注入時に熱飽和による光強度の減衰が見られており、この観点からもワイヤボンディングを用いることで発熱の均一性が取れていることが分かる。

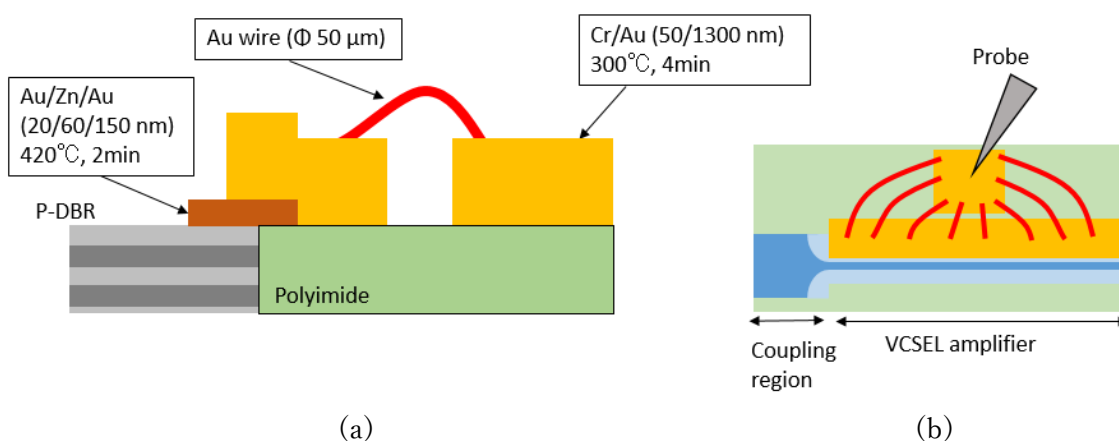
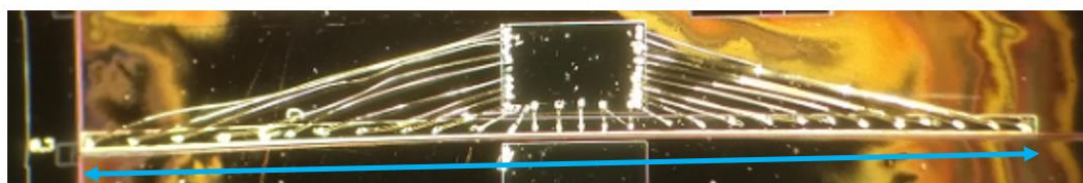


Fig.3-13 Schematic of wire bonding structure. (a) Cross section and (b) top view.



10 mm long VCSEL amplifier

Fig.3-14 Top view of fabricated 10 mm long amplifier with wire bonding.

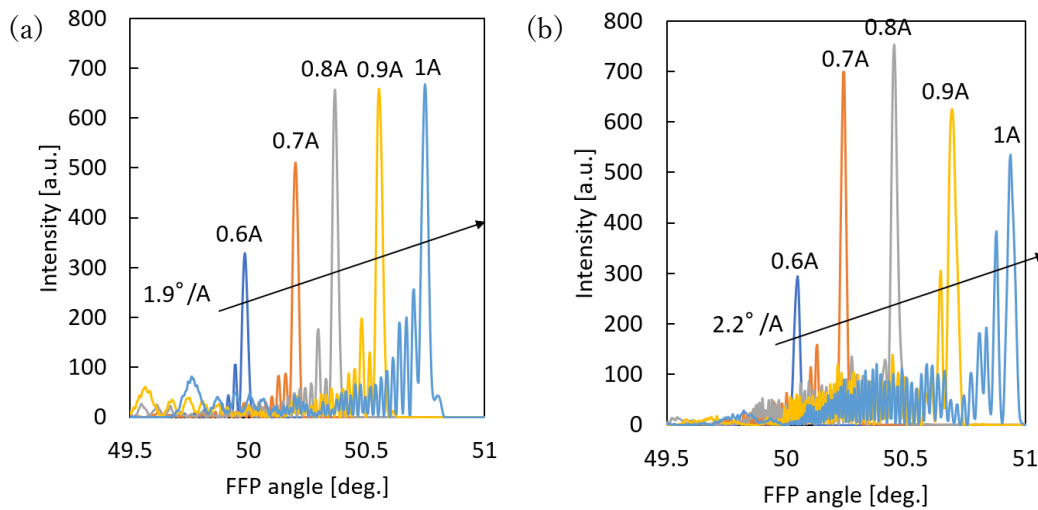


Fig.3-15 FFP of 10 mm long amplifier for different injection current from 0.6 A to 1 A in 0.1 A step when coupled input wavelength of 950 nm, (a) bonding device, (b) single probe used.

最後に本章で得られたビーム拡がり角の結果を Fig.3-16 にまとめた。素子長を横軸にとると 6mm 長までは長尺化によってビーム拡がり角が狭くなること示された。一方で回折限界との差は広がった。解析や実験の結果から素子長が長くなるほど注入電流や発熱の均一性が悪くなり、それが原因であると考えられる。今回は注入電流の均一に着目したが、ヒートシンクをボンディングした排熱構造などを取り入れることでさらにビーム品質が改善できる可能性がある。

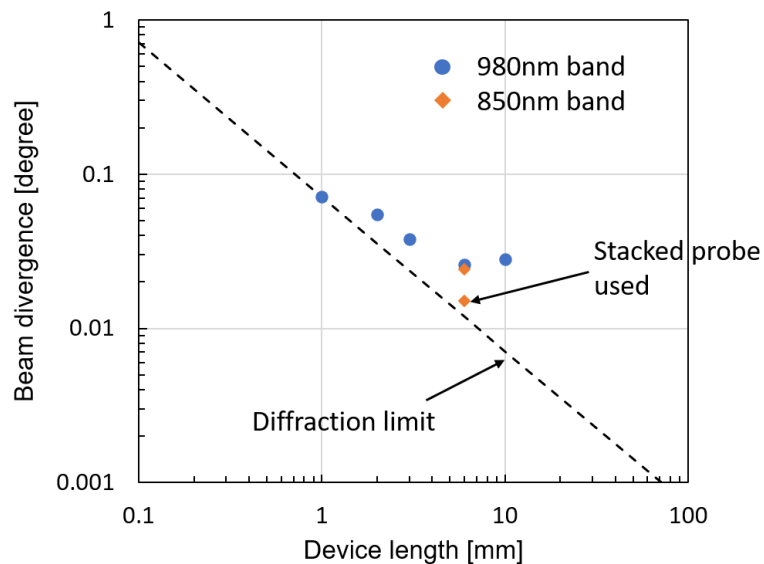


Fig.3-16 Measured beam divergence as a function of the amplifier length. Dashed line is calculated diffraction limit.

## Reference

[3-1] 近藤圭祐, 顧曉冬, 中濱正統, 許在旭, 小山二三夫, “多層膜スローライト導波路ビーム偏向器を用いた LiDAR システムの検討(II)--2次元ビームスキャンの実証,” 第 65 回応用物理学会春季学術講演会, 18a-B203-9, (2018).

## 第4章 長尺増幅器によるビーム掃引

### 4.1 VCSEL 増幅器によるビーム掃引の原理

VCSEL 増幅器によるビーム掃引の概略図を Fig.4-1 に示す。我々が提案する VCSEL 増幅器は増幅器内の伝搬光の一部を随時表面から放射させることで光を取り出す。このとき放射する光の角度はスネルの法則によって決まるため、空気中の屈折率を  $n_{air}$ 、導波路中の屈折率を  $n_{wg}$ 、増幅器内の伝搬角度を  $\theta_i$  とすると、放射角度  $\theta$  は、

$$n_{air} \sin \theta = n_{wg} \sin \theta_i \quad (4.1)$$

と求まる。  $n_{air} = 1$  と置き、これを变形させると、

$$\begin{aligned} \sin \theta &= n_{wg} \sin \theta_i \\ &= n_{wg} \sqrt{1 - \cos^2 \theta_i} \end{aligned} \quad (4.2)$$

ここでカットオフ波長における波数を  $k_c$  と置くと、Fig.2-2 より  $\cos^2 \theta_i$  は  $\cos^2 \theta_i = k_c/k$  と置けるから式(4.2)は次のように变形される。

$$\begin{aligned} \sin \theta &= n_{wg} \sqrt{1 - \left(\frac{k_c}{k}\right)^2} \\ &= n_{wg} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} \end{aligned} \quad (4.3)$$

ゆえに放射角度は、

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ n_{wg} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2} \right\} \quad (4.4)$$

となる。式(4.4)より放射角度は入力波長に依存するため、カットオフ波長より短い領域で入力波長を掃引することで増幅器から斜め方向に対するビーム掃引が可能になる。ここでカットオフ波長を 860nm、導波路の屈折率を 3.5 と置いた時の偏向特性を計算すると Fig. 4-2 のようになる。この図では結合光波長をカットオフ波長から約 30nm 振れば垂直方向から水平方向まで非常に幅広い範囲でビーム掃引が可能であることが示されている。しかし実際は、デバイスをアクティブ動作させる場合は増幅器の発振成分を結合光で抑圧する必要がある。そのため実際に掃引できる波長帯は VCSEL ウェハの PL 波長によって制限される。しかし適切に増幅器の発振を抑圧した状態でビーム掃引ができれば、パッシブのスローライト導波路では実現が難しい高出力ビームスキャンが可能になり、LiDAR などの中・遠距離測距が可能なデバイスを作ることができる。

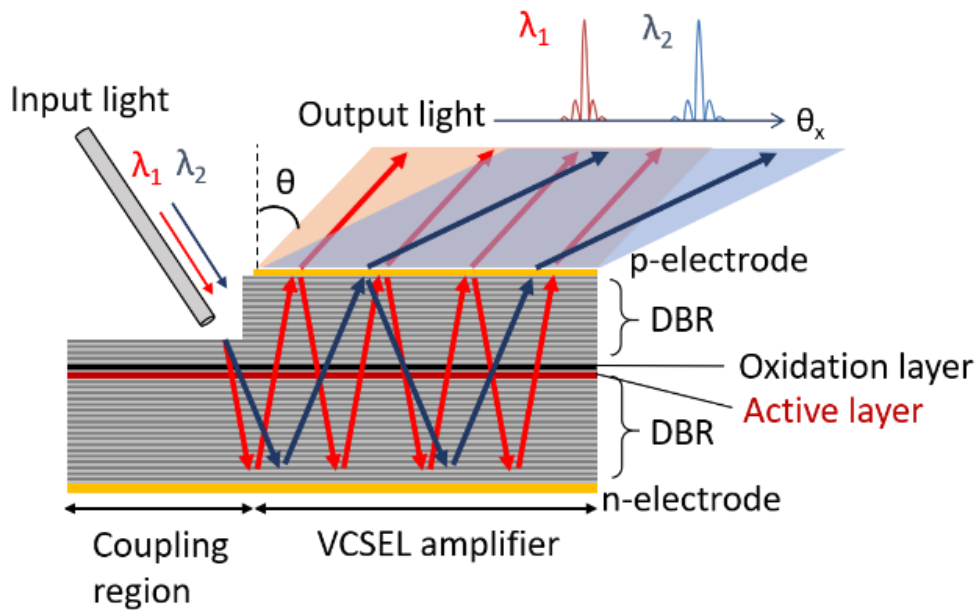


Fig.4-1 Schematic of beam steering principle

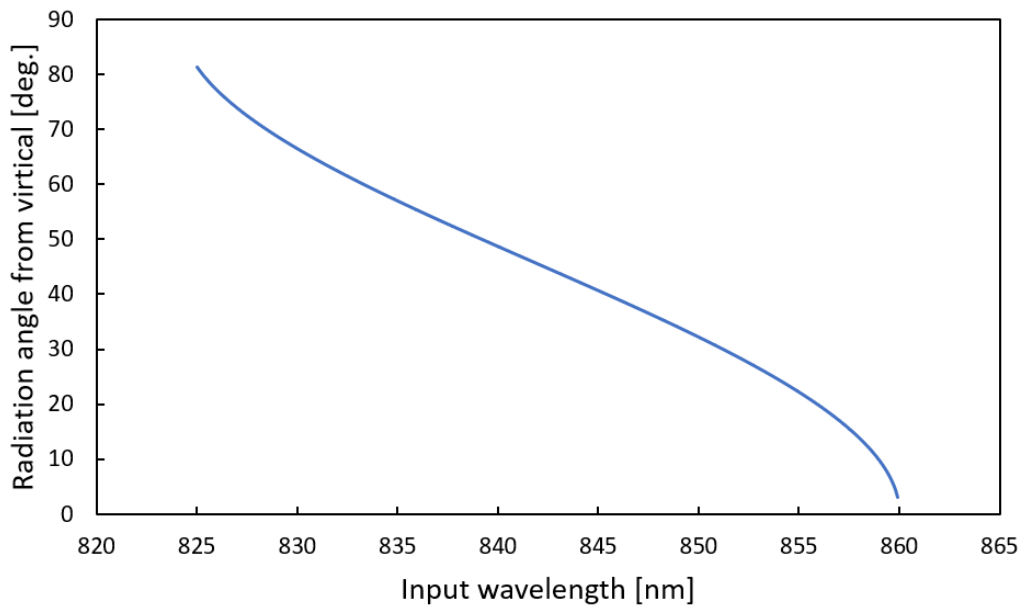


Fig.4-2 Calculation of beam deflection angle when cutoff wavelength is 860 nm

## 4.2 ビーム掃引特性の評価方法

本研究ではビーム掃引の特性を解像点数という指標で評価する。Fig.4-3 に示すようにデバイスが振れるビームの最大掃引範囲を $\theta_{max}$ 、ビーム拡がり角を $\theta_{div}$ と置くと、解像点数は

$$N = \frac{\theta_{max}}{\theta_{div}} \quad (4.5)$$

となる。これは掃引範囲の中でどれだけの細かさでビームを振れるかを表しており、解像点数が高いほど高解像なビームスキャンが可能であることを意味する。ここで偏向範囲を  $5^\circ$  ,  $10^\circ$  ,  $20^\circ$  と仮定し、3章の回折限界の式から、素子長に対する解像点数を計算すると Fig.4-4 のようになる。仮に回折限界を維持したまま  $10^\circ$  の偏向角でビームを触れる場合、1mm 長素子で解像点数 150 点、6mm で解像点数 1,000 点を得られる見込みがある。

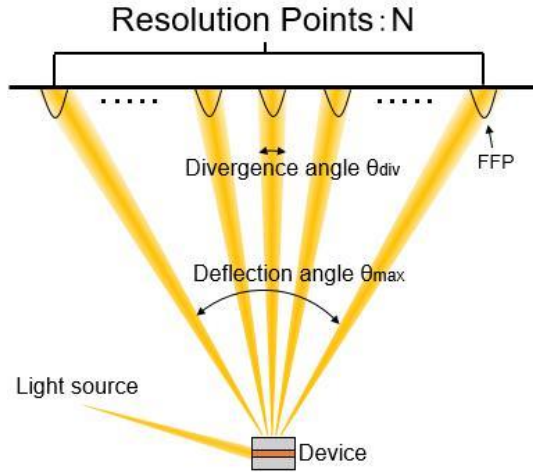


Fig.4-3 Definition of resolution points

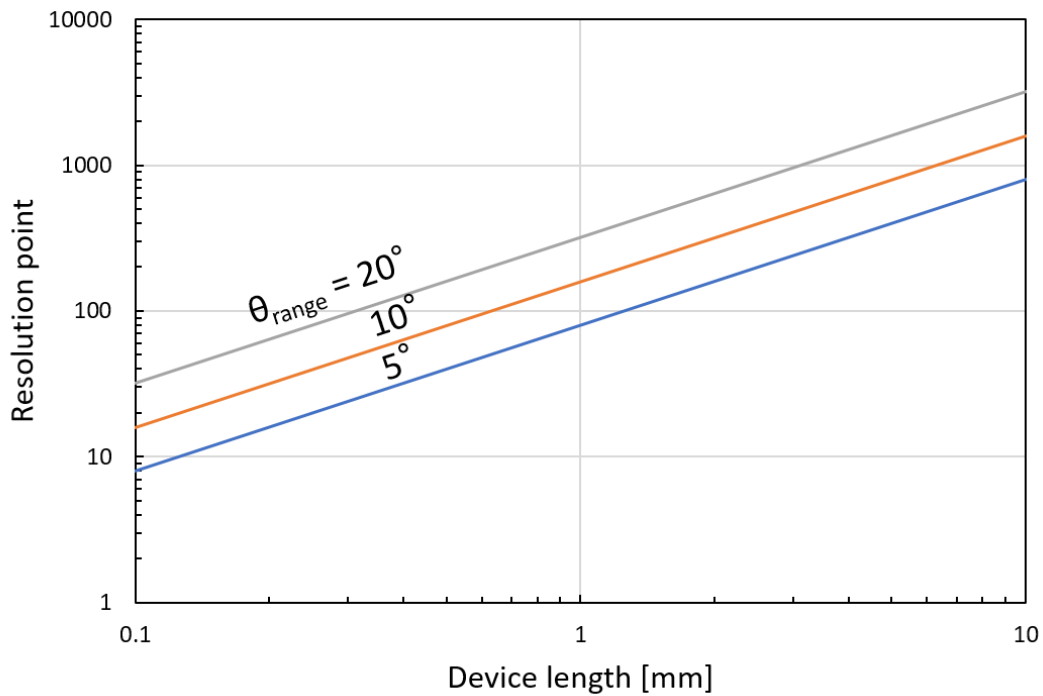


Fig.4-4 Calculation of resolution points

### 4.3 VCSEL 増幅器によるビーム掃引特性

素子長に対してどれだけの解像点数を得られるかを調べるために、素子長が 3mm, 6mm の 2 種類のデバイスを用いて実験を行った。Fig.4-5 に 3mm 長素子のビーム掃引特性を示す。このデバイスはカットオフ波長 862.7nm, 上部 DBR が 21 ペアの VCSEL ウェハを使用した。グラフは波長を 839nm~855.5nm まで 0.5nm 刻みで変化させたときの FFP を重ね合わせている。電流値は単峰性のビームが得られる最大の電流値として 250mA で固定した。偏向角範囲  $27^\circ$ , 波長分解能  $1.6^\circ/\text{nm}$  でビームを振ることができた。Fig.4-6 は  $n_{wg} = 3.5$  として、式(4.4)の偏向角理論計算に実験値をプロットしたグラフである。理論値通りの偏向特性が得られていることが確認できる。Fig.4-5(b)のプロファイルを見ると短波長側(

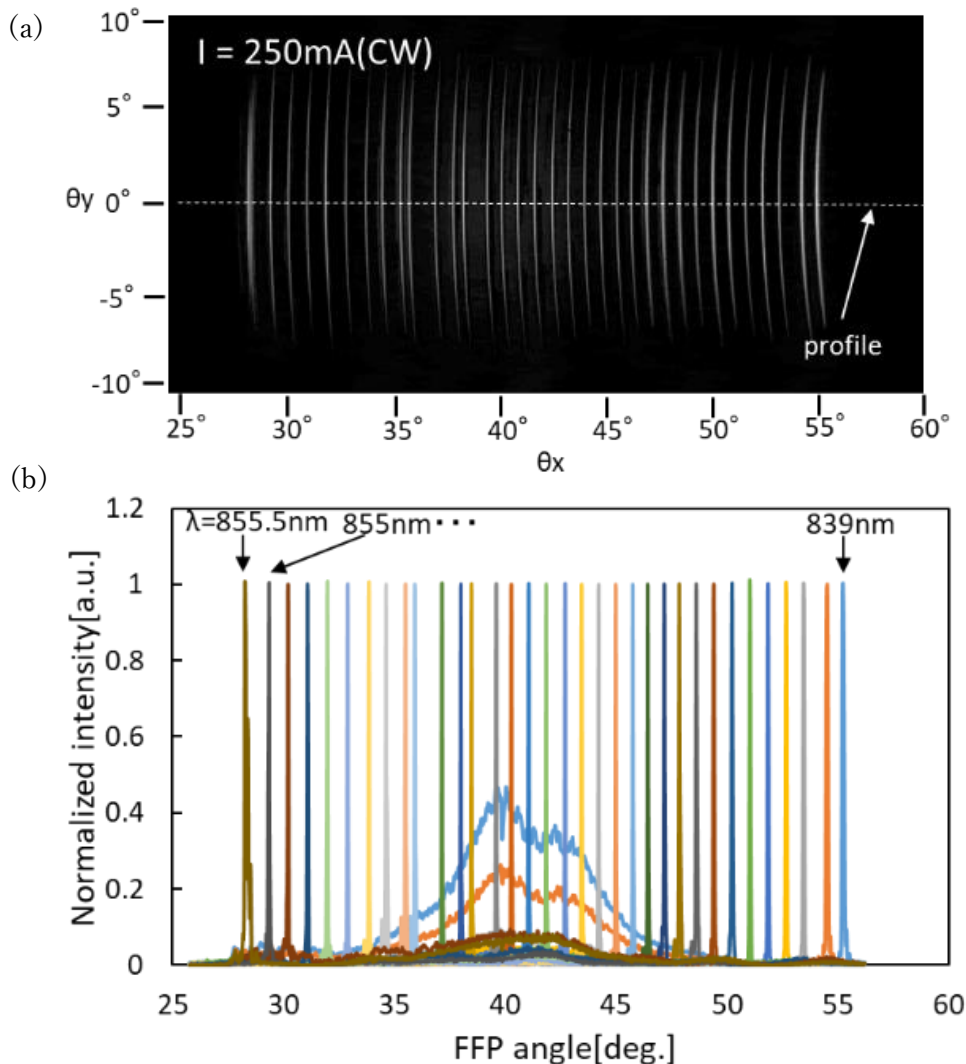


Fig.4-5 Beam scanning characteristics of 3 mm long amplifier when wavelength is changed from 839 nm to 855.5 nm in 0.5 nm steps, (a) FFP overlay image, (b) profile

