

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	面発光レーザとスローライトデバイスの集積化に関する研究
Title(English)	
著者(和文)	島田敏和
Author(English)	Toshikazu Shimada
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9532号, 授与年月日:2014年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:小山 二三夫,浅田 雅洋,梶川 浩太郎,植之原 裕行,宮本 智之,大橋 弘美
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第9532号, Conferred date:2014/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

博士論文

面発光レーザとスローライトデバイスの
集積化に関する研究

2014 年 3 月



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

指導教員 小山 二三夫 教授

島田 敏和

目 次

第1章 序 論

1.1 緒 言	1
1.1.1 情報通信の進展と光通信技術	1
1.1.2 コンピュータネットワークと光通信	5
1.2 面発光レーザの進展	8
1.2.1 850nm 帯の面発光レーザ	11
1.2.2 980nm 帯の面発光レーザ	12
1.3 直接変調の方式の課題と外部変調方式	15
1.4 面発光レーザフォトリソの展開	17
1.5 研究目的	19
1.6 本論文の構成	20
第1章参考文献	22

第2章 面発光レーザとスローライト導波路の横方向集積

2.1 緒 言	37
2.2 ブラッグ反射鏡導波路における低群速度伝搬	37
2.3 面発光レーザとスローライト導波路の横方向集積のモデリング	45
2.3.1 構造と原理	45
2.3.2 横方向集積における結合効率	49
2.4 スローライト導波路集積デバイスの製作及び特性評価	54
2.4.1 デバイス構造	54
2.4.2 製作プロセス	55
2.4.3 面発光レーザからスローライト導波路への横方向光結合	58
2.5 横方向光結合モードの制御	60
2.6 まとめ	67
第2章参考文献	68

第3章 面発光レーザとスローライト光増幅器の横方向集積

3.1 緒 言	70
3.2 スローライト光増幅器集積のモデリング	74
3.3 スローライト光増幅器集積デバイスの製作及び特性評価	80

3.3.1 デバイス構造	80
3.3.2 スローライト光増幅器によるレーザ出力の向上	82
3.4 まとめ	89
第3章参考文献.....	90

第4章 面発光レーザとスローライト変調器の横方向集積

4.1 緒言	92
4.2 電界吸収型スローライト変調器集積化のモデリング	95
4.3 スローライト変調器集積デバイスの製作及び特性評価.....	100
4.3.1 デバイス構造	100
4.3.2 面発光レーザの特性	103
4.3.3 スローライト変調器の静特性	106
4.3.4 スローライト変調器の動特性	113
4.4 高反射ミラーによる垂直方向成分の抑制	115
4.4.1 デバイス構造	115
4.4.2 スローライト変調器集積デバイスの静特性	116
4.5 まとめ	125
第4章参考文献.....	126

第5章 ビーム偏向器の集積

5.1 緒言	128
5.2 スローライトビーム偏向器集積化のモデリング	129
5.3 ビーム偏向器の製作及び特性評価.....	134
5.3.1 動作原理	134
5.3.2 デバイス構造	135
5.3.3 偏向特性	136
5.3.4 くびれ構造を持つビーム偏向器の特性	140
5.4 まとめ	143
第5章参考文献.....	144

第6章 面発光レーザ横方向集積の展望

6.1 緒言	145
6.2 スローライト変調器集積デバイスの展望	145

6.3 スローライト光増幅器集積デバイス／ビーム偏向器の展望.....	149
6.4 まとめ	153
第 6 章参考文献.....	154
第 7 章 結 論	155
本研究に関する発表	158
謝 辞	162

第1章

序 論

1.1 緒 言

本章では本研究の背景として、情報通信技術の進展及びコンピュータネットワークにおける光通信技術の重要性について述べるとともに、そこで鍵となる面発光レーザの歴史について触れる。さらに、近年本研究グループで盛んに研究を行っているスローライトデバイスについても触れ、多角的に本研究の意義を検討する。

1.1.1 情報通信の進展と光通信技術

我々の生活を取り巻くネットワーク環境は近年、劇的に変化してきた。情報通信技術 (Information Communication Technology: ICT) の急速な発達により、我々の生活の利便性は大幅に向上し、その恩恵を享受しているところである。ICT の代名詞とも言われるインターネットは最も身近で馴染みのある ICT である。You Tube をはじめとした動画共有サービスや、Facebook などのソーシャルネットワーキングサービス (SNS) は、誰もが一度は利用したことのあるネットワークサービスであろう。また、SNS とチャットの間のようなシステムを持った Twitter やブログは、政治家の選挙活動に利用されるなど、もはや単なるコミュニケーションとしての用途に留まらない。加えて、「スマート家電」と呼ばれる、スマートフォンと連携させた家電製品が 2012 年中頃から多く市場に出回るようになり、生活に欠かせない白物家電を中心

にスマートフォンとの機能連携を実現している. このように, 我々の日常生活とネットワークサービスは水魚之交である. 上記の様相は図 1.1 に示す日本におけるインターネットトラフィックの年次推移に描写されており[1], この増加傾向は今後も続いていくものとみられ, 通信容量の更なる大容量化が求められている. 中でも, FTTH (Fiber To The Home)の契約数は, 平成 13 年度版情報通信白書において「ブロードバンド元年」と位置付けられて以降急激に増加し[2], 現在, 図 1.2 に示すように固定系ブロードバンドサービス契約数の大部分を占めている[3]. また, 2010 年に総務省が発表した「光の道」構想に従い[4], 国家の成長戦略として ブロードバンドサービスの普及を推し進めていることから, この増加傾向が続くことに疑いの余地はない.

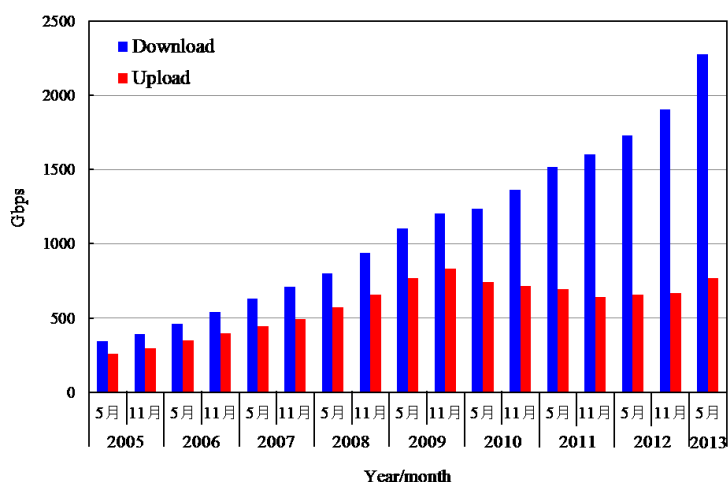


図 1.1 日本におけるインターネットトラフィックの年次推移 ([1]を元に作成)

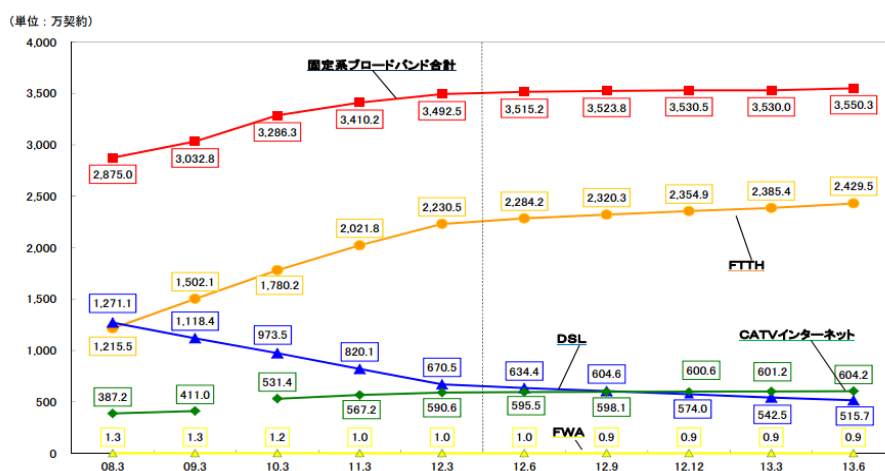


図 1.2 日本における固定系ブロードバンドサービス契約者数の推移

一方, ICT の発達は個人の生活を便利にするだけでなく, エネルギー・環境問題解決の一端をも担う. 近年, グリーン ICT と呼ばれる地球環境に配慮した取り組みが急速に推進されており[5], ICT を利用したエネルギー効率の改善, 物の生産・消費の効率化・削減及び人・物の移動の削減などが推進されている. スマートグリッドやインテリジェントビルなどはその一例である.

さらに, ICT には国家の経済成長への寄与も期待できるという. 経済成長の要素は, 労働の量的拡大, 労働の質的向上, TFP 向上及び資本蓄積(投資)に分解され, この内, 労働の量的拡大以外は, ICT の利活用の促進による向上が期待でき, 成長力基盤の底上げが期待できる[6]. 図 1.3 に示す主な産業部門毎の実質 GDP と実質国内生産額の経年変化を見ると, ICT 産業が経済成長に大きく貢献してきたことがわかる. また, ICT 競争力と経済成長との間には相関関係があるとの報告がなされている[7]. 図 1.4 は, ICT 競争力指数と国民一人当たりの GDP との関係を示したものである. ICT の発達と国家の経済成長には明確な相関関係があることが確認でき, 今後, 益々少子高齢化による労働人口の減少が懸念される我が国にとって, ICT の発達は必須であると考えられる.

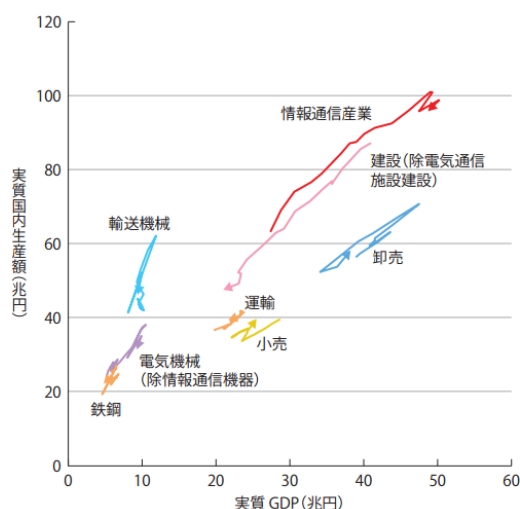


図 1.3 主な産業部門の実質 GDP と実質国内生産額の経年変化 (平成 7 年～23 年)

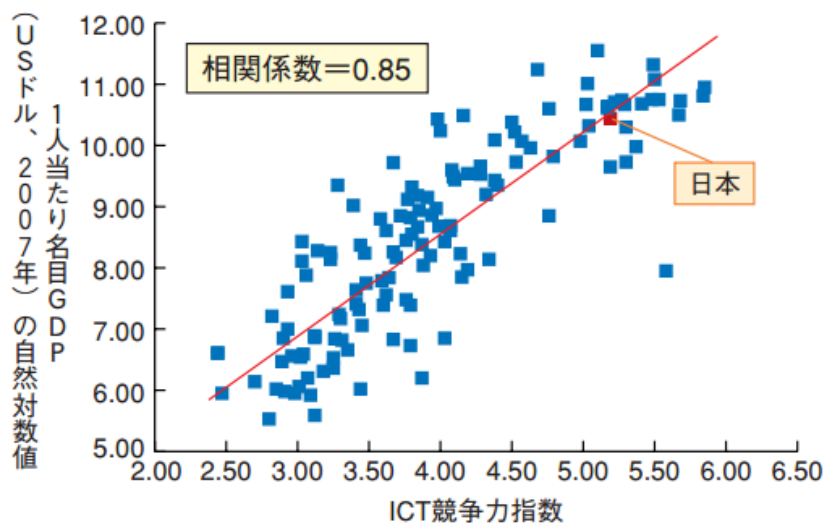


図 1.4 ICT 競争力指数と一人あたりの GDP

上記 ICT を支える基盤技術は「光通信技術」であり、その起源は「のろし」と言われている。それから数百年、光を含む無線通信は大きな発展を遂げることなく、郵便や有線通信に活躍の場を譲ってきた。無線通信が大きく発展を遂げたのは第 2 次世界大戦前後であり、戦後は、米ソ間の熾烈なロケット開発競争の末、人工衛星の打ち上げに成功し、衛星通信が国際遠距離通信の主役を担ってきた。周波数と情報を運ぶ能力は比例することから、衛星通信ではマイクロ波が使われている。また、周波数が高い、すなわち波長が短いほど指向性が高く直進する性質を持つことも理由の一つである。

この頃、「マイクロ波よりも高周波の電磁波である光ならば超高速(大容量)の通信が可能になる」との考えの基、光通信の研究が行われ始めた。現在の光通信の基盤技術は「光ファイバ通信」であるが、その構成要素は主として 2 つある。1 つは信号を生成する半導体レーザであり、もう 1 つはその信号を運ぶ光ファイバである。1960 年に Maiman によりルビーレーザのパルス発振を実現したことを皮切りに発展し[8]、1970 年には林 厳雄氏らが GaAs/AlGaAs のダブルヘテロ構造を用いて室温連続発振を実現した[9]。その後、1976 年に Hsieh により光

ファイバの伝送損失の小さい長波長帯で発振可能な InGaAsP 系レーザの実現[10], 1977 年に伊賀氏により面発光レーザ (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: VCSEL) の発明, 1982 年に荒川氏らにより量子ドットレーザの発明[11]がなされ, 現在, 様々な分野で応用されている.

一方, 伝送路としての光ファイバについてはどうであっただろう. 1960 年代中頃に 1000dB/km 以上あった光ファイバの伝送損失は, 1970 年に Kapron らにより 20dB/km 以下まで低減された[12]. その後, 1979 年には 0.2dB/km という現在の光ファイバの伝送損失と同程度まで低減され[13], 1986 年には 0.154dB/km[14], 2002 年には 0.151dB/km[15], 0.148dB/km と極限まで低損失化が実現されている.

1.1.2 コンピュータネットワークと光通信

上記の技術を基に, これまで光通信技術は著しく向上し, グローバルエリアネットワーク (Global Area Network: GAN), ワールドエリアネットワーク (World Area Network: WAN) 及びメトロエリアネットワーク (Metro Area Network: MAN) においてその実力を如何なく発揮してきた. このような長距離ネットワークでは, 波長分割多重 (Wavelength Division Multiplexing: WDM) などによる大容量化が進められてきた[16]. WDM 方式は光の非干渉性を利用しており, 複数のレーザにより生成した複数の波長それぞれに対し信号を乗せ, それらを 1 本のファイバ内に合波し伝送することで大容量化を可能にする (図 1.5). 2001 年には, 研究レベルにおいて 1 本のファイバで 10Tbit/s の伝送に成功している[17,18]. 一方, WDM 光通信の発展に伴い低調となったデジタルコヒーレント光通信技術であったが, 近年の急速な通信の大容量化に伴いその重要性が見直され, 一部実用化されている[19]. デジタルコヒーレント光通信技術は, 無線分野で既に実用化されているデジタル信号処理技術を光フ

ファイバ通信に応用及び発展させたものであり、従来の WDM 方式との併用により大容量通信が可能である。その一方で、更に短距離の領域であるローカルエリアネットワーク(Local Area Network:LAN)においても光通信技術が採用されるようになった。1980 年代当初は同軸ケーブルを使用した 10 メガビットイーサネットであったが、1990 年代に光ケーブルを使用した 100 メガビットイーサネット、光ファイバを使用したギガビットイーサネットが標準化され、2010 年 6 月には 40/100 ギガビットイーサネットが標準化されるに至っている。このように高速化の一途を辿る LAN では 400 ギガ/1 テラビットイーサネットの構想についての議論も既に始まっております[20]、光通信技術の適用範囲はより短距離化している。

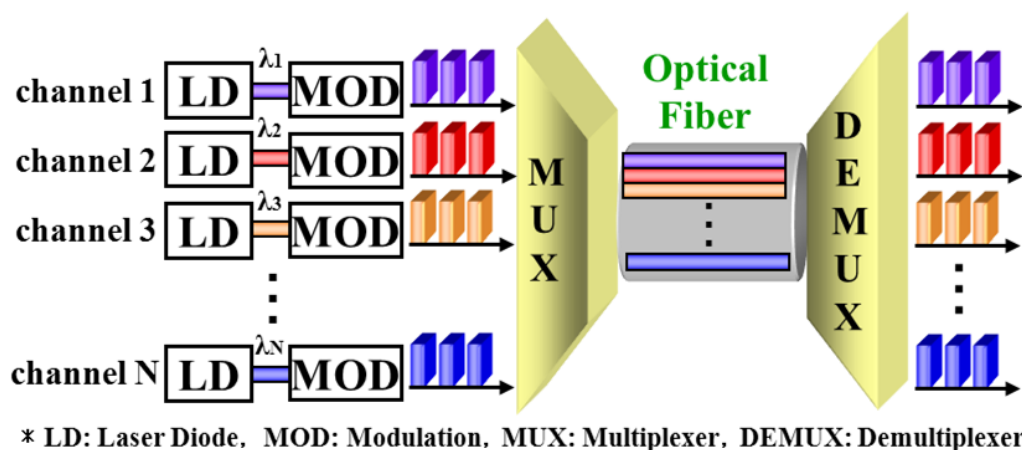


図 1.5 波長分割多重方式の構成

これまで述べてきたように、光ファイバを基盤技術とした光通信技術は、主として LAN (数 m) 以上の長距離の領域で使用されてきた (図 1.6) [21]。それより短距離の領域では、伝送距離が限られることから、安価で扱いやすい電気インターコネクトが用いられてきた。一方、情報化社会の発展によるデータ伝送量増大の要求は留まることを知らず、データセンターやスーパーコンピュータ内など、特に大容量通信が必要な領域では深刻な問題である。また、チップ間データ伝送速度は 2020 年には 10Tbps/cm² の大容量が必要とされており、サイズ、消費電

力ともに電気インターコネクต์での実現が困難と言われている。図 1.7 に示すオンチップ・オフチップインターコネクットの動向によると[22], チップ内におけるクロック周波数は間もなく 10GHz 以上が求められることに加え, チップ内配線数の増加, 低消費電力化の要求が見て取れる。また, このような要求が高まる中, 従来の電気配線を用いた電気インターコネクットの物理的な限界が叫ばれるようになった。10GHz を超える高速な信号周波数においては, 表皮効果, 誘電損失及びクロストークに起因する帯域制限に見舞われるとされている[23]。加えて, 大容量化に伴う高密度集積化や装置の大きさの要求に起因するスペース制限, 消費電力の制限及びコスト制限も電気インターコネクットの使用を制限する要因となる[22-25]。このような背景のもと, 広帯域, 低消費電力, 配線(光導波路)の高密度集積可能及び電磁誘導による影響を受けない, 信号遅延が小さいなどの利点を持つ光配線を利用することが解決策として考えられた[23,26-28]。ラック間, ボード間, モジュール間, チップ間, 更にはチップ内配線に至るまで光インターコネクットが検討され, 現在, ボード間光インターコネクットまで実現されている[29,30]。

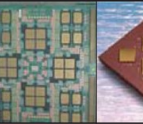
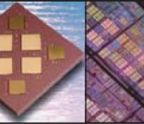
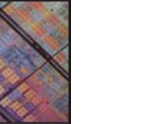
	MAN/WAN	Cables-long	Cables-short	Card-to-card	Intra-card	Intra-module	Intra-chip
							
Length	Multi-km	10–300 m	1–10 m	0.3–1 m	0.1–0.3 m	5–100 mm	0–20 mm
No. of lines per link	One	One to tens	One to tens	One to hundreds	One to hundreds	One to hundreds	One to hundreds
No. of lines per system	Tens	Tens to thousands	Tens to thousands	Tens to thousands	Thousands	Approximately ten thousand	Hundreds of thousands
Standards	Internet Protocol, SONET, ATM	LAN/SAN (Ethernet, InfiniBand, Fibre Channel)	Design-specific, LAN/SAN (Ethernet, InfiniBand)	Design-specific and standards (PCI, backplane InfiniBand and Ethernet)	Design-specific, generally	Design-specific	Design-specific
Use of optics	Since the 1980s	Since the 1990s	Present time, or very soon	2005–2010 with effort	2010–2015	Probably after 2015	Later

図 1.6 各階層における光インターコネクットの動向

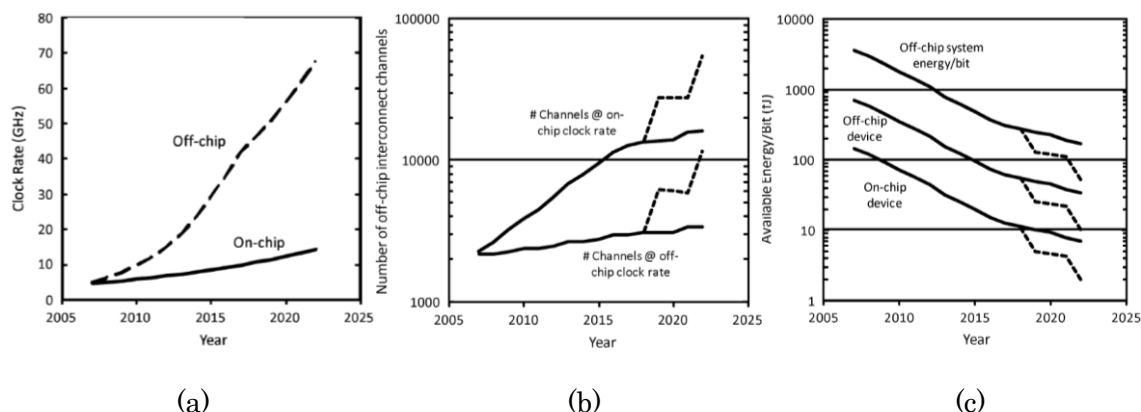


図 1.7 オンチップ・オフチップインターコネクトの動向

(a) クロック周波数, (b) 配線数, (c) 1bit 当たりの許容エネルギー

1.2 面発光レーザの進展

先述のように、大規模システムにより大容量化が進められてきた長距離ネットワークに対し、短距離系ネットワークではコストの面から技術転用が難しい。よって、短距離ネットワークにおいては、経済性、拡張性に優れた革新的な大容量光配線・光リンク技術が必要とされている。これを実現するためには、デバイスレベルでの小型化、低消費電力化、高速化などが急務であるが、実用化のためにはこれらに加えて低コスト化及び高信頼性化が必要である。キーデバイスとなる光源には小型、低消費電力、高速かつ低コストである、面発光レーザ (Vertical-Cavity Surface Emitting Laser: VCSEL) が有望視され、一部適用されている。

面発光レーザは、基板面に平行な共振器を持つ従来の端面出射型レーザとは全く異なる構造を持ち、基板面に垂直に共振器を持つ垂直出射型のレーザであり、1977 年に伊賀氏により考案された。1979 年に電流注入による初めてのレーザ発振が確認され、「Surface-emitting injection laser」と名付けられた[31]。これが現在の Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser の起源である。面発光レーザは従来の端面出射型レーザと比べ、

以下のような優れた特徴を有する[32].

