T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ Science Tokyo 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)		
Type(English)	Doctoral Thesis	

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
1.5 Laser Imaging Detection and Ranging
1.6 本研究の目的
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
2.2 高屈折率差サブ波長格子を用いた横モード選択
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
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
2.5 まとめ
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
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

f
6
5
7
2
2
5
7
5
7
7
8
9
F
0
0
4
2
5

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.世界で初のプロブラム 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

6

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

 $\overline{7}$

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.













(c) Grating-Coupled Sampled-





(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

14

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.

15

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]
	Turing Contact Top n-OER P-OBR Bottom n-OER Bottom n-OER Subditate Contact	Loss - Lo	bonded interface Grafwar, O- minor
掃 引 幅 /	31.6nm / 935nm	102nm / 1550nm	150nm / 1310nm
中心波長	(3.4%)	(6.6%)	(11.4%)
共振器構	カンチレバー	ノンブレン	メンブレン
造			
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



(c) Multi oxide layer



(b) Metal aperture





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

19

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, 10us 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 + 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 100us 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.

21





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 ーモード動作をしていれば、高出力の単ー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/usyvlasov//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 multiwavelength 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 <u>http://velodynelidar.com/index.html</u>

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

30

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.



↑: Fundamental-mode ↑:1-st order mode

伝搬角イメージ



Fig.2-1 共振器内の横モード 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A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β₁, β₂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)π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 $\beta_1 = 2$ β2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 $k_a^2\Lambda^2 \ge k_s^2\Lambda^2$ の値に対する $\beta \ge 2\pi/\beta$ 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.

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

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



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.





(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.







(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 SiO2のクラッド層,アモルファス Siの HCG 層を成膜し,アモルフ アス 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., <u>http://www.gsolver.com/</u>

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.

49



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,

(3 - 1)

$$\theta = \frac{L}{R} \ll 1$$

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.

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

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

$$\varepsilon_{i} = \frac{F}{A_{i} \cdot E_{i}} \tag{3-3}$$

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

$$\mathbf{F} = \frac{\alpha_1 - \alpha_0}{1/A_1 \cdot E_1 - 1/A_0 \cdot E_1} \tag{3-5}$$

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

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

であるため、相互作用のモーメント Mrは

$$M_{r} = w \int_{0}^{t_{0}} \left(\frac{F_{r}}{w \cdot t_{0}} \cdot y \right) dy + \int_{-t_{1}}^{0} \left(\frac{-F_{r}}{w \cdot t_{1}} \cdot y \right) = -\frac{t_{0} + t_{1}}{2} \cdot \frac{\alpha_{1} - \alpha_{0}}{1/A_{1} \cdot E_{1} - 1/A_{0} \cdot E_{1}}$$
(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 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 σ(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

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

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

$$\iint_{A} \sigma(z) \cdot z \cdot dz \iint = w \int_{-z_n}^{-z_n+t_0} \left(\frac{E_0 z}{R} \cdot z\right) dz + \int_{-z_n+t_0}^{-z_n+t_0+t_1} \left(\frac{E_1 z}{R} \cdot z\right) dz \quad (3.11)$$
これにより曲率半径 R を書き換えることができる.

$$\frac{1}{R} = \frac{6(t_0 E_0 + t_1 E_1)(t_0 + t_1)}{(t_0 t_1 E_0 E_1)^2 \left[\left(\frac{t_0}{t_1 E_1}\right)^2 + \left(\frac{t_1}{t_0 E_0}\right)^2 + \frac{1}{E_0 E_1} \left(4 \cdot \left(\frac{t_1}{t_0}\right) + 4 \cdot \left(\frac{t_0}{t_1}\right) + 6 \right) \right]} \cdot \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{\frac{\alpha_1}{t_0 E_0} + \frac{\alpha_0}{t_0 E_0}} \right) \quad (3 \cdot 12)$$

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.

$$\alpha_{i}(T) = (1 + \alpha_{i}) \cdot \alpha_{0,i} \cdot (T - T_{0})$$
(3-13)