839~840nm)および長波長側(855.5~845.5nm)結合時に偏向角度  $34^{\circ} \sim 48^{\circ}$  の範囲に結合光以外の成分が見られた。これは増幅器自身の発光成分である。本増幅器はアクティブデバイスであるため、結合光の増幅特性を得るためには結合光の波長を PL 波長に合わせて、増幅器の発振成分を抑圧する必要がある。PL 波長から外れた場合、増幅特性は得られないため、伝搬光は実質パッシブ動作による伝搬となる。また増幅器成分の放射角度から 250mA の電流注入時は 852.5nm~843.5nm の範囲が PL 波長に相当すると言える。

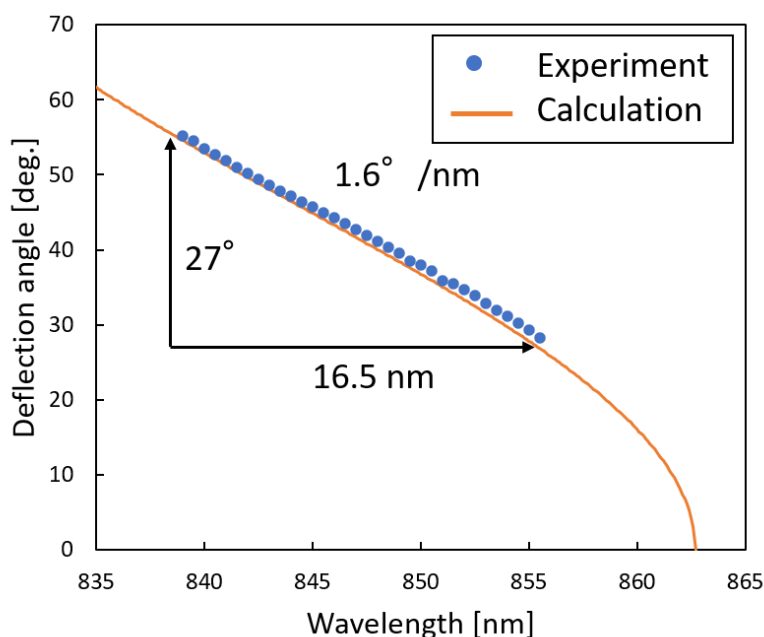


Fig.4-6 Calculation and experiment result of the deflection angle as a function of the input wavelength.

次に各波長におけるビーム拡がり角を Fig.4-7 にプロットした。この図が示すように掃引範囲内でビーム拡がり角に差が出た。これは先述したとおり、PL 波長から外れた波長での動作は十分に利得が得られず減衰するため、ビーム品質が劣化するからである。ここで図中に示してあるようにビーム拡がり角が  $0.04^{\circ}$  以下の領域とそれ以外の領域を破線によって分けると、狭ビーム領域は 844.5~851.5nm となり PL 波長帯とほぼ一致している。そのため狭いビーム拡がり角でビーム掃引できる範囲は PL 波長によって限定されることが分かる。また結合波長によって拡がり角が大きく異なるため、解像点数の計算はより精度を高めるために、拡がり角が近い波長どうしで式(4.5)の計算を行った。その結果、本素子の解像点数は 250mA 動作時で約 590 点と見積もられる。また最もビーム拡がり角が小さくなるのは波長 846nm 時  $0.032^{\circ}$  であった。3mm 長における回折限界は約  $0.02^{\circ}$  であるため、回折限界の 1.6 倍であった。回折限界により近い拡がり角を得るためには 3 章で述べたように多点コンタクトの構造や排熱を行う必要がある。それによってさらに解像点数を上げることができる。Fig.4-8 は結合光波長 850nm 時の本素子の CW 動作下における I-L 特性を示しており、ビーム掃引条件では 18mW の光出力が得られた。

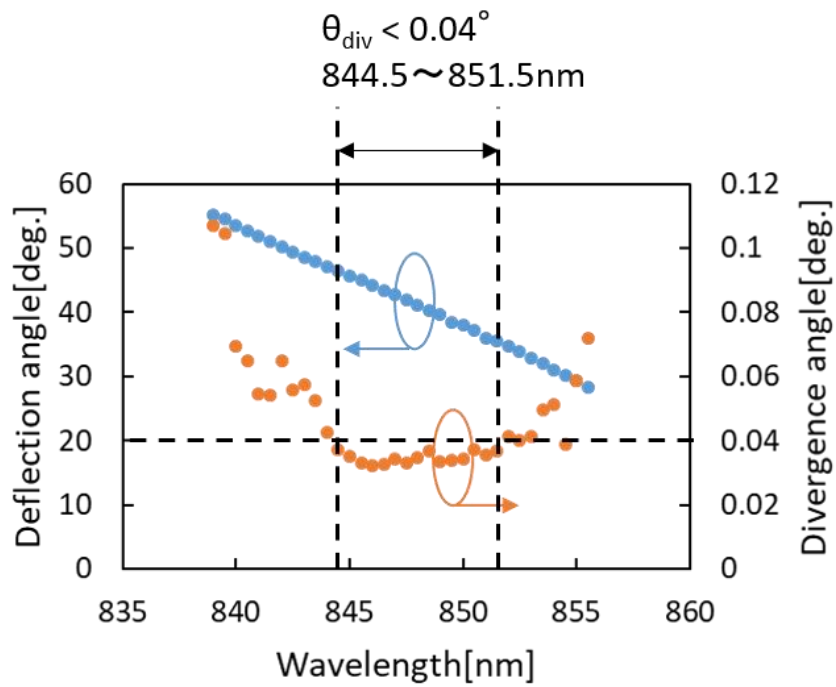


Fig.4-7 Deflection angle and divergence angle as a function of input wavelength

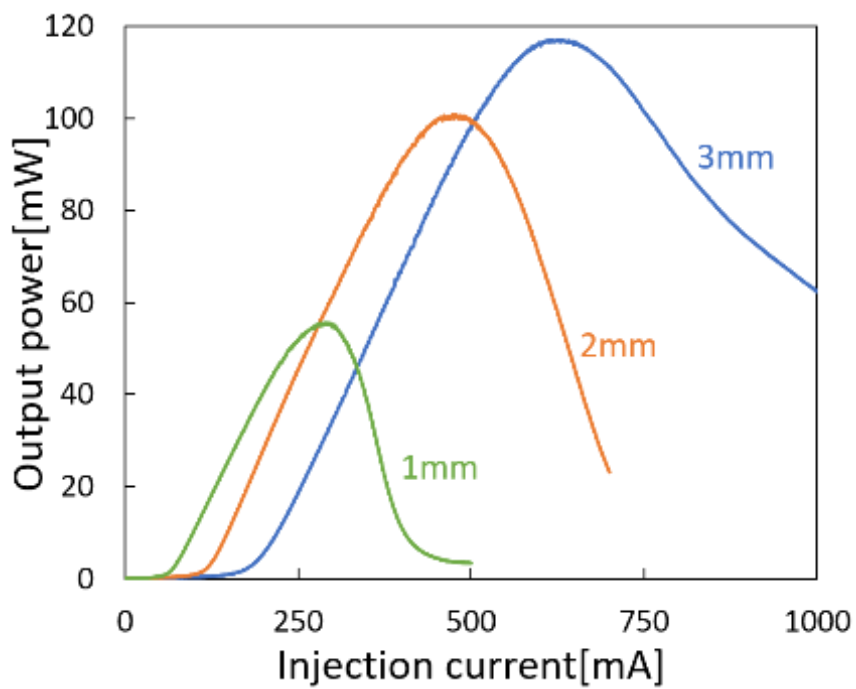


Fig.4-8 I-L characteristics under CW operation at 850 nm wavelength coupling.

次に 6mm 長の増幅器の評価を行った。本素子はカットオフ波長が 855nm, 上部 DBR が 19 ペアの VCSEL ウェハを用いて作製した。Fig.4-9 にビーム掃引特性を示す。

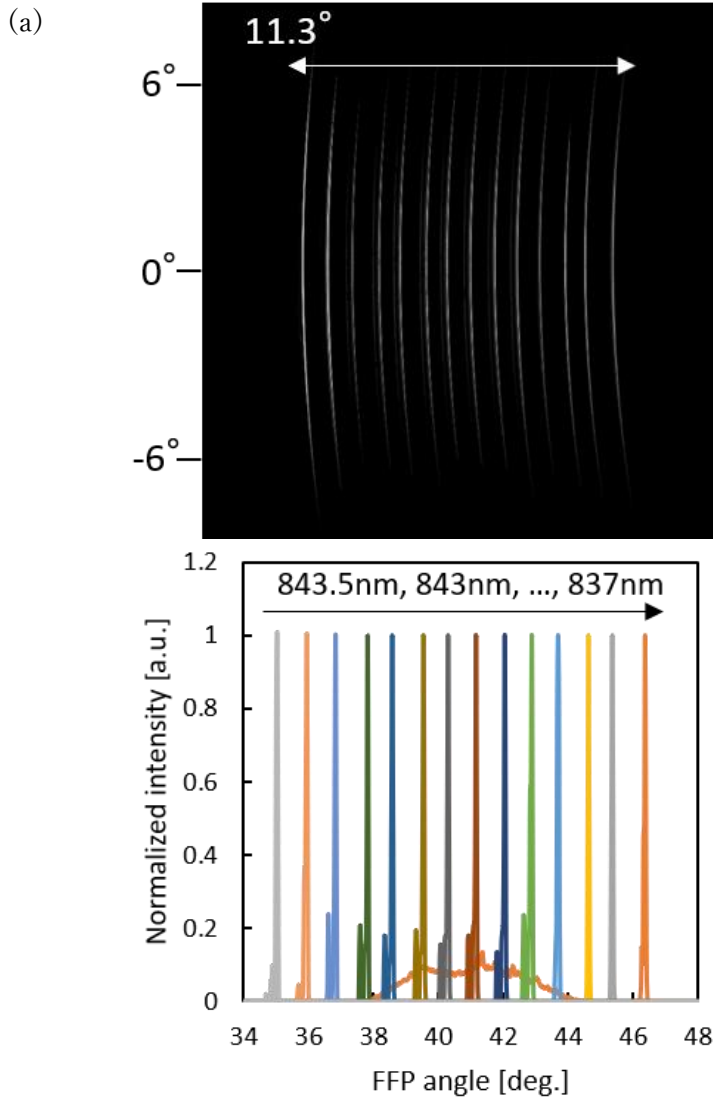


Fig.4-9 Beam scanning characteristics of 6 mm long amplifier when wavelength is changed from 837 nm to 843.5 nm in 0.5 nm steps, (a) FFP overlay image, (b) profile

注入電流は 500mA で結合光波長は 837nm~843.5nm である。 Fig.4-10 が示すように波長掃引範囲は 843.5nm~837nm の 6.5nm で、偏向角は 11.3° であった。波長をより短波または長波側に動かしたとき、増幅器の発光成分が支配的になってしまい、ビーム掃引を行うことができなかった。よってビームスキャンの結果は Fig.4-11 のようになった。本素子の諸特性を解析すると、 Fig.4-12 に示すように結合光波長 841.5nm 時に最小ビーム拡がり角 0.017° を得た。これは回折限界の約 1.5 倍にあたる。本実験は単一のプローブを用いたが、3mm 長の素子よりも回折限界に近い値が得られた。本素子は電極パッドの厚さを 1.5 $\mu$ m としており、 Fig.4-5 の 3mm 長素子の 5 倍ほど厚い。よって注入電流の均一性が良くなり、単一プローブでも 3mm 長より両特性が得られたと考えられる。 Fig.4-13 は結合光

波長 841nm 時の I-L 特性を示しており、ビーム掃引実験と同条件の 500mA 時には 155mW の光出力が得られた。

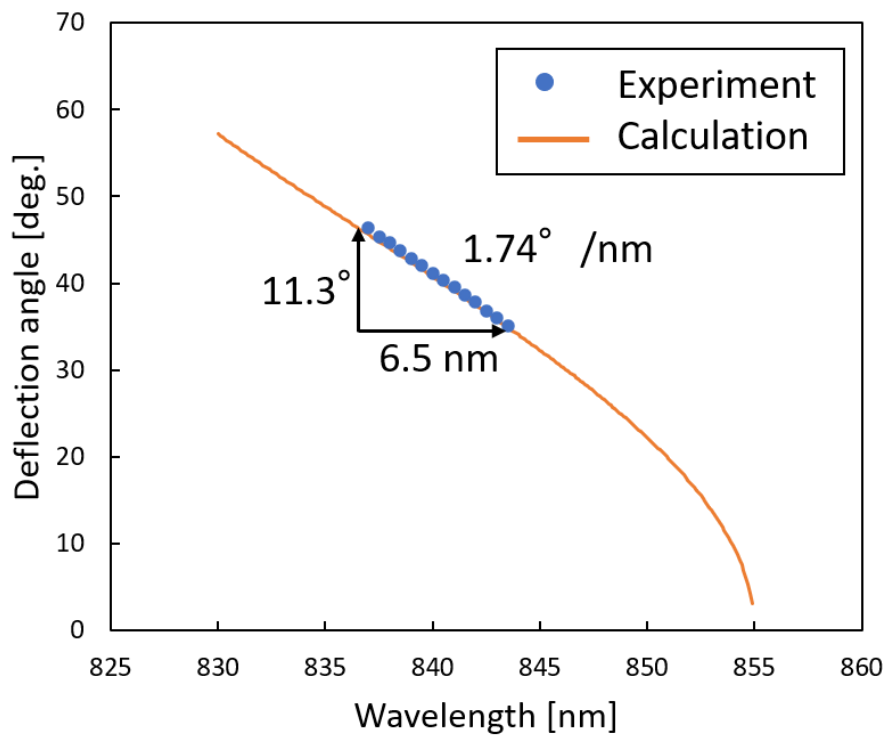


Fig.4-10 Calculation and experiment result of 6 mm long VCSEL amplifier

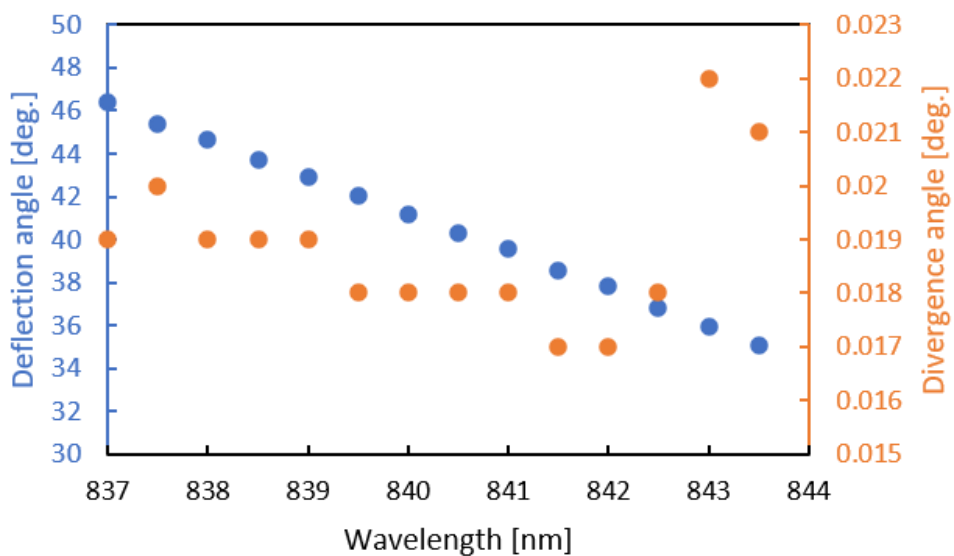


Fig.4-11 Beam steering characteristics of 6 mm long amplifier

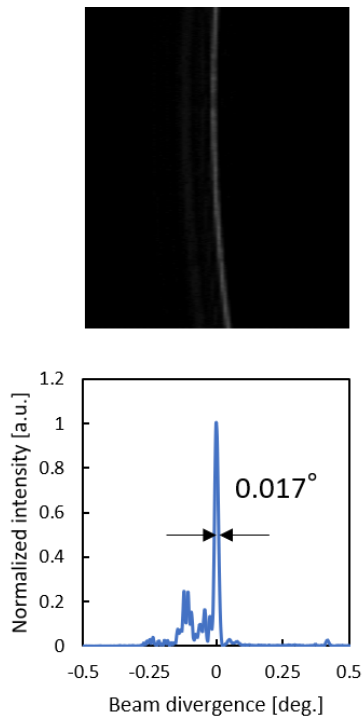


Fig.4-12 FFP when 841.5nm seed light and 500 mA current are injected into 6 mm long amplifier

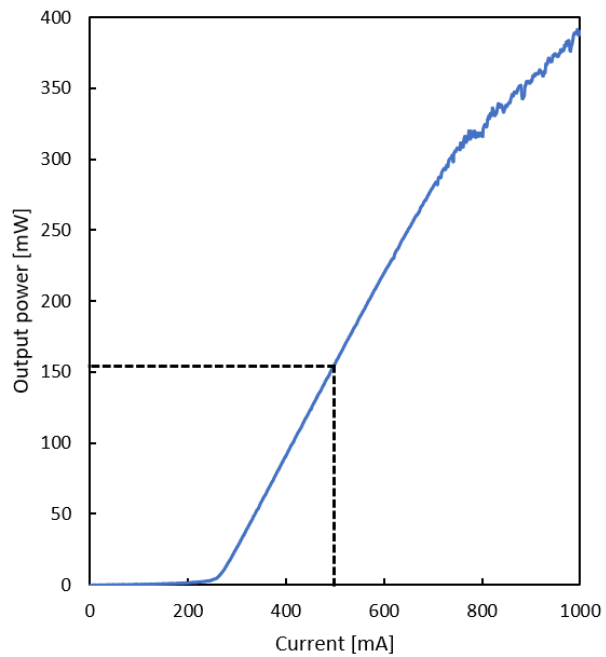


Fig.4-13 I-L characteristic of 6 mm long amplifier with wavelength of 841 nm under CW operation.