- (1) 活性層体積の小ささから, μA レベルの極低しきい値動作が可能である[33-35].
- (2) $(I - I_{th}) I_{th} > I_{th}$ が可能 (I = 動作電流, I_{th} = しきい値電流)
- (3) 波長やしきい値が温度に対して比較的安定している.
- (4) 共振器長が発振波長に近いことから, 動的単一モード性に優れている.
- (5) 活性層体積の小ささから, 大きな緩和振動周波数が期待でき, 潜在的に広い変調帯域を持つ.
- (6) 活性層が上下反射鏡に完全に埋め込まれており, パッシブ化されていることから, 長寿命が期待できる.
- (7) 50%以上という高い電力-光変換効率が可能[36-38].
- (8) 基板から光を取り出せる.
- (9) 円形ビームにより, ファイバとの高効率結合が可能である.
- (10) 大量のデバイスをモノリシックプロセスにより製作可能であり, チップ価格を抑えることができる.
- (11) 個別のチップに分ける前に, 初期実験が可能である.
- (12) ボンディングやマウンティングが容易である.
- (13) モジュールとパッケージ価格を抑えることができる.
- (14) 高密度な 2 次アレーレーザが可能である.
- (15) 垂直方向への機能デバイス集積が可能である.
- (16) LSI との集積に相性が良い.

上記のような多数の優れた特徴を持つ面発光レーザはどのように進展してきたのであろうか.

1979 年のパルス動作での発振が確認された際には, InP 系材料を用いており, 波長は

1.3 μm 帯であった。その後、特性温度が良いことから GaAs 系の材料での研究が行われた。1988 年に誘電体多層膜を用いた構造により、初の室温連続発振を GaAs 系材料で実現し [39]、翌年、半導体多層膜で動作も実現されている [40]。GaAs 材料を用いる利点はその特性温度の良さだけでなく、非常に格子定数の近い (In)GaAs 及び AlGaAs の多層膜を用いることで、屈折率差の大きな高反射ミラー及び (歪) 多重量子井戸がモノリシックに成膜できることにもある。以上から GaAs 系での面発光レーザの研究が急速に加速し、1991 年にイオン注入を用いた電流狭窄構造を持つ面発光レーザが報告された [41]。GaAs 系材料を用いる場合、量子井戸の設計により代表的な波長としては 850nm と 980nm が選択できるが、この頃から 850nm 帯の面発光レーザの開発が先行することになる。この背景には、850nm 帯は Si フォトダイオードでの受光が可能な波長であり、レンズ等の光学部品が揃っていたことが挙げられる。

面発光レーザの結晶成長技術が向上する一方で、面発光レーザの光閉じ込め構造について関心が寄せられ始めた。文献 41 以降、面発光レーザの電流狭窄構造にイオン注入が用いられるものが一般的であったが、これは光導波路で言うところの利得導波路構造であり、光の閉じ込め構造は存在しなかった。これにより、面発光レーザのモード選択及び信頼性の点において不安視されていた。このような中、AlGaAs を水蒸気酸化させることで Al_xO_y 絶縁膜を形成する手法 [42] を取り入れ、1995 年に 50% という高い電力変換効率を達成した [36]。この選択酸化という手法により形成された Al_xO_y 絶縁膜の屈折率は酸化前に比べ小さくなるので [43]、面発光レーザ内に屈折率導波路を形成することが可能となった。これにより横・縦モード共に安定した単一モード発振が可能になるとともに、電流を効率よく活性層に注入できるため、しきい値の低下に大きく貢献する結果となり、1995 年に 70 μA [33]、59 μA [34]、8.7 μA [35] と立て続けにサブ mA のしきい値を達成した。

以上のように、様々な技術を結集することで面発光レーザは著しく進展を遂げ、現在、40/100 ギガビットイーサネット用の光源として用いられるなど、光インターコネクトを支える主要な光源としてその実力を遺憾なく発揮している。

これまで、面発光レーザの研究の歴史及びその利点について簡単に示してきたが、面発光レーザが高速イーサネット用光源に採用されるに至った理由の1つである、その高速性に主眼をおいて、短波長帯の面発光レーザの歴史について以下で述べる。

1.2.1 850nm 帯の面発光レーザ

ここでは、短波長帯の面発光レーザとして主流である 850nm 帯及び 980nm 帯の面発光レーザについて、その特徴や高速化の歴史について述べる。

先述のように、850nm 帯の面発光レーザは、980nm 帯の面発光レーザに先行して開発された経緯があり、LAN やストレージエリアネットワーク (Storage Area Network: SAN) 用の光源として既に標準化されており、今後予想されている 400 ギガ/1テラビットイーサネットにおいても重要な役割を担うことが予想される。850nm 帯の波長は、周囲の環境に非常に恵まれており、先述した Si フォトダイオードだけでなく、GaAs フォトダイオードでの受光も可能であることに加え、光ファイバはこの波長帯において最適化されている。

一方、物理的な面から 850nm 帯の利点を考えると、長波長帯に比べ AlGaAs の自由キャリア吸収が小さいことが挙げられる。長波長帯に比べ層厚が薄いことから、全体として吸収量を低減できる。よって、長波長帯に比べドーピング濃度をある程度増加させることができ、結果的に電気抵抗を低下できるとともに、しきいキャリア密度の低下が可能である。このことは潜在的に高速動作を可能にする。

850nm 帯の面発光レーザの活性層の材料にはある程度の選択肢があり、量子井戸に

GaAs[44], InGaAs[45], InAlGaAs[46]または InGaAsP[47]を用いることができる。最もよく使用されているのは GaAs を量子井戸とする面発光レーザであるが、量子井戸に歪を導入することで微分利得を向上させることができるため[48], In を含む歪量子井戸の場合の方が、潜在的に高速化に適している。

2000 年頃までは、12.5Gbit/s[49,50], 15.6Gbit/s[51]程度の速度での動作実証が多く報告されていたが、2001 年に IBM により 20Gbit/s の高速面発光レーザが報告された[52]。その後、30Gbit/s の壁が大きく立ちはだかり、7 年もの間 30Gbit/s を超える速度の報告はなされなかった。そのような中、2008 年に GaAs 量子井戸を用いた 850nm 帯の面発光レーザにより 30Gbit/s の動作実証が報告された[44]。その後、高速面発光レーザの開発は劇的に進み、2 年間の間に 30Gbit/s 以上での動作実証が多数報告され、遂に 40Gbit/s でのエラーフリー動作が実証された[45,53-58]。この間、歪量子井戸を用いることによる微分利得の向上[45,56,59], 酸化アパチャーの設計による寄生容量の低減[60]などの手法を用いて、高速動作が実証されてきた。最近、これらに加えて光子寿命を制御することによる高速化の検討がなされ[61,62], 2013 年に back-to-back において 57Gbit/s のエラーフリー動作が実証され[63], 現在、これはすべての波長帯における OOK (On-Off-Keying) での最高変調速度である。

1.2.2 980nm 帯の面発光レーザ

一方、850nm 帯の面発光レーザに先行され、980nm 帯の面発光レーザの開発は遅れをとってしまった。しかしながら、この波長帯は先述の通り 850nm 帯に比べ自由キャリア吸収が大きいにもかかわらず、いくつかの利点が存在する。

- (1) 活性層に歪量子井戸を用いていることが容易であり、微分利得向上による高速動作が期待できる。

- (2) 深いバリア障壁を形成できるため、温度特性がよく、安定的に利得が得られる。
- (3) 光子エネルギーが小さいことにより、動作電圧が小さい。
- (4) GaAs に対して透明であることから、基板側からの出射が可能である。
- (5) エルビウムドープドファイバー増幅器 (Erbium-doped fiber amplifier: EDFA) の励起光源として使用可能である。

以上のような特長を持つことから、高速かつ温度特性のよい 980nm 帯の面発光レーザの実現は、850nm 帯の面発光レーザに取って代わる可能性を示唆する。

980nm 帯の高速面発光レーザは、潜在的に高速動作が可能であることに加え 850nm 帯での経験が生かされたこともあり、2005 年には 20Gbit/s で動作する面発光レーザを搭載した、チップ間光インターコネクトの動作実証が報告されている[64]。翌年にも同様の報告がなされている[65,66]。更に翌年には、酸化層厚を通常の $\lambda/4$ 厚ではなく $\lambda/2$ 厚とし、テーパ形状を用いるとともに、抵抗と損失のバランスを取る形で p 型半導体のドーピングを最適化することにより、35Gbit/s でのエラーフリー動作が実証された[67]。つまり、980nm 帯の方が 850nm 帯よりも 30Gbit/s 以上の速度での動作実証が早かったのである[44,67]。40Gb/s 以上でのエラーフリー動作は 2011 年に実証され[68]、980nm 帯での最高速度となっている。

一方、温度上昇に伴う帯域低下の課題を克服する取り組みも行われてきた。2006 年に量子ドットを用いたシングルモード面発光レーザが実証され、翌年に量子ドット面発光レーザによる 85°C での 20Gbit/s のエラーフリー動作が実証された[69]。その後、活性層のアルミニウム組成を調整することによる熱伝導率の改善、オフセット波長の設計及びパッドキャパシタンス低減のためのポリマー材料の選定など、各種設計の最適化により、2008 年には 120°C で 20Gbit/s[70]、2009 年には 120°C で 20Gbit/s のエラーフリー動作が実証されている[71,72]。

以上のように、誕生から約 35 年の間、高まる光源への性能要求に応え続け、面発光レーザは飛躍的に進歩を遂げてきた。結果、1999 年にギガビットイーサネット用の光源に採用された後、10 ギガビットイーサネット、40/100 ギガビットイーサネット用の光源としても採用され、短距離用光源として広く用いられている。先述の様に、2000 年中頃には 40Gbit/s でのエラーフリー動作が実証されている一方で、100 ギガビットイーサネットでは図 1.8 に示すように、マルチモードファイバを用いた 10Gbps/ch×10 チャンネルの並列伝送による 100Gbps 伝送である[73]。研究レベルでは 40Gbit/s 以上の動作実証が数多く報告されているにも拘わらず、商用化には至らない理由はその信頼性にある。直接変調の帯域は、面発光レーザへの注入電流密度の増加に応じて増加する。そのため高速面発光レーザには $20\text{-}60\text{kA/cm}^2$ という高い電流密度が必要であるが[45]、そのために素子の寿命が加速的に短くなってしまうというトレードオフの問題が存在する[74]。また、別な問題として酸化アパチャーの信頼性の問題がある。高速面発光レーザ実証のキーとなる構造の 1 つに、酸化アパチャーの構造が挙げられるため、本質的に改善することは困難である。よって、今後の更なる高速化の要求に応えるためには、直接変調ではなく外部変調方式を用いる必要があると考えられる。

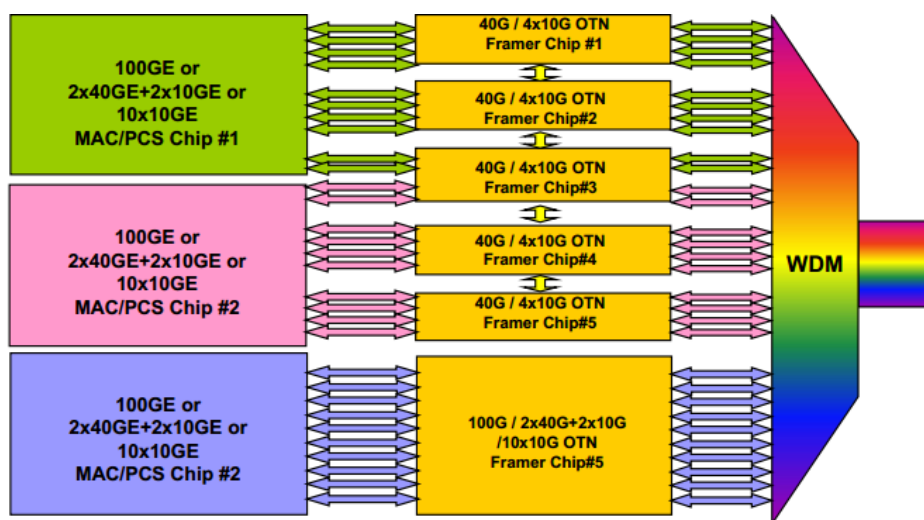


図 1.8 40/100 ギガビットイーサネットにおける伝送方式

1.3 直接変調の方式の課題と外部変調方式

変調方式には大きく分けて 2 通りあり, 直接変調方式と外部変調方式が挙げられる. 直接変調方式は, レーザに直接電気信号を与え, レーザの光出力を変調する方式であり, 外部変調方式は, レーザから出力された光をレーザ外部の変調器に結合させ, 変調器に電気信号を与えることで変調を行う方式である. 1.2 節で扱った面発光レーザはすべて直接変調方式を用いている. 一般的に, 面発光レーザの直接変調速度限界は端面出射型レーザと同様に以下の要因により決定される.

- (1) 緩和振動周波数
- (2) ダンピング効果
- (3) 寄生容量

緩和振動周波数は, 微分利得の増大, 活性層体積の減少及び高出力化などにより向上させることが可能である. しかしながら, 高出力化のために電流注入量を増加させて動作させることは, 先述のとおり素子の寿命を加速的に短くしてしまう. ダンピング効果は, 光出力が増加していくと生じることが知られており, その要因として, スペクトルホールバーニングや空間的ホールバーニング及び発熱などによる利得飽和が挙げられる. これらに対しても微分利得の増大は効果がある. また, これらに加えて量子井戸構造に由来するキャリア輸送及び捕獲過程に起因するものが挙げられるが, そのメカニズムは非常に複雑であり, 扱うのが困難である. 寄生容量は, 素子本体だけでなくパッド部分にも存在する. 素子においては酸化層に起因するものが存在し, 酸化層を厚くすることで寄生容量の低減が可能である. しかしながら, 酸化層を厚くすることは散乱損失の増加を生むため, 実際には数十 nm まで薄膜化する必要がある. つまり寄生容量を低減するには, 酸化アパチャーの構造に工夫が必要であり, それは変調速

度が酸化アパチャーに大きく依存することを意味する。

一方、外部変調方式はその高速応答性から長距離伝送の分野で広く用いられてきた。チップサイズが大きく(～数十 mm)、動作電圧が大きい(3～5V)が、消光特性が良く、伝送距離を制限する波長チャープ[75]が非常に小さいことから、長距離の基幹系ではマッハチェンダー型の光変調器が用いられており、その動作原理には電気光学効果が用いられている。一方、LAN やそれより短距離の領域を想定した場合、上記変調器は大きさや動作電圧に関して到底許容できない。そこで、短距離の領域では動作電圧が小さく(< 2V)、小型(チップサイズ:< 1mm)な電界吸収型光変調器(Electro Absorption Modulator:EAM)が有望である。電界吸収型光変調器には量子閉じ込めシュタルク効果(Quantum Confined Stark Effect: QCSE)[76-78]が用いられている。QCSE は、多重量子井戸へ電圧を印加することにより、エネルギーバンドが歪み、吸収端波長が変化する効果のことである。早くからその高速応答性が注目され[79]、変調器への応用が検討された[80]。外部変調方式を用いる場合には、モジュールの小型化及び光結合部での過剰損失抑制のため、レーザとの集積化が望ましいが、1986年に分布帰還型(Distributed Feedback:DFB)レーザとEA変調器の集積デバイスが実現されたのを皮切りに[81]、集積デバイスでの動作実証が多く報告され、1990年代初めには10Gbit/sでの動作が実証されている[82-91]。端面出射型レーザとEA変調器を水平方向に集積するように、垂直方向に光を出射する面発光レーザの場合は、垂直方向に集積する方法が妥当である。これまで、垂直方向に変調器を集積したデバイスの報告がなされている[92,93]。しかしながら、垂直方向の光結合及び共振器への強い戻り光による帯域制限が課題となっている。端面出射型レーザにおいては、外部変調器を集積することにより、直接変調の速度限界打破を実現してきたが、面発光レーザと外部変調器集積に関しては、垂直方向集積であるが故に存在する上記課題が障壁となり、直接変調による高速動作実証の報告が主流と

なっている現状がある。また、面発光レーザ特有の多層膜構造は、通常の EA 変調器との集積を困難にしており、構造に由来する問題も存在する。しかしながら、潜在的には EA 変調器には 100Gbit/s を超える動作も期待でき、これは直接変調では到底実現できないであろう速度である。よって、面発光レーザと外部変調器(EA 変調器)の革新的な集積手法が必要であると考える。

1.4 面発光レーザフォトリクスの展開

面発光レーザはその優れた特性を生かし、通信応用だけでなくプリンターやマウス、ディスプレイなど様々な分野で応用されている(図 1.9)[32]。先述のように、その構造が故に機能デバイスとの集積化が困難であることから、面発光レーザ単体、面発光レーザと他の機能デバイスとの組み合わせ(集積ではない)、または面発光レーザアレーが用いられている。既に商用化されていることから、性能要求を満たしていると考えられるが、面発光レーザの特徴である小型という利点が損なわれてしまっていることに加え、アレー化した場合に多数の素子を制御するためのアルゴリズムが複雑になってしまうという欠点がある。また、活性層体積が小さいが故に制限されるシングルモード出力は、面発光レーザの活躍の場を制限している。面発光レーザの利点を削ぐことなく、性能限界を打破・向上するためには、機能デバイスとの集積化が必要であり、それは従来の垂直方向集積ではない集積手法である必要がある。面発光レーザと機能デバイスの集積化により、面発光レーザフォトリクスの新たな展開が期待できると考えられる。

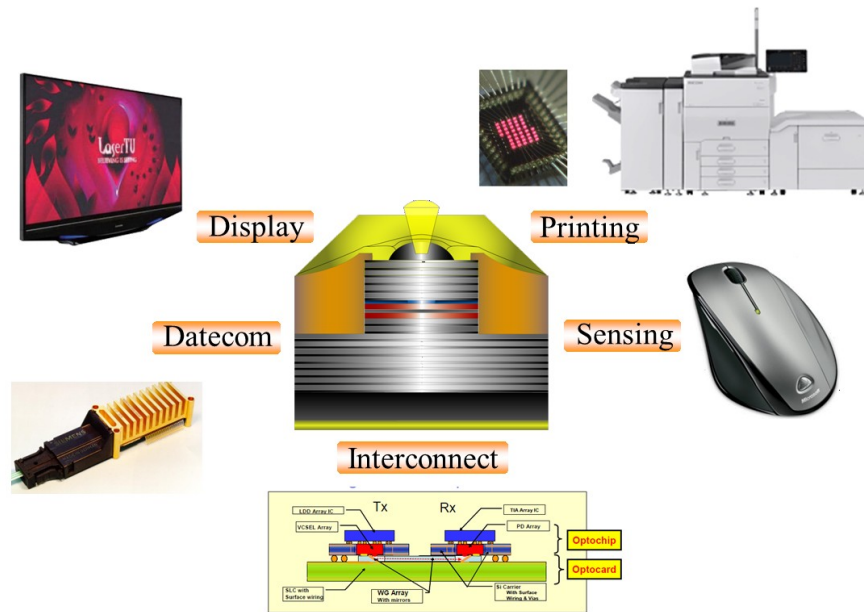


図 1.9 面発光レーザを用いたアプリケーションの例

一方、近年本グループではブラッグ反射鏡(Distributed Bragg Reflector)導波路を用いたスローライトデバイスの研究に取り組んできた。スローライトとは光の低群速度伝搬のことを指し、導波路構造に由来する構造分散により生成される。これまで、フォトディテクター[94]、光変調器[95,96]、光スイッチ[97]及びビーム偏向器[98,99]などを実証している。ビーム偏向器では、非機械式では最高である、1000 を超える解像点数を実現している[99]。スローライトを利用する利点の1つにデバイスの小型化が可能である点が挙げられ、 $20\mu\text{m}$ 以下の超小型光変調器を実証している[95]。しかしながらブラッグ反射鏡導波路におけるスローライトを利用する最大の利点は、面発光レーザとの集積化の可能性にある。ブラッグ反射鏡導波路を用いたスローライトデバイスの構造は、面発光レーザを基礎としているため、面発光レーザとの平面集積の可能性が考えられる。一方、現在のスローライトデバイスには外部光源を用いているが、光源との集積化が望ましい。また、スローライトモードの励振には、デバイスに対し斜めに光を入射する斜め入射法を用いており、この手法では3次元での精密なアライメントが必要であり、光結合が課題となっている。

1.5 研究目的

1.1～1.4 節において述べてきたように, 高信頼性の高速変調光源, 面発光レーザへの新しい機能付加を実現するためには, 面発光レーザと機能デバイスの集積化が必要であり, その集積手法は従来の垂直方向集積とは異なる革新的なものである必要がある. そこで, 本研究では面発光レーザとスローライトデバイスの集積化による面発光レーザの高性能化・高機能化を目的とし, 以下の3点を研究目標に研究を進めた.