ここでα_{0,i}は i 層の材料の,温度T₀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

$$\delta_{\rm Th}(\Delta T) = \frac{L^2}{2} \frac{6(t_0 E_0 + t_1 E_1)(t_0 + t_1)}{(t_0 t_1 E_0 E_1) \left[\left(\frac{t_0}{t_1 E_1}\right)^2 + \left(\frac{t_1}{t_0 E_0}\right)^2 + \frac{1}{E_0 E_1} \left(4 \cdot \left(\frac{t_1}{t_0}\right) + 4 \cdot \left(\frac{t_0}{t_1}\right) + 6 \right) \right]} \\ \cdot \frac{(1 + \alpha_1 \Delta T) \cdot \alpha_1 - (1 + \alpha_0 \Delta T) \cdot \alpha_0}{(1 + \alpha_1 \Delta T) \cdot \alpha_1} \tag{3.14}$$

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 & Th(T_0)と T_0 + \Delta 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_0.65GaAs,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

53

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 Alo.3GaAs 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、Alo.3GaAs 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

- 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

59

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 O₃ 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-a, 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

60

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

$T_R \ge T_M \times DC_M$

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 C12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,C12/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 (b)ICP エッチング後の HCG 形 形状 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 O₂RIE 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.



(b) HCG の反射光

 Fig.4-3 反射率測定イメー
 Fig.4-4 FFP 測定による HCG 反射

 ジ
 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.

66





Fig.4-6 デバイス製作プロセスフロー

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.

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

 O2-RIE による残膜処理と C12-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) C12-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°C	10 分
キシレン	120°C	5 分
アセトン	100°C	5 分×2
メタノール	100°C	5 分
02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 SiO2 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

H₂O/N₂ 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

71
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 03 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
03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	スピンコート 5000rpm
布	
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.4-17 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.4-21 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、 v 方向については $\pm 3^{\circ}$ を中心に 2 つのピークが見える. v 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

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. 垂直方向ヘ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.

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

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= 3.3μ m, 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 Alo.99GaAs 層・GaAs 犠牲層・HCGとなる Alo.65GaAs 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 11) Back contact electrode deposition

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 SiO2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 SiO2 であり, SiO2 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 SiO₂ 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 SiO₂ 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 SiO₂ 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 SiO₂ 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, SiO₂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 SiO₂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 SiO₂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 SiO₂ 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 SiO₂ 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 SiO₂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 SiO₂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 SiO₂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 SiO₂ 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. SiO₂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 SiO₂パターンと断面形状



Fig.4-33 スパッタ時間に対する SiO2 膜厚



Fig.4-34 (a)SiO2 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 CO₂ 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.

94



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 Leff 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.

98

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}=7λ 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

- 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 GaAsAl_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

102

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

103

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

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.

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

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.

106



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,goは初期エアギャップである.

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

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

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

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.

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

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

ここで $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$ は空気の密度、Vは速度、S=20 μ m×80 μ mは移動方向垂直の面積、Cp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,

$$\int Ddx \approx 2 \times 10^{-18} [\text{N} \cdot \text{m}] \qquad (5-6)$$

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

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

これを 50nm 振った際のバネポテンシャルは約 1.2×10⁻¹⁴Nm 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.

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

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に大 を 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ー回一回の到達点 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.

113



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+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 2.5 µ s 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.5-204波長スイッチングの印加電圧波形



Fig.5-214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

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 1/2fo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.

$$\omega = \frac{\lambda}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot h^2}{a}}$$
(5-9)
$$V = \frac{4}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot h^3 \cdot d_0^3}{54.6\varepsilon_0}}$$
(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 To/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

133

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

134

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

- 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-reducespeaking-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θiは, 伝搬光の波数κ, 導波路の遮断波長の波数κ。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.

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

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

SOA electrode

Laser Contact



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.





4) MEMS forming



7) P-type electrode deposition



10) Laser contact and tuning contact deposition



2) Top DBR etching



5) Mesa forming



8) GaAs removal



11) Dielectric DBR deposition



3) Ion implantation



6) Oxidation



9) AR layer removal



12) Citric acid selective etching



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.