解像点数は Fig.4-11 の結果より 597 点と見積もられる。本デバイスは偏向角を広く取れなかったため 3mm 長素子と同程度の解像点数しか得ることができなかった。次に 6mm 長素子の VCSEL ウェハを計算モデルとして、ビーム拡がり角の波長依存性を調べた。Fig.4-14 は計算結果を示している。本計算は利得ピークが上部 DBR の反射率に対してしきい値となるようにシートキャリア密度と光閉じ込め係数を設定し、材料利得係数と光閉じ込め係数の積から反射損を引くことで利得スペクトル(Fig.4-14 灰色線)を算出した。この時の負の利得を伝搬損失の係数として、NFP の強度は指数関数的に減少するとみなした。また FFP はローレンツ関数として近似でき、FFP の半値全幅の計算結果を図中の黒線に示した。この図が示すように利得ピーク付近のおよそ 4nm の帯域で半値全幅が約 0.012° になっており、利得帯域から外れると急激に発散角が広がった。Fig.4-11 の実験値と比較すると狭ビーム出射帯域が微妙にずれているが、計算値と近い傾向を示している。このずれは、電流注入に伴う温度上昇による屈折率変化および利得スペクトルのシフトの影響によって起きた誤差であると考えられる。また長波長側の発散角の変化量は短波側より大きい、利得ピークに対して長波側の利得スペクトルの減少量が短波側よりも急峻であることに起因する。

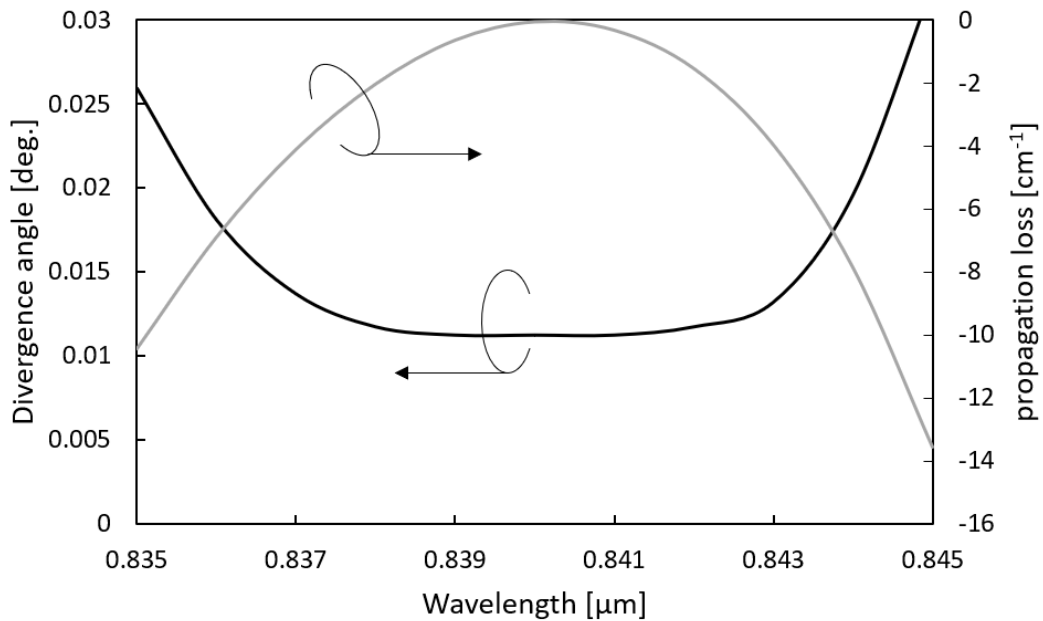


Fig.4-14 Calculation of divergence angle of 6 mm long VCSEL amplifier (black line) and that of gain spectrum under threshold condition (gray line).

6mm 長素子においてスキャン範囲が狭まった原因を考える。ここで結合光波長が PL 波長から離れたときの FFP の様子を 3mm 長, 6mm 長の両素子で見ていく。Fig.4-15 は 6mm 長の素子に 836.5nm の種光源を結合させて 500mA の電流を注入したときの FFP プロファイルと, 3mm 長の素子に 839nm の種光源を結合させて 250mA の電流を注入したときの FFP プロファイルを示す。なお ASE 成分のピークが 1 になるように各々規格化している。この図から分かるように 6mm 長素子を作成したウェハの利得帯域が 3mm 長のものよりも短い。ASE の半値全幅を比較すると, 6mm 長素子は 4.6nm, 3mm 長素子は 6.0nm であった。よって 6mm 長素子の偏向角が広く取れなかった原因は PL 波長の形状に起因していると考えられる。また結合光波長のピークと ASE 波長のピークを比較すると, 6mm 長素子の方が ASE が支配的になっている。これは素子が長尺になるにつれスローライト伝搬する ASE 出力も増加するためである。よって長尺素子の方がより結合光波長の自由度が下がると考えられる。

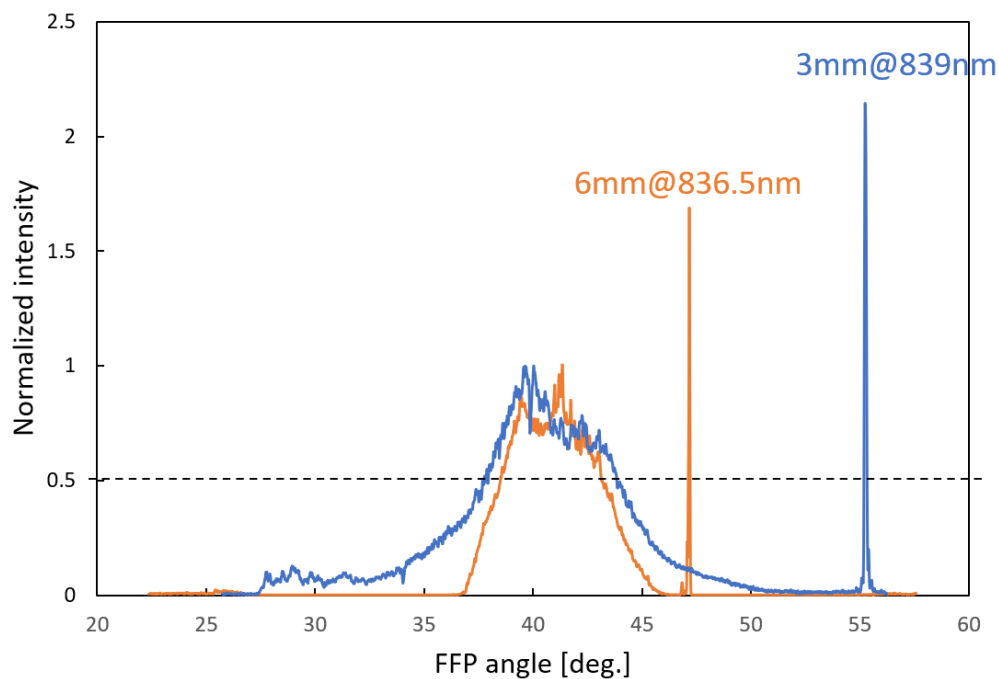


Fig.4-15 FFP profile of 3mm and 6 mm long amplifier when coupling wavelengths far from PL wavelength.

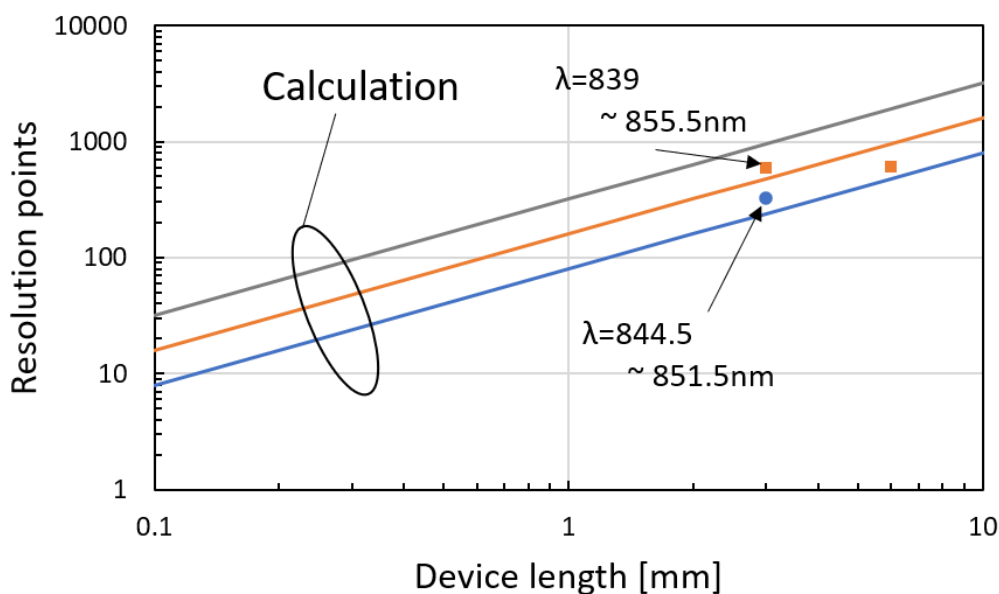


Fig.4-16 Plot experimental values for calculation results

最後に Fig.4-16 に解像点数の計算結果に実験値をプロットしたグラフを示す。3mm 長の素子は 27° の掃引結果と利得帯域のみの結果の 2 点をプロットした。利得帯域のみを考えると、素子長に対して線形な解像点数になることが分かる。より解像点数を上げるためには、

①ビーム拡がり角を回折限界に近づける

②利得帯域を広げて掃引角度を増やす

の2点が必要になる。

①については第3章で述べたように電流注入の均一化や排熱処理によって改善できる可能性がある。②については利得ピークを平坦化する取り組みについて第6章で取り上げる。

## 第5章 長尺増幅器による高出力動作

### 5.1 VCSEL 増幅器による高出力化の原理

VCSEL 増幅器は半導体レーザを用いる増幅器であるため半導体光増幅器(SOA : Semiconductor Optical Amplifier)に分類される。しかしその原理は一般的な SOA とは大きく異なる。通常の SOA は Fig.5-1 に示すように導波路に入力された結合光は活性層で誘導放出により増幅され、増幅された光は導波路端から放出される。この時電流注入によりレーザ発振が起こると、それが寄生発振となり増幅特性が妨げられる。そのため通常の SOA は導波路端面に無反射コーティングを施したり、斜め導波路構造を取り入れたりすることでレーザ発振を抑制している。一方我々が提案する VCSEL 増幅器は Fig.5-2 に示すように導波路方向に対して上方向に光が取り出される。これは大量の VCSEL を横に並べたような構造と等価で、活性層内で増幅された光は順次上部反射鏡から放射される。そのため垂直方向へのレーザ発振が生じても増幅器が飽和することはなく、むしろ大量にキャリアが供給されるため結合光の高い増幅に寄与する。レーザ発振しきい値以上の十分に高い電流が注入されている時、増幅器表面から取り出される増幅光の強度は増幅器長に対して均一となるため、素子長に比例した光出力を得ることができる。本章では活性層内におけるレート方程式を用いることで、VCSEL 増幅器の出力特性を見積もる。

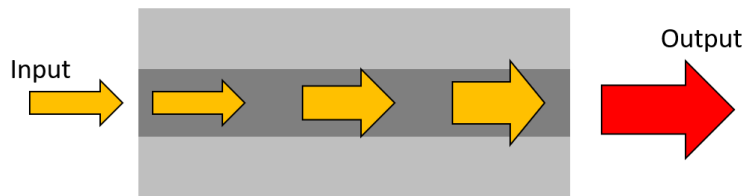


Fig.5-1 Ordinary semiconductor optical amplifier

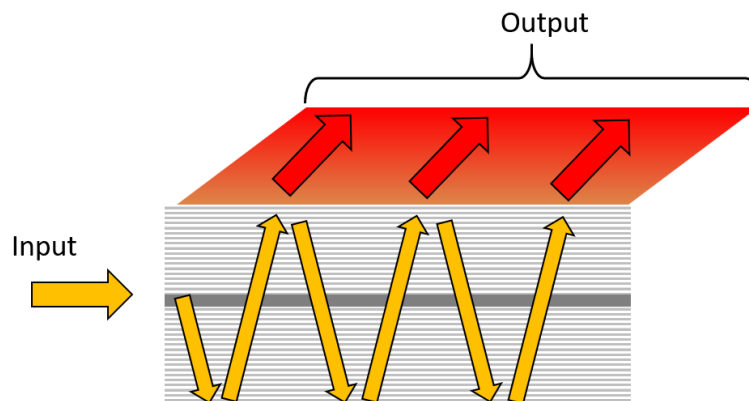


Fig.5-2 VCSEL amplifier

VCSEL の活性層内におけるキャリア密度 $N$ と光子密度 $S$ のレート方程式は次式で表される。

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{qV} - (BN^2 + CN^3) - fv_g gS \quad (5.1)$$

$$\frac{dS}{dz} = f\{\Gamma g - (\alpha_r + \alpha_i)\}S \quad (5.2)$$

ここで $I$ は注入電流,  $q$ は電気素量,  $V$ は活性層体積,  $B$ および $C$ は再結合定数,  $f$ はスローダウンファクタ,  $g$ は利得係数,  $\Gamma$ は光閉じ込め係数,  $\alpha_r$ は放射損失,  $\alpha_i$ は吸収損失,  $z$ は導波路の伝搬方向の軸を示す. 各式に着目すると, 式(5.1)の第1項は電流注入によって供給されるキャリア密度を示している, 第2項および第3項は発光再結合と誘導放出により消費されるキャリア密度を示している. 式(5.2)は誘導放出により生じる光子密度と増幅器上部への放射損失および量子井戸内の吸収損失の単位距離あたりのやり取りを示している. これらの式が意味するところは群速度 $v_g$ のスローライトが活性層に入射されたときの単位時間および単位距離あたりに生成および消費されるキャリア密度と光子密度の関係である. ところで式(5.2)の放射損失 $\alpha_r$ は上部反射鏡から放射される損失を意味するため, つまり上部への放射強度と関連する. よって活性層幅を $w$ , 活性層厚を $d$ , プランク定数を $h$ , 光の周波数を $\nu$ と置くと, 単位距離あたりの放射強度は

$$\frac{dP_{out}}{dz} = \frac{(Sf\alpha_r)w d \nu_g h \nu}{\Gamma} \quad (5.3)$$

となる. 本計算は発振しきい値以上の電流を注入したときを仮定するため, 単位距離あたりの放射強度は増幅器内で均一とみなせる. つまり実際に得られる光出力は式(5.3)を増幅器長 $L$ で積分すればよいので,

$$P_{out} = \int_0^L \frac{(Sf\alpha_r)w d \nu_g h \nu}{\Gamma} dz \quad (5.4)$$

となる. ここで入力波長 850nm, 入力光パワー 1mW とし, 上部 DBR が 20 ペアと 25 ペアの時, また注入電流密度が 10kA/cm<sup>2</sup>, 100kA/cm<sup>2</sup> の時の光出力を式(5.1)~(5.4)を用いて計算した. その結果を Fig.5-3 に示す. 図中の赤線は上部反射鏡が 20 ペアの時, 青線は 25 ペアの時を示している. また実線は注入電流密度が 100kA/cm<sup>2</sup> のとき, 破線は 10kA/cm<sup>2</sup> のときを示している. 発振しきい値以上の電流を注入しても増幅器が飽和しない仮定で計算しているため, 注入電流密度に対して線形に光出力は増加する. この図が示すように十分に高い電流注入ができる場合, 1cm 規模の増幅器長で 1~100W クラスの高出力化が見込める. また通常の VCSEL は低しきい値電流動作を得るために上部反射鏡の反射率を高めに設定するが, VCSEL 増幅器のように高出力動作を行う場合は反射率は低いほうが望ましいことも示されている.

本研究では 2 つの VCSEL ウェハを用いて VCSEL 増幅器を作製し, その出力特性を評価した. 使用した VCSEL ウェハのパラメータを Table.5-1 に示す.

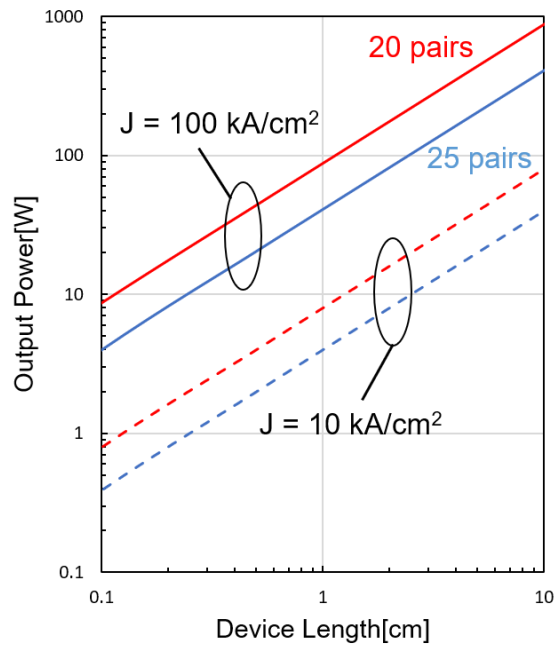


Fig.5-3 Calculation of output power as a function of device length

**Table 5-1 Structure of two types VCSEL wafer**

	Wafer A	Wafer B
Cutoff wavelength	974 nm	855 nm
Top-DBR	Al <sub>0.16</sub> GaAs/Al <sub>0.92</sub> GaAs × 21 pairs	Al <sub>0.15</sub> GaAs/Al <sub>0.9</sub> GaAs × 19 pairs
Bottom-DBR	Al <sub>0.16</sub> GaAs/Al <sub>0.92</sub> GaAs × 40 pairs	Al <sub>0.15</sub> GaAs/Al <sub>0.9</sub> GaAs × 31 pairs
SCH	Al <sub>0.7</sub> GaAs	Al <sub>0.55</sub> GaAs
QW	In <sub>0.2</sub> GaAs/GaAs × 3 pairs	GaAs/Al <sub>0.3</sub> GaAs × 3 pairs

## 5.2 CW 特性

まずは CW の電流を注入したときの増幅特性を評価した。測定系の構成を Fig.5-4 に示す。出力特性は Si フォトディテクタを用いて測定した。この時光が射出される角度を CCD カメラで確認したのち、フォトディテクタを同じ角度に傾けてデバイスに近接させた。

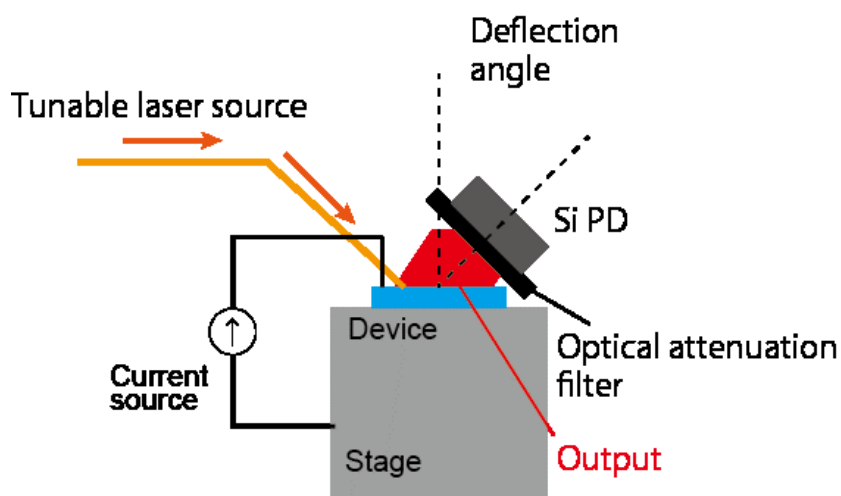


Fig.5-4 CW output measurement setup

Fig.5-5 に Wafer A のウェハ上に作製した VCSEL 増幅器の CW 動作下における I-L 特性を示す。測定した素子の長さは 1, 2, 3, 6mm である。また結合した種光源の波長は 953nm である。スロープ効率は 1~6mm 長素子においてそれぞれ 0.23, 0.28, 0.32, 0.34 であった。また最大出力は 52mW, 132mW, 196mW, 215mW であった。ここで 1~3mm 長素子は途中で光出力が減衰されているが、これはデバイスをヒートシンクにボンディングしていないため熱飽和が起きているためである。また測定系のリミットで 1A までしか電流を流していないが、6mm 長素子はまだ熱飽和が起こっておらず、さらに高い出力を得られる可能性がある。

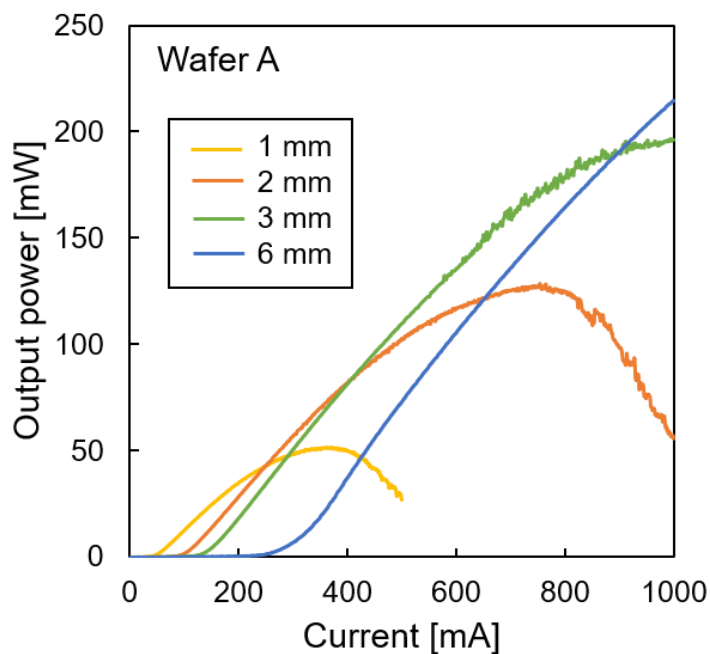


Fig.5-5 I-L characteristics of 1 to 6 mm long device on wafer A under CW operation