- (1) 面発光レーザを基盤とした新しい集積手法及び光結合手法の探索
- (2) スローライト集積デバイス製作技術の確立
- (3) 面発光レーザと機能デバイスの集積化と動作実証

機能デバイスとしては, 電界吸収型光変調器, 半導体光増幅器, ビーム偏向デバイスを想定しており, 変調器集積においては, 高速変調のために必要な広帯域な周波数帯域実現のため, 変調器の小型化を主眼に, 増幅器集積においては, 面発光レーザの出力の向上を主眼に, ビーム偏向デバイス集積においては, 面発光レーザに新しい機能を集積することを主眼に取り組んだ.

1.6 本論文の構成

本論文の構成は図 1.10 に示すとおりであり、全 7 章からなる。

先ず、第 2 章においてブラッグ反射鏡導波路における低群速度伝搬(スローライト)生成の原理を述べるとともに、本研究で提案する面発光レーザとスローライト導波路の横方向集積の構造及び原理を説明する。また、モデリングにより横方向集積の有効性を示すとともに、集積デバイスにおける横方向光結合実証実験について述べる。

第 3 章では面発光レーザとスローライト光増幅器の横方向集積について、モデリングにおいて高出力化について検討するとともに、製作した増幅器集積デバイスにおける特性について述べる。

第 4 章では面発光レーザとスローライト変調器の横方向集積について、モデリングにおいて変調器の小型化について検討するとともに、製作した変調器集積デバイスにおける特性について述べる。

第 5 章ではブラッグ反射鏡導波路を利用することによる、高解像度ビーム生成の原理について述べるとともに、面発光レーザに集積された熱駆動ビーム偏向器における特性について述べる。

第 6 章では面発光レーザ横方向集積化の展望として、各種機能集積デバイスの高性能化の可能性について述べる。

第 7 章では以上の議論を統括し、本論文の結論を述べる。

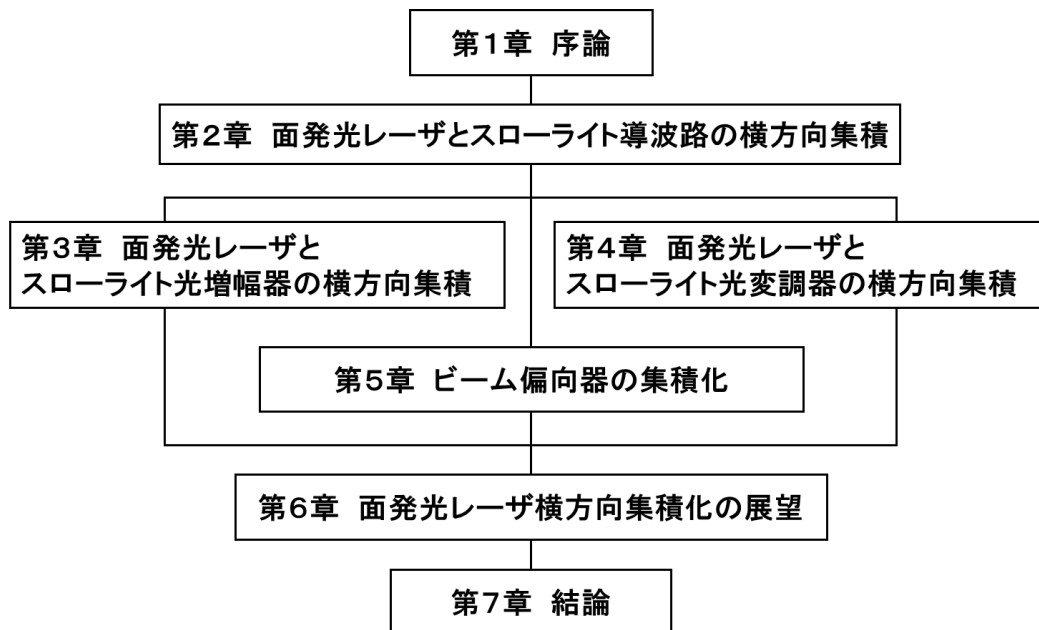


図1.10 本論文の構成

第 1 章参考文献

[1] 総務省報道資料, “我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算”

http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban02_01000011.html

[2] 情報通信白書平成 13 年度版 第 1 章

<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h13/pdf/hajimeni.pdf>

[3] 総務省報道資料, “電気通信サービスの契約数及びシェアに関する四半期データの公表”

http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban04_02000062.html

[4] 総務省報道資料, “「光の道」構想実現に向けた工程表の公表”

http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01kiban02_01000011.html

[5] 情報通信白書平成 22 年度版 第 2 章

<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h22/pdf/m2010000.pdf>

[6] 情報通信白書平成 25 年度版 第 1 章

<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h25/pdf/25honpen.pdf>

[7] 情報通信白書平成 21 年度版 第 1 章

<http://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/h21/pdf/11010000.pdf>

[8] T. H. MAIMAN, “Stimulated Optical Radiation in Ruby,” *Nature.*, **187**, pp. 493-494, 1960.

[9] I. Hayashi, M. B. Panishi, P. W. Foy, and S. Sumski, “JUNCTION LASERS WHICH OPERATES CONTINUOUSLY AT ROOM TEMPERATURE,” *Appl. Phys.*

Lett., **17**, 3, pp. 109-111, 1970.

[10] J. J. Hsieh, “Room Temperature CW Operation of InGaAsP/InP double-heterostructure diode lasers emitting at $1.1\mu\text{m}$ ”, Appl. Phys. Lett., **28**, 12, pp. 709-711, 1976.

[11] Y. Arakawa and H. Sakaki, “Multidimensional quantum well laser and temperature dependence of its threshold current”, Appl. Phys. Lett., **40**, 11, pp. 939-941, 1982.

[12] F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, “RADIATION LOSSES IN GLASS OPTICAL WAVEGUIDES”, Appl. Phys. Lett., **17**, 10, pp. 423-425, 1970.

[13] T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Miyashita, “ULTIMATE LOW-LOSS SINGLE-MODE FIBRE AT $1.55\mu\text{m}$ ”, Electron. Lett., **15**, 4, pp. 106-108, 1979.

[14] H. Kanamori, H. Yokota, G. Tanaka, M. Watanabe, Y. Ishiguro, I. Yoshikda, T. Kakii, S. Itou, Y. Asano, and S. Tanaka, “Transmission characteristics and reliability of pure silica core single mode fibers”, J. Lightwave Technol., **LT-4**, 8, pp. 1144-1150, 1986.

[15] K. Nagayama, T. Saitoh, M. Kakui, K. Kawasaki, M. Matsui, H. Takamizawa, H. Miyaki, Y. Ooga, I. Tsuchiya, and Y. Chigusa, “Ultra low nonlinearity low loss pure silica core fiber for long haul WDM Transmission”, Proc. of Optical Fiber Communication Conference 2002, PD. FA10, 2002.

[16] A. R. Chraplyvy, A. H. Gnauck, R. W. Tkach, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, A. J. Lucero, Y. Sun, R. M. Jopson, F. Forghieri, R. M. Derosier, C. Wolf, and A. R. McConnick, “1 -Tb/s Transmission Experiment,” IEEE Photon. Technol. Lett., **8**, 9,

1996.

[17] K. Fukuchi, T. Kasamatsu, M. Morie, R. Ohhira, T. Ito, K. Sekiya, D. Ogasahara, and T. Oono, “10.92-Tb/s (273 x 40-Gb/s) triple-band/ultra-dense WDM optical-repeatered transmission experiment,” Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, PD24, 2001.

[18] S. Bigo, V. Frignac, G. Charlet, W. Idler, S. Borne, H. Gross, R. Dischler, W. Pochlmann, P. Tran, C. Simonneau, D. Bayart, G. Veith, A. Jourdan, and J. P. Hamaide, “10.2Tbit/s (256 x 42.7Gbit/s PDM/WDM) transmission over 100 km TeraLight™ fiber with 1.28bit/s/Hz spectral efficiency,” Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exhibit, PD25, 2001.

[19] NTT コミュニケーションズ 企業情報 (2007 年 1 月 25 日ニュース)

http://www.ntt.com/serviceinfo/2007/01/s_0125.html

[20] Peter J. Winzer, “BEYOND 100G ETHERNET”, IEEE Communication Magazine., **48**, 7, pp. 26-30, 2010.

[21] A.F. Benner, M. Lgnatowski, J. A. Kash, D. M. Kuchta, and M. B. Ritter, “Exploitation of optical interconnects in future server architectures,” IBM J. Res. & Dev., **49**, 4.5, pp.755-775, 2005.

[22] D. A. B. Miller, “Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips,” Proc. IEEE., **97**, 7, pp. 1166-1185 , 2009.

[23] E. Mohammed, A. Alduino, T. Thomas, H. Braunisch, D. Lu, J. Heck, A.Liu, I. Young, B. Barnett, G. Vandentop, and R. Mooney, “Optical Interconnects System Integration for Ultra-Short-Reach Application,” Intel Technol. J., **8**, 2, pp. 115-127,

2004.

[24] D. A. B. Miller, “Limit to the Bit-Rate Capacity of Electrical Interconnects from the Aspect Ratio of the System Architecture,” *J. Parallel and Distributed Computing.*, **41**, 1, pp. 42-52, 1997.

[25] INTERNATIONAL TECHNOLOGY ROADMAP FOR SEMICONDUCTOR
2011 EDITION ASSEMBLY AND PACKAGING

<http://www.itrs.net/Links/2011ITRS/2011Chapters/2011AP.pdf>

[26] F. A. P. Tooley, “Challenges in Optically Interconnecting Electronics,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **2**, 1, pp. 3-13, 1996.

[27] D. A. B. Miller, “Physical Reasons for Optical Interconnection,” *Intel J. Optoelectron.*, **11**, pp. 155-168, 1997.

[28] M. J. Koblinsky, B. A. Block, J.-F. Zheng, B. C. Barnett, E. Mohammed, M. Reshotko, F. Robertson, S. List, I. Young, and K. Cadien, “On-Chip Optical Interconnects,” *Intel Technol. J.*, **8**, 2, pp. 129-142, 2004.

[29] K. Kurata, I. Hatakeyama, K. Miyoshi, T. Shimizu, J. Sasaki, M. Kurihara, and K. Yamamoto, “Opto-Electronics Packaging Techniques for Interconnection,” *Proc. of Laser and Electro-Optics Society* 2003, TuWi, pp. 364-365, 2003.

[30] S. Addagatla, M. Shaw, S. Sinha, P. Chandra, and S. V. Michael, “Direct Network Prototype Leveraging Light Peak Technology,” *Proc. Of IEEE Symposium on High Performance Interconnects* 2010, pp. 109-112, 2010.

[31] H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, “GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **18**, 12, pp. 2329-2330, 1979.

-
- [32] K. Iga, "Surface-Emitting Laser-Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field," *IEEE. J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **6**, 6, pp. 1201-1215, 2000.
- [33] D. G. Deppe, D. I. Huffaker, J. Shin, and Q. Deng, "Very-Low-Threshold Index-Confined Planar Microcavity Lasers," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7**, 9, pp. 965-967, 1995.
- [34] Y. Hayashi, T. Mukaihara, N. Hatori, N. Ohnoki, A. Matsutani, F. Koyama, and K. Iga, "Record low-threshold index-guided InGaAs/GaAlAs vertical-cavity surface-emitting laser with a native oxide confinement structure," *Electron. Lett.*, **31**, 7, pp. 560-561, 1995.
- [35] G. M. Yang, M. H. MacDougall, and P. D. Dapkus, "Ultralow threshold current vertical-cavity surface-emitting lasers obtained with selective oxidation," *Electron. Lett.*, **31**, 11, pp. 886-888, 1995.
- [36] K. L. Lear, K. D. Choquette, R. P. Schneider Jr., S. P. Kilcoyne, and K. M. Geib, "Selectivity oxidised vertical-cavity surface-emitting lasers with 50% power conversion efficiency," *Electron. Lett.*, **31**, 3, pp. 208-209, 1995.
- [37] R. Jager, M. Grabherr, C. Jung, R. Michalzik, G. Reiner, B. Weigl, and K. J. Ebeling, "57% wallplug efficiency oxide-confined 850nm wavelength GaAs VCSELs," *Electron. Lett.*, **33**, 4, pp. 330-331, 1997.
- [38] K. Takaki, N. Iwai, K. Hiraiwa, S. Iwai, H. Shimizu, T. Kageyama, Y. Kawakita, N. Tsukiji, and A. Kasukawa, "A recorded 62% PCE and low series and thermal resistance VCSEL with a double intra-cavity structure," *Proc. of International*

Semiconductor Laser Conference, PDP1, 2008.

[39] F. Koyama, S. Kinoshita, and K. Iga, "Room Temperature CW Operation of GaAs Vertical Cavity Surface Emitting Laser," Trans. IEICE., **E71**, 11, pp. 1089-1090, 1988.

[40] J. L. Jewell, A. Scherer, S. L. McCall, Y. H. Lee, S. J. Walker, J. P. Harbison, and L. T. Florez, "Low-threshold electrically pumped vertical-cavity surface-emitting microlasers," Electron. Lett., **25**, 17, pp. 1123-1124, 1989.

[41] R. A. Morgan, L. M. F. Chirovsky, M. W. Focht, G. Guth, M. T. Asom, R. E. Leibenguth, F. C. Robinson, Y. H. Lee, and J. L. Jewell, "Progress in planarized vertical cavity surface emitting laser devices and arrays," Proc. SPIE, 1562, pp. 149-159, 1991.

[42] F. A. Kish, S. J. Caracci, N. Holonyak, J. M. Dallesasse, K. C. Hsieh, and M. J. Ries, "Planar native - oxide index - guided $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ - GaAs quantum well heterostructure lasers," Appl. Phys. Lett., **59**, 14, pp. 1755-1757, 1991.

[43] K.D. Choquette, K. L. Lear, R. P. Schneider, and K. M. Geib, "Cavity characteristics of selectively oxidized vertical-cavity lasers," Apply. Phys. Lett., **66**, 25, pp. 3413-3415, 1995.

[44] R. H. Johnson and D. M. Kuchta, "30 Gb/s Directly Modulated 850 nm Datacom VCSELs," Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics, CPDB, 2008.

[45] P. Westbergh, J. S. Gustavsson, A. Haglund, M. Sköld, A. Joel, and A. Larsson, "Hightspeed, low-current-density 850 nm VCSELs," J. Sel. Top. Quantum Electron., **15**, 3, pp.694-703, 2009.

-
- [46] J. Ko, E. R. Hegblom, Y. Akulova, B. J. Thibeault and L. A. Coldren, "Low-threshold 840-nm laterally oxidized vertical-cavity lasers using AlInGaAs-AlGaAs strained active layers," IEEE Photon. Technol. Lett., **9**, 7, pp.863-865, 1997.
- [47] H. C. Kuo, Y. S. Chang, F. Y. Lai, T. H. Hsueh, L. H. Lai and S. C. Wang, "Highspeed modulation of 850 nm InGaAsP/InGaP strain-compensated VCSELs," Electron. Lett., **39**, 14, pp.1051-1053, 2003.
- [48] T. Aggerstam, R. M. V. Würtemberg, C. Runnström, and E. Choumas, "Large aperture 850nm oxide-confined VCSELs for 10Gb/s data communication," Proc. of SPIE, 4629, pp. 19-24, 2002.
- [49] M. Kicherer, R. Jager, R. King, F. Mederer, H. J. Unold, and K. J. Ebeling, "Single- and multi-mode VCSELs for 12.5Gb/s data links," Proc. of Lasers and Electro-Optics Europe, CTuG2, 2000.
- [50] M. Webster, R. V. Penty, I. H. White, M. R. T. Tan, and S. W. Corzine, "Performance of 10Gbit/s VCSELs operating at 85°C," Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics 2000, CTuF2, pp. 201-202, 2000.
- [51] P. Pepeljugoski, D. Kuchta, Y. Kwark, P. Pleunis, and G. Kuyt, "15.6Gb/s Transmission over 1km of Next Generation Multimode Fiber," Proc. of European Conference on Optical communications, We.P.31, pp. 440-441, 2001.
- [52] D. M. Kuchta, P. Pepeljugoski and Y. Kwark, "VCSEL modulation at 20 Gb/s over 200 m of multimode fiber using a 3.3 V SiGe laser driver IC," Proc. of Lasers and Electro-Optics Summer Topical Meeting, WA1.2, pp. 49-50, 2001.

-
- [53] S. A. Blokhin, J. A. Lott, A. Mutig, G. Fiol, N. N. Ledentsov, M. V. Maximov, A. M. Nadtochiy, V. A. Shchukin, and D. Bimberg, "Oxide-confined 850nm VCSELs operating at bit rates up to 40 Gbit/s," *Electron. Lett.*, **45**, 10, pp. 501–503, 2009.
- [54] A. Mutig, S. A. Blokhin, A. M. Nadtochiy, J. A. Lott, V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, and D. Bomberf, "Frequency response of large aperture oxide-confined 850nm vertical cavity surface emitting lasers," *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 13, pp. 131101-1–131101-3, 2009.
- [55] P. Westbergh, J. S. Gustavsson, A. Haglund, and A. Larsson, "32 Gbit/s transmission experiments using high speed 850nm VCSELs," *Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics and International Quantum Electronics Conference, CMGG6*, 2009..
- [56] P. Westbergh, J. S. Gustavsson, Å. Haglund A. Larsson, F. Hopfer, G. Fiol, D. Bimberg, and A. Joel, "32 Gbit/s multimode fibre transmission using high-speed, low current density 850 nm VCSEL," *Electron. Lett.*, **45**, 7, pp. 366–368, 2009.
- [57] A. Mutig, S. Blokhin, A. M. Nadtochiy, G. Fiol, J. A. Lott, V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, and D. Bimberg, "High-speed 850nm oxide-confined VCSELs for DATACOM applications," *Proc. of SPIE*, 7615, pp. 76150N-1-76150N-11, 2010.
- [58] P. Westbergh, J. S. Gustavsson, B. Kögel, Å. Haglund, A. Larsson, A. Mutig, A. Nadtovhily, D. Bimberg, and A. Joel, "40Gbit/s errorfree operation of oxide-confined 850nm VCSEL," *Electron. Lett.*, **46**, 14, pp. 1014–1016, 2010.
- [59] S. B. Healy, E. P. O'Reilly, J. S. Gustavsson, P. Westbergh, A. Larsson, and A. Joel, "Active region design for high-speed 850nm VCSELs," *IEEE J. Quantum*

Electron., **46**, 4, pp. 506–512, 2010.

