T2R2 東京工業大学リサーチリポジトリ
Tokyo Tech Research Repository

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	面発光レーザのモード制御と波長可変動作に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	井上俊也
Author(English)	Shunya Inoue
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10861号, 授与年月日:2018年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小山 二三夫,淺田 雅洋,植之原 裕行,渡辺 正裕,宮本 智之,東盛 裕一
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第10861号, Conferred date:2018/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

Powered by T2R2 (Tokyo Institute Research Repository)

博士論文

面発光レーザのモード制御と波長可変動作に関する研究

平成 30 年 (2018 年) 1 月

指導教員 小山　二三夫　教授

提出者

東京工業大学

大学院総合理工学研究科

物理電子システム創造専攻

井上　俊也

目次

第一章　序論 4
1.1 研究の背景 4
1.1.1 情報通信の発展と光エレクトロニクス 4
1.1.2 高屈折率差サブ波長格子(HCG) 10
1.1.3 ナノインプリントリソグラフィー 11
1.1.4 広帯域波長可変光源 12
1.2 面発光レーザの横モード制御 18
1.3 マイクロマシン波長可変面発光レーザの温度無依存化 19
1.4 マイクロマシン面発光レーザの波長スイッチング 21
1.5 Laser Imaging Detection and Ranging 22
1.6 本研究の目的 23
第二章　高屈折率差サブ波長格子(HCG)を用いた面発光レーザの横モード制御 30
2.1 高屈折率差サブ波長格子の角度依存性 30
2.2 高屈折率差サブ波長格子を用いた横モード選択 31
2.3 高屈折率差サブ波長格子の角度依存性による単一横モード条件拡大の検討 32
2.4 マイクロマシン面発光レーザへのサブ波長格子の導入と単一横モード条件 40
2.5 まとめ 46
第三章　HCG マイクロマシン面発光レーザの波長温度無依存化 49
3.1 熱バイモルフ型アクチュエータを用いた発振波長制御 49
3.2 HCG マイクロマシン面発光レーザの波長温度無依存化の設計 . 51
3.3 まとめ 55
第四章　ナノインプリントリソグラフィーを用いた HCG 面発光レーザの作製と評価 59
4.1 ナノインプリントリソグラフィーを用いた高屈折率差サブ波長格子の作製 59

4.2 高屈折率差サブ波長格子を上部反射鏡として用いた面発光レーザ 66
4.3 高屈折率差サブ波長格子を用いたマイクロマシン面発光レーザ 85
4.4 まとめ 97
第五章　マイクロマシン面発光レーザの波長スイッチングの高速化 102
5.1 マイクロマシンのリンギング 102
5.2 リンギング抑制の原理 105
5.3 リンギング抑制のシミュレーション 107
5.4 マイクロマシン面発光レーザでのリンギング抑制の実証 115
第六章　波長可変面発光レーザの機能集積化 137
6.1 波長可変面発光レーザとスローライト導波路の集積化 137
6.1.1 スローライト導波路ビームスキャナ 138
6.1.2 スローライト導波路 SOA 139
6.2 波長可変面発光レーザを集積したスローライト導波路ビームスキャナの作製と評価 140
6.3 まとめ 150
第七章　結論 154
本研究に関する発表 162
謝辞 165

第一章　序論

1.1 研究の背景

1.1.1 情報通信の発展と光エレクトロニクス

離れた場所に瞬時に情報を送るという通信伝送は古くから研究されてきた．18 世紀の半ばには，一文字ごとに電線を用意し，順に静電気を送るという最初期の電気通信方式が提案されていた．19 世紀始めには，電磁石を用いて検流計が発明され，電気信号を直接読み取れるようになり，また継電器の発明により電気信号の長距離伝送も可能となった．1832 年に Schilling von Canstatt が発明した電信機は，電流方向を決める 7 組の白・黒鍵と 7 つの検流計を持ち，6bit の伝送を達成した．これは世界初の 2 進数での信号伝送であった．1833 年にはガウスが発明した電信機は，2 本の伝送路を持ち，4 進数を用いて 1 秒間に 7 文字の伝送に成功している．通信電送が初めて商用化されたのは 1839 年のことである．パディントン駅―ウェスト・ドレイトン間の 21km に線路を伝送路に用いて警報機用として初めて敷設された．アメリカでは 1944 年にモールスが電信線を敷設し，モールス符号の伝送実験を行っている．1857 年には大西洋横断海底ケーブルが初めて敷設され，初めて商用化されてから 30 年余りで全大陸に電信網が広がり，世界的な高速通信網が誕生した．

日本においてはペリーの来日時にエンボッシング・モールス電信機がもたらされている．1869 年には東京・横浜間で電報の取り扱いが始まった．1871 年にはロシア・ウラジオストクから長崎へ海底ケーブルが敷設され，ヨーロッパ，さらには米国とも通信が可能となった．

一方電信は電話の普及により規模を縮小していく．電話は 1876 年にグラハム・ベルにより発明された．日本には 1877 年にもたらされ 1890 年に電話サービスが開始された．1934 年には東京-マニラ間で日本初の国際電話が開通し，1964 年には太平洋横断海底ケーブルが敷設された．

1990 年台に入ると音声を伝送する電話に代わり，今度はデータ通信を行うインターネットによる情報通信が拡大していく．インターネッ

トの発展はコンピュータと深く関わっている．世界で初のプログラム内蔵方式のコンピュータは 1949 年にマンチェスター大学で発明された．1951 年にはレミントンランド社が初の商用コンピュータ UNIVAC Iを発売した．コンピュータ間の通信技術は 1960 年台に研究が始まっており，パケット通信が提案されたのもこの頃である．1969 年には 3 大学 1 研究所間で 24 時間接続の ARPANET が始動した．同時期に複数のネットワークが構築されたが，1980 年代後半には TCP/IP プロトコルの導入によりネットワークの統合が進み，インターネットへと発展していった．1990 年前後には世界中でネットワークが敷設され，それがインターネットに接続されていった．1990 年頃までは商用利用が禁止されており，主に学術用途のみに用いられてきたインターネットであるが，1990 年台に入るとその制限も緩和されていき，1995 年には NFSNET が民間へ払い下げられ，また Windows 95 の発売もあり，一般の人に急速に普及することとなった．

パーソナルコンピュータの普及により一般の人に広まったインターネットであるが，1990 年代～2000 年代はインターネットへの接続は主に有線で行われていた．しかし近年では移動体通信網が拡充されてきており，またスマートフォンやタブレットの普及により，インターネットへの接続がより身近なものとなり，無線通信による通信量も爆発的に増加している．

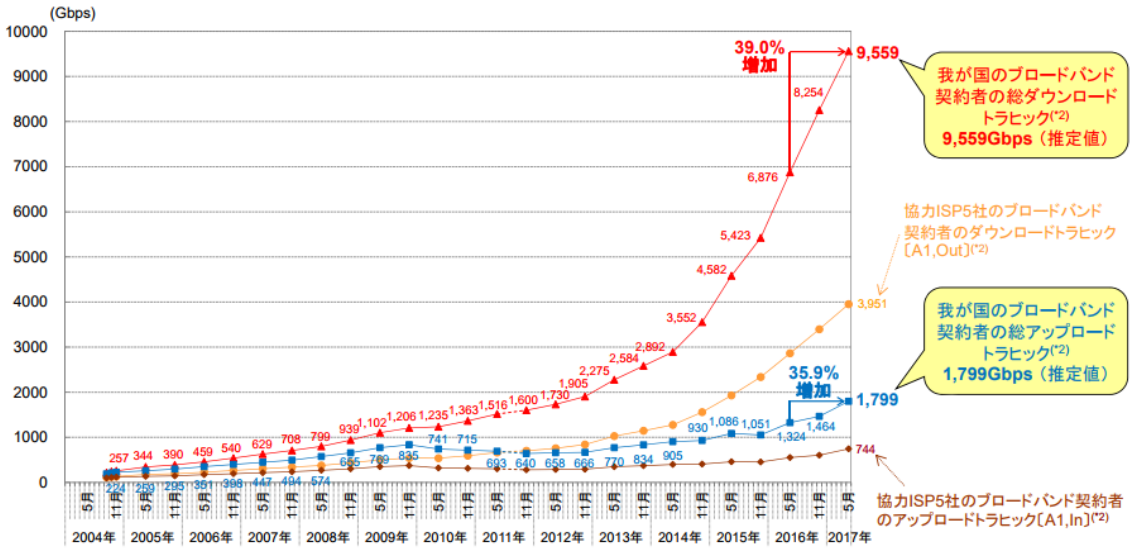


Fig.1-1 総務省統計資料「我が国のインターネットトラヒックの現状」

Fig.1-1 に総務省統計資料「我が国のインターネットトラヒックの現状」としてブロードバンド契約者の総ダウンロードトラヒックの推移を掲載する[1]. これによれば近年では年 10%を超える速度で通信量が増加しており，今後も同じような傾向が続くと考える．これは，1,パソコンやスマートフォン・タブレット端末の普及率の増加，2,通信量の多いコンテンツの増加，3,クラウド型サービスの増加によるものと考えられる．パソコンの世帯普及率は 90%近くあり，すでに一人 1 台持っている時代となってきている．また，ここ約 5 年でスマートフォンやタブレットは急激に普及率が増してきており，いつでもどこにいてもインターネットを利用することが可能となってきている．また Youtube 等の動画共有サービスや放送局等からの有料・無料を問わず動画配信サービスが充実してきており，それをパソコンだけでなくスマートフォンやタブレットで試聴する機会も増えてきている．このようなサービスの利用は今後も増加していくと思われ，また 4K や 8K と言った高画質動画の配信が普及すればさらに通信量が増えていくことが予想される．3 つ目のクラウド型サービスについては，オンラインストレージによる複数端末でのデータ同期もさることながら，オープンオフィス等のソフトウェアから Web 会議システムといったソリューションまでオンライン上で様々なサービスが提供されている．クラウド型サービスによりこれまでになかった新しい便利なサービスを受けられる反面，多くの処理がオンライン上で行われるためデータ通信量は増えてしまい，これからも様々なサービスが提供されるにつれて更に通信量が増えていくことが予想される．

高度情報化社会を迎えた現代ではさらなる通信速度の向上は必要不可欠である．有線接続における通信速度の高速化には光ファイバ通信がその役割を大きく担ってきた．

光通信自体は古くから行われてきており，一例としては電話を発明した Bell 自身による 1880 年の光通信実験の試みが挙げられる．この実験においてベルは光源に太陽光を用い，約 200m の音声電送を達成して

いる．しかしながらこの実験系において伝送路は大気中であるため信号光の散乱や損失が大きく実用化は難しいものであった．光通信の実用化の大きな一歩となったのは，光信号の伝搬を低損失で行える光ファイバと，低消費電力でコヒーレント光を生成が簡単な半導体レーザの発明である．低損失光ファイバは 1966 年にカオ博士らが理論研究を発表し，1970 年にはコーニング社が光ファイバの製造を開始した．また同じ頃光通信の光源用として使用可能な半導体レーザの研究も盛んに研究されており 1962 年に低温パルス発振，1970 年に AlGaAs/GaAs ダブルヘテロ接合構造半導体レーザの室温連続発振が達成された[2]．このように低損失光ファイバと半導体レーザの発明によって光通信は実用的な技術となった．さらには 1977 年には NTT が VAD(気相軸付)法による量産を成功させ 1979 年に光ファイバの損失値 0.20dB/km を実現されており[3]，中継器無しで数十 km～100km の長距離伝送が可能となり，1986 年のイギリス-ベルギー間の海底ケーブルを皮切りに太平洋・大西洋横断海底ケーブルなどの長距離通信や数十 km の都市間メトロネットワークなど比較的伝送距離の長い通信において用化されてきた．また 1990 年のエルビウム添加光ファイバ増幅器(EDFA)の実現により光信号を電気信号に戻すことなく増幅できるようになった[4]ことも長距離光通信の発展に大きく貢献した．

同軸ケーブルを用いる電気通信に対し光通信における最大のメリットは伝搬損失の低減である．また電気配線において生じる寄生インダクタンスにより生じる高周波での伝送損失の増加が光ファイバにおいては生じない．このことにより光ファイバ通信では 40GHz の伝送速度でも 1 万 km にもなる太平洋横断海底ケーブルにおいて中継器の数を大幅に低減することができている．また光通信においては信号の多重化が可能であり，1 本の伝送路における伝送容量を 100 倍以上に増やすことが可能である．光信号の多重化としては，複数の波長の光を伝送する波長分割多重，光ファイバ内の伝送モードを多重化するモード多重，偏波による偏波多重などがあり，また位相変調を用いて 1 信号に数 bit のデータを送ることができる多値変調も取り入れられており，1Tbps を

超える伝送容量も可能となってきている．この中でも特に光ファイバの大容量化に貢献している技術は波長分割多重である．モード多重，多値変調による多重度は多くても 10 程度，偏波多重において多重度は 2 であるが，波長分割多重の場合多重化する波長の数だけ多重度を増やすことができる．基本的に光信号は他の波長の光信号と干渉しないため 1 本のファイバに複数の波長にのせた信号を伝送し，分波することができる．理論的には 1000 波以上重ねることも可能である．波長分割多重はファイバを変えずに，送受信機を波長分割多重通信対応の機器に置き換えるだけで使用でき伝送容量を飛躍的に向上させることができるため，コスト的にも優れている．もちろん長距離通信に用いることができる低伝搬損失の波長帯域は限られているため制限はあるものの，波長間隔を狭くすることによって伝送波長数を増やすことができる．この波長間隔により波長分割多重は大雑把に 2 つに分けることができる．波長間隔が 20nm と広い CWDM(Coarse WDM)と 1nm 以下の DWDM(Dense WDM)である．DWDM では波長の高密度化により伝送容量の大容量化が可能であるが，レーザの波長変動を±0.1nm 以下に抑える必要がありコストが跳ね上がる．それゆえ基幹ネットワークほど高密度化していないネットワークでは精密な光源制御の必要ない CWDM が用いられるが，波長間隔が広いことから増幅器の使用が困難であり，50～80km 以下の伝送距離に限定される．

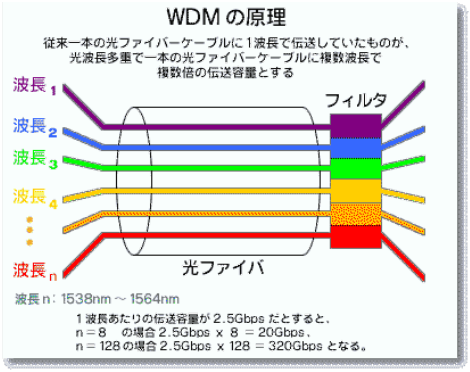
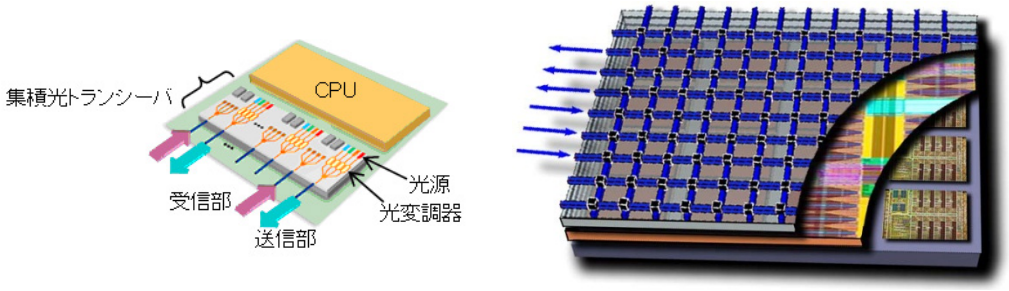


Fig. 1-2 WDM のイメージ[5]

長距離・大容量伝送において，電気通信に対して大きなメリットを持つ光通信であるが，端末でのデータ処理を電気で行う現在の機器においては，電気→光・光→電気の変換を行わなければならないため，伝送損失に対し変換損失が大きく，これまで光通信の主な舞台は長距離通信であった．しかしながら 1980 年に伊賀健一博士によって発明された面発光レーザ(VCSEL：Vertical Cavity Surface Emitting Lazer) [6]により光源の低消費電力化が進んだこと，変調速度の高速化により電気配線での伝送損失が増加してきたことにより，短距離通信でも光通信の利点が増してきており，データセンターやスーパーコンピュータのラック間配線といった数 m～数百 m の配線に対しても光通信が用いられるようになってきている．本学のスーパーコンピュータ・TSUBAME においてもラック間光インターコネクトが用いられており[7]，スーパーコンピュータ世界ランキングでは，絶対性能・電力性能において高い性能を発揮している[8][9]．身近なところでは Apple 社のパソコンに搭載されている Thunderbolt コネクタにおいて電気・光通信が併用されており，住友電工や Corning から光ケーブルが製品化されている[10]．また，LSI の小型化によって寄生素子の影響が大きくなり，伝搬損失の増加・信号遅延などが大きな問題となってきており，その対策としてチップ間配線，さらにはチップ内グローバル配線などに対しても光配線を用いるべく研究が進められている．



チップ間光配線[11]　　チップ内グローバル光配[12]

Fig.1-3 超短距離光配線のイメージ

このように光伝送は電気伝送に対し優位な点が多く，今後のさらなる発展に向けて研究が盛んに行われ，それに伴い様々なデバイスが開発されている．通信で用いられる光デバイスには，小型，低消費電力等が求められているが，単なる光源としてだけではなく，様々な機能を一体集積したデバイスの実現によりコストダウン等が期待されている．
その中で本研究室における研究対象の一つは波長可変レーザであり，短距離光インターコネクトでの WDM 通信用光源として，広帯域で連続的に波長掃引可能な面発光レーザの実現を目指している．
主に通信用として発達してきた光エレクトロニクスであるが，小型・低消費電力である半導体レーザは通信以外でも用いられつつある．その中でも波長可変機構をレーザに一体集積した波長可変レーザは，眼底検査に用いられる光コヒーレントトモグラフィーやガスセンシングなどの各種センサーへの応用が期待されている．

1.1.2 高屈折率差サブ波長格子(HCG)

従来の DBR の他に HCG(subwavelength high-index contrast grating reflectors)と呼ばれる反射鏡が注目されている(Fig.1-4). これは波長以下という微細な周期構造を持つ回折格子で，数百 nm の単層で高反射率を得ることができる[13]. また DBR においては材料の屈折率差で制限されていたストップバンド帯域を，HCG では格子の厚さ・周期・周期に対する格子幅の割合(Duty Cycle : DC)を変えることで制御することが可能である．計算上では 980nm 帯で最大 250nm 程度のストップバンド帯域が実現可能と見込まれる．他にも HCG には偏波依存性や大きな反射率入射角度依存性といった特徴があり，通信用やセンサー用の光源に応用できるのではないかと期待されている．この HCG を DBR の代わりに上部反射鏡として用いた VCSEL はすでに報告されており[14], また偏光の制御や高次モードの抑制等も期待されている[15]. また反射帯域を狭くし波長によって大きく反射率の変わる設計をすることでモードフィルタ等への応用も提案されている[16].

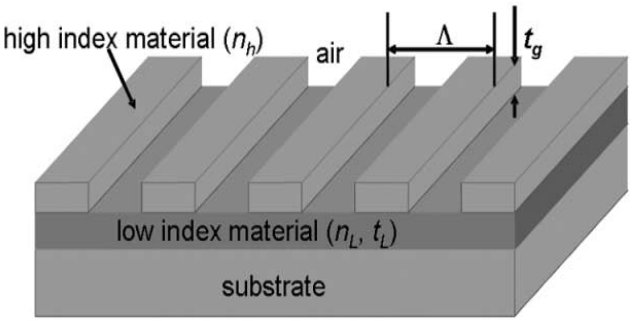


Fig.1-4 High-index contrast grating reflectors (HCG)のイメージ図[17]

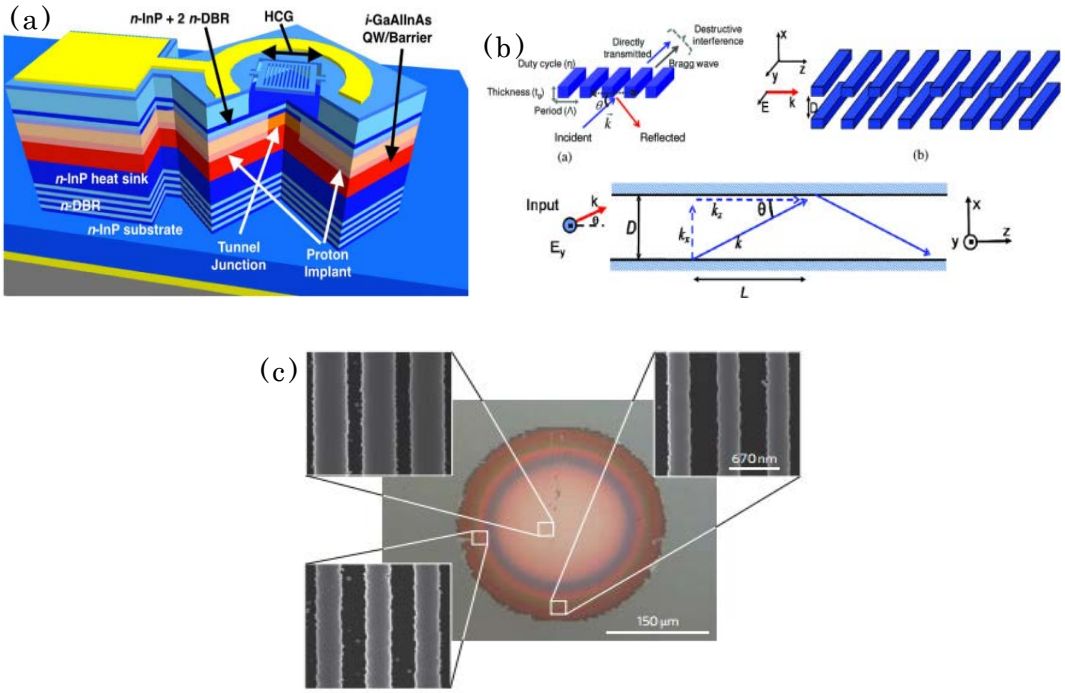


Fig.1-4 HCG を用いたデバイス.(a)波長可変面発光レーザ[18],
(b)中空導波路[15], (c)変面誘電体レンズ[19]

1.1.3 ナノインプリントリソグラフィー

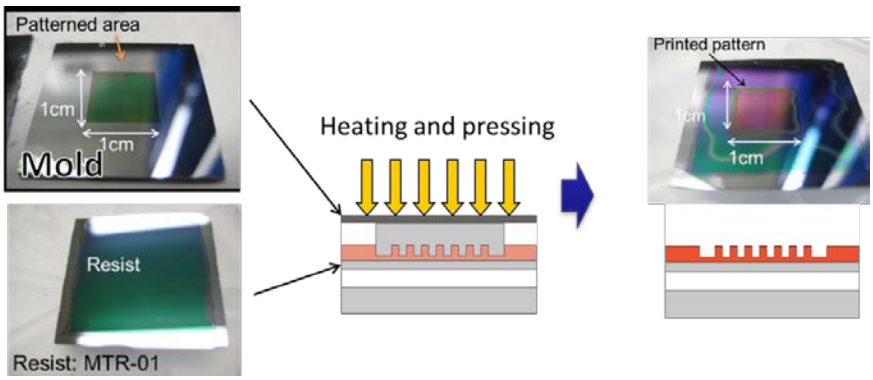


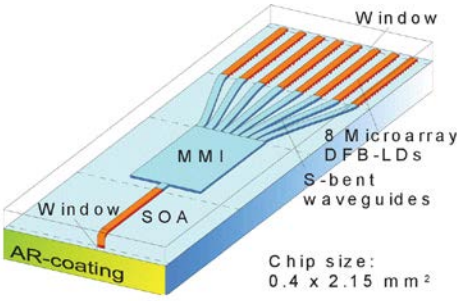
Fig. 1-5 ナノインプリントリソグラフィーの工程

半導体微細加工において，感光性レジストのフォトリソグラフィーや電子ビーム露光によるパターニングとエッチングプロセスによる形成が一般的である．しかしながら HCG は百 nm オーダーの構造であるため一般的なフォトリソグラフィーによるパターン形成は回折限界により不可能である．ArF 液浸ダブルパターニングソリグラフィ等により 100nm を下回る構造のパターニングも可能である[20]が，装置が高額でありコスト面で不利である．また他には電子ビーム露光による製作も報告されている[14][15]が，基板 1 つ 1 つに電子ビームにより微細パターンを描画しなければならず，パターニングに時間がかかり，量産性においてネックとなる．そこで本研究では，ナノインプリントリソグラフィーという手法を用いて格子形状のパターニングを行う．ナノインプリントは Si 基板等に形成した型を，レジストをコーティングした基板に押し当て，金型のパターンをレジストに転写する方法である．金型自体は電子ビーム露光を用いて形成するが，一度金型を作製してしまえば同じ形状を安価に素早くパターニングすることが可能である．もちろん金型のパターン形成を，大面積に施せばそれだけ広い領域にパターニングをすることも可能である[21]. 本研究室ではすでにナノインプリントリソグラフィーを用いた HCG の製作が実証されている[22].

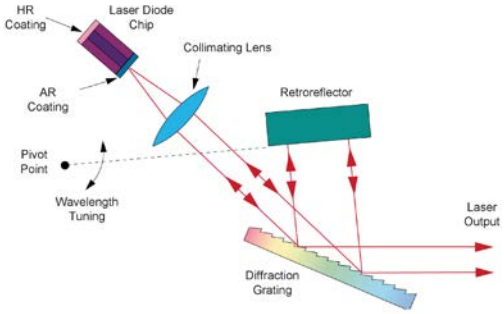
ナノインプリントリソグラフィーはレジストを基板に塗布し，金型を押し付けるものである[23]. この時レジストを固める方法において主に 2 種類の手法が存在する．それは熱によって硬化させるものと紫外線によって硬化させるものである．後者では紫外線透過型の型を使う必要があるが，前者において加熱温度(200℃以下)に耐えれば特に制約はない．本研究室では熱ナノインプリントを用いた微細構造形成の研究を続けてきている．

1.1.4 広帯域波長可変光源

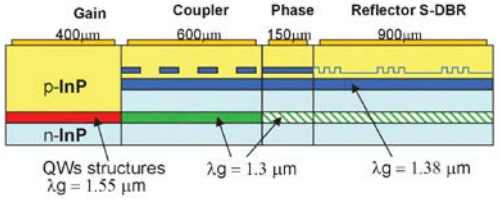
WDM に代表されるように近年多波長光源に対する期待は高まってきている．以下に代表的な波長可変光源の例を挙げる．



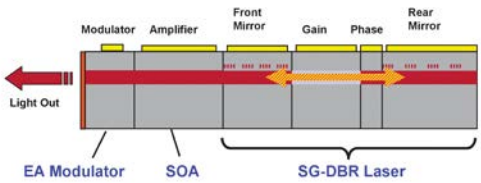
(a) DFB Laser array



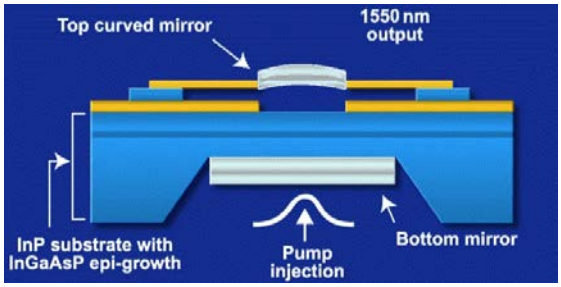
(b) external cavity with grating



(c) Grating-Coupled Sampled-Reflector



(d) Sampled-Gating DBR



(e) MEMS VCSEL

Fig. 1-6 波長可変レーザの一例[24]

(a)は波長の異なる DFB(Distributed-Feedback)レーザを集積し，MMI でそれぞれのレーザからの出力光を合波する．DFB レーザは，共振器内に回折格子を持っており，その格子周期に対し共振する波長の光だけが発振するため波長制御性がよいが，多重化する波長に合わせた DFB レーザをそれぞれ設計する必要がある．

(b)はレーザダイオードからの光を，回折格子を用いて干渉させ，単一波長のみを取り出す方法．広帯域で連続的な波長掃引が可能だが，デバイスの大型化と，モード間隔が狭いことが難点である．

(c), (d)はカプラー・位相チューニング部・反射鏡に注入する電流を変化させることで屈折率を変え，発振波長を変化させる．波長可変幅は広いが，掃引は連続的ではなく，(d)では SOA と集積してはいるものの出力が大きくない．

(e)は VCSEL に機械的な共振器長可変機構を設けた MEMS-VCSEL (Mechanical Electro Micro System – VCSEL) と呼ばれるものである．共振器内に空気層を設け，反射鏡を可動とし，機械的に反射鏡を動かして共振器長自体を変化させる．広帯域で連続的な波長掃引が可能なことと小型であることが特長だが，それゆえ出力が小さいことが課題である．

波長可変光源として現在は(a)や(b)のような複数の機構で多波長を達成しているものが主である．このようなものでは大きな出力が取れたり，広帯域で波長掃引可能であったりするが，素子のサイズ・消費電力といった観点からチップ間やチップ内の配線のような超短距離通信に用いるのは現実的ではない．そこで波長可変機構を光源に一体集積した，広帯域波長可変で低消費電力となるようなデバイスが理想である．

初めて発明された半導体レーザは端面出射型レーザであり，基板から横方向にレーザ光を放射するものであった．一方 1980 年に考案された面発光レーザは，基板に対して垂直方向に共振器構造を持ち，出力を基板上面または裏面から取り出す構造となっている．VCSEL では反射率が 99%を超える多層膜反射鏡 1 組を用いて共振器構造を形成するため光閉じ込めが強くでき，半導体-空気界面での反射のみを用いる端面出射型のレーザに比べて活性層体積を 2～3 桁のオーダーで小さくできる．また共振器長が 2 桁程度短く波長の数倍程度であり，縦モード間隔が 50～10nm であるため縦モード制御が必要なく構造を簡単にできる．さらに端面出射レーザと違いデバイスの劈開が不要であるため，エピタキシャルウェハにフォトリソグラフィーとエッチングのみの加工でウェハスケールで製造でき，二次元アレイも可能であるため，製造コスト

を抑えることができる．これらのことから面発光レーザのメリットをまとめると以下のようになる[25].

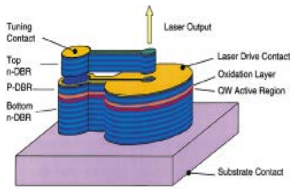
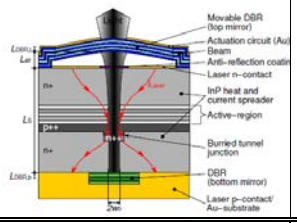
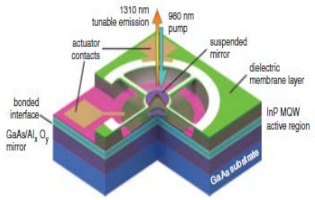
1. モノリシックな共振器形成
2. 素子分離前のウェハ単位の検査
3. 1mA 以下の極低閾値動作
4. 動的単一波長動作
5. 大放射面積，狭出射円形ビーム
6. 高密度二次元レーザレー
7. 積層による三次元アレーデバイスの集積化
8. 基板と垂直な光出射
9. LSI との良好な整合性

また共振器長が短いことにより，実行共振器長の変化に対し波長変動が大きいため，それを利用して物理的に共振器長を変化させ広帯域は超可変光源への応用も広く研究されている．波長可変面発光レーザの主な構造としては，共振器内に空気層を設け，機械的に反射鏡を可動としている．この構造により広帯域で連続的に波長可変な面発光レーザが報告されている．この機構は MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)と呼ばれることもあり，微細な電子部品と機械的要素を集積し，電気や熱などによって機械的な変化や変位が可能なデバイスである[26][27][28]．一般にマイクロメートルオーダーのサイズであり，フォトリソグラフィーやレーザ描画を用い製作される．微細加工技術の発展に伴い電子分野と機械分野の融合が可能となり，今までにないメカニズムのデバイスや多機能を小型集積したデバイスが研究開発されている．応用先としては各種センサー，インクジェットプリンタのノズル，光制御等に用いられている．例えば Texas Instruments 社の開発した DMD (Digital Micromirror Device) は 16μm 角の反射鏡を静電引力で動かし，ON・OFF の切り替えができる．これを用いたプロジェクターは DLP (Digital Light Processing) と呼ばれる．

Fig. 1-7 DMD (Digital Micromirror Device)[29]

他にも光スイッチや，先ほど紹介した外部共振器型の波長可変レーザにもマイクロマシン構造は利用されている．
このマイクロマシン構造を面発光レーザに集積した波長可変のレーザが盛んに研究されている．これまでに中心波長の 10%以上の波長掃引も報告されている．以下に一例を紹介する．

Fig. 1.6 MEMS-VCSEL の波長掃引例[30]

	Chang-Hasnain 他[26]	Amann 他[31]	Jayaraman 他[30]
			
掃引幅/中心波長	31.6nm / 935nm (3.4%)	102nm / 1550nm (6.6%)	150nm / 1310nm (11.4%)
共振器構造	カンチレバー	メンブレン	メンブレン
発光方法	電気励起	電気励起	光励起
駆動方法	静電引力	熱応力	静電引力

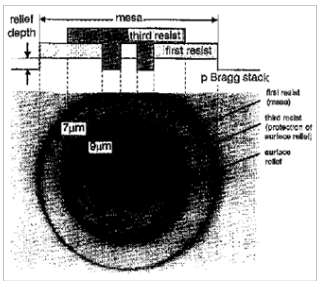
これらの面発光レーザでは，活性層の上に空気層を挟んで上部反射鏡が設けられている．この空気層を変化させて共振器長を変化させる．それには主に 2 種類の方法があり，一つが静電引力，もう一つが熱応力である．上部反射鏡と空気層を挟んだ基板側に電位差を与え，静電引力で上部反射鏡を変位させる方法が前者，熱膨張係数の異なる材料を貼り合わせた板を加熱することにより熱膨張係数差から上部反射鏡を変位させるのが後者である．静電引力の方が低消費電力・高速応答といった特長があるが，印加電圧が高く，可動範囲も制限される．

面発光レーザの場合，電流は縦方向に流す．一般にアパチャーまでの抵抗値を減らすために電流拡散層を設けたり，電流が流れるように半導体反射鏡を用いたりする．一方光励起であれば電流拡散層が必要なく，誘電体反射鏡を用いることができ，反射鏡の広帯域化が可能である．しかし外部励起光源が必要であり，装置の大型化や低出力といったことが課題である．

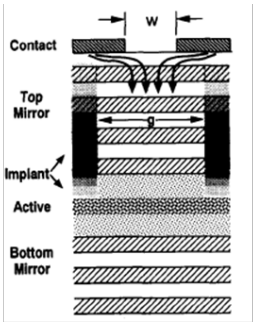
本研究室ではこれまで面発光レーザの温度無依存化のために熱応力を用いた MEMS 構造を集積した面発光レーザの研究を行ってきた[32][33]．また同様の構造を用いて逆に加熱することで積極的な波長掃引可能なデバイスの研究も行っている[34]．

1.2 面発光レーザの横モード制御

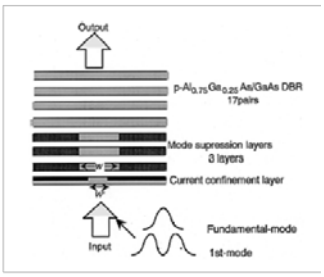
面発光レーザはその共振器長の短さから大きな縦モード間隔を持っており，単一縦モード動作は特別な制御を行わずに達成できる．一方単一横モード動作は，活性層の近くに高アルミ組成層を挟み，中央を残して周囲から酸化することで，電流・光を閉じ込めることによって達成していた．しかしながらこの方法では開口径を 3μm 程度にしか広げることができず，熱抵抗により出力が制限されていた．活性層領域を広げれば高出力かも見込めるが，モード制御とトレードオフであった．多モードで動作する光源であると，伝搬角や波長の違うビームも放射されることになり，通信であればモード分散・波長分酸により通信品質の劣化を引き起こしたり，センサー技術であれば解像度の劣化等を引き起こしたりする．



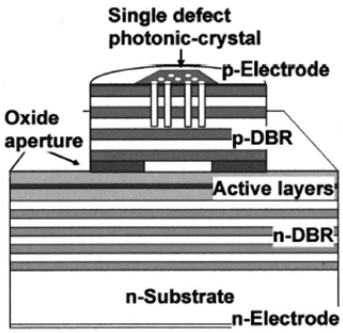
(a) Surface relief structure



(b) Metal aperture



(c) Multi oxide layer



(d) Photonic crystal

Fig. 1-8 これまでに報告されている横モード制御[35][36][37][38]

そこで酸化開口径を広げても単一横モードが得られる構造・機能が研究されてきた．例えば多層酸化狭窄・金属アパチャー・表面レリーフ構造・フォトニック結晶[35][36][37][38]などが提案されてきた．これらは高次モードに対して損失を与えるモードフィルタとして働くが，その機能が充分でないため，高い単一横モード出力は得られていなかった．そこで本研究室では，面発光レーザ共振器内において書く横モードの伝搬角の違いに着目し，入射角によって反射率の異なる反射鏡を用い，一つのモードだけを選択的に励振させ，単一モード動作の達成を試みた．

1.3 マイクロマシン波長可変面発光レーザの温度無依存化

波長分割多重通信などの絶対波長が重要になるアプリケーションなどでは，厳密な波長の制御が求められる．半導体レーザではマイクロマシンなどの特殊な機構を持たなければ，一般には共振器長が変わることはないが，環境温度により屈折率が変化してしまい，発振波長のシフトが生じてしまう．半導体レーザにおける温度による波長シフトは一般に 0.07k/K と知られており，温度上昇に伴い波長が長波長側へシフトを起こす．メトロネットワークで用いられる波長分割多重通信では，波長間隔が 0.4nm のものも用いられており，非常に厳しい温度管理が求められる．そのため装置価格の高騰や運用コストの増大を引き起こしてしまう．

一方マイクロマシン面発光レーザは反射鏡を直接駆動して共振器長を変化させ，波長掃引を行う．マイクロマシンを静電引力で駆動する場合，屈折率変化による波長変化と，マイクロマシンの駆動量による波長変化は独立であるため，温度による波長変化を打ち消すマイクロマシンの駆動が実現できれば，発振波長の温度無依存化が達成できる．
本研究室では熱バイモルフ効果を利用し．マイクロマシン面発光レーザの温度無依存化を達成している．バイモルフとは 2 つの異なる材質を貼り合わせた板状の構造であり，ここでは熱膨張係数の異なる材料を貼り合わせた片持ち梁を意味する．熱膨張率が違う材質を貼り合わ

せたバイモルフは，熱が加わると熱膨張率の差から，熱号町立の小さい材料側に屈曲する．片持ち梁型のマイクロマシン面発光レーザにおいては片持ち梁が基板側へ変位することで，短波長側へ発振波長を掃引させることができるため，熱膨張率の大きな材料を片持ち梁の上に成膜するか，または熱膨張率の小さな材料を下に挿入することで，温度上昇が生じた際に単共振器方向に反射鏡を変位させることができる．

本研究室では，Fig.1-9 に示すように DBR を上部反射鏡として用いたマイクロマシン面発光レーザにおいてすでに温度無依存化を達成している．このデバイスでは 830nm～865nm の 35nm で小さな温度係数が得られている．一方，HCG を上部反射鏡として用いたでマイクロマシン面発光レーザでは温度無依存化の報告はなく，DBR に対する HCG の優位性を示すためには，温度無依存化の実現も不可欠である．

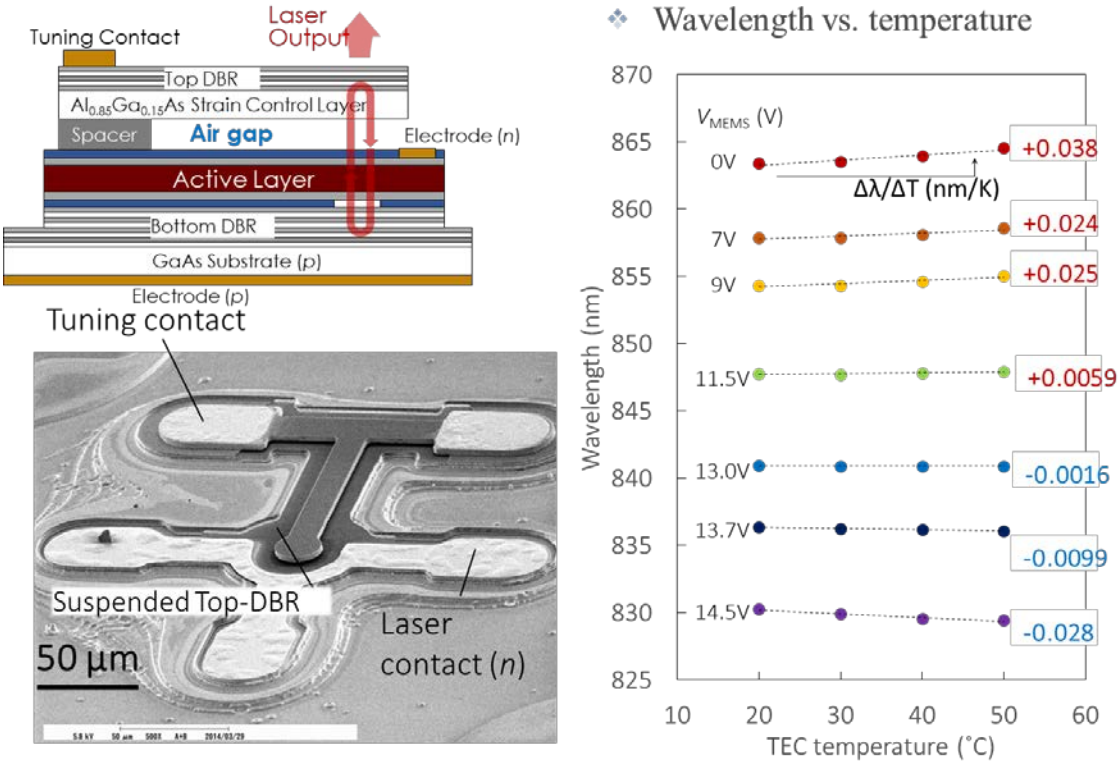
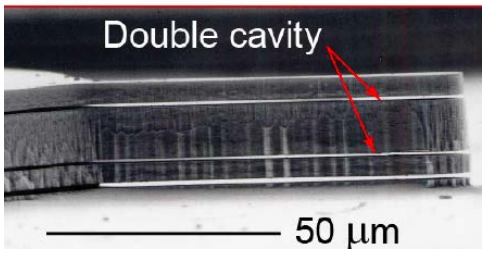
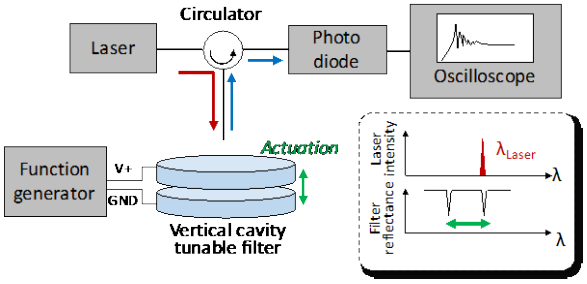


Fig.1-9 マイクロマシン面発光レーザのアサーマル動作[39]

1.4 マイクロマシン面発光レーザの波長スイッチング

波長可変光源を用いるアプリケーションにおいては，その波長スイッチング速度の高速化も求められている．たとえは次世代アクセスネットワーク規格である NG-PON2 では，10μs 以下の波長スイッチングが要求されており，また OCT などのセンシング用途においては波長掃引速度がフレームレートにダイレクトに影響し，測定時間の律速要因となる．波長の切替信号はステップ関数を印可することが慣用である．しかしながらマクロマシン面発光レーザの波長切替機構である片持ち梁は，弾性特性を持っており，簡便なステップ関数印可では片持ち梁がオーバーシュートをおこし，リンギングが生じてしまう．リンギングは梁の共振周波数でおこる振動であるが，このリンギングは梁の空気抵抗等により減衰していくものの，梁の共振に対しリンギングの減衰は数十倍といった時間がかかってしまう．Fig.1-10 にはマイクロマシン面発光レーザではないが，同様の片持ち梁マイクロマシン構造を有する波長可変フィルタの時間応答を示す．Fig.1-10 ではフィルタに照射したレーザ光の反射率を測定することにより，梁の動きを観測している．この測定ではリンギングが収まるために 100μs 以上の時間を要しており，スイッチングの高速化の妨げとなっている．波長スイッチング速度は，マイクロマシンの共振周波数を元に高速化が語られるが，実際のスイッチング手法については議論されておらず，実用化に備えて解決されるべき課題である．





波長可変フィルタの反射率測定系

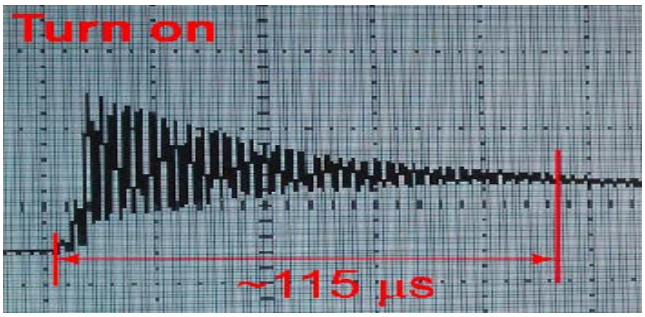


Fig.1-10 波長可変フィルタのリンギング[40]

1.5 Laser Imaging Detection and Ranging

近年自動車の自動運転技術の要求などから LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)と呼ばれる測距センサーが注目を集めている．LIDAR はパルス状のレーザ光を照射し，反射光を測定することで障害物までの距離を測るものである．現在は米 Velodyne 社等から発売されているが[41]，高価なものでは数万ドルという価格が普及の妨げとなっている．

LiDAE は細いビームのレーザ光を照射し反射光を測定するため，ビームの出射方向を制御する必要がある．現在一般的なものではガルバのミラー等を回転させてビーム掃引を行っている．この方式では高い改造点数は得られるが，装置が大きくなってしまい，また掃引速度も速くはできない．

LiDAR は反射光を受光して測距を行うため，光源のレーザには高い出力が求められる．レーザ製品の安全基準である Eye safe による制限はあるものの，ワットオーダーの高出力が必要となる．

本研究室ではビーム掃引機能と光増幅機能を併せ持つスローライト導波路の研究を行ってきた．外部光源からの光をスローライト導波路に結合させると，広がり角が 0.08°という非常に小さな遠視野像が得られる．結合させるレーザ光の波長を変化させるとビームの出射方向を変えることができ，1 次元で 1000 以上の改造点数を実現している．これまで波長可変の外部光源を用いてビーム掃引を行ってきたが，光源を集積することで，フットプリントが小さくアセンブリコストが低いビームスキャナを実現することができる．またスローライト導波路に電流を流すと入力光を増幅することができるため，結合する光源が単一モード動作をしていれば，高出力の単一モード光源が得られる．本研究室では 1mm の長さのスローライト導波路で 1W を超える出力が得られているため，マイクロマシン面発光レーザと集積することで波長可変レーザの高出力化が見込まれる．

1.6 本研究の目的

以上のことから本研究では超高速通信や超解像イメージング・センサ光源として応用可能な高品質ビームを持つ面発光レーザの実現を目指し次のことを行った．

・サブ波長格子の反射率入射角度依存性強化

・広帯域モード制御可能なサブ波長格子の検討

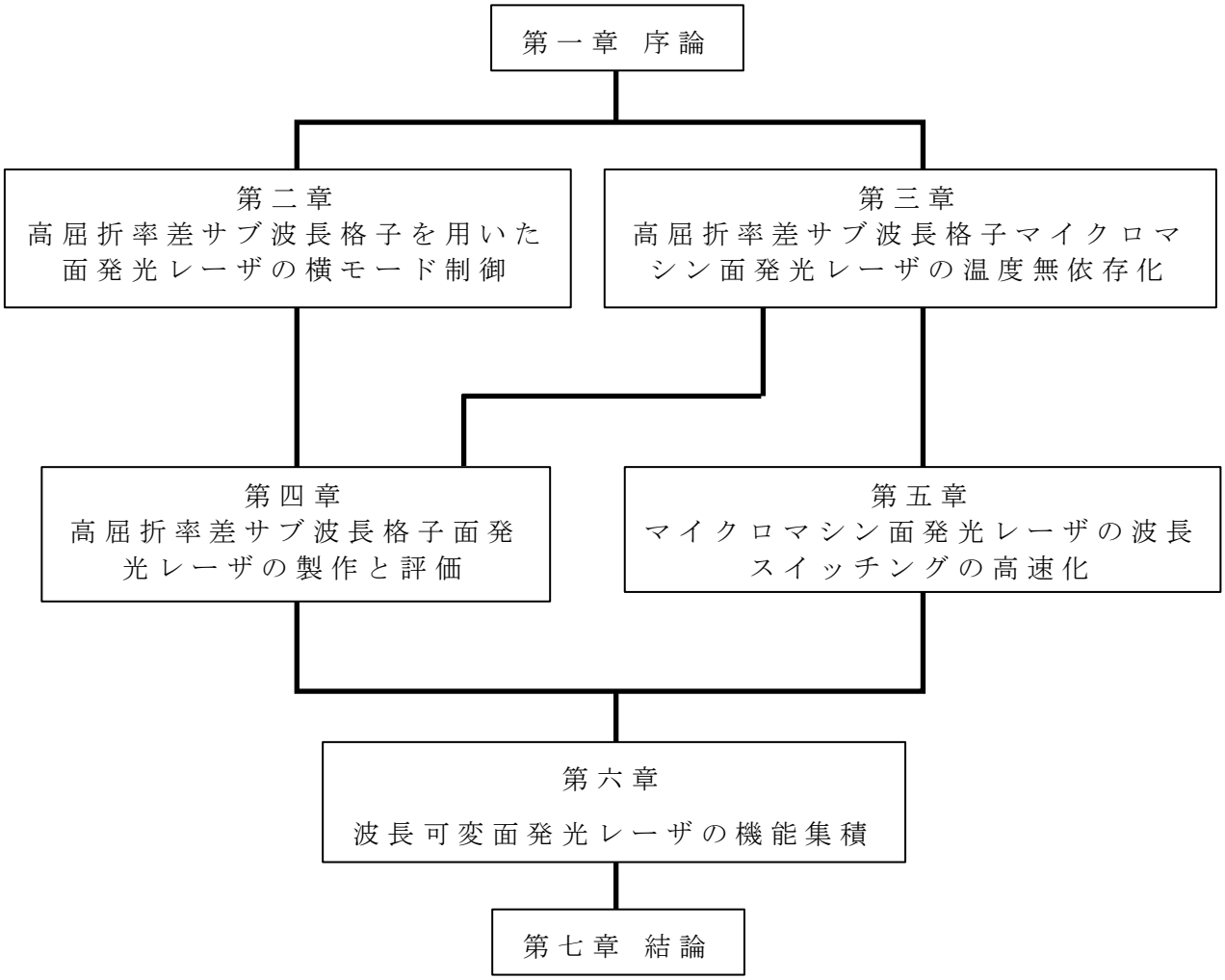
・サブ波長格子を用いたマイクロマシン面発光レーザの温度無依存化の検討

・熱ナノインプリントを用いたサブ波長格子の製作・評価

・サブ波長格子を上部反射鏡として用いた面発光レーザの製作

・マイクロマシンサブ波長格子面発光レーザの作製と温度係数の評価

・マイクロマシン面発光レーザとスローライト導波路 SOA の集積デバイスの作製



本論文は上に示すような構成となっている．

第二章「高屈折率差サブ波長格子を用いた面発光レーザの横モード制御」では HCG の角度依存性を用いた横モード制御を提案し，通常マルチモード動作となる大きな酸化狭窄アパチャーを持つ VCSEL でのモード制御の検討を行う．

第三章「高屈折率差サブ波長格子マイクロマシン面発光レーザの温度無依存化」では HCG MEMS VCSEL における絶対波長と温度係数の制御の原理について説明し，温度無依存化の設計を行う．

第四章「高屈折率差サブ波長格子面発光レーザの製作と評価」ではナノインプリントリソグラフィーを用いた HCG の作製，さらにその HCG を上部反射鏡として用いた VCSEL の作製を行い，特性評価を行う．

第五章「マイクロマシン面発光レーザの波長スイッチングの高速化」ではマイクロマシンのリンギング制御の原理について述べ，マイクロマシンの挙動計算の手法について紹介し，計算によりリンギングの抑制を実証する．また実際のデバイスでリンギングの抑制を確認する．

第六章「波長可変面発光レーザの機能集積」では，光増幅機能を有するスローライト導波路との集積デバイスの設計・作製を行い，特性評価を行う．

参考文献

[1] 総務省報道資料, http://www.soumu.go.jp/main_content/000502437.pdf

[2] Z. I. Alferov, V. M. Andreev, E. L. Portnoi, and M. K. Trukan, “AlAs-GaAs heterojunction injection lasers with a low room-temperature threshold”, Sov. Phys. Semiconductors, Vol. 3, pp. 1107, Mar. 1970.