次に Wafer B の素子を測定した。Fig.5-6 に CW 動作下での I-L 特性を示す。2, 3, 6, 10mm 長素子の測定を行い、結合光波長は 841nm である。スロープ効率 $\eta_{\text{slope}}$ は 2mm 長素子では 0.58, 3~10mm 長素子では 0.65 が得られた。最大出力はそれぞれ 227mW, 354mW, 390mW, 275mW であった。スロープ効率は Wafer A のおよそ 2 倍であった。これは Table 5-1 に示すように Wafer B の方が上部 DBR のペア数が少なく、反射率が低いためである。Wafer A と Wafer B は波長帯が異なるため厳密な比較はできないが、上部反射率が低い方が良好な高出力特性を示すことが分かる。また注入電流 700mA 以上の領域において I-L 特性にキックが見られた。これは素子の冷却を行っていないためである。冷却を行わない場合電流値の上昇によって発熱量が増加するため、利得帯域がレッドシフトする。キックが生じるのは 700mA 以上の領域において結合光波長が利得帯域から外れてしまったからであると考えられる。結合光波長の変動による I-L 特性の違いを調べるために、Wafer A の 1mm 長素子を用いて、波長を 953nm から 957nm まで変化させたときの I-L 特性を測定した。その結果を Fig.5-7 に示す。この図が示すように低電流領域ではスロープ効率、光出力が一致しているが、高電流領域では利得帯域のレッドシフトのため長波長側の方が高い出力が得られた。Wafer B についても結合光波長を長波長側にシフトすることで 700mA 以上の電流値でもキックが生じない安定した I-L 特性が得られる可能性がある。または、冷却動作を行いレッドシフトしないようにすることで、841nm の結合波長でもより高い光出力が得られる見込みがある。

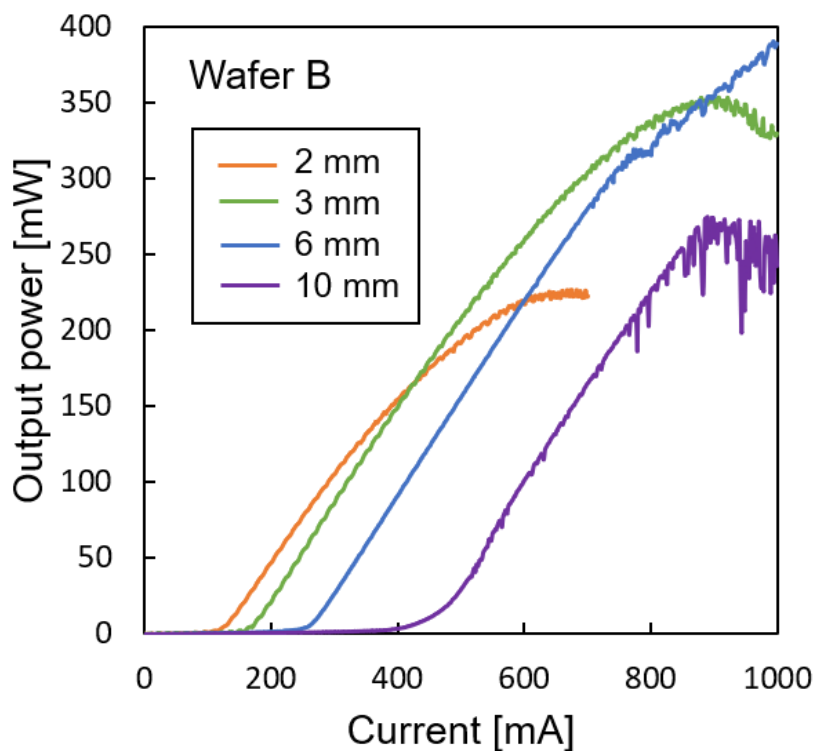


Fig.5-6 I-L characteristics of 2 to 10 mm long device on wafer B under CW operation

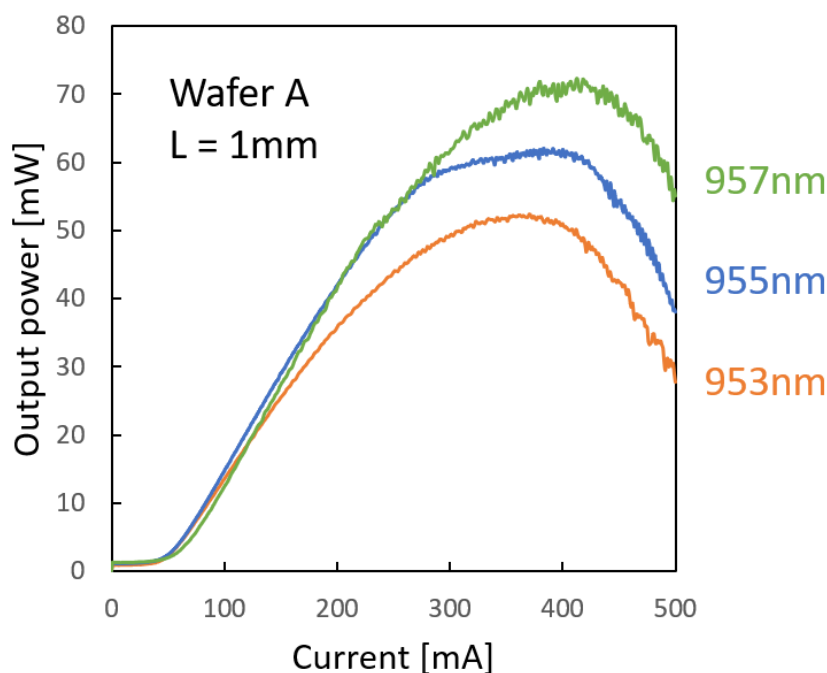


Fig.5-7 Wavelength dependence of I-L characteristics of 1 mm long device on wafer A

### 5.3 パルス特性

次に注入電流をパルス動作させたときの特性について評価した。パルス駆動を行うことによって冷却時間を設けることができるため、CW 動作と比較すると発熱の影響を大きく抑えることができ、より高出力な I-L 特性を得ることができる。Fig.5-8 に測定系の構成を示す。CW 測定で使用した大口径の Si フォトディテクタを使用すると、短パルス動作時に応答が追いつかないためアバランシェフォトダイオード (APD) を用いた。APD は口径が非常に小さいため放射光を全て拾えるように積分球に APD を取り付けて測定を行った。Fig.5-9 に Wafer A の素子のパルス動作下における I-L 特性を示す。パルス電流はパルス幅 100ns、繰り返し周波数 1kHz の条件で電流注入を行った。結合光波長は 948nm である。結合波長が CW 動作時より短波である理由は、パルス動作時は利得帯域がレッドシフトしないため、本来の PL 波長に近い波長帯の方が高い出力が得られるためである。Fig.5-7 より結合光波長が異なる場合でも低電流領域におけるスロープ効率はほぼ同等であるため、パルス動作下における出力特性は低電流注入時のスロープ効率が一致するように校正している。Fig.5-9 に示すように 1~6mm 長の素子でパルス出力はそれぞれ 395mW, 1.4W, 3.2W, 5.3W が得られた。同様に Wafer B のパルス動作下における I-L 特性を測定した。その結果を Fig.5-10 に示す。結合光波長は 839nm で光出力は素子長が短い順から、4.5W, 5.1W, 8.8W, 9.7W が得られた。

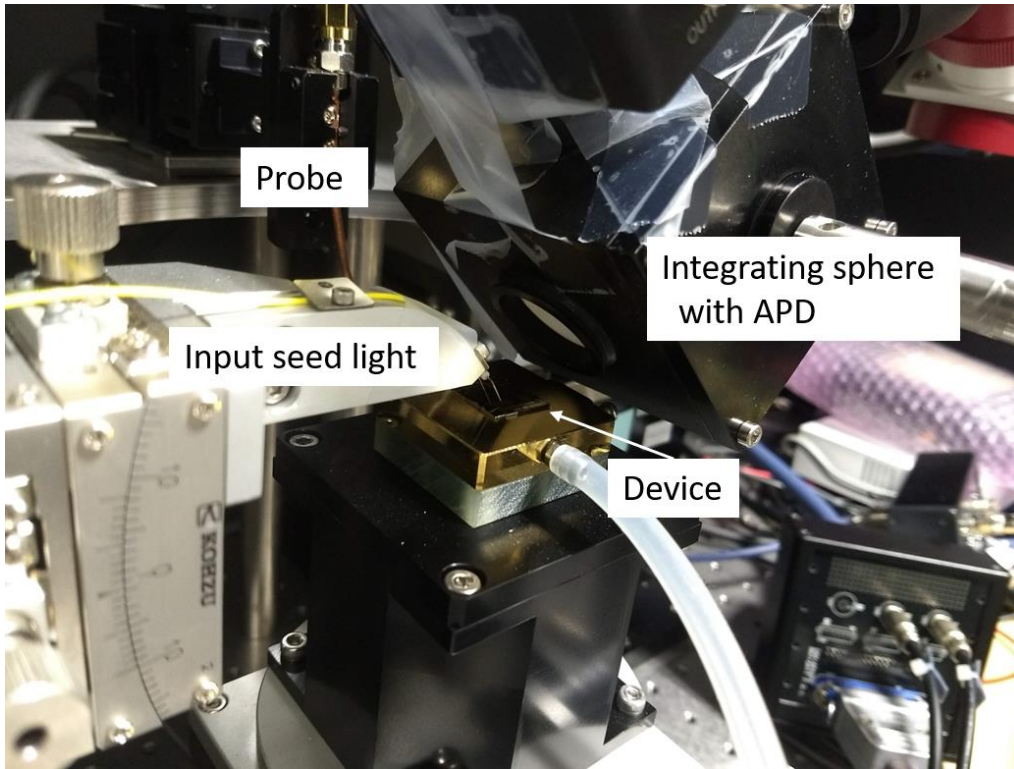


Fig.5-8 Short pulse measurement setup using APD

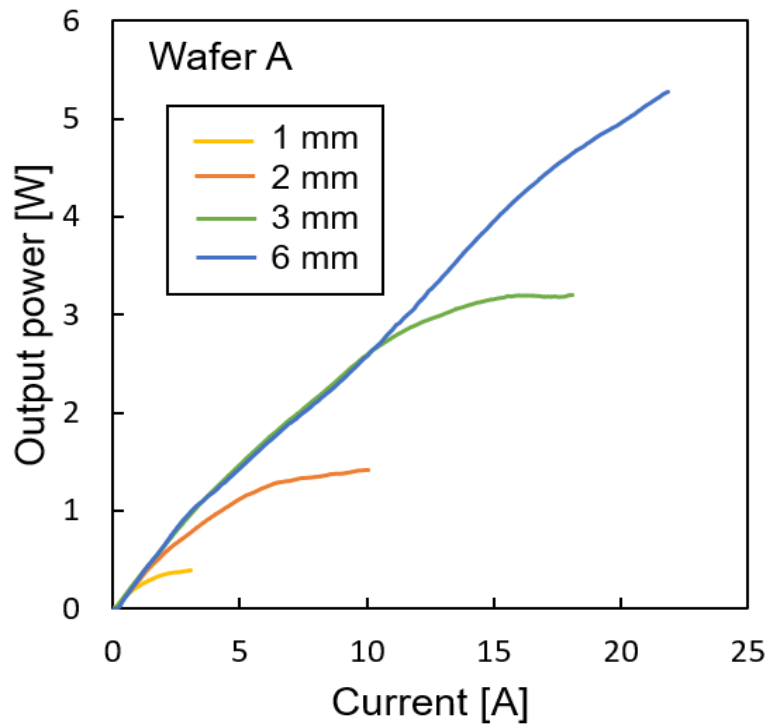


Fig.5-9 I-L characteristics of 1 to 6 mm long device on wafer A under pulsed operation

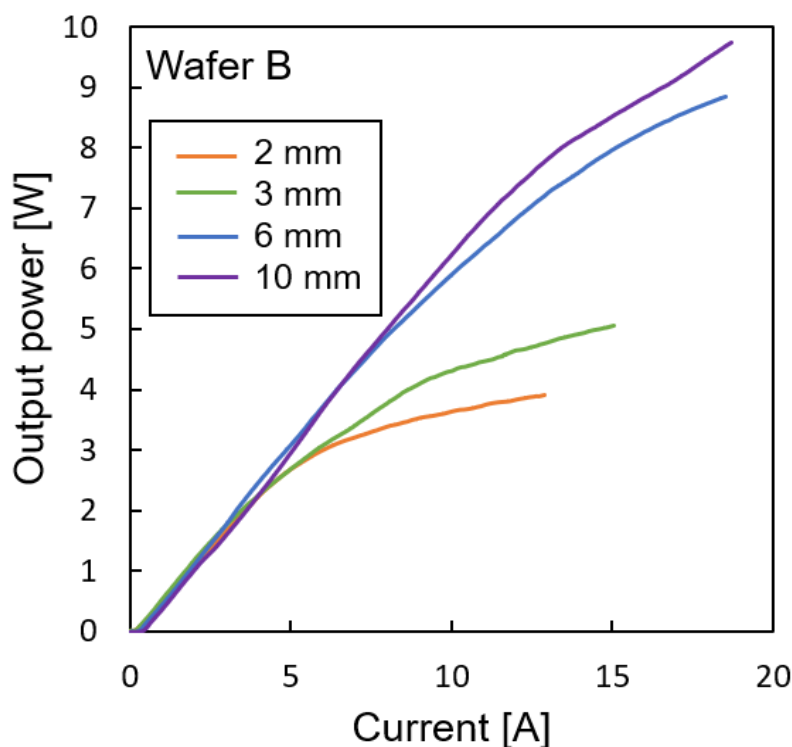


Fig.5-10 I-L characteristics of 2 to 10 mm long device on wafer B under pulsed operation

次にパルス動作中のスペクトルを測定した。スペクトル測定はマルチモードファイバを素子中央に、斜め約  $40^\circ$  方向に傾けた状態で配置し、測定した。まず初めに Wafer A の 6mm 長素子で 2A, 5A, 10A, 15A 時の 4 ポイントを測定した。その結果を Fig.5-10 に示す。この図が示すように電流が 2A 時は結合光波長と同じ 948nm 地点に単一モードのスペクトルが見られた。一方、さらに電流値を上げると結合光波長より長波長側にブロードなスペクトルが生じ始めた。これは増幅器内の自然放出光がスローライト伝搬することによって生じる現象である。今回使用した VCSEL ウェハは 2 章で報告した導波モードをカットオフにする構造が取り入れられている。しかしこの構造はスローライトモードを維持するため、結合光がスローライト伝搬するのと同じ原理で、増幅器内で生じた自然放出光もスローライト伝搬する。しかし導波モードに比べてスローダウンファクタが大きいため、低電流領域では種光源を結合することでこの自然放出光を抑圧することができる。しかし大電流領域では抑圧しきれないほど自然放出光が増大し、スローライトモードの ASE を引き起こした。Fig.5-11 は Wafer B の 10mm 長素子のパルススペクトルを示しており、こちらのスペクトルも Fig.5-10 と同様に注入電流の増加に伴ってスローライトモードの ASE が抑圧しきれないほど増大した。結論として、パルス動作時は大電流領域でスローライトモードの ASE が生じるため単一モード特性が損なわれた。よってワットクラスの高出力かつ単一モードの高ビーム品質を得るためにはこの ASE の抑圧が重要になる。スローライトモードの ASE 抑圧については 6 章で検討を行った。

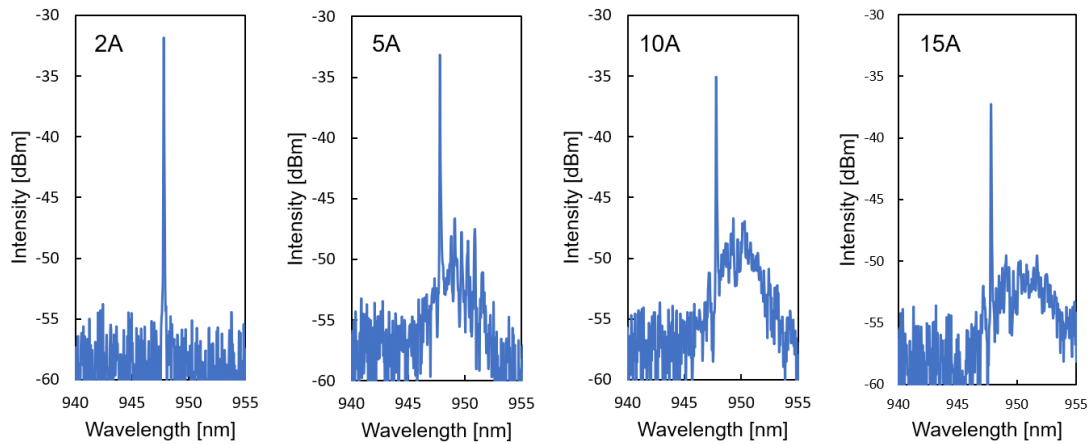


Fig.5-11 Spectrum of 6 mm long amplifier on wafer A for different injection pulse current

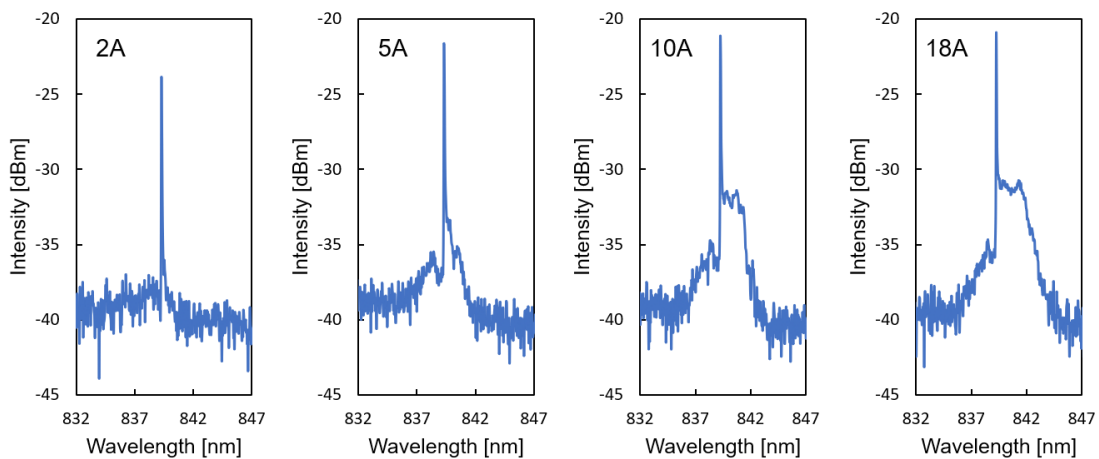


Fig.5-12 Spectrum of 10 mm long amplifier on wafer B for different injection pulse current

最後にパルス動作時の FFP の測定を行った。3 章の測定結果より 6mm 長素子が最も狭い発散角が得られる見込みがあるため、Wafer B の 6mm 長素子を用いて FFP を測定した。839nm の種光源を結合させ電流値を 1A, 3A, 5A に変化させたときの FFP 画像およびプロファイルを Fig.5-13 に示す。なおこの FFP は平均パワーを見ているため、CW の FFP 測定で使用した減衰フィルタよりもさらに弱いフィルタで観測している。ビーム拡がり角はそれぞれ  $0.23^\circ$  ,  $0.30^\circ$  ,  $0.51^\circ$  であった。これは回折限界の 10 倍以上で、電流値の増加に伴って裾を引くように連続的なビーム拡がりが見られた。パルス動作時にビームが広がる原因はパルス電流印加によって生じる熱チャープである。今回の実験で使用しているパルス電源は三角波のパルス電流を発生させるが、このときパルス開始時とパルスピーク時で熱のチャープが生じてしまうため、FFP が連続的に広がるという現象が起こる。これを避