[60] Y. Ou, J. S. Gustavsson, P. Westbergh, Å. Haglund, A. Larsson, and A. Joel, “Impedance characteristics and parasitic speed limitations of high-speed 850nm VCSELs,” *IEEE Photo. Technol. Lett.*, **21**, 24, pp. 1840–1842, 2009.

[61] P. Westbergh, J. S. Gustavsson, B. Kögel, A. Haglund, A. Larsson, and A. Joel, “Speed enhancement of VCSELs by photon lifetime reduction,” *Electron. Lett.*, **46**, 13, pp. 938–940, 2010.

[62] P. Westbergh, J. S. Gustavsson, B. Kögel, Å. Haglund, and A. Larsson, “Impact of Photon Lifetime on High-Speed VCSEL Performance,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron.*, **17**, 6, pp. 1603–1613.

[63] P. Westbergh, J. S. Gustavsson, Å. Haglund, R. Safaisini, J. S. Gustavsson, and A. Larsson, “High-speed 850nm VCSELs operating error free up to 57 Gbit/s,” *Electron. Lett.*, **49**, 16, pp. 1021–1023, 2013.

[64] J. A. Kash, F. Doany, D. Kuchta, P. Pepeljugoski, L. Schares, J. Schaub, C. Schow, J. Trehwella, C. Baks, Y. Kwark, C. Schuster, L. Shan, C. Tsang, J. Rosner, F. Libsch, R. Budd, P. Chiniwalla, D. Guckenberger, D. Kucharski, R. Dangel, B. Offrein, M. Tan, G. Troff, D. Lin, A. Tandon, and M. Nystrom, “Terabus: a chip-to-chip parallel optical interconnects,” *Proc. of Lasers and Electro- Optics Society, TuW3*, pp. 363–364, 2005.

[65] Jeffrey A. Kash, F. E. Doany, L. Schares, C. L. Schow, C. Schuster, D. M. Kuchta, P. K. Pepeljugoski, J. M. Trehwella, C. W. Baks, R. A. John, L. Shan, Y. H. Kwark, R. A. Budd, P. Chiniwalla, F. R. Libsch, J. Rosner, C. K. Tsang, C. S. Patel, J. D.

Schaub, D. Kucharski, D. Guckenberger, S. Hegde, H. Nyikal, R. Dangel, and F. Horst, “Chip-to-Chip optical interconnects,” Proc. of Optical Interconnect Technology, OFA3, 2006.

[66] L. Schares, J. Kash, F. Doany, C. L. Schow, C. Schuster, D. M. Kuchta, P. K. Pepeljugoski, J. M. Trewhella, C. W. Baks, R. A. John, Lei Shan, Y. H. Kwark, R. A. Budd, P. Chiniwalla, F. R. Libsch, J. Rosner, C. K. Tsang, C. S. Patel, J. D. Schaub, R. Dangel, F. Horst, B. J. Offrein, D. Kucharski, D. Guckenberger, S. Hedge, H. Nyikal, C.-K. Lin, A. Tandon, G. R. Trott, M. Nystrom, D. P. Bour, R. T. M. Tan, and D. W. Dolfi, “Terabus: Terabit/second-class card-level optical interconnects technologies,” IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron., **12**, 5, pp. 1032-1044, 2006.

[67] Y.-C. Chang, C. S. Wang, L.A. Coldren, “High-efficiency, high-speed VCSELs with 35 Gbit/s error-free operation,” IEEE Electron. Lett., **43**, 19, pp. 1022-1023, 2007.

[68] W. Hofmann, P. Moser, P. Wolf, A. Mutig, M. Kroh, and D. Bimberg, “44 Gb/s VCSEL for optical interconnects,” Proc. of Optical Fiber Communication Conference and Exhibition and the National Fiber Optic Engineers Conference, PDPC5, 2011.

[69] F. Hopfer, A. Mutig, M. Kuntz, G. Fiol, D. Bimberg, N. N. Ledntsov, V. A. Shchukin, S. S. Mikhlin, D. L. Livshits, I. L. Krestnikov, A. R. Kovsh, N. D. Zakharov, and P. Wemer, “Single-mode submonolayer quantum-dot vertical-cavity surface-emitting lasers with high modulation bandwidth,” Appl. Phys. Lett., **89**, 14, pp. 141106-1-141106-3, 2006.

[70] F. Hopfer, A. Mutig, G. Fiol et al., “20Gb/s 85°C error-free operation of vcsels

based on submonolayer deposition of quantum dots,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **13**, 5, pp. 1302–1308, 2007.

[71] A. Mutig, G. Fiol, P. Moser, D. Arsenijevic, V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, S. S. Mikhlin, I. L. Krestnikov, D. A. Livshits, A. R. Kovsh, F. Hopfer, and D. Bimberg, “120°C 20 Gbit/s operation of 980 nm VCSEL,” *Electron. Lett.*, **44**, 22, pp. , 2008.

[72] A. Mutig, G. Fiol, K. Pötschke, P. Moser, D. Arsenijevic, V. A. Shchukin, N. N. Ledentsov, S. S. Mikhlin, I. L. Krestnikov, D. A. Livshits, A. R. Kovsh, F. Hopfer, and D. Bimberg, “Temperature-dependent small-signal analysis of high-speed hightemperature stable 980-nm VCSELs,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **15**, 3, pp. 679-686, 2009.

[73] Li Zeng, Qiwen Zhong, and WB Jiang, “40GE and 100GE Transport over OTN,” *Proc. of May 2008 Interim Meeting IEEE P802.3ba 40Gb/s and 100Gb/s Ethernet Task Force*.

[74] 10 Gb oxide isolated VCSEL reliability report, Finisar Corporation (2007).

[75] F. Koyama, and Y. Suematsu, “Analysis of dynamic spectral width of dynamic-single-mode (DSM) lasers and related transmission bandwidth of single-mode fibers,” *IEEE J. Quantum. Electron.*, **QE-21**, 4, pp.292-297.

[76] D. S. Chemla, T. C. Damen, and D. A. B. Miller, “Electroabsorption by Stark effect on room-temperature excitations in GaAs/GaAlAs multiple quantum well structures,” *Appl. Phys. Lett.*, **42**, 15, pp. 864-866, 1983.

[77] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, and T. C. Damen, “Band-Edge Electroabsorption

in Quantum Well Structures : The Quantum-Confined Stark Effect,” Phys. Rev. Lett., **53**, 22, pp. 2173-2176, 1984.

[78] D. A. B. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, W. Wiegmann, T. H. Wood, and C. A. Burrus, “Electric field dependence of optical absorption near the bandgap of quantum well structures,” Phys. Rev. B., **32**, 2, pp. 1043-1060, 1985.

[79] T. H. Wood, C. A. Burrus, D. A. Miller, D. S. Chemla, T. C. Damen, A. C. Gossard, and W. Wiegmann, “131 ps Optical Modulation in Semiconductor Multiple Quantum Wells (MQW’s),” IEEE. J. Quantum. Electron., **QE-21**, 2, pp. 117-118, 1985.

[80] D. A. Miller, J. S. Weiner, and D. S. Chemla, “Electric-Field Dependence of Linear Optical Properties in Quantum Well Structures : Qaveguide Electroabsorption and Sum Rules,” IEEE. J. Quantum. Electron., **QE-22**, 9, pp. 1816-1830, 1986.

[81] Y. Kawamura, K. Wakita, Y. Yoshikuni, Y. Itaya, and H. Asahi, “Monolithic integration of InGaAs-InP DFB lasers and InGaAs-InAlAs MQW optical modulators,” Electron. Lett., **22**, 5, pp. 242-243, 1986.

[82] Y. Kawamura, K. Wakita, Y. Yoshikuni, Y. Itaya, and H. Asahi, “Monolithic integration of a DFB laser and an MQW optical modulator in the 1.5- μ m wavelength range,” IEEE J. Quanrum Electron., **23**, 6, pp. 915-918, 1991.

[83] T. Kato, T. Sasaki, N. Kida, K. Komatsu, and I. Mito, “Novel MQW DFB laser diode/modulator integrated light source using bandgap ennergy control epitaxial growth technique,” Proc. of European Conference on Optical Communications,

WeB7-2, 1991.

[84] H. Soda, K. Sato, H. Sudo, S. Takeuchi, and H. Ishikawa, "Ultra-low chirp characteristics of monolithic electroabsorption modulator/ DFB laser light source," Proc. of European Conference on Optical Communications, WeB7-I, 1991.

[85] M. Aoki, H. Sano, M. Suzuki, M. Takahashi, K. Uomi, and A. Takai, "Novel structure MQW electroabsorption-modulator/DFB-laser integrated device fabricated by selective area MOCVD growth," Electron. Lett., **27**, 23, pp. 2138-2140, 1991.

[86] M. Suzuki, H. Tanaka, H. Taga, S. Yamamoto, and Y. Matsushima, " $\lambda/4$ -shifted DFB laser/electroabsorption modulator integrated light source for multigigabit transmission," J. Lightwave Technol., **10**, 1, pp. 90-95, 1992.

[87] K. Wakita, I. Kotaka, H. Asai, M. Okamoto, Y. Kondo. and M. Naganuma, "High-speed and low-drive-voltage monolithic multiple quantum well modulator/DFB laser light source," IEEE Photon. Technol. Lett., **4**, 1, pp. 16-18, 1992.

[88] U. Koren, B. Glance, B. 1. Miller, M. G. Young, M. Chien, T. H. Wood, L. M. Ostar, T. L. Koch, R. M. Jopson, J. D. Evankow, G. Raybon, C. A. Bums, P. D. Magill, and K. C. Reichmann, "Widely tunable distributed Bragg reflector laser with an integrated electroabsorption modulator," Proc. of Optical Fiber Communication Conference, WG5, 1992.

[89] T. Kato, T. Sasaki, K. Komatsu, and I. Mito, "DFB-LD/modulator integrated light source by bandgap energy controlled selective MOVPE," Electron. Lett., **28**, 2,

pp. 153-154, 1992.

[90] M. Aoki, M. Takahashi, M. Suzuki, H. Sano, K. Uomi, T. Kawano, and A. Takai, “High-extinction-ratio MQW electroabsorption modulator integrated DFB laser fabricated by in-plane bandgap energy control technique,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **4**, 6, pp. 580- 582, 1992.

[91] M. Aoki, M. Suzuki, M. Takahashi, H. Sano, T. Ido, T. Kawano, and A. Taki, “High-speed (10 Gbit/s) and low-drive-voltage (1 V peak to peak) InGaAs/InGaAsP MQW electroabsorption modulator integrated DFB laser with semi-insulating buried heterostructure,” *Electron. Lett.*, **28**, 12, pp. 1157-1158, 1992;

[92] S. F. Lim, J. A. Hudgings, L. P. Chen, G. S. Li, W. Yuen, K. Y. Lau, and C. J. Chang-Hasnain, “Modulation of a Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Using an Intracavity Quantum-Well Absorber” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 3, pp. 319-321, 1998.

[93] D. K. Serkland, G. M. Peake, and K. M. Geib, “VCSEL modulation using an integrated electro-absorption modulator,” *Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics*, CTuAA2, 2004.

[94] K. Kuroki, G. Hirano, F. Koyama, K. Hasebe, T. Sakaguchi, N. Nishiyama, C. Caneau, and C. E. Zah, “Slow Light Waveguide Detector Slowing Light in Bragg Reflector Waveguide,” *Proc. of European Conference and Exhibition on Optical Communication*, P049, 2007.

[95] G. Hirano, F. Koyama, K. Hasebe, T. Sakaguchi, N. Nishiyama, C. Caneau, and C-E. Zah, “Slow Light Modulator with Bragg Reflector Waveguide,” *Proc. of Optical*

Fiber Communications Conference, PDP34, 2007.

[96] X. Gu, T. Shimada, A. Matsutani, and F. Koyama, “35- μm Bragg Reflector Waveguide Modulator for High-Speed and Energy-Saving Operation,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **25**, 8, pp. 1766-1769, 2013.

[97] A. Fuchida, A. Matsutani, and F. Koyama, “Slow-light total-internal-reflection switch with bending angle of 30 deg,” *Opt. Lett.*, **36**, 14, pp. 2644-2646, 2011.

[98] X. Gu, T. Shimada, and F. Koyama, “Giant and high-resolution beam steering using slow-light waveguide amplifier,” *Opt. Express.*, **19**, 23, pp. 22675-22683, 2011.

[99] 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.*, **4**, 5, pp. 1712-1719, 2012.

第 2 章

面発光レーザとスローライト導波路の横方向集積

2.1 緒 言

本章ではブラッグ反射鏡導波路における低群速度伝搬 (スローライト) 生成の原理について述べるとともに, 本研究で新しく提案する面発光レーザとスローライト導波路の集積構造及び光結合の原理について述べる. また, モデリングを用いて提案構造による横方向集積の可能性を検討するとともに, 製作した横方向集積デバイスの実験結果について述べる.

2.2 ブラッグ反射鏡導波路における低群速度伝搬

ブラッグ反射鏡導波路とは, 屈折率の異なる周期的な多層膜で構成された導波路であり[1], ファイバー状のものはブラッグファイバーとして知られている[2]. 本研究で扱うブラッグ反射鏡導波路は, 面発光レーザのエピ構造そのものであり, $\lambda/4$ 厚の高屈折率層と低屈折率層を 1 ペアとし, 上下数十ペアの多層膜でコアを挟んだ構造である[3]. ペア数を増やすことで 100% に近い高反射率を得ることが可能であり, 面発光レーザでは, これにより多重共振が可能となり, 数十 nm 厚の活性層にも関わらずレーザ発振が可能である. 活性層は導波路におけるコアであるので, 上述は言い換えれば, コアに強く光を閉じ込めることができることを意味する. このように, ブラッグ反射鏡導波路における光の伝搬は, 一般的な導波路における屈折率差による全反射ではなく, 多層膜による多重反射により行われる. また, 高屈折率層と低屈折率層の屈折率差が大きいほど広いストップバンドを形成することができ[4], 少ないペア数で高反

射率を得ることが可能である。

ブラッグ反射鏡導波路における低群速度伝搬(以下, スローライト)生成の原理を定量的に考察するため, 図 2.1 のようなコアの厚さ D , コアの材料屈折率 n_{core} の導波路における光の伝搬について考える. 伝搬波長を λ , 伝搬角を θ とし, 簡単のため反射率 100% の完全反射ミラーを仮定する. また, 波長帯域は 980nm 帯を仮定している. コア内を伝搬する光の伝搬定数 β は式(2.1)のように表すことができる.

$$\beta_m = k_0 n_{core} \cos \theta = \frac{2\pi}{\lambda} n_{core} \left\{ 1 - \left(m \frac{\lambda}{2D n_{core}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

ここで, k_0 は真空中の波数, m はモード番号である.

ここで, スローライト効果による群速度の低下の度合いを示す指標としてスローダウンファクターを以下のように定義する.

$$f = \frac{c/n_{core}}{v_g} \quad (2.2)$$

ただし,

$$v_g = \left(\frac{d\beta_m}{d\omega} \right)^{-1} \quad (2.3)$$

であり, v_g は群速度である. 以上より, 式(2.2)は以下のように表すことができる.

$$f = \frac{c/n_{core}}{v_g} = \frac{c}{n_{core}} \cdot \frac{d\beta_m}{d\omega} = \frac{2\pi n_{core}}{\lambda} \left\{ \left(\frac{2\pi n_{core}}{\lambda} \right)^2 - \left(m \frac{\pi}{D} \right)^2 \right\}^{-\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

$m = 1$ の時, 式(2.4)を図示すると図 2.2 のようになる. カットオフ波長(λ_c)近傍においてスローダウンファクターが急激に増加していることがわかる. これは, 群速度が急激に低下していることを意味し, その本質はカットオフ波長近傍での巨大な構造分散である. カットオフ波長とはそれ以上の波長で伝搬しなく波長のことで, 式(2.4)において $\lambda_c = 2n_{core}D$ を満たす. また, この時の伝搬角は 90° でありスローダウンファクターは無限になる.

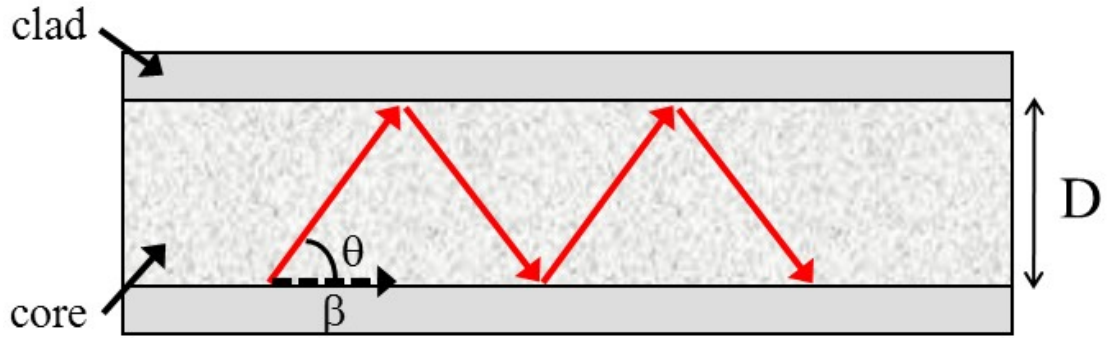


図 2.1 100%完全ミラーによる全反射導波路

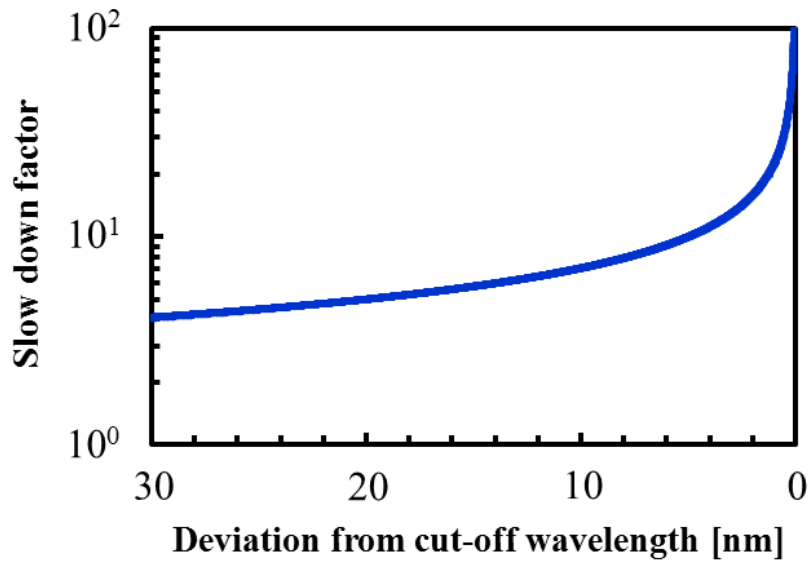


図2.2 スローダウンファクターの波長依存性

ここで、スローライトの効果について考える。図 2.3 は(a)一般的な 3 層スラブ導波路及び(b)ブラッグ反射鏡導波路の概略図である。先述のように、通常の導波路の場合は、低屈折率層のクラッドで挟まれた高屈折率層のコアに光が閉じ込められ、全反射により光は伝搬する。よって、伝搬角が臨界角の補角を超えると放射が起こり、クラッドへ光が漏れ出すことになる。high- Δ シリコン細線導波路においても、 90° に近い角度で伝搬するスローライトモードを生成することはできない。一方、群速度は位相速度と等価であり、コアの屈折率を n_{core} 、光速を c と

すると $v_g' = c/n_{core}$ となる. 式(2.4)より, 例えばスローダウンファクターが 10 の時, ブラッグ反射鏡導波路のスローライトモードの群速度は通常の導波路の群速度の 1/10 であることを意味する. つまり, 単位長さあたりにコアを通る回数が 10 倍になることを意味する. コアに利得媒質や吸収媒質を仮定する, つまり半導体光増幅器 (Semiconductor Optical Amplifier: SOA) や EA 変調器に対しスローライトを適用した場合, 通常の SOA や EA 変調器の 1/10 のデバイス長で同様の効果 (利得や吸収) を得ることができることを意味する. 一般化すると, スローダウンファクター f のスローライトモードを用いることで, デバイス長を $1/f$ にできることになり, デバイスの小型化という面ではスローダウンファクターが大きい程効果を発揮する. また, EA 変調器を仮定した場合, 所望の消光比を得るのに必要な変調電圧を抑えることができるので, 低消費電力動作が期待できる.