[3] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T.Miyashita, “Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μm”, Electronics Letters, Vol. 15, no. 4, pp. 1.6-108, Feb. 1979.

[4] M. Nakazawa, Y. Kimura, and K. Suzuki, “Efficient Er3+-doped optical fiber amplifier pumped by a 1.48 μm InGaAsP laser diode” Appl. Phys. Lett., Vol. 54, no. 4, pp. 295-297, Jan. 1989.

[5] NEC, http://www.nec.co.jp/bnwjh/gijutsu/gij_012.html

[6] K. Iga, “Surface-Emitting Laser—Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 6, no. 6, Nov./Dec. 2000

[7] 東京工業大学学術交際情報センター http://www.sim.gsic.titech.ac.jp/DL/ESJ/TSUBATS_ESJ_02jp.pdf

[8] http://www.top500.org/lists/2010/11/

[9] http://www.green500.org/lists/green201011

[10] http://www.sei.co.jp/ewp/J/thunderbolt/

[11] 富士通, http://pr.fujitsu.com/jp/news/2011/09/16.html

[12] IBM, http://researcher.ibm.com/researcher/files/us-yvlasov//vlasov%20ECOC%20tutorial%202008.pdf

[13] V. Karagodsky and C. J. Chang-Hasnain, “Physics of near-wavelength high contrast gratings”, Optics Express, Vol. 20, no. 10, pp. 10888-10895, May. 2012.

[14] M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, “A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating,” Nat. Photonics, Vol. 1, no. 2, pp. 119–122, Feb. 2007.

[15] Y. Zhou, M. C. Y. Huang, C. Chase, V. Karagodsky, M. Moewe, B. Pesala, F. G. Sedgwick, and C. J. Chang-Hasnain, ”High-Index-Contrast Grating (HCG) and Its Applications in Optoelectronic Devices”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 15, no. 5, pp. 1-15, Sept. 2009.

[16] A. Imamura, W. Yang, J. Ferrara, Y. Hasidume, X. Gu, F. Koyama, and C. J. Chang-Hasnain, “Spatial Mode Demultiplexer Based on High Contrast Sub-Wavelength Grating Hollow Waveguide,” 16th Optoelectronics and Communications Conference, Kaohsiung, Jul. 2011.

[17] C. F. Mateus, M. C. Huang, Y. Deng, A. R. Neureuther, and C. J. Chang-Hasnain, “Ultrabroadband mirror using low-index cladded subwavelength grating,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, no. 2, pp. 518-520, Feb. 2004.

[18] Y. Zhou, M. C. Huang, and C. J. Chang-Hasnain, “Tunable VCSEL with ultra-thin high contrast grating for high-speed tuning,” Optics express, Vol. 16, no. 18, pp. 14221-14226, Aug. 2008.

[19] D. Fattal, J. Li, Z. Peng, M. Fiorentino, and R. G. Beausoleil, “Flat dielectric grating reflectors with focusing abilities,” Nature Photonics, Vol. 4, no. 7, pp. 466-470. May. 2010.

[20] G. Vandenberghe, Y. C. Kim, C. Delvaux, K. Lucas, S. J. Choi, M. Ercken, K. Ronse, and B. Vleeming, “ArF Lithography Options for 100nm Technologies,” Proceedings of SPIE, Vol. 4346, 2001.

[21] S. C. Chou, P. R. Krauss, and P. J. Renstrom, “Nanoimprint lithography,” J. Vac. Sci. Technol. B, Vol. 14, no. 6, pp. 4129-4133, Aug. 1996.

[22] 橋爪 佑樹，修士論文

[23] L. J. Guo, “Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements,” Adv. Mater., Vol. 19, pp. 495-513, 2007

[24] http://ece.ucsb.edu/Faculty/Coldren/papers/TSL.pdf

[25] 末松安晴，伊賀健一著，光ファイバ通信入門，オーム社

[26] C. J. Chang-Hasnain, “Tunable VCSEL,” IEEE Journal On Selected Topics In Quantum Electronics, Vol. 6, no. 6, pp. 978-987, Nov./Dec. 2000.

[27] J.M. Bustillo, R.T. Howe, and R.S. Mulle, “Surface Micromachining for Microelectromechanical Systems,” Proceedings of the IEEE, Vol. 86, No. 8, Aug. 1998.

[28] S. C. Yao, X. Tang, C. C. Hsieh, Y. Alyousef, M. Vladimer, G. K. Fedder, and C. H. Amon, “Micro-electro-mechanical systems (MEMS)-based micro-scale direct methanol fuel cell development,” Energy, Vol. 31, no. 5, pp. 636-649, Apr. 2006.

[29] D. Dudley, W. Duncan, and J. Slaughter, “Emerging Digital Micromirror Device (DMD) Applications,” Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, Vol. 4985, pp. 14-26, 2003.

[30] V. Jayaraman, G. D. Cole, M. Robertson, A. Uddin and A. Cable, “High-sweep-rate 1310 nm MEMS-VCSEL with 150 nm continuous tuning range,” Electronics Letters, Vol. 48, no. 14, Jul. 2012.

[31] C. Gierl, T. Gruendl, P. Debernardi, K. Zogal, C. Grasse, H. A. Davani, G. Böhm, S. Jatta, F. Küppers, P. Meißner, and M. C. Amann, "Surface micromachined tunable 1.55 μm-VCSEL with 102 nm continuous single-mode tuning," Optics Express, Vol. 19, no. 18, pp. 17336-17343, Aug. 2011.

[32] 佐野 勇人, 博士論文, 2012

[33] 中田 紀彦, 修士論文, 2012

[34] M. Nakahama, T. Sakaguchi, A. Matustani, and F. Koyama, “Athermal and widely tunable VCSEL with bimorph micromachined mirror,” Optics Express, Vol. 22, no. 18, pp. 21471-21479, Aug. 2014.

[35] H. J. Unold, M. Grabherr, F. Eberhard, F. Mederer, R. Jäger, M. Riedl and K. J. Ebeling, “Increased-area oxidised single-fundamental mode VCSEL with self-aligned shallow etched surface relief,” Electron. Lett., vol. 35, no. 16, pp. 1340-1341, Aug. 1999.

[36] R. A. Morgan, G. D. Guth, M. W. Focht, M. T. Asom, K. Kojima, L. E. Rogers, and S. E. Callis, Transverse mode control of vertical-cavity top-surface emitting lasers,” IEEE Photon. Technol. Lett., Vol. 5, no. 4, pp. 374-377, Apr. 1993.

[37] N. Nishiyama, M. Arai, S. Shinada, K. Suzuki, F. Koyama and K. Iga, “Multi-oxide layer structure for single-mode operation in vertical-cavity surface-emitting lasers,” IEEE Photon. Technol. Lett. Vol.12, no 6 pp.606-608, Jun. 2000.

[38] D. S. Song, S. H. Kim, H. G. Park, C. K. Kim, and Y. H. Lee, “Single-fundamental-mode photonic-crystal vertical-cavity surface-emitting lasers,” Applied Physics. Lett., Vol. 80, no. 21, pp.3901-3903, Apr. 2002.

[39] M. Nakahama, T. Sakaguchi, A. Matsutani, F. Koyama, “Athermalization and on-chip multi-wavelength integration of VCSELs employing thermally actuated micromachined mirrors,” Applied Physics Letters, Vol. 105, no.9, pp. 091110, Aug. 2014.

[40] T. Amano, T. Hino, F. Koyama, M. Arai, and A. Matsutani, “A thermally tunable GaAlAs-GaAs micromachined optical filter with submillisecond tuning speed,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, no. 6, pp. 1501-1503, May 2004.

[41] Velodyne 社 HP http://velodynelidar.com/index.html

第二章　高屈折率差サブ波長格子(HCG)を用いた面発光レーザの横モード制御

2.1 高屈折率差サブ波長格子の角度依存性

レーザからのビームの品質は，超高速通信や超解像センサー技術において大きな影響を及ぼすものである．多モード光源では，通信においてはモード分散や波長分散により周波数利用効率の向上を阻害し，また高密度波長多重分割通信ではそのチャネルの過密さからサイドモードが隣のチャネルに近づきクロストークの悪化につながる[1][2]．センサーであれば，モードごとに伝搬角が違うため空間解像度が低下する原因となる．これらの理由により横モードにおいても単一動作は求められており，これまでは基本モード以外の高次モードが伝搬条件を満たさないように活性層に近い層を周囲から酸化することによる電流・電磁場の酸化狭窄を用いて単一横モード動作を達成していた．しかしながら，酸化狭窄による単一横モード条件では開口径が 3μm 程度に制限されてしまい，熱抵抗により高出力化は困難であった．
そこで酸化狭窄以外による横モード制御が求められている．多層酸化狭窄や金属アパチャー，フォトニクス結晶，表面レリーフ構造などがすでに報告されているが，本研究室では波長より短い周期を持つ高屈折率材料によるサブ波長格子(High-index Contrast Grating : HCG)によるモード制御を提案する．

本研究において横モード制御は HCG の反射率入射角度依存性を用い行う．Fig. 2-1 に示すように共振器内の横モードの伝搬角はそれぞれ異なり，基本モードで一番小さく高次モードになるに連れて大きくなっていく．そこで基本モードのみに対し高反射率で高次モードに対して低反射率となる反射鏡を用いることで選択的に基本モードだけ励

振させることを基本原理とする (Fig.2-2). 従来用いられている多層膜反射鏡である分布ブラッグ反射鏡(Distributed Bragg Refractor : DBR)では反射率の入射角度依存性はほとんど見られないが，HCG においては強い角度依存性を持たせることが可能である．そこで共振器内の基本モードと 1 次モードの伝搬角を求め，それぞれに対する反射率を見積もることで，10μm 以上の開口径を持つ面発光レーザでの単一横モード動作を目指す．

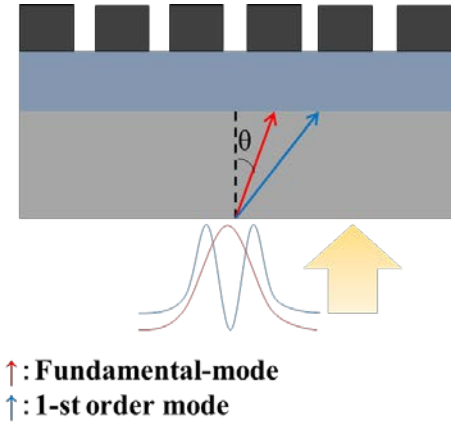


Fig.2-1 共振器内の横モード伝搬角イメージ

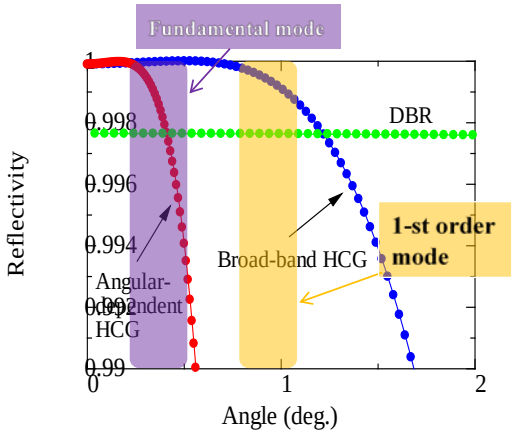


Fig.2-2 HCG の角度依存性による横モード選択

2.2 高屈折率差サブ波長格子を用いた横モード選択

HCG はその構造により反射特性を大きく変えることができる．UC バークレー等では広帯域波長掃引を目指し反射帯域の広帯域となる構造を用いている[3]が，本研究では入射角度によって反射率の異なる HCG を設計する．またレーザ動作を得るためには励振させるモードに対しては十分な反射率が必要であるため，基本モードに対しては 99%を超える反射率が得られることも条件である．そのためモード制御の条件として，垂直入射における反射率が 99%以上であり，基本モードと 1 次モードに対する反射率差を 0.5%以上と仮定する．共振器内の横モードの伝搬角は透過屈折率法を用いて求めることができ，開口径のサイズにより反射鏡への透過的な入射角は Fig.2-3 のようになる．垂直入射に対する反射率を最も高くしておけば基本モードのみを選択可

能であるが，ある特定の角度に対する反射率を上げることで，任意の高次モードのみを励振させることも原理上可能ではある．

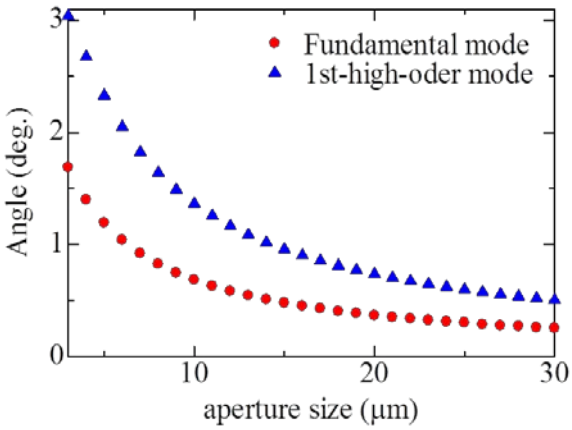


Fig.2-3 開口径と横モード伝搬角

2.3 高屈折率差サブ波長格子の角度依存性による単一横モード条件拡大の検討

まず HCG の反射原理について説明する．Fig.2-4 に HCG の断面図と入射光イメージを示す．HCG の周期 Λ は波長 λ に対し，λ > Λ > λ /2.5 程度となる．HCG に入射した光は，式(2-1)と式(2-2)を満たすような空気領域と高屈折率材料格子領域で伝搬方向への波数が等しくなるような格子の横モードに結合するが，上記の Λ の条件を満たす領域では 1 次モードと 2 次モードのみが結合する．屈折率 3.48 の時の条件をグラフにすると Fig.2-4 のようになり，式(2-1)と式(2-2)を満たすところは，実線と点線の交点となる．それぞれのモードでは横方向への波数が異なる為，伝搬方向の波数 β_1，β_2 も異なる．HCG の放射側での 1 次モード 2 次モードの位相差がちょうど $(2n+1)\pi$ となるとき，放射側で打ち消しが起こるため高反射率となる．格子の厚さが変化すると終端での位相差がずれるため反射率が変化するが，入射角度が変化しても実効的に厚さが変わるため，反射率が変化する要因となり，これが HCG の反射率角度依存性になる．また横方向への波数は 2 次モードの方が大きいため，伝搬方向の波数 β の関係は $\beta_1 > \beta_2$ となる．ここで $\beta_1 = 2\beta_2$ のときモード間の位相差が π となるように設計すると，それぞれ

のモードが格子内でファブリペロー共振を起こす条件となる．そのためこの条件では光が格子内に強く閉じ込められ，入射角度に対して反射率が大きく変化する領域となる．Fig.2-6 と Fig.2-7 には式(2-1)から求めた Fig.2-5 の横軸と縦軸である $k_a^2\Lambda^2$ と $k_s^2\Lambda^2$ の値に対する β と $2\pi/\beta$ を示す．$k_a^2\Lambda^2 \approx 0$, $k_s^2\Lambda^2 \approx 90$ 前後では β の値の変化が急激となっており，2 次モードは HCG の構造に対して β が変化しやすいことがわかる．そのため $\beta_1=2\beta_2$ を満たす条件は非常に限定的となる．$\beta_1 = 2\beta_2$ を満たす点で角度依存性が強くなると仮定すれば，λ/Λ が変われば角度依存性の強くなる DC もそれに応じて変化していくと予想される．

$$\beta_m^2 = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 - k_{a,m}^2 = \left(\frac{2\pi n_{bar}}{\lambda}\right)^2 - k_{s,m}^2 \qquad (2-1)$$

$$n_{bar}^{-2} k_{s,m} \tan(k_{s,m}\, s/2) = -k_{a,m} tan(k_{a,m}\, a/2) \qquad (2-2)$$

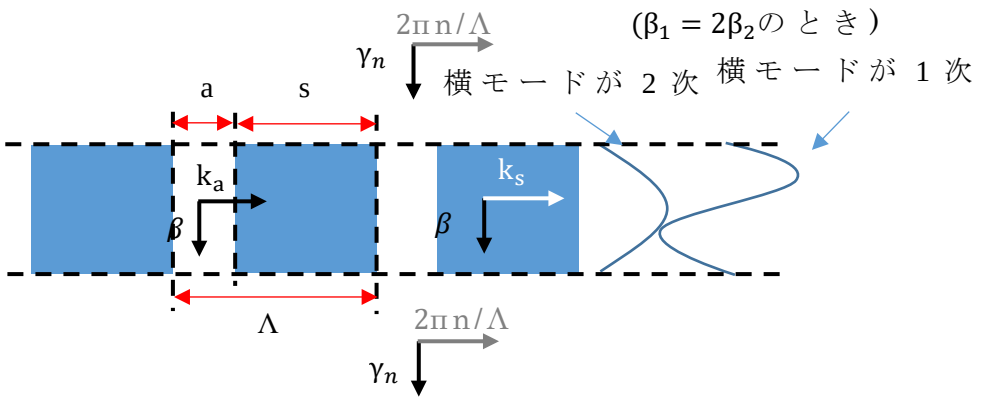


Fig.2-4 HCG と入射光の断面模式図

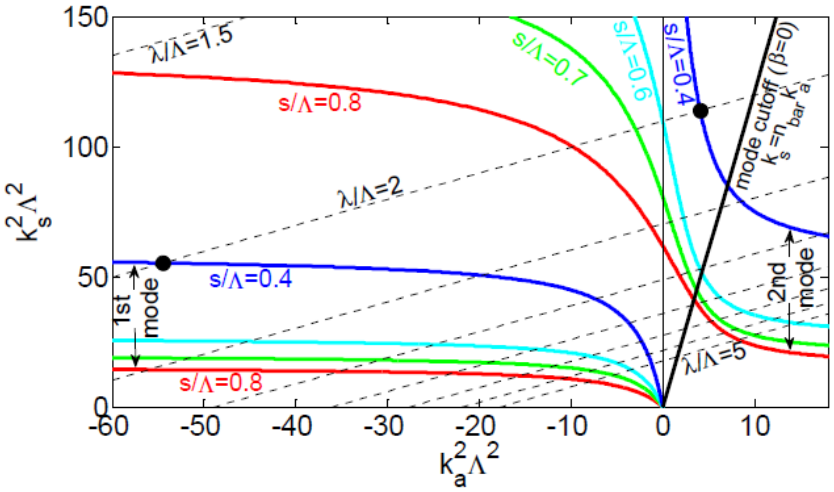


Fig.2-5 格子内と空気層の横方向波数の関係[3]

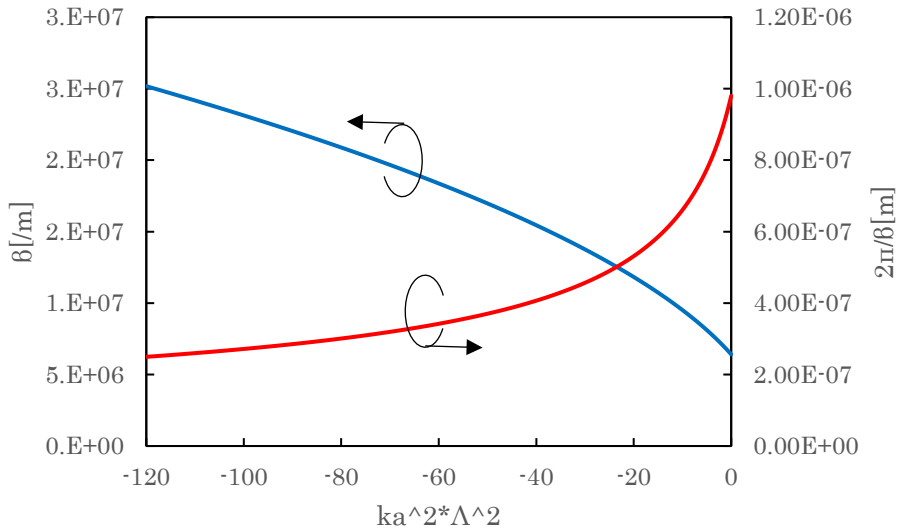


Fig.2-6 空気層の横方向波数(k_a)と縦方向波数(β)の関係

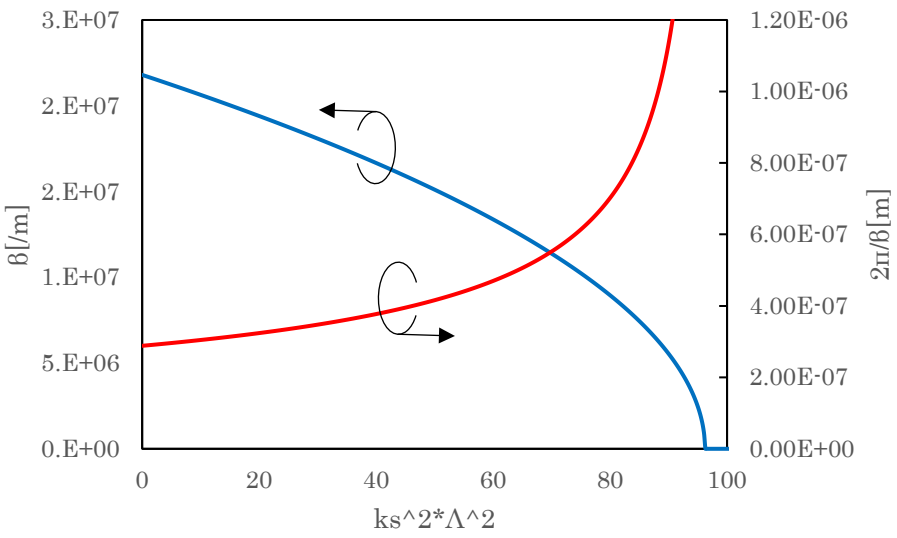


Fig.2-7 格子内の横方向波数(k_s)と縦方向波数(β)の関係

波長可変単一モード面発光レーザを実証するにあたってまず波長掃引機構のない単純な構造で大口径単一モード出力の実現を目指す．そのため HCG の構造は SiO2 をスペーサ層とし，サブ波長格子の材料は amorphous-Si とする．980nm 帯のレーザを想定しており，Si 結晶では吸収が起きるため[4]プラズマ CVD により成膜したアモルファスの Si を使用する．HCG の設計をするにあたって検討するパラメータは，格子周期(Λ)，格子幅(a)，格子厚(Tg)であるが，HCG の構造をスケーリングすることで反射特性を変えずに波長帯域を動かすことができるため[3]，格子周期に対する格子幅(a/Λ)をデューティサイクル(Duty Cycle：DC)とし，格子厚と共に主な変数として扱う．また格子と電界の向きによって特性は変わるため，まず TM モード(格子と電界が直交)において検討する．

これまでに報告されている広帯域 HCG の構造を基とし，反射率を落とさず角度依存性の強くなる構造を探っていく．HCG の反射率は Grating Solver 社の解析ソフト「G-Solver」で厳密結合波解析(Rigorous Coupled Wave Analysis：RCWA)法を用いて計算する[5]．この解析ソフトにおいては無限周期の構造について反射率・透過率・反射光透過光

の位相変化量を計算することができる．Fig.2-8 に反射率を求める構造図と各種パラメータを示す．

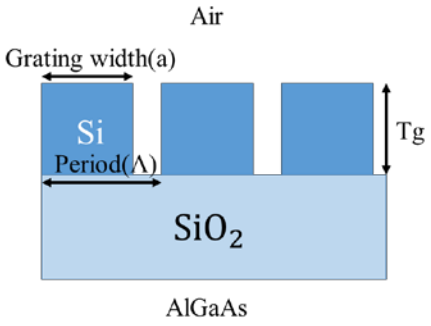


Fig.2-8 HCG モデルと格子パラメータ

反射率角度依存 HCG を設計するにあたってまず垂直入射に対する高反射率帯域を調べる．格子のパラメータは，周期・厚さ・DC の 3 つがあるため，DC を固定し波長(実質的に周期)と厚さを変えた時に反射特性が変わるかを調べた．まず一般的な広帯域 HCG の反射特性を Fig.2-9 に示す．この構造は周期 500nm，格子厚 300nm，DC77%で波長 980nm を中心に 250nm 程度の反射帯域を持つ．

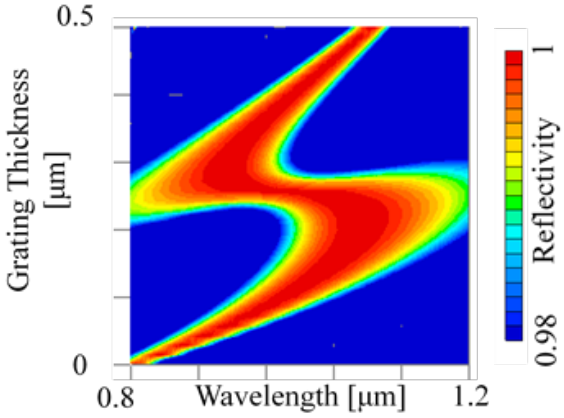
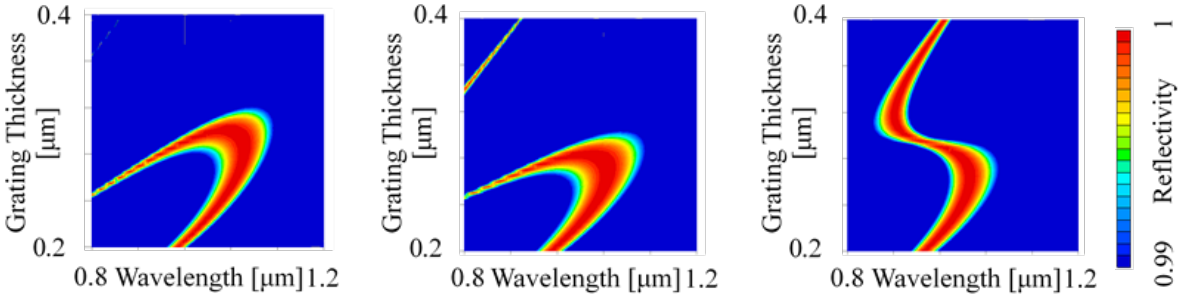


Fig.2-9 Broadband HCG の反射帯域

次に DC を変えて反射帯域の変化を調べる．Fig.2-10 に示すように DC を変化させていくと S 字状の高反射率帯域が変化していくことがわかる．



(a) DC=60%　　(b) DC=70%　　(c) DC=80%

Fig.2-10 DC による高反射率帯域の変化

この高反射率帯域を目安にして，角度依存性が強くなる構造を探っていく．DC を決定するために波長・格子厚を固定し DC を変化させ角度依存性を調べた．Fig.2-11 に示すように DC70%で最も角度依存性が強くなっている．また垂直入射に対して高い反射率も持っており，上記の単一モード発振の条件を満たしている．

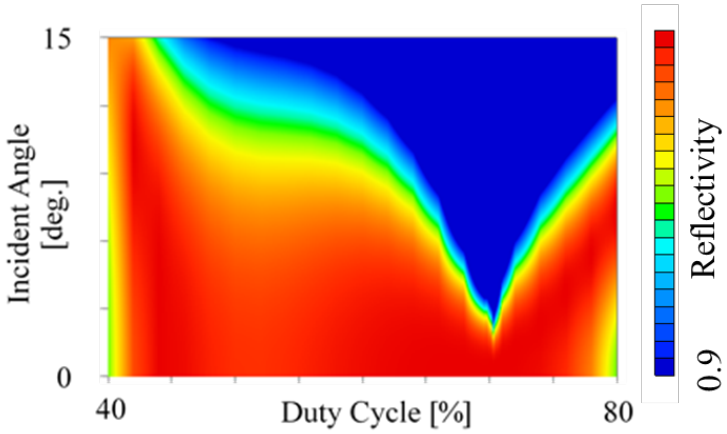


Fig.2-11 DC による角度依存性の変化

また DC を 70%に固定し波長を変化させて角度依存性を調べた．これにおいて波長 980nm で最も角度依存性が強くなっていることが確認できた．次に格子の厚さによる角度依存性の変化を調べた．Fig.2-13 は垂直入射に対する反射率から 0.5%反射率が落ちる入射角を表示している．つまり Incident Angle が小さければ小さいほど強い角度依存性を示している．ここでは格子厚 288nm で最も強い角度依存性を示した．

また 285nm～295nm の 10nm の範囲でも開口径 30μm 以上で 1 次モードに十分な損失を与えられる角度依存性を持っていることがわかる．最後に実際に VCSEL に横モード制御の反射鏡として用いた時にどの程度の開口径で横モード制御可能かを見積もった．Fig.2-14 の左軸は Fig.2-13 と同様，右軸は横モード制御可能な最大開口径を示している．前出の通り横モード制御の条件として基本モードと 1 次モードの反射率差 0.5%以上と仮定している．各横モードの伝搬角は Fig.2-3 に示しているとおりであり，この角度での反射率をそれぞれ求め，その差が 0.5%を下回らない限界を横モード制御可能な最大開口径とする．

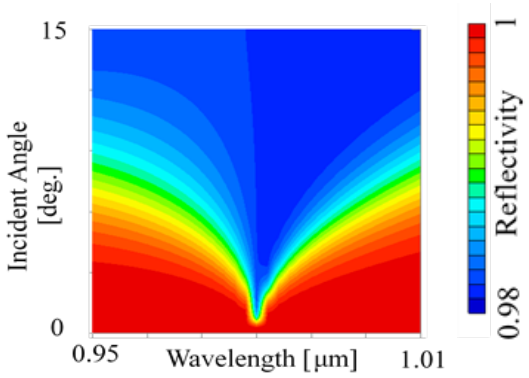


Fig.2-12 波長による反射率角度依存性

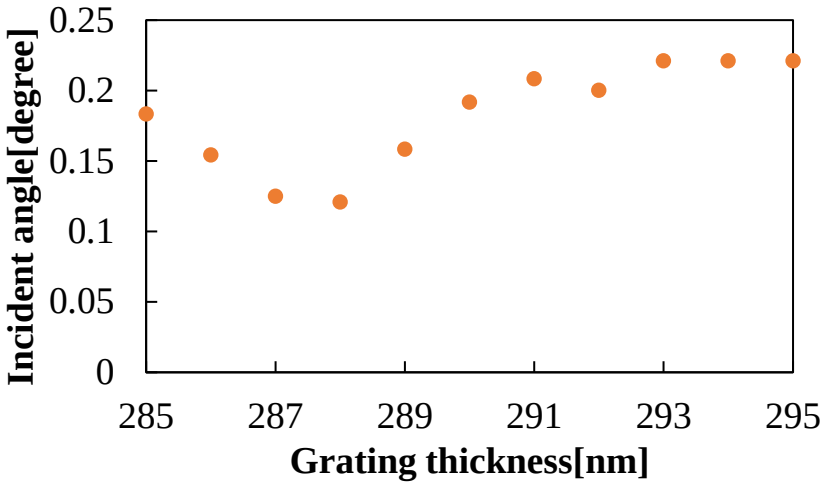


Fig.2-13 格子厚による垂直から反射率が 0.5%落ちる入射角

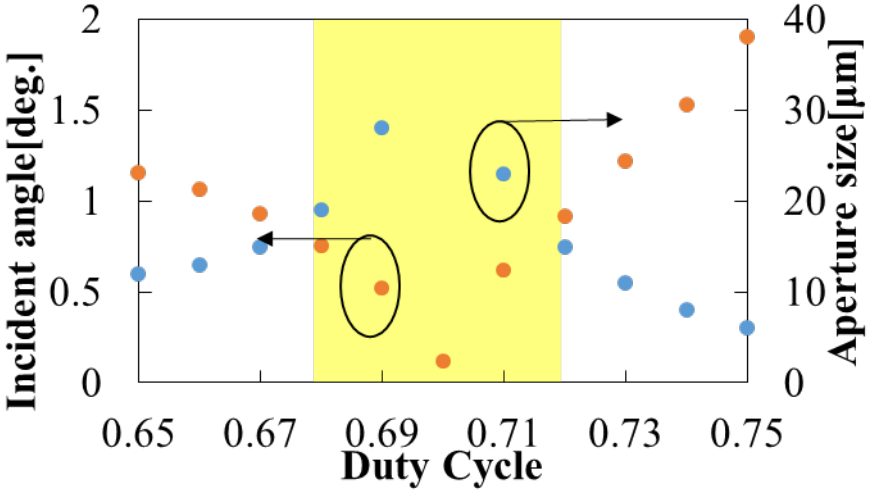


Fig.2-14 計算による最大単一横モード開口系の見積もり
(左軸は垂直から 0.5%反射率が落ちる入射角)

ここまで格子は完全な矩形とし，格子壁面は垂直に製作できると仮定してきた．格子形成には ICP エッチングを用いるため，高い垂直性は得られるが，実際には完全に垂直ではなく，Fig.2-15 のようにある程度の角度を持つため，格子形状は台形となる．そこで台形となった場合の反射特性を調べ，矩形格子からどの程度変化が生じるかを見積もる．G-Solver では台形を作ることはできないので，矩形を重ねて台形を表現する．Fig,2-16 に平均 DC を変えずに壁面角度を変えたものの反射率角度依存性比較のグラフを示す．これによりエッチング角度が 10 度程度であれば平均 DC が等しい矩形格子とほぼ同様の特性が得られることがわかる．

(a) 矩形 HCG　　(b) 台形 HCG

Fig.2-15 矩形・台形 HCG イメージ

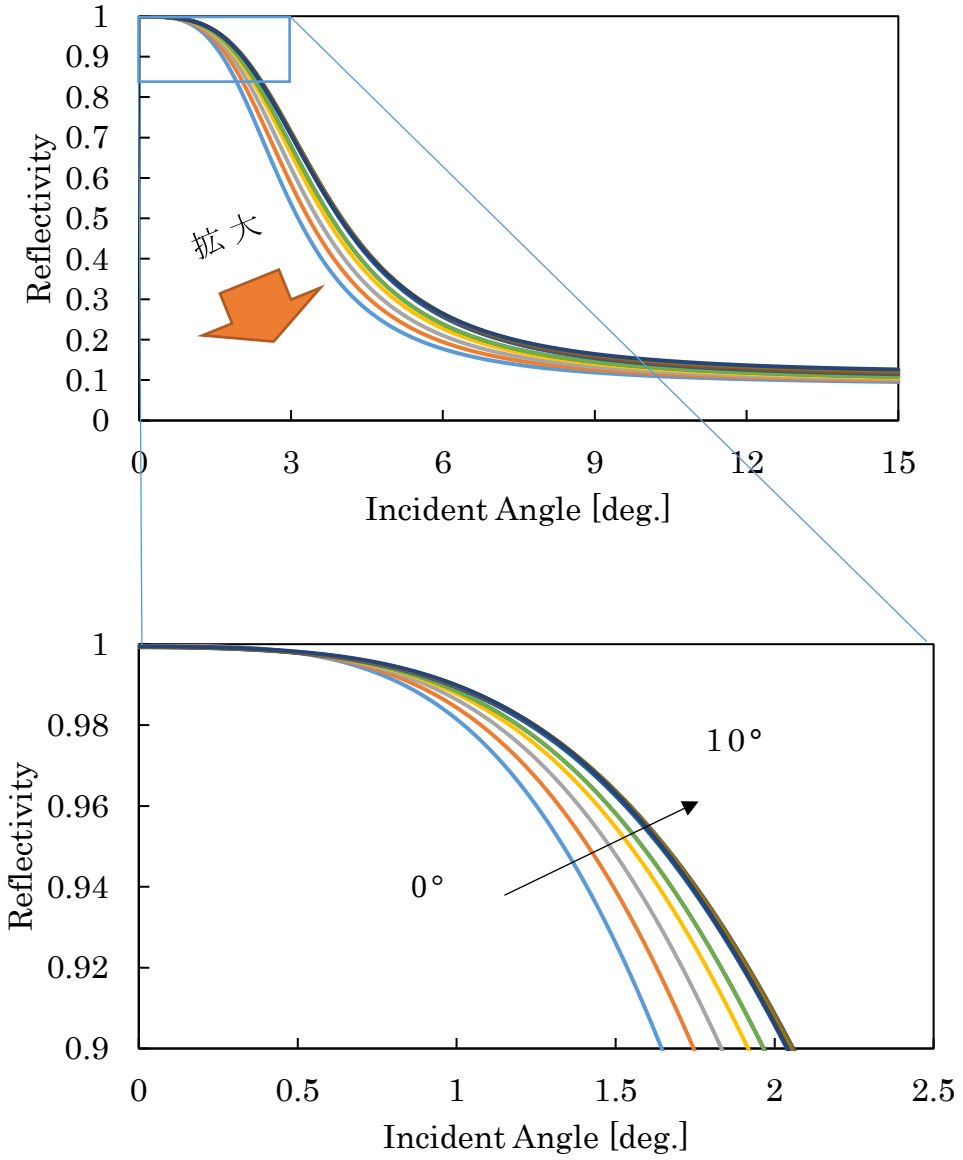


Fig.2-16 HCG 台形化による角度依存性の変化 (下) 一部拡大

2.4 マイクロマシン面発光レーザへのサブ波長格子の導入と単一横モード条件

ここまで波長固定レーザにおいて横モード制御を行うサブ波長格子の検討を行ってきた．一方本研究では波長可変面発光レーザでの横モード制御を行い広帯域で単一モード動作を得ることを最終的な目標としている．波長可変レーザにおいて横モード制御用 HCG には広帯域

での強い角度依存性が必要となる．今回は 20μm 以上の開口径において単一横モード動作が期待できる波長帯域の検討を行った．

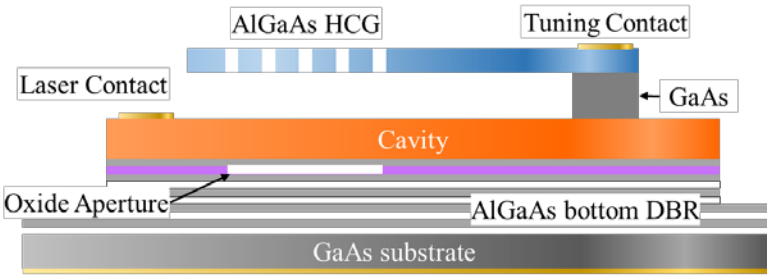


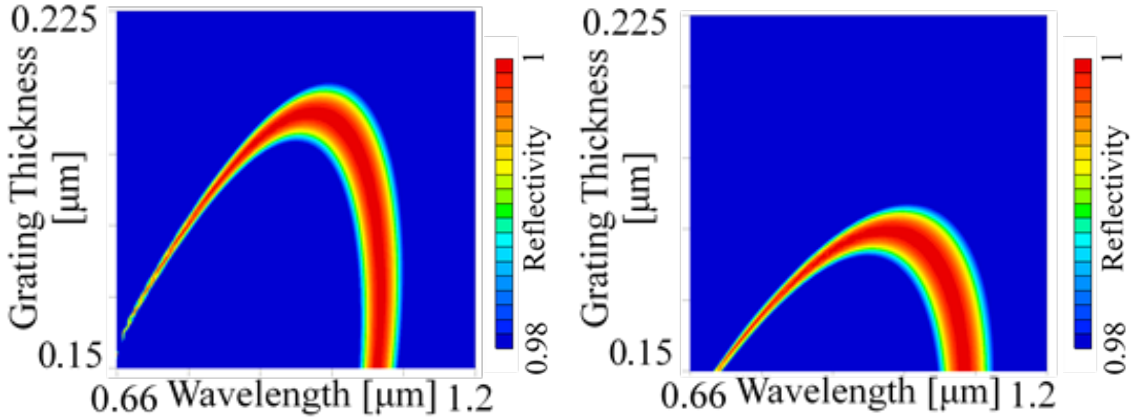
Fig.2-17 HCG-MEMS VCSEL イメージ図

本研究室において AlGaAs 系のエピタキシャル成長させた，上部下部反射鏡が共に DBR である面発光レーザに MEMS 構造である片持ち梁構造を導入し，熱バイモルフ効果・静電引力により共振器長を変えることにより，波長掃引を達成している．この片持ち梁構造の面発光レーザは上部反射鏡と活性層の間に GaAs 層を挟んでエピタキシャル成長させ，プロセスの最後にクエン酸により GaAs 層を選択的にエッチングし上部反射鏡をリリースすることにより形成している．これと同様のプロセスを採用するため，波長可変レーザ用 HCG ではエピタキシャル成長により一括で製作できる AlGaAs 系の材料を HCG として用いることを検討する．今回は自然酸化する恐れが低く，GaAs に対しクエン酸でのエッチングのレート比が十分大きくなる Al0.65Ga0.35As で検討を行った．

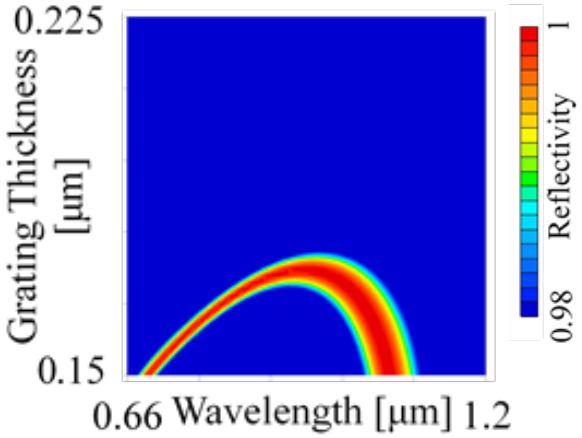
通信用波長可変光源においては波長の安定性が求められる一方，OCT などのイメージセンサーや各種検査用センサー等では掃引周波数が求められるものがある．片持ち梁 MEMS-VCSEL では半導体の片持ち梁を物理的に動かすことにより波長掃引を行う．波長掃引を行う方法は，熱膨張率の違う材料を貼りあわせたものに熱を加え応力によって変化させるものと，梁と基板に電解を掛け，梁を動かすものと 2 種類ある．前者は熱容量により掃引周波数が決まり，数百 Hz 程度であるが可動範囲が広い・変化量が投入熱量に比例するため制御がしや

すいといったメリットが有る．後者は掃引速度は速いものの梁の駆動範囲が狭く･短共振器方向への駆動しかできないといった欠点もある．しかしながらどちらにしても梁の体積の増加により掃引のための電力が大きくなる．HCG は DBR に対し 1/10 程度の厚さであり電力面で優位であるが，ここでは TM モードの HCG より更に厚さが 2/3 程度になる TE モード(電解と格子が平行)において広帯域横モード制御 HCG の検討を行う．

まず DC の違いによる反射率特性の変化を見極める．TM モードでは DC70%前後で高反射率となったが TE モードでは 20～30%を中心に高反射率帯域が存在する．20%～40%へ動かした場合高反射率帯域は格子厚の薄い方向へ動いていく．またその高反射率帯域に合わせて調べた入射角度依存性を Fig.2-19 に示す．これらの計算から DC27%前後で，広帯域で強い角度依存性を持つことがわかった．Fig.2-20，2-21 に DC27%での垂直入射に対する反射率と角度依存性を示す．Fig2-21 より波長約 980nm で垂直入射に対する強い反射率と強い角度依存性を示している．

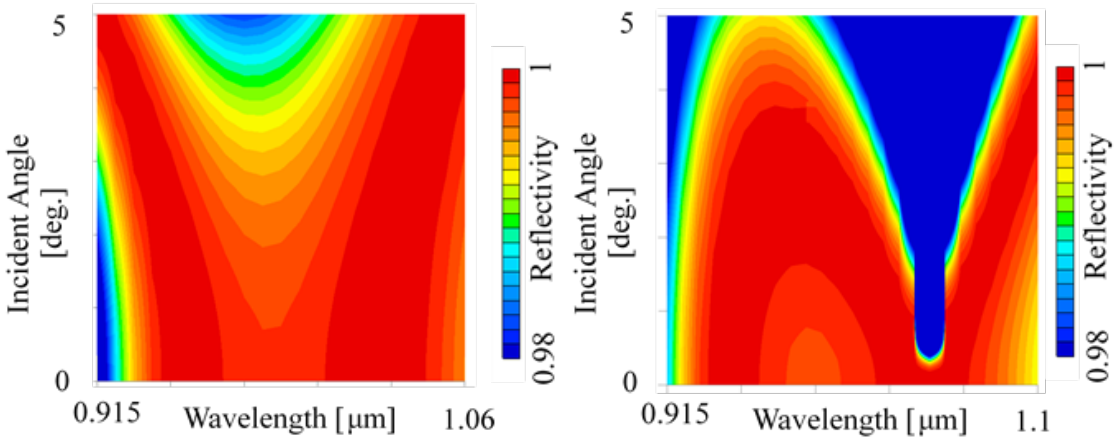


(a) DC=20%　　(b) DC=30%

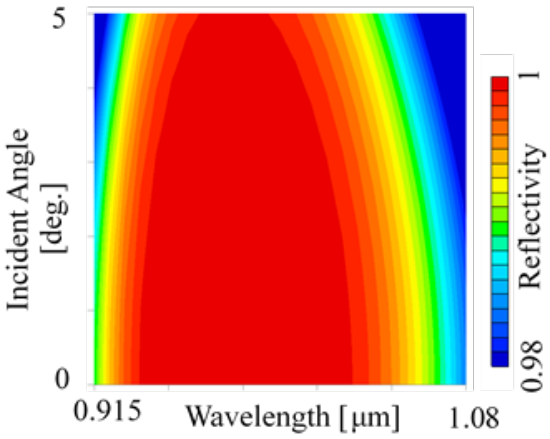


(c) DC=40%

Fig.2-18 DC による反射帯域の変化



(a) DC=20%　　(b) DC=30%



(c) DC=40%

Fig.2-19 DC による反射率角度依存性の変化

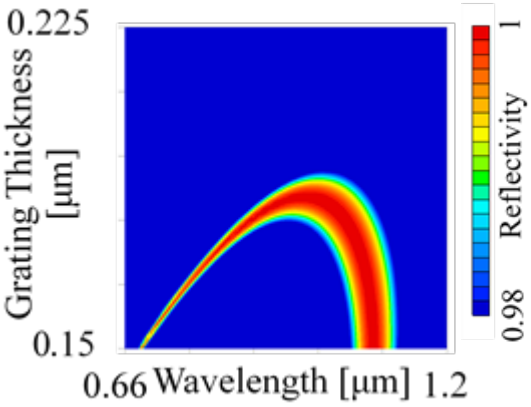


Fig.2-20 DC=27%での反射帯域

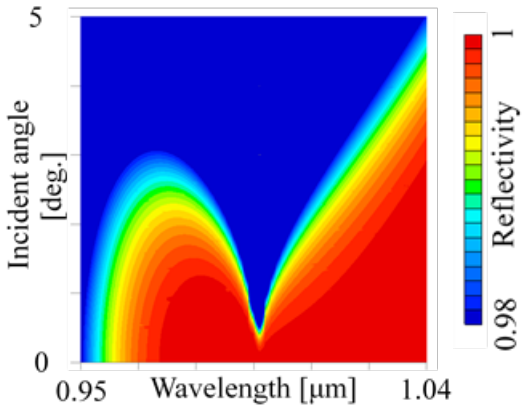
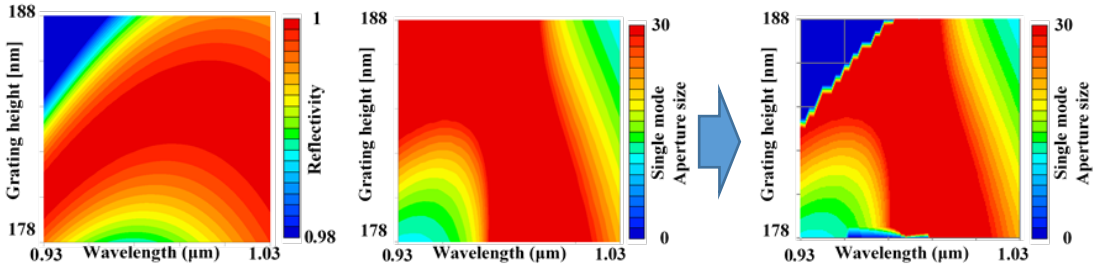