143


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 Ta₂O₅/SiO₂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,A1 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 SiO₂を製膜してるた め屈折率の大きな Ta₂O₅から成膜し,最後の層は同様に Ta₂O₅とする. EB 蒸着で成膜する TaO と SiO₂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 (Alo.85GaAs/Alo.16GaAs)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.6-12 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.



誘 電 体 DBR 非 蒸 着 領 域

放射量増加

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, Ta₂O₅/SiO₂の誘電体 DBR を 4.5 ペア蒸着することで補償した. Ta₂O₅, SiO₂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 オ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

151

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

- 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-SiO₂ 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 SiO₂ 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 Alo.65GaAs,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 -0.5 nm/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 SiO2 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 A1 組成の高い A1GaAs を高温水蒸気下で酸化しアルミナにする. A1GaAs は A1 組成が低くなると酸化レートが大きく低下するものの, A10.98GaAs を 30µm 以上酸化するため HCG の材料である A10.65GaAs 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 SiO2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 Alo.3GaAs 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

159

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.

161

本研究に関する発表

論文

- <u>Shunya Inoue</u>, 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).
- M.Nakahama, H.Sano, <u>S.Inoue</u>, 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).
- M.Nakahama, H.Sano, <u>S.Inoue</u>, 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) <u>Shunya Inoue</u>, 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) <u>Shunya Inoue</u>, Akihiro Matsutani and Fumio Koyama, "Dual beam emission from VCSEL with angular dependent high-index contrast grating," IEICE Electronics Express, submitted.
- 6) <u>Shunya Inoue</u>, 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, <u>S. Inoue</u>, T. Sakaguchi, A. Matsutani, F. Koyama, "Giant wavelengthtemperature dependence of 850nm VCSELs with a metal/semiconductor thermally actuated mirror," SPIE OPTO 2013, 86390F-6, Jan., SF, USA, (2013).
- M. Nakahama, H. Sano, <u>S. Inoue</u>, A. Matsutani, T. Sakaguchi, and F. Koyama, "Electrothermally 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)
- Junichi Kashino, <u>Shunya Inoue</u>, Akihiro Matsutani, Hideo Ohtsuki, Takahiro Miyashita and Fumio Koyama, "Transverse Mode Control of VCSELs Using Angular Dependent Highcontrast Grating Mirror", 2013 IEEE Photonics Conference (IPC), TuE2.2, WA, USA, (2013)
- 4) Masanori Nakahama, Hayato Sano, <u>Shunya Inoue</u>, 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) <u>S. Inoue</u>, F. Koyama, "Highly Angular Dependent High-Contrast Grating Mirror for Transversemode Control of VCSELs", International Nano-Optoelectronics Workshop (iNOW2014), St Petersburg, Russia, (2014)
- 6) <u>S. Inoue</u>, F. Koyama, "High-Contrast Grating Spatial Mode Filter for Widely Tunable Vertical Surface Emitting Laser", 19th Microoptics Conference (MOC' 2014), Nice, France, (2014)
- 7) <u>S. Inoue</u>, 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)

- 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)
- <u>Shunya Inoue</u>, 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) <u>Shunya Inoue</u>, Masanori Nakahama, Akihiro Matsutani, Takahiro Sakaguchi, Fumio Koyama, "Fabrication of HCG MEMS VCSELs for athermal operations", OECC PS 2016
- 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) <u>Shunya Inoue</u>, 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

- <u>井上 俊也</u>, 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, <u>井上俊也</u>, 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
- 中濵正統, 佐野勇人, <u>井上俊也</u>, 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) <u>井上俊也</u>, 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) <u>井上 俊也</u>,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) <u>井上 俊也</u>,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) <u>井上 俊也</u>, 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) <u>井上 俊也</u>, 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) <u>井上 俊也</u>, 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, <u>井上 俊也</u>, 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) <u>井上 俊也</u>, 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, <u>井上 俊也</u>, 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.

165

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.