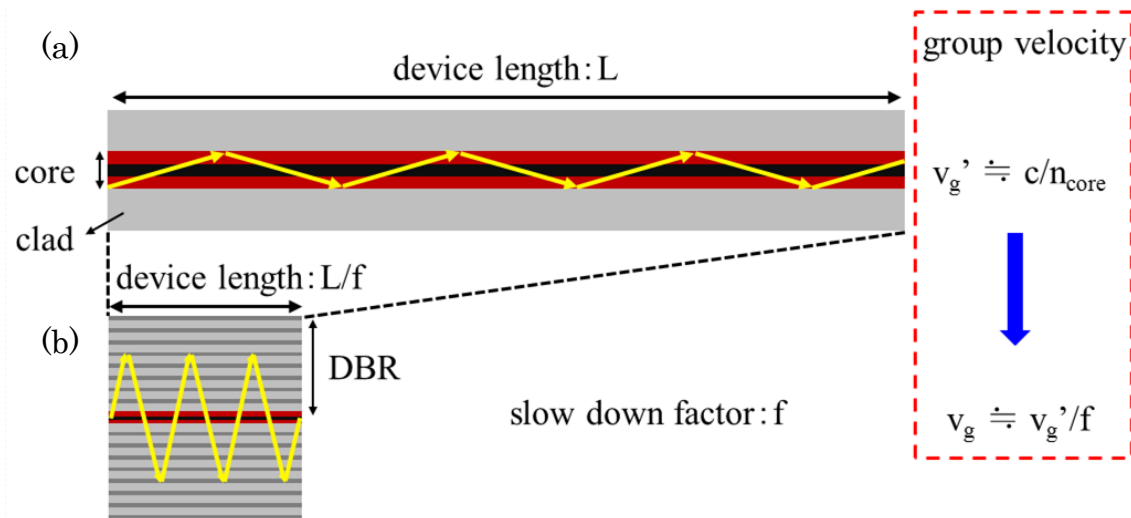


図 2.3 各導波路の断面図 (a) スラブ導波路, (b) ブラッグ反射鏡導波路

ここまで簡単のため、100%の完全反射ミラー導波路を仮定してスローライト生成の原理及びその効果について述べたが、実際のブラッグ反射鏡導波路においては、反射率は100%に近い値で設計できるものの、光の伝搬はDBR領域へ光が染み出す形で行われる。そこで、フィルムモードマッチング法(FIMMWAVE, Photon Design 社製)[5]を用いて、スローダウンファクター及び構造分散の波長依存性を計算した。計算モデルは図2.4に示すように、上部・下部DBRともに $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{As}$ 40 ペアのDBR、活性層に $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ の λ 共振器を仮定した。この構造は通常の面発光レーザのエピ構造とほぼ同様である。図2.5はスローダウンファクター及びブラッグ反射鏡導波路の構造分散の波長依存性を偏光毎に示したものである。偏光状態はDBRの積層面と光の電界成分が平行であるときをTE(Transverse Electric)モード、磁界成分が平行であるときをTM(Transverse Magnetic)モードと定義している。また、構造分散(Waveguide Dispersion:WD)は、式(2.3)の群速度を用いて以下のように表すことができる[6]。

$$WD = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{1}{v_g} \right) \quad (2.5)$$

図2.5より、カットオフ波長近傍において構造分散が急激に増加していることがわかる。先述の通り、これがスローライト生成の本質である。また、偏向依存性がほとんど見られないのは、スローライトモードの伝搬角が大きいいため、光線幾何学で考えた場合、伝搬光の電界成分及び磁界成分がともにブラッグ反射鏡に対して水平に近づくために、偏光による差が小さくなるためと考えられる。これは、ブラッグ反射鏡導波路におけるスローライトの特徴の1つであり、フォトリック結晶におけるスローライトでは実現困難なものである[7]。一方、巨大な構造分散によるパルス広がりや信号の波形劣化の要因となる。しかしながら、チップ間やチップ内配線など、数mmオーダー以下の領域での使用を仮定する場合、大きな問題にはならないと考えられる。

また、横方向の光閉じ込めに関しては、通常の面発光レーザと同様に酸化層を用いることで可能であり、細部構造は2.4節において示す。

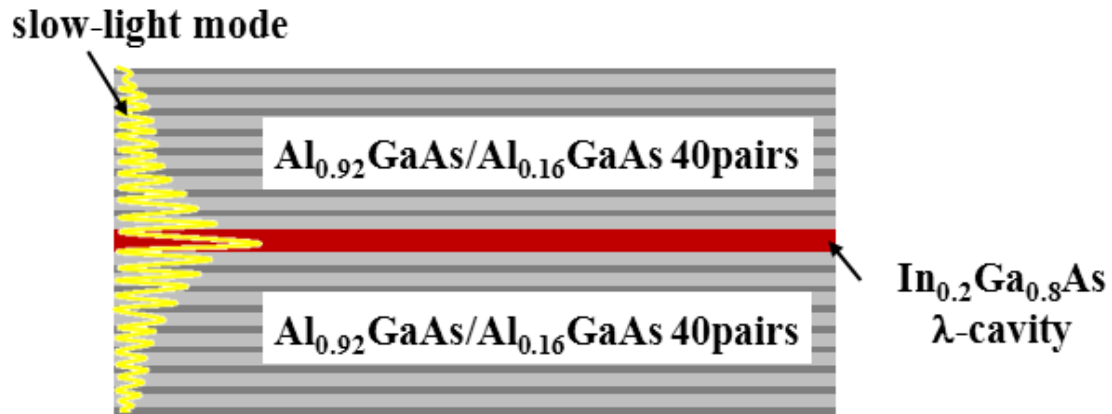


図 2.4 計算モデル:ブラッグ反射鏡導波路の断面図

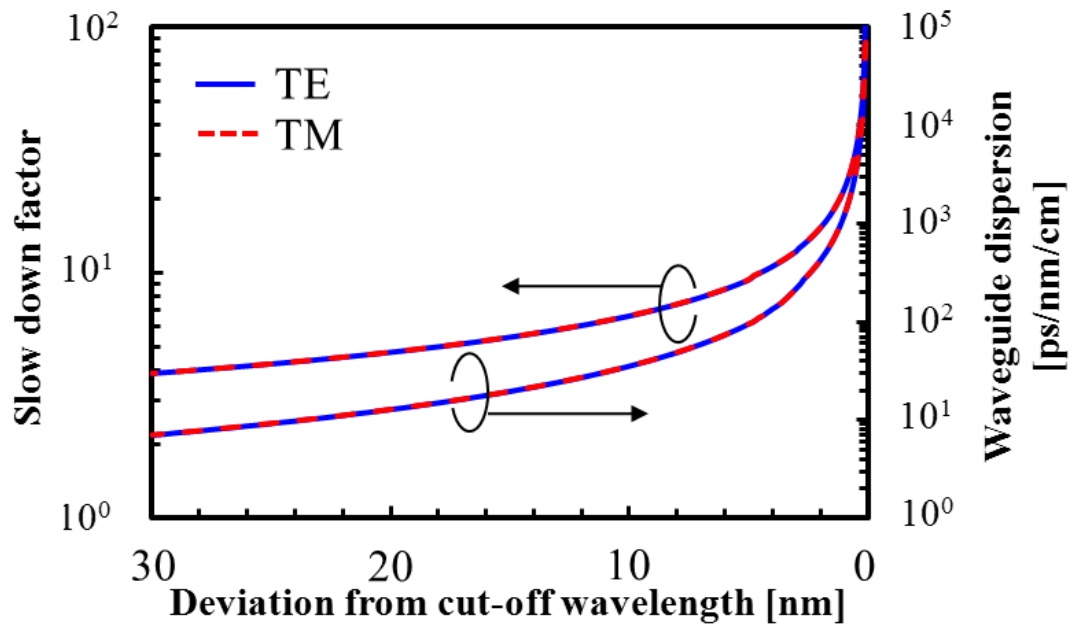


図 2.5 スローダウンファクター及び構造分散の波長依存性

ここで、スローライトモードの放射角について考える。スローライトモードは大きな伝搬角で伝搬するモードであるが、上部へ放射する光の放射角を考えた場合、その角度は小さいことを意味する。図 2.6 に示すブラッグ反射鏡導波路における放射のモデルに示すように、光線幾何学を基に波数ベクトルを用いて考えると、スローライトモードの放射角 θ_r はスネルの法則より

$$\begin{aligned} \sin \theta_i &= \sqrt{1 - \left(\frac{k_c}{k_{in}}\right)^2} \\ &= \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{in}}{\lambda_c}\right)^2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} \sin \theta_r &= n_{wg} \sin \theta_i \\ &= n_{wg} \times \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_{in}}{\lambda_c}\right)^2} \end{aligned} \quad (2.7)$$

と表すことができる。図 2.7 はブラッグ反射鏡導波路における偏向角（後述のビーム偏向器での定義と統一するため、放射角は偏向角として表現する。）の波長依存性の計算結果であり、数値解析によるもの（破線）及びモードマッチング法によるシミュレーション解析によるもの（実線）を示している。また、スローダウンファクターは先述のものと同様である。両解析手法での傾向は概ね一致している。両解析手法において値が完全に一致しないのは、図 2.6 のモデルに基づく数値解析では、DBR への光の染み出しが考慮されていないためである。図 2.7 よりカットオフ波長近傍ではスローライトモードの放射角は 0° に近いことがわかる。これはスローライトモードが 90° に近い角度で伝搬するためであり、スローライトデバイスの遠視野像 (Far-Field Pattern: FFP) を観察することにより、デバイスを伝搬するモードがスローライトモードか否かを判断することができる。また、ブラッグ反射鏡導波路における、偏向角の波長依存性が大きいことは、高解像度ビーム偏向器実現の可能性を示唆する。これは第 5 章にて扱う。

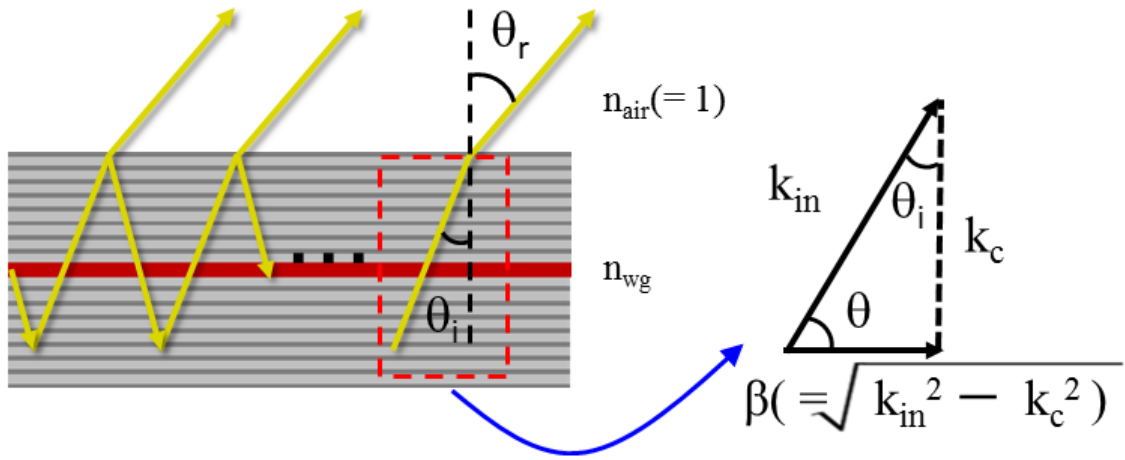


図 2.6 ブラッグ反射鏡導波路における放射モデル

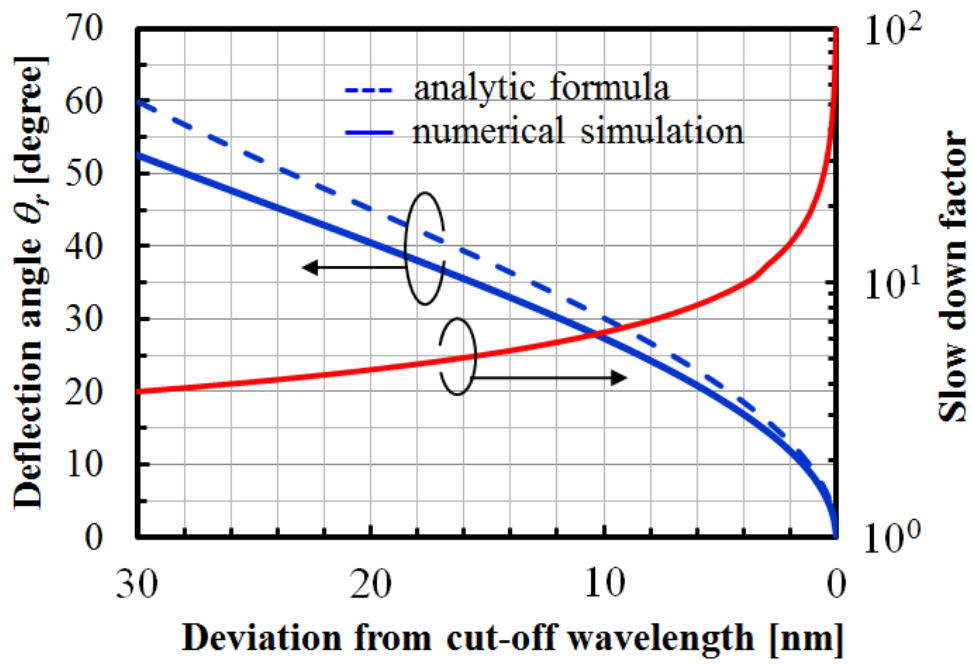


図 2.7 ブラッグ反射鏡導波路における偏向角及びスローダウンファクターの波長依存性

破線:モデルに基づく数値解析結果,
実線:モードマッチング法に基づく数値シミュレーション結果

2.3 面発光レーザとスローライト導波路の横方向集積のモデリング

次に、本研究で提案する面発光レーザとスローライトデバイス(機能デバイス)の新しい集積手法について議論する。構造及び光結合の原理について述べるとともに、フィルムモードマッチング法を用いたモデリングにより提案する集積手法の有効性について示す。

2.3.1 構造と原理

本研究で新しく提案する面発光レーザとスローライトデバイスの集積手法は、従来の垂直方向の集積手法とは構造・光結合の方法ともに全く異なるものである。図 2.8 に提案する構造を示す。面発光レーザとスローライトデバイスをモノリシックに集積した構造となっており、面発光レーザの特徴である2次元アレーを可能にする。よって、集積化によるコスト面でデメリットは想定されない。提案構造の特徴は、

- (1) 上部反射鏡の反射率を 100%近くまで高めることにより、垂直方向に対する光閉じ込めを行う。
- (2) 面発光レーザとスローライトデバイス間に微小酸化膜を形成することによる光の染み出しを利用した横方向光結合を用いる。
- (3) スローライトデバイスに結合した光は、損失補償、変調または偏向され、上部 DBR の反射率を下げることで外部へ取り出す。

それぞれの特徴について補足する。(1)について、通常的面発光レーザの出力は垂直方向から取り出し、その本質はミラー損失である。本集積構造においては、光を横方向に集積したスローライトデバイスに結合させることを想定しているため、垂直方向成分は損失となる。よって、通常的面発光レーザとは異なり、上部 DBR を高反射率ミラーにすることで垂直方向成分

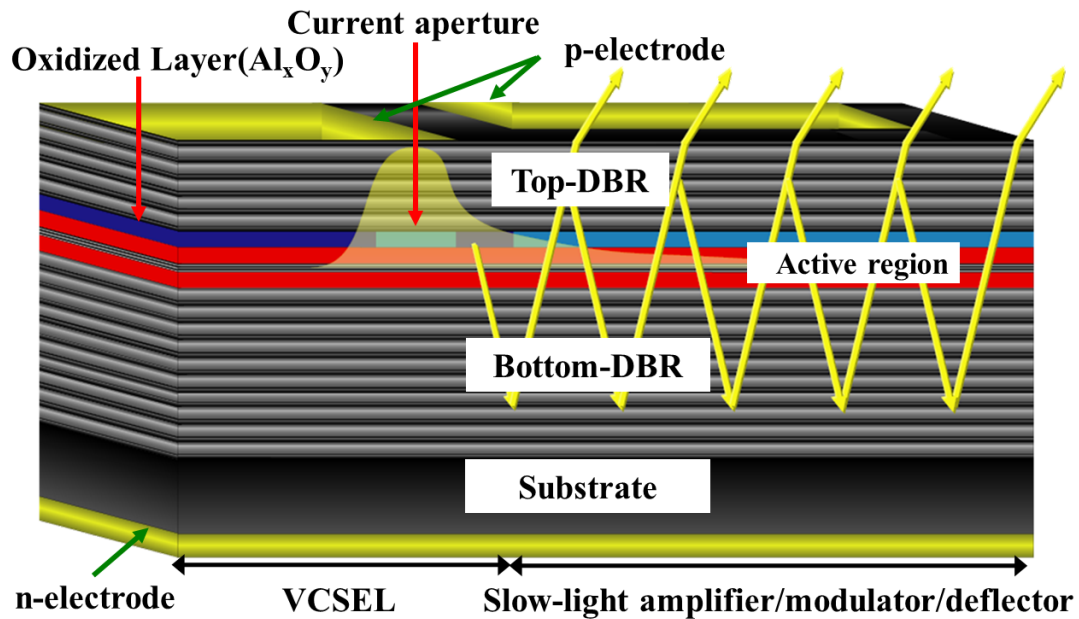


図 2.8 面発光レーザとスローライトデバイスの集積構造(断面図)

を抑制し、共振器内に光を閉じ込める。(2)について、通常的面発光レーザでは酸化膜により横方向に対して 100%の光閉じ込めを行う。この酸化膜はスラブ導波路のクラッド層に相当する。クラッド層の厚さを薄くしていくと、クラッド層による光の閉じ込め効果が弱くなり伝搬放射モードとなる。この原理を本集積手法に適用する。共振器内に閉じ込めた光を横方向に結合させるため、面発光レーザとスローライトデバイス間に微小酸化膜を形成し、スローライトデバイス側に光が漏れる構造を設ける。これにより、共振器内から横方向に光が漏れ出し、これが横方向に結合する成分となる。また、この漏れ成分は通常的面発光レーザのミラー損失に当たり、ミラー損失が横方向への放射損失に変換されたことになる。以上を図示すると図 2.9 のようになる[8]。また、横方向への結合成分の制御は、酸化膜の幅の制御だけでなく、レーザの共振波長の制御によっても行うことができる。面発光レーザから染み出す光の伝搬方向の波数ベクトル成分(k_z)が小さい場合、横方向に染み出す光の量が制限されてしまう。しかしながら、面発光レーザの酸化アパチャー径を小さくすることにより、共振モードの伝搬定数が小さくなり共振

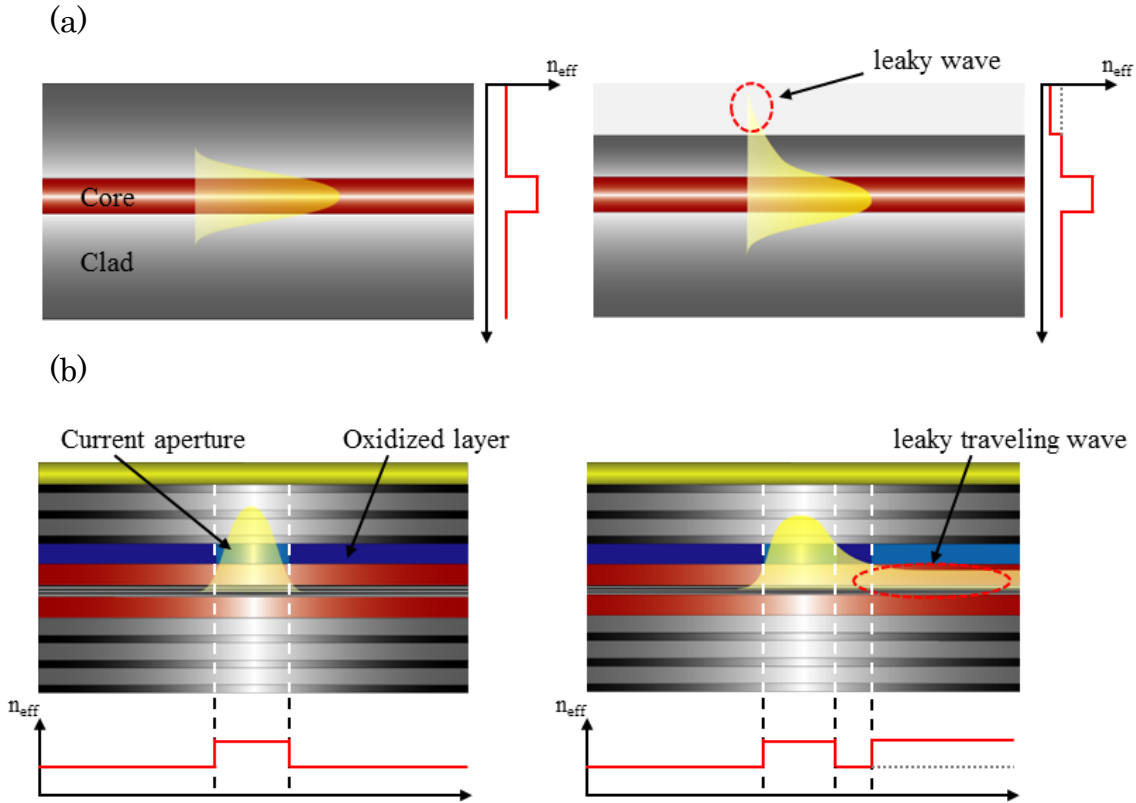


図 2.9 光閉じ込め層の厚さによる光閉じ込め率の制御

(a) スラブ導波路, (b) 面発光レーザ

波長が短波長側にシフトする[9,10]. これにより, 横方向の波数成分を増加させることできる (図 2.10). (3)について, 本研究では集積するスローライトデバイスとして, SOA, EA 変調器及びビーム偏向器を想定している. スローライトデバイス領域に対し電流注入及び電圧印加を行うことで, それぞれの機能デバイスとしての機能を果たす. 細部原理は第 3 章～第 5 章において機能デバイス毎に説明するが, このように損失補償, 変調または偏向された光は, 上部ミラーの反射率を 100%近くある高反射率から低下させることで, 放射光を出力光として取り出すことができる.