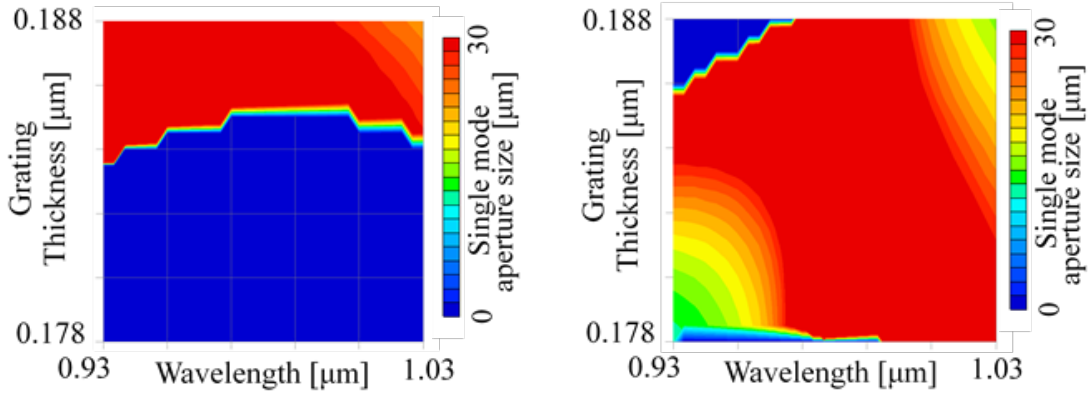
Fig.2-21 DC=27%での角度依存性

次に角度依存性からモード制御可能な開口系の見積もりを行う．またレーザ発振を得るためには基本モードに対して十分な反射率が必要であるため，垂直入射に対する反射率が 99%以上の領域のみで議論する．そのため Fig.2-22 に示すように角度依存性から求めた単一モード開口径から，垂直入射に対する反射率が 99%以下の部分を除外した．Fig.2-23(a)-(c)に DC を変えた時の横モード制御可能な開口径の変化を示す．この結果から DC=27%，格子厚 185nm で広帯域で強い角度依存性が得られるとわかる．また，HCG 作製時の格子幅変化を考慮して構造のトレランスを検討する．格子幅の変化はつまり DC の変化である．格子の周期が 750nm であるため DC1%は 7.5nm に相当する．このため格子厚を固定し DC を少しずつ変化させ，その時の角度依存性の変化をプロットする．横軸に波長，縦軸に格子幅の変化量をとり，単一モード動作可能な開口径をプロットしたものを Fig.2-23(d)に示す．格子幅は目標から±10nm 以内の誤差で製作することができているので，作製誤差を±15nm までとったとしても波長帯域 60nm で 20μm の開口径を持つ VCSEL での単一横モード動作の実現の可能性が得られた．

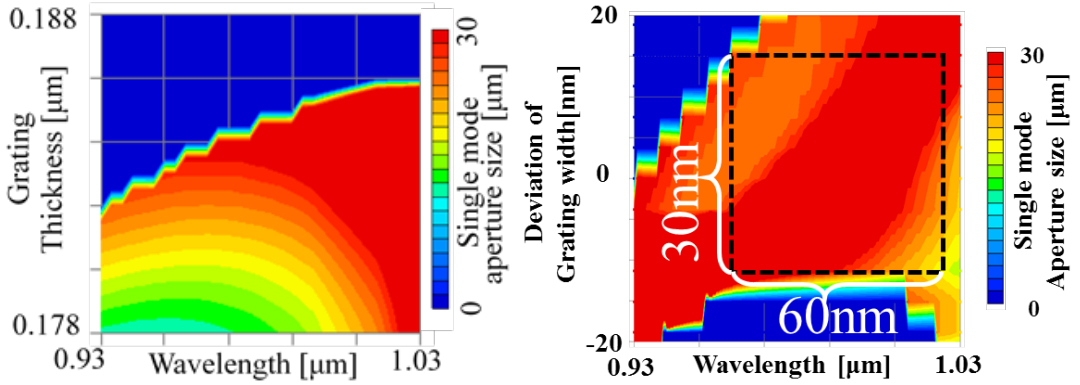


(a) 垂直入射に対する反射率　(b) 単一モード開口径　(c) 単一モード発振条件

Fig2-22 横モード制御可能な開口径の見積もり方法



(a) DC25%での単一モード開口径　(b) DC25%での単一モード開口径



(c) DC25%での単一モード開口径　(d) 単一モード開口径の格子幅トレランス

Fig.2-23 モード制御可能な波長帯域と開口径の検討

2.5 まとめ

サブ波長回折格子を用いた横モード制御を提案し，単一モード面発光レーザの大口径化を検討した．面発光レーザにおいては主に酸化狭窄による横モード制御が用いられているが，単一横モード動作のためにはアパチャーサイズは 3μm 角程度に制限される．酸化狭窄アパチャーは光の閉じ込めによる横モード制御を行うと同時に電流の閉じ込めも行うため，発光面積が小さくなるので出力が制限されるといったデメリットが生じる．酸化狭窄以外にも横モード制御を行う方法があれば，大口径化による出力の増大や製作トレランスの拡大といったメリットが生じる．

波長以下の周期構造を持つ高屈折率材料の格子であるサブ波長回折格子(HCG)は，数 100nm の厚さの薄膜構造でありながら広帯域高反射率の反射鏡を形成することが可能である．1 次元の周期構造である HCG は偏波依存性など DBR にない特長を持っている．また HCG は設計により大きな角度依存性を持たせることができる．面発光レーザの共振器内では各横モードはそれぞれ異なった角度で伝搬しており，反射鏡への入射角は基本モードで一番小さく高次モードになるにつれて大きくなっていく．このことを利用し，HCG の角度依存性によりそれぞれの横モードに対し反射率に差を付ければ，選択的に一つのモードのみを励振させることが可能となる．酸化狭窄のみを用いた場合には高次モードが伝搬できない大きさのアパチャーサイズとして単一モード動作を実現しているが，HCG の角度依存性を用いれば大口径の酸化狭窄アパチャーであっても単一モード動作が得られる可能性があるため，角度依存性を強く持つ HCG の設計とアパチャーサイズの見積もりを行った．

まず波長固定の HCG VCSEL を考えた．AlGaAs 系のハーフ VCSEL に SiO_2 のクラッド層，アモルファス Si の HCG 層を成膜し，アモルファス Si に HCG を形成した場合を想定する．TM モードに設計したアモルファス Si HCG では Duty Cycle(周期に対する格子幅)が 70%付近

で最も角度依存性が高くなり，DC=68％～72％の間では，15μm の酸化狭窄アパチャーでも単一モード動作の可能性が得られた．
またマイクロマシン型の HCG 反射鏡を用いた波長可変 VCSEL でも横モード制御を検討した．波長可変 VCSEL として用いる HCG 製作時では広帯域に渡って高い反射率と強い角度依存性の両立が求められる．今回は TE モードに対する反射鏡を想定し計算を行った．レーザ発振に必要な HCG の反射率は 99％以上と仮定し．また HCG の作製時の格子幅の変化も考慮すると，計算から 20μm 以上のアパチャーの 980nm 帯 HCG MEMS VCSEL では波長大気 60nm で単一モード動作の可能性が得られた．このとき格子幅のトレランスは 30nm となった．後述するが HCG の作製では設計値から 10nm 程度の誤差で作製できており，十分な許容誤差である．

以上本章では HCG の反射率角度依存性の増強により，大きな酸化狭窄開口径のデバイスで単一モード動作の可能性を計算により示した．

参 考 文 献

[1] C. A. Brackett, “Dense Wavelength Division Multiplexing Networks : Principles and Applications”, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 8, no. 6, pp. 948-964, Aug. 1990

[2] K. W. Cheung, M. M. Choy, and H. Kobrinski. “Electronic wavelength tuning using acousto-optic tunable filter with broad continuous tuning range and narrow channel spacing, ’’ IEEE Photon. Technol. Lett., vol. I, pp. 38-40, 1989.

[3] V. Karagodsky, F. G. Sedgwick, and C. J. Chang-Hasnain, “Theoretical analysis of subwavelength high contrast grating reflectors,” Optics express, Vol. 18, no. 16, pp. 16973-16988, Jul. 2010.

[4] J. E. Jaffe and A. Zunger, ” Theory of the band-gap anomaly in ABC2 chalcopyrite semiconductors,” Physical Review B, Vol. 29, no. 4, Feb. 1984.

[5] Grating Solver Development Co., http://www.gsolver.com/

第三章　HCG マイクロマシン面発光レーザの波長温度無依存化

3.1 熱バイモルフ型アクチュエータを用いた発振波長制御

半導体レーザでは，材料の屈折率が温度依存性を持つことから，環境オウンドの変化により光学的共振器長が変化し，発振波長の変動につながる．WDM 通信システムではチャネルの波長間隔は数 nm からサブ nm であり．温度変化によるクロストークが生じないため，精密な温度制御が求められ，システムの低廉化の妨げとなっている．

本研究室ではマイクロマシンを用いた面発光レーザで温度無依存(アサーマル)化を実現している．このデバイスではマイクロマシンの熱膨張率の不均一性を利用し，温度による光学的共振器長の変化を打ち消すように反射鏡を変位させることで温度無依存化を達成している．Fig.3-1 に概念を示す．温度が上昇すると屈折率は大きくなるため，発振波長のレッドシフトが生じるが，屈折率変化による波長変化と共振器長変化による波長変化は独立であるため[1]，それに合わせて共振器長を短くすれば波長シフトを抑えることができる．

これを達成するものが，熱バイモルフ型アクチュエータである．熱膨張率の異なる材料を貼り合わせた熱バイモルフ構造の梁は，温度が上昇すると熱膨張率の小さな材料側へ曲がる．そのため，片持ち梁構造では先端が上下に変位する．Fig.3-2 に示すように，基板側の層の熱膨張率が小さく，上の層の熱膨張率が大きいバイモルフ構造とすれば，温度上昇に対して反射鏡を基板側に変位させることが可能である．本研究室で温度無依存化を達成したデバイスは上部反射鏡が DBR であり，DBR の最下層に 1λ の $Al_{0.85}GaAs$ 層を挿入することでバイモルフ構造としている．これを，同様に HCG を上部反射鏡として用いた場合に適用し，アサーマル化の設計を行う．

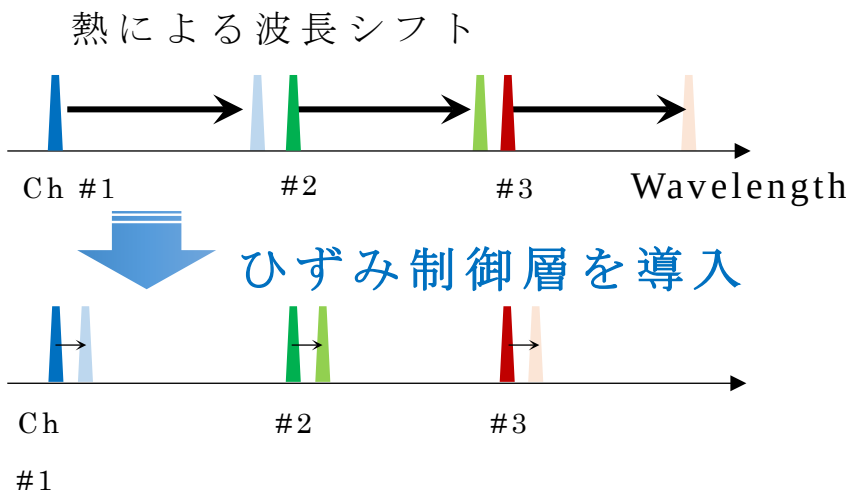


Fig.3-1 ひずみ制御層の導入による温度無依存化

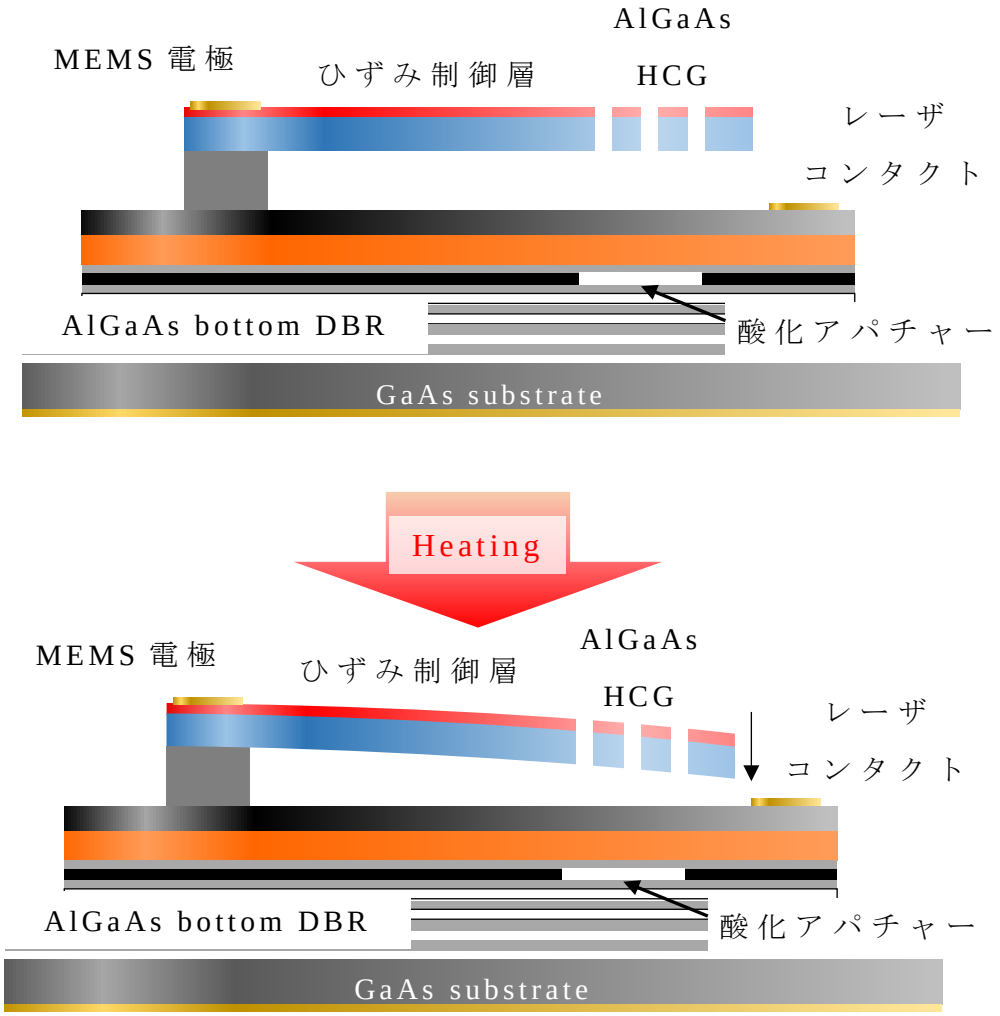


Fig.3-2 熱バイモルフ型の片持ち梁を用いたときの波長補正の原理

3.2 HCG マイクロマシン面発光レーザの波長温度無依存化の設計

計算方法について説明する[2][3]．まず DBR 面発光レーザと同様，アルミ組成の違う AlGaAs を貼り合わせたバイモルフ構造を仮定して計算を行う．マイクロマシンは片持ち梁構造とし，梁のひずみは長さ方向にのみ生じると仮定する．アルミ組成の異なる AlGaAs を貼り合わせると，格子整合のために片持ち梁全体に一様な歪みが生じ，一定の曲率で円弧を描く．梁の先端の変位量を x ととり，梁の長さを L，曲率半径を R，円弧の中心角を θ とすると，曲率半径が梁長に比べて充分大きいと，

$$\theta = \frac{\mathrm{L}}{\mathrm{R}} \ll 1 \tag{3-1}$$

と近似できる．梁の先端の変位量は幾何学的な性質により次のようになる．

$$\mathrm{x} = \frac{\mathrm{L}^2}{2R} \tag{3-2}$$

室温付近で各層の格子定数が違うとすると，境界面では格子整合していなければならないため，格子定数の小さい層に引っ張り，大きい層に圧縮する外力を仮定する．歪 ε_i が圧力に対して線形であるとすると，各層の断面積 A_i，ヤング率 E_i を用いて，各層の歪は

$$\varepsilon_\mathrm{i} = \frac{F}{A_i \cdot E_i} \tag{3-3}$$

と表せる．格子定数が整合した状態ではある温度でのそれぞれの項指定薄を α_i とすると

$$\alpha_0 - \frac{F}{A_0 \cdot E_0} = \alpha_1 + \frac{F}{A_1 \cdot E_1} \tag{3-4}$$

となるので，F は

$$\mathrm{F} = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{1/\mathrm{A}_1 \cdot E_1 - 1/\mathrm{A}_0 \cdot E_1} \tag{3-5}$$

整合した状態で外力を取り除くと，反作用として同じ大きさの逆向きの力が発生する．それにより生じる応力は

$$\sigma_{\mathrm{i}} = \frac{F_r}{A_i} \tag{3-6}$$

であるため，相互作用のモーメント $\mathrm{M_r}$ は

$$\mathrm{M_r} = w\int_0^{t_0}\left(\frac{F_r}{w\cdot t_0}\cdot y\right)dy + \int_{-t_1}^{0}\left(\frac{-F_r}{w\cdot t_1}\cdot y\right) = -\frac{\mathrm{t_0}+\mathrm{t_1}}{2}\cdot\frac{\alpha_1-\alpha_0}{1/\mathrm{A_1}\cdot E_1 - 1/\mathrm{A_0}\cdot E_1} \tag{3-7}$$

また歪みを幾何学的に考える．底面から無歪み面までの距離を $\mathrm{z_N}$ とすると

$$\varepsilon(z) = \Delta\alpha/\alpha = z/R \tag{3-8}$$

であるので断面における応力 $\sigma(\mathrm{z})$は

$$\sigma(z) = E\cdot z/R \tag{3-9}$$

定常状態においては内力の和は 0 になるので

$$\iint \sigma(z_a)dA = w\int_{-z_n}^{-z_n+t_0}\frac{E_0 z}{R}dz + \int_{-z_n+t_0}^{-z_n+t_0+t_1}\frac{E_1 z}{R}dz = 0 \tag{3-10}$$

これにより無歪み面の座標が求まるので，曲げモーメントの曲率半径の関数として書き直すと

$$\iint_A \sigma(z)\cdot z\cdot dz\iint = w\int_{-z_n}^{-z_n+t_0}\left(\frac{E_0 z}{R}\cdot z\right)dz + \int_{-z_n+t_0}^{-z_n+t_0+t_1}\left(\frac{E_1 z}{R}\cdot z\right)dz \tag{3-11}$$

これにより曲率半径 R を書き換えることができる．

$$\frac{1}{\mathrm{R}} = \frac{6(t_0E_0+t_1E_1)(t_0+t_1)}{(t_0t_1E_0E_1)^2\left[\left(\frac{t_0}{t_1E_1}\right)^2+\left(\frac{t_1}{t_0E_0}\right)^2+\frac{1}{E_0E_1}\left(4\cdot\left(\frac{t_1}{t_0}\right)+4\cdot\left(\frac{t_0}{t_1}\right)+6\right)\right]}\cdot\left(\frac{\alpha_1-\alpha_0}{\frac{\alpha_1}{t_0E_0}+\frac{\alpha_0}{t_0E_0}}\right) \tag{3-12}$$

温度による格子定数の変化は線形であり，線膨張係数(熱膨張率)で表される．

$$\alpha_{\mathrm{i}}(T) = (1+\alpha_i)\cdot\alpha_{0,i}\cdot(T-T_0) \tag{3-13}$$

ここで $\alpha_{0,\mathrm{i}}$は i 層の材料の，温度 $\mathrm{T_0}$における格子定数，α_{i}は線膨張係数である．これらを式(3-11)の格子定数と置き換えれば曲率半径を温度の関数として表すことが出来る．よって熱による片持ち梁の変位量は

$$\delta_{\mathrm{Th}}(\Delta T)=\frac{L^2}{2}\frac{6(t_0E_0+t_1E_1)(t_0+t_1)}{(t_0t_1E_0E_1)\left[\left(\frac{t_0}{t_1E_1}\right)^2+\left(\frac{t_1}{t_0E_0}\right)^2+\frac{1}{E_0E_1}\left(4\cdot\left(\frac{t_1}{t_0}\right)+4\cdot\left(\frac{t_0}{t_1}\right)+6\right)\right]}$$
$$\cdot\frac{(1+\alpha_1\Delta\mathrm{T})\cdot\alpha_1-(1+\alpha_0\Delta\mathrm{T})\cdot\alpha_0}{\frac{(1+\alpha_1\Delta\mathrm{T})\cdot\alpha_1}{t_1E_1}+\frac{(1+\alpha_1\Delta\mathrm{T})\cdot\alpha_1}{t_1E_1}} \qquad (3\text{-}14)$$

この式を用いて温度係数が 0 nm/K になるバイモルフ構造を検討する．この式は格子ひずみも含めた梁の基準からの変位量となるため，基準の温度 $\varepsilon_{\mathrm{Th}}(\mathrm{T}_0)$と $\mathrm{T}_0+\Delta\mathrm{T}$ での変位量求め，ここでは HCG は TM モード用とし，材料は $Al_{0.65}GaAs$，片持ち梁の厚さ 290nm とする．AlGaAs の物性値は参考文献[4]から導出し，線膨張係数は 5.6ppm/K とする．温度無依存化のためには基板側に梁を変位させるため，基板側が熱膨張率の小さい材料，上側が熱膨張率の大きな材料でなくてはならない．AlGaAs は Al の組成比により熱膨張率が変化し，Al 組成に対して単調減少するので，HCG の材料より Al 組成の小さい材料を表面に製膜することで温度上昇に対して基板側に変位するバイモルフ構造を形成することが可能である．またすでに結晶成長されているウェハにおいても表面に熱膨張率の大きな物質を製膜すれば温度無依存化が期待できるため，比較的成膜が容易で熱膨張率が 5.6ppm/K より大きな Au, Ti, Cr の検討も行った．

計算結果を Fig.3-3 に示す．Au, Ti, Cr の熱膨張率はそれぞれ，14.2, 8.5, 6.2ppm/K である．結晶成長を行った半導体では，格子定数の違う材料の界面で格子不整合のためにひずみが生じるが，蒸着を行った金属ではアモルファス状態となっていると仮定して格子整合による歪を無視して考えた．Fig.3-3 は片持ち梁の長さを 50μm として，横軸にひずみ制御層の厚さ，縦軸に温度係数を示している．温度係数の大きさは熱膨張率の差に依存しており，熱膨張率差が大きくなるほど温度係数は大きくなっていく．エアギャップを 1 波長分とした HCG MEMS VCSEL では，実効共振器長が波長の 7 倍程度であるため，片持ち梁の変位量を 7 で割ったものが波長のシフト量になる．温度による波長シフト量は 0.07nm/K であるので，梁の変位量が-0.5nm/K であれば，温

度による波長シフトを打ち消すことが可能となる．この結果では，Au や Ti のような熱膨張率の大きく異なる材料を用いると，5nm 程度の薄膜が必要となり，精密な厚さ制御が求められるので，これらを用いることは難しい．$Al_{0.3}GaAs$ であれば 15nm 厚の歪み制御層で条件を満たすため，ウェハと一括成長できるというメリットもあり，歪み制御層として望ましいといえる．

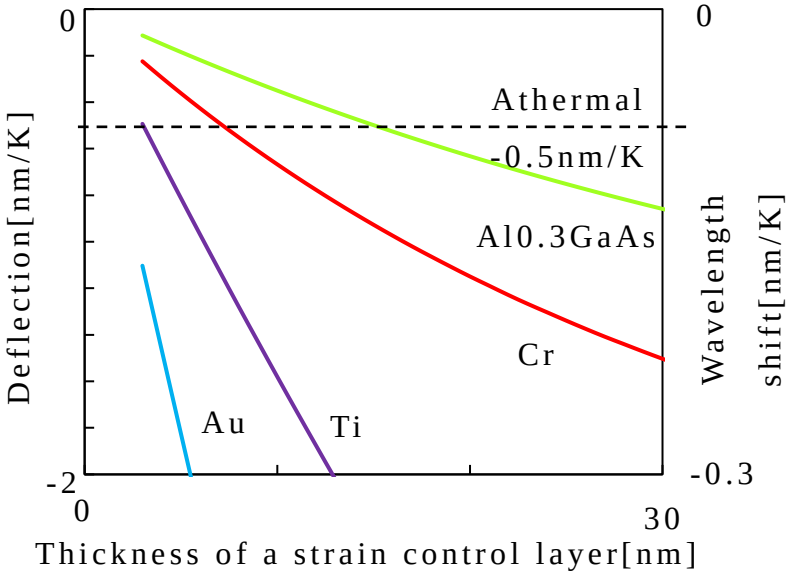


Fig.3-3 片持ち梁を 50μm としたときのそれぞれの材料におけるひずみ制御層の厚さに帯する温度係数

また Fig.3-4 には $Al_{0.3}GaAs$ を歪み制御層として用い，歪み制御層の厚さによる温度係数を示す．これは歪み制御層の厚さによるトレランスを示す．グラフは歪み制御層の厚さを 5nm から 5nm 間隔で示しているが，歪み制御層が厚くなるほど間隔は狭まっていく．歪み制御層は厚いほど膜厚の許容誤差は小さくなっていくが，温度無依存化となる梁の長さは短くなっていく．梁が短いと波長掃引範囲の制限等につながる可能性があり，他の要因も考慮してデバイスを設計する必要がある．

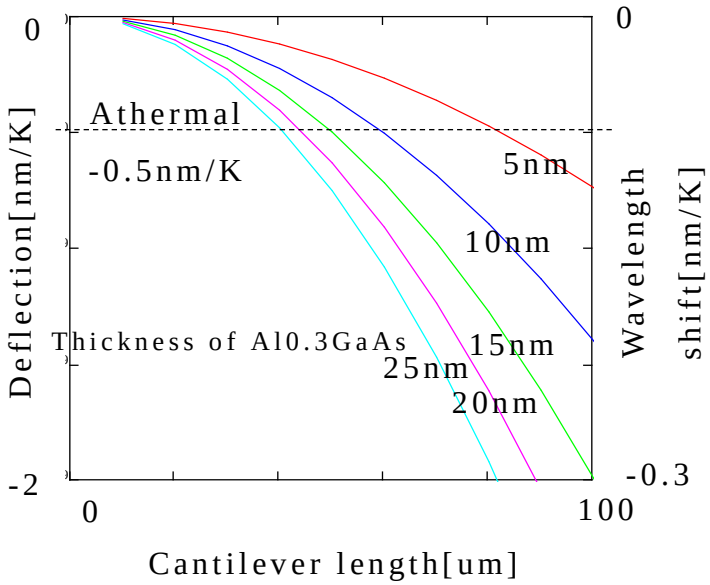


Fig.3-4 $Al_{0.3}GaAs$ をひずみ制御層としたときの
片持ち梁の長さに対する温度係数

3.3 まとめ

波長分割多重通信など，レーザ光源の絶対波長が要求されるアプリケーションは多い．これまでは温度調節をすることで波長を制御してきたが，より短距離の通信システムでも導入できる安価な光源として波長可変レーザ光源の温度無依存化は重要になってくる．

本研究室では上部反射鏡を DBR(厚さ約 3μm)とするマイクロマシン面発光レーザにおいて，熱バイモルフ型のアクチュエータを用いることで温度無依存化を達成している．前章でも述べたとおり，HCG には DBR にないユニークな特性があるため，HCG を用いたマイクロマシン面は國レーザでも温度無依存化の検討をした．

歪み制御層は片持ち梁の上に成膜するという条件のもと，熱膨張率が $Al_{0.65}GaAa$ (5.6ppm/K)より大きい材料である Au (14.2ppm/K)，Ti (8.5ppm/K)，$Al_{0.3}GaAs$ (6ppm/K)を歪み制御層の候補とした．レーザの実行教新機長は 7λ 程度であるため，片持ち梁の温度係数が-0.5nm/K となるとき，温度無依存として梁の変位量を計算した．HCG の厚さを 290nm で，片持ち梁の長さを 50μm としたとき，20nm の $Al_{0.3}GaAs$ を

用いると温度無依存化が得られる結果となった．一方で Au や Ti などの熱膨張率の大きく異なる材料を歪み制御層に用いた場合では，5nm 以下の歪み制御層が必要となり作製は困難である．また歪み制御層を $Al_{0.3}GaAs$ としたときの歪み制御層の厚さに対する温度係数の計算を行った．歪み制御層は厚い方が温度係数は大きくなるが，厚さに対する許容誤差は大きくなるため，波長掃引などの他の要因を加味して最適値を探す必要があるが，$Al_{0.3}GaAs$ を歪み制御層として用いると，厚さ 15nm，片持ち梁の長さ 50μm で温度無依存化が得られる結果になった．

以上本章では HCG MEMS VCSEL における発振波長温度無依存化の可能性を示した．

参考文献

[1] L. A. Coldren, G. A. Fish, Y. Akulova, J. S. Barton, L. Johansson, and C. W. Coldren, "Tunable Semiconductor Lasers: A Tutorial," Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, no. 1, pp. 193-202. 2004.

[2] 中田紀彦氏 修士論文

[3] 中濱正統氏 博士論文

[4] S. Adachi, “GaAs, AlAs, and $Al_xGa_{1-x}As$: Material parameters for use in research and device applications,” Journal of Applied Physics, Vol. 58, no. 3, R1-R29, Apr. 1985.

第四章　ナノインプリントリソグラフィーを用いた HCG 面発光レーザの作製と評価

4.1 ナノインプリントリソグラフィーを用いた高屈折率差サブ波長格子の作製

半導体微細加工において，感光性レジストのフォトリソグラフィーや電子ビーム露光によるパターニングとエッチングプロセスによる形成が一般的である．しかしながら HCG は百 nm オーダーの構造であるため一般的なフォトリソグラフィーによるパターン形成は回折限界により不可能である．ArF 液浸ダブルパターニングソリグラフィ等により 100nm を下回る構造のパターニングも可能である[1]が，装置が高額でありコスト面で不利である．また他には電子ビーム露光による製作も報告されている[2]が，基板 1 つ 1 つに電子ビームにより微細パターンを描画しなければならず，パターニングに時間がかかり，量産性においてネックとなる．そこで本研究では，ナノインプリントリソグラフィーという手法を用いて格子形状のパターニングを行う．ナノインプリントは Si 基板等に形成した型を，レジストをコーティングした基板に押し当て，金型のパターンをレジストに転写する方法である．金型自体は電子ビーム露光を用いて形成するが，一度金型を作製してしまえば同じ形状を安価に素早くパターニングすることが可能である．もちろん金型のパターン形成を，大面積に施せばそれだけ広い領域にパターニングをすることも可能である．本研究室ではすでにナノインプリントリソグラフィーを用いた HCG の製作が実証されている[3]．ナノインプリントリソグラフィーはレジストを基板に塗布し，金型を押し付けるものである[4]．この時レジストを固める方法において主に 2 種類の手法が存在する．それは熱によって硬化させるものと紫外線によって硬化させるものである．後者では紫外線透過型の型を使う必

要があるが，前者において加熱温度(200℃以下)に耐えれば特に制約はない．本研究室では熱ナノインプリントを用いている．
ここでナノインプリントによる HCG 作製プロセスを説明する．HCG の反射率を測定したい場合 VCSEL 構造では下部の構造が不要であるため，Si 基板上に実際の基板と同じようにプラズマ CVD により SiO2 スペーサ層(500)・a-SiHCG 層(290nm)を成膜したサンプルを用いる．この成膜はサムコ株式会社に依頼している．レジストは丸善石油化学株式会社の MTR-01,ナノインプリントリソグラフィー装置は SCIVAX 株式会社の VX-1090N-NT-UNT を用いる．次でナノインプリントリソグラフィーの詳しい工程を説明する．

4.1.(i)　ウェハ

ウェハにはまずレジストを塗布する．格子は数百 nm オーダーであるため，小さなゴミが付着していただけでパターニングが失敗する．基本的にはゴミの周囲に格子形状が形成されないだけであるが，半導体成長基板では圧力が集中し基板が割れることがあるため表面の洗浄は念入りに行う必要がある．基板を切り出したあと，超音波洗浄によるパーティクル除去，アセトン・メタノールによる有機洗浄を行い，メタノールをつけた綿棒で基板表面を拭きパーティクルの完全除去をする．その後濡れ性の改善と付着有機物の最終除去のため 200℃で O_3 によるアッシングを 20 分行う．この間適宜 N2 によるブローをかけゴミが付着しないよう注意を払う．
洗浄した基板はその後レジストのコーティングを行う．使用するレジストは丸善石油化学株式会社の MTR-01 という樹脂素材で，加熱によりガラス転移を起こす．この MTR-01 には 2 種類の濃度の違うもの(MTR-01-α，MTR-01-β)が存在し，前者のほうが薄い．この 2 つのレジストのスピンコートの回転数による膜厚を Fig.4-1 に示す，レジストの必要膜厚は金型の形状によって決まる．ナノインプリント時に金型の溝にレジストが埋まりきる必要がある．そのため金型の形状を，溝

深さ TM, DC_M(HCG とは反転するため 1-DC_{HCG})とするとレジスト膜圧 T_R は

$$T_R \geqq T_M \times DC_M$$

となる．今回用いた金型は溝深さが 290nm であり，HCG の設計が DC_M ＝70%であるためレジストは 210nm 以上が必要である．しかしレジストは必要量以上であればなるべく薄いほうが良いため MTR-01-α を用い，回転数 3000rpm でコーティングした．レジストコーティング後は 100℃10 分のプリベイク，窒素気流下での 200℃30 分のキュア，145℃30 分のポストベイクを行い，レジストを十分に乾燥させる．

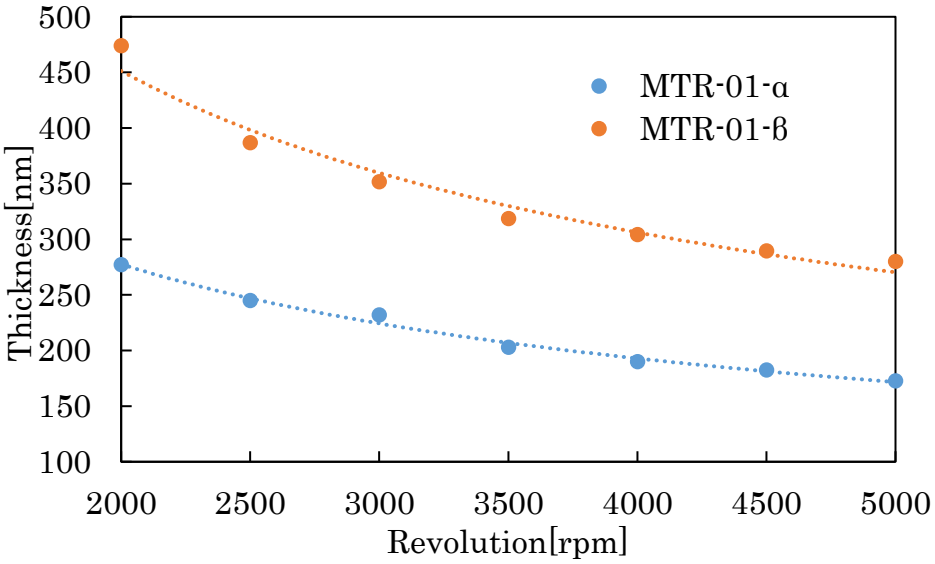


Fig.4-1 ナノインプリントレジスト膜圧

4.1.(ii)　金型

金型も基板と同様十分な洗浄が必要である．アセトン・メタノールで有機洗浄を行ったあとアッシングを行う．しかしこのままではナノインプリントした後に基板が金型から離れなくなってしまうので離型剤をコーティングする．離型剤はダイキン工業株式会社のオプツール DSX を用いる[5]．オプツール DSX はすでに C6F14 で 20%に希釈されているが，使用時にはさらに 0.1mass%に希釈する．これもレジスト同様スピンコーター3000rpm でコーティングし，60℃の水蒸気雰囲気下

で 1 時間乾燥させる．その後，C6F14 で金型表面に残った余分なオプツールを流し，さらに同条件下で 10 分乾燥させる．

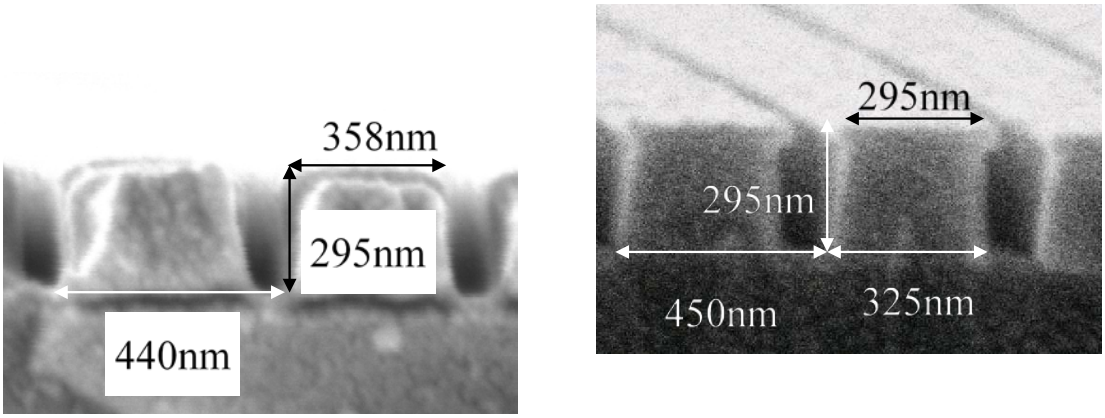
4.1.(iii)　ナノインプリントによるパターン転写

基板へのレジスト塗布と金型への離型剤コーティング後ナノインプリントリソグラフィーを行う．金型のパターン部と基板のレジストが向かい合うように重ね，圧力均一化のためにカーボンシートでこれらを挟んだ上で装置のステージに乗せ圧力を加えパターニングを行う．ナノインプリントリソグラフィーにおける条件は，加熱温度 170℃，押し込み圧力約 1MPa，形成時間 30 分である．リソグラフィーにおける所要時間は 1 時間半程度であり短時間で作成可能である．パターン形成したあとのレジスト形状は走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope : SEM)を用いて観測する．レジスト単体では SEM での観察はできないためサンプルの一部を切り出し，断面に金をコーティングして観察する．

4.1.(iv)　エッチング

レジストが必要以上に塗布されていた場合，全体的にレジストが厚くなりエッチング領域にもレジストが残ってしまい，HCG の面内均一性を損なう原因となる．そのため格子形状の溝部のレジスト(残膜)を除去する必要があるため，O2 プラズマによる残膜除去を行う．その後 Cl2 による ICP-RIE を行うことで a-Si に格子形状が形成できる．エッチングにおける条件は次のとおりである．残膜処理は O2 の流量 25 sccm，プロセス圧力 0.1 Torr，RIE パワー100 W，エッチング時間 15 sec，HCG の形成は，Cl2/Xe の流量 2/0.1 sccm，プロセス圧力 1 Pa，ICP/Bias パワー300/20 W，エッチング時間 5 min である．その後格子部分に残ったレジストを除去するために，100℃に加熱したデカヒドロナフタレンに 10 分浸け，200℃で 20 分の O3 アッシングを行う．

ナノインプリントによるパターニングとICPエッチングにより作製したHCGは，SEM観察により格子形状を観測し，台形に近似してG-Solverで反射特性を計算することで特性の評価を行う．a-Siの格子とSi基板の間には絶縁層であるSiO2があるため，そのままSEM観察を行うとチャージアップにより精度が落ちるため，レジスト観察時と同様切り出したサンプルの断面に金をコーティングする．



(a)ナノインプリント後のレジスト形状　(b)ICPエッチング後のHCG形状

Fig.4-2 HCG形成時のレジスト形状とHCG形状比較

Fig.4-2(a)にDC＝22%の金型を用いて行ったナノインプリントリソグラフィー後のレジスト形状，Fig.4-2(b)にそのレジストを用いて作製したHCGのSEM観察像を示す．レジスト形状は周期440nm，格子厚295nm，格子幅358nm，格子形状は周期450nm，格子厚295nm，格子幅は底辺で325nm，上辺で295nm，格子形状を台形と考えてDCの平均値を取ると69%でありレジストのDC＝78%から10%近く小さくなっている．残膜除去時のO_2RIEは等方性エッチングのため縦方向だけでなく横方向にもエッチングが進んだことと，ICPエッチングが完全には垂直ではなかったことにより，格子幅が減少したと考えられる．一方この減少量は再現性がとれており，それを考慮してここでは設計より8%DCの大きく設計した金型を用いており，設計値から1%程度のDC変化に収めている．また格子の壁面は約85°であり高い垂直性を持

っている．2 章で検討したように垂直から 10°傾いていてもほぼ同様の角度依存性を示していたため，5°の傾きは特性に大きな影響はないと考えられる．

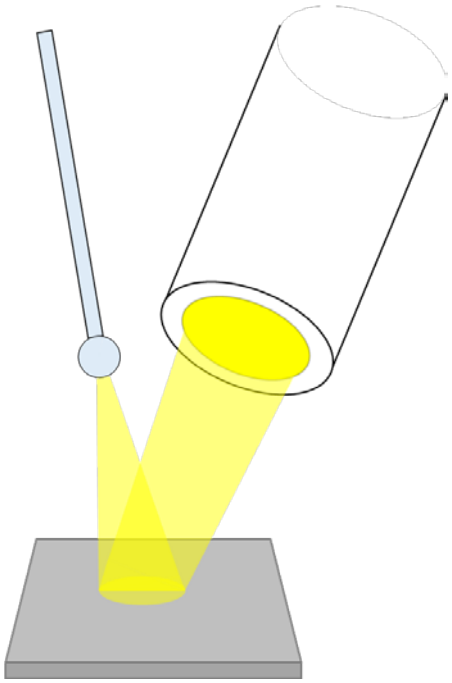
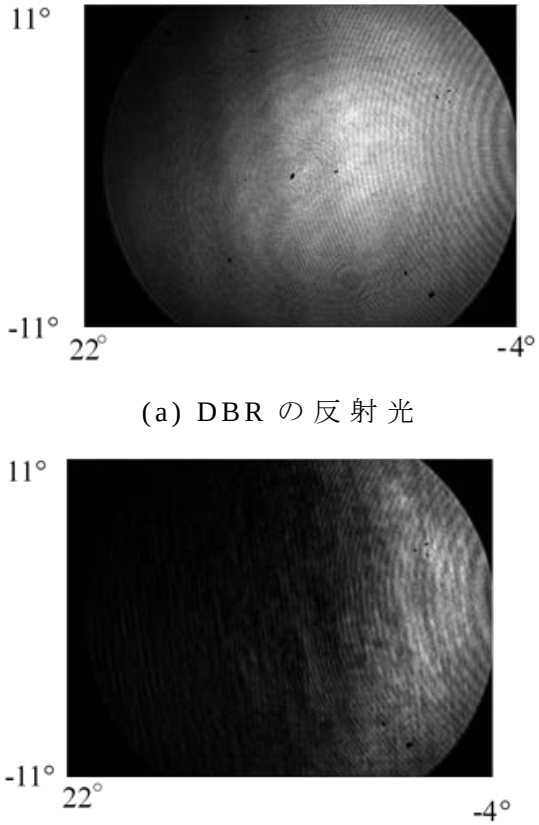


Fig.4-3 反射率測定イメージ



(a) DBR の反射光

(b) HCG の反射光

Fig.4-4 FFP 測定による HCG 反射率の導出

作製した HCG は反射光遠視野像の遠視野像の測定により反射率を評価する．Fig.4-3 に反射率測定系の模式図を示す．光源に 960-997nm の帯域を持つ波長可変レーザを用いレンズファイバーから基板に放射する．ファイバはポラライザを介しており偏波の制御が可能である．基板から反射した光は対物レンズを通り CCD で受光される．偏波を完全に分離するために遠視野像測定系には偏光板を挿入している．遠視野像測定系では 10 倍の対物レンズを用いた場合，28°の視野角を持っており，レンズファイバーは放射角約 30°の物を使用する．また遠視

野像測定系は中心の角度を-5°から 60°まで動かすことができ，視野の±14°を含めると-19°から 74°まで測定することが可能である．Fig.4-4 に遠視野像の例を載せる．0°が中心角であり右側が垂直方向，左が水平方向になる．反射率は 32 ペア DBR をリファレンスとして用い，DBR の反射光強度に対する HCG の反射光強度として算出する．

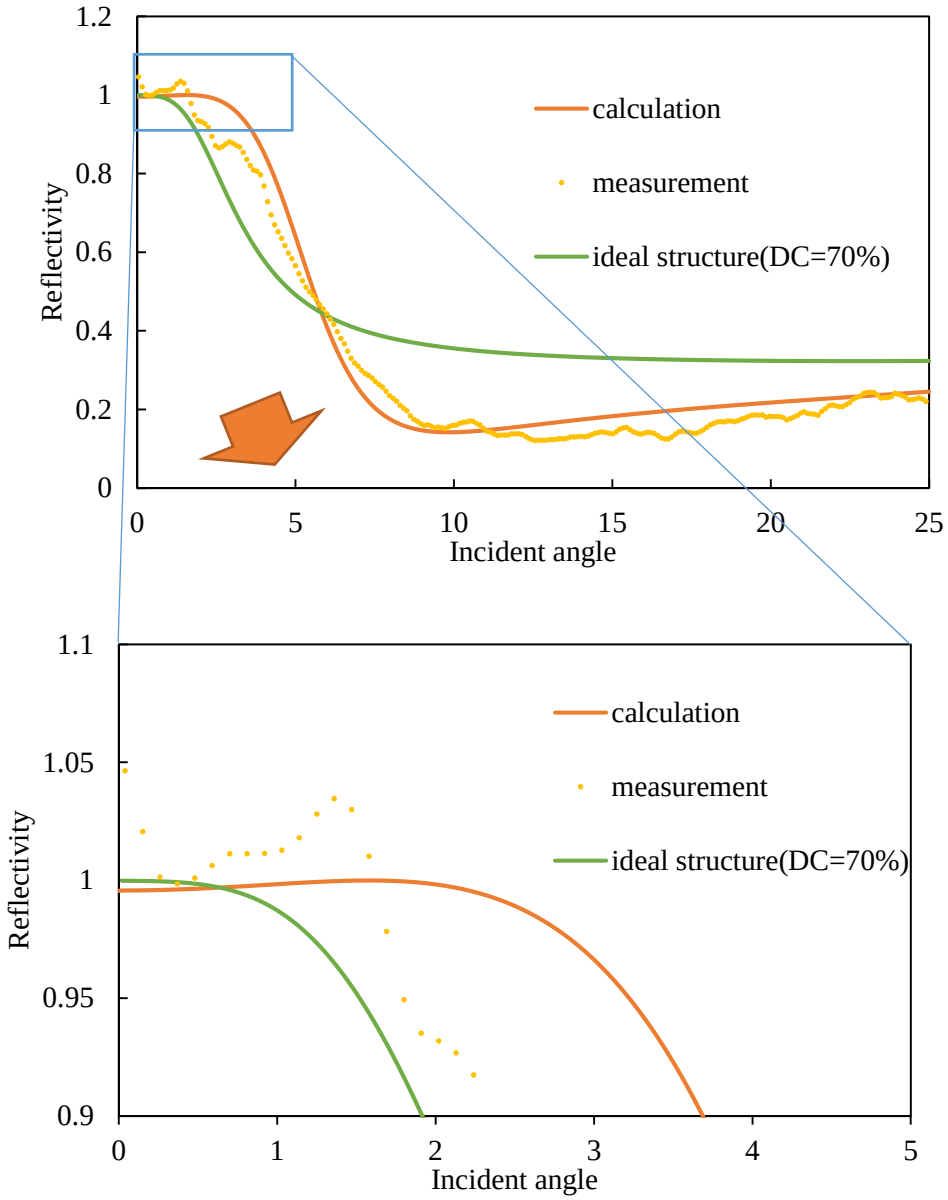


Fig.4-5 製作した HCG(measurement)・設計値(ideal structure)・SEM 観察で得られた実際の形状で計算した(calculation)反射率とその垂直入射部の拡大(下)

Fig.4-5 には作製した HCG の波長 980nm に対する反射率を示す．また設計値の反射率と，SEM 観察により推定した構造での反射率も併記する．この結果では測定した HCG の反射率と構造推定して計算した反射率が高い一致性を持っており，両者の正当性が確認できた．一方で構造近似による計算では反射率の極大領域が垂直からずれてしまっている．反射率の極大値の角度は HCG の厚さに依存性を持っており，成膜された amorphous-Si 層が SEM で観察したように設計値から 5nm ほどずれてしまったことが原因であると考えられる．これは極短時間の ICP エッチングを行うことで格子圧を調節し極大値を垂直入射に動かすことができるのではないかと考えている．

4.2 高屈折率差サブ波長格子を上部反射鏡として用いた面発光レーザ

4.2.(i) HCG-VCSEL プロセスフロー

上部反射鏡を HCG のとした面発光レーザを製作し，発振スペクトルでの横モード制御を実証する．HCG-VCSEL の製作手順は，HCG 作製後は基本的に従来の面発光レーザと同様である．したがって一度に多くの素子を製作することが可能であり，また開口系の異なるものも同時に製作することができる．

Fig. 4-6 には HCG-VCSEL の製作プロセスを示す．

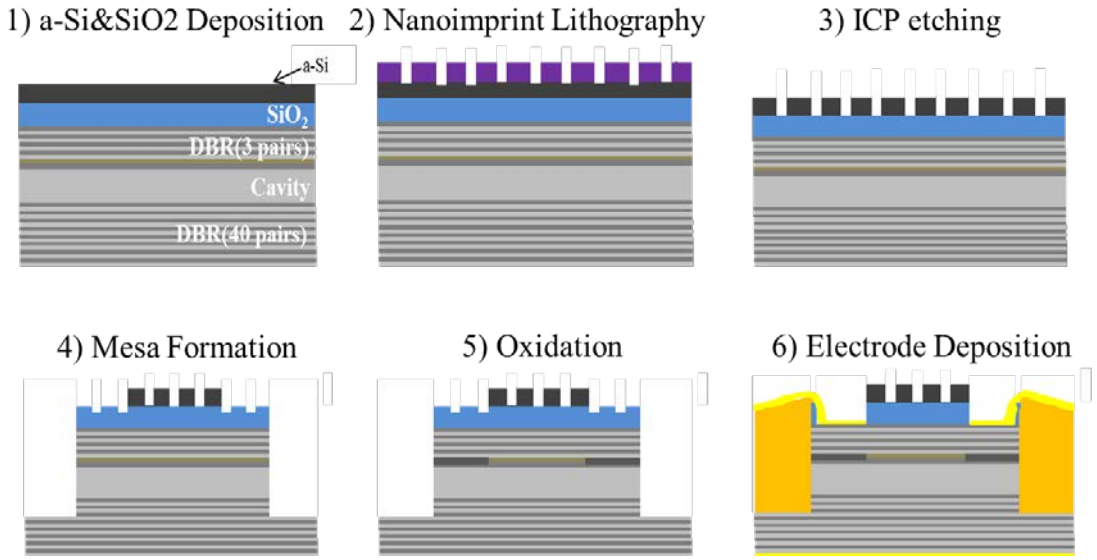


Fig.4-6 デバイス製作プロセスフロー

1) 上部 DBR が 3 ペアだけであるハーフ VCSEL にスペーサ層 SiO2 と HCG 層 a-Si をプラズマ CVD により成膜する.