けるためにはよりパルス幅の短い動作を行う必要がある。そこでパルス幅を変化させたときの FFP の変化を観測した。Fig.5-14 はパルス電流 3A, パルス幅を 30ns, 50ns, 100ns に変えた時の FFP を示している。半値全幅はそれぞれ  $0.18^\circ$ ,  $0.23^\circ$ ,  $0.30^\circ$  で、パルス幅を短くすることで拡がり小さくすることができた。しかし未だ回折限界から離れているため、さらに拡がりを抑えるためには数ナノオーダー～ピコ秒のよりパルス幅が短いパルス動作が求められる。

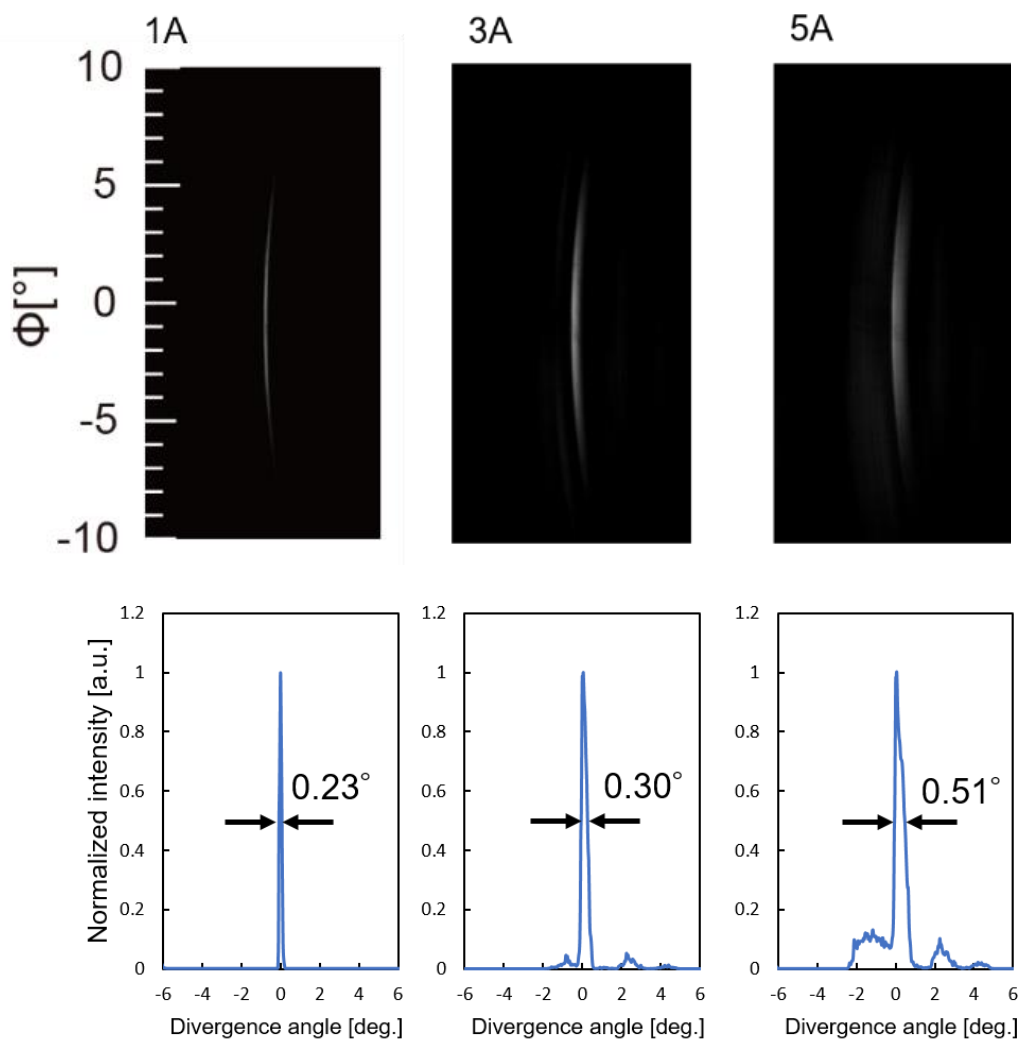


Fig.5-13 FFP of 6 mm long amplifier for different injection current under pulsed operations.

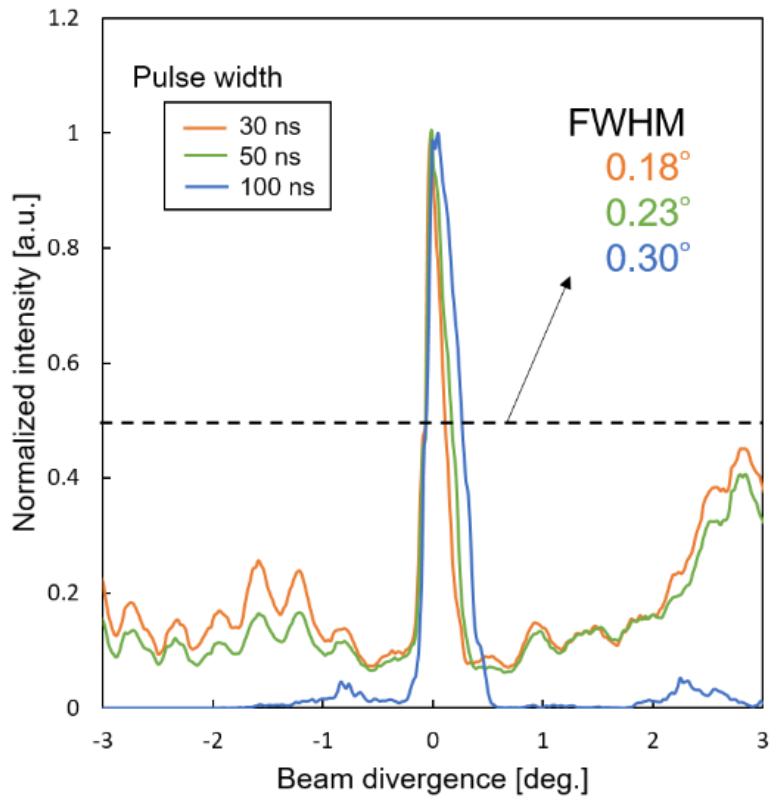


Fig.5-14 FFP profile of 6 mm long amplifier. Injection current is 3A and pulse width is 30 to 100 ns.

今回の測定で得られたパルス出力を Fig.5-3 のスケーリングにプロットしたグラフを Fig.5-15 に示す。図中の●印は得られた最大出力である。また素子長に対する出力のスケーリングを確認するために注入電流密度  $J=10\text{kA}/\text{cm}^2$  時のパルス出力を図中の▲印でプロットした。上部 DBR ペア数は両者とも 20 ペア近くであるので、図中の赤破線が測定条件に近い理論値となる。この図が示すように素子長に対する光出力の slope は理論値と近い形状となった。出力値は理論値から大きく下回っているが、これは計算に使用したアパチャ幅、波長、放射損失などのパラメータが実験で使用した素子と一致していないためである。これらのパラメータを最適化することでより正確な理論値を求めることができる。

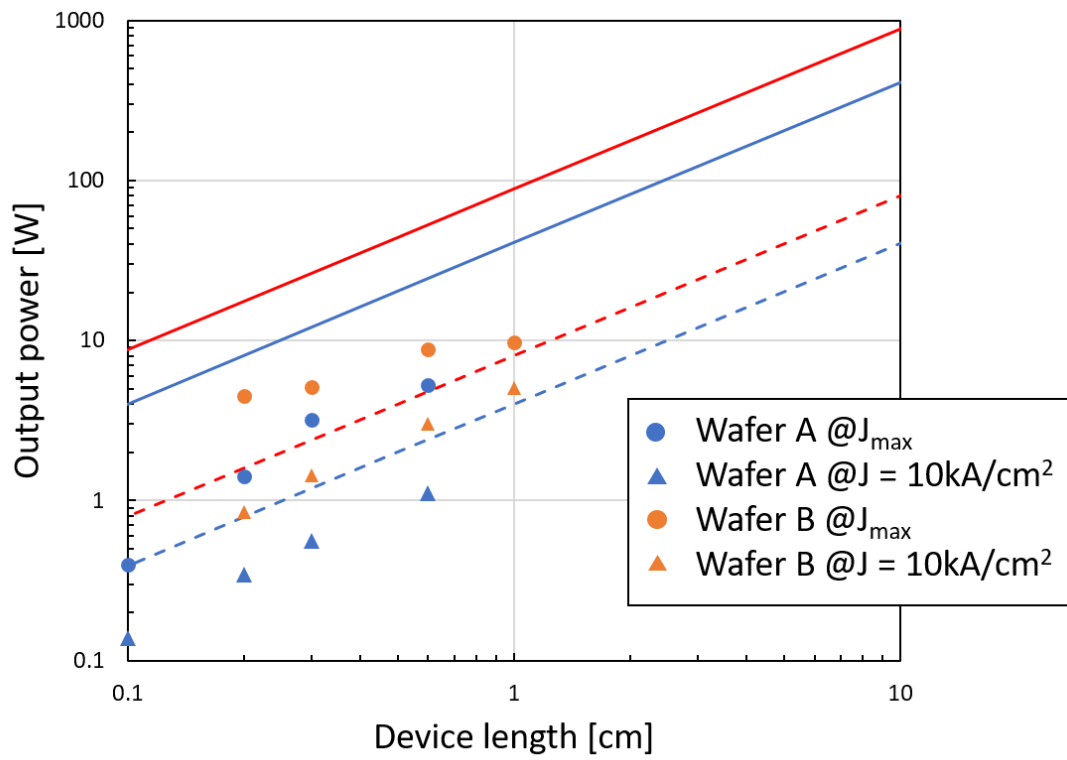


Fig.5-15 Plot experimental output power as a function of the amplifier length

## 第6章 高出力・高ビーム品質動作のための検討

本章では VCSEL 増幅器の性能を改善するための構造を検討する。これまでの結果より、VCSEL 増幅器の課題は以下ようになる

1. PL 波長によるビームスキャン範囲の制限
2. 大電流注入時のスローライトモードの ASE による特性劣化

スローライトモードの ASE が生じる原因は、利得スペクトルのピーク波長において反射率が高すぎるために引き起こされると考えられる。反射率が高い場合増幅器内で発生した自然放出光が全て上部に放射されずに一部が内部に残り、これがスローライト伝搬して ASE となる。つまり利得ピークの波長帯の反射率を下げ、自然放出光を放出させるような構造を作ればよい。これは実効的には利得スペクトルを平坦化することになり、ビームスキャン範囲を広げることにもつながる。本研究では利得を平坦化する手法として誘電体 DBR による反射率制御を提案する。なお、本章ではすでに作製した VCSEL 増幅器に追加加工するという前提で誘電体 DBR を用いた議論を進めるが、本理論は半導体 DBR のみを用いた場合でも適用できる。

### 6.1 VCSEL 増幅器の利得平坦化の提案

本研究の提案は作製した VCSEL 増幅器上に位相シフタ付きの誘電体 DBR を成膜することによって反射率スペクトルを制御するものである。原理を説明するための誘電体多層膜の概略図を Fig.6-1 に示す。誘電体 DBR は半導体 DBR と同様に、光学厚さが  $\lambda/4$  の高屈折率材料と低屈折率材料を交互に積層することで高い反射率を得ることができる。一般的に半導体 DBR のペアよりも大きな屈折率差をつけることができるため、少ないペア数で反射率を制御できるという特徴を持つ。Fig.6-1(a)は全ての誘電体材料が  $\lambda/4$  厚さで積層されている様子を示している。半導体 DBR と同様に、このとき各境界における反射波の位相が揃うため、高い反射率が得られる。ここで提案する構造は(b)のように、誘電体多層膜中に1層だけ光学厚さが  $\lambda/2$  の層を入れることである。この場合  $\lambda/2$  厚さの誘電体を通った光の反射波は、 $\lambda/4$  厚さの層の反射波と位相が反転する。つまり反射波が互いに打ち消しあうため、この  $\lambda/2$  厚さの層は反射率を下げる働きをする。本研究ではこの  $\lambda/2$  厚さを持つ誘電体 DBR のペアを位相シフタと呼ぶ。本研究の提案はこの位相シフタの数や配置位置を制御することで反射率スペクトルを制御するというものである。Fig.6-2 は3種類の誘電体 DBR 構造を示している。上の図は誘電体構造の概略図、下の図は反射率スペクトルの模式図を示す。(a)は全てが  $\lambda/4$  厚さの誘電体 DBR で構成されており位相シフタを含まない構造である。この場合は先述したように高い反射率を得る。(b)は1ペア分だけ位相シフタを入れる構造である。この場合も Fig.6-1 で説明した通り誘電体の中心波長の反射波の位相が反転されるため、中心波長付近の帯域の反射率が落ちる。ここで(c)のように位相シフタが

周期構造を形成した場合を考える。このとき誘電体の中心波長では反射波の位相が完全に反転しているため、周期構造のペア数を増やしても反射率は変化しない。一方で中心波長の周りの波長帯は周期構造によって反射率が増加する。つまり(c)の下図が示すように、中心波長が固定されたまま両サイドの反射率が少しずつ増加していくという挙動を示す。この構造によって反射率にディップを形成することができる。本提案のコンセプトはこのディップを利用ピークと一致させることで利得を平坦化するものである。

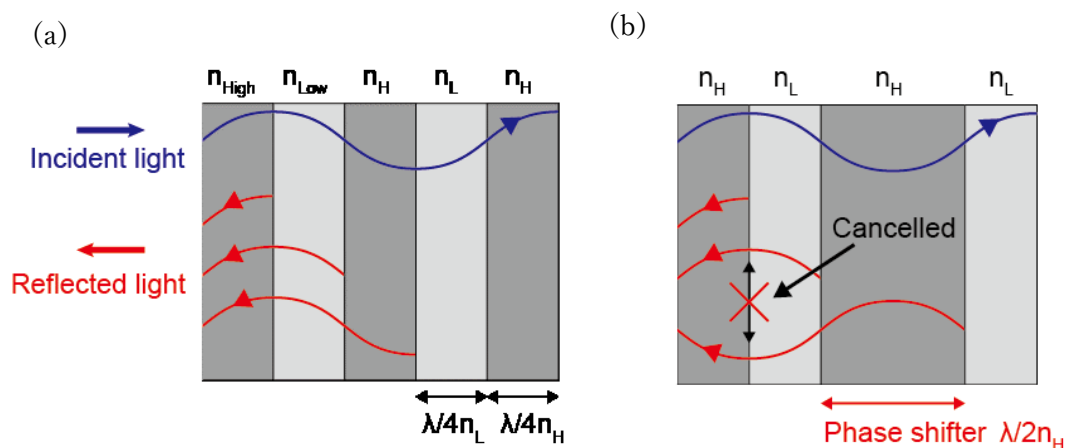


Fig.6-1 Principle of reflection by dielectric DBR. (a) Optical thickness of all layers is  $\lambda/4$ . (b) One layer has an  $\lambda/2$ -thickness.

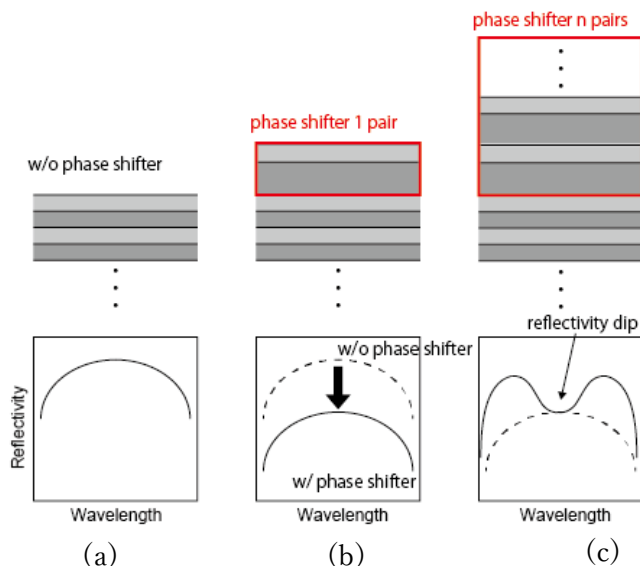


Fig.6-2 Diagram of three types of dielectric structures and their reflectivity, (a) w/o phase shifter, (b) 1 pair of phase shifter included, (c) n pairs of phase shifter included.

## 6.2 計算結果

次にセクション 6.1 で説明した理論を誘電体 DBR の反射率を計算することで証明する。誘電体 DBR の反射率計算は転送行列法[6-1]を用いて計算した。今回は Fig.6-3 に示す半導体 DBR を計算モデルとして反射率の計算を行った。これは量子井戸が In<sub>0.2</sub>GaAs/GaAs の 980nm 帯 VCSEL で、DBR は Al<sub>0.16</sub>GaAs/Al<sub>0.92</sub>GaAs から構成され、上部 DBR が 4 ペア、下部 DBR が 40 ペアという構造である。スローライトモードの ASE は第 5 章でも示したように斜め方向に出射されるため、実際の計算は斜め方向に対する反射率を求める必要があるが、今回は簡単のため垂直方向のみを考えて計算を行う。

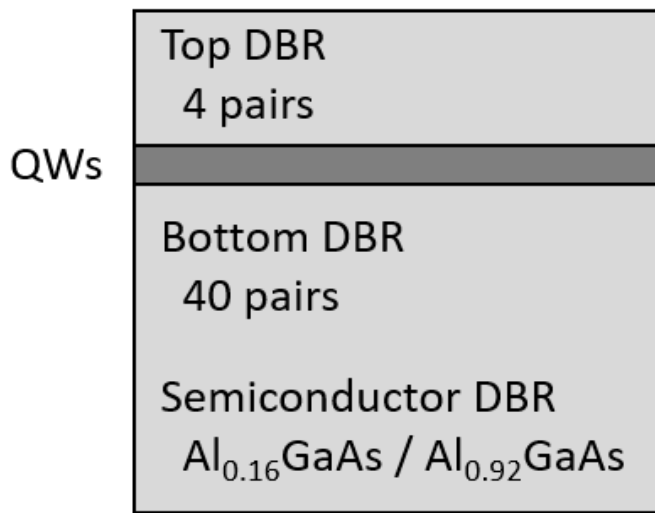


Fig.6-3 980 nm band half VCSEL calculation model

まず平坦化するための利得スペクトルを決めるために、量子井戸の構造を In<sub>0.2</sub>GaAs/GaAs の井戸厚を 70 Å と仮定し、次式によって材料利得定数を計算した[6-2]

$$g(\omega) = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \frac{m_c^* m_h^*}{m_c^* + m_h^*} \frac{1}{\pi \hbar^2 L w} \cdot \sum_{n=0}^{M-1} \int_{E_{ch} + E_{hn} + E_g}^{\infty} \langle R_{ch}^2 \rangle_n \frac{(f_c - f_v)(\hbar/\tau_{in}) dE_{ch}}{(E_{ch} - \hbar\omega)^2 + (\hbar/\tau_{in})^2} \quad (6.1)$$

ここで、 $\omega$  は光の周波数、 $\mu$  は透磁率、 $\varepsilon$  は誘電率、 $\hbar$  はプランク定数、 $\langle R_{ch}^2 \rangle_n$  は電子-正孔対の双極子モーメント、 $m_c^*$  は電子の有効質量、 $m_h^*$  は正孔の有効質量、 $E_{ch}$  は伝導帯の電子と価電子帯の正孔間の遷移エネルギー、 $E_{ch}(E_{hn})$  は n 番目の電子(正孔)の量子順位、 $Lw$  は量子井戸幅、 $M$  は量子準位数、 $\tau_{in}$  はバンド内緩和時間、 $f_c(f_v)$  は伝導帯(価電子帯)の Fermi-Dirac 分布関数を示す。ここで各物理パラメータおよび歪みを考慮するためのパラメータは参考文献[6-3]を参考にした。材料利得定数の計算結果を Fig.6-4 に示す。ここではシートキャリア密度  $N=5.0 \times 10^{18}$  [cm<sup>-3</sup>] がしきい値条件となる場合を仮定して、この利得スペクトルが平坦化されるような誘電体構造を考えていく。まず、Fig.6-4 より利得ピーク波長がおおよそ

977.5nm であるため、誘電体の中心波長を 977.5nm として計算を行った。また本研究で取り扱う誘電体は高屈折率層として  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、低屈折率層として  $\text{SiO}_2$  を使用した。誘電体の構造を Fig.6-5 に示す。 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  と  $\text{SiO}_2$  の屈折率はそれぞれ 2.1, 1.45 とし(a)は  $\lambda/4$  厚さの誘電体ペア、(b)は  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  の厚さを 2 倍にすることで位相シフトとした。