本集積構造を用いることで, 面発光レーザ共振器により励振されたスローライトモードを直接

スローライトデバイスに結合させることができるため、スローライトデバイスにおける光結合の課題克服が期待できる。また、垂直方向集積における課題であった戻り光抑制による安定動作が期待できる。加えて、後に示すように製作プロセスも簡易なものであり、コスト面からも優位な構造であると考えられる。

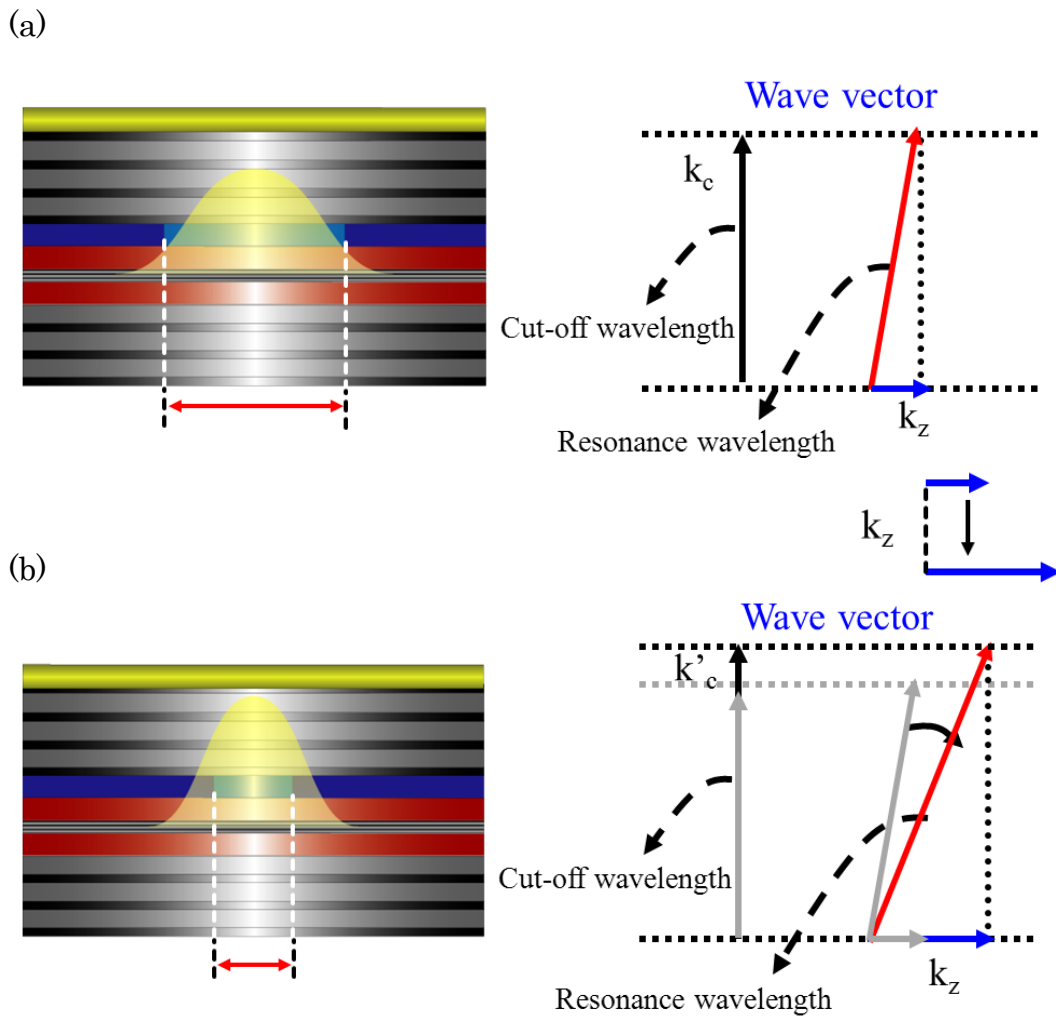


図 2.10 アパチャー径による共振波長

(a) 通常のアパチャー, (b) 微小アパチャー

2.3.2 横方向集積における結合効率

先ず, 提案する集積手法の有用性を検討するため, フィルムモードマッチング法を用いて横方向への光結合効率の計算を行った. 計算モデルを図 2.11 に示す. スローダウンファクター及び構造分散の波長依存性を計算した際の計算モデルに微小酸化膜を設けた構造である. 吸収損失を除くため, スローライト導波路は利得や吸収のないパッシブな導波路を仮定し, 上部・下部 DBR ともに $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{As}$ 4 ペア r を仮定することで, 垂直方向への光の放射を抑制している. 酸化層厚は $d = 30\text{nm}$, カットオフ波長は $\lambda_c = 980\text{nm}$ で設計を行った. 計算における偏向は TE モードのみを仮定しているが, 2.2 節で示したようにスローライトモードの偏向依存性は小さい. 面発光レーザとスローライト導波路間の酸化膜の幅 w は横方向へ漏れ出す光の量を調整するパラメータとなる. また, 活性層と酸化層の間に DBR を挿入することによっても結合量を調整可能である. デバイスの横方向 (図 2.9 の左側) からスローライトモードを励振させると, 左側の反射面と酸化膜により形成される共振器により, 面発光レーザの共振モードが励振されるため, 図 2.11 に示す計算モデルにより, 面発光レーザからスローライト導波路への横方向光結合効率を計算することができる. このようにして定義される共振器の幅は $3.2\mu\text{m}$ とした.

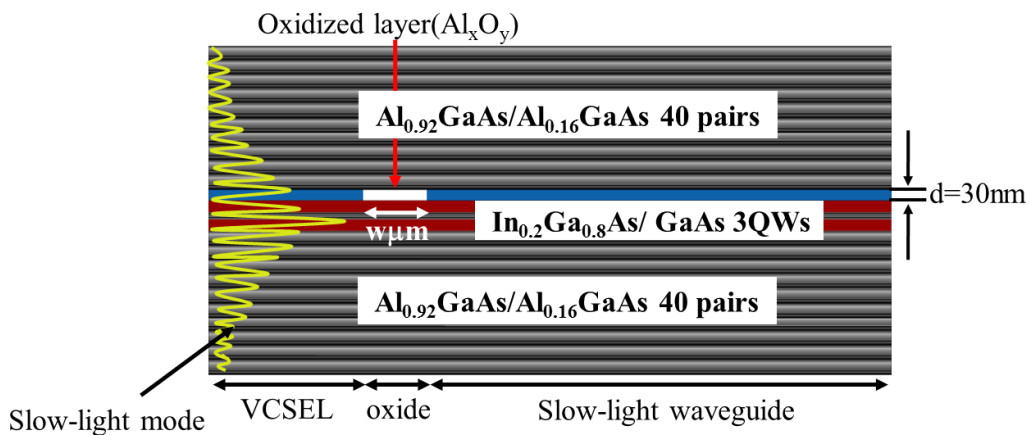


図 2.11 横方向光結合の計算モデル

図 2.12 は横方向光強度分布の計算結果である. 異なる酸化膜幅 w について示しており, 活性層と酸化層の間には 1 ペアの DBR が挿入されている. 面発光レーザ共振器により直接スローライトモードが励振されており, 面発光レーザからスローライト導波路への横方向光結合が確認できる. 横方向への結合効率 η は, 面発光レーザの上部 DBR の反射率が十分に高いと仮定すると, 次式で表される.

$$\frac{1}{\tau_{out}} = \frac{v_g |E_0|^2 dy}{\iint |E|^2 dy dz} \quad (2.6)$$

$$\eta = \frac{1/\tau_{out}}{1/\tau_{int} + 1/\tau_{out}} \quad (2.7)$$

ここで, $\iint |E|^2 dy dz$ は横方向 z 及び垂直方向 y に沿った面発光レーザ共振器内部強度の積分値, E_0 は面発光レーザとスローライト導波路の境界の電界強度, v_g はスローライトモードの群速度である. また, 面発光レーザ内部の吸収損失は 20cm^{-1} と仮定しており, $\tau_{int} = 5.9\text{ps}$ に相当する. 各式の物理的な意味を考えると, 式(2.6)は面発光レーザ共振器外への単位時間当たりの放出損失, 式(2.7)は面発光レーザ共振器における全損失に対する放射損失の割合を表す. つまり, 式(2.7)が表す結合効率 η は, 通常的面発光レーザの外部量子効率に相当する. 図 2.13 は酸化膜の幅 w に応じた横方向光結合効率, 図 2.14 は活性層と酸化層の間に 1 ペアの DBR を挿入した場合の過剰損失の割合を示す. 酸化膜を狭くすることで, 横方向へ染み出す光の量が増加し, 結合効率が増加することがわかる. また, 活性層と酸化層の間に DBR を挿入すると, 更に結合効率を高めることができる. ただし, 横方向への放射損失は先述のとおり, 通常的面発光レーザのミラー損失に相当するため, 結合効率を高くするために酸化膜の幅を狭くすることは, 通常的面発光レーザの上部 DBR のペア数を減少させることを意味し, しきい値の上昇を生む. よって, 結合効率の最適値の目安は, 通常的面発光レーザの外部微分量子効率と同程度の 50%となる. 図 2.13 より, 50%以上という従来の面発光

レーザと同程度の高い効率が得られることがわかる。また、図 2.14 より微小酸化膜での過剰損失は数%オーダーと非常に小さい値であり、しきい値の上昇をもたらす余分な損失は無視できるため、提案構造によるスローライトモードの励振方法は有効であり、面発光レーザとスローライトデバイスの集積化の可能性が示されていると言える。

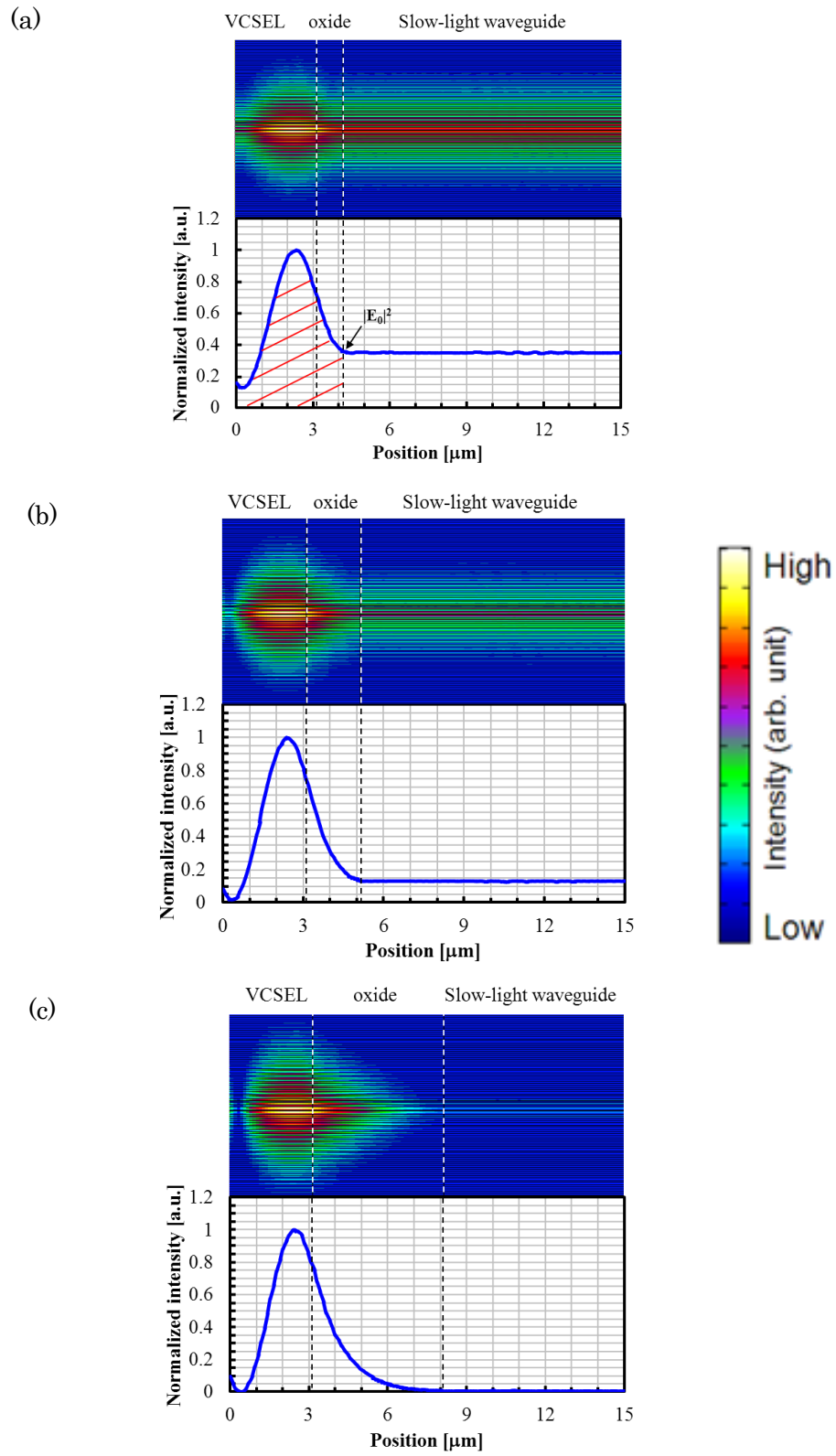


図 2.12 横方向光強度分布 (DBR1 ペア挿入)

(a) $w = 1\mu\text{m}$, $w = 2\mu\text{m}$, $w = 5\mu\text{m}$

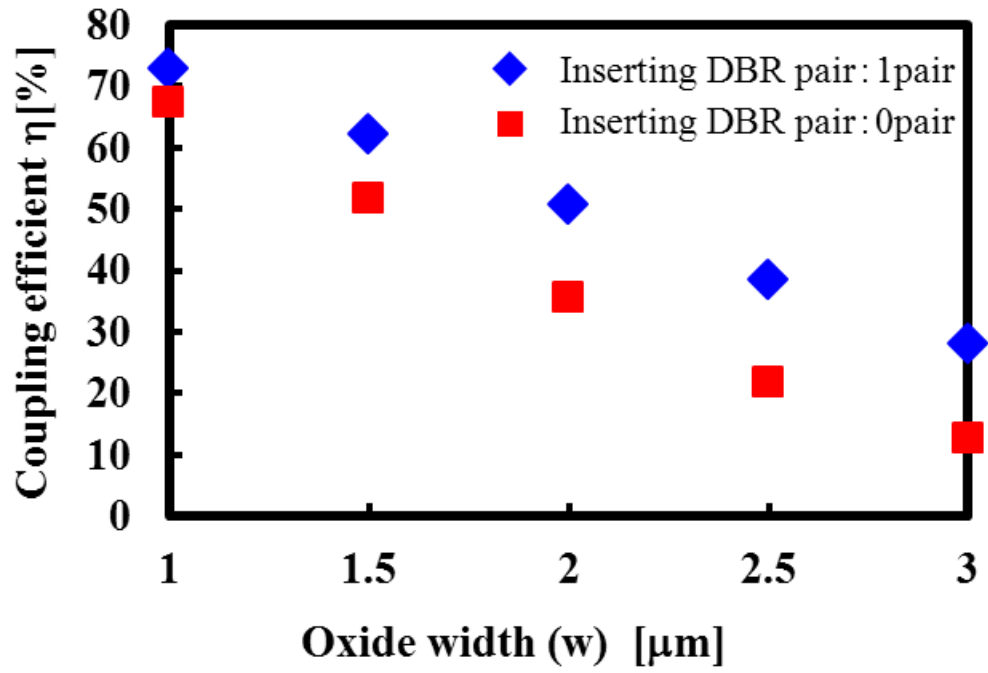


図 2.13 横方向光結合効率

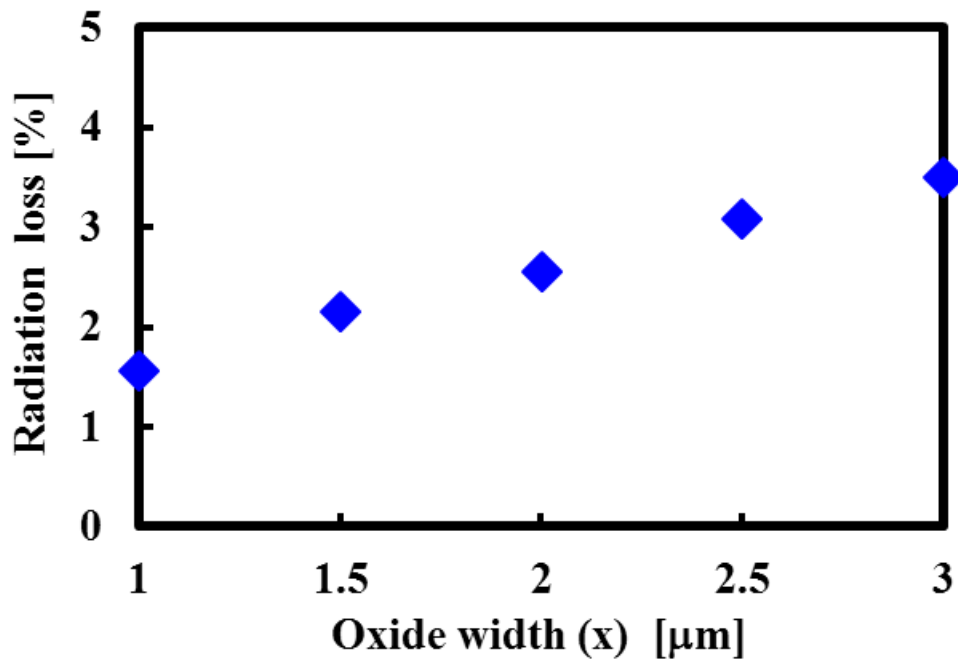


図 2.14 共振器全損失に対する過剰損失の割合

2.4 スローライト導波路集積デバイスの製作及び特性評価

提案する集積デバイスの構造は、面発光レーザとスローライトデバイスのモノリシック集積構造であるので、その製作プロセスは通常的面発光レーザと同様であり、簡易なプロセスであると言える。本節では、実際に製作したスローライト導波路集積デバイスの構造及び製作プロセスについて説明するとともに、諸特性について議論する。

2.4.1 デバイス構造

集積デバイスの製作に用いたのは通常的面発光レーザのエピ構造を持つ半導体ウェハであり、その構造は図 2.15 に示すとおりである。集積デバイスは、 $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{As}$ 26 ペアの上部 DBR、 $\text{Al}_{0.16}\text{Ga}_{0.84}\text{As}/\text{Al}_{0.92}\text{Ga}_{0.08}\text{As}$ 40 ペアの下部 DBR により、 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ の 3 重量子井戸を含む共振器を挟む構造である。また、横方向の光閉じ込め構造は水蒸気酸化により形成し、面発光レーザの垂直方向出射は上部 Au 電極により抑制される。2.3 節で