2) ウェハを切り出し, ナノインプリントレジスト(MTR-01)を塗布する.

3) ナノインプリントによりレジストに格子形状を転写

4) O2-RIE による残膜処理と Cl2-RIE での amorphous-Si エッチングによる HCG 作製

5) 開口部以外の HCG を除去するためのレジストパターニング

6) Cl2-RIE による開口部以外の HCG の除去

7) 開口部以外の SiO2 除去のためのパターニング

8) Buffered HF による開口部以外の SiO2 除去

9) メサ形成のためのパターニング

10) ICP エッチングによるメサ形成

11) 高アルミ組成層の水蒸気酸化による電流・光狭窄機構の形成

12) 裏面電極蒸着

13) 基板・電極パッド間絶縁のための AL ポリマー膜形成

14) 電極蒸着のためのパターニング

15) レーザコンタクト用電極蒸着

16)　リフトオフにより不要部分の金属除去

17)　電極のアニール

4.1.(ii)　HCG-VCSEL 製作手順

前節のプロセスフローを基に実際に行った HCG-VCSEL 製作の手順を下記に記す．ハーフ VCSEL のエピタキシャル成長・SiO2/a-Si 層のプラズマ CVD による成膜は外注であり，ここでは SiO2/a-Si 層の成膜後から述べる．

a)　ナノインプリントリソグラフィーによる HCG 作製

はじめにナノインプリントリソグラフィーを用いて HCG を作製する．手順については前章の HCG 反射鏡作製と同じであるためここでは省く．

b)　開口部以外の HCG 除去

後段のプロセスにおいてメサ形成や電極蒸着を行うため，HCG を反射鏡として用いる部分を除いてスペーサ層・HCG 層は除去する必要がある．SiO2 は Buffered HF によりエッチングが可能であるが，Si-HCG は BHF に耐性があるため別の方法で除去しなければならない．今回はフォトレジストで HCG を一部覆い，ICP エッチングにより HCG を除去した．ここで用いる AZ5200NJ は i 線に対して感光性のあるポジ型のレジスト，OAP は AZ5200NJ の密着性を高めるための溶液である．

プロセス	内容
OAP 塗布	スピンコート 4000rpm，プリベイク 100℃60 秒
AZ5200NJ 塗布	スピンコート 4000rpm
プリベイク	100℃，90 秒
露光	25mW/cm^2(i 線)，5 秒
現像	AZ-Developer，90 秒
ポストベイク	120℃，90 秒
ICP エッチング	開口部以外の HCG 除去

ICP エッチング後にマスクとして用いたレジストの除去を行う．高温に加熱されたレジストは非常に除去しにくくなっているため，502A 剥離液を使用する．ただし 502A 剥離液は半導体もエッチングするためなるべく使用時間は短くすることが望ましい．そのため予め沸点に達しない程度に加熱したアセトンに浸けてレジストの溶解性を高めておく．またここでは 502A と O2 プラズマのアッシングを併用しレジスト除去を行う．

薬品	温度	時間
アセトン	沸点(56℃)以下	任意
502A	130℃	10 分
キシレン	120℃	5 分
アセトン	100℃	5 分×2
メタノール	100℃	5 分
O_2 プラズマ		10 分

次に HCG 部以外の基板表面を露出するため SiO2 のエッチングを行う．マスクパターンは上記のものと同じものを使用した．

プロセス	内容
OAP 塗布	スピンコート 4000rpm
ベイク	100℃，60 秒
AZ5200NJ 塗布	スピンコート 4000rpm
プリベイク	100℃，90 秒
露光	25mW/cm^2(i 線)，5 秒
現像	AZ-Developer，90 秒
ポストベイク	120℃，90 秒
BHF	2 分，反射鏡部以外の SiO_2 除去

この行程においてレジストは加熱プロセスを経ていないためレジスト剥離液には Remover PG を用いる．

プロセス	内容
Remover PG	70℃，30 分
IPA	リンス，5 分

c)　メサ形成

フォトレジストにメサ形状のパターニングを行い，ICP エッチングでメサを形成する．活性層の上，ないし下にある酸化狭窄層を露出させる必要が有るため，従来の上部反射鏡が DBR である VCSEL ではメサの高さが 5μm となるが，HCG-VCSEL では活性層上に 3 ペアの DBR しかないため，1.5μm 程度で充分である．今回は AL ポリマーの膜圧を考慮して 2.5μm 程度とした．パターニング・レジスト除去は開口部以外の HCG を除去と同様．

d)　酸化狭窄による閉じ込め機構の形成

H_2O/N_2 雰囲気化で高アルミ組成層($Al_{0.98}Ga_{0.02}As$)を酸化し，閉じ込め機構を形成する．この高アルミ組成層は空気中で自然酸化を起こす．自然酸化膜がある状態で酸化を行うと酸化レートが不均一になり，開口形がいびつになるため参加をする前に取り除く．自然酸化膜の除去は 10 倍希釈の BHF，3 秒で行った．

酸化レートはウェハによって，また装置の状態によってばらつきが生じる．酸化距離はミクロンオーダーで制御する必要があるため，その都度ダミーのサンプルを用意し酸化レートを見積もる必要がある．酸化した後のサンプルは赤外顕微鏡で酸化径を計測する

酸化開口径は充分な光閉じ込めが得られるよう HCG 反射鏡より 5μm 程度小さくした．

e)　裏面電極蒸着

電極蒸着後のアニールの最適条件が P 側(裏面)と N 側で異なる(P 側:420℃,5 分，N 側:450℃2 分)．先に蒸着した電極は，後に蒸着した電極のアニール時にもアニールがされてしまうため，より正確性が求め

られるN側の電極を後に蒸着する．今回用いた基板はP基板であるため裏面の電極を先に蒸着する．金属の厚さ等の条件は次の通り．

金属	厚さ
Au	300Å
Zn	200Å
Au	2500Å

電極蒸着後420℃で3分アニールを行う．このアニールが最適条件(420℃，5分)ではないのは，N側コンタクトを蒸着した際のアニール(450℃，2分)で補完され最適条件に近くなることを期待しているためである．またアニールは非常に高温で行うため，急激な冷却を行うと半導体と金属の熱膨張率の違いから電極が剥離する原因となるため時間をかけて冷却する．

f)　ALポリマーによる絶縁膜形成

面発光レーザはメササイズが10μmオーダーであるため，コンタクト電極を作製する際にパッド部を作る必要がある．そのためパッドを基板と絶縁するためにポリマー樹脂でメサを埋める．今回使用したポリマー樹脂はネガ型のAGCのALポリマーである．ポリマーを埋める際には，注意点が2つあり，ひとつはポリマーとメサの間に隙間ができないこと，もう一つは半導体と電極のコンタクトを取れる程度にパターンを開けることである．ポリマーは3μmほど積むため露光時間が15～20秒と長く，回折によりパターンが小さくなりやすい．回折によりパターンの内側まで露光されてしまいメサ表面を覆ってしまうと電極がメサにコンタクトできなくなり，通電しなくなってしまう．一方でパターンが大きすぎるとパターンがメサからはみ出てしまいメサとポリマーに隙間が生じてしまう．この場合電極がその隙間の中に入り活性層の下部とリークしたり，電極がパッドとメサ間で絶縁したりすることが考えられる．以上のことから今回はパターニング用マスクとして，メサ形成時のものとメサより2μm各辺を伸ばしたものを用いて

ダミーメサにパターニングをし，適当なものを検討した．またコンタクト電極蒸着用パターンでは VCSEL の出射部に金属がつかないようレジストを残すが，周囲のポリマーの形状によりその部分のレジストが取れやすくなるため，ポリマーの厚さによる違いも検討した．メサ形成と同じパターンを用いたものではメサ上面へのせり出しは過剰ではなく必要十分であったが，大きめのパターンを用いて露光したものでは，メサとポリマーに隙間が生じたものが一部あった．そのためパターニングはメサ形成と同じパターンを使うのが最適である．

またポリマーの厚さ制御については，スピンコートの回転数と元の溶液の年度によって調整できるが，今回は回転数 2000rpm～5000rpm で 7μm～3.5μm まで制御できる AL-X2010[6]と同 3μm～1μm まで制御できる AL-X2003 を用いて比較を行った.検討した厚さは 2 通りである．AL-X2010 の 5000rpm(コーティング後厚 3.5μm)と AL-X2003 の 2000(同 2.7μm)である．ポリマーはベイクやキュア等のプロセスにより薄くなっていき成膜プロセス終了後には，前者は 2.5μm，後者は 1.5μm 程度になっていた．メサの高さが 2.7μm 程度であったため前者はメサとほぼ段差なし,後者はポリマー表面がメサ表面より 1μm 低くなっている．これらに電極上着用のパターニングを行い(条件等は次の項)，条件を検討した．前者では出射部のパターンは残っていたのに対し，後者ではパターンがなくなっているものが多く見受けられた．これは段差によって実質的にレジストが厚くなる部分が生じ，その部分で現像を完了する時間が長くなり出射部のパターンに対しても過剰なアンダーカットが入ったためパターンがとれてしまったと考えられる．今回はポリマーがメサより高い場合は検討しなかったが，ポリマーが薄い時と同様，出射部のパターン維持が難しいと考えられるので，メサとポリマーがほぼ同じ高さとなる AL-X2010/5000rpm でのコートを採用した．ポリマーの成膜プロセスは以下のとおりである．AP-903 は AL ポリマーと半導体の密着性を高めるプライマーである．また最後の O3 アッシングはメサ上に薄く残ったポリマーを完全に除去するために行う．メサ上には 50nm 程度ポリマーが残っていると思われ，2～4 分で完全

に取り切ることができた．アッシングプロセスは長すぎるとポリマーが減っていき活性層等が露出する可能性があるため必要最小限とする．

プロセス	内容
AP-903 塗布	スピンコート 4000rpm
ベイク	100℃，90 秒
AL-X2010 塗布	スピンコート 5000rpm
プリベイク	60℃，90 秒
露光	25mW/cm^2(i 線)，14 秒
現像	AS-203，20 秒
リンス	AS-203，30 秒
キュア	窒素気流下，200℃，30 分
O_3アッシング	250℃，2～4 分

g)　コンタクト電極蒸着

レーザ表面の N 側コンタクト電極を蒸着する．リフトオフプロセスのため，フォトレジストのスピンコートの前に耐熱性に優れる感光性がなく AZ レジスト現像液に対し溶解性のある PMGI をコーティングする．その上からフォトレジストをコート・露光・現像することで AZ レジストの非現像域の下の PMGI にアンダーカットが入るので，コンタクト部の金属とレジスト上の金属を分離することも容易である．また AZ レジストは蒸着中の熱で硬化して除去しにくくなるため，それを防ぐ役割も持っている．パターニングの条件は次の通り．蒸着中に加熱されることと，パターンがだれるのを防ぐためにポストベイクは行わない．

プロセス	内容
PMGI(SF-15) 塗布	スピンコート 5000rpm
プリベイク	150℃，90 秒
AZ5200NJ 塗布	スピンコート 4000rpm
プリベイク	100℃，90 秒

露光	25mW/cm^2(i 線), 5 秒
現像	AZ-Developer, 2 分

蒸着金属は次の通り. Ni は AuGe と Au が凝集するのを防ぐために間に挟む.

金属	厚さ
AuGe	700Å
Ni	350Å
Au	1000Å

蒸着後にリムーバ PG を用いて PMGI を溶かし金属をリフトオフする. レジストパターンが適切であれば 70℃に加熱したリムーバ PG に 30 分程度浸けておけばリフトオフは完了する.
最後に 450℃で 2 分間アニールを行う.

4.1.(iii) プロセスにおける問題点

今回作製したデバイスで上部数層が剥離する現象が半分程度のデバイスで起きた. 一部のデバイスでは中心部に模様が残っていることから酸化狭窄層の参加加領域であると考えられる. 酸化層は一度エピタキシャル成長した高アルミ組成層を酸化するため内部歪が大きくなっている. そのため高温加熱を行う裏面電極上着後のアニールにおいて加熱/冷却中に内部応力で剥がれたのではないかと考えられる. そのためアニールにおいて加熱/冷却はゆっくりと行う必要がある.

サブ波長回折格子を用いた面発光レーザの特性評価

作製したデバイスの特性を示す. I-L-V 特性はレーザに電流源から電流注入を行い, 出力光をフォトダイオードで受光し測定した. また MMF(Multi Mode Fiber)を通してスペクトルアナライザーに結合させ, 発振スペクトルの測定を行った.

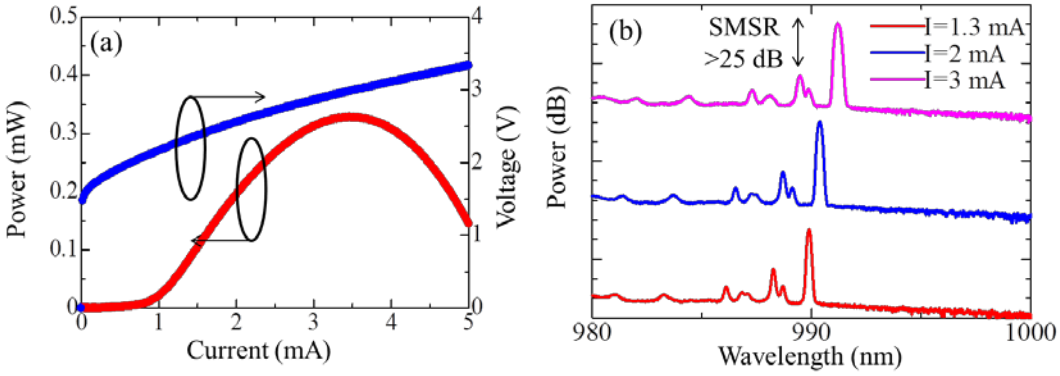


Fig.4-7 酸化開口径 5-6 μm の(a) L/V/I 特性と(b) スペクトル特性

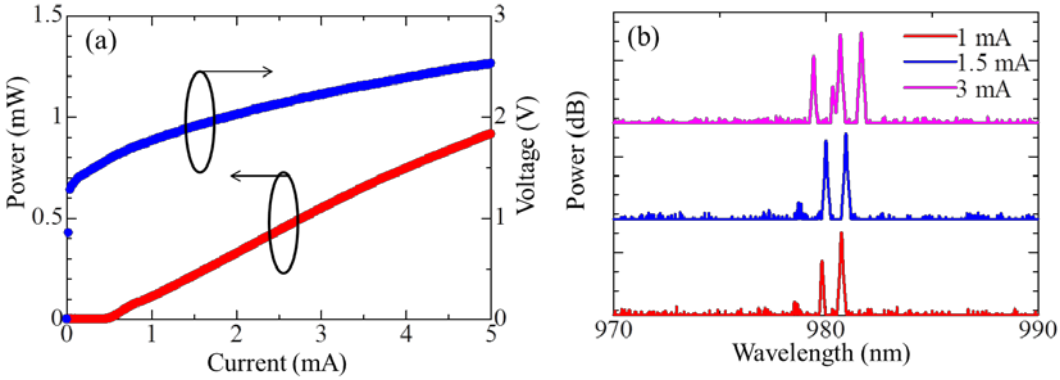


Fig.4-8 酸化開口径 5 μm 程度の VCSEL の(a) L/I/V 特性と(b) スペクトル特性

Fig.4-7 にしめす I-L-V 特性とスペクトルは，DC=64%の HCG を上部反射鏡として用いた VCSEL で測定したものである．酸化アパチャーサイズは約 5μm であり，閾値電流は Ith は 1.0 mA で最大出力は 0.3 mW となっている．3 Ith でサイドモード抑圧比は 25 dB 以上で単一モード発振が得られていると共に，電流を増加しても高次モードを抑圧していることが分かる．一方 Fig.4-8 には同程度の酸化アパチャーを持つ DBR VCSEL の特性を示す．このデバイスではマルチモード動作をしており，電流が増加するとピークの数が増えていくことが確認できる．

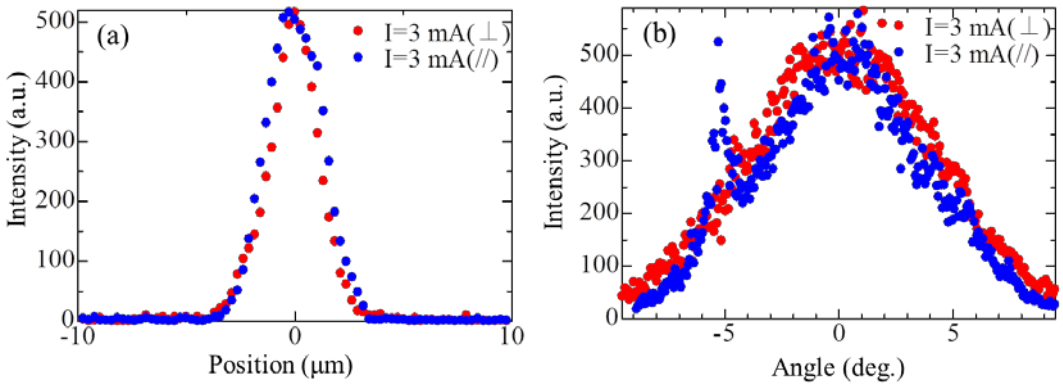


Fig.4-9 酸化開口径 5-6 μm の 3 Ith での(a) NFP と(b) FFP

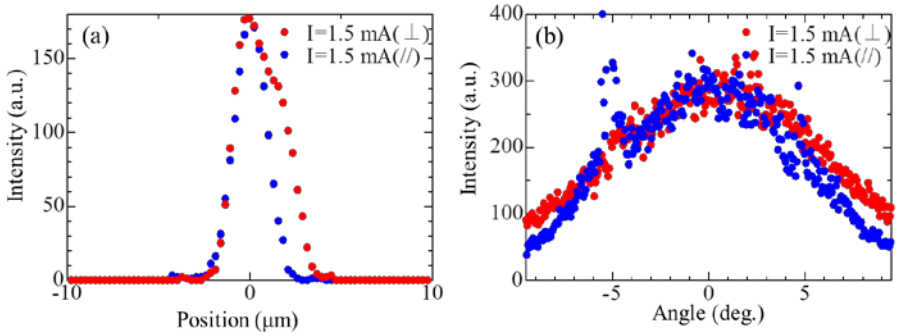


Fig.4-10 酸化開口径 5 μm 程度の VCSEL の 3 Ith での(a) NFP と(b) FFP

Fig.4-9 には HCG VCSEL の近視野像と遠視野像，Fig.4-10 には DBR VCSEL の近視野像と遠視野像を示す．HCG VCSEL では NFP も FFP も垂直，水平とも単峰性の強度分布を示しており，出力を大きくしても単一横モード動作を維持することができている．また，計算では基本モードと 1 次モードに対する反射率差が約 2.2%となっており，十分に反射率差を与えることができている．その結果，高次モードへ損失を十分に与えることができ，単一横モード発振を維持することができたと考えられる．一方マルチモード動作している DBR VCSEL では，垂直方向で高次モードの影響がみられる．また，FFP でも垂直方向で水平方向より広い広がり角を持っており，これも高次モードによる影響である．

従って，HCG-VCSEL と従来の VCSEL の比較を行うことで，HCG の角度依存性による横モード制御の有効性を実証した．

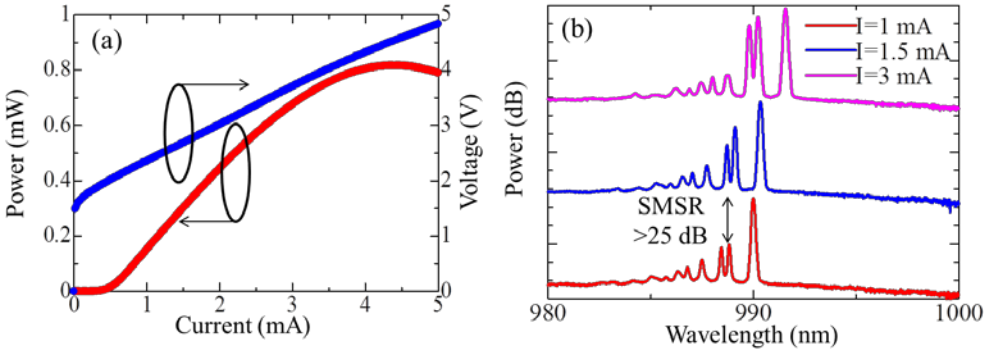


Fig.4-11 酸化開口径 11-12 μm の(a) L/I/V 特性と(b) スペクトル特性

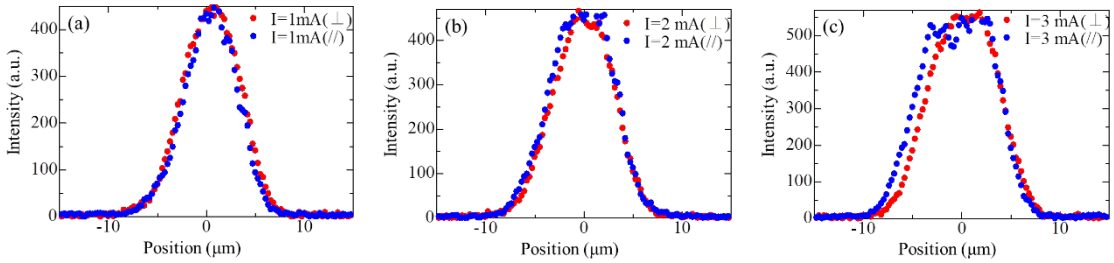


Fig.4-12 酸化開口径 11-12 μm の NFP

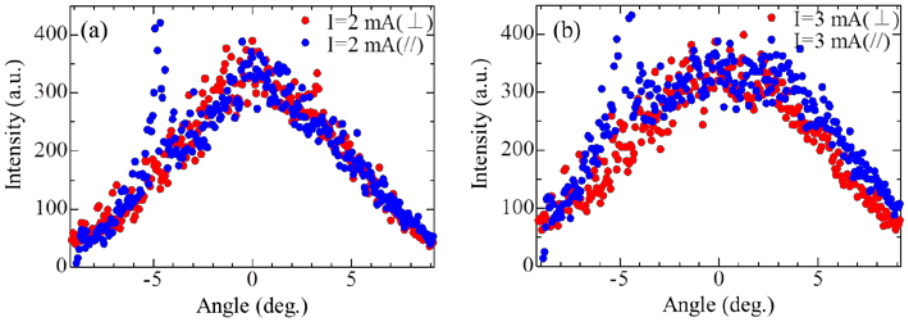


Fig.4-13 酸化開口径 11-12 μm の(a) 2 mA と(b) 3 mA での FFP

また，Fig.4-11，Fig.4-12，Fig.4-13 には酸化アパチャー 11-12 μm の HCG-VCSEL の特性を示す．ここで用いた HCG は 10μm を超えるアパチャーに対しては横モード制御を行うのに十分な角度依存性を有していない．そのため注入電流が小さい場合には単一モード動作が得られており，NFP・FFP も短峰性のプロファイルが得られているが，注入電流を増加していくと再度モードが強くなり，また NFP・FFP も広がっ

ていくことが確認できた．このデバイスでは HCG の反射率差は 0.2%程度であり，反射率差 0.5%以上とした最初の仮定の有効性を示した．

次に DC=69%の HCG を用いて製作したデバイスの特性を示す．Fig.4-14, Fig.4-15 に開口径 10μm 角の VCSEL, Fig.4-16, Fig.4-17 に同 12.5μm 角の I-L-V 特性と発振スペクトルを示す．

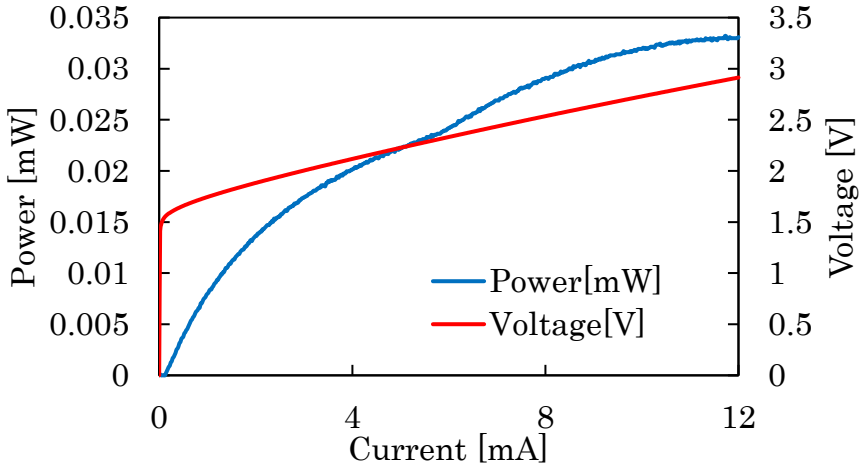


Fig.4-14 開口径 10μmHCG-VCSEL の I-L-V 特性

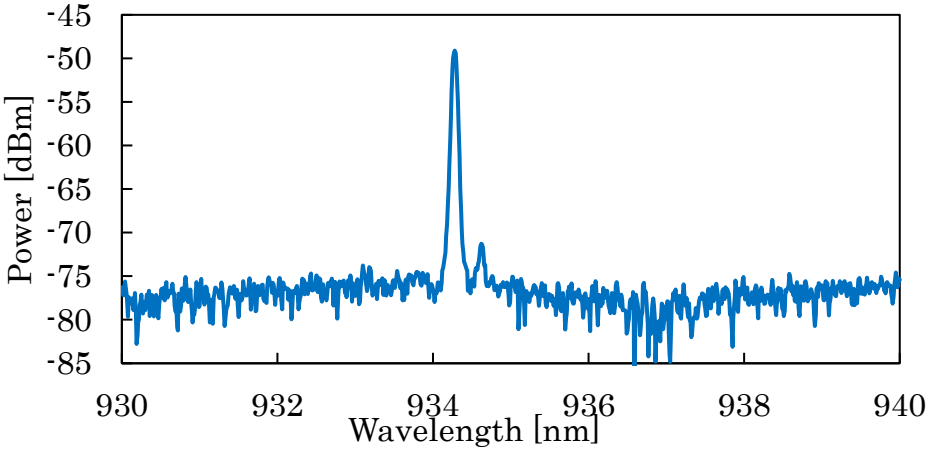


Fig.4-15 開口径 10μmHCG-VCSEL の発振スペクトル

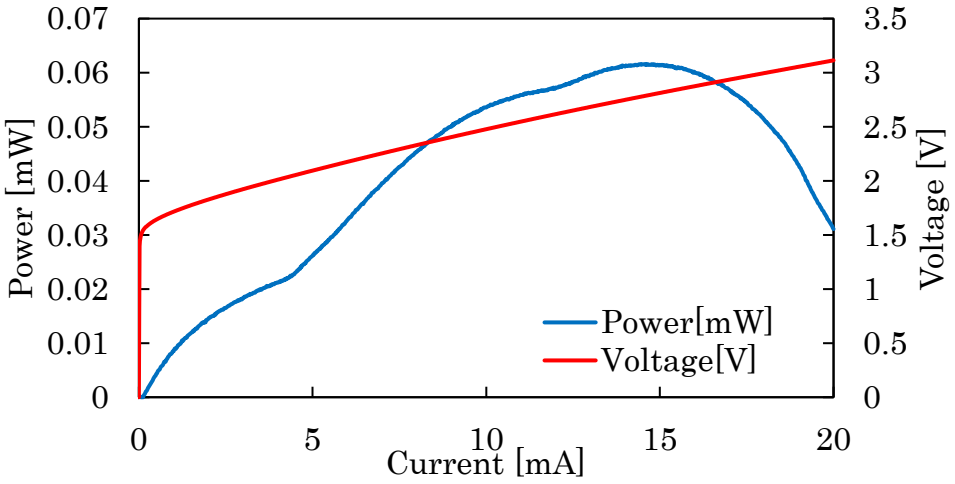


Fig.4-16 開口径 12.5μmHCG-VCSEL の I-L-V 特性

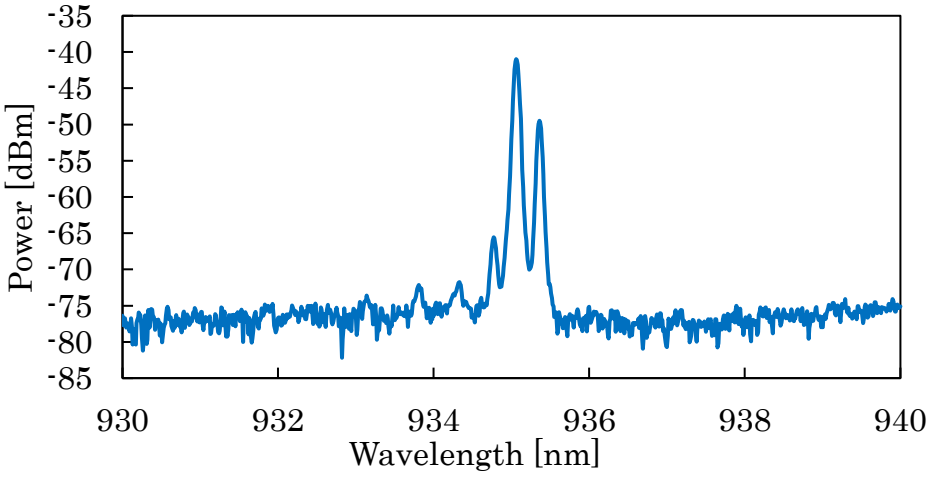


Fig.4-17 開口径 12.5μmHCG-VCSEL の発振スペクトル

開口径 10μm 角の VCSEL ではしきい値電流約 6mA, しきい値電流密度 6kA/cm2, 10mA の電流注入で 35μW の出力が得られ, 20dB 以上の SMSR が得られモード制御に成功していることが確認できる.

開口径 12.5μm 角の VCSEL では 15mA の電流注入で 60μW の出力が得られたが, マルチモード発振となった.

発光スペクトルの測定によりこれらのデバイスでレーザ発振が得られていることは確かであるが, 出力が非常に小さかった. これについては次の節で述べる通り, レーザビームの出射方向が垂直から約 45°傾いており, またこの測定系では垂直方向にある対物レンズで集光して

ディテクターに入射光を送るため，斜めに出射したレーザ光を適切に集光できていなかったためと考えられる．そのため斜めに出射するビームを受光できる測定計を用いて，I-L 特性とスペクトルの測定を行った．

測定計を Fig.4-18，Fig.4-19 に示す．I-L 特性はむき出しの InGaAs のディテクターを用い，フォトカレントを測ることにより光出力を見積もる．ディテクターの角度，位置を自由に変えられるため，レーザビームの出射方向に合わせる事が可能である．またディテクターの受光面積は直径約 1cm あるためレーザとディテクターの距離による強度の依存性はほとんどない．今回レーザは垂直から±45°にビームが出射しているため両方のビームを拾うためには基板上方に設置する必要がある．また両ビームのスポットはデバイスからの距離の 2 倍で広がるため，デバイスに十分近づける必要がある．またスペクトルは，ファイバをデバイスに対し斜めに近づけレーザビームを結合させる．

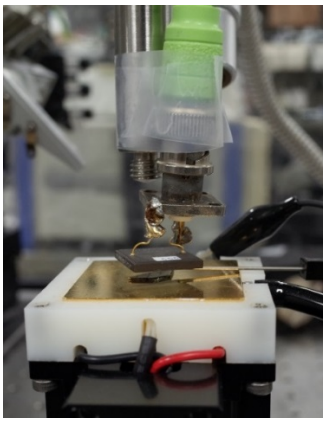


Fig.4-18 斜め放射 I-L 特性測定系

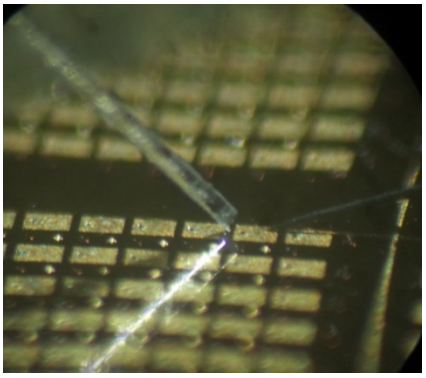


Fig.4-19 斜め出射スペクトル測定系

この測定に先立ち InGaAs ディテクターのキャリブレーションを行う．まず波長 980nm のレーザとパワーメーターをファイバで結合し，レーザの制御出力によるファイバ結合強度を測る．次にファイバからの出射光を InGaAs ディテクターで受光し制御出力に対するフォトカレントを測定する．この操作によりパワーメーターで受けた出力とデ

ィテクターでのフォトカレントを対応させることができ，測定したフォトカレントから出力を見積もることができる．Fig.4-20 にレーザの制御出力に対するパワーメーターの受光強度，ディテクターのフォトカレントを示す．なおディテクターにおいて 1.5μA 程度の暗電流が生じたためその補正も行っている．

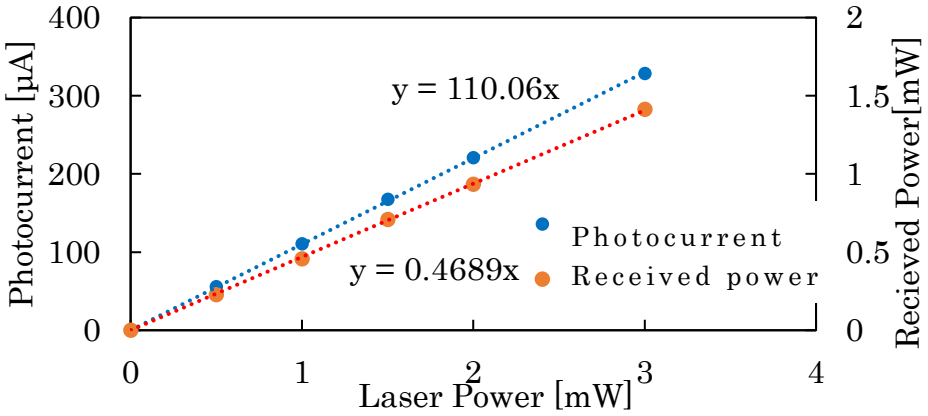


Fig.4-20 フォトディテクタのキャリブレーション

Fig.4-21 に測定した I-L 特性，スペクトルを示す．電流は 0.5mA ステップである．しきい値電流は 6mA であり垂直方向での測定と変化なかったが，出力は 10mA 注入時に最大で 400μW となり 10 倍以上になった．このことから垂直方向にはほぼ出力がなく，大きな角度を持ったビームが出ていることがわかる．また発振スペクトルはほぼ同じであったが，30dB 以上の横モード抑圧比を示し，単一モード動作が得られた．

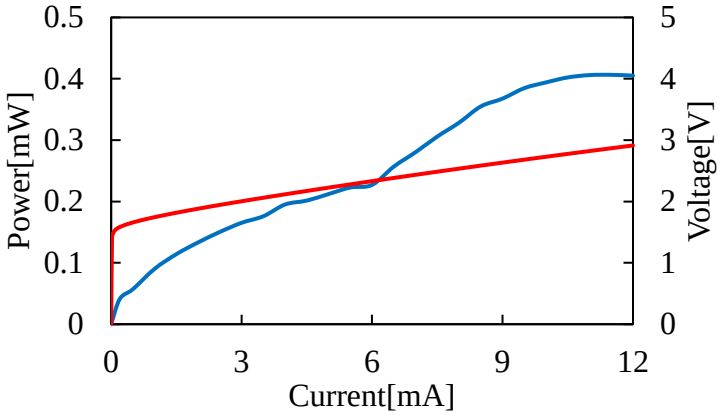
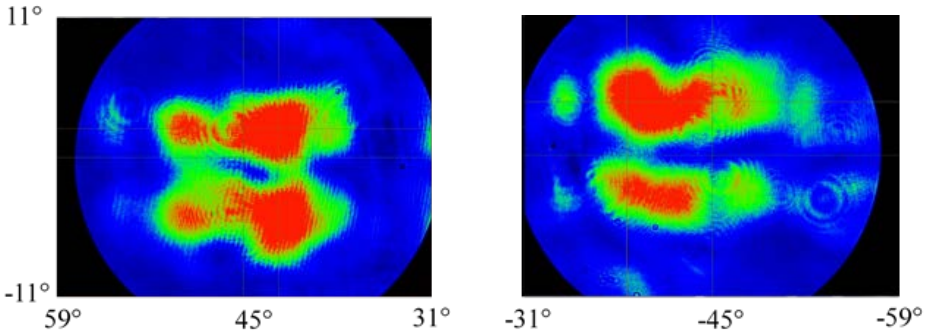


Fig.4-21 開口径 10μmHCG-VCSEL の I-L-V 特性(斜め放射も含む)

レーザの発振モードを確認するため近視野像/遠視野像の観察を行う．この系は HCG の反射率測定に用いたものと同じであり，視野角 28°，最大可動範囲 65°である．Fig.4-22 に遠視野像を示す．この時近視野像において HCG は y 方向に向いており，x 方向の電解は TM モード，y 方向は TE モードである．この結果から x 方向においては 45°付近で，y 方向については±3°を中心に 2 つのピークが見える．y 方向については-15°≦x≦15°において 60°付近まで強度はほぼ 0 であったため，0°中心の対称の 2 つのピークのみであると考えられる．この共振モードは 0°を対称に 2 つピークを持つため 1 次モードであると思われる．今回作製した HCG は a-Si 層の厚さが設計から 5nm 程度ずれており，計算上でも垂直ではなく幾ばくかの入射角を持ったところで反射率が極大値を持っており，それにより基本モードではなく 1 次モードが選択的に励振されているのではないかと考えられる．一方 x 方向については出射角が約 45°となっている．NFP を見るとアパチャー内に周期的にピークが生じている．この干渉により，45°という大きな角度でビームが放射していると考えられる．



(a) 45°付近の FFP　　(b) (a)の反対(-45°付近)の FFP

Fig.4-22 出射ビームの遠視野像

Fig.4-23(a)に 10μm 角，Fig.4-23(b)に 12.5μm 角の開口径を持った VCSEL の NFP を示す．これは 45°の角度を付けて観察しているため x 方向の距離は 1/√2 となっている．Fig.4-24，Fig.4-25 に y 軸断面の強

度を示す．レーザ領域において 4 つのピークが立っていることがわかる．ピーク間隔は 3.3μm である．垂直方向へビームの出射がないことから隣り合ったピークでは逆相になっていると考えられる．またビームの放射角は垂直からのビームの傾きを θ，ピーク間距離を Lp，出射媒質の屈折率 n，波長 λ とすると次の式により決定される．

$$\theta = sin^{-1}\frac{N\lambda_0}{2nL_p}$$

ここで N は，それぞれのピークが同相であるとき偶数，逆相であるときは奇数となる．波長 935nm，Lp=3.3μm，n=1，θ=45°である今回のデバイスでは N=5 となり隣り合ったピークが逆相であるという条件をみたすので，放射角が 45°となった原因は NFP において生じた電解分布の干渉によるものであると言える．

(a) 開口径 10μm　　(b) 同 12.5μm

Fig.4-23 レーザ発振時の NFP

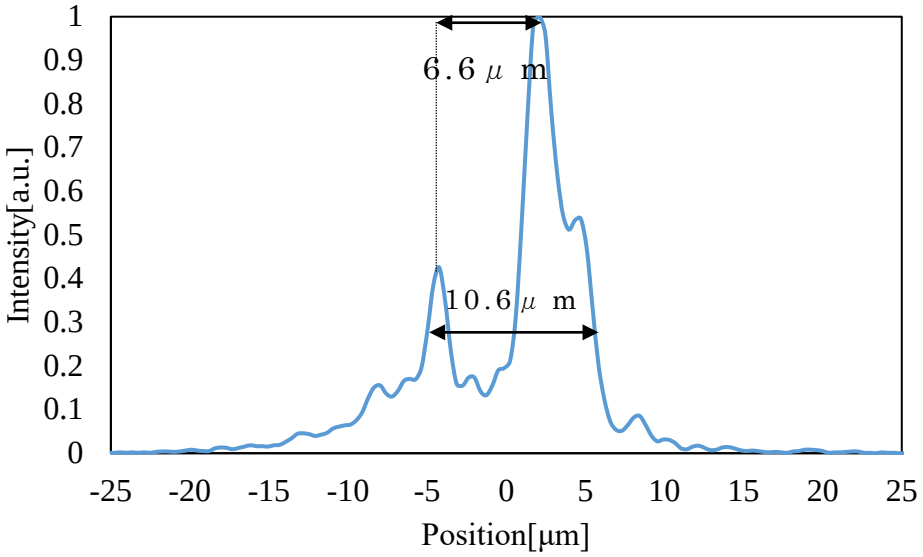


Fig.4-24 開口径 10μmVCSEL の NFP 強度場所依存性

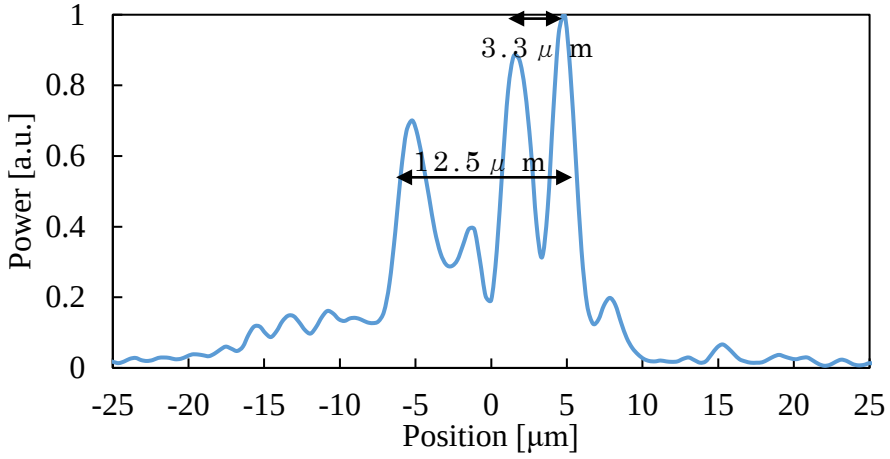
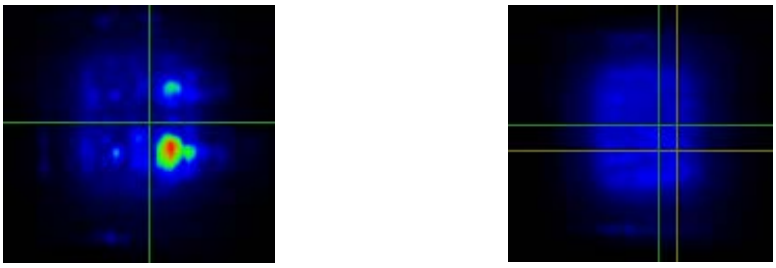


Fig.4-25 開口径 12.5μmVCSEL の NFP 強度場所依存性

また近視野像測定系に偏光板を挿入し偏光モードを確認した．Fig.4-26 に TM モードと TE モードの近視野像を示す．これによると発振しているモードは TE モードである．今回の HCG は垂直入射の TM モードに対して高い反射率を得られるよう設計しており，垂直入射の TE モードに対して反射率は低いはずである．そこで大きい入射角において TE モードに対する反射率が高くなるかどうか確認した．Fig.4-27 に TE モードに対する反射率角度依存性を示す．半導体側からの入射

に対する反射率とする．25°を超えるとほぼ 100%の反射率となっているが，これは半導体 SiO2 界面での全反射である．また 8°付近に高い反射率となる領域があり，大きい伝搬角をもつ TE モードが選択的に励振されていると考えられる．またこれにより NFP に定在波分布が生じ上記のように出射角が 45°となったと考えられる．



(a) TE モード　　(b) TM モード

Fig.4-26 レーザビームの偏光特性

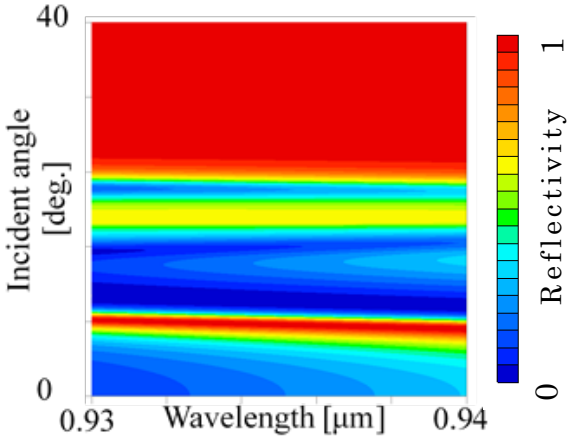


Fig.4-27 TE モードの反射率入射角度依存性

4.3 高屈折率差サブ波長格子を用いたマイクロマシン面発光レーザ

次に上部反射鏡をマイクロマシン構造とした HCG マイクロマシン面発光レーザの作製を行った．構造を Fig.4-28 に示す．本研究室ではすでに上部反射鏡が DBR のものでマイクロマシン面発光レーザを達成しており，同様のプロセスが適応できるため，HCG の材料を AlGaAs とし，その直下の GaAs 層をクエン酸によりエッチングすることでマ

イクロマシン構造の形成を行う．そのため，前節で用いたウェハと下部 DBR・活性層の構造は同じであるが，その上に電流拡散層・水蒸気酸化によりアルミナになり反射防止層として働く $Al_{0.99}GaAs$ 層・GaAs 犠牲層・HCG となる $Al_{0.65}GaAs$ が成膜されてるウェハを用いる．プロセスフローを Fig.4-29 に示す．

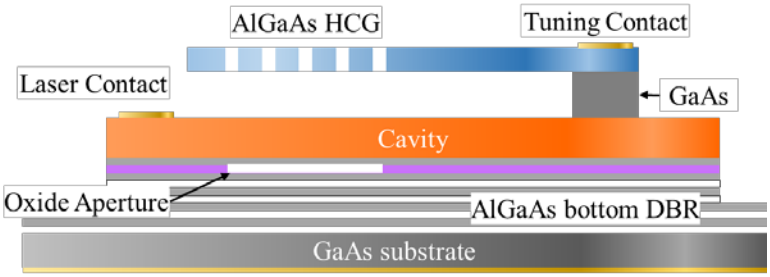
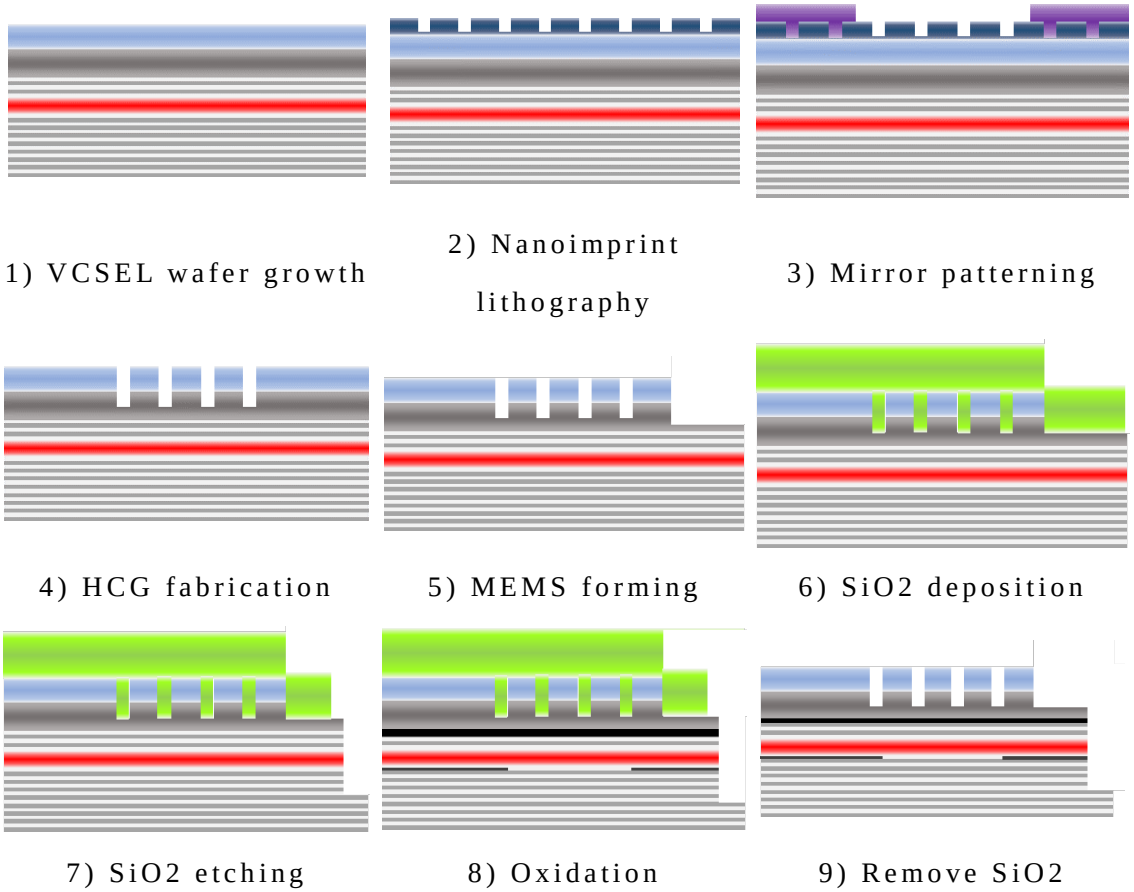
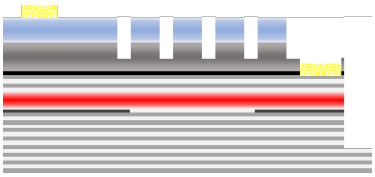
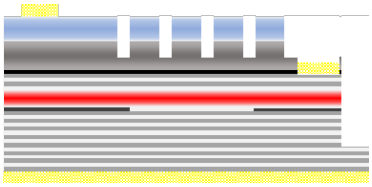