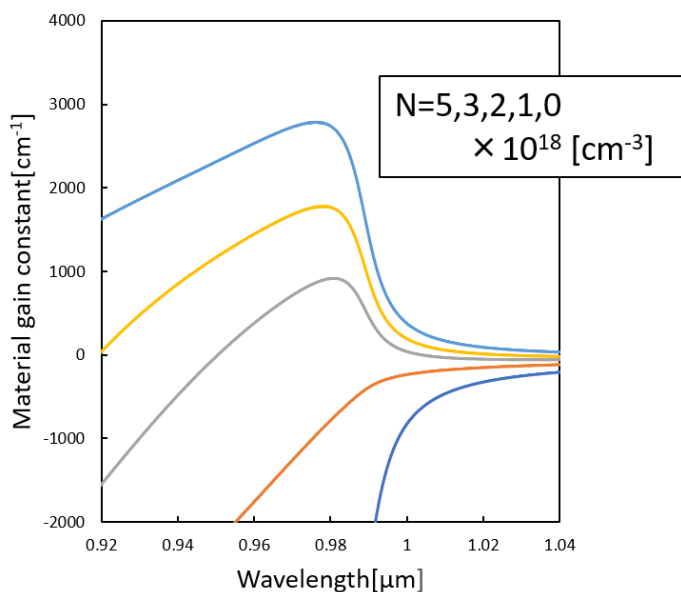


Fig.6-4 Material gain constant of  $\text{In}_{0.2}\text{GaAs}/\text{GaAs}$  ( $w=70 \text{ \AA}$ )

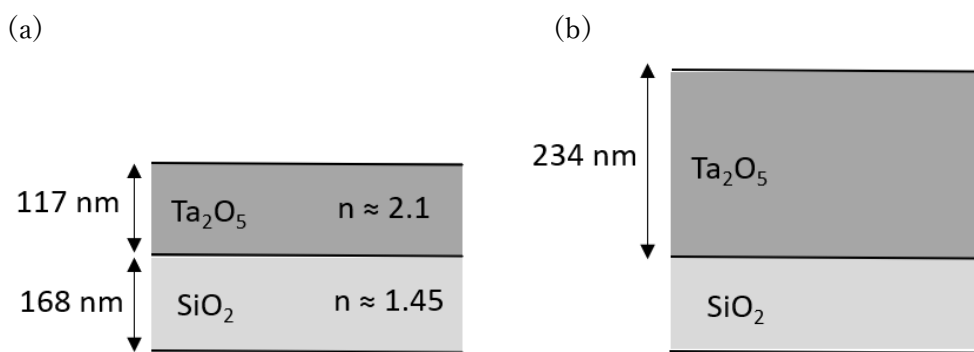


Fig.6-5 Calculation model of (a)  $\lambda/4$ -thickness dielectric DBR, and (b) phase shifter

まず Fig.6-2 の原理が成り立つことを証明するために、誘電体のみの反射率計算、および位相シフトを 1 ペア入れる場合の反射率計算を行った。その結果を Fig.6-6 に示す。Fig.6-6(b)は計算した誘電体 DBR の構造を示している。これは Fig.6-3 の計算モデル上に Fig.6-5(a)の誘電体 DBR が 7 ペア、その上に Fig.6-5(b)の位相シフトが 1 ペアある状態を表している。計算結果の破線は位相シフトを入れない場合、実線は入れる場合を示している。位相

シフタを入れない場合，中心の反射率は約 99.8%で，位相シフタを入れることで反射率が約 0.2%低減することが確認できる．

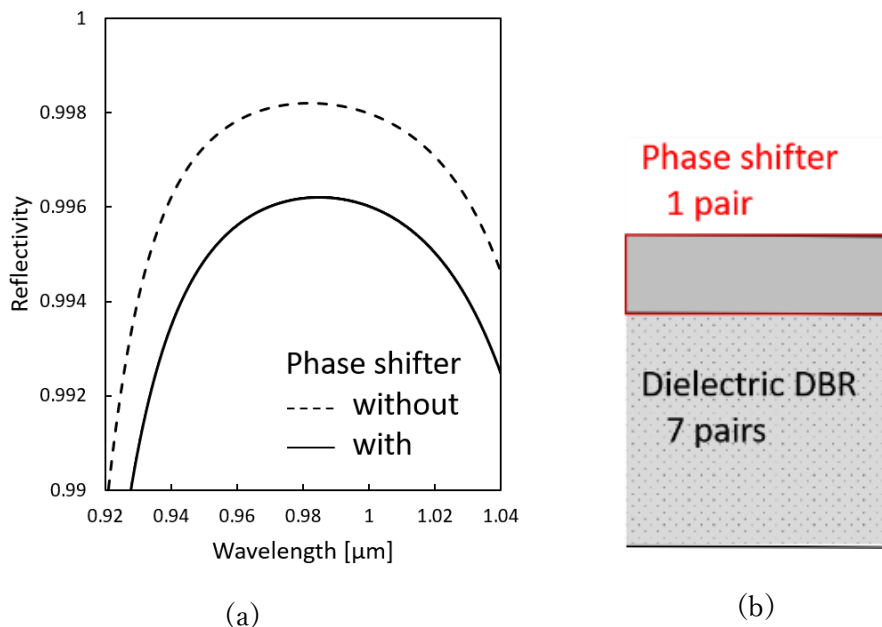


Fig.6-6 (a)Calculation of reflectivity of top mirror as function of wavelength, (b) Structure of Dielectric DBR.

次に位相シフタの周期構造がある場合の計算を行った．その結果を Fig.6-7 に示す．計算結果の破線は Fig.6-6(a)の位相シフタを設けないときの反射率を表しており，実線は位相シフタの周期数を 1~7 まで奇数倍に増やした時の反射率を示す．中心波長の 977.5nm が固定され，その周辺の反射率が増加したため，反射率にディップが形成されることが確認できた．この反射スペクトルに対する反射損失は次式で求まる

$$\alpha_m = \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \quad (6.2)$$

ここでLは共振器長を表している．共振器長をL = 279nm としたときの反射損の計算結果を Fig.6-8 に示す．図中の破線は光閉じ込め係数Γを簡易的に 0.05 とおき，Fig.6-4 のシートキャリア密度 N=5.0×10<sup>18</sup>[cm<sup>-3</sup>]のときの材料利得定数を掛けた値を示している．Fig.6-8 より周期構造のペア数が 5 ペアのとき，利得スペクトルと非常に一致する形状を示すことがわかる．

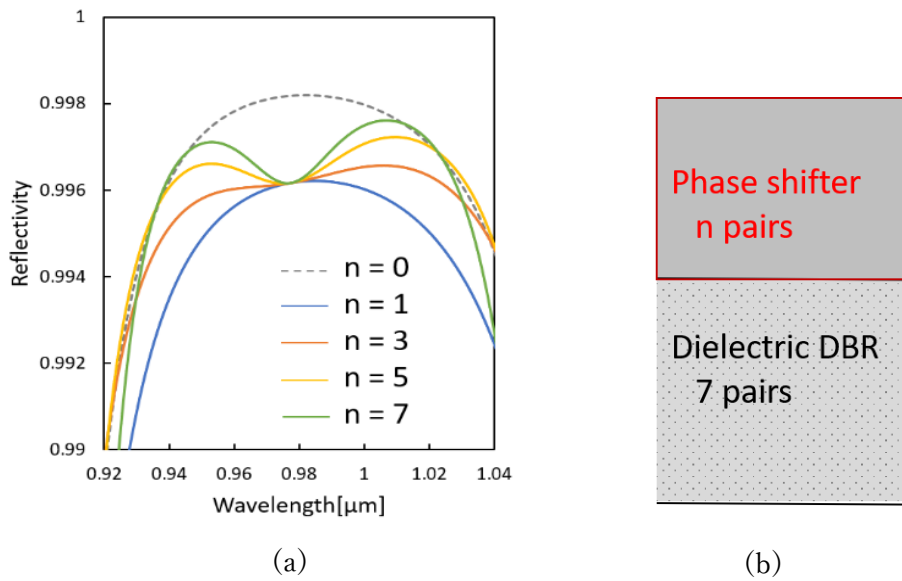


Fig.6-7 (a) Calculation of reflectivity with periodic structure of phase shifter, (b) Structure of Dielectric DBR.

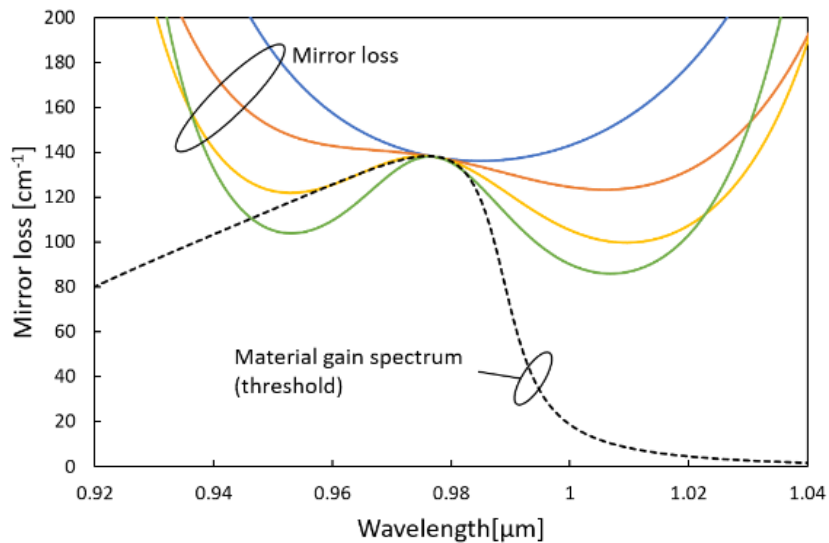


Fig.6-8 Calculation of mirror loss. The solid lines are the loss when the phase shifter has 1 to 7 pairs, and each color corresponds to figure 6-7. The broken line shows the material gain under the threshold condition.

実効利得は  $\Gamma \cdot g(\omega) - \alpha_m$  として計算を行った。その結果を Fig.6-9 に示す。Fig.6-8 で形状が一致していることから分かるように、 $n=5$  の時に実効利得が平坦化され、その帯域は 20nm であった。今回は一例として  $\lambda/4$  厚さの誘電体 7 ペア上に位相シフタの周期構造を設けたが、反射率ディップのボトムは  $\lambda/4$  厚さの誘電体のペア数に依存するため、

誘電体ペア数を減らせばディップボトムの反射率を下げる事ができる。よって誘電体 DBR のペア数と誘電体の光学厚さ、周期構造のペア数を調整することで様々なディップ形状を作り出すことができ、これを利得スペクトルの形状と一致させることで、あらゆる VCSEL ウェハに対して利得の平坦化を行うことができる。

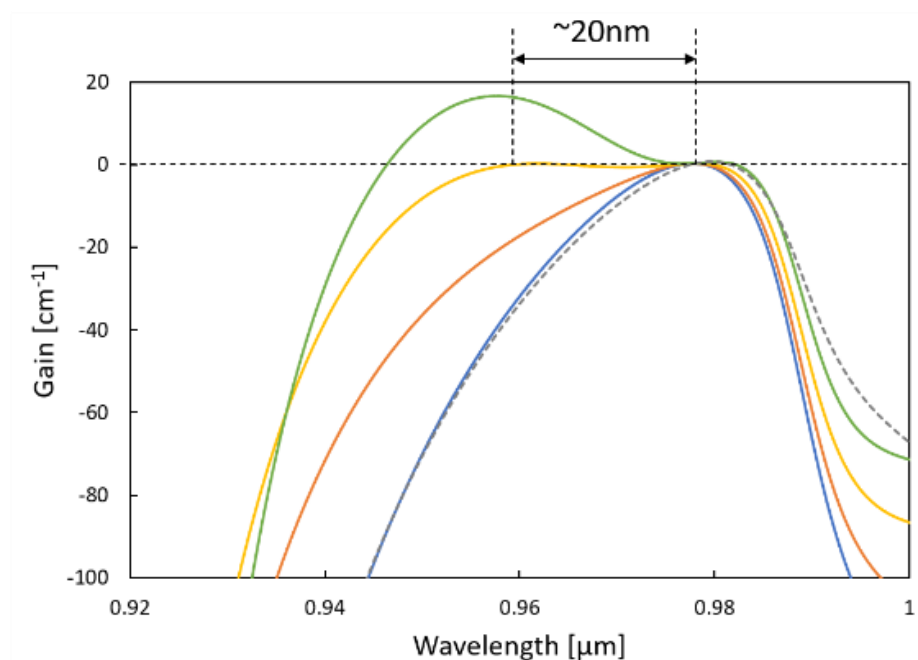


Fig.6-9 Calculation results of effective gain which were obtained by subtracting the broken line from the solid line in figure 6-8. An equalization of 20 nm was obtained when  $n = 5$  (yellow line).

### 6.3 斜め入射を考慮した誘電体構造の検討

セクション 6.2 では垂直方向に対する反射率の計算を行ったが、我々の扱う VCSEL 増幅器の ASE はスローライト伝搬するため斜め方向に出射される。したがって実際のデバイスに応用する場合は斜め入射に対する反射率を計算する必要がある。本セクションでは斜め方向に対する反射率の計算を行い、実際の ASE スペクトルデータを用いて、構造の検討を行う。計算モデルとして第 5 章で測定を行った wafer B の測定データを使用する。Fig.6-10 に 10mm 長素子のパルススペクトルを示す。これは結合光波長 839nm、パルス幅 100ns で 18A の電流を流した時のスペクトルである。種光源を結合しない場合、ASE によるパルススペクトルは波長 841nm の位置にピークを持っている。本素子のウェハはカットオフ波長が 855nm であるため、偏向角に換算すると、垂直方向から約 40° 方向に出射されていると

計算できる。よって入射角度を  $40^\circ$  として計算を行えばよい。まずは誘電体を用いない半導体 DBR のみでの反射率の計算を行う。Fig.6-11 に垂直方向および斜め  $40^\circ$  方向の上部反射鏡の反射率を示す。ASE スペクトルのピーク波長である  $841\text{nm}$  付近で約  $99.5\%$  の高い反射率を持っていることが確認できる。この部分に反射率のディップを作り、利得ピークを放射させる構造を作れば ASE を発生させない構造が実現できる。

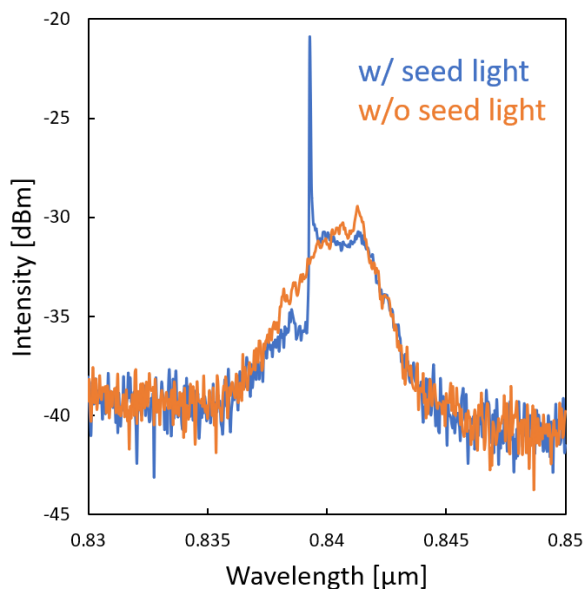


Fig.6-10 Pulse spectrum of 10 mm long amplifier. The current was 18 A with a pulse width of 100ns

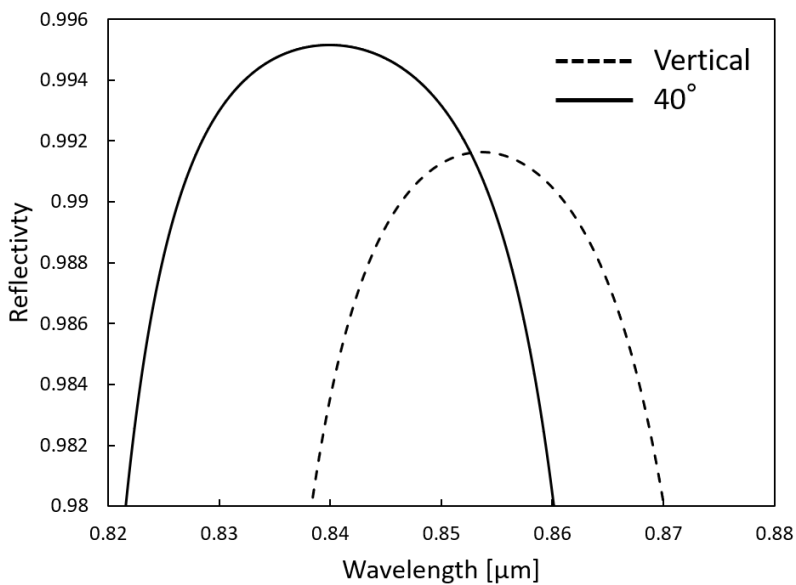


Fig.6-11 Reflectivity spectrum of top mirror for the vertical and  $40^\circ$  direction of wafer B

まず誘電体の膜厚を決定するために Fig.6-12 のような誘電体中の光路を考える。今回は斜め  $40^\circ$  方向に対して計算するから  $\theta_1=40^\circ$  としたとき,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  と  $\text{SiO}_2$  の光路長が  $841\text{nm}$  に対して  $\lambda/4$  になるような誘電体膜厚を考えればよい。図中の  $n_{\text{Ta}}=2.1$ ,  $n_{\text{Si}}=1.45$  とするとスネルの法則より  $\theta_2=18^\circ$ ,  $\theta_3=26^\circ$  となる。よって  $d_{\text{Ta}}=105\text{nm}$ ,  $d_{\text{Si}}=161\text{nm}$  とすれば, 光路長が  $841\text{nm}/4$  となる。よって誘電体設計は Fig.6-13 のようになる。

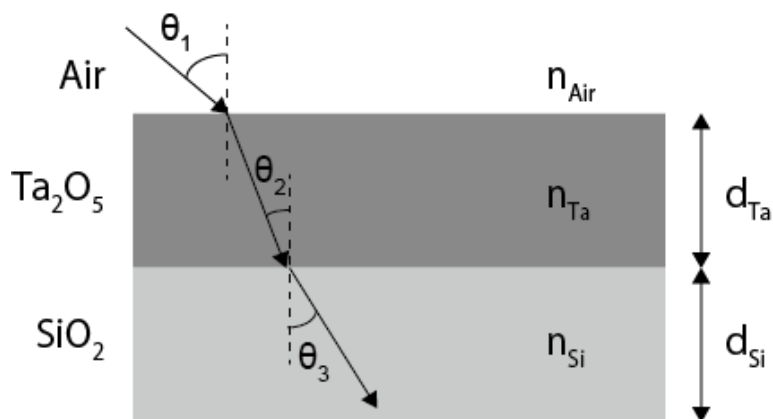


Fig.6-12 Optical path in dielectric DBR

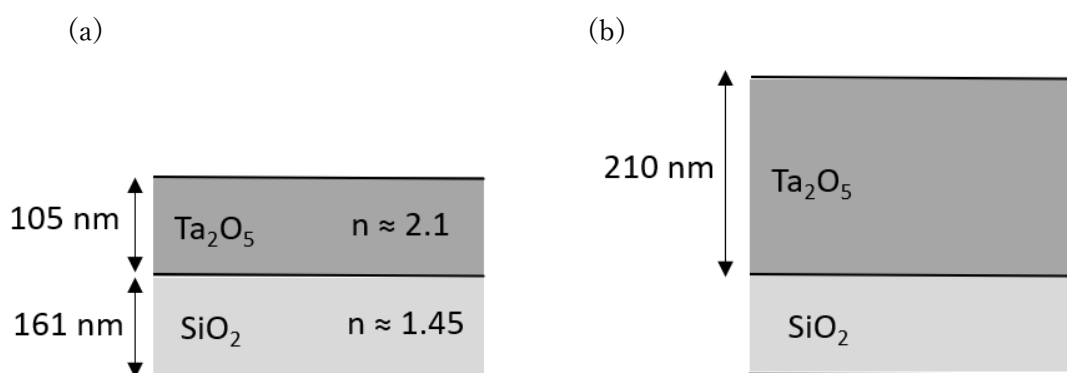


Fig.6-13 Dielectric DBR design with center wavelength of  $841\text{ nm}$  considering tilted incidence, (a)  $\lambda/4$ -thickness and (b) phase shifter

ここで Fig.6-14 のような構造を増幅器のコンタクト層上に成膜することを考える。この場合,  $\lambda/4$  厚の誘電体 DBR に挟まれた位相シフタの周期数を増やすことでディップ形状が変化する。位相シフタの周期構造を変えた時の反射率計算を Fig.6-15 に示す。セクション 6.2 と同様の傾向が見られ, 周期構造のペア数を増やすことで, 中心波長の  $841\text{nm}$  における反射率が固定された状態で周辺波長の反射率が変化し, ディップを形成した。Fig.6-16 に ASE スペクトルと反射率スペクトルの計算結果を重ね合わせた。この図が示すように斜め入射に対しても適切に誘電体構造を設計することで, 利得ピークに合わせた反射率構造を形成することができた。

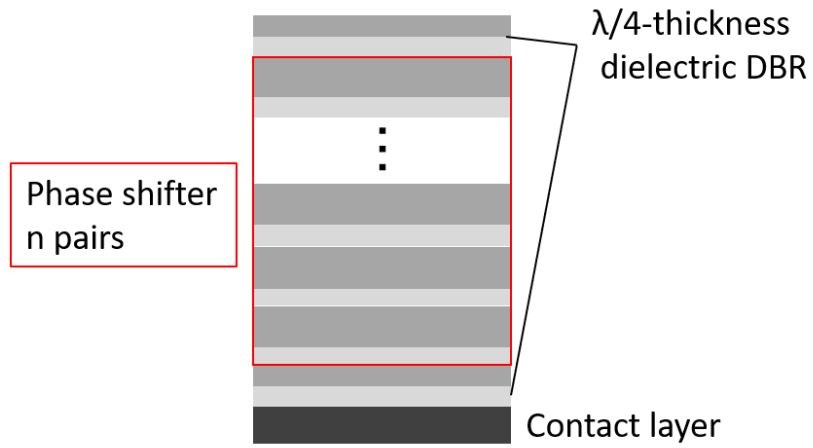


Fig.6-14 Dielectric DBR structure deposited on contact layer.