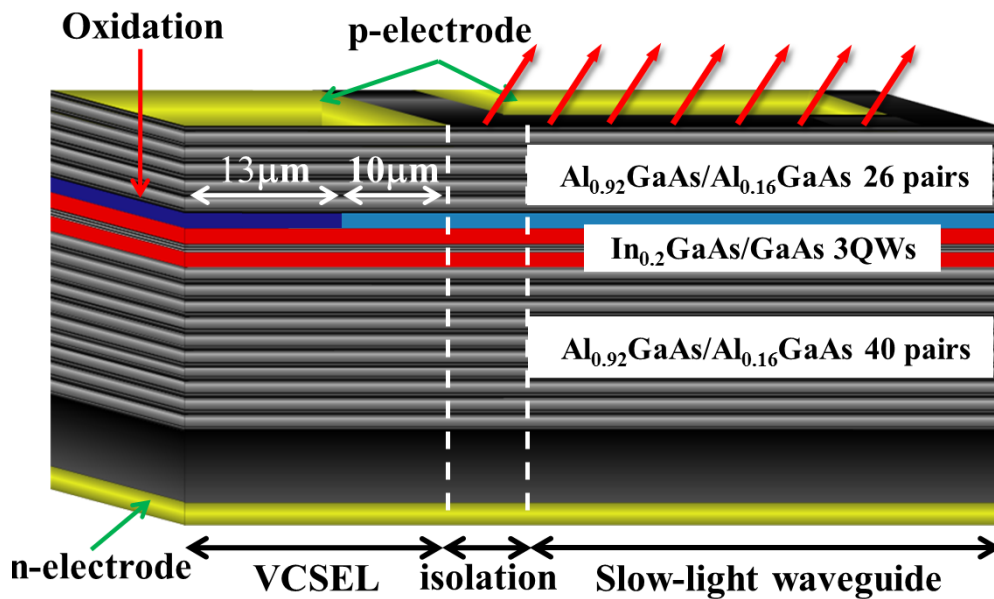


図 2.15 面発光レーザとスローライト導波路集積デバイスの概略図

示した集積構造では、面発光レーザとスローライト導波路間に微小酸化膜形成を仮定しているが、その形成方法は未確立である。よって、図 2.15 に示すように、微小酸化膜を設けない構造を採っている。面発光レーザの活性領域は $4\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ (幅方向 $\times$ 長さ方向) で設計しているが、長さ方向の利得領域は面発光レーザ上部電極の位置により等価的な長さとして定義される。ウェハのエタロン波長とフォトルミネッセンス(Photoluminescence: PL)ピーク波長間のオフセット波長は 20nm である。

2.4.2 製作プロセス

次にデバイスの製作プロセスについて、概略図と用いて説明する。製作プロセスは図 2.16 に示す順序で進められる。

まず、フォトリソグラフィーによるメサ形成用のパターニングを行う。フォトレジストには AZ5240NJ (AZ ELECTRONIC MATERIALS 社製) を用いている。また、半導体ウェハ表面にスパッタされている SiO_2 との密着性を助けるために、フォトレジストを塗布する前に OAP という密着補助剤を用いた。露光後、現像液 (AZ developer) により現像を行う。最後に、次のプロセスで行う誘導結合プラズマ (Inductively Coupled Plasma: ICP) エッチング時に障害となるため、フォトレジストの箇所以外の SiO_2 をバッファードフッ酸 (BHF) によりエッチングする。

ICP エッチングにより、ウェハ表面から約 $5\mu\text{m}$ 程度のエッチングを行う。エッチングの深さは、上部 DBR のペア数に応じて変える必要がある。ここでの ICP エッチングの目的は素子分離であるが、電流注入に伴う活性領域でのキャリア広がりを抑制するため、活性層下部までエッチングを行うことを着眼とする。ICP エッチング終了後は、フォトマスクとして用いた AZ を除去する。

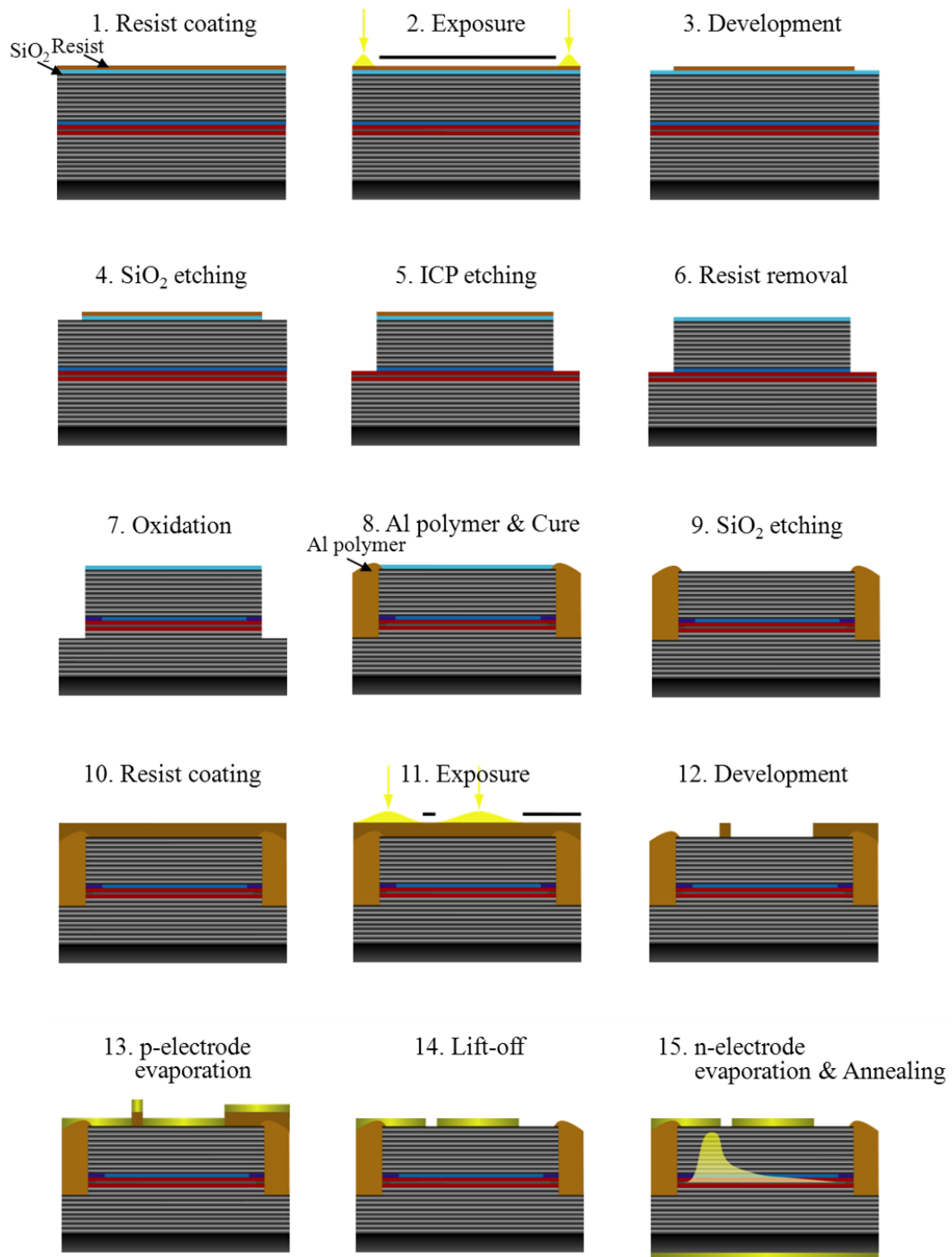


図 2.16 製作プロセス

水蒸気酸化プロセスを行う前に、ICP エッチング後に生じた自然酸化膜をアンモニア水溶液により除去する。これには酸化膜形成の不均一性を抑制する目的がある。水蒸気酸化は、アルミニウム組成の高い層が高温水蒸気化において低屈折率絶縁膜である Al_xO_y に変化することを利用し[11]、電流及び光閉じ込め構造を形成するプロセスである。

先述のパターニングプロセスにより、AL ポリマー（旭硝子社製）をメサ周囲に塗布し、メサの保護及び絶縁構造を形成する。その後、キュアによりガラス転移させる。

メサ表面の SiO_2 を BHF によりエッチングし、GaAs コンタクト層を露出させる。p 電極蒸着用のパターニングの際、次のリフトオフプロセスを容易にするため、AZ の下に PMGI (Micro Chem 社製) を塗布し、真空蒸着器により電極を蒸着する。p 電極を形成する材料は、Au / Zn / Au である。

Remover-PG (Micro Chem 社製) によりリフトオフを行い、続いて n 電極を蒸着する。n 電極を形成する材料は、AuGe / Au である。

最後にアニールプロセスにより、金属と半導体界面のオーミック接触を形成する[12,13]。

以上のプロセスにより、集積デバイスは製作される(図 2.17)。

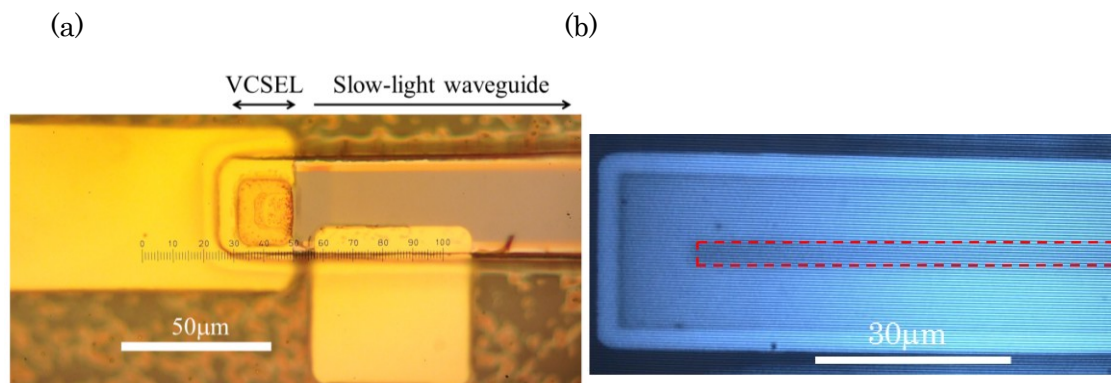


図 2.17 スローライト導波路集積デバイス
(a) レーザ顕微鏡画像, (b) 赤外顕微鏡画像

2.4.3 面発光レーザからスローライト導波路への横方向光結合

面発光レーザからスローライト導波路への横方向光結合の確認は、先述の通り FFP の観察により得られる。面発光レーザの発振波長はスローライト導波路のカットオフ近傍であると予想されるので、数°の角度成分を持つ FFP が観測されればそれはスローライトモードが面発光レーザにより直接励振され、スローライト導波路に結合していると判断できる。また、NFP の観察も同時に行うことで伝搬距離を見積もることができる。

図 2.18 は FFP 及び NFP 観察のための測定系である。面発光レーザへの電流注入によりレーザ発振するが、図 2.17 のように面発光レーザ上部は電極で覆われているので、垂直方向成分は抑制される。よって、横方向に結合した光の FFP 及び NFP を観察することができる。また、NFP 及び FFP の分解能はそれぞれ $0.7\mu\text{m}$ と 0.02° である。

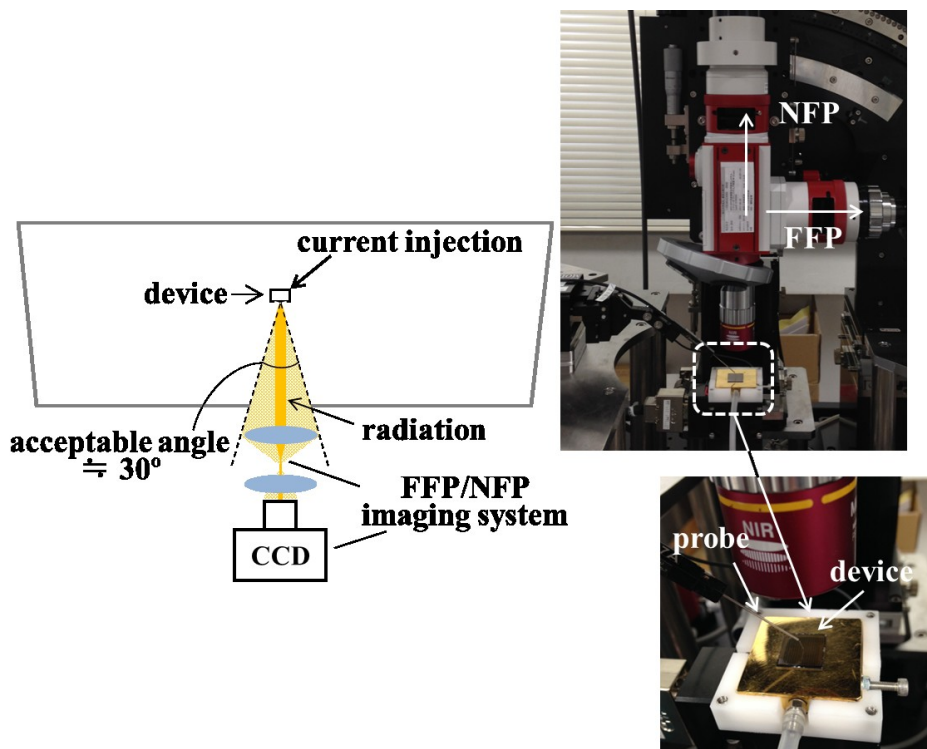


図 2.18 FFP/NFP 測定系

図 2.19 は面発光レーザに 2.5mA の電流注入を行った時の NFP 及び FFP である。面発光レーザへの電流注入量の調整は FFP を観察しながら調整を行った。NFP の観察結果より、面発光レーザからスローライト導波路への横方向光結合が確認できる。NFP から伝搬距離は約 20 μm であることが確認できるが、これは放射損失及び吸収損失により制限されている。また、FFP の観察結果より偏向角は約 9°であることが確認でき、第 2 章 2.2 節の図 2.7 よりスローダウンファクター ≈ 20 のスローライトモードが、面発光レーザからスローライト導波路に結合していることが確認できる。また、0°付近に強度ピークは確認できないことに加え、マイナス方向の成分も確認できないことから、上部電極による面発光レーザの垂直方向成分が抑制できているとともに、スローライト導波路から面発光レーザへの戻り光が抑制されていると理解できる。

以上より、面発光レーザとスローライト導波路の横方向集積の実証に初めて成功した。スローライト導波路部に電流注入を行うことにより SOA 集積、電圧を印加することにより EA 変調器集積が可能である。変調器集積の場合においては、帯域を制限する要因となる戻り光が抑制できる事実は重要である。また、詳細は第 5 章で述べるが、ヒーターを集積することにより熱駆動のビーム偏向器を集積することが可能である。面発光レーザとスローライト導波路の集積化に成功したことにより、上記機能デバイスの他、様々な機能デバイス集積の可能性があり、面発光レーザの高性能化・高機能化が期待できる。

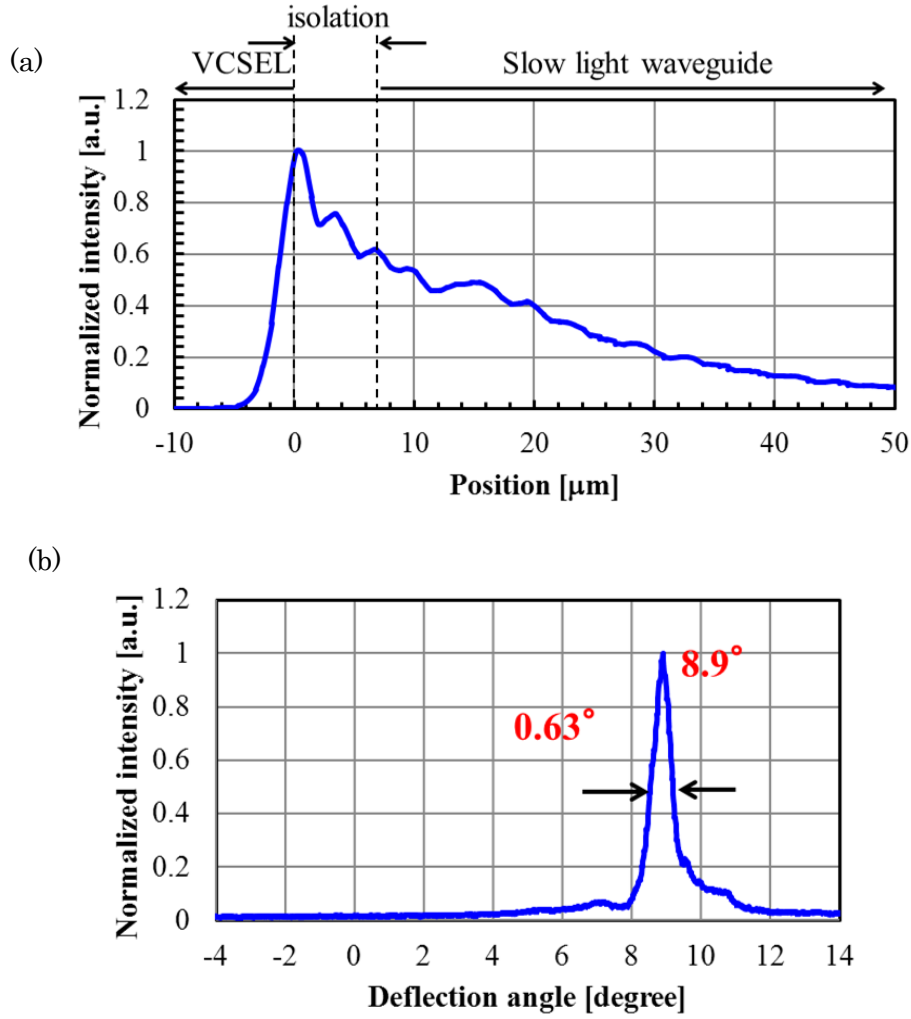


図 2.19 測定結果 (a) NFP, (b) FFP

2.5 横方向光結合モードの制御

ここで、面発光レーザのモード制御について考える。通常の面発光レーザでは図 2.20 (a)に示すように、酸化アパチャー周囲に低屈折率酸化膜を形成することにより電流及び光を閉じ込め、レーザの共振モードを選択する。しかしながら、プロセス上の観点から、製作した集積デバイスには長さ方向に対して光閉じ込めがない構造となっている。よって、どのようにしてレーザの共振モードが選択されているかが不明確であり、横方向光結合を安定して得るためには

問題であると考え、現状、モデリングと同様の微小酸化膜を形成することは困難であるが、図 2.21 のようにくびれ構造を形成することで長さ方向に対しても屈折率変化を持たせることができる。この構造によりモード選択ができる可能性がある。また、モデリングにおいて結合効率は微小酸化膜の幅により制御していたが、くびれ構造の場合はくびれ具合により結合効率の制御が可能であると考えられる。長さ方向に対しても屈折率変化を持たせることが目的であり、そのためにくびれ構造が最適であるという結論には達しないが、長さ方向に屈折率変化を形成する構造の 1 例として検討を行う。

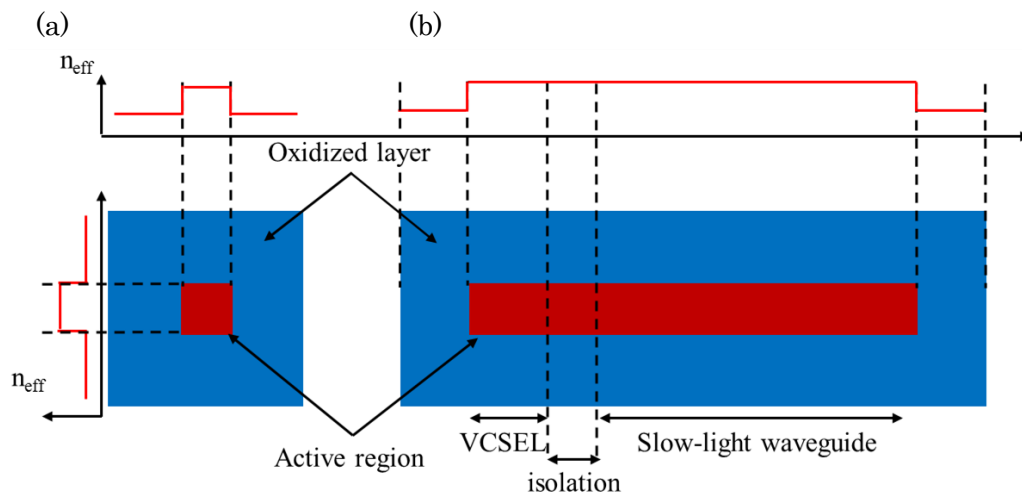


図 2.20 光閉じ込め構造 (a) 通常の面発光レーザ, (b) 集積デバイス

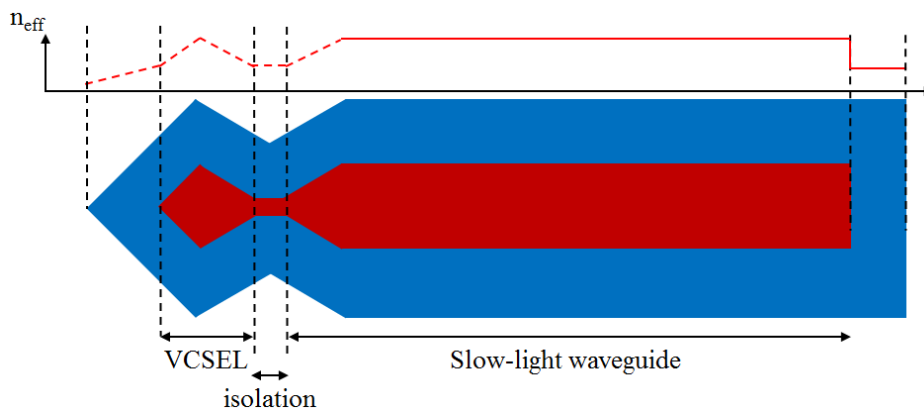


図 2.21 くびれ構造による光閉じ込め

実際にくびれ構造を持つデバイスを製作し、その特性を評価した。デバイスのエピ構造はエタロン波長と PL ピーク波長間のオフセット波長が 25nm であること以外は同様である。図 2.22(a)は製作したデバイスのレーザ顕微鏡画像、(b)はデバイスの赤外顕微鏡画像である。図 2.22(b)における赤い点線の内側が非酸化領域である。くびれ構造により、図 2.21 に近い構造が形成されていることがわかる。また、面発光レーザ上部には垂直方向成分を抑制する高反射ミラーは形成していない。これは、後述する横方向光結合効率を見積もるためである。