Fig. 4-28 HCG MEMS VCSEL のイメージ図

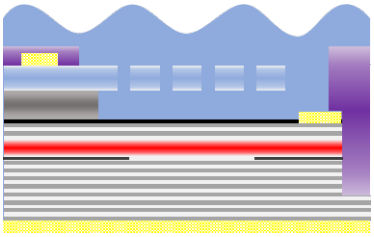




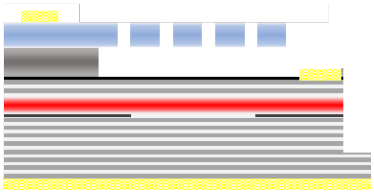
10) Tuning and contact electrode deposition



11) Back contact deposition



12) GaAs sacrificial layer selective etching



13) Critical point drying

Fig.4-29 HCG MEMS VCSEL の作製プロセスフロー

プロセスの基本的な部分は固定波長の HCG VCSEL と同じであるため詳細は省略する．固定波長 HCV VCSEL ではハーフ VCSEL の上にクラッド層の SiO_2 と HCG 層のアモルファス Si をプラズマ CVD で成膜していたが，今回はどちらも GaAs 系であり一括成長しているため，プラズマ CVD での成膜プロセスは不要である．一方マイクロマシン構造形成の為，クエン酸による GaAs の選択エッチングのプロセスと，超臨界乾燥プロセスが追加される．

・AlGaAs HCG 作製

HCG は同様にナノインプリントリソグラフィーを用いて作製した．パターン転写後，残膜処理後，ICP エッチング後の断面図 SEM 像を Fig.4-30 に示す．金型のパターンは，ナノインプリント後のレジスト形状は周期 450nm，格子幅 320nm，残膜処理後は周期 460nm，格子幅 310nm，ICP エッチング後の HCG 形状は周期 450nm，格子幅 320nm となった．固定波長の HCG VCSEL はクラッド層が SiO_2 であり，SiO_2 が

エッチングされてしまうと反射率が変化してしまうため，エッチングの深さを精密に制御する必要があったが，HCG MEMS VCSEL では HCG 直下の GaAs 層は最後にエッチングし，空気のクラッド層となるため，エッチングが一番上の AlGaAs 層を貫通しており，GaAs 犠牲層の中で止まっていれば問題ない．また HCG となる AlGaAs 層は同様にマイクロマシン構造となるため，前面に HCG を作製してはいけないため，ナノインプリント後に反射鏡となる部分のみ窓を開けたレジストのパターニングを行い ICP エッチングを行う．

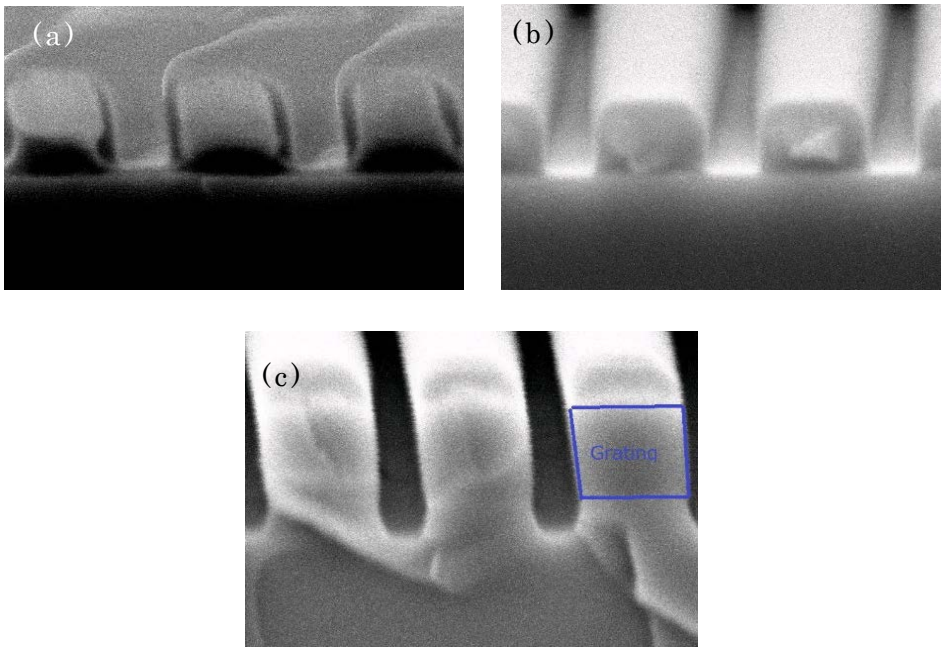


Fig.4-30 (a)ナノインプリント後と(b)残膜処理後のレジストと
(c)ICP エッチング後の HCG 断面 SEM 像

・HCG のプロテクト

HCG に AlGaAs を用いたことにより，Fig.4-29 に示した酸化プロセスにおいて AlGaAs の変色が確認された．Al 塑性の高くない AlGaAs ではほとんど酸化されないが，HCG は百 nm オーダーの構造であるため，わずかな酸化でも特性への影響が考えられる．そのため HCG を作製したあとに SiO_2 をスパッタリングして保護膜とすることを検討した．

まず HCG 作製直後に SiO_2 を全面に成膜し，必要な部分のみレジストで保護して BHF で SiO_2 を取り除く方法を行った．HCG 作製直後は部分的に HCG が形成されているだけの基板である．全面に SiO_2 をスパッタしたあとの顕微鏡写真を Fig.4-31 に示す．基板は HCG が部分的に形成されている以外は平らであるが，SiO_2 の内部には細かいクラックが入ってしまっている．クラックが入っているとその後の BHF による SiO_2 除去プロセスでアンダーカットが想定以上に入っていまい，保護されなくなってしまう．アンダーカットが許容できるのは HCG の外枠(2.5μm)のみであり，その後 ICP エッチングでマイクロマシン構造を形成するため SiO_2 はマイクロマシン構造より小さい必要がある．

Fig.4-31 全面 SiO_2 スパッタ後の基板表面とメサ形成後の顕微鏡写真

次にリフトオフにより SiO_2 成膜を試みた．電極の蒸着と同様にフォトレジストでパターンを形成したあと SiO_2 を成膜し，レジストを除去することで所定のパターンにのみ SiO_2 を残す．マイクロマシン構造を形成した後に成膜を行うため，AlGaAs 層を完全にプロテクトするためには 1μm 近く SiO_2 を成膜する必要がある．Fig.4-32，33，34 に GaAs 基板でマイクロマシン構造を形成したダミー基板に SiO_2 をスパッタした結果を示す．リフトオフプロセスでは SiO にクラックは入らず高品質の膜が形成されている．SiO_2 の膜厚は成膜時間にほぼ比例しており 180min のスパッタで 1.1μm 程度成膜できているため，AlGaAs を完全に保護することが可能である．

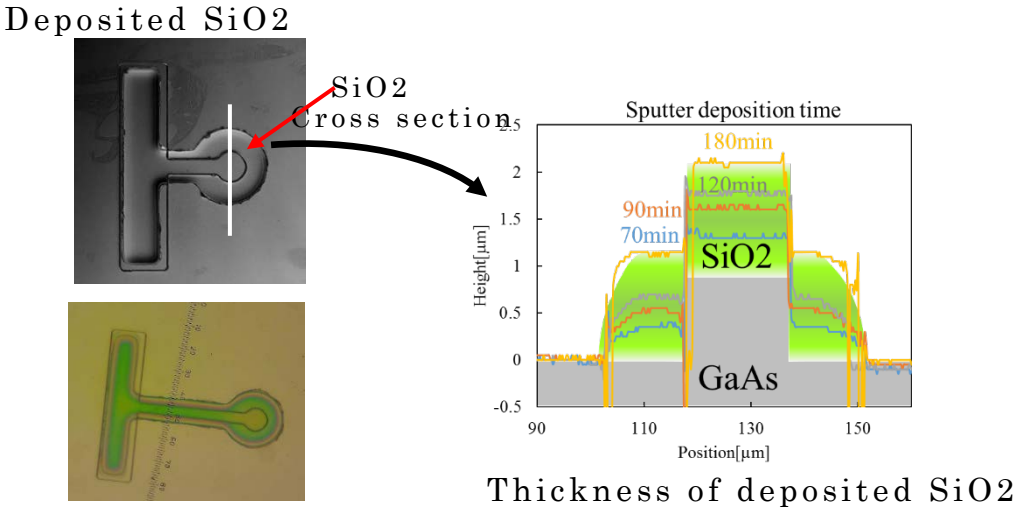


Fig.4-32 GaAs ダミー基板上の SiO_2 パターンと断面形状

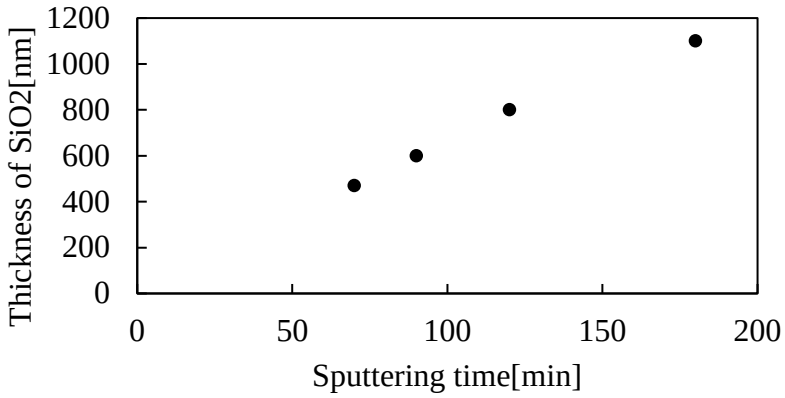


Fig.4-33 スパッタ時間に対する SiO_2 膜厚

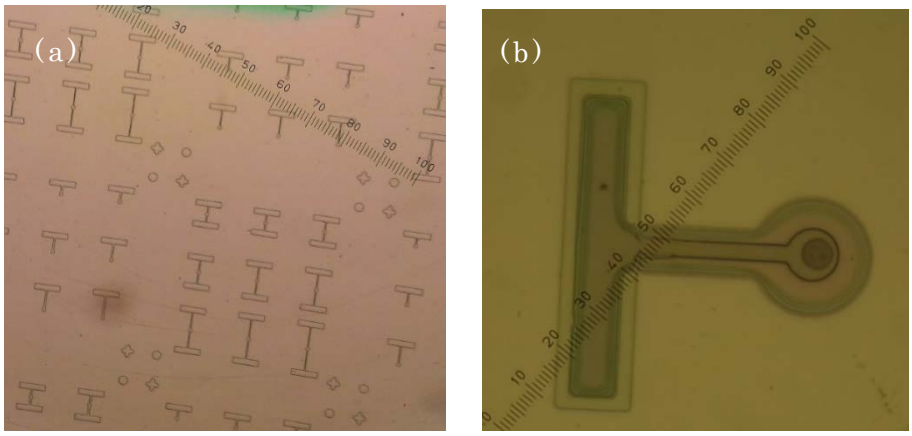


Fig.4-34 (a)SiO_2 スパッタ後と(b)リフトオフ後の顕微鏡写真

・GaAs 犠牲層エッチング

マイクロマシン構造を形成するため，また HCG のクラッド層として HCG 直下の共振器内に空気層を設ける必要がある．今回は，本研究室ですでに DBR を上部反射鏡として用いたマイクロマシン面発光レーザの作製プロセスとして実績があり，他の研究機関からも報告のある，クエン酸を用いた GaAs 層の選択エッチングを用いた．過酸化水素水を混合したクエン酸は pH や調製，温度を変化させることで，Al_xGaAs の Al 組成によりエッチングレートが変化する．AlGaAs のエッチングレートに関する報告はいくつかあるが，今回 HCG に用いた $Al_{0.65}GaAs$ と GaAs のエッチングレートを比較したものは報告はなく，Al 組成が最も大きなものでも $Al_{0.3}GaAs$ であったが，pH を 6.5 に調製したクエン酸では，GaAs と $Al_{0.15}GaAs$ のエッチングレート比は 100 程度あり，$Al_{0.65}GaAs$ とのエッチングレート比はさらに大きくなると予想できる．温度が低くなるとエッチングレート比は大きくなる傾向があるため室温でエッチングを行った．[7][8][9][10]

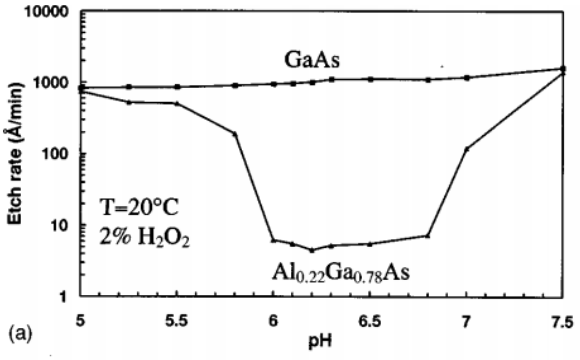


Fig.4-34 GaAs，$Al_{0.22}GaAs$ のクエン酸エッチングの pH 依存性[10]

・超臨界乾燥

GaAs の除去は先に述べた通りクエン酸によるウェットエッチングにより行う．クエン酸は純水でリンスを行うが，純水から取り出して乾燥させると，Fig.4-35 に示すように表面張力によりマイクロマシンが基板にくっついてしまうスティッキングが生じる．表面張力の小さい液体に置換することでスティッキングを起こりにくくすることは可能であるが，HCG より厚い構造である DBR を用いたマイクロマシン

面発光レーザでも少なからずスティッキングは生じていたため，表面張力の働かない超臨界乾燥を用いる．

超臨界乾燥は，超臨界状態を経由して液体を気化させ乾燥させる技術である．物質は Fig.4-36 に示すように臨界点と呼ばれる温度・圧力を超えると超臨界流体となる．超臨界状態から圧力を下げ，臨界点の圧力を下回った状態から温度を下げると流体が気化し，取り除くことが可能である．超臨界乾燥には CO_2 が広く用いられているが，本研究室では AGC chemicals のアサヒクリン AE-3000 (HFE-347pc-f : 1,1,2,2-テトラフルオロエチル-2,2,2-トリフルオロエチルエーテル)を用いている．また超臨界乾燥装置としては，Fig.4-37 に示す NTT-AT 社製の小型超臨界乾燥装置 PCS-4SC を用いた．

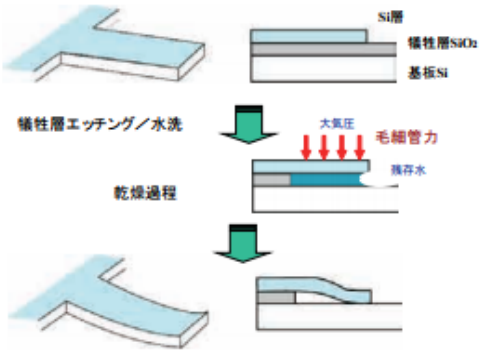


Fig.4-35 片持ち梁のスティッキングイメージ[11]

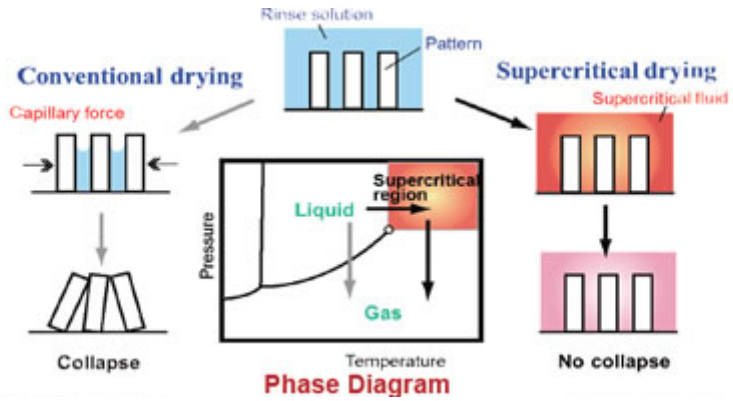


Fig.4-36 超臨界乾燥の原理[7]

Fig.4-37 小型超臨界乾燥装置 PCS-4SC[7]

作製したデバイスの顕微鏡写真を Fig.4-38 に示す．マイクロマシンは片持ち梁のものと両もち張りのものを作製したが，梁の長さが 80μm と 200μm の両もち張りのデバイスで発振が得られたが．片持ち梁のデバイスでは得られなかった．片持ち梁のものでは GaAs と AlGaAs の格子ひずみにより大きく上方へ梁が反ってしまっていたため，発振が得られなかったと考えている．Fig.4-39 には HCG 部分を上方から見た SEM 画像を示す．ナノインプリントに用いた金型の設計地とよく一致している．

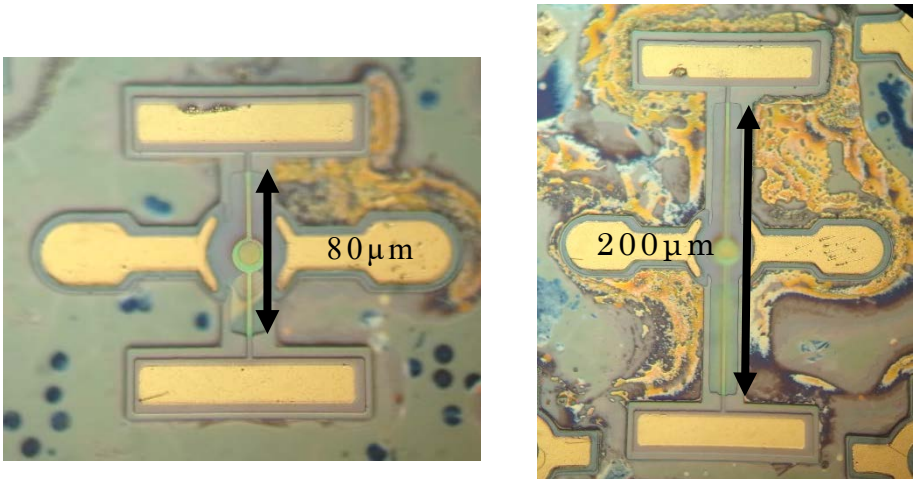


Fig.4-38 作製したデバイスの顕微鏡写真

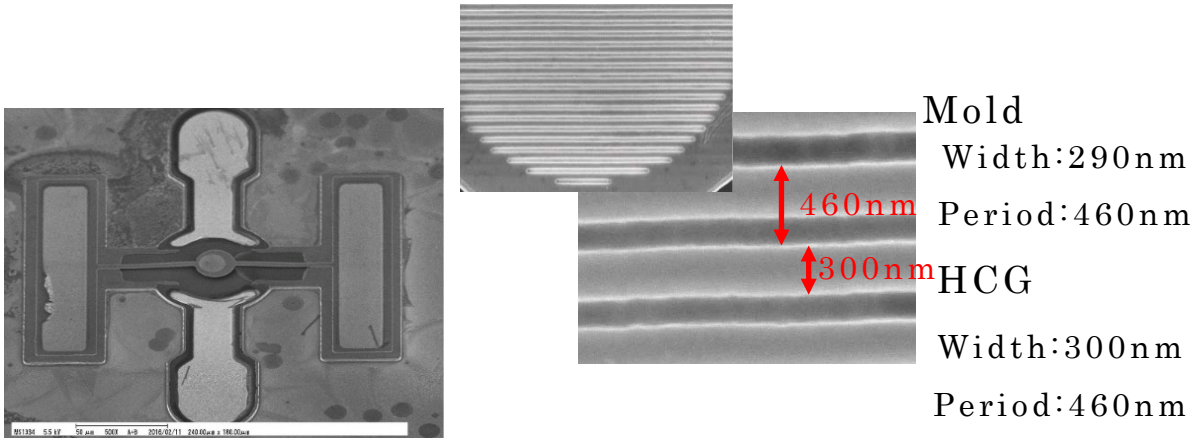


Fig.4-39 作製したデバイスの HCG 部分の SEM 画像

発振したデバイスで測定した I-L-V 特性とスペクトルを Fig.4-40, 41 に示す．酸化アパチャーのサイズは約 5μm 角であり，そのため閾値電流は大きめとなった．出力は最大で 0.7mW が得られた．上部反射鏡はマイクロマシン構造であり空気層があるため，散乱が増え，閾値電流の上昇と出力の低下を引き起こしたと考えられる．アパチャーサイズは 5μm 角と，一般的な DBR VCSEL ではマルチモード動作となるアパチャーサイズであるが,本デバイスでは単一モード発振が得られた．これは HCG の角度依存性の効果であると推測する．また梁の長さによって発振波長が違っていたが，これは反射鏡の変位の違いである．Fig.4-42 にはレーザ顕微鏡で測定した反射鏡の初期変位を示す．梁の長さが 80μm のものは HCG 部分が 2μm 弱上方へ変位しているが，200μm のものでは 4μm 以上変位しており，共振器長が 2.4μm 違うことになる．そのため共振波長が変化し，発振波長のずれとなっている．このことから，マイクロマシンに電圧を印加してミラーを変位させれば，波長掃引ができるといえる．

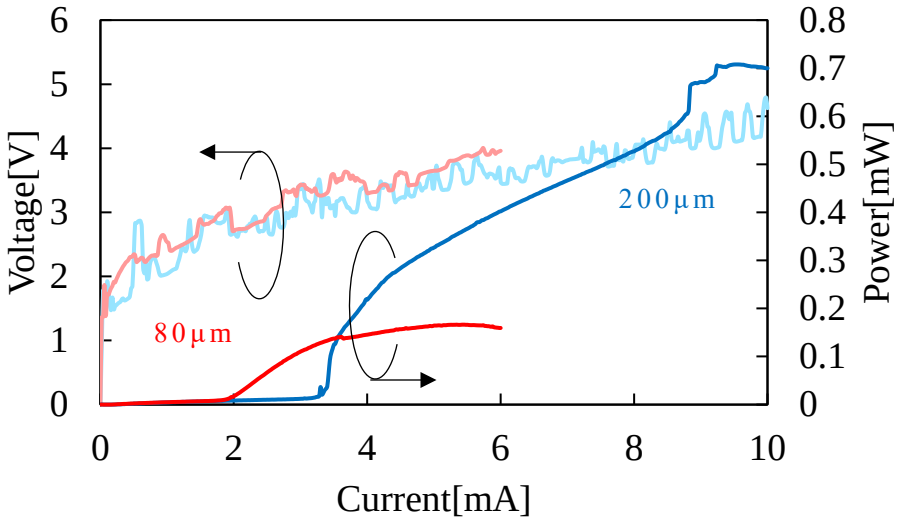


Fig.4-40 長さが異なる両持ち梁のデバイスの I-L-V 特性

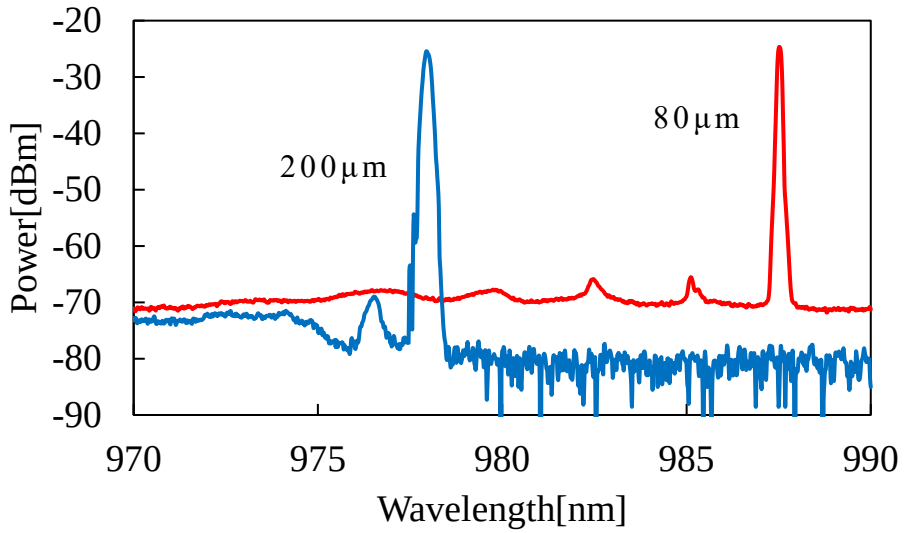


Fig.4-41 長さが異なる両持ち梁のデバイスの発振スペクトル

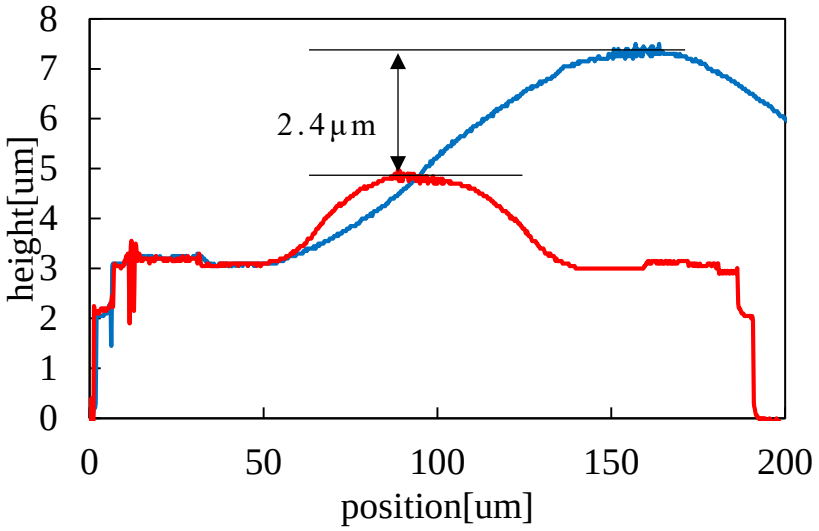


Fig.4-42 両持ち梁の変位量

一方で Fig.4-43 には同程度の酸化開口径を持つ DBR MEMS VCSEL の発振波長を示す．こちらのデバイスではマルチモード発振となっており，HCG の反射率角度依存性により単一モード動作が得られていると考えられる．

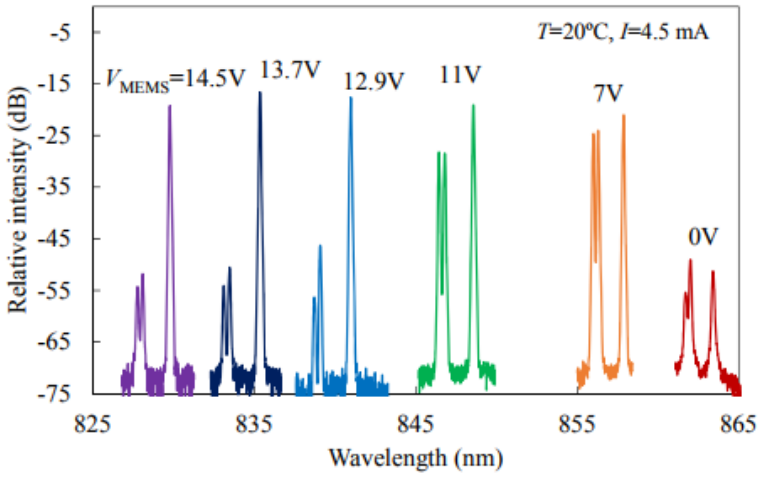


Fig. 4-43 5μm アパチャの DBR MEMS VCSEL の発振スペクトル[12]

また HCG 層の上には $Al_{0.3}GaAs$ の層が 20nm 成膜されており，第 3 章で示した通り温度無依存化ができる構造となっている．そのため発振波長の温度係数を測定した．ペルチェ素子を用いてデバイスを加熱し温度による発振波長の変化を測定した．Fig.4-44 にスペクトルを示す．

一般に半導体は温度が上昇すると屈折率が大きくなる．そのため実効的な共振器長が長くなるので発振波長は長波側へシフトする．しかしながら測定では温度上昇に対して波長が短波側へシフトしており，これは上部反射鏡が短共振器側へ変位していることを意味している．屈折率変化による波長のシフトは一般に 0.07nm/K と知られており，波長がブルーシフトしているということはその補正を超える反射鏡の変位が波長の変化が起きて言うということである．熱によるレッドシフトの分も考慮すると，実行共振器長 L_{eff} が 7λ と仮定すると反射鏡の変位量は-1.3nm/K となる．温度係数は梁の長さを変えることで制御することが可能であるため，構造を最適化することでさらに温度係数を小さくすることができると考えている．

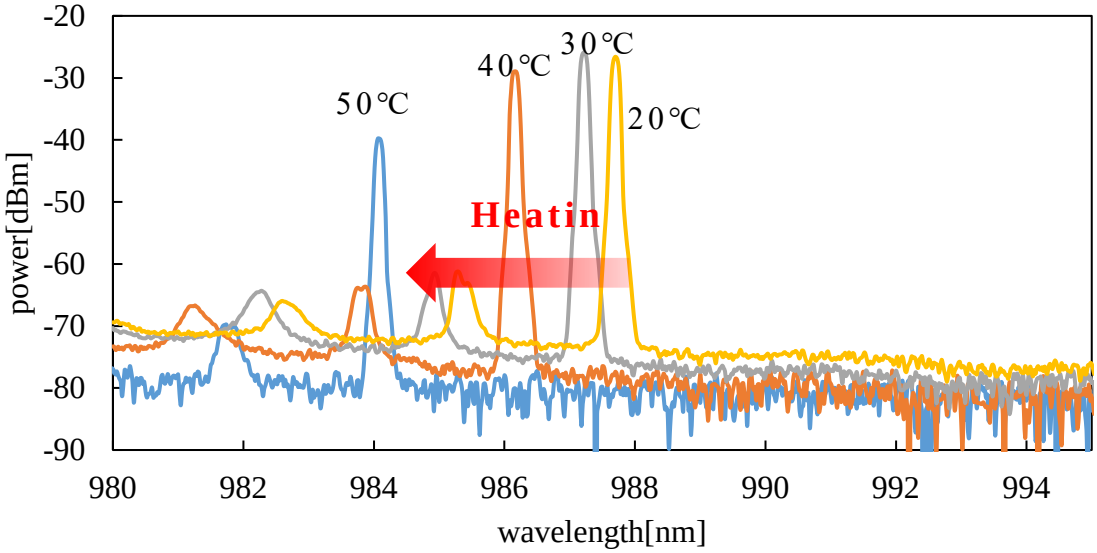


Fig.4-44 ペルチェの温度に対する発振スペクトル

4.4 まとめ

ナノインプリントリソグラフィーを用いて HCG VCSEL の作製を行った．金型をレジストに押しあててパターンを転写するナノインプリントは，一度に大面積へパターニングすることが可能であり，電子ビームリソグラフィーと比べてプロセス時間・コスト性に優れており，量産化に適している．

まずは HCG の製作評価を行った．ナノインプリントのレジストは金型の溝に過不足なく満たす厚さが理想であり，薄すぎると格子に欠陥が生じ，厚すぎると残膜処理のために形状が崩れる原因となる．転写した後のレジストは金型の形状をよく反映しており，ICP エッチングにより，レジスト形状に近い HCG を作製することができた．壁面も約 85°と高い垂直性が得られた．Si ウェハ上に作製した HCG で行った反射率の測定では，計算による反射率に近い特性が得られ，HCG の構造による角度依存性の変化も確認することができた．

ナノインプリントを用いて作製した HCG を用いた VCSEL を製作しレーザ発振が得られた．DC=64%である HCG を用いた VCSEL では，酸化狭窄アパチャーが直径 5μm 程度でも単一横モード発振が得られた．角度依存性を持たない DBR を用いた場合には，同程度の VCSEL ではマルチモード発振となるため，HCG の角度依存性によりモード制御が達成できたといえる．一方，HCG 作製の際に格子幅が減少してしまい，角度依存性が最も強い設計からずれてしまったことにより，10μm 程度のアパチャーのデバイスではマルチモード動作となってしまった．また DC=78%に対応する金型を用いて作製した HCG は，DC=69%となり，計算通り DC=64%のものより角度依存性が強いことが確かめられた．また，酸化狭窄アパチャーが 10μm 角でも単一モード動作が得られ，DC=64%のものより横モード制御を増強することができた．

波長可変の HCG VCSEL を実現するため，AlGaAs の HCG 層をマイクロマシン構造としたマイクロマシン HCG VCSEL の製作を行った．ナノインプリントのレジストをパターン転写に支障がない程度に薄くしたため，残膜処理のアッシングが短時間で済んだため，金型とほぼ同じ設計の HCG を作製することができた．作製したデバイスでは両もち張り構造のマイクロマシンを持つレーザで発振が得られ，0.7mW の最大出力が得られた．酸化狭窄アパチャーは 5μm 角程度であったが，HCG のモード選択性により単一モード発振が得られた．梁の長さの異なるデバイスとの比較では，上部反射鏡の初期変位が異なることから発振波長が変わることが確かめられた．

またマイクロマシン上に熱膨張係数が HCG の材料である $Al_{0.65}GaAs$ より大きな $Al_{0.3}GaAs$ が成膜されているため，熱バイモルフ効果を検証するため発振波長の温度特性を調べた．通常温度が上昇すると屈折率が大きくなることから発振波長は長波長側へシフトする．ペルチェ素子を用いて作製したデバイスを加熱していくと，通常とは異なる短波長側への波長シフトが観測された．これにより温度上昇で上部反射鏡が共振器側へ変位していることが確かめられた．一方短波側への波長シフトが発生するということは，屈折率上昇を打ち消す以上の反射鏡の変位が起きていることを意味し，波長制御機構を持たない半導体レーザの波長シフト 0.07nm/K を加味し，このデバイスの実行共振器長 $L_{eff}=7\lambda$ と仮定すると，反射鏡の変位は-1.3nm/K となる．温度無依存化となる反射鏡変位量の温度係数は-0.5nm/K であり，測定したデバイスでは変位量が大きすぎるため，梁の長さを短くする等により温度係数をさらに 0 に近づけられると考えている．

以上本章ではナノインプリントリソグラフィーを用いることで，大口径 VCSEL で横モード制御が可能であることを実験的に示した．また HCG MEMS VCSEL で発振波長温度無依存化の実現の可能性を示した．

参考文献

[1] G. Vandenberghe, Y. C. Kim, C. Delvaux, K. Lucas, S. J. Choi, M. Ercken, K. Ronse, and B. Vleeming, “ArF Lithography Options for 100nm Technologies,” Proceedings of SPIE, Vol. 4346, 2001.

[2] M. C. Y. Huang, Y. Zhou, and C. J. Chang-Hasnain, “A surface-emitting laser incorporating a high-index-contrast subwavelength grating,” Nat. Photonics, Vol. 1, no. 2, pp. 119–122, Feb. 2007.

[3] 橋爪佑樹氏，修士論文

[4] L. J. Guo, “Nanoimprint Lithography: Methods and Material Requirements,” Adv. Mater., Vol. 19, pp. 495-513, 2007

[5] ダイキン工業株式会社 オプツール DSX, http://www.daikin.co.jp/chm/products/optool/dsx.html

[6] AGC 旭硝子 感光性 AL Polymer http://www.agc.com/products/semiconductor/dielectric.html

[7] H. J. Lee, M. S. Tse, K. Radhakrishnan, K. Prasad, J. Weng, S. F. Yoon, and Y. C. Leong, “Selective wet etching of a GaAs$Al_xGa_{1-x}As$ heterostructure with citric acid-hydrogen peroxide solutions for pseudomorphic GaAs/$Al_xGa_{1-x}As$/$In_yGa_{1-y}As$ heterojunction field effect transister fabrication,” Materials Science and Engineering: B, Vol. 35, no. 1-3, pp. 230-233, Dec. 1995.

[8] 北野俊明，和泉茂一，生和義人，高野博三，”クエン酸系エッチャントによる GaAs/AlGaAs ヘテロ構造の高選択エッチング,” 電子情報通信学会技術研究報告. ED, 電子デバイス, Vol. 93, no. 285, pp. 23-28, Oct. 1993.

[9] Y. Uenishi, H. Tanaka, and H. Ukita, “Characterization of AlGaAs microstructure fabricated by AlGaAs/GaAs micromachining,” IEEE transactions on electron devices, Vol. 41, no. 10, pp. 1778-1783, Oct. 1994.

[10] X. Hue, B. Boudart, and Y. Crosnier, “Gate recessing optimization of GaAs/$Al_{0.22}Ga_{0.78}As$ heterojunction field effect transistor using citric acid/hydrogen peroxide/ammonium hydroxide for power applications,” Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, Vol. 16, no. 5, pp. 2675-2679, Jul. 1998.

[11] NTT-AT，小型超臨界乾燥装置 PCS-4SC http://keytech.ntt-at.co.jp/equipment/prd_0020.html

[12] M. Nakahama, T. Sakaguchi, A. Matustani, and F. Koyama, “Athermal and widely tunable VCSEL with bimorph micromachined mirror,” Optics Express, Vol. 22, no. 18, pp. 21471-21479, Aug. 2014.

第五章　マイクロマシン面発光レーザの波長スイッチングの高速化

5.1 マイクロマシンのリンギング

波長可変光源を用いるアプリケーションにおいては，その波長スイッチング速度の高速化も求められている．たとえは次世代アクセスネットワーク規格である NG-PON2 では，10μs 以下の波長スイッチングが要求されており，また OCT などのセンシング用途においては波長掃引速度がフレームレートにダイレクトに影響し，測定時間の律速要因となる．波長の切替信号はステップ関数を印可することが慣用である．しかしながらマクロマシン面発光レーザの波長切替機構である片持ち梁は，弾性特性を持っており，簡便なステップ関数印可では片持ち梁がオーバーシュートをおこし，リンギングが生じてしまう．リンギングは梁の共振周波数でおこる振動であるが，このリンギングは梁の空気抵抗等により減衰していくものの，梁の共振に対しリンギングの減衰は数十倍といった時間がかかってしまう．Fig.5-1 にはマイクロマシン面発光レーザではないが，同様の片持ち梁マイクロマシン構造を有する波長可変フィルタの時間応答を示す．Fig.5-1 ではフィルタに照射したレーザ光の反射率を測定することにより，梁の動きを観測している．この測定ではリンギングが収まるために 100μs 以上の時間を要しており，スイッチングの高速化の妨げとなっている．

ステップ電圧を印加してスイッチングを行う際には，リンギングは目的とするスイッチング位置(電圧と釣り合う位置)を中心に振動する．つまりスイッチング位置には到達しているため，リンギングを抑制できればさらなる高速化が期待できる．機械的な梁構造では駆動速度は共振周波数に制限される．第一章で紹介したように，マイクロマシン面発光レーザには，バイモルフ構造を用いた熱駆動と電圧印加による駆動方式との，2 種類の駆動方式があるが，熱駆動方式では 100kHz を

超えるような高速な応答は期待できないため，リンギングの影響は生じない．そのため，ここでは静電引力応答でのリンギング抑制を検討していく．

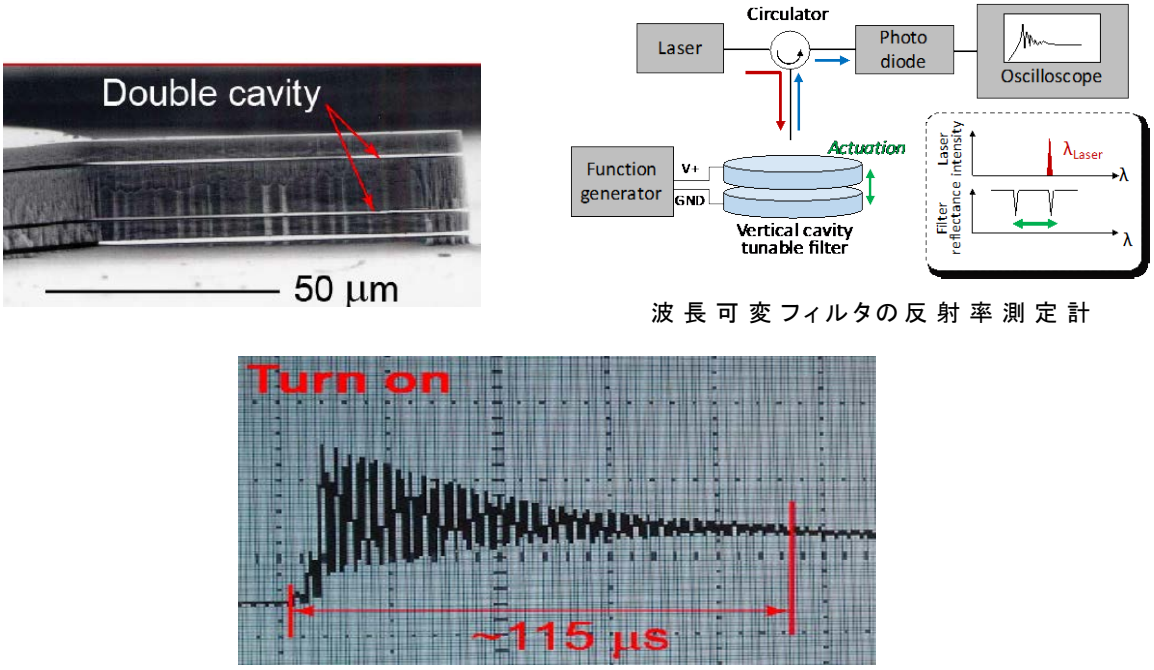


Fig.5-1 マイクロマシン型波長可変フィルタのリンギング[3]

リンギング抑制の理論についてはすでに報告がされている[1][2]．Fig.5-2 に報告されているマイクロマシンの挙動解析の結果を示す．ここでは計算の簡単化の為にマイクロマシンにかかる力をマイクロマシンの位置によらず一定として考えているが，終状態での釣り合う力の 0.58 倍の力を共振周期の半分の時間印可することでリンギングのないスイッチングを達成している．この印可した 2 ステップの力の波形をフーリエ変換して周波数空間に変換すると Fig.5-3 に示すようなマイクロマシンの共振周波数成分を全く持たない形となる．共振成分を持たないことからリンギングを抑制できていると言える．また同論文では 2 ステップだけではなくオーバードライブの提案も行っており，より短時間でのスイッチングを予想している．オーバードライブはごく短時間(2 ステップの場合の中間電圧の保持時間より短い時間)の間だけ大きな力を印可し，その後印可する力を 0 とし，マイクロマシンが

目標位置に到達したときに保持電圧を印加する方法である．オーバードライブでは，常にスイッチング速度が共振周波数の 2 倍である 2 ステップスイッチングと違い，マイクロマシンの初期状態と終状態，さらに印可できる電圧により変わってくるがされるが，Fig.5-4 に示すように 2 ステップの場合よりさらに 2 倍程度スイッチング速度の向上が期待できる．同論文中では実際のデバイスにおいて，2 ステップによるリンギングの抑制は実証しているが，マイクロマシンレーザの波長制御には応用されておらず，またオーバードライブによるスイッチングの高速化は実証されていない．

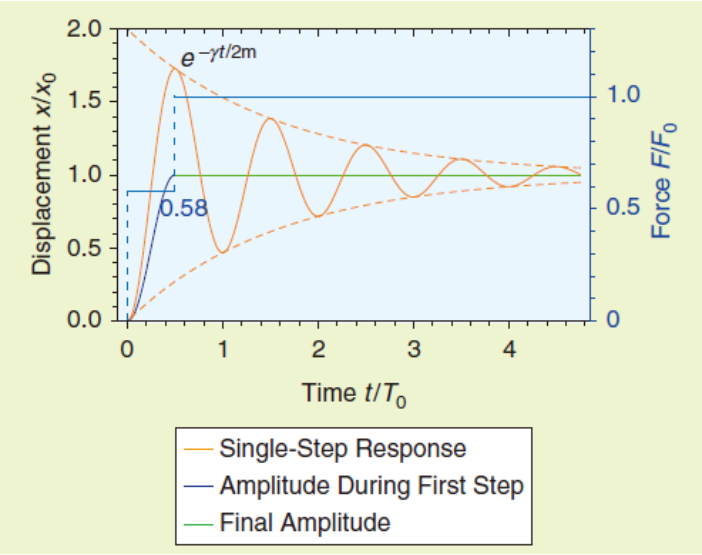


Fig.5-2 ステップ波形によるリンギング抑制

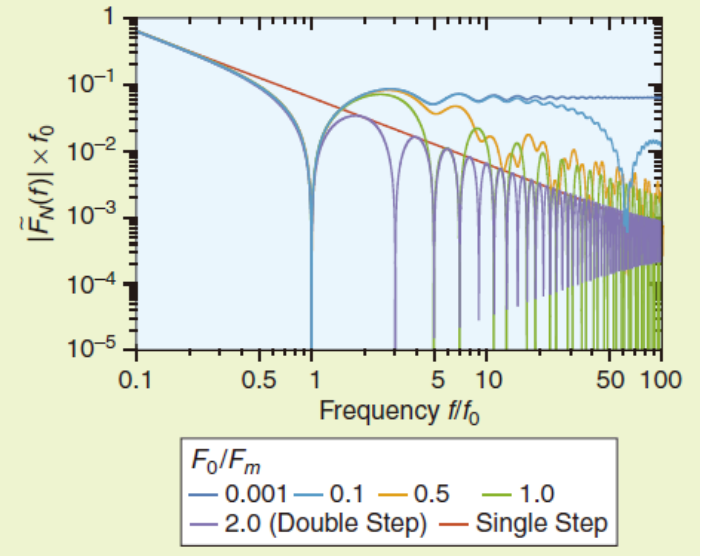


Fig.5-3 それぞれの印加波形の周波数成分

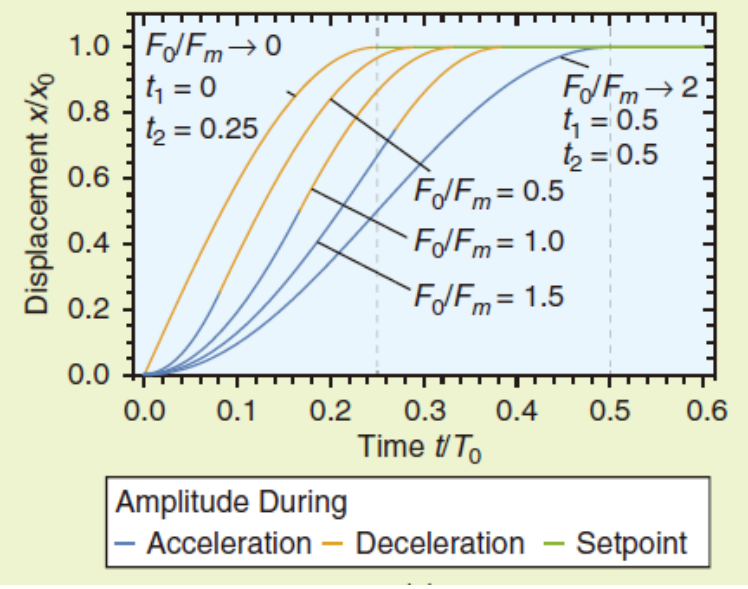


Fig.5-4 オーバードライブによるリンギングフリー動作の計算

5.2 リンギング抑制の原理

まず計算によりリンギング抑制を検討していく．念頭に置いているデバイス構造は第 4 章の Fig.4-28 に示したとおり，上部反射鏡が片持ち梁となっており，レーザコンタクトと上部反射鏡上にあるチューニングコンタクト間に電圧を印加して梁の駆動を行う．そのため，梁にかかる力は基板側への引力のみであり，最も力が弱い状態は印加電圧 0V である．

さて，リンギングの発生する原因はオーバーシュートである．片持ち梁と基板間に電圧を印加することにより生じる静電引力は，片持ち梁と基板間のエアギャップの厚さに依存するため，たとえ印加電圧が一定であっても変位し続けている片持ち梁にとっては一定とはならない．そのため厳密には正確ではないが，一定電圧が印加されている片持ち梁に釣り合いのとれない位置で初期状態を与えると，空気抵抗がなければほぼ正弦波状の変位を繰り返す．また空気抵抗を考慮すると同じ周波数の減衰する正弦波となる．このときの周波数はバネ定数と質量から求められる固有振動数となる．

一方正弦波で振動しているということは変位の極大値・極小値に於いては一瞬片持ち梁が停止していることを意味する．リンギングが生じないということは，言い換えれば初期状態とスイッチング後の終状態で片持ち梁が停止している，つまり運動量を持たないと言うことである．そのため極大値・極小値での変位速度が 0 となる点をうまく用いればリンギングを抑制できると考えられる．

そこで印加電圧波形を矩形から 2 ステップに変えることでリンギングの抑制を検討する．先ほども述べたとおり一定の電圧を印加すると，空気抵抗を無視すると二点間をほぼ正弦波状に振動する．この二点がスイッチング前とスイッチング後の波長に一致する電圧を求め，この電圧を，運動量を持たない片持ち梁に印可するとオーバーシュートがちょうどスイッチング先の波長が発振波長となる位置まで片持ち梁が移動したときに再度運動量が 0 となる．運動量が 0 となった瞬間にその点で釣り合う電圧を印加すると片持ち梁は振動することなく，スイッチングを完了することができる．2 ステップ電圧印加のスイッチングでは，一定電圧を印加して極小値から極大値まで変位する時間がスイッチング時間となるため，共振周波数のちょうど 2 倍のスイッチング速度となる．このスイッチングのイメージを Fig.5-5 に示す．

さてエネルギーの変化から中間電圧の見積りを行う．先ほど述べたとおりスイッチング時間は片持ち梁の構造ですでに決まってしまうため，既知である．始状態と終状態ではリンギングを生じていない，つまり運動エネルギーを持っていないと仮定すると，スイッチングの前後で変化するエネルギーはバネによるポテンシャルエネルギーと静電引力による静電ポテンシャルである．また空気抵抗による損失が発生するため，静電ポテンシャルの変化量とバネポテンシャルの変化量の差分が空気抵抗による損失に等しくなる．