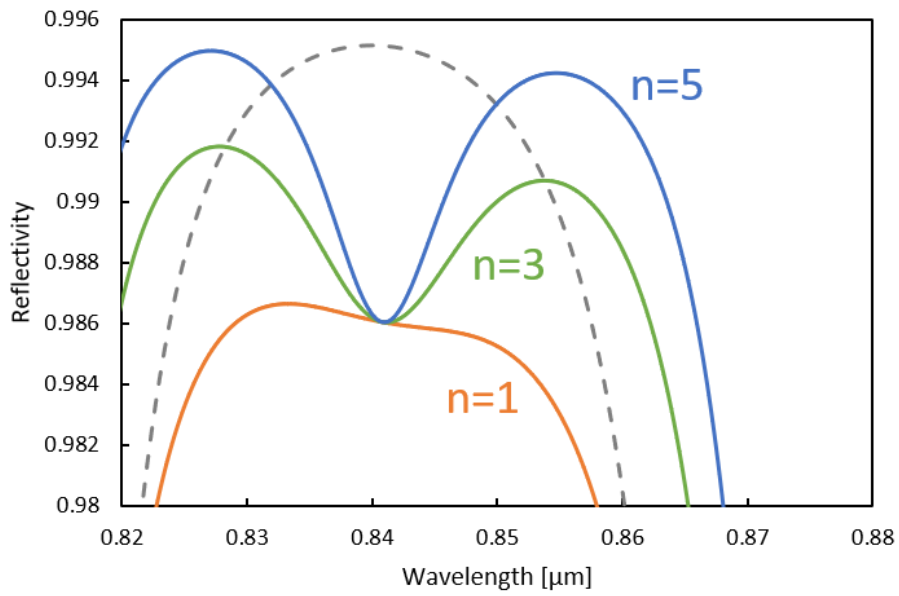


Fig.6-15 Reflectivity in the  $40^\circ$  direction including the dielectric DBR with phase shifter.

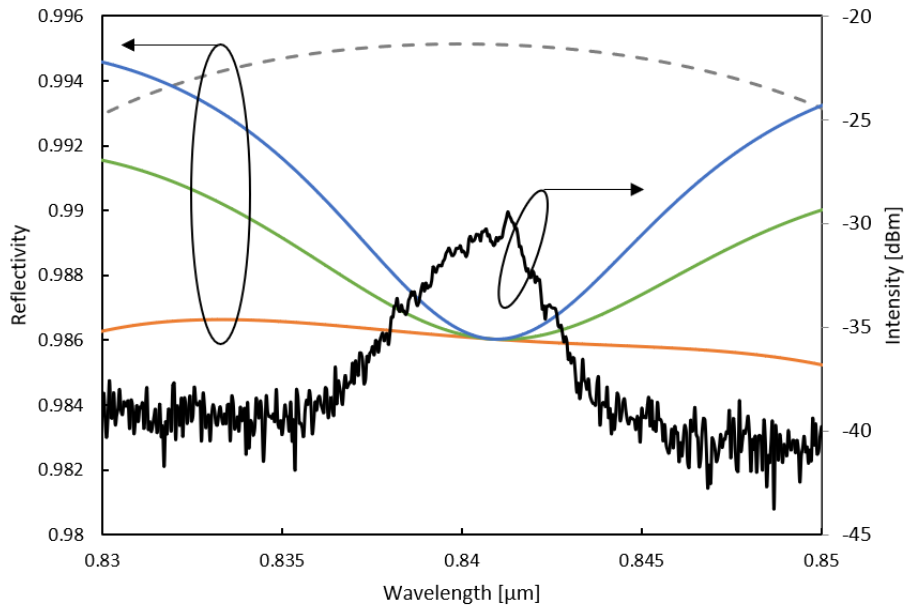


Fig.6-16 Wavelength dependence of ASE spectrum and reflectivity

## Reference

- [6-1] 迫田 和彰, フォトニック結晶入門, 森北出版, 2005.
- [6-2] 伊賀 健一, 小山 二三夫, 面発光レーザの基礎と応用, 共立出版, 1999.
- [6-3] L. A. Coldren, S. W. Corzine, and M. L. Masanovic, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits.

# 第7章 将来展望

## 7.1 長尺 VCSEL 増幅器の極限追及

Fig.7-1 に本研究で得られた VCSEL 増幅器の特性のプロットと、その理論値を示す。図中の星印は共同研究者の成果[7-1]を含む出力特性を示しており、素子長に比例して出力が増加することを確認でき、パルス動作および CW の冷却動作にて 1W を超える高出力動作が得られた。さらに高出力化させるためにはより高い電流密度でポンプする必要があるが、パルス幅 100ns の動作では発熱の影響を抑えきれなくなる。そのため注入電流の短パルス化を行うことで熱特性および出力特性を改善できる可能性がある。また第6章で述べた反射率制御の理論を適用することでスローライトモードの ASE を抑えることができる。これらの取り組みによって 100W 級の高出力動作を達成する可能性があり、LiDAR やレーザ加工分野への実用化が期待できる。また、図中の丸印は CW 動作時の素子長に対する最小ビーム拡がり角を示している。6mm 長まではビーム品質  $M_y^2 < 2$  を達成することができた。一方さらに長尺化するとビーム品質が劣化した。これは第3章で述べたように発熱や屈折率分布が生じることに起因している。今後、十分な冷却動作やワイヤを用いたサブマウント基板へのボンディングによって注入電流を均一化すれば、さらにビーム拡がり角を狭窄化できる可能性がある。

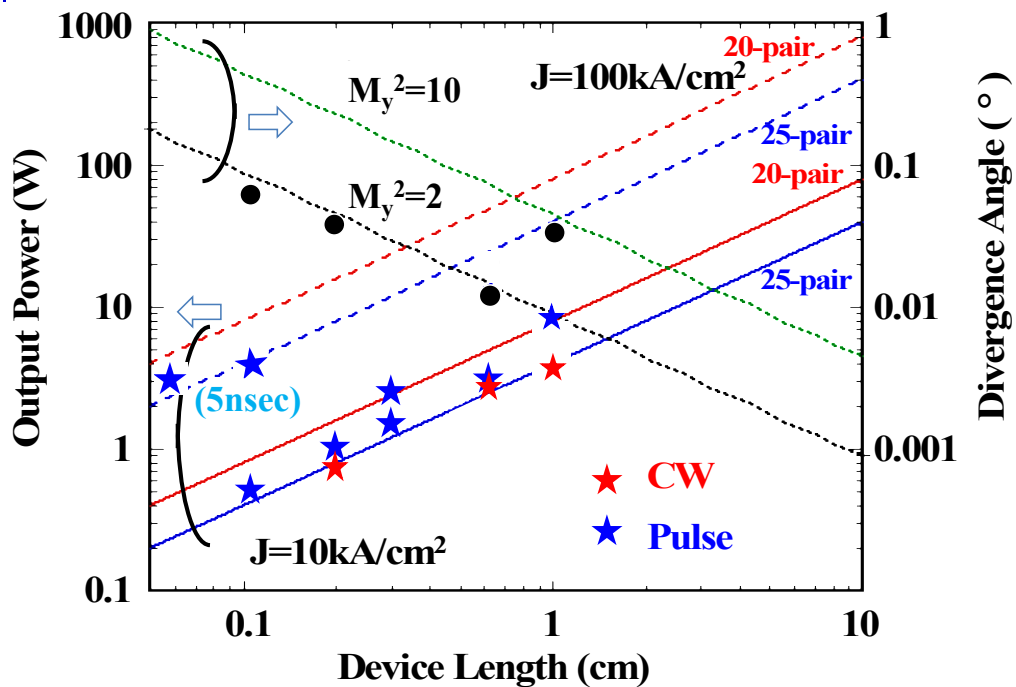


Fig.7-1 Prospects for higher power and higher beam quality

次に本研究の成果および非機械式光偏向器との性能比較を Table.7-1 にまとめた。本研究では長さ 6mm の長尺増幅器の動作に成功したため、最小のビーム拡がり角は  $0.02^\circ$  を切る非常に狭いビームが得られた。これは他の非機械式光偏向器では達成できていない値である。アクティブ動作時に PL 波長によって偏向角が制限されてしまうため、スキャン範囲は LSPCW に劣るが、この狭ビーム出射のおかげで 1次元スキャンにおける解像点数は約 600 点と高い値が得られた。光産業技術振興協会の技術資料[7-2]より、車載用 LiDAR に要求される解像点数は 1,000 点以上とされており、将来展望としてこの要求を満たせる高解像ビームスキャナの実現を今後の目標とする。長尺増幅器においてはビーム拡がり角を回折限界にさらに近づけられる余地があるため、第 3 章で議論したようにビーム品質の改善に取り組めば解像点数の増加が見込める。特に 10mm 長の増幅器で回折限界に近いビームが得られれば拡がり角は  $0.01^\circ$  以下となり、解像点数 1,000 点以上のアクティブデバイスが期待できる。

**Table. 7-1 Performance comparison of non-mechanical beam steering devices.**

	Phased array [1-58]	KTN [1-37]	LSPCW [1-40]	This work
Divergence angle	$0.04^\circ$	—	$0.06^\circ$	$0.015^\circ$
Deflection range	$56^\circ \times 15^\circ$	$5.6^\circ$	$\pm 20^\circ$	$11.3^\circ$ (6mm) $27^\circ$ (3mm)
Resolution points	-	—	266 (1D) 4,256 (2D)	597
Wavelength	1.5 $\mu\text{m}$ band	1.3 $\mu\text{m}$	1.5 $\mu\text{m}$ band	850 nm, 980 nm

次に車載用 LiDAR に応用するための光出力を考える。共同研究者の実験より、現状は 200mW のピーク出力で 40m の測距を達成している。高速走行を想定すると 200m の検出距離が求められる[7-3]ため、これに対応できる光出力が要求される。物体から反射される光のパワー密度は距離の 2 乗に反比例する形で減衰するため、ピーク出力 5W 程度が必要とされる。第 4 章で示したように、完全な単一モードでの 5W 以上の高出力化は達成できていないため、高電流注入下におけるビーム品質改善が課題となる。また実際は反射率の低い物体も検知する必要があるため、さらに高い光出力が求められる。実用化されている LiDAR の性能を見ると、OSRAM Opto Semiconductors 社[7-4]はピーク出力 85W ( $\lambda=905\text{nm}$ , Pulse width < 5ns)で 200m の測距を達成しており、京都大学野田グループ[7-5]では 70W のピーク出力で 100m 以上の測距の見込みが立っている。よって遠距離測定を可能にするために 100W 近くの高出力化が求められる。以上より高出力化の今後の目標は、(1)完全単一モードでのワット級高出力化、(2)100W 級高出力動作に向けた極限追及、となる。

## 7.2 2次元構造による高出力化

我々が提案する VCSEL 増幅器は長尺化によって高性能化することを示した。しかし長さが cm 以上の長尺素子を 1 直線状に作ることは現実的ではない。そこでより長尺な素子を実現するためには Fig.7-2 に示すような折り返し構造やアレイ化による 2 次元レイアウト構造が必要になる。本グループでは Fig.7-3 に示すような折り返し導波路による高出力化が実証されている。折り返し構造の場合、それぞれの導波路から出射される光が干渉しあいドットパターンを形成するというユニークな特徴を持つ。またパルス動作を行うことで片方の出射だけでも数ワットの高出力化が達成されている。2 次元構造による高出力化を達成するための課題として注入電流の均一化とレンズ設計が挙げられる。2 次元構造の場合、アレイピッチ数に応じて幅方向への面積が広がるため、注入電流の均一化は直線導波路よりもシビアになる。そのため適切なワイヤボンディング構造を考える必要がある。またレンズによる集光を行う際は、各導波路の出射光を各々コリメートする必要がある。マイクロシリンドリカルレンズを用いた 2 レンズ系の構成になる。集光スポットを狭めるために、適切なレンズ設計を要する。

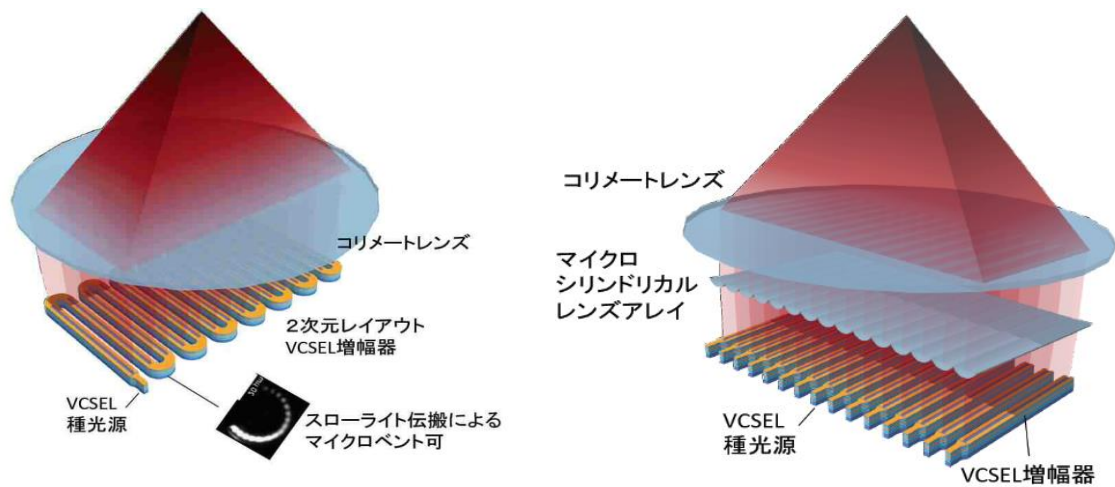


Fig.7-2 Two-dimensional layout structure of VCSEL amplifier

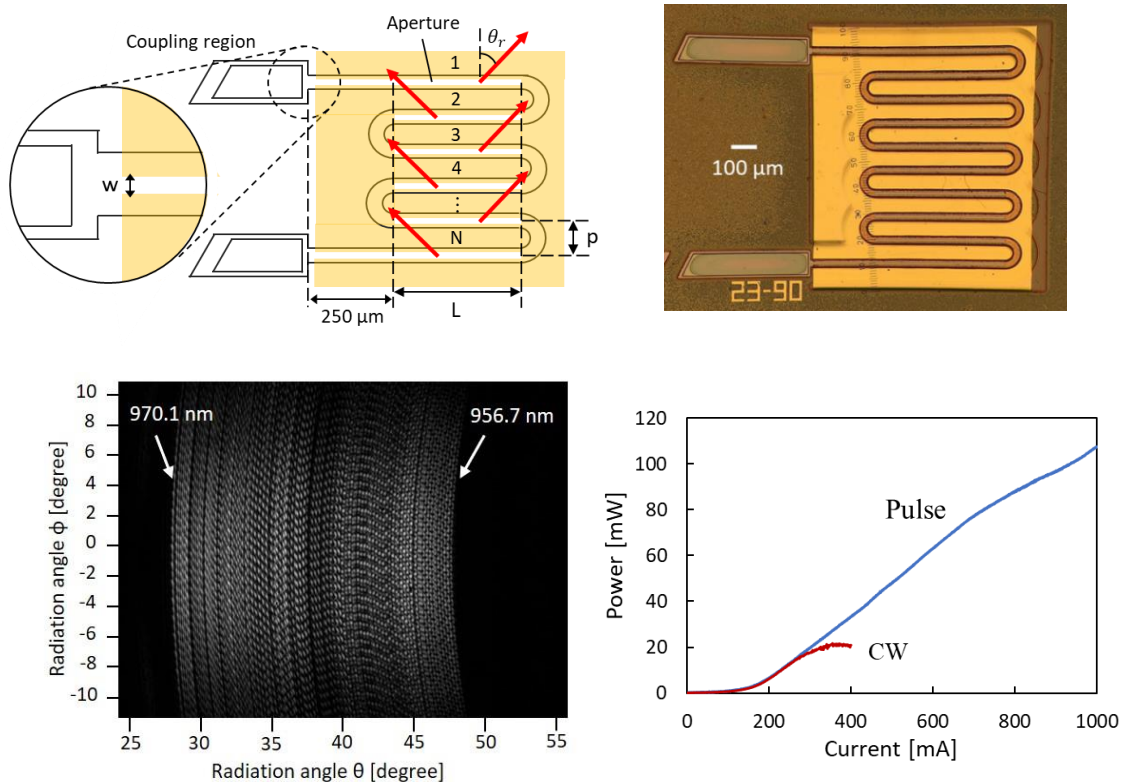


Fig.7-3 VCSEL amplifier with folded path structure [7-6]

### 7.3 VCSEL との集積化

本研究では外部光源を種光源として使用したが、小型化のために将来的には VCSEL との集積構造を確立する必要がある。集積化の課題として、VCSEL から増幅器に安定した横方向結合を行うことである。高効率結合を実現する構造として Fig.7-4 に示すように、離調層によって VCSEL と SOA のカットオフ波長に差をつけて、一方向結合を実現させるという手段があり、40mW の単一モード出力を達成している。またビーム掃引機能として、熱チューニングによる波長掃引(Fig.7-5)や MEMS VCSEL との集積化(Fig.7-6)なども行われている。まだ集積構造を用いたワットクラスの高出力動作は達成できていないが、本研究で実証した長尺 VCSEL 増幅器にこれらの集積構造を適用することで出力特性を改善できる可能性があり、超小型の高出力・高ビーム品質動作が可能なビーム偏向器を実現できる。

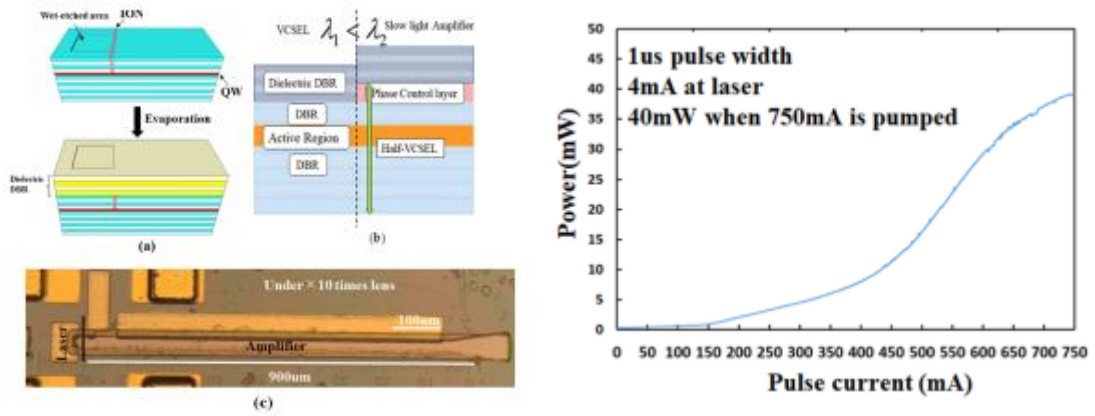


Fig.7-5 Lateral integration of VCSEL and SOA [7-7]