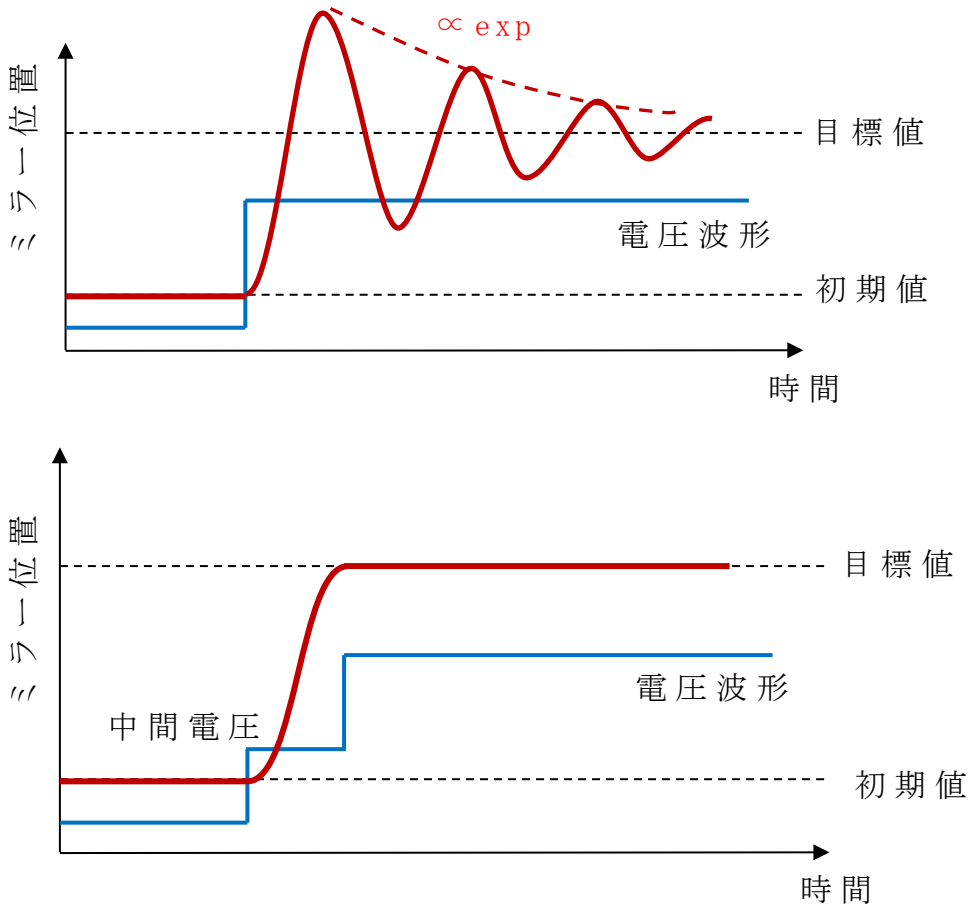


Fig.5-5 印加電圧波形の違いによる片持ち梁の応答のイメージ

5.3 リンギング抑制のシミュレーション

片持ち梁の挙動を計算するにあたって，まずデバイスの計算モデルを作る．片持ち梁のマイクロマシンに加わる力は主に 3 つである．1 つ目はレーザコンタクトとチューニングコンタクト間に印可する電圧による静電引力，2 つめが，片持ち梁が元に戻ろうとする弾性力，そして 3 つめが片持ち梁が動いたときに受ける空気抵抗である．この中でデバイスに対して任意に制御出来るのは印加電圧のみである．弾性力はマイクロマシンの形状や材料により，また空気抵抗はマイクロマシンの形状により変化させることは可能であるが，完成したデバイスでは固有の値である．

さてこれを計算モデルとして考える．一般にカンチレバー等のマイクロマシンの挙動は Fig.5-6 に示すような SDOF モデル(Single Degree of Freedom Model)によってかなり正確に表せことが知られている．バネで吊された質量 m の平板を片持ち梁とし，印加電圧が無いときの位置を変位量の基準とする．平行平板間に電圧が印加されるとバネで吊された平板が引きつけられ下方に変位する．このときに平板に移動速度に応じた空気抵抗が生じると考える．実際には片持ち梁は平行に変位しないため，電圧による静電引力は梁の位置により不均一となるが，ここでは簡便のため，測定値と照らし合わせて修正を行う．簡単なモデルを用いることで，ここではバネ定数 K，平行平板の実効容量 C，空気抵抗の係数 c を決定すれば片持ち梁の応答を計算することは可能である．

まずデバイス構造から各パラメータを推測していく．片持ち梁のダンピング係数は式(5-1)，ばね定数は式(5-2)，Q 値は式(5-3)であらわされる．実際のデバイスでは，先端の反射鏡部分は円形となっており，梁部分より太くなっているが，簡単のためここではまず長方形の平板として考える．また，上部反射鏡は AlGaAs の組成の違う多層膜であるが，一様な材質として扱う．この式に於いて L は梁の長さ(GaAs 犠牲層を取り除いた部分)，w は梁の幅，t は梁の厚さ，E はヤング率，a は梁の密度，g_0 は初期エアギャップである．

$$c = \frac{2\mu Lw}{H} \text{ ; Effective Damping Coefficient} \qquad (5\text{-}1)$$

$$k = \frac{Ewt^3}{4L^3} \text{ ; Effective Spring Constant} \qquad (5\text{-}2)$$

$$Q = \frac{\sqrt{km}}{c} \propto L^{-2} \text{ ; Q-factor} \qquad (5\text{-}3)$$

より実デバイスでの挙動を再現するために，デバイスの測定値から各パラメータを算出していく．

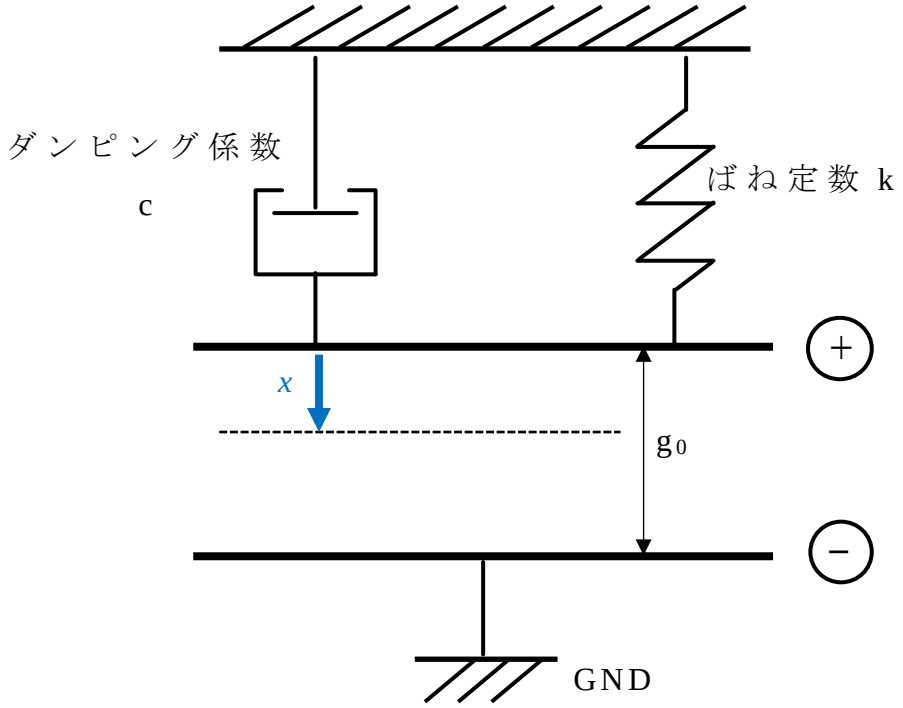


Fig.5-6 SDOF モデル

まず静特性から測定していく．マイクロマシンに電圧を印加すると反射鏡が短共振器側へ変位するため波長が短波へ移動していく．レーザの発振波長は共振器長に依存し,モードホップが生じなければ,反射鏡が連続的に変位している限り，発振波長も連続的にシフトしていく．共振器長には多層膜反射鏡での染み出し長も含まれるため，染み出し長は厳密には波長によって変化するため反射鏡の移動量 x に対して発振波長のシフト量 Δλ は一定ではないが，本実験で用いた DBR MEMS VCSEL では，波長のシフト量は，反射鏡の変位量の約 1/10 である．一方 Fig.5-7 には実際に測定したデバイスの電圧-発振波長特性を示す．この実験値から初期発振波長と初期エアギャップを変えることにより，フィッティングを行うと静電容量とばね定数の関係を求めることができる．

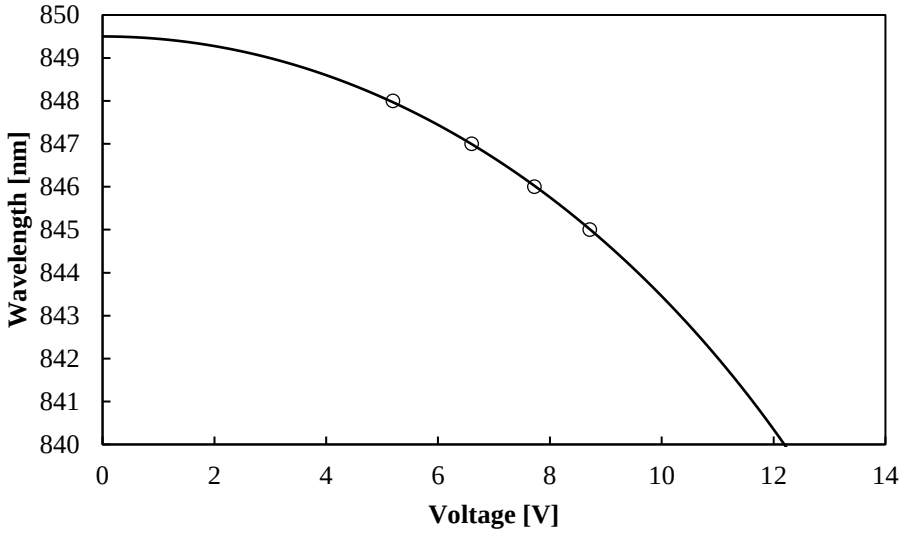


Fig.5-7 印加電圧に対する発振波長

次にバネ定数の推定を行う．マイクロマシン面発光レーザに於いて，上部反射鏡をマイクロマシン構造にするために，直下の GaAs 層をクエン酸によりエッチングを行うが，アンダーカットが入ってしまうため，梁の長さの精密な制御・見積もりは困難である．そのためバネ定数 K は計算値から大きくずれてしまうため，実験値と比較する．片持ち梁に電圧一定の正弦波電圧を印加すると波長によって振れ幅が変化する．周波数が低いうちは静特性と整合する幅で発振波長はシフトするが，周波数が高くなっていくと振れ幅が広くなっていき，ピークを迎えた後減少していく．振れ幅がピークとなったときが梁の共振周波数である．Fig.5-8 に片持ち梁の長さ 80μm のデバイスで測定した周波数特性を示す．このデバイスでは共振周波数は 200kHz となった．
またこの実験結果から空気抵抗も推定できる．周波数応答は式(5-4)で表されるため，実験結果とフィッティングをすると空気抵抗のダンピング定数 c を求めることができる．これらの結果から各パラメータは次のように求められる．

$$\mathrm{D}(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\left(1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + \left(\frac{c}{\sqrt{k\cdot m}}\cdot\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \qquad (5-4)$$

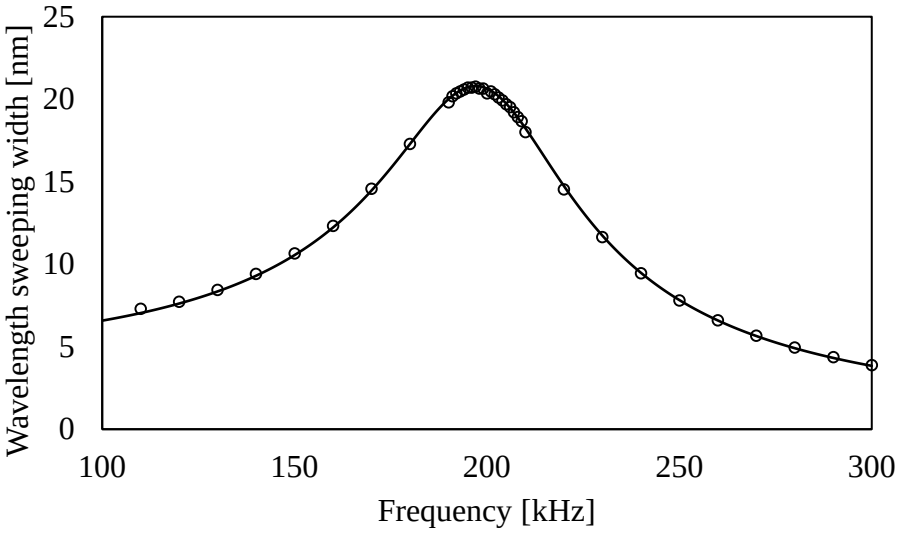


Fig.5-8 波長掃引幅の周波数応答

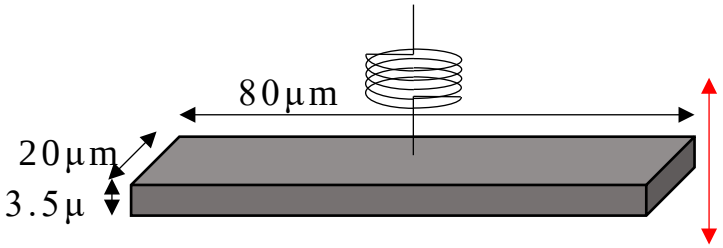


Fig.5-9 空気抵抗計算用のカンチレバーモデル

ダンピングにおける空気抵抗の寄与を見積もった．実際のカンチレバーは幅 10μm で先端に直径 20μm の円形が付いているが，簡単のため Fig.5-9 に示すように幅 20μm の平板全体が動くと仮定する．この場合実際の空気抵抗より大きな値が得られることになる．空気抵抗は次の式で表される．

$$D = \frac{1}{2}\rho V^2 S C_D \qquad (5-5)$$

ここで ρ =1.2kg/m^3 は空気の密度，V は速度，S=20μm×80μm は移動方向垂直の面積，C_D は抗力係数でここでは 2 とする．これを振幅

50nm，振動中の振幅変動無しで 1 周期分振動したと仮定するとその間に受ける空気抵抗によるエネルギーは，

$$\int Ddx \approx 2\times10^{-18}[\mathrm{N\cdot m}] \qquad (5-6)$$

となる．

一方片持ち梁のバネ定数は，ヤング率 E=84GPa，梁の幅 b=10μm，梁の厚さ h=3.5μm，梁の長さ l=80μm とすると

$$\mathrm{k}=\frac{\mathrm{Ebh}^3}{4l^3}\approx 10[\mathrm{N/m}] \qquad (5-7)$$

これを 50nm 振った際のバネポテンシャルは約 1.2×10^{-14}Nm となる．

時間平均スペクトルから，1 周期の振動が起きると振幅は半分程度になることがわかっているため，空気抵抗を大きく，かつバネポテンシャルを小さく見積もっても，空気抵抗による損失は 0.02%程度であり，空気抵抗の影響はかなり少なく，摩擦が支配的と考えられる．一方，エアギャップは 1μm 程度であるが，先端の円形は直径 20μm 程度あり，このような形状では空気が横方向へ押し出されるため，スクイズフィルムダンパ効果が生じることも懸念される．

以上から求められたパラメータを用いて,片持ち梁の駆動計算を行う．片持ち梁の運動方程式は式(5-8)のようになる．この運動方程式は非線形の微分方程式であるため，Runge-Kutta 法を用いて解を計算した．

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+c\frac{dx}{dt}+kx=\frac{1}{2}\cdot\frac{\varepsilon_0 AV(t)^2}{(g_0-x)^2} \qquad (5\text{-}8)$$

Fig.5-10，Fig.5-11 には矩形電圧を印加した場合と，適切な中間電圧を付与した 2 ステップ電圧を印加した場合の印加電圧波形と片持ち梁の変位の時間応答を示す．スイッチングの周期は 50kHz である．矩形電圧を印加した場合にはリンギングが生じているが，適切な中間電圧を付与することでほぼ完璧にリンギングを抑制することができている．

片持ち梁の共振周波数を 200kHz としているので，リンギングを抑制できれば計算で示すように 2.5μs での波長スイッチングが可能となる．さて，ここでは片持ち梁の変位の時間応答を計算で求めたが，実際の片持ち梁の挙動をリアルタイムで測定することは困難である．一方でスペクトルを時間積分した時間平均スペクトルはスペクトルアナライザーで簡単に測定することが可能である．時間平均スペクトルは，各波長における受光強度を時間で積分したものをスペクトルで表示したものである．そのため波長のシフト範囲で発振波長がほぼ一定であれば，ある波長で安定している時間が長いほど，その波長での強度が強く出る．つまりリンギングを抑制でき，波長が安定していれば，2 点で鋭いピークを持つことになる．

Fig.5-12 には Fig.5-10，5-11 で計算した矩形波の電圧と 2 ステップ電圧を印加した時の片持ち梁の変位を波長シフトに換算し，時間平均スペクトルに書き換えたものを示す．ここでは片持ち梁の変位量に対して波長のシフト量は 1/10 としている．矩形波を印加しリンギングが生じている場合の時間平均スペクトルは横に広がっており，いくつかの小さいピークが見られる．これはオーバーシュート一回一回の到達点であり，空気抵抗があることからだんだんオーバーシュートが小さくなっていくことがわかる．一方でリンギングを抑制した 2 ステップ電圧印加では,先ほど述べたように 2 波長で鋭いピークが得られている．実験でもこのような時間平均スペクトルが得られればリンギングを抑制できたといえる．ちなみに 2 つのピーク間でも強度が出ているが，これはスイッチングで波長がスイープしていく際に受けるものである．

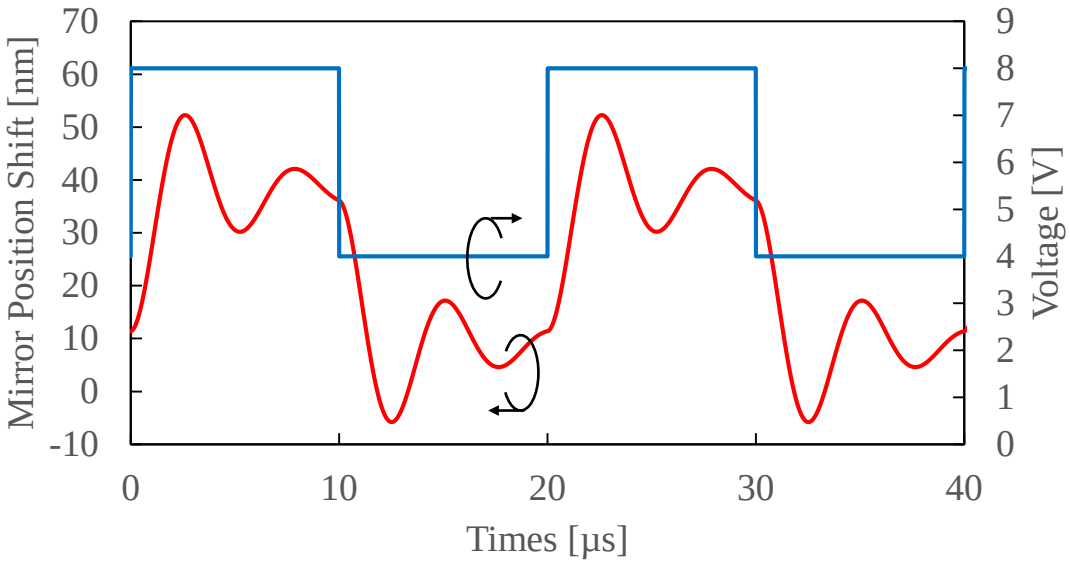


Fig.5-10 印加した矩形電圧波形と片持ち梁の時間応答

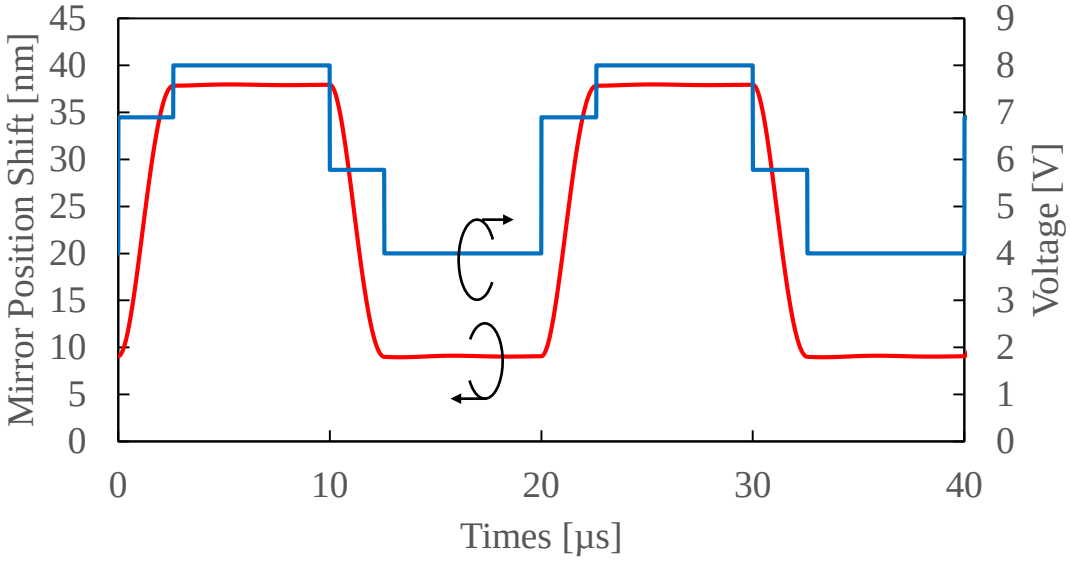


Fig.5-11 印加した 2 ステップ電圧波形と片持ち梁の時間応答

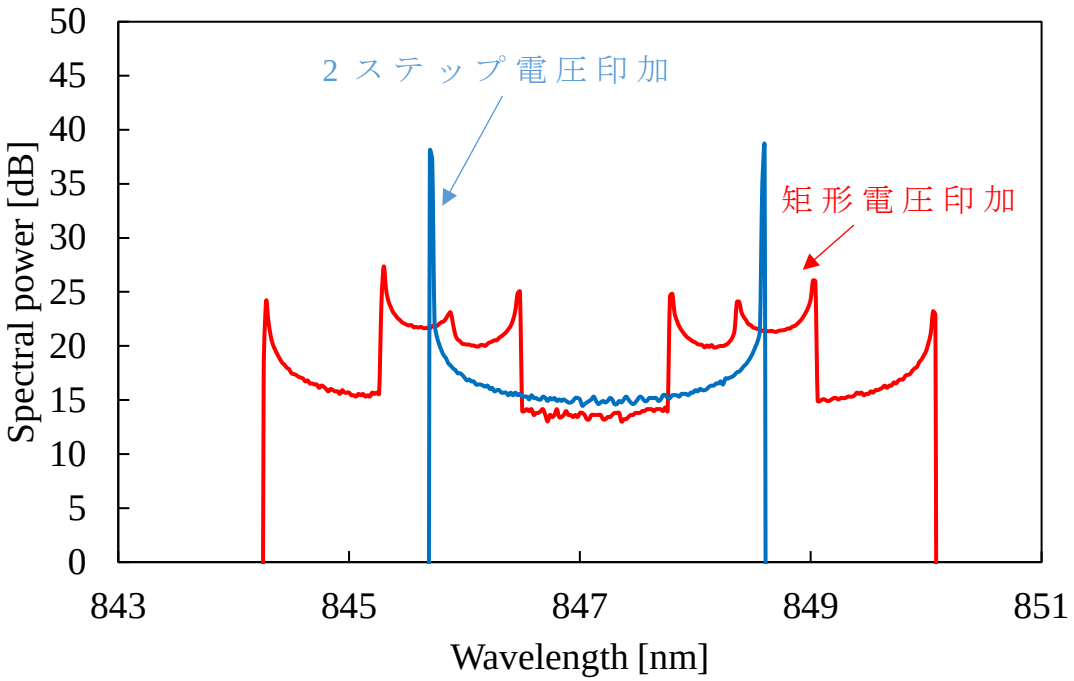


Fig.5-12 片持ち梁の駆動計算から求めた時間平均スペクトル

5.4 マイクロマシン面発光レーザでのリンギング抑制の実証

実際のデバイスでの実証を行う．Fig.5-13 には今回測定に用いたデバイスの SEM 画像を示す．このデバイスは上部反射鏡に DBR を用いており，片持ち梁の長さは 80μm である．Fig.5-14 にはスイッチング特性測定系を示す．n 型のレーザコンタクトと裏面の p 型電極間に電流を流しレーザを発振させる．片持ち梁の駆動には数十 V が必要になるため，バイアス電圧印加用の電圧源とスイッチング電圧印加用のファンクションジェネレータにより片持ち梁の根元にあるチューニングコンタクトとレーザコンタクト間に電圧をかけ片持ち梁を基板側に変位させて，発振波長のチューニングを行う．

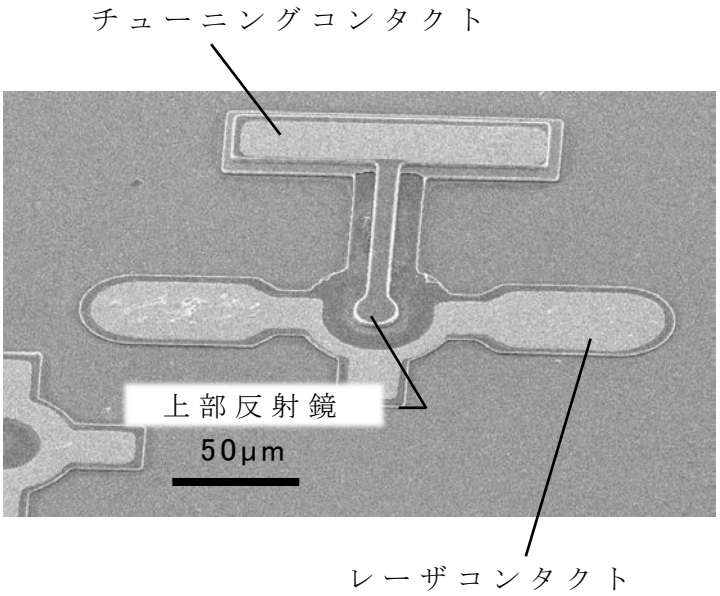


Fig.5-13 測定に用いたデバイスの SEM 鳥瞰画像

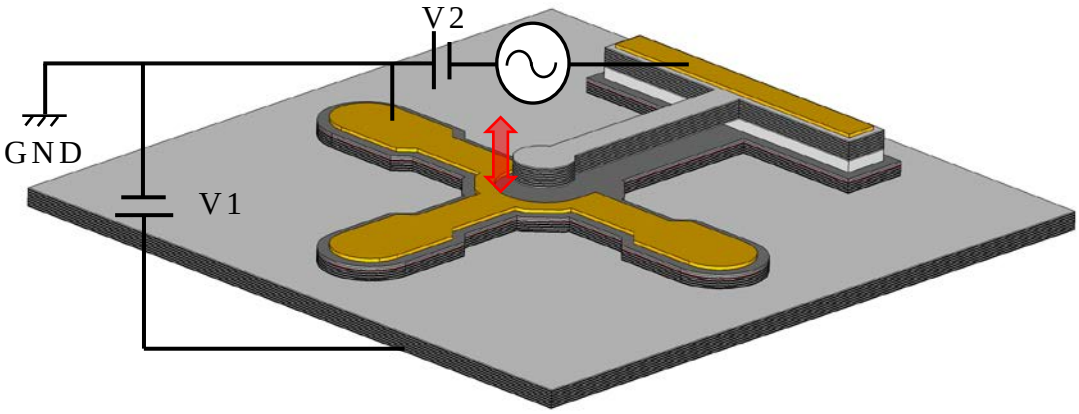


Fig.5-14 高速スイッチング特性測定系イメージ

Fig.5-15 に印加した電圧波形(設定値), Fig.5-16 にサンプリングレート 10Hz で測定した時間応答スペクトルを示す. 矩形波を印加した場合には, スペクトルが広がっており, また細かいピークがいくつか立っている. 片持ち梁の共振周波数は Fig.5-8 でも示したとおり 200kHz であり, スイッチングの周波数が 50kHz であるため, リンギングのリークが 4~5 個見えるのはほぼ理論値通りである. 電圧が切り替わる瞬間の片持ち梁の位置が釣り合いの点ではないため, 長波長側ではピークがきれいに 4 つにはなっていないと考えられる. また適切な中間電圧を

挿入した 2 ステップ電圧印加ではきれいな 2 つのピークが立ったスペクトルが得られた．計算で求めた Fig.5-12 の時間応答スペクトルと見比べると，2 ステップ電圧印加によりリンギングを抑制できたことがわかる．また 2 ステップ電圧印加における中間電圧の保持時間は 2.3μs であり，ほぼこれに等しいスイッチング時間を達成できていると見込まれる．計算における中間電圧の値は 6.895V，5.778V であったが，実験での中間電圧は 6.604V，5.946V となっている．これは計算では実際より空気抵抗が大きくなっていることを示し，より正確に導出するためには空気抵抗のモデルの改善が必要である．

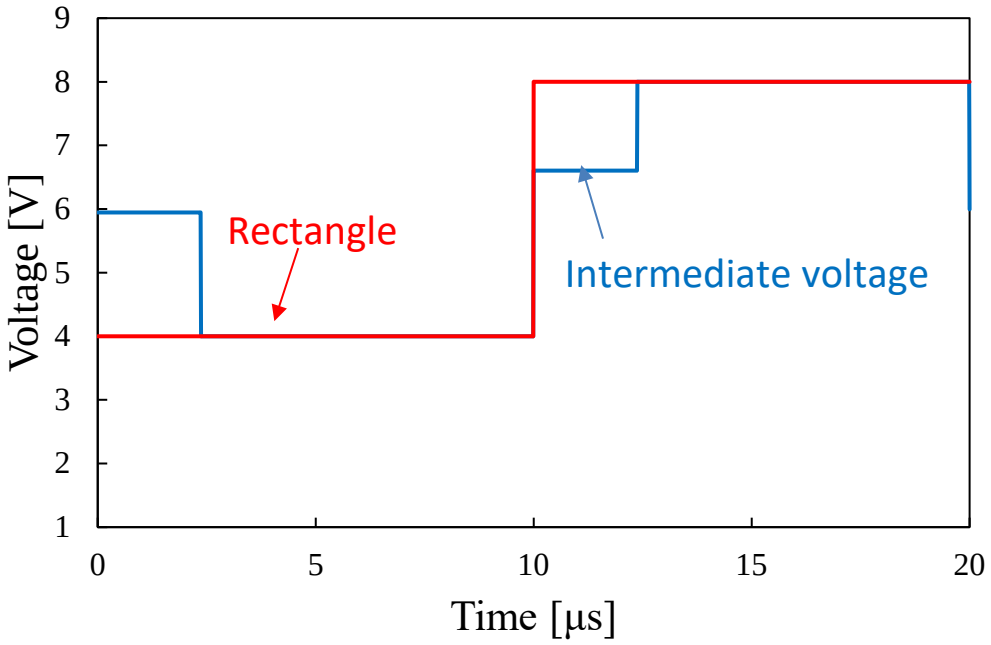


Fig.5-15 印加電圧波形

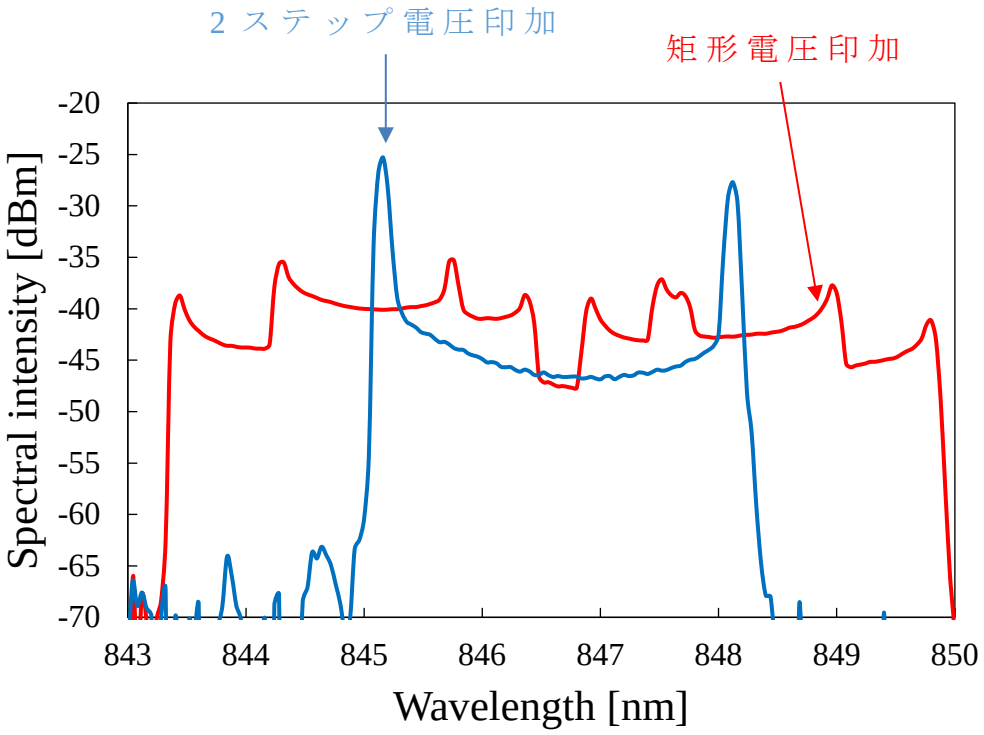


Fig.5-16 矩形波・2ステップ電圧印加による時間平均スペクトル

さてここまで電圧波形を最適化することでリンギングを抑制できることを示したが，完璧にリンギングを抑えるためには計算上 3~4 桁の制度が必要であり，デバイスでの測定においてもファンクションジェネレータにおいて電圧・時間の設定を同農に細かく行う必要があった．そのため印加電圧波形が最適値からずれた場合にどの程度リンギングが生じるかの検討を行った．波形の誤差は電圧・時間それぞれが考えられるが，それぞれ切り離して考える．最もリンギングを抑制できる電圧波形から，Fig.5-17 に示すように電圧・保持時間をそれぞれ動かしていきリンギングの幅がどの程度になるかを測定する．Fig.5-18，Fig.5-19 には電圧波形の誤差によるリンギング幅を示す．ここでは波長間隔を 10nm としており，±0.5nm のリンギングを起こしていると，リンギング幅が 1nm となる．赤の点と青の点はそれぞれ長波長側と短波長側のリンギング幅を示す．

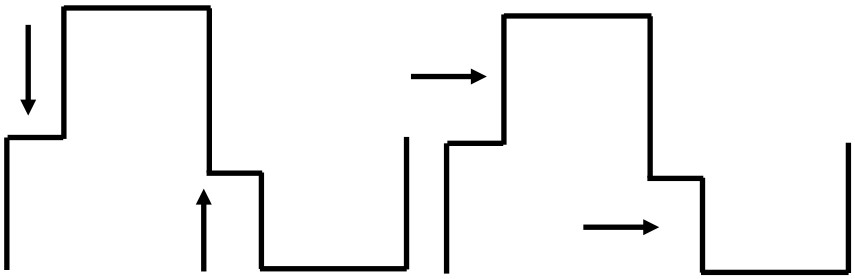


Fig.5-17 中間電圧の電圧誤差と保持時間誤差のイメージ

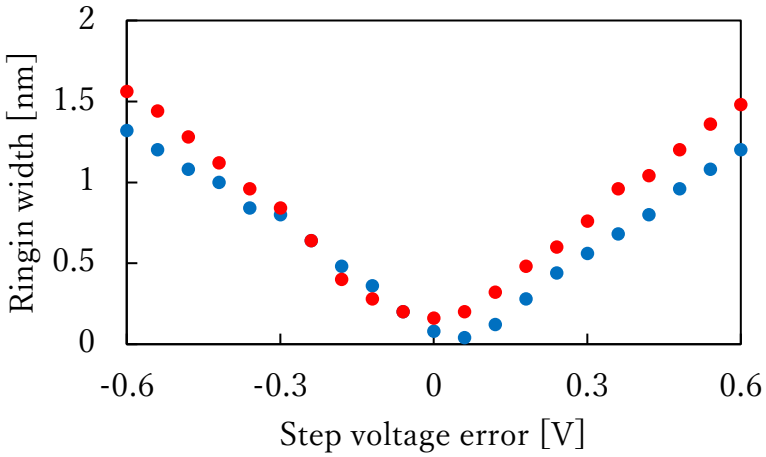


Fig.5-18 中間電圧の印加電圧誤差によるリンギング

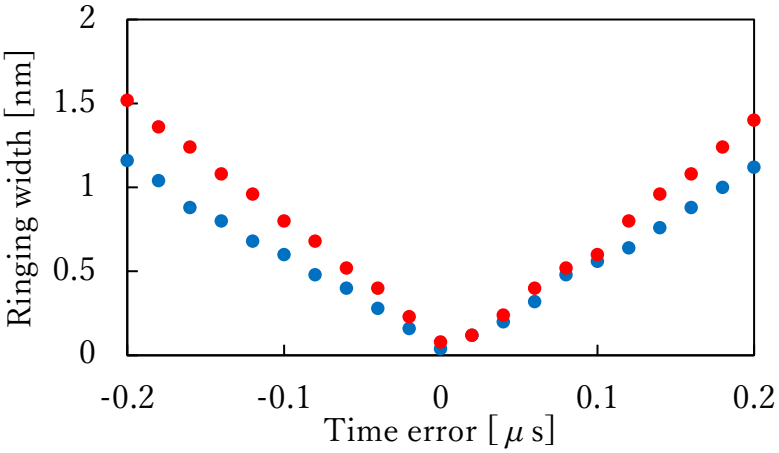


Fig.5-19 中間電圧の保持時間誤差によるリンギング

ここでスイッチングのオンオフ電圧差は 6V，中間電圧の保持時間は 2.5μs である．この結果から，許容できるリンギングの振幅を波

長間隔の 10%とすれば中間電圧の誤差が±0.4V，±0.14μs 程度までは許容することができるという結果が得られた．

また，NG-PON2 等の波長多重通信では，4 波長ないしそれ以上の波長のスイッチングが求められるため，同様に 4 波長のスイッチングにおけるリンギング抑制も確認した．Fig.5-20 に印加電圧，Fig.5-21 に時間平均スペクトルを示す．波長間隔は 1nm とし，スイッチングはランダム性を持たせるため，隣接・一つ飛ばし・二つ飛ばしを含む電圧波形としている．中間電圧の保持時間は，全てのスイッチングにおいて 2 波長スイッチングと同様，2.3μs である．中間電圧の値はあらかじめ 2 波長ごとに最適値を求め，それを適応した．Fig.5-21 に示すように 4 波長でもリンギングを抑制することができており，スペクトルも十分狭いことから狭帯域バンドパスフィルタを用いて信号の分波も可能であると言える．

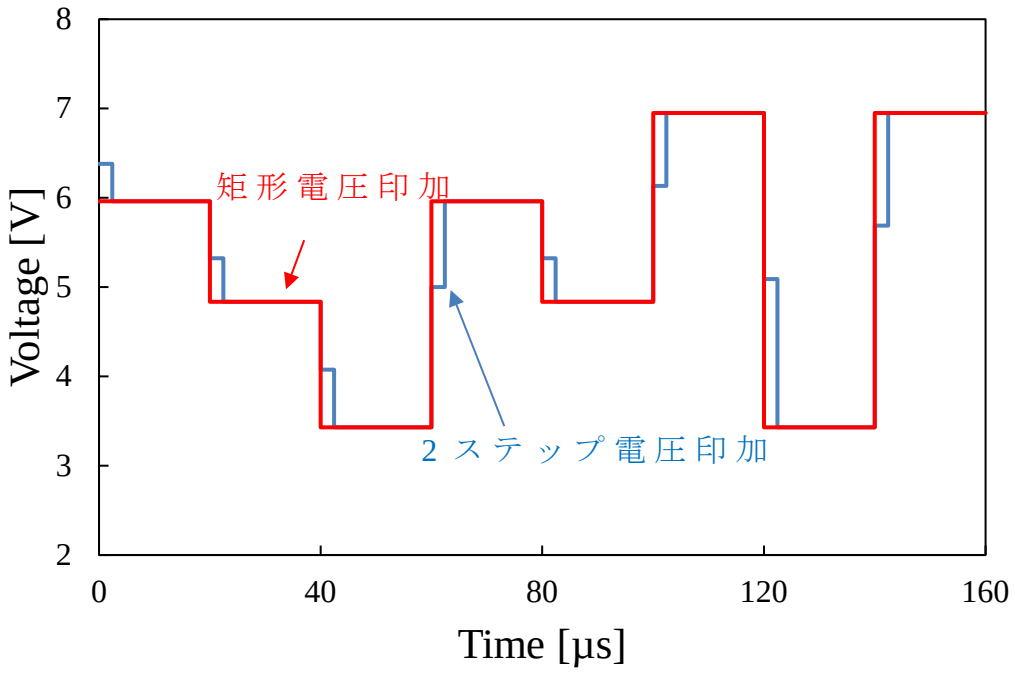


Fig.5-20 4 波長スイッチングの印加電圧波形

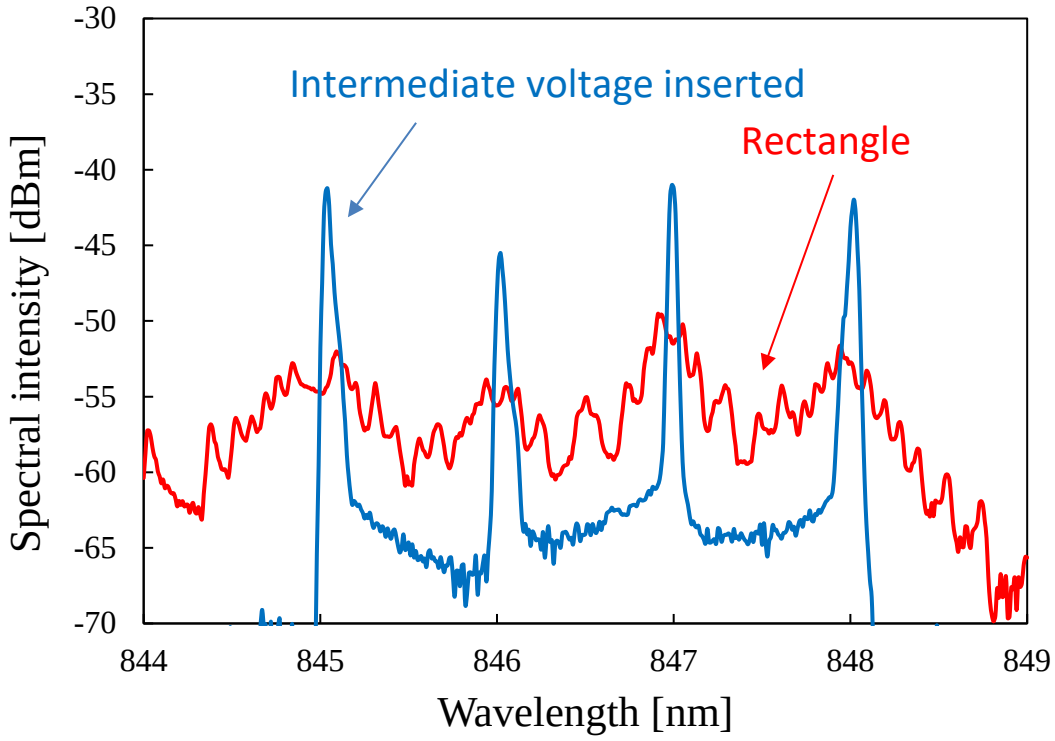


Fig.5-21 4 波長スイッチングの時間平均スペクトル

時間平均スペクトルの測定では，印加電圧波形(ファンクションジェネレータの設定値)からスイッチング時間を推定した．しかしながらこれでは波長シフトを直接測定しているわけではないため，実際のスイッチング時間はわからない．そのため波長可変フィルタを用いてスイッチング時間を測定することとした．波長可変面発光レーザからの放射光を光ファイバに結合させ，波長可変フィルタを通してフォトディテクタで受光し，受光パワーの時間変化を測定する．波長可変フィルタはあらかじめ任意の波長に設定しておき，フォトディテクタでパワーを受光したタイミングでは，その設定波長でレーザが発振していると考える．波長可変フィルタは，光伸光学工業株式会社のフィルタカセットモジュール(TFM/FC)を用いた[4]．このフィルタカセットモジュールは，バンドパスフィルタが搭載されたカセットをマイクロメータにより回転させることで波長のチューニングを行う．Fig.5-22 にはマイ

クロメータの値とピーク波長，Fig.5-23 には白色光源を投入した際の白色光源のスペクトルとフィルタの透過スペクトル特性である．波長可変範囲は 828nm～856nm の 28nm でありスムーズな波長シフトが得られている．またフィルタの挿入損失は約 1.5dB，-3dB 帯域は約 1nm である．850nm 帯についてはカスタマイズ品のため，ホームページでの特性は公開されていないが，980nm 帯と同程度の特性が得られている．

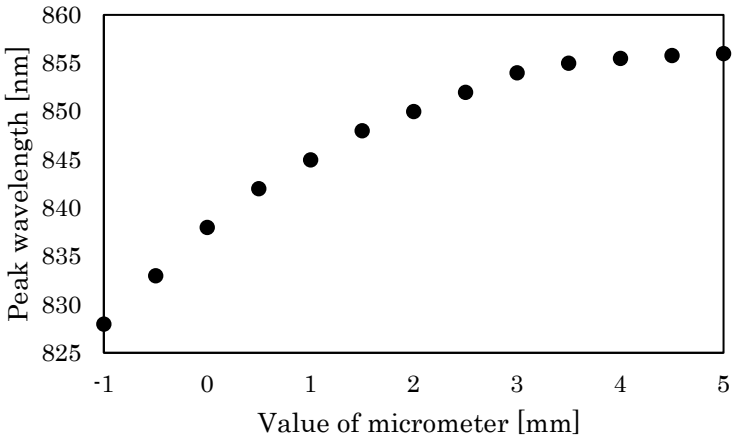


Fig.5-22 波長可変フィルタのマイクロメータに対する透過波長特性

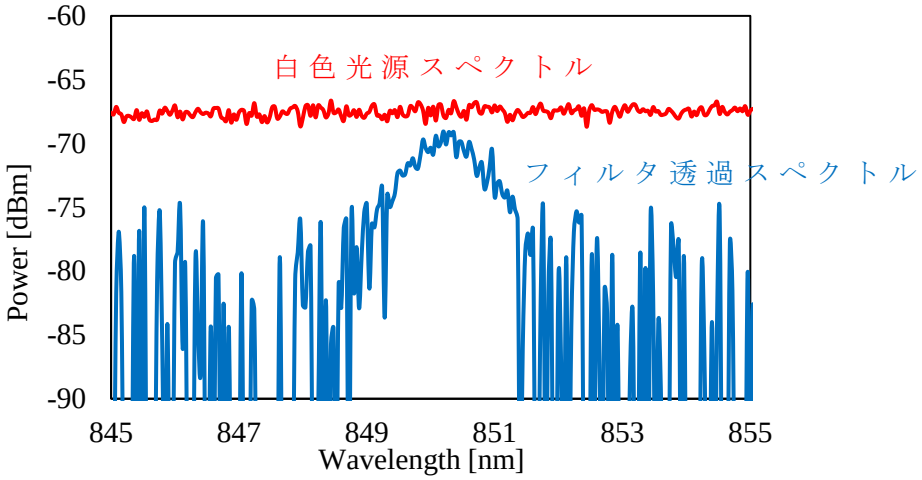


Fig.5-23 フィルタの透過スペクトル特性

波長可変フィルタの半値幅が 1nm と，スイッチング波長間隔と比べるとそれなりに大きな値であり，スイッチングの際の波長シフトを観測するのは難しいため，なるべくスイッチング波長間隔を広げ，845nm

と 855nm で実験を行った．これは詰まるところ，スイッチングの波長間隔が狭いときに比べ，フィルタの帯域を擬似的に狭くしたことを意味する．スイッチング波長間隔が 1nm であった場合には，フィルタの透過帯域が 1/10 のものを用いていることと等価である．オシロスコープではファンクションジェネレータの同期信号を取っている．Fig.5-24 にはフィルタの中心波長を 845nm から 855nm まで 2nm 間隔でシフトしたときの，フォトディテクタでの受光パワーの時間変化を示す．この図では，5μs と 15μs でスイッチングを行っている．先ほどと発振波長がずれているのは，違うデバイスで測定したためであるが，デバイス設計は同じであり，片持ち梁の共振周波数は先ほどのものと同様 200kHz であることを確認している．845nm・855nm それぞれで受光パワーがほぼ一定の時間があり，この間では片持ち梁が振動していないということがわかる．若干の変動が見られ，多少リンギングしているものと考えられるが，1dB 未満の変動であり，無視しても問題ないと考える．またこの結果を時間と波長に書き換えると Fig.5-25 のようになる．この図からスイッチング時間が 2.5μs であることがわかり，時間応答スペクトル実験の際に推定したスイッチング時間が裏付けられた．