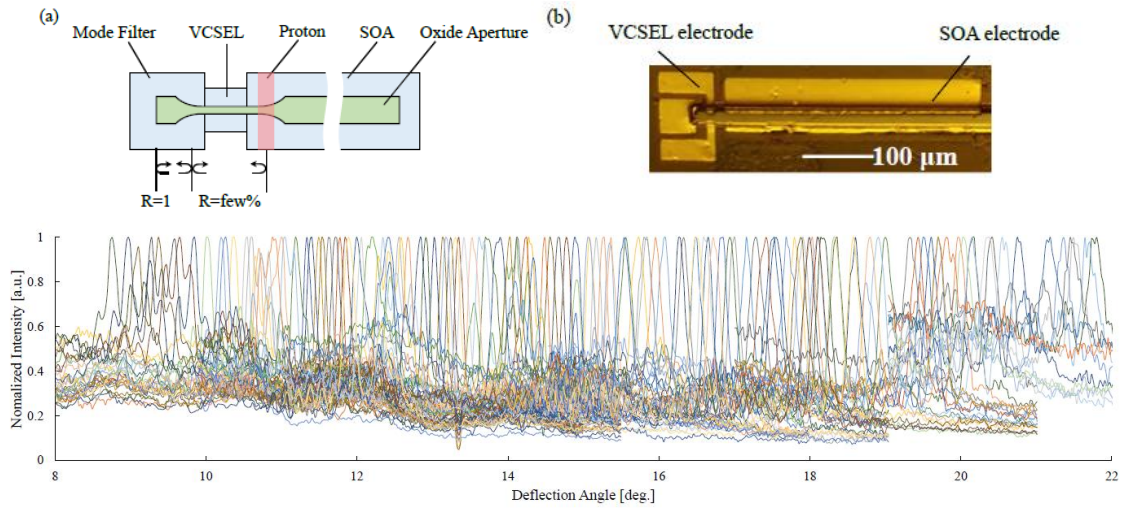


Fig.7-6 Beam scanning by thermal tuning of VCSEL integrated amplifier [7-8]

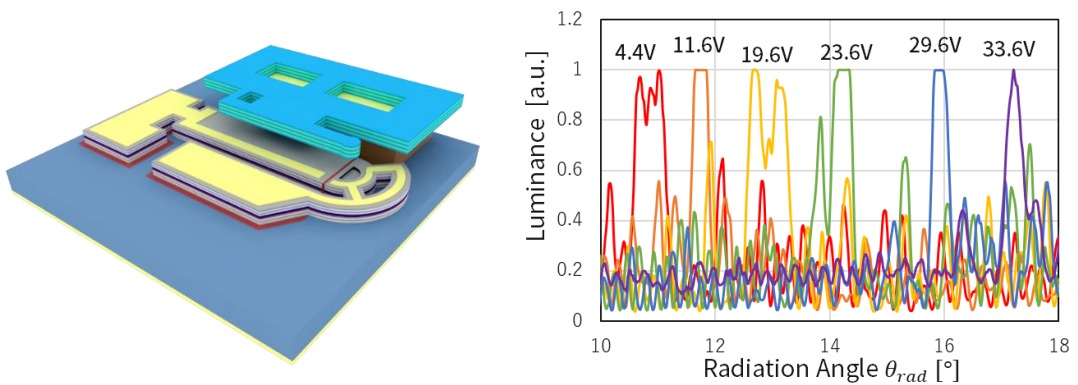


Fig.7-7 Beam steering device integrated with MEMS VCSEL [7-9]

## 7.4 LiDAR 測定

本グループでは 2mm 長素子を用いた LiDAR 測定が行われている, Fig.7-8 は ToF を用いた LiDAR 測定を示しており, 40m 先の物体に対して高い解像度で測距を行っている. また VCSEL 増幅器は出射光の形状が細長いラインビーム状になることから, Fig.7-9 に示すようなストラクチャードライト方式のスキヤニングにも応用でき, 高い精度での測距が実証されている. 本研究で実証したより長尺な素子を用いることでより細くかつ高出力なラインビーム出射を可能にするため, さらに遠距離かつ高い分解能での LiDAR 測定が期待される.

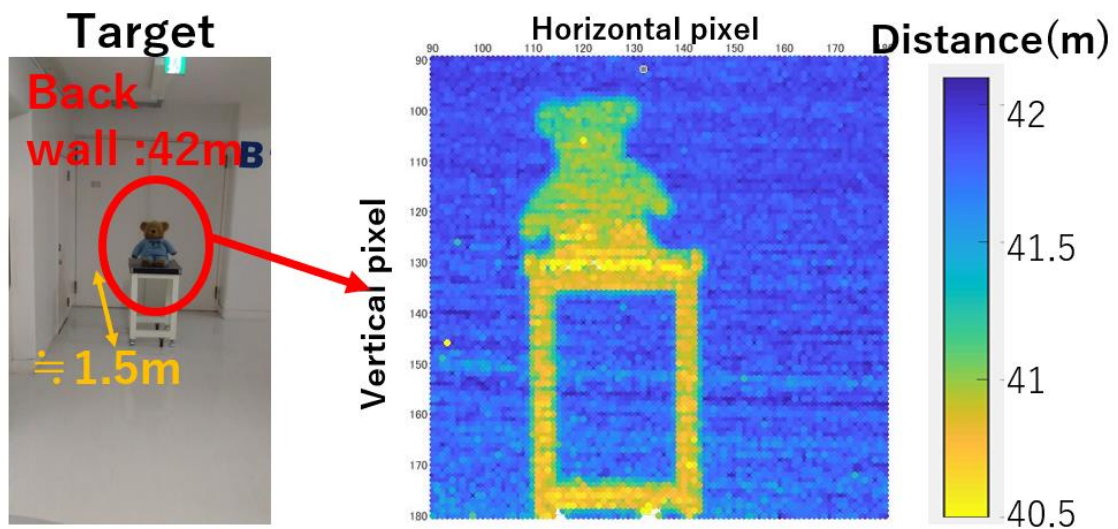


Fig.7-8 LiDAR measurement by ToF using 2 mm long amplifier [7-10]

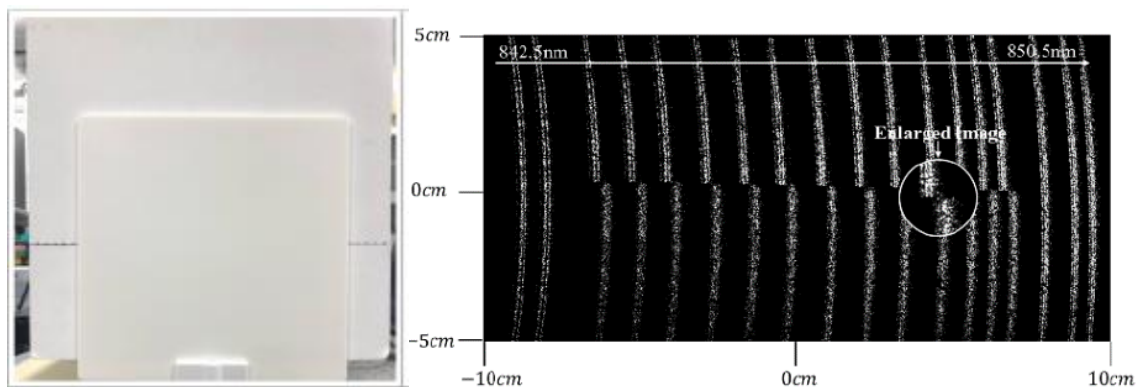


Fig.7-9 Non-mechanical structured light scanning [7-11]

## Reference

- [7-1] J. Hayakawa, A. Murakami, A. Tominaga, Y. Suzuki, Z. Ho, X. Gu, and F. Koyama, "Watt-class high-power and high-beam-quality VCSEL amplifiers," SPIE OPTO, 1093809, (2019).
- [7-2] 一般財団法人光産業技術振興協会, "光偏向器の適用領域及び技術情報," (2017). : <http://www.oitda.or.jp/main/st/TP27-1.pdf>
- [7-3] 馬場俊彦, "切手サイズライダの実現に向けて," 電子情報通信学会誌, Vol. 102, No. 7, pp. 649-653, (2019).
- [7-4] OSRAM Opto Semiconductors, "A milestone for laser sensors in self-driving cars," (2016) : <https://www.osram-group.com/media/press-releases/pr-2016/07-11-2016>
- [7-5] 京都大学 野田研究室, "フォトリソニック結晶レーザーを搭載した LiDAR の開発に成功- 来るべき超スマート社会におけるスマートモビリティの発展に貢献- " : [http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research\\_results/2020/documents/200716\\_1/01.pdf](http://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research/research_results/2020/documents/200716_1/01.pdf)
- [7-6] M. Morinaga, X. Gu, K. Shimura, M. Nakahama, A. Matsutani, F. Koyama. VCSEL Amplifier Dot Projector with Folded-Path Slow-light Waveguide for 3D Depth Sensing, 2018 International Semiconductor Laser Conference, TuC4, pp. 95-96, (2018).
- [7-7] S. Hu, M. Takanohashi, X. Gu, K. Shimura, F. Koyama. Lateral Integration of VCSEL and Amplifier with Resonant Wavelength Detuning Design, Conference on Lasers and Electro-Optics 2019, SM4N.3, (2019),
- [7-8] K. Shimura, Z. Ho, M. Nakahama, X. Gu, A. Matsutani, and F. Koyama, "Non-mechanical Beam Scanner Integrated VCSEL For Solid State LiDAR", The 12th CLEOPR, 2-2G-3, (2017).
- [7-9] 旭 利紘, 顧 曉冬, 坂口 孝浩, 小山 二三夫. MEMS VCSEL 集積 DBR 導波路偏向素子のビーム偏向特性, 第 66 回応用物理学春季学術講演会, 12p-W611-7, 03-652, (2019).
- [7-10] I. Fujioka, R. Li, Z. Ho, X. Gu, and F. Koyama, "Time of Flight 3D Imaging using VCSEL Beam Scanner," 2019 24th Microoptics Conference (MOC), Toyama, Japan, pp. 88-89, (2019).
- [7-11] Ruixiao Li, Zeuku Ho, Xiaodong Gu, FUMIO KOYAMA. Structured-Light Sensor Based on Non-mechanical VCSEL beam scanner, 23rd Microoptics Conference, E-3, (2018).

## 第 8 章 結論

本研究は VCSEL 増幅器を長尺化することで高出力・高ビーム品質動作を両立したビームスキャナを実現することを目的とし研究を行った。各章では以下の成果が得られた。

1) VCSEL 増幅器を長尺化すると導波路内のコアとクラッド間の屈折率差によって生じる導波モードによって ASE が生じ、結合光の増幅特性が妨げられる。そこで SCH 層の屈折率を下げることでコアとクラッド間の屈折率差を無くし、導波モードをカットオフにして ASE を抑圧する構造を提案した。

3 重量子井戸を有する 850nm 帯 VCSEL ウェハと 980nm 帯 VCSEL ウェハに対して計算を行った。FIMMWAVE による電界分布計算では、850nm 帯 VCSEL に対しては SCH 層の AlGaAs の Al 組成を 0.55 以上に、980nm 帯 VCSEL に対しては 0.7 以上に設計することで、導波モードの光閉じ込め係数は完全に 0 になり、カットオフにできる可能性を示した。

また本計算によって設計した VCSEL ウェハを用いて実験的に ASE の抑圧を検証した。導波路をへき開し、へき開端面から出射される光の強度を測定したところ従来の構造では素子長に応じた光出力の増加が見られたのに対し、ASE の抑圧構造ではその出力はほぼ 0mW であった。また種光源を結合させ増幅器を動作させたところ、3mm 以上の増幅器でも終端まで結合光が伝搬されることが確認でき、本提案によって ASE が抑圧できることを示した。

2) VCSEL 増幅器は増幅器長に応じてビーム拡がり角が狭窄化される。それを検証するために 1~10mm 長の素子を用いて測定を行った。素子を長尺化すると注入電流や発熱の不均一性が大きくなり、ビーム拡がり角は回折限界から遠ざかる傾向が見られた。積層プローブやワイヤボンディングによる均一注入を試みたところ、6mm 長素子において、ビーム拡がり角が回折限界の約 1.5 倍である  $0.015^\circ$  が得られた。

3) 長尺増幅器の結合光を波長掃引することで高解像ビーム掃引を行った。3mm 長と 6mm 長の増幅器を用いて実験を行ったところ、3mm 長素子は  $27^\circ$  の偏向角と 590 点の解像点数、6mm 長素子は  $11.3^\circ$  の偏向角と 597 点の解像点数を得た。解像点数をより上げるためには拡がり角を回折限界に近づけるほか、利得帯域を広げ偏向範囲を広げることが有効であることを示した。

4) 2 種類の VCSEL ウェハを用いて高出力動作の実験を行った。上部反射鏡の反射率を落とすことでスロープ効率が向上することが確認でき、CW 動作下では最大スロープ効率 0.65W/A、最大光出力 390mW が得られた。また 100ns のパルス幅でパルス動作させたと

ころ、10mm 長の素子で 9.7W 以上の単一波長動作での高出力化を達成した。一方大電流を流すとスローライトモードで伝搬する ASE が生じることが確認でき、高出力・高ビーム品質を両立するための課題を明らかにした。

5) スローライトモードの ASE によるビーム・スペクトル品質の課題を解決するための構造の検討を行った。提案は位相シフタを取り入れた誘電体 DBR によって反射率にディップを生じさせ、利得ピーク帯の反射率を落とすことでスローライトモードの ASE を抑圧するというものである。これは実効的には利得スペクトルを平坦化することになるため、4 章で取り扱ったビームスキャン範囲の拡大にもつながる。

構造は  $\lambda/4$  光学厚さをもつ誘電体中に  $\lambda/2$  光学厚さの誘電体(位相シフタ)を入れるというものである。この時位相シフタの周期構造を作ると、中心波長の反射率を固定した状態で周辺の反射率が増加するため、反射率のディップを形成することができる。この反射率ディップを利得ピークに合わせるような設計を行うことで、波長帯域 20nm の利得の平坦化を示した。斜め入射の場合も同様の手法が使えることを示し、スローライトの ASE を抑圧できる可能性を示した。

6) 共同研究者との連携により、本研究で実現した面発光レーザ光偏向器を用いて、Time of Flight 方式でオフライン測定で 40m を超える測距範囲で距離精度 0.5% の 3D 測長に初めて成功するとともに、Structured Light 方式を用いて、5m の測距範囲で距離精度 0.7% の 3D 測定を実現した。

## 本研究に関する発表

### 1. 論文

- 1) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, and Fumio Koyama, “ASE Suppression for High Power Operation of VCSEL Amplifier,” Jpn. J. Appl. Phys. , submitted.
- 2) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, and Fumio Koyama, “High Beam Quality Operations of VCSEL Amplifiers,” APEX, submitted.
- 3) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, and Fumio Koyama, “High-Resolution Non-Mechanical Active Beam Scanner based on VCSEL Amplifiers”, Appl. Phys. Lett. (ready for the submission)
- 4) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, and Fumio Koyama, “High-power Pulsed Operations of VCSEL Amplifiers” (ready for the submission)
- 5) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, and Fumio Koyama, “Gain Equalization of VCSEL Amplifiers” (ready for the submission)

### 2. 国際会議

- 1) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama. “High-resolution Beam Steering of Slow Light VCSEL Amplifier,” The 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim, 2-1G-5, Aug. 2017.
- 2) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Xiaodong Gu, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, FUMIO KOYAMA. “VCSEL Optical Amplifier for High Power Operations, “The 24th General Congress of the International Commission for Optics, Tu1J-08, Aug. 2017.
- 3) Zeuku Ho, Junichiro Hayakawa, Keisuke Shimura, Keisuke Kondo, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, Akemi Murakami, Fumio Koyama. “High Power and High Beam Quality VCSEL Amplifier”, 2018 International Semiconductor Laser Conference, WC3, pp. 229-230, Sep. 2018.
- 4) Zeuku Ho, Keisuke Shimura, Keisuke Kondo, Xiaodong Gu, Akihiro Matsutani, Fumio Koyama. “High Resolution Active Beam Scanner Based on VCSEL Amplifier”, 31st Annual Conference of the IEEE Photonics Society, MC2.2, pp. 67-68, Oct. 2018.

### 3. 国内会議

- 1) 許在旭, 志村京亮, 顧曉冬, 中濱正統, 松谷晃宏, 小山二三夫. “面発光レーザ高出力化のための長尺半導体光増幅器,” 第 64 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-422-3, Mar. 2017.
- 2) 許在旭, 志村京亮, 顧曉冬, 中濱正統, 松谷晃宏, 小山二三夫. “面発光レーザ増幅器の統合効率の検討,” 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会, 6p-C14-7, Sep. 2017.

3) 許在旭, 志村京亮, 顧曉冬, 中濱正統, 松谷晃宏, 小山二三夫. “長尺面発光レーザー増幅器による高出力・高ビーム品質動作,” 第 65 回 応用物理学会 春季学術講演会, 18a-B203-10, Mar. 2018.

4) 許 在旭, 志村 京亮, 顧 曉冬, 松谷 晃宏, 小山 二三夫. “高出力面発光レーザー増幅器のビーム品質改善の検討,” 2019 年第 66 回応用物理学会春季学術講演会, 12p-W611-3, Mar. 2019.

#### 本研究に関する受賞歴

- 1) 平成 28 年度 総合理工学研究科物理電子システム創造専攻 修士中間発表 優秀学生賞
- 2) 平成 29 年度 第 40 回光通信研究会 Sales Talk Poster 賞

# 謝辞

本研究を遂行するにあたり、研究・実験方針に関して多大なご指導を頂いた小山二三夫教授に心よりお礼申し上げます。また研究報告会を中心に多くのご意見、ご助言を頂いた植之原裕行教授、宮本智之准教授に感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、大変貴重なご意見を頂いた浅田雅洋教授、中村健太郎教授、株式会社富士通研究所 森戸健様に感謝いたします。

研究を進めるにあたり、実験装置や薬品の扱い方などのご指導を頂いた坂口考浩助教、プロセス製作において ICP エッチング加工を行っていただいた松谷晃宏技術部マイクロプロセス部門長、実験用の備品の管理に関しお世話になった須藤久男技術支援に感謝いたします。

事務手続き等で研究生活のサポートをして頂いた秘書の吉田ひろみ様、千葉とみ江様、小岩恵津子様に感謝いたします。

研究方針や実験方法に至るまで親身にご指導・ご助言を頂いた中濱正統博士、顧曉冬特任助教に感謝いたします。

研究室においてお世話になった相川洋平助教、近藤圭祐博士、井上俊也博士、Hameeda Ibrahim 博士、Hu Shanting 博士、Ahmed Hassan 博士、押田将平氏、小山俊泰氏、賀川拓用氏、小林拓貴氏、笹子寛貴氏、鈴木崇裕氏、鈴木陽平氏、谷口寛樹氏、森裕之氏、森脇翔平氏、荒牧恵悟氏、池田拓磨氏、北本智士氏、小森雄貴氏、齋藤季氏、須原壮氏、土岡弘明氏、森田晃平氏、國貞彰吾氏、竹田亮平氏、平林祐紀氏、熊本知優氏、志村京亮氏、須田義久氏、永沼友浩氏、三村正樹氏、Xu Jialun 氏、青山智之氏、旭利紘氏、七條太一氏、高野真氏、冨樫良介氏、西村駿氏、堀切顕徳氏、松永一仁氏、山崎将志氏、Zhang Yiqi 氏、Li Ruixiao 氏、塗師豪太氏、石田侑次氏、勝田優輝氏、坂元駿斗氏、下澤航平氏、鷹箸雅司氏、森長瑞氏、松沢一平氏、篠塚竣氏、高橋健太氏、高橋朋来氏、外山裕太氏、張家赫氏、李嘉莹氏、上野信明氏、太田浩紀氏、小原日向氏、佐山翔泰氏、藤岡威吹氏、山下孝史氏、吉木幹人氏、劉語氏、湯静氏、Shui Shuting 氏、北村研太氏、小林亮輔氏、松尾駿氏、新井貴大氏に感謝いたします。

最後に、陰で支えてくれた家族に心より感謝いたします。