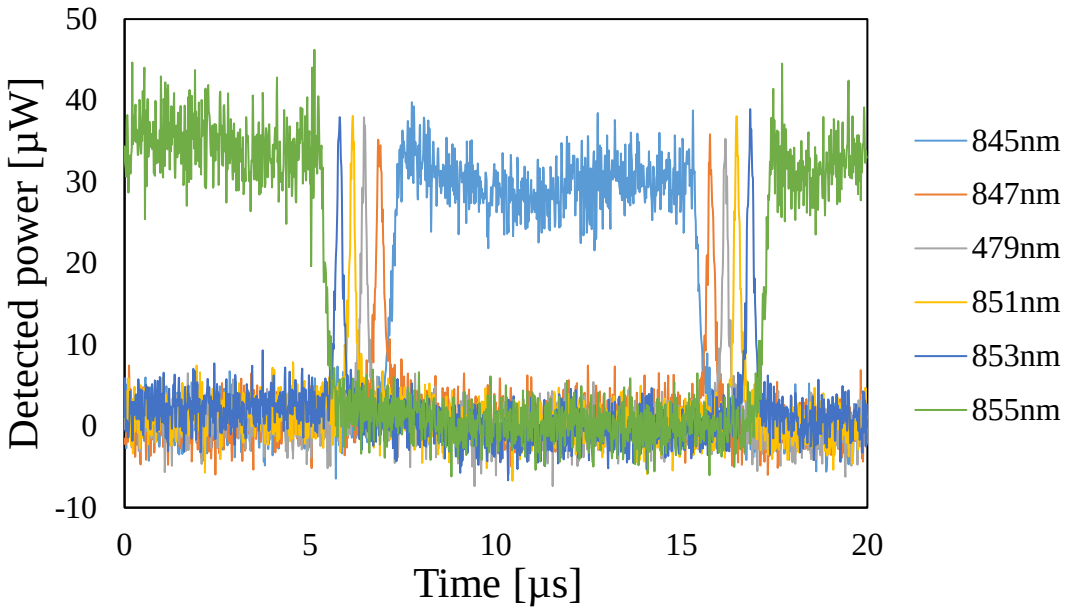


Fig.5-24 フィルタ波長ごとの受光強度の時間応答

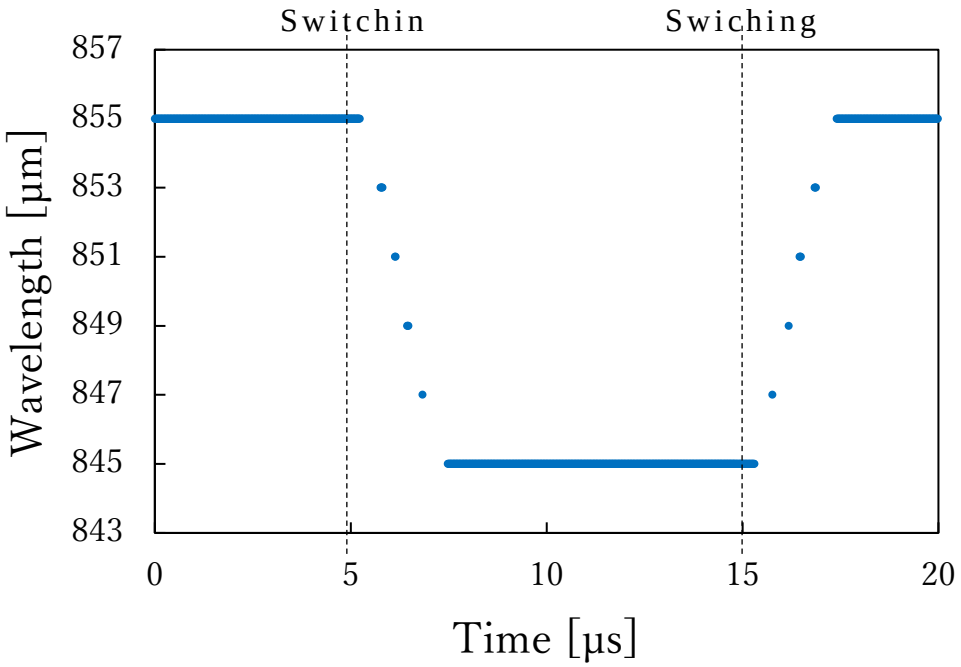


Fig.5-25 波長変化の時間応答(Fig.5-24 から変換)

また比較のために Fig.5-26 に矩形電圧を印加した際の受光パワーの時間応答を示す．ここでは波長可変フィルタを片方の波長に固定し，受

光パワー測定している．またスイッチングの周波数は，リンギングを観測するために 10kHz としている．この図からわかるように，矩形波を印加した際には 50μs 経過してもリンギングは収まってはいない．2 ステップ電圧を印加することにより 2.5μs でのスイッチングを実証したので，矩形波電圧印加に比べ，スイッチング速度を 20 倍以上に高速化できたと言える．

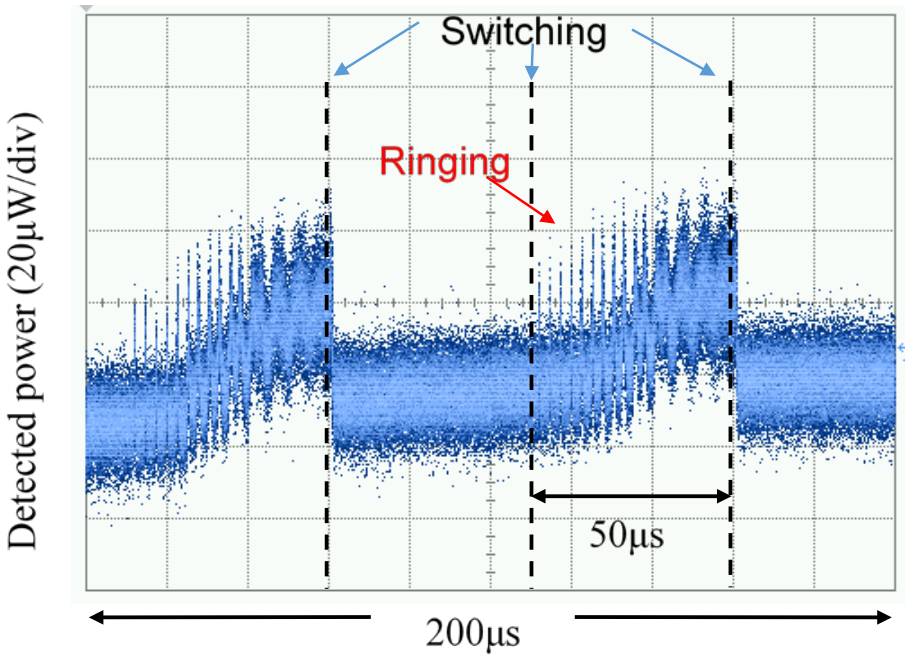


Fig.5-26 矩形波電圧を印加した時の受光強度の時間応答

またオーバードライブによるリンギングの抑制とスイッチングの高速化を実験的に行った．まず Fig.5-27 に計算によるマイクロマシンの応答を示す．赤線で示すオーバードライブは，青線で示す 2 ステップ電圧よりさらなる高速スイッチングを実現している．

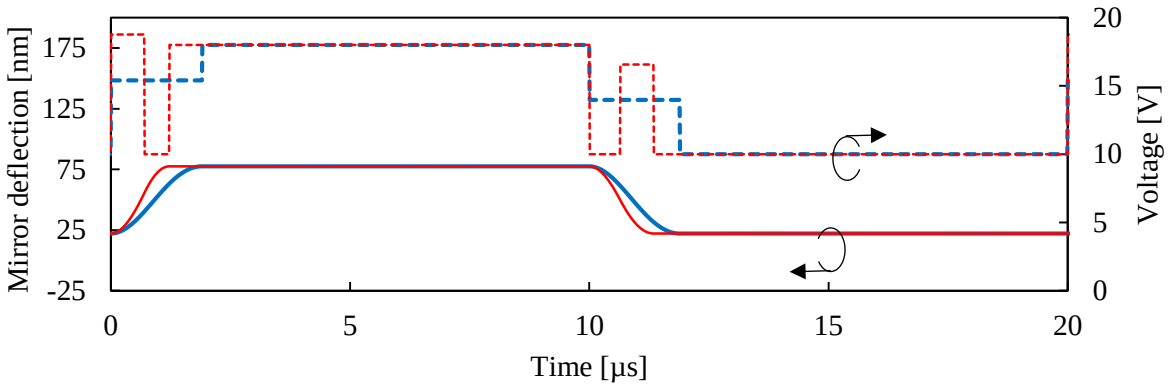


Fig.5-27 2-ステップとオーバードライブの MEMS 応答比較

Fig.5-28, Fig.5-29 には実際のデバイスで測定した 2 ステップ電圧印加とオーバードライブでの時間平均スペクトルを示す．Fig.5-30 には印加した電圧をオシロスコープで測定した結果を示すが，印加電圧波形自体にリンギングが生じているためスペクトルに多少の広がりは生じているが，オーバードライブでも 2 ステップ電圧と同様スイッチング波長でピークを持つスペクトルが得られており，リンギングが抑制できることを示している．

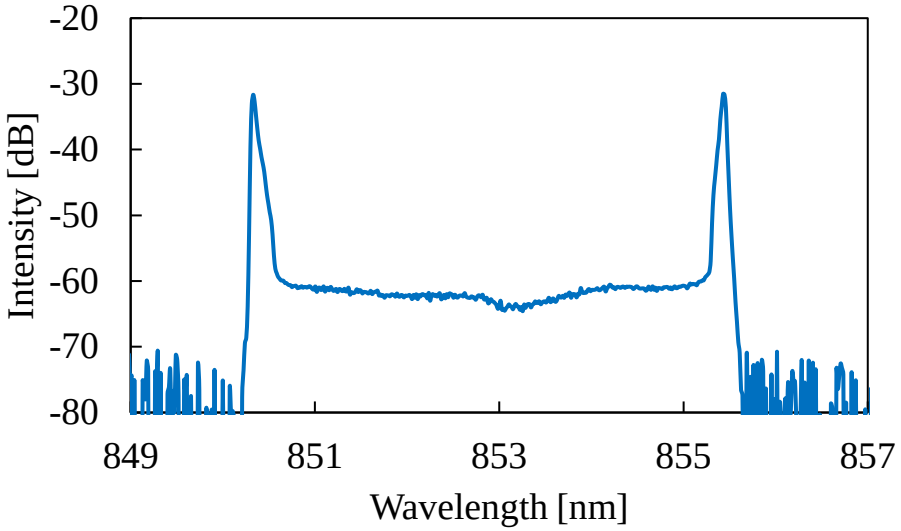


Fig.5-28 2-ステップ電圧による時間平均スペクトル

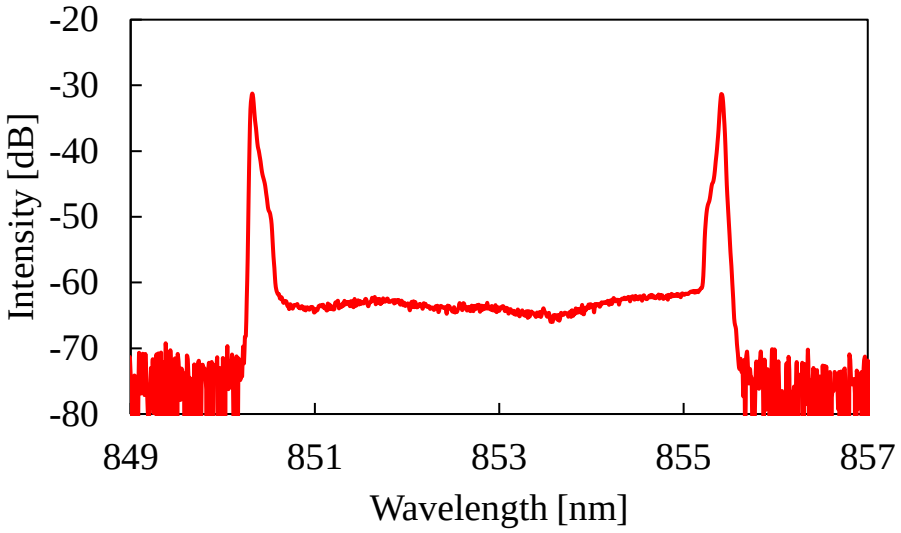


Fig.5-29 オーバードライブによる時間平均スペクトル

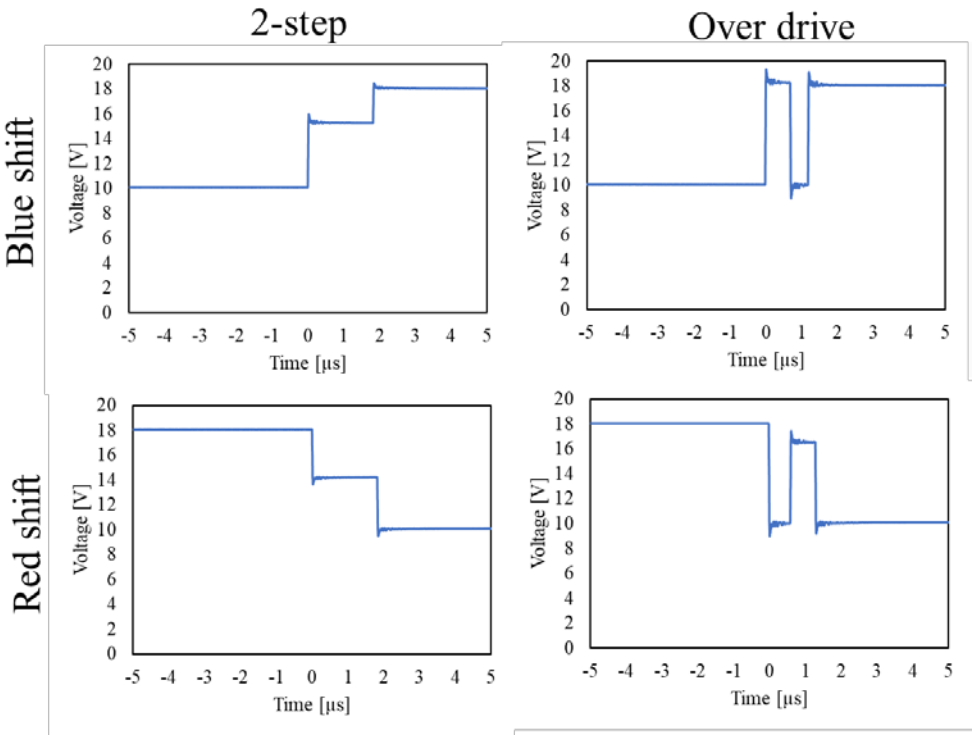


Fig.5-30 オシロスコープで測定したマイクロマシンへの印加電圧波形

Fig.5-31 には波長可変フィルタを用いて測定した PD の受光強度の時間応答を示す．このデバイスではマイクロマシンの共振周波数が 270 kHz であったため，先の実験とスイッチング時間が異なるが，2 ステップ印加では約 1.8 μs となっており，先ほどと同じく $1/2f_0$ である．一方でオーバードライブでは約 1.3 μs であり，2 ステップに対して約 1.5 倍に高速化されている．ここで短波側，長波側へのスイッチング時間が異なるのは，印加電圧の非対称性が原因であり，理論通りである．今回の測定ではファンクションジェネレータの印加電圧の振幅が 10V に制限されていたが，さらに大きな電圧を印加できるものを使えば，さらなる高速化も可能である．

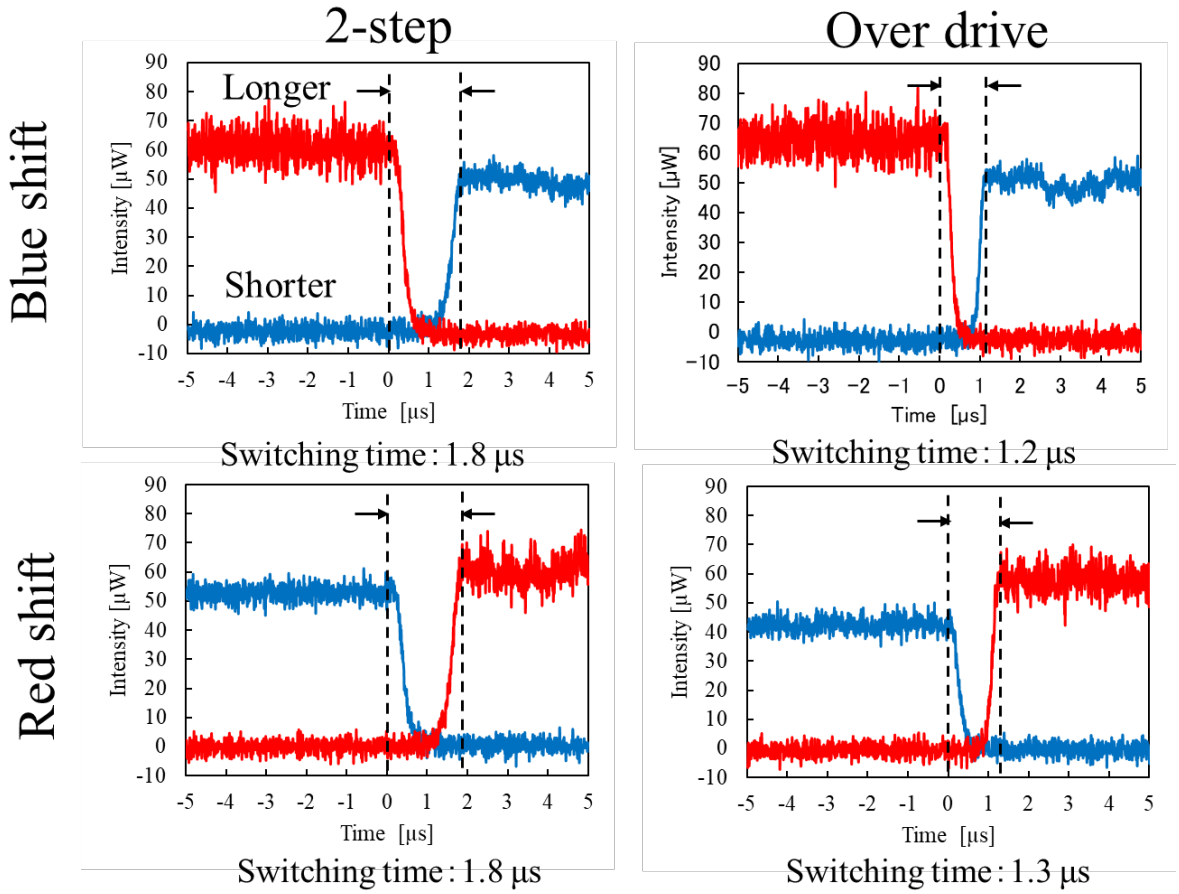


Fig.5-31 短波・長波それぞれにチューニングした
波長可変フィルタの透過光強度の時間応答波形

・さらなる高速化のためのマイクロマシン設計

ここまで述べたように，2ステップ電圧やオーバードライブを用いてもスイッチング速度の支配的要因はマイクロマシンの共振周波数である．そのためマイクロマシンの共振周波数を向上させる指針を示す．まず共振周波数は梁の長さの2乗に反比例する．しかし梁を短くすると波長掃引のための電圧が上昇してしまう．

$$\omega = \frac{\lambda}{L^2}\sqrt{\frac{E \cdot h^2}{a}} \qquad (5-9)$$

$$V = \frac{4}{L^2}\sqrt{\frac{E \cdot h^3 \cdot d_0^3}{54.6\varepsilon_0}} \qquad (5-10)$$

そのため掃引電圧と共振周波数の関係を示すと次のようになる．

$$V = \frac{4\omega}{\lambda}\sqrt{\frac{h \cdot d_0^3 \cdot a}{54.6\varepsilon_0}}$$

この式において任意に任意に変更可能なのは厚さhのみである．電圧一定とすればマイクロマシンを薄くすることで共振周波数の向上が可能である．今回はDBRを用いており，厚さは3.5μm程度あったが，厚さが1/10程度であるHCGを用いると共振周波数を約3倍に向上することが可能である．UCバークレーからは薄膜構造のHCGを用い，梁の長さ3μmのマイクロマシンを用いて1MHzを超える共振周波数を達成している(Fig.5-32)．一方で共振周波数が約2MHzのHCG VCSELでは7Vの電圧印加で4nmしか波長掃引できておらず，共振周波数と掃引電圧はトレードオフとなる．

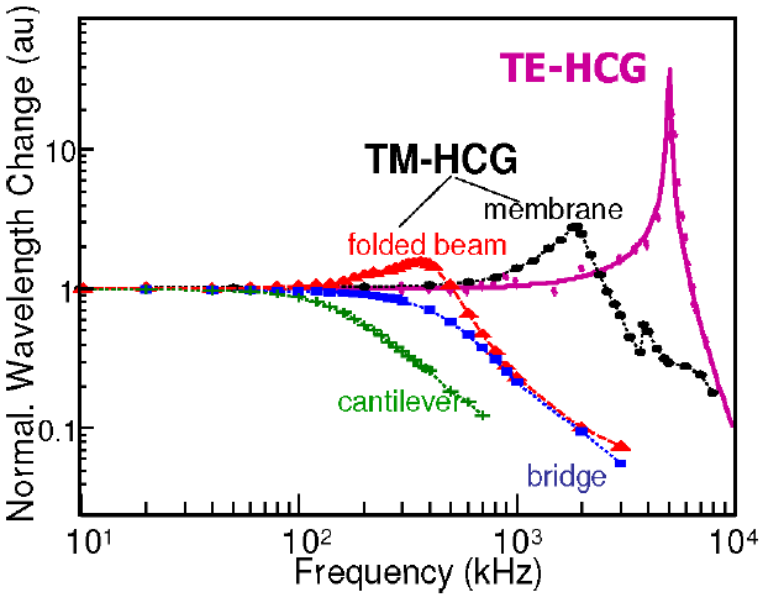


Fig.5-32 ミラーの構造による共振周波数の違い[5]

・RLC バンドエリミネーションフィルターを用いたリンギング抑制

印加電圧の周波数解析により，リンギングを抑制できる印加電圧ではマイクロマシンの周波数成分が抑制されていることがわかる．そのためステップ電圧であっても周波数を合わせたバンドエリミネーションフィルター(BEF)を用いればリンギングの抑制が期待できる．

Fig.5-33，Fig.5-34 に示すように RLC BEF を用いて，オペアンプのリンギング抑制は実用化されている．BEF を挿入することでループ利得の共振成分を取り除き，時間波形に於いてリンギングの低減を実証している[6].

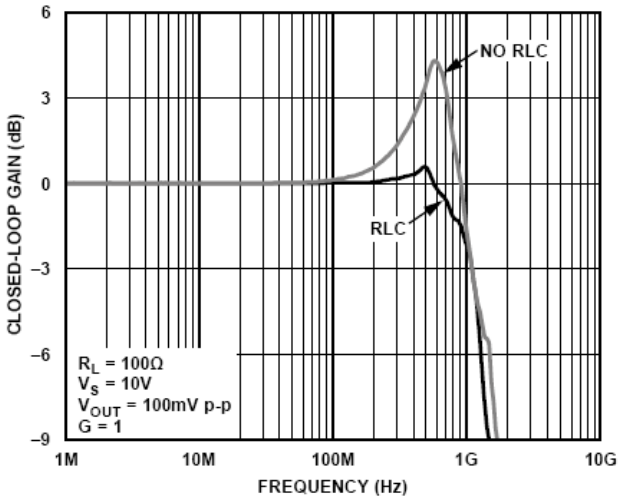


Fig.5-33 オペアンプの利得の周波数特性

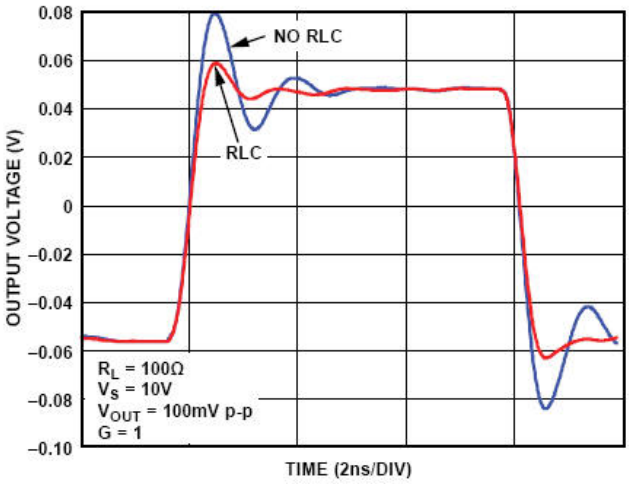


Fig.5-34 利得のステップ応答

同様に MEMS VCSEL への応用を検討する．Fig.5-35 にリジェクト周波数 200kHz，Q=0.5 の RLC バンドエリミネーションフィルタ(BEF)の透過特性，Fig.5-36 にステップ応答を示す．

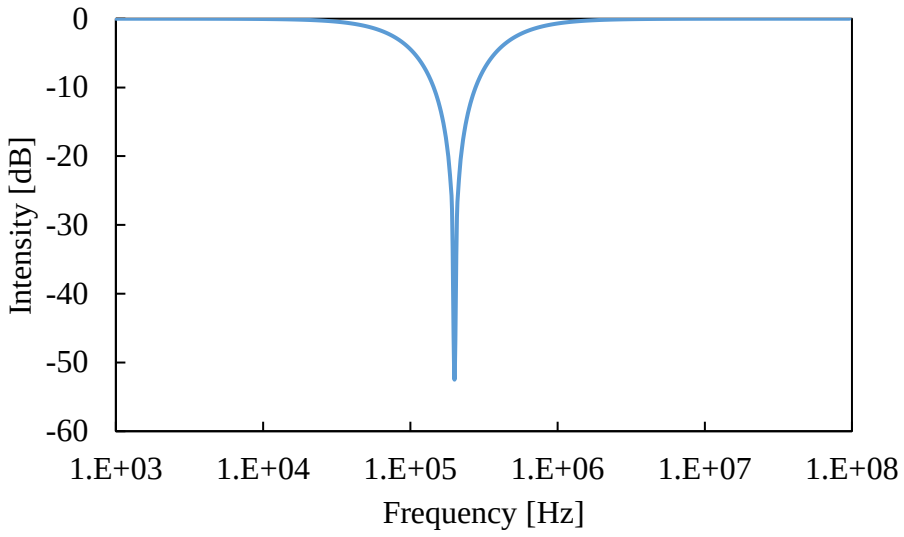


Fig.5-35 RLC BEF の透過特性(F=200 kHz, Q=0.5)

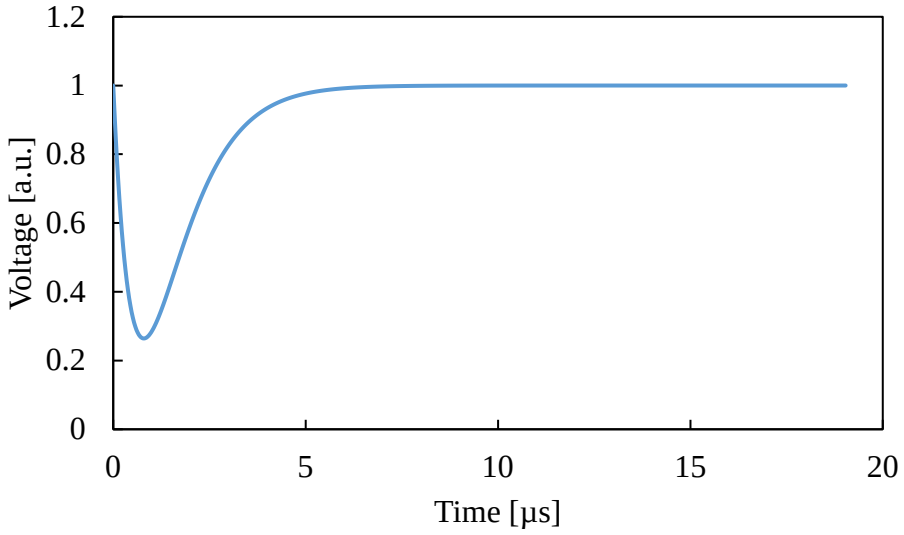


Fig.5-36 RLC BEF のステップ応答

Fig.5-36 に示すように，BEF を用いた際にデバイスに印加される電圧はオーバードライブと似たような，一度強い電圧が印加されその後電圧が弱くなり，最後に一定の電圧が加わるという波形をしている．2-ステップ電圧印加やオーバードライブと同様，電圧が変動している間は波長も必ず変動しており，たとえこの電圧を印加してリンギ

ングが抑制できたとしてもスイッチング時間は 5μs 程度となり，2-ステップ電圧駆動ほどの高速化は見込めない．

また追実験によりオーバードライブによるスイッチングで $T_0/3$ 程度までスイッチングが高速化できているため，スイッチング速度の要件とコストの兼ね合いから，実際のシステムに於いては RLC BEF と 2-ステップ電圧印加ないしオーバードライブを選択することが可能である．

5.5 まとめ

マイクロマシン面発光レーザを波長多重通信などの光源として用いる際に，波長切替時にマイクロマシンに生じるリンギングを抑制することで，波長スイッチング時間の高速化を検討した．一般的に，マイクロマシンにステップ電圧を印加してチューニングを行うと，オーバーシュートが発生してリンギングが生じる．リンギングの収束はマイクロマシンの空気抵抗に依存する．空気抵抗の大きさはマイクロマシンの形状に依存するが，単純な長方形の片持ち梁であるとすると，リンギングの収束までには片持ち梁の共振周波数の数十倍の時間がかかる．本研究室で提案しているマイクロマシン面発光レーザは，片持ち梁の共振周波数が 100kHz を超えており高速駆動が可能であるが，リンギングの収束には 100μs 程度の時間がかかってしまい，高速スイッチングの制限要因となっていた．

そこで印加電圧波形を 2 ステップとすることでリンギングの抑制と高速波長スイッチングの実証を試みた．まずマイクロマシン面発光レーザを SDOF モデルに落とし込み，片持ち梁の挙動計算を行った．片持ち梁の挙動を特徴付ける物性値として，静電容量・バネ定数・空気抵抗があるが，これらはマイクロマシン面発光レーザの構造から正確に求めることは難しいことから，静特性・動特性を測定しフィッティングすることで，値を求めた．

計算では，バイアス電圧 6V，スイッチング電圧(peak to peak)が 4V の時，6.895V と 5.778V の中間電圧を，片持ち梁の共振周波数の 2 倍

に相当する 2.5μs 挿入することで，リンギングを抑えたスイッチングができることを示した．

また，実際に作製したデバイスを用いてリンギング抑制の実証を行った．片持ち梁の挙動を直接観測することは困難であるため，時間平均スペクトルを測定し，計算で求めた片持ち梁の変動を同じく時間平均スペクトルに変換したものと比較し，リンギングの抑制効果を検証した．実験においても計算で求めたリンギングが発生していない時の時間平均スペクトルと同様の 2 点で鋭いピークを持つスペクトルが得られ，中間電圧の保持時間は計算とほぼ同じ 2.3μs でリンギングが抑制されたが，中間電圧はそれぞれ 6.604V・5.946V となった．空気抵抗がない場合には中間電圧は等しくなるため，空気抵抗が大きくなると中間電圧の差は広くなる．そのためフィッティングにより求めた空気抵抗は実際より大きくなったと考えられる．また 4 波長 DWM 通信等への応用を想定し，擬似的な 4 波長のスイッチングの実験も行った．あらかじめそれぞれの 2 波長間でリンギングが抑制できる中間電圧を求め，それぞれのスイッチングに適応することで，4 波長のスイッチングにおいても 2 波長のスイッチングと同様リンギングを抑制できることを実証した．

最後に波長可変フィルタを用いてスイッチング時間の測定を行った．あらかじめ波長をセットしたフィルタの透過光を，同期したオシロスコープで測定することで，チューナブル面発光レーザの発振波長がフィルタの透過波長と一致するタイミングを測定することができる．そのためフィルタの波長を少しずつずらしていくことで，波長の時間変化を測定することができる．この測定により 2 ステップ電圧を印加しリンギングを抑えることで，2.5μs の波長スイッチングを確認した．また同じデバイスに矩形電圧を印加することでリンギングの収束時間を確認したが，50μs 経っても完全にはリンギングは収束しなかったことから，リンギングを除去することで波長スイッチングを 20 倍以上に高速化できることを実証した．2 ステップ電圧印加によるスイッチング速度は，片持ち梁の共振周波数の 2 倍に高速化できるため，片持ち

梁の長さを短くする等により共振周波数を上げることができれば，さらなる高速化も可能である．

以上本章ではマイクロマシンのスイッチング電圧波形を 2 ステップ，オーバードライブとすることでリンギングを抑制すると共に高速なスイッチングが達成できることを示した．

参考文献

[1] M. Imboden, J. Chang, C. Pollock, E. Lowell, M. Akbulut, J. Morrison, and D. J. Bishop, “High-Speed Control of Electromechanical Transduction: Advanced Drive Techniques for Optimized Step-and-Settle Response of MEMS Micromirrors,” IEEE Control Systems, Vol. 36, no. 5, pp. 48-76, Sep. 2016.

[2] J. Small, W. Irshad, A. Fruehling, A. Garg, X. Liu, and D. “Peroulis, Electrostatic fringing-field actuation for pull-in free RF-MEMS analogue tunable resonators,” Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 22, no. 9, pp. 095004, Jul. (2012).

[3] T. Amano, T. Hino, F. Koyama, M. Arai, and A. Matsutani, “A thermally tunable GaAlAs-GaAs micromachined optical filter with submillisecond tuning speed,” IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, no. 6, pp. 1501-1503, May 2004.

[4] 光伸光学工業株式会社，TFM/FC：波長可変フィルタモジュール http://www.koshin-kogaku.co.jp/products/module/tfm/

[5] Y. Zhou, M. C. Y. Huang, C. Chase, V. Karagodsky, M. Moewe, B. Pesala, F. G. Sedgwick, and C. J. Chang-Hasnain, ”High-Index-Contrast Grating (HCG) and Its Applications in Optoelectronic Devices”, IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 15, no. 5, pp. 1-15, Sept. 2009.

[6] AnalogDialogue, http://www.analog.com/jp/analog-dialogue/articles/notch-filter-reduces-peaking-increases-gain-flatness.html

第六章　波長可変面発光レーザの機能集積化

6.1 波長可変面発光レーザとスローライト導波路の集積化

近年自動車の自動運転技術の要求などから LIDAR (Laser Imaging Detection and Ranging)と呼ばれる測距センサーが注目を集めている．LIDAR はパルス状のレーザ光を照射し，反射光を測定することで障害物までの距離を測るものである．

LiDAE は細いビームのレーザ光を照射し反射光を測定するため，ビームの出射方向を制御する必要がある．また反射光を受光して測距を行うため，光源のレーザには高い出力が求められる．レーザ製品の安全基準である Eye safe による制限はあるものの，ワットオーダーの高出力が必要となる．

本研究室ではビーム掃引機能と光増幅機能を併せ持つ面発光レーザと同様の層構造を持つスローライト導波路の研究を行ってきた．外部光源からの光をスローライト導波路に結合させると,広がり角が 0.08°という非常に小さな遠視野像が得られる．結合させるレーザ光の波長を変化させるとビームの出射方向を変えることができ，1 次元で 1000 以上の改造点数を実現している．これまで波長可変の外部光源を用いてビーム掃引を行ってきたが，光源を集積することで，フットプリントが小さくアセンブリコストが低いビームスキャナを実現することができる．またスローライト導波路に電流を流すと入力光を増幅することができるため，結合する光源が単一モード動作をしていれば，高出力の単一モード光源が得られる.本研究室では 1mm の長さのスローライト導波路で 1W を超える出力が得られているため，マイクロマシン面発光レーザと集積することで波長可変レーザの高出力化が見込まれる．

6.1.1 スローライト導波路ビームスキャナ

まずスローライト導波路ビームスキャナについて説明する．光ファイバの様な単一材料のコア・クラッドを持つ導波路では，界面での全反射を用いて光を導波する．全反射が起きない入射角の光は反射せず導波路の外に放射してしまうため，ほぼ導波路に沿った向きの光しか導波されない．一方で面発光レーザのウェハ構造のように垂直反射に対して高い反射率を持つ反射鏡により共振器が形成されている場合，上下の反射鏡で反射し，ジグザグに進行する光を導波させることができる．そのため導波方向の群速度は小さくなり，実際のデバイス長より光路長を長くすることができる．デバイス長に対し光路長が何倍になるかということを示す値をスローダウンファクターと呼び，10 以上が得られる．スローライトを用いない量子閉じ込めシュタルク効果を用いた変調器などでは，十分な消光比を得るためにミリメートルオーダーのデバイス長が必要であったものが，スローライト効果を用いることで単位長さあたりの干渉量が増えるため，デバイスの小型化，さらには低消費電力化にもつながる．

スローライトの伝搬角は共振器長と結合する光の波長により決定される．伝搬角 θ_i は，伝搬光の波数 κ，導波路の遮断波長の波数 κ_c およびスローライトの伝搬定数 β から決められる．これらのパラメータを使って，波数 κ を波長 λ に替えることで，上部の自由空間に放射される光の偏向角 θ は次の式で示される．

$$\sin\theta = n_{wg} \times \sqrt{1-\left(\frac{\lambda}{\lambda c}\right)^2} \qquad (6\text{-}1)$$

この式から遮断周波数より周波数の大きな光，つまり波長の短いもののみ伝搬することができる．波長が短くなるに従って伝搬角は大きくなっていき，放射角も変化する．このことから，結合させるレーザ光の波長を変化させることで放射角を制御することが可能である．実験においては，Fig.6-1 に示すように導波路長 5mm のデバイスで，入射光は長を 952nm から 989nm まで掃引することによって 60°以上の大き

なビーム偏向と，最小 0.025°の狭いビーム広がり角が得られている．ビーム広がり角は変更角 41°の範囲で 0.04 以下を達成しており，1000 を超える解像点数(ビーム偏向角/ビーム広がり角)が得られており，非機械式のビームスキャナとしては従来方式と比べ 10 倍以上を実現している．

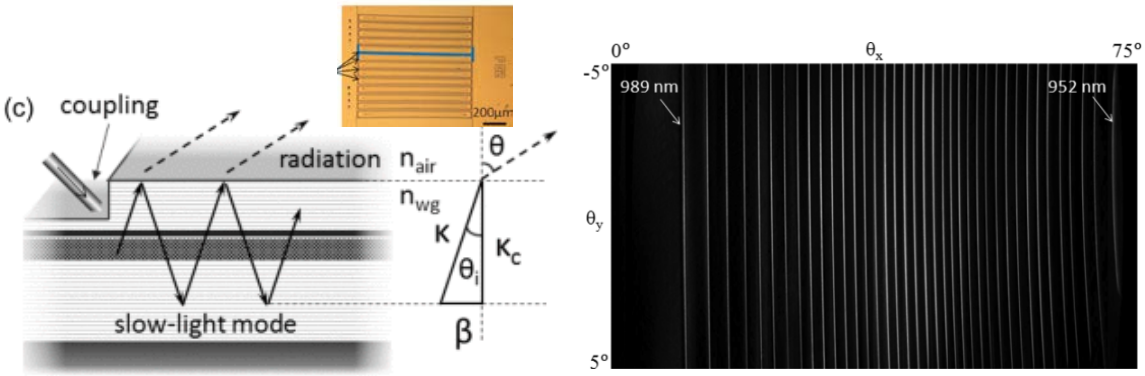


Fig.6-1 スローライト導波路ビームスキャナのビーム掃引特性[1]

6.1.2 スローライト導波路 SOA

スローライト導波路ビームスキャナにおいては，導波路に吸収等がなくても上部から光が放射されていくため，伝搬に伴い伝搬光強度は減少していく．そのためスローライト導波路の伝搬距離は制限される．ビーム広がり角は近視野像のフーリエ変換により求められ，放射領域が長いほどビーム広がり角は小さくなるため，解像点数の向上にはいかに長く伝搬させるかということが鍵である．スローライト導波路に面発光レーザと同様，利得領域を挿入することができるため，放射による伝搬光強度の減少の保証，さらには増幅も可能である．スローライト導波路からの放射強度が場所によらず一定であれば，出力が導波路長に比例するため，増幅効果も併せ持つことになる．

本研究室ではすでに Fig.6-2 に示すように 1mm のスローライト導波路 SOA を用いて 250mW を超える出力を実現している．電流を流して反転分布状態となっているスローライト導波路に，種光源としてレーザ光を結合させると，誘導放出により種光源のレーザ光のみが増幅されることを確認している．また種光源の波長を変えても増幅効果が維持

されており，ビームスキャン機能と増幅機能を両立できることを確かめている．

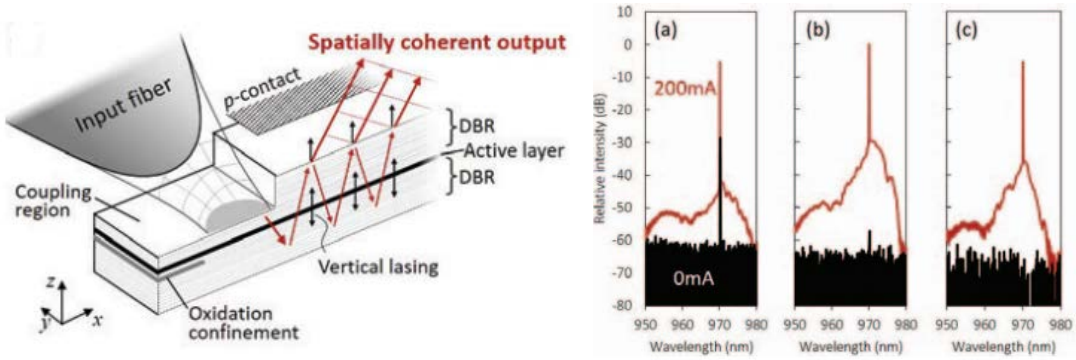


Fig.6-2 スローライト導波路 SOA の増幅特性[2]

6.2 波長可変面発光レーザを集積したスローライト導波路ビームスキャナの作製と評価

現在スローライト導波路には外部光源から光ファイバを通して種光源を結合させている．しかしこれでは外部光源とそこから光を結合させるシステムが必要となり，スローライト導波路の小型・低コストといった利点を活かせていない．分布 Bragg 反射鏡スローライト導波路は面発光レーザと同様の層構造をしているため，これまで面発光レーザとの集積を試みてきた．しかしながら，全く同じ層構造では遮断周波数で発振する面発光レーザのレーザ光は導波方向への伝搬定数をほとんど持たないため，スローライト導波路に結合することは困難であった．またビームスキャンを行うためには光源の波長を変える必要があり，波長掃引の実績があるマイクロマシン面発光レーザとマイクロマシン型のスローライト導波路の集積の検討を行った．

マイクロマシン面発光レーザ集積スローライト導波路ビームスキャナのイメージを Fig.6-3 に示す．横方向に長いメサ構造をしており，そのため酸化狭窄アパチャーも長い長方形となる．上部反射鏡はメサの横から突き出た足で支えられる片持ち梁構造となっている．足の上にはマイクロマシンの駆動のための電極を儲けている．レーザ部分とスローライト導波路部分にそれぞれ電流を流すため，プロトン注入によ

る絶縁を行っている．Fig.6-4 にはデバイスの断面図と動作原理を示す．面発光レーザからの放射光をスローライトに結合させるためには，レーザ側とスローライト側に遮断周波数の差異を付けることが不可欠であるため，マイクロマシンに電圧を印加した際はスローライト側の上部反射鏡は変位せず，レーザ側だけ変位することが理想である．3 方を酸化狭窄，1 方をイオン注入により形成したアパチャーで発振し，スローライト導波路に漏れたレーザ光が増幅されながら伝搬し，状 u 反射鏡から放射される．チューニング電極に電圧を印加することで，レーザ側の上部反射鏡を変位させ発振波長を変化させると，遮断周波数の変化しないスローライト導波路からの出射ビームの放射角が変化する．

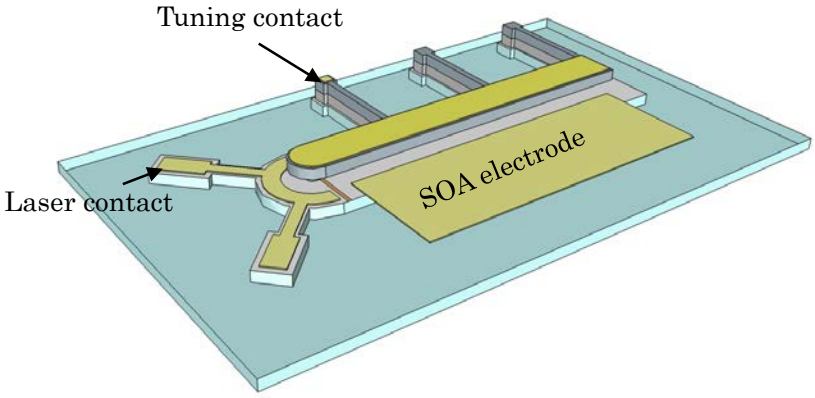


Fig.6-3 マイクロマシン面発光レーザ集積スローライト導波路ビームスキャナのデバイスイメージ

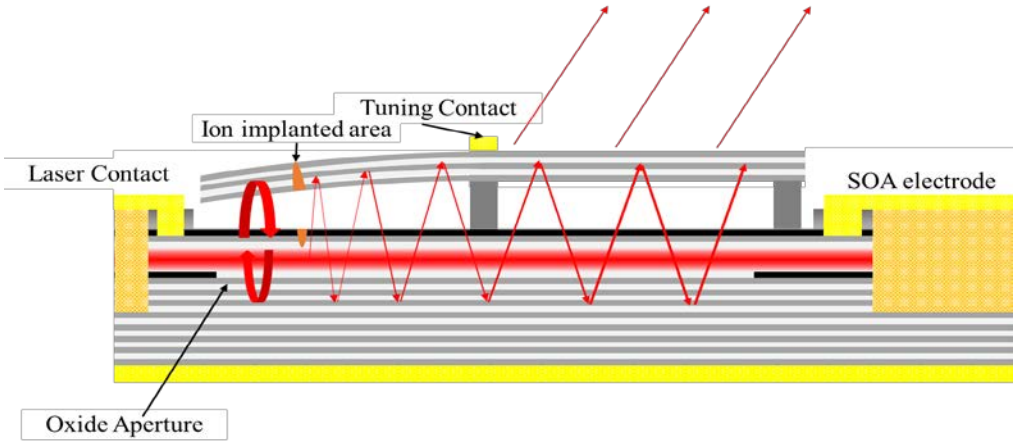
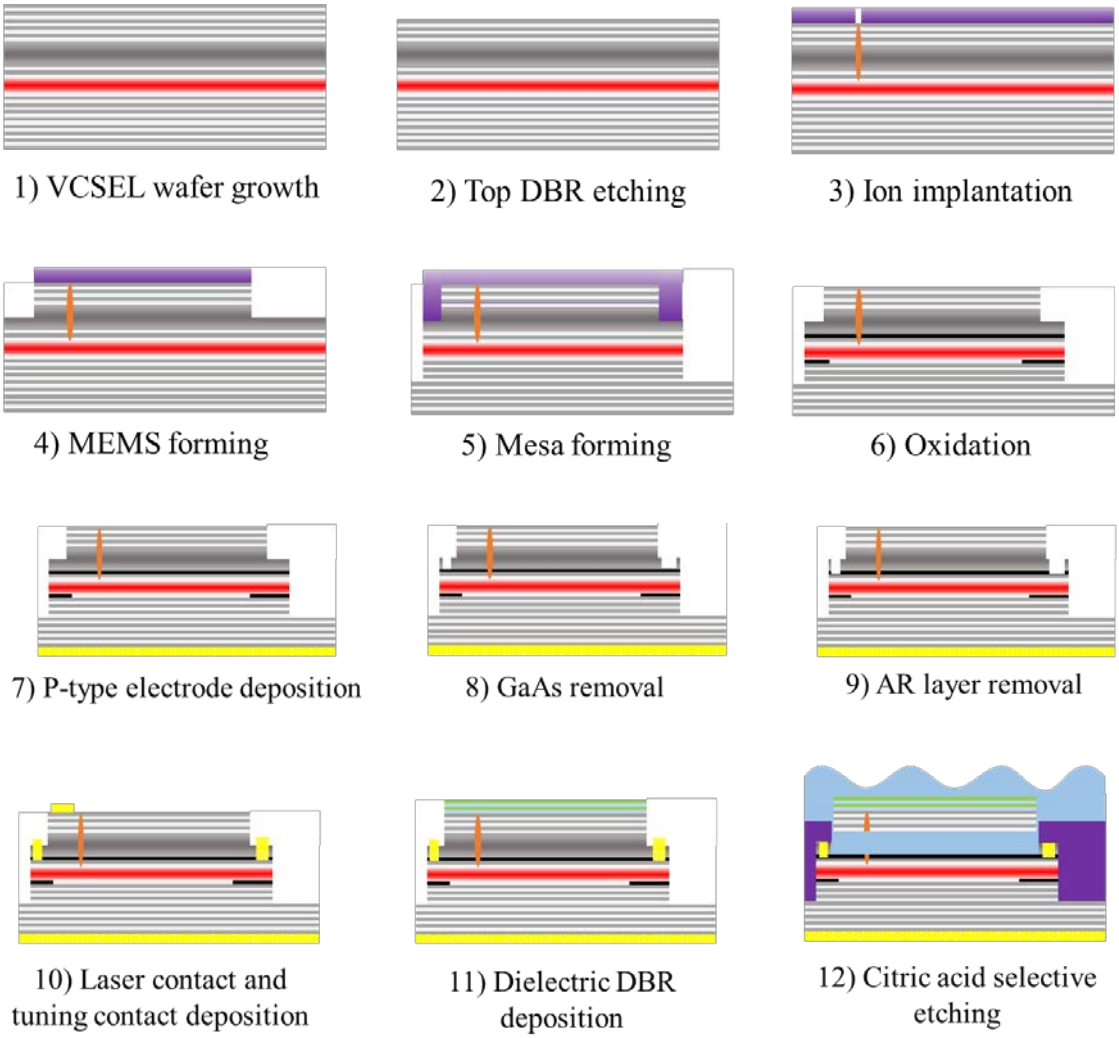
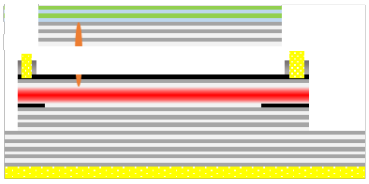


Fig.6-4 マイクロマシン面発光レーザ集積スローライト

導波路ビームスキャナの動作イメージ

Fig.6-5 に作製プロセスを示す．基本的にはマイクロマシン面発光レーザの作製プロセスと同一である．始めにレーザ部とスローライト部のアイソレーションを取るためにプロトン注入を行うが，マイクロマシン面発光レーザのウェハでは，GaAs 犠牲層を含むため活性領域の上に 4.5μm 近い層を成長している．イオン注入ではイオンの加速電圧が高くなるに応じて注入深さが深くなるが，一般的なイオン注入では 300keV～400keV が加速エネルギーの上限である．400keV のイオン注入においてもイオンは 4μm 程度しか注入できず，今回用いたウェハでは完全なアイソレーションは得られないため，イオン注入の前に上部 DBR を数ペア除去した．またこれにより減少した反射率を補うために電極蒸着後に誘電体ミラーを成膜した．





13) Critical point drying

Fig.6-5 デバイス作製プロセスフロー

・DBR 除去

イオン注入においてアイソレーションを充分に取るために上部反射鏡を 8 ペア(約 1.1μm)除去する．エッチングには硫酸(濃硫酸：過酸化水素水：純水＝1:8:80)を用いる．エッチングレートは 600nm/min 程度，1 ペアの除去に 15s 程度かかるが色の変化がわかるため，エッチング時間は目視で行った．硫酸エッチングでは面内でエッチング量の分布ができてしまい，8 ペアエッチングすると 1 ペア程度の誤差が生じてしまうため，比較のために 8 ペアエッチングのものの他に 4 ペアエッチングしたものも用意した．4 ペアエッチングのものでは，活性層まで深くイオンの加速エネルギーが足りないため，十分なアイソレーションは期待できないが，イオンの深さには分布があるため，イオン注入を全く行わない物と比べれば,アイソレーション効果が期待できる．作製したデバイスで測定した抵抗値は，4 ペアエッチングのもので 10～20kΩ，8 ペアエッチングしたもので最大 100kΩ 程度となった．上部反射鏡のないダミーメサに電流を流し近視野像を観察したところ，Fig.6-6 に示すように，どちらのウェハでもレーザ部に光が閉じ込められており，電気的アイソレーションが確認できた．

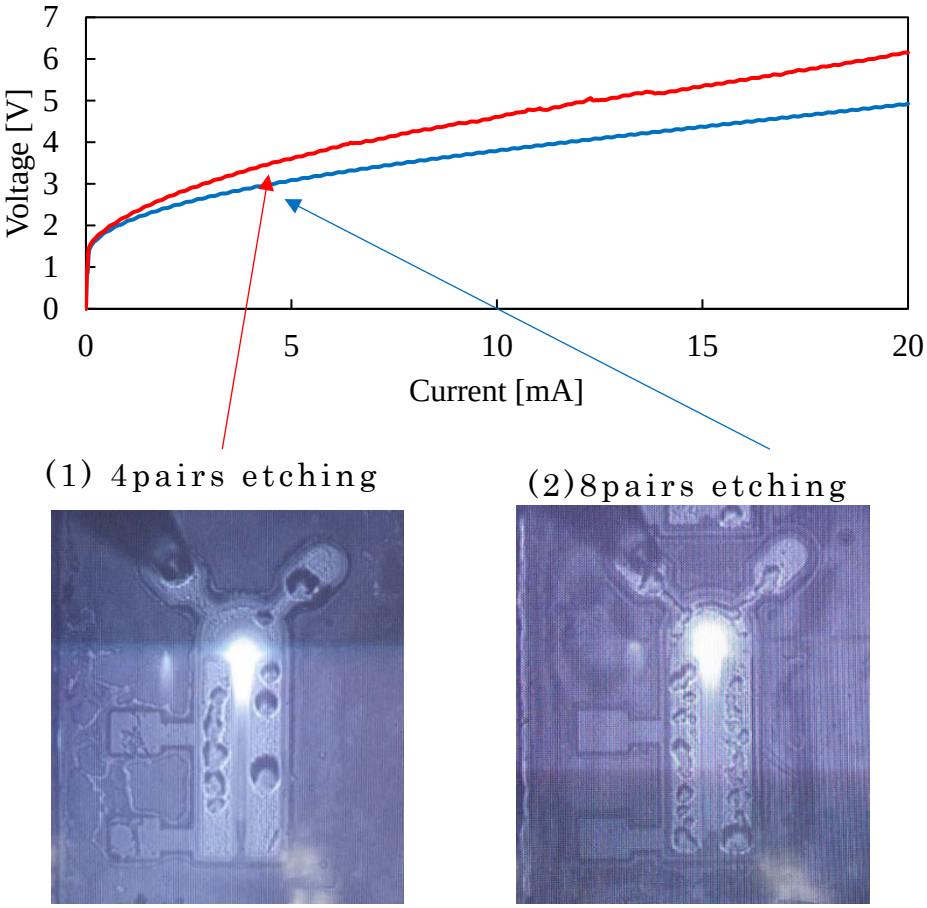
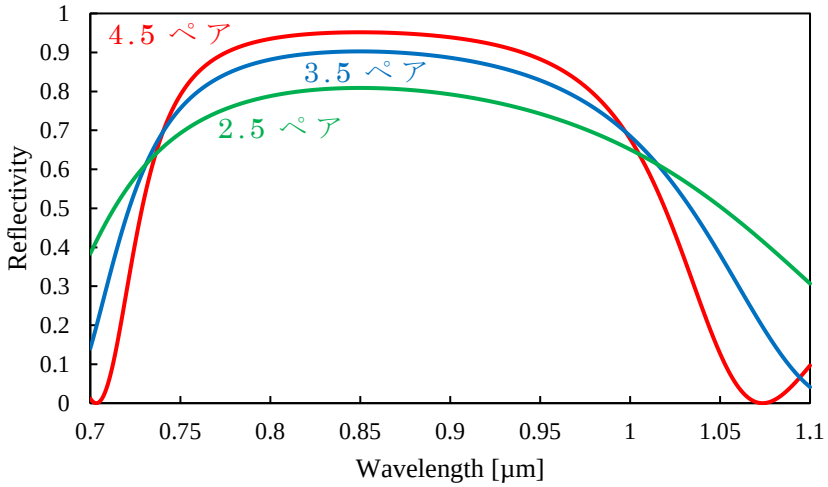


Fig.6-6 ダミーメサの発光パターンと I-V 特性

・誘電体 DBR 蒸着

イオン注入前に上部 DBR を一部除去しており反射率が低下してしまう為，低下した反射率を補うために誘電体 DBR の蒸着を行う．電子ビーム蒸着(EB 蒸着)装置を用いてリリース前に Ta_2O_5/SiO_2 の DBR を 4.5 ペア成膜する．エッチングしたあとの上部反射鏡は BHF に曝されているため，Al 組成の大きい $Al_{0.85}GaAs$ はエッチングされて $Al_{0.16}GaAs$ が露出していると考えられる．その上に 140nm の SiO_2 を製膜してるため屈折率の大きな Ta_2O_5 から成膜し，最後の層は同様に Ta_2O_5 とする．EB 蒸着で成膜する TaO と SiO_2 の屈折率はだいたい 2.1 と 1.46 である．まず G-solver を用いて誘電体 DBR の反射率を求めた．



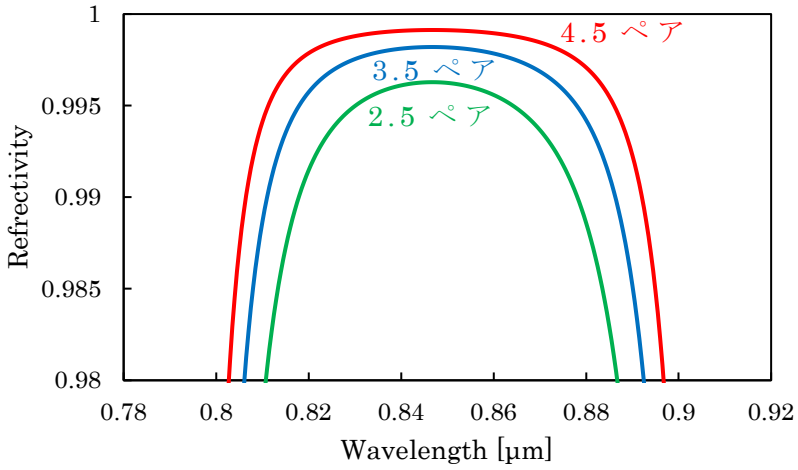


Fig.6-7 誘電体 DBR の反射率計算

Fig.6-8 半導体 DBR と誘電体 DBR の全体の反射率

Fig.6-7 には，入射媒質・出射媒質共に空気としたときの誘電体 DBR の反射率を示す．反射率がピークとなる 850nm 付近では，4.5 ペアで 95%，3.5 ペアでも 90%の反射率が得られている．また 11 ペアの半導体 DBR ($Al_{0.85}GaAs/Al_{0.16}GaAs$)を足した場合の反射率を Fig.6-8 に示す．3.5 ペアの誘電体 DBR でも 99.8%，4.5 ペアの DBR だと 99.9%の反射率が得られるという結果になった．一方，Fig.6-9 には実際に EB 蒸着で成膜して透過率を測定した結果を示す．4.5 ペアの成膜をしているものの，最大でも 85%程度の反射率しか得られておらず，また反射帯域の

中心が 850nm からずれる結果となっており，DBR の各膜厚が理想的ではなかったと思われる．一方計算において，単体の誘電体 DBR では 80%の反射率しか得られていない 2.5 ペアの DBR でも，11 ペアの半導体 DBR を追加することで 99.5%の反射率は得られているため発振を得るためには問題ないと考えられる．

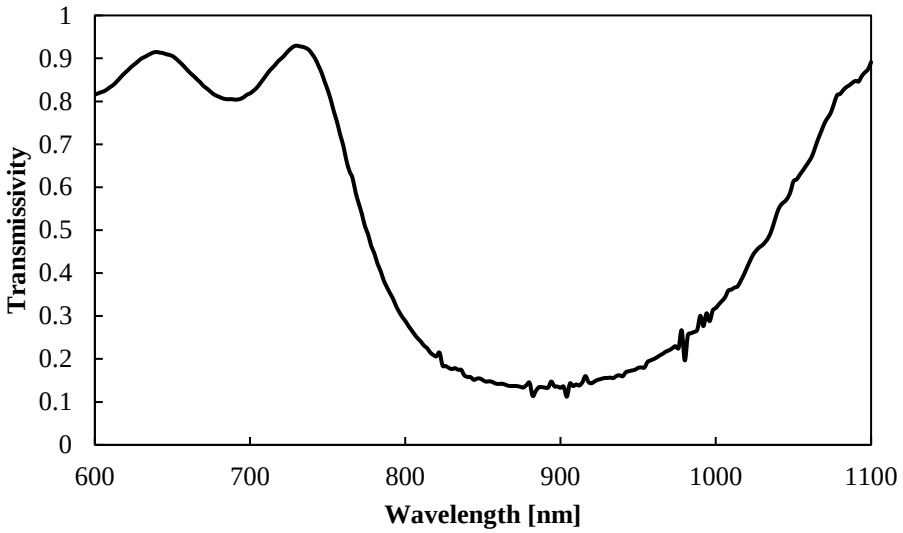


Fig.6-9 EB 蒸着した誘電体 DBR の透過率

作製したデバイスの顕微鏡写真と発振している状態での CCD イメージを Fig.6-10 に示す．Fig.6-11 には発振が得られたデバイスの I-L-V 特性，Fig.6-12 にはスペクトルを示す．このデバイスは DBR を 4 ペアエッチングしたものである．DBR を 4 ペア，8 ペア除去したデバイスで共に発振が得られたが，8 ペアエッチングしたものでは出力が弱く，計算通りの反射率が得られていないと考えている．閾値電流は 6mA で，10mA の注入電流で 0.2mW の出力が得られている．発振波長は 862.4nm で，単一モード出力が得られている．

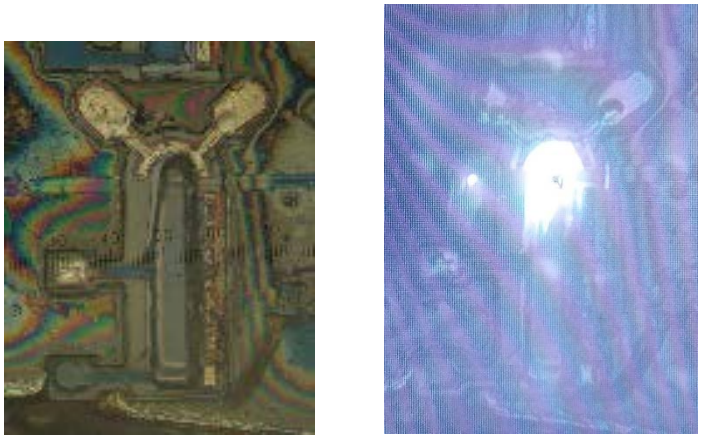


Fig.6-10 デバイスの顕微鏡写真と発振時の CCD 画像

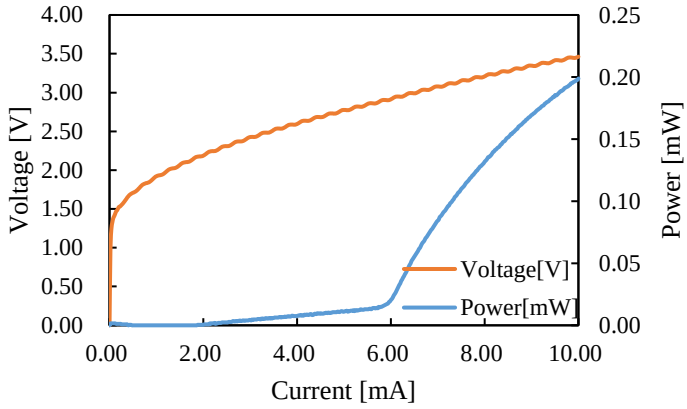


Fig.6-11 レーザ部の I-L-V 特性

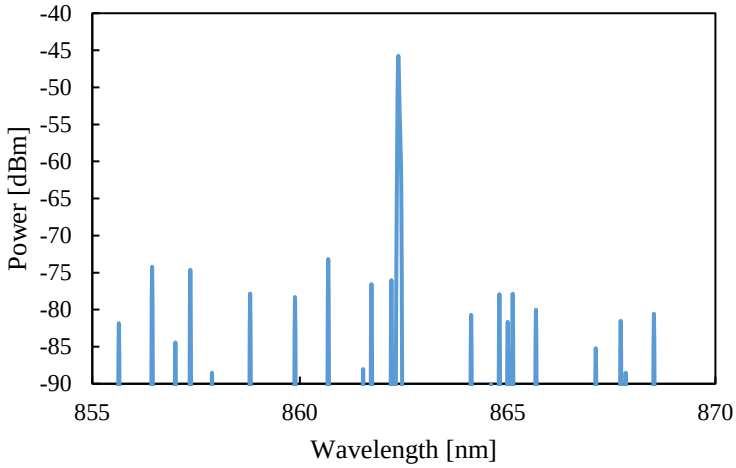


Fig.6-12 レーザ部の発振スペクトル

また Fig.6-13 にはマイクロマシンに電圧を印加した際の波長掃引特性を示す.同じウェハを用いた従来のマイクロマシン面発光レーザでは,

20V 程度の電圧印加で 30nm 以上の波長掃引ができていたが，このデバイスでは 32V 印可しても 1nm 程度しか掃引できなかった．これは誘電体 DBR の成膜が一因だと考えられる．Fig.6-14 の SEM 画像に示すように，半導体 DBR 上に誘電体 DBR を蒸着したため，熱膨張係数の違いから上部反射鏡が上方向に反っている．この図の中でスローライト導波路は左に位置するが，反った上部反射鏡からの反射光はスローライト導波路と反対側へ散乱してしまう．この状態では発振を得ることは難しく，発振が得られたデバイスでは何かしらの制限により，反射鏡があまり反っていないものと考えられる．誘電体 DBR の成膜の際には熱に強い PMGI SF15 を厚塗りした上に感光性のある AZ5200NJ を塗ってパターニングを行うが，EB 蒸着では高温になるためレジストが焼けてしまいパターンが崩れて一部上部反射鏡の外側に蒸着されたものがあった．その誘電体が基板側とくっつき上部反射鏡が反らないように抑えになっている，または犠牲層エッチングの際にクエン酸が GaAs をエッチングする妨げとなって部分的に犠牲層が残っている等の原因によってレーザ側の上部反射鏡がほぼ水平に保たれているデバイスに限り，垂直発振が得られたのではないかと推測しいている．そのため，マイクロマシンを駆動していない状態で垂直発振が得られていないデバイスにおいても，電圧印加により上部反射鏡を水平に近づけられれば，垂直発振が得られると考えられる．ただし今回のデバイスでは 50V 印可しても垂直発振は得られていない．レーザ側の反射鏡が上方向に大きく変位していることから静電引力が弱く，充分に反射鏡を引きつけられなかったと推測する．

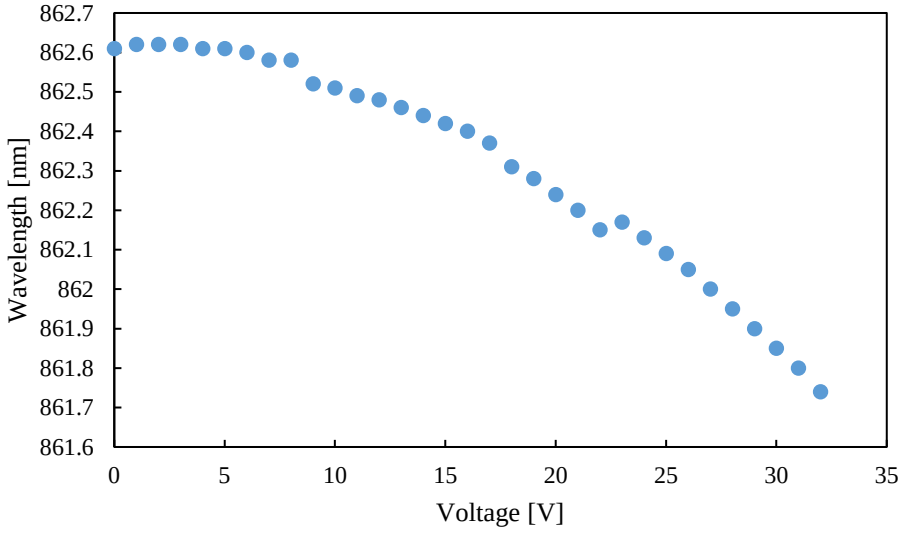


Fig.6-13 電圧印加による波長掃引特性

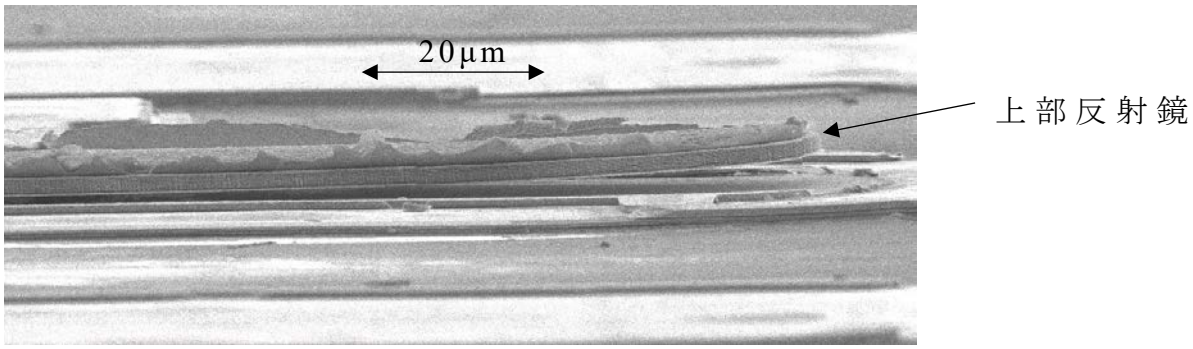


Fig.6-14 リリース後のデバイス側面 SEM 画像

最後にレーザ発振が得られていないデバイスのマイクロマシンを駆動した際の特性について Fig.6-15 に示す．このデバイスは垂直発振が得られていないものである．マイクロマシンの長さは約 300μm あり，レーザと反対側には誘電体 DBR の無い領域が 50μm ほど存在し，スローライト導波路を伝搬してくるとそこから放射光を観測することができる．Fig.6-15 はレーザ側に一定の電流を流して CCD で観測したデバイスの写真である．この図から，マイクロマシンに電圧を印加していくと放射量域からの光強度が強くなることがわかる．マイクロマシンに電圧を印加したことによりレーザ側の共振波長が短くなり，導波路側

で横方向の伝搬定数が大きくなったため，スローライト導波路の反対側まで伝搬するようになったためと考えられる．今後は遠視野像を測定することで，マイクロマシンの印加電圧により出射方向が変化するかを確かめていく．またスローライト導波路に電流を流し，増幅効果の実証も行いたい．

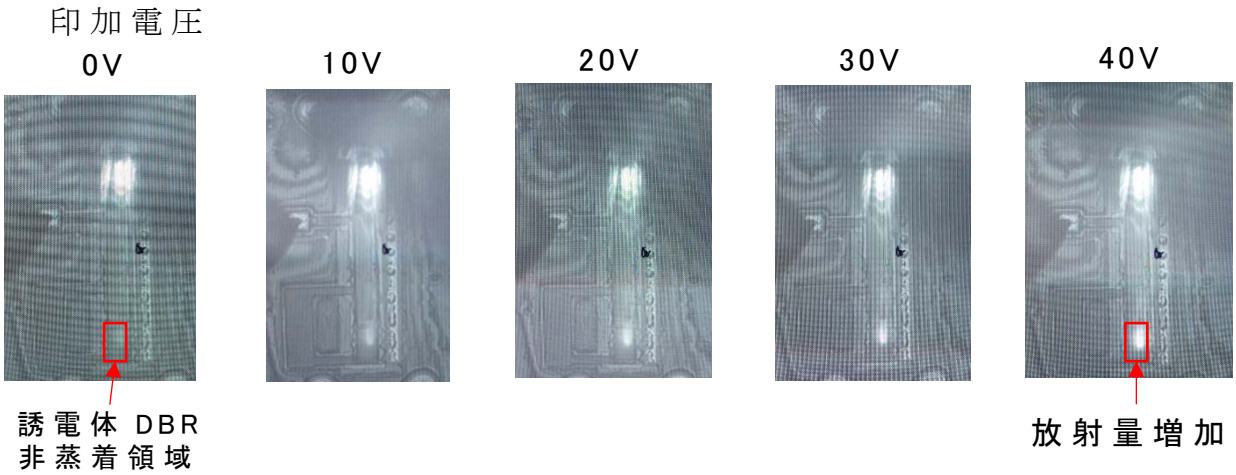


Fig.6-15 マイクロマシンに電圧をかけたときのデバイスの CCD 画像

6.3 まとめ

マイクロマシン面発光レーザとスローライト導波路の集積デバイスの作製を行った．面発光レーザと同一の層構造を持つスローライト導波路は光増幅機能とビームスキャン機能を持ち合わせており，近年注目されている LiDAR への応用が期待できるデバイスである．上部反射鏡をマイクロマシン構造としたスローライト導波路においては，これまで本研究室で実証してきたマイクロマシン面発光レーザと完全に同一の層構造で実現でき，同一のプロセスで作製可能である．一方，レーザへの電流注入とスローライト導波路での光増幅を両立するためには，レーザ部とスローライト導波路部で電気的アイソレーションが必要となる．マイクロマシン構造の VCSEL ウェハでは約 1μm の GaAs 犠牲層があるため通常のイオン注入では注入エネルギーが足りないため，上部反射鏡を 4 ペア・8 ペア除去してからイオン注入を行った．イオン注入による抵抗は，4 ペア除去したもので 10~20kΩ，8 ペア除去した

もので最大 100kΩ 程度となり，イオン注入の深さによる差異が認められたが，上部反射鏡のないダミーメサの近視野像観測ではどちらもイオン注入により発光領域が制限されており，閉じ込め効果を確認できた．

イオン注入のために DBR を削ったことにより低下した反射率は，Ta_2O_5/SiO_2 の誘電体 DBR を 4.5 ペア蒸着することで補償した．Ta_2O_5，SiO_2 の屈折率はそれぞれ 2.1，1.46 であり，厳密結合波解析を用いた計算では反射率は 95%程度であったが，実際にガラス基板上に成膜した DBR では 80%程度しか得られなかった．一方誘電体 DBR の反射率が 80%であっても半導体 DBR の反射率も加味すれば，全体の反射率は 99.5%に達する見込みである．

作製したデバイスでは，上部反射鏡を 4 ペア，8 ペア除去したウェハそれぞれで発振が得られた．一方で 8 ペア除去したものでは出力が非常に弱く，上部反射鏡の反射率が不十分であったと考えられる．4 ペアエッチングしたものでは，閾値電流 6mA，10mA の注入電流の時に 0.2mW の出力が得られた．発振波長は 862.4nm であり，ウェハの共振波長の設計値は 850nm であるため，上部反射鏡が長共振器側へ変位したためと考えられる．実際に SEM で観測した上部反射鏡は大きく上方向に反っており，多くのデバイスで発振が得られなかった原因であると推測される．

垂直発振が得られたデバイスでは，マイクロマシンに 32V 印可しても 1nm 程度しか波長掃引を行えなかった．EB 蒸着の最中に高温によりフォトレジストのパターンが崩れてしまった箇所があり，誘電体がマイクロマシンの側面に付着し，上部反射鏡が反らなかったデバイスで発振が得られたため，その誘電体が波長掃引の阻害要因になったと考えている．

一方反射鏡が上方向に反ったデバイスでも電圧印加により水平に近づければ発振が得られる可能性がある．しかし 40V 程度印可しても発振が得られなかった．SEM で見る限り反射鏡の先端ではエアギャップの厚さが数倍になっており，レーザ部分の上部反射鏡に適切に静電引力

がかからなかったためと考えられる．静電引力を強くするためにレーザ部の反射鏡の面積を広げる等の改善が今後必要である．
垂直方向のレーザ発振が観測されていないデバイスに電流を流し，スローライト導波路の反対側での放射強度を観測した．200μmのスローらと導波路を持ち，終端の50μmに誘電体DBRを持たないこのデバイスでは,スローライト導波路を伝搬してきた光は終端の誘電体DBRが成膜されていない部分から放射される．このデバイスのマイクロマシンに0Vから40Vまで電圧を印加し駆動すると，放射光強度が増加することが確認された．レーザ側の共振波長が短波側にシフトしたことにより，スローライト導波路で結合した光の横方向の伝搬定数が大きくなり，終端まで伝搬される光が増えたためと考えられる．今後遠視野像測定により出射ビームの放射角度等を測定していく予定である．

以上本章ではマイクロマシン面発光レーザとスローライト導波路の横方向集積デバイスを提案・作製し，設計の指針と集積デバイスの実現の可能性を示した．

参考文献

[1] 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, Vol. 4, no. 5, pp. 1712-1719, Aug. 2012.

[2] M. Nakahama, X. Gu, A. Matsutani, T. Sakaguchi, and F. Koyama, “Slow light VCSEL amplifier for high-resolution beam steering and high-power operations,” In Lasers and Electro-Optics (CLEO), 2016 Conference on (pp. 1-2), IEEE, Jun. 2016.

第七章　結論

本研究は，大口径面発光レーザの単一モード動作実現のためサブ波長回折格子を用いたモード制御，熱バイモルフ型のアクチュエータを用いた波長可変 HCG VCSEL の温度無依存化，マイクロマシン面発光レーザの高速波長切替，マイクロマシン面発光レーザを集積したスローライトビームスキャナの実現に取り組み，以下の結果が得られた．

第二章　高屈折率差サブ波長格子(HCG)を用いた面発光レーザの横モード制御

アモルファス Si-SiO_2 HCG の角度依存性設計

固定波長 VCSEL の単一モードアパチャーの拡大のためサブ波長回折格子の角度依存性増強の設計を行った．サブ波長格子はその構造により反射率・角度依存性が大きく変化するため，高反射率と強い角度依存性を両立できる構造の探索を行った．ここでは入射光を TM モード，HCG の材料をアモルファス Si，クラッドの材料を SiO_2 とした．厳密結合波解析を用いた計算では Duty Cycle(格子周期に対する格子幅)が 70%の場合に最も角度依存性が強くなることが得られた．また共振器の透過屈折率を用いて計算した各モードの伝搬角度を用いて，15μm 以上の酸化狭窄アパチャーを持つ VCSEL でも単一モード動作が得られると見積もられた．

波長可変 VCSEL に向けた AlGaAs-Air HCG の角度依存性設計

前項の固定波長 HCG VCSEL の横モード制御を拡張し，波長可変 HCG VCSEL での横モードについて計算を行った．波長可変 VCSEL での横モード制御 HCG には，広帯域での高反射率と強い角度依存性が求められる．ここでは格子材料を $Al_{0.65}GaAs$，クラッド層を空気とした HCG を想定した．固定波長の VCSEL と違い，TE モードを想定して計算を行った．また高反射率の条件として，垂直入射に対する反射率が 99%

以上とした．計算では格子周期 750nm，DC=27%，格子高さ 185nm としたときに，980nm 帯の VCSEL では，格子の製作誤差±15nm まで許容すると 60nm の波長帯域で 20μm 以上の単一モード開口径が得られる結果となった．

以上本章では HCG の反射率角度依存性の増強により，大きな酸化狭窄開口径のデバイスで単一モード動作の可能性を計算により示した．

第三章　HCG マイクロマシン面発光レーザの波長温度無依存化

熱バイモルフ型アクチュエータを用いた HCG MEMS VCSEL の温度無依存化の設計

波長多重通信等の絶対波長が重要なアプリケーションに向けた光源として HCG MEMS VCSEL の温度無依存化の検討をした．本研究室ではすでに DBR を上部反射鏡として用いた MEMS VCSEL で温度無依存化を達成しているが，同様の構造を HCG MEMS VCSEL へ適用した．

熱バイモルフ型のアクチュエータを用いるためには，片持ち梁の上に片持ち梁の材料である $Al_{0.65}GaAs$(熱膨張率 5.6ppm/K)より熱膨張率が大きい材料を歪み制御層として成膜する必要があり，金(同 14.2ppm/K)，Ti(8.5ppm/K)，Cr(6.2ppm/K)，$Al_{0.3}GaAs$(6.0ppm/K)を検討した．計算より，片持ち梁が長くなる，歪み制御層が厚くなる，片持ち梁の材料と熱膨張率差が大きくなると，梁変位量の温度係数は大きくなることがわかった．屈折率による波長のシフト量は 0.07nm/K 程度であり，光学的な共振器長は約 7λ であるため，梁の変位量が-0.5nm/K 程度で温度無依存化が達成できる．片持ち梁の長さが 50μm のとき，Au や Ti では 5nm 以下の膜厚が必要となり製作が困難となる．一方 $Al_{0.3}GaAs$ では 15nm で温度係数-0.5nm/K が得られ，膜厚が 5nm 程度変化しても片持ち梁の長さを 10μm 程度変化させれば温度無依存化となる結果が得

られた．$Al_{0.3}GaAs$であればウェハと一括成長が可能であり，精密な膜厚制御も期待できる．

以上本章ではHCG MEMS VCSELにおける発振波長温度無依存化の可能性を示した．

第四章　ナノインプリントリソグラフィーを用いたHCG面発光レーザの作製と評価

ナノインプリントリソグラフィー技術の確立

ナノインプリントリソフラフィーを用いてサブ波長回折格子の作製を行った．HCGは百nmオーダーの格子形状であり，電子ビーム(EB)リソグラフィを用いることが一般的であるが，プロセス時間・コストの削減のため，金型をレジストに押し当てパターンを転写するナノインプリントによる作製を試みた．まずレジストの厚さによるHCGの作製精度を検討した．レジストが厚すぎると転写したあとに溝部分の残膜を取り除く等方性のオゾンアッシングにより，格子幅の現象が生じる．一方で薄すぎると部分的に格子に欠陥が生じる．そのため，レジストの厚さ＝格子の溝深さ×DC＋20nm程度がふさわしい．

ナノインプリントによりパターニングを行いICP-RIEにより形成したHCGは，壁面角度85°の高い垂直製を持った格子の形成が確認できた．また残膜を薄くした時には，格子幅はレジストの形状通りであった．

作製したHCGは遠視野像を測定することにより反射律を求めた．まず先球ファイバから放射したレーザ光を高反射率のDBRで反射させその反射光強度を測定する．これを参照として，HCGの反射光の割合を反射律とする．測定した反射率は，SEMを用いて格子形状を測定し計算したものとよく一致した．

HCG VCSELの作製

ナノインプリントを用いて作製した HCG を上部反射鏡として持つ VCSEL の製作を行った．ハーフ VCSEL 基板に SiO_2 クラッド層，アモルファス Si HCG 層をプラズマ CVD で成膜し，前項に示した HCG の作製を行ったあとのプロセスは，上部反射鏡が DBR である一般的な VCSEL のものとほぼ同じである．

DC=64%の HCG を用いて作製した VCSEL では，5μm の酸化狭窄アパチャーを持つレーザで単一モード動作が得られた．同程度のアパチャーを持つ DBR VCSEL ではマルチモード発振となっているため，横モード制御を実証した.遠視野像においても単峰性のビームが確認でき，単一モード動作を確認した．一方最も角度依存性が強くなる設計からずれてしまっていたため,11μm のアパチャーを持つレーザではマルチモード動作となってしまった．また，DC＝69%で角度依存性がさらに強い HCG を用いた際には 10μm 角のアパチャーを持つレーザで単一モード動作が得られ，角度依存性の強さによる横モード制御性の違いを確認した．

HCG MEMS VCSEL の作製と温度係数の測定

HCG をマイクロマシン構造とした MEMS VCSEL の作製を行った．固定波長 VCSEL の HCG と同様，ナノインプリントリソグラフィーにより HCG を作製した．すでに確立されている DBR MEMS VCSEL の作製プロセスを基に作製を行った．ただし HCG は数百 nm の格子構造であり，DBR では大きな問題とならなかった半導体へのダメージが，致命傷となる．主に酸化プロセスと GaAs 犠牲層エッチングが主に HCG へダメージを与えるため，プロセスの検討を行った．

酸化狭窄アパチャーと AR 層を作製するための酸化プロセスでは Al 組成の高い AlGaAs を高温水蒸気下で酸化しアルミナにする．AlGaAs は Al 組成が低くなると酸化レートが大きく低下するものの，$Al_{0.98}GaAs$ を 30μm 以上酸化するため HCG の材料である $Al_{0.65}GaAs$ もわずかに酸化される．10nm オーダーでも酸化されれば特性が変化してしまうため，スパッタリングによる SiO_2 を製膜し酸化から保護できることを確

認した．またクエン酸による GaAs 犠牲層エッチングでは，酸化同様高いエッチングレート比が必要であるため pH の調整や低温でのエッチングにより,十分なエッチングレート比が得られることを確認した．作製したデバイスではブリッジ構造のマイクロマシンを持つ VCSEL で発振が得られた．酸化アパチャーサイズは約 5μm 角であったが単一モード動作が得られており，HCG の横モード制御によるものと考えられる．マイクロマシンの両持ち梁上に 20μm の $Al_{0.3}GaAs$ のひずみ制御層を持つこのデバイスではペルチェ素子により加熱することで発振波長のブルーシフトが得られた．通常温度が上昇すると波長はレッドシフトするため，それを打ち消し短波側へ波長がシフトするほどに反射鏡が基板側へ変位したことを意味する．マイクロマシンの変位量は梁の長さに依存するためより短い梁を用いれば，波長シフト量を 0 に近づけることができると考えている．

以上本章ではナノインプリントリソグラフィーを用いることで，大口径 VCSEL で横モード制御が可能であることを実験的に示した．また HCG MEMS VCSEL で発振波長温度無依存化の実現の可能性を示した．

第五章　マイクロマシン面発光レーザの波長スイッチングの高速化

マイクロマシン面発光レーザの梁駆動計算

リンギング抑制のため，マイクロマシン片持ち梁の電圧印加応答を計算した．ステップ電圧を印加するとマイクロマシンのリンギングにより波長スイッチングの高速化が困難であり，片持ち梁の印加電圧応答を計算することでリンギングの抑制を試みた．電圧駆動のマイクロマシンは SDOF モデルで表されることが知られているため，電圧を変化させたときの波長変化量から片持ち梁の静電容量，一定振幅の正弦波電圧を印加した時の波長掃引幅から共振周波数，この時の波長掃引幅

の Q 値から空気抵抗を求め，MEMS VCSEL のマイクロマシンをモデル化した．
このモデルを用いた計算により，2 ステップ電圧を用いることでリンギングを抑制できるという結果が得られた．適切な電圧を片持ち梁の共振周波数の 2 倍の時間挿入することでリンギングを完全に抑制できることがわかった．ここで用いたデバイスでは片持ち梁の共振周波数が 200kHz であったため，約 2.5μs で波長スイッチングができるという結果が得られた．

作製したデバイスの測定によるリンギング抑制と高速波長切替の実証

前項で得られた電圧波形を実際にデバイスに印可しリンギング抑制と高速スイッチングの実証を行った．中間電圧の電圧は計算とわずかにずれが生じたが，2.5μs の中間電圧を挿入した 2 ステップ電圧を印加することで 2 つの鋭いピークを持つ時間平均スペクトルが得られた．
また，矩形電圧を印加した場合には複数ピークを持つ広がったスペクトルが得られ，これらは前項の計算で得られた片持ち梁の挙動を発振波長の時間平均スペクトルに変換したものと同様のものであり，2 つの鋭いピークを持つ時間平均スペクトルが得られた 2 ステップ電圧を印加した際には，リンギングを完全に抑制できていると言える．また WDM 用光源への応用も考慮し 4 波長でのリンギングフリースイッチングを検討したが，2 波長の時と同様それぞれの波長で鋭いピークを持つスペクトルが得られ，4 波長でもリンギングを抑制できることを示した．
またチューナブル光フィルタを用い発振波長の時間応答を擬似的に測定した．2 ステップ電圧印加に対し片持ち梁の挙動が定常状態となっている MEMS VCSEL からの放射光をチューナブルフィルタに通し，チューナブルフィルタの透過波長を少しずつシフトさせながら PD で受光強度の時間変化を測定する擬似的に波長の時間変化を測定することができる．この測定によりリンギングが抑制されていることがわかり，中間電圧の保持時間である 2.5μs で波長切替が完了していること

が確認できた.波長切替時間は片持ち梁の共振周波数に依存しており,片持ち梁を短くするなどにより共振周波数を上げることができれば,さらなるスイッチングの高速化が可能である.

以上本章ではマイクロマシンのスイッチング電圧波形を 2 ステップ,オーバードライブとすることでリンギングを抑制すると共に高速なスイッチングが達成できることを示した.

第六章　波長可変面発光レーザの機能集積化

波長可変 VCSEL を集積したスローライト導波路ビームスキャナの作製

波長可変面発光レーザとスローライト導波路ビームスキャナの集積デバイスの作製を行った. 波長掃引によるビームスキャン機能と光増幅機能を併せ持つスローライト導波路は LiDAR 等への応用が期待されるデバイスであるが, 別に波長可変光源が必要であった. マイクロマシン面発光レーザとスローライト導波路は同一の層構造で実現することができる.

作製プロセスは基本的にマイクロマシン面発光レーザと同様であるが,レーザ部とスローライト部にそれぞれ電流注入を行うため, イオン注入により電気的アイソレーションをとった. マイクロマシン面発光レーザのウェハでは GaAs 犠牲層があることなどから電流拡散層が表面から深い位置にあるため,あらかじめ上部 DBR を一部硫酸で除去してイオン注入を行った. またこれにより減少した上部反射鏡の反射率は誘電体 DBR を蒸着することで補償した.

上部 DBR は 4 ペアと 8 ペア除去したものを用いたが, 前者ではレーザコンタクトとスローライト導波路の SOA コンタクト間の抵抗は 10kΩ 程度であったが, 後者では最大 100kΩ 程度が得られ, イオン注入の深さによる抵抗値の違いを確認できた. 一方レーザ部にのみ電流

を流した際には両者とも閉じ込めが確認でき，上部反射鏡を全て取り除いたダミーメサで観測した近視野像では大きな差は見られなかった．作製したデバイスでは，垂直発振が得られたものがあったが，マイクロマシンに電圧印加を行ってもほとんど波長掃引はできなかった．これは誘電体 DBR がマイクロマシンと基板の間についてしまい，マイクロマシンが駆動する妨げとなったためと考えられる．また発振が得られていないデバイスであったが，マイクロマシンに電圧印加することでスローライト導波路の反対側からの放射の増加が見られ，レーザ部の共振波長が短波側に変化したことによりスローライト導波路に於いて横方向の伝搬定数が増加し長い伝搬が可能になったためと考えている．今後遠視野像の測定によりビーム出射方向の確認や，SOA への電流注入による増幅効果の実証を行う予定である．

以上本章ではマイクロマシン面発光レーザとスローライト導波路の横方向集積デバイスを提案・作製し，設計の指針と集積デバイスの実現の可能性を示した．

以上本論文では面発光レーザのモード制御・波長制御を目的とし，数値解析とデバイスの作製評価により，その指針を示した．

本研究に関する発表

論文

1) Shunya Inoue, Junichi Kashino, Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Takahiro Miyashita, Fumio Koyama, “Highly Angular Dependent High-contrast Grating Mirror and its Application for Transverse-mode Control of VCSELs”, Japanese Journal of Applied Physics, Vol.53, No.9, 090306, (2014).
2) M.Nakahama, H.Sano, S.Inoue, T.Sakaguchi, A.Matsutani, M.Ahmed, 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. 53 (1), 010303 (2014).
3) M.Nakahama, H.Sano, S.Inoue, T.Sakaguchi, A.Matsutani, F. Koyama, “Tuning Characteristics of Monolithic MEMS VCSELs With Oxide Anti-Reflection Layer”, IEEE Photon. Technol. Lett., VOL. 25, NO. 18, pp.1747-1750 (2014).
4) Shunya Inoue, Shun Nishimura, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, and Fumio Koyama, “High-speed wavelength switching of tunable MEMS Vertical Cavity Surface Emitting Laser by ringing suppression”, Japanese Journal of Applied Physics, accepted
5) Shunya Inoue, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Dual beam emission from VCSEL with angular dependent high-index contrast grating," IEICE Electronics Express, submitted.
6) Shunya Inoue, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Wavelength control of high contrast grating micro-machioned vertical cavity surface emitting lasers," Jpn. J. Appl. Phys., submitted.

2, 国際会議

1) M. Nakahama, H. Sano, S. Inoue, T. Sakaguchi, A. Matsutani, F. Koyama,“Giant wavelength-temperature dependence of 850nm VCSELs with a metal/semiconductor thermally actuated mirror,” SPIE OPTO 2013, 86390F-6, Jan., SF, USA, (2013).
2) M. Nakahama, H. Sano, S. Inoue, A. Matsutani, T. Sakaguchi, and F. Koyama, “Electro-thermally Tunable 850nm VCSELs with metal/semiconductor Thermally Actuated Mirror”, 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), ML-2, Kyoto, Japan, (2013)
3) Junichi Kashino, Shunya Inoue, Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Takahiro Miyashita and Fumio Koyama, “Transverse Mode Control of VCSELs Using Angular Dependent High-contrast Grating Mirror”, 2013 IEEE Photonics Conference (IPC), TuE2.2, WA, USA, (2013)
4) Masanori Nakahama, Hayato Sano, Shunya Inoue, Takahiro Sakaguchi, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, “Wavelength Tuning and Controlled Temperature Dependence of MEMS VCSELs with Thermally and Electrostatically Actuated Micromachined Mirror”, 18th Microoptics Conference (MOC’13), C-3, Tokyo, Japan, (2013)
5) S. Inoue, F. Koyama, “Highly Angular Dependent High-Contrast Grating Mirror for Transverse-mode Control of VCSELs”, International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW2014), St Petersburg, Russia, (2014)
6) S. Inoue, F. Koyama, “High-Contrast Grating Spatial Mode Filter for Widely Tunable Vertical Surface Emitting Laser”, 19th Microoptics Conference (MOC’ 2014), Nice, France, (2014)
7) S. Inoue, A. Matsutani, H. Ohtsuki, T. Miyashita, F. Koyama, “Dual beam single-mode vertical cavity surface emitting lasers using high-index contrast grating”, 20th Microoptics Conference

(MOC ’15), Fukuoka, Japan, (2015)

8) S. Inoue, A. Matsutani, H. Ohtsuki, T. Miyashita, F. Koyama, “Beam engineering of VCSELs using High-index Contrast sub-wavelength Grating”, International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW2015), Tokyo, Japan, (2015)
9) Shunya Inoue, Masanori Nakahama and Fumio Koyama, “Design of athermal and tunable MEMS VCSELs with a thermally actuated HCG mirror”, SPIE Photonics West OPTO 2016, SF, USA, (2016)
10) Shunya Inoue, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, “Fabrication of HCG MEMS VCSELs for athermal operations”, OECC PS 2016
11) S. Inoue, M. Nakahama, A. Matsutani, T. Sakaguchi, F. Koyama, “Consideration and Fabrication of athermal HCG MEMS VCSEL”, International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW2016), Technische Universität München, Germany, (2016)
12) Shunya Inoue, Shun Nishimura, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi and Fumio Koyama “High speed wavelength switching of tunable MEMS VCSEL by suppressing ringing.”, SPIE Photonics West OPTO 2018, SF, USA, (2018)

国内口頭発表

1) 井上 俊也, 佐野 勇人, 中濱 正統, 小山 二三夫, “波長可変面発光レーザの掃引幅拡大のための分布反射鏡の染み出し長制御”, 第 73 回応用物理学会秋期学術講演会, 12a-C6-3, 愛媛大学・松山大学, 2012 年 9 月
2) 中濱正統, 井上俊也, 佐野勇人, 小山二三夫, “高屈折率差構造による面発光レーザの光閉じ込め係数の増大”, 第 73 回応用物理学会秋期学術講演会, 12a-C6-1, 愛媛大学・松山大学, 2012
3) 中濵正統, 佐野勇人, 井上俊也, 坂口孝浩, 松谷晃宏, 小山二三夫, “AR 層を有した波長可変 MEMS 面発光レーザの波長掃引特性”, 2013 年電子情報通信学会総合大会, 2013 年 3 月, C-4-11, 岐阜大学, 2013
4) 井上俊也, 樫野純一, 松谷晃宏, 小山二三夫“高屈折率差サブ波長回折格子を用いた VCSEL の横モード制御”, 2013 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-17, 福岡工業大学, 2013 年 9 月
5) 井上 俊也, 小山 二三夫, “サブ波長回折格子波長可変面発光レーザの横モード制御の検討”, 第 61 回応用物理学会春期学術講演会, 18p-F9-14, 青山学院大学, 2014 年 3 月
6) 中濱正統, 井上俊也, 住本裕一, 森脇翔平, 坂口孝浩, 松谷晃宏, 小山二三夫, “波長可変アサーマル面発光レーザの低閾値化に関する検討”, 2014 年電子情報通信学会総合大会, 2014 年 3 月, C-4-26, 新潟大学, 2014
7) 井上　俊也, 松谷　晃宏, 小山　二三夫, “サブ波長格子を用いたデュアルビーム面発光レーザーの作製”. 2015 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-10, 東北大学, 2015 年 9 月
8) 井上　俊也, 松谷　晃宏, 小山　二三夫, “高屈折率差サブ波長格子を用いた面発光レーザの出射ビーム制御”, レーザ・量子エレクトロニクス研究会 (LQE), 神戸市産業振興センター, 2016 年 1 月
9) 井上 俊也, 中濵　正統, 松谷　晃宏, 坂口　孝浩, 小山 二三夫, “サブ波長格子を用いたアサーマル波長可変面発光レーザの製作”, 第 63 回応用物理学会春期学術講演会, 20a-S321-9, 東京工業大学, 2016 年 3 月
10) 井上　俊也, 中濵　正統, 松谷　晃宏, 坂口　孝浩, 小山　二三夫, “HCG MEMS VCSEL の製作と温度無依存化に向けた特性評価”, 2016 年電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-4-23, 北海道大学, 2016 年 9 月

11) 中濱 正統, 井上 俊也, 松谷 晃宏, 坂口 孝浩, 小山 二三夫, “機械的共振を用いた MEMS 波長可変 VCSEL の広帯域掃引・低駆動電圧動作”, 第 64 回応用物理学会春期学術講演会, 15p-422-5, パシフィコ横浜, 2017 年 3 月
12) 井上 俊也, 西村 駿, 中濵 正統, 松谷 晃宏, 坂口 孝浩, 小山 二三夫, “電圧波形制御による MEMS VCSEL のリンギング抑制”, 第 78 回応用物理学会秋期学術講演会, 6p-C14-4, 福岡国際会議場, 2017 年 9 月
13) 旭 利紘, 井上 俊也, 顧 暁冬, 中濵 正統, 小山 二三夫, “MEMS ミラーを有するスローライト SOA の偏光特性”, 第 78 回応用物理学会秋期学術講演会, 6p-C14-10, 福岡国際会議場, 2017

受賞歴
大学院専攻行事である研究構想発表会(平成 25 年 12 月)にて学生研究賞受賞

謝辞

本研究を進めるにあたり多大なるご指導を賜った小山二三夫教授に感謝する．また本研究に関して多くのご意見，ご助言いただきました井筒雅之特任教授，植之原裕行教授，宮本智之准教授に感謝する．

研究を進めるにあたり実験上のサポート, アドバイスをいただいた坂口孝浩助教, ICP エッチング等でのデバイス製作やプロセスのアドバイスをいただいた松谷晃宏半導体 MEMS プロセス技術センター長に感謝する．

光通信研究会等で様々なご助言をいただいた末松安晴名誉教授，伊賀健一名誉教授，荒井滋久教授，浅田雅洋教授，渡辺正裕教授，宮本恭幸教授，國分泰雄教授，馬場俊彦教授，西山伸彦准教授，荒井昌和准教授，雨宮智宏助教

研究生活を支えていただいた秘書の伊藤節子氏，吉田ひろみ氏，苔口祥子氏，千葉とみ江氏，小岩恵津子氏に感謝する．

奨学金という形で学生生活を支えていただいた公益財団法人日本国際教育支援協会井上正之理事長に感謝する．

研究に関して様々なことを教えていただき，実験指導をしていただいた佐野勇人氏，中濵正統氏，顧暁冬氏，樫野純一氏に感謝する．

研究室においてお世話になった反町幹夫氏，Hamed Dalir 氏，相川洋平氏，近藤圭祐氏，藤井新蔵氏，岩崎創氏，齋藤航平氏，貞光雅徳氏，中川大輔氏，中村謙介氏，古川聖紘氏，望月翔太氏，阿久津友宏氏，井原光皓氏，佐野祐太郎氏，清水翔貴氏，星野文哉氏，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，Hu Shanting 氏，Hameeda Ibrahim 氏，北本智士氏，小林卓矢氏，丸山彰氏，頼映佑氏，山川英明氏，荒牧恵悟氏，池田拓磨氏，小森雄貴氏，齋藤季氏，須原壮氏，土岡弘明氏，森田晃平氏，許在旭氏，Ahmed Hassan 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，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，森長端氏，橋谷亨氏に感謝する．

同期として互いに励ましあい切磋琢磨し研究を進めてきた魏徹氏，草野秀行氏，菊池麻子氏，鈴木絢子氏，住本裕一氏，高橋雄太氏，田辺賢司氏，角田健氏，柳館優輝氏に感謝する．

最後に，陰で支えてくれた家族に心より感謝する．