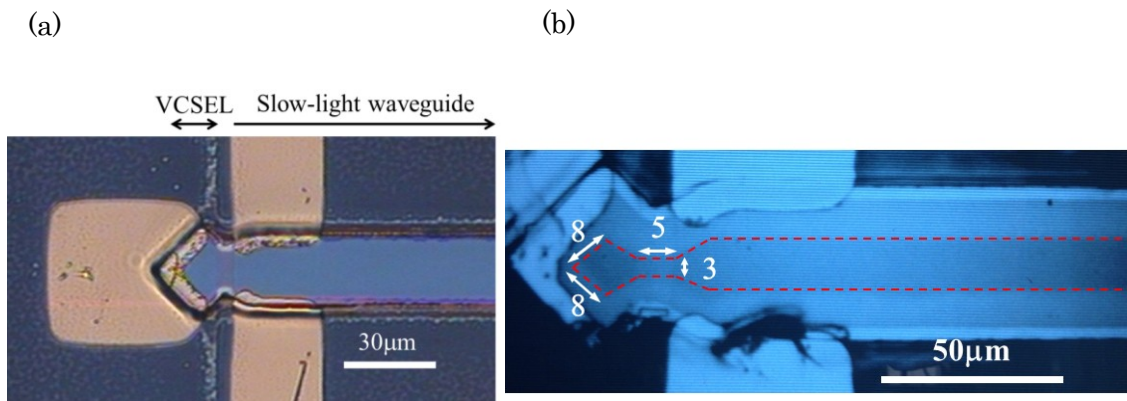


図 2.22 くびれ構造を持つ集積デバイス

(a) レーザ顕微鏡画像, (b) 赤外顕微鏡画像

まず、レーザの基本特性として電流対光出力 (I - L) 特性を測定した(図 2.23)。しきい値が 0.7mA と若干大きな値となっているのは、面発光レーザの利得領域が大きいためであり、利得領域を微小にすることによってもしきい値の低下は可能である。 I - L 特性におけるキंकは、電流注入量の増加に伴うモード変化が起こっている点であり、図 2.24 に示すスペクトル特性においてその様子が確認できる。また、スペクトル測定における空間分解能は高いことから、面発光レーザ領域またはスローライト導波路領域にファイバーを移動させることにより、面発光レーザからスローライト導波路に結合する光を分離することを試みた。図 2.25 に面発光レーザ

に 3mA の電流注入を行った時のスペクトル特性を示す. 面発光レーザ領域ではマルチモードであることが確認できるが, スローライト導波路領域ではシングルモードである. よって, くびれ構造によるモード選択が確認できる. この原理はテーパー導波路をモデルに以下のように理解できる. 図 2.26 に示すテーパー導波路においては, 各モードにおけるカットオフ条件はコア厚に依存する. よって, VCSEL 共振器内では多モードであるが, くびれ構造によりスローライト導波路に結合するモードが選択され, シングルモードになっていると理解できる. ただ

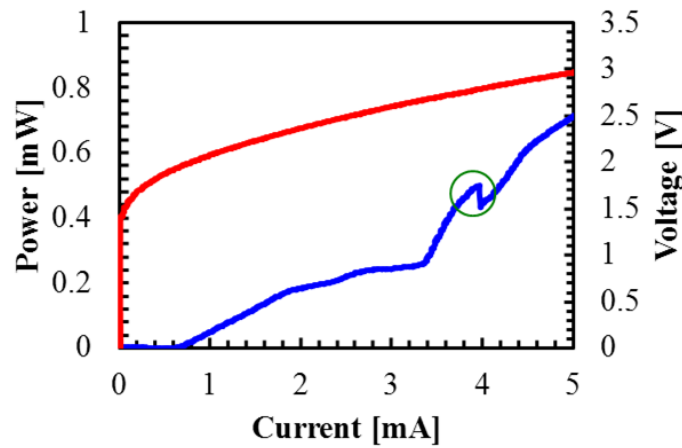


図 2.23 I-L 特性

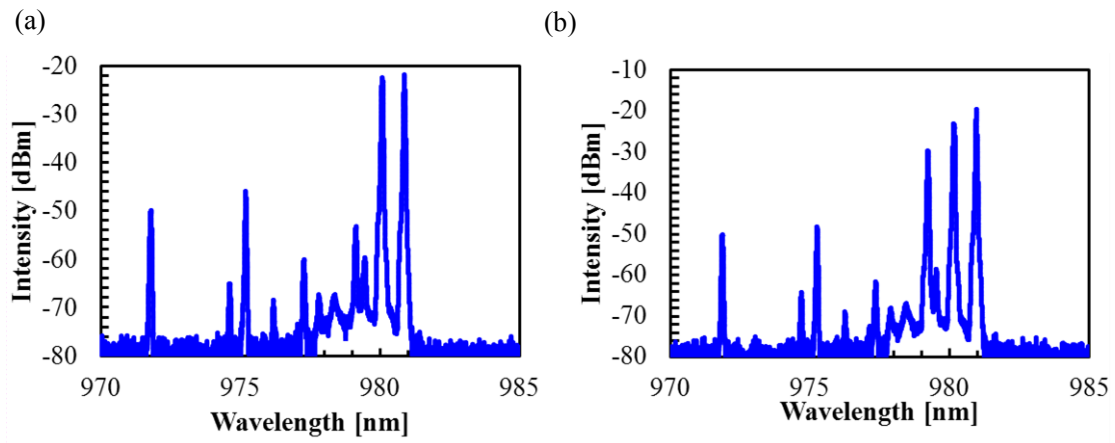


図 2.24 スペクトル特性の注入電流依存性

(a) 注入電流 3.8mA, (b) 注入電流 4mA

し、長波長側の波長が抑制されているのは原理から考えると矛盾するが、これは後述の FFP の測定結果(図 2.27)から判断するに、VCSEL 共振器内で主たるモードが高次モードシングルモードであることに加え、長波長側の波長の方がスローダウンファクターが大きく、巨大な吸収損失を持つためと考えられる。また、くびれ構造導入により、横方向光結合素子の歩留まりは向上しており、モード安定化の可能性が確認できた。面発光レーザの酸化アパチャー径をより小さくし、サイドモードを抑圧することによるシングルモード化により、高効率での横方向光結合が期待できる。

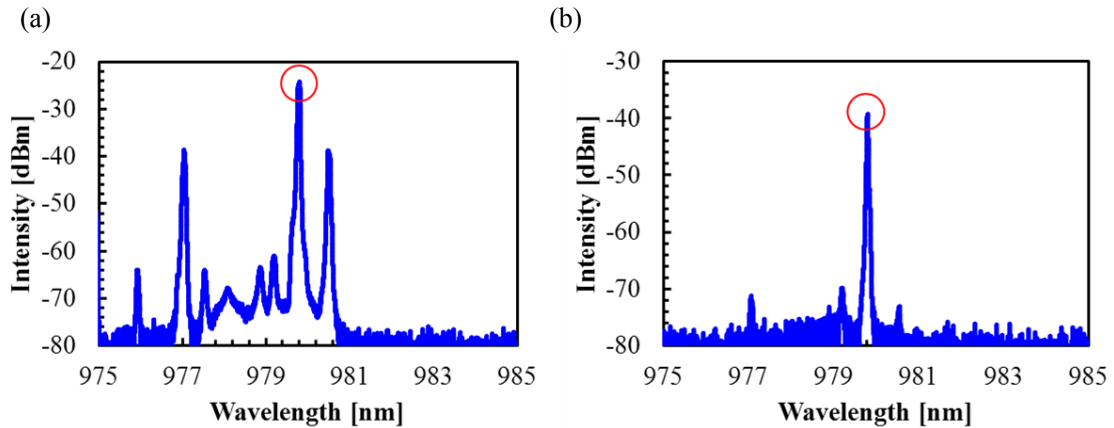


図 2.25 スペクトル特性の観測点依存性（注入電流：3mA）

(a) 面発光レーザサイド、(b) スローライト導波路領域

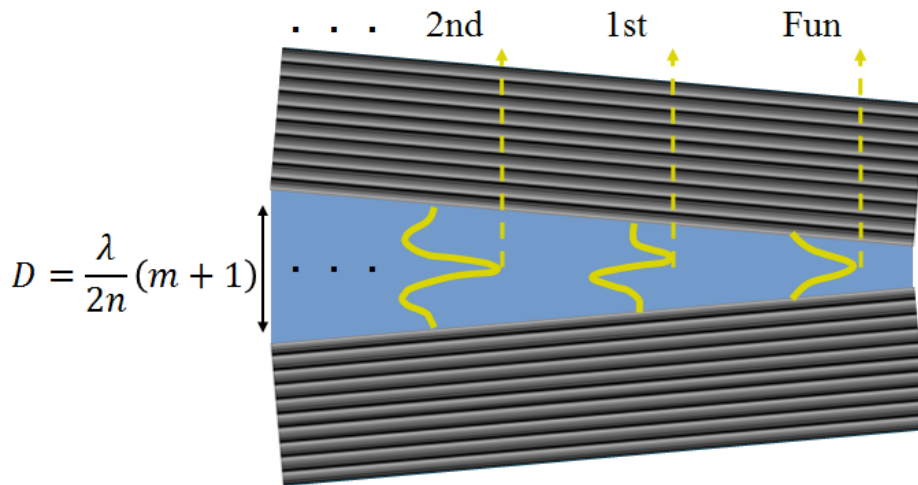


図 2.26 テーパー導波路におけるカットオフ条件

次に, FFP の観察を行った. 測定系は先述のとおりである. 面発光レーザへの電流注入量が 1.5mA の時, 図 2.27 に示すように偏向角は約 9.5° であり, 2.2 節の図 2.7 よりスローダウンファクター ≈ 17 のスローライトモードが, 面発光レーザからスローライト導波路に結合していることが確認できる. また, FFP において面発光レーザの垂直方向成分と, 横方向に結合したスローライトモード成分が空間的に分離できている. よって, 面発光レーザからスローライト導波路への横方向光結合効率は, I-L 特性及び FFP の観察結果より見積もることができ, 約 5% であることが分かる. この結合効率は非常に小さい値であり, 結合効率改善の策を講じる必要がある. 以下に結合効率改善のための策を挙げる.

(1) 面発光レーザ上部への高反射ミラー形成による, 垂直方向出射の抑制

集積デバイスにおいて垂直方向成分は損失になるので, モデリングのように高反射ミラーにより垂直方向出射を抑制する必要がある. 今回の集積デバイスにおける結合効率が低いのは必然と言える. 垂直方向成分抑制により, 結合効率は約 3 倍改善されると見積もられる.

(2) 面発光レーザの酸化アパチャー微小化による, マルチモード発振の抑制

先述の通り, 横方向に結合せずに共振器内に留まる成分は損失となるため, サイドモードを抑制し, シングルモード動作により効率化を図る必要がある.

(3) くびれ具合の調整

くびれ構造を用いた場合の横方向への光の結合量は, くびれ具合大きく依存する. くびれ具合により図 2.21 で示した等価屈折率分布が変化する. 極端にくびれを入れしまうと, 通常的面発光レーザと同様に横方向に対して 100% の光閉じ込め構造を形成してしまう. 一方, くびれが弱すぎると, 先述のくびれ構造の無い構造に近くなってしまい, 光閉じ込め構造が形成できず共振モードが安定しない.

以上 3 つの策を組み合わせることにより, 結合効率の大幅な改善が見込まれる.

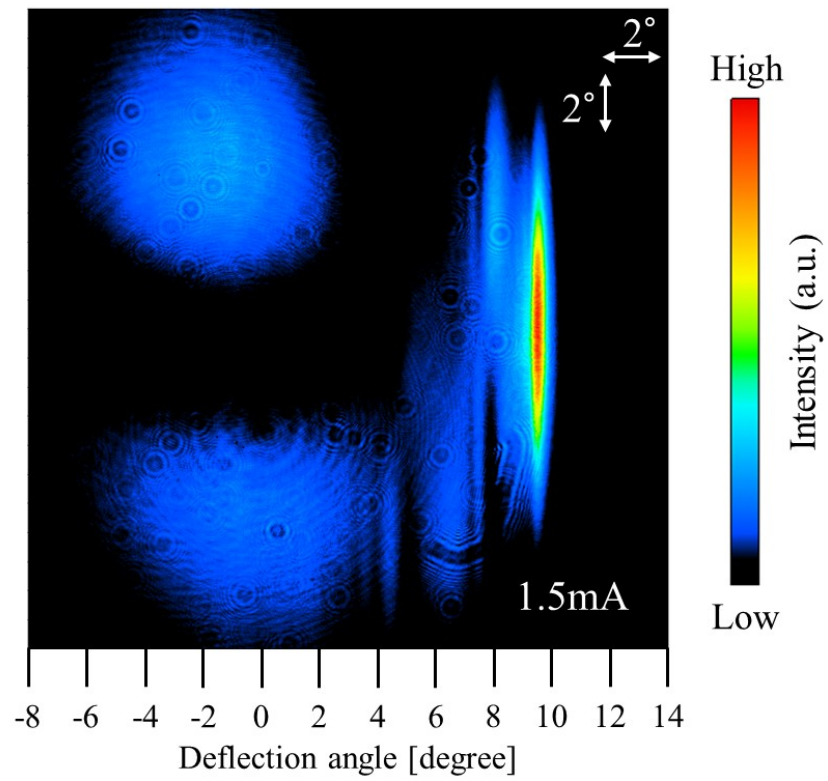


図 2.27 FFP の観測結果

2.6 まとめ

第2章ではブラッグ反射鏡導波路における低群速度伝搬(スローライト)生成の原理について述べるとともに、その本質がブラッグ反射鏡導波路における巨大な構造分散であることをフィルムモードマッチング法を用いた数値解析により示した。また、本研究で提案する面発光レーザとスローライトデバイスの横方向集積について、その構造及び光結合の原理を示した。モデリングにより提案構造による集積化の可能性を示すとともに、実際にスローライト導波路集積デバイスを製作し、面発光レーザから直接スローライトモードが励振され、スローライト導波路に結合することを初めて実証した。くびれ構造導入による、面発光レーザの共振モード制御の可能性を示すとともに、横方向への結合効率の見積り及び結合効率向上の策について議論した。本集積構造を用いて、SOA, EA 変調器及びビーム偏向器など様々な機能デバイスを面発光レーザに集積できる可能性がある。

第2章参考文献

- [1] A. Y. Cho, A. Yariv, and P. Yeh, “Observation of confined propagation in Bragg waveguides,” *Apply. Phys. Lett.*, **30**, 9, PP. 471-472, 1977.
- [2] P. Yeh, A. Yariv, and E. Marom, “Theory of Bragg fiber,” *J. Opt. Soc. Am.*, **68**, 9, pp. 1196-1201, 1978.
- [3] T. Sakaguchi, F. Koyama, and K. Iga, “Vertical cavity surface-emitting laser with an AlGaAs/Al As Bragg reflector,” *Electron. Lett.*, **24**, 15, pp. 928-929, 1988.
- [4] C. Wilmsen, H. Temkin, and L. A. Coldren, Book : Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. Enhancement of Spontaneous Emission in Microcavities, CHAPTER 3.
- [5] A. S. Studbo, “Film mode matching: a versatile numerical method for vector mode field calculations in dielectric waveguides,” *Pure Appl. Opt.*, **2**, 3, pp. 211-233, 1993.
- [6] B. E. A. Saleh, and M. C. Teich, Book : FUNDAMENTALS OF PHOTONICS Second Edition, FIBER OPTICS, CHAPTER9.
- [7] M. Natomi, K. Yamada, A. Shinya, J. Takahashi, C. Takahashi, and I. Yokohama, “Extremely Large Group-Velocity Dispersion of Line-Defect Waveguides in Photonic Crystal Slabs,” *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 25, pp. 253902-1-4, 2001.
- [8] G. R. Hadley, “Effective model for vertical-cavity surface-emitting lasers,” *Optics. Lett.*, **20**, 13, pp. 1483-1485, 1995.

- [9] S. P. Hegarty, G. Huyet, J. G. Mcierney, K. D. Choquette, H. Q. Hou, and K. M. Geib, "Size dependence of selectively oxidized VCSEL transverse-mode structure," Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics, CThS6, pp. 447-448, 1998.
- [10] D. K. Serkland, K. D. Choquette, G. R. Hadley, K. M. Geib, and A. A. Allerman, "Size Dependence of Small-Aperture Thin-Oxide VCSEL's," Proc. of Conference on Lasers and Electro-Optics Summer Topical Meetings, WB2.3, 1999.
- [11] V. A. Haisler, F. Hopfer, R. L. Sellin, A. Lochmann, K. Fleischer, N. Esser, W. Richter, N. N. Ledentsov, D. Bimberg, C. Möller, and N. Grote, "Micro-Raman studies of vertical-cavity surface-emitting lasers with Al_xO_y/GaAs distributed Bragg reflectors," Appl. Phys. Lett., **81**, 2544-2546, 2002.
- [12] T. Sanada, and O. Wada, "Ohmic Contacts to p-GaAs with Au/Zn/Au Structute," Jpn. J. Apply. Phys., **19**, 8, pp. L-491-494, 1980.
- [13] A. Ilidis, and K. E. Singer, "The role of germanium evaporated Au-Ge ohmic contacts to GaAs," Solid-State Electron., **26**, 1, pp. 7-14, 1983.

第 3 章

面発光レーザとスローライト光増幅器の横方向集積

3.1 緒 言

面発光レーザは第 1 章で述べたように、その優れた特徴を生かし様々な用途で広く用いられている。しかしながら、面発光レーザのシングルモード出力はその小さな活性層体積が故に制限され、面発光レーザの活躍の場を制限している。例えば、高出力シングルモード面発光レーザを実現できれば、10km 以上の伝送領域において面発光レーザを適用できる可能性があり、DFB レーザに取って代わることが可能であると考えられる[1]。一般的に面発光レーザ出力の高出力化のためには活性層体積拡大が鍵となる。しかしながら、高出力化のための活性層体積拡大とシングルモード化は表裏一体の関係にあり、シングルモード出力の向上を妨げている。よって、活性層体積を拡大した上で、高次モードを抑制することによりシングルモード出力向上の取り組みがなされてきた。高次モード抑制の手法の例として以下のような手法が挙げられる。

- (1) ミラー損失を利用する手法
- (2) 吸収損失を利用する手法
- (3) ミラー損失と吸収損失ともに利用する手法
- (4) 散乱損失を利用する手法

以上の手法を用いた報告例を図 3.1 に示す。以下、それぞれの手法について簡単に紹介

する。

先ず(1)のミラー損失を利用する手法は、シングルモードと高次モードの強度分布の違いを利用し、高次モードの強度ピークの領域での反射率を低下させることにより、高次モードの発振を抑制するものである。この原理を利用した報告では、 $5\sim 6\mu\text{m}$ の酸化アパチャー径の面発光レーザにおいて $1\sim 5.7\text{mW}$ のシングルモード出力が達成されている[2-4]。また、位相を制御する手法を更に加えることで 6.5mW が達成されている[5]。

(2)の吸収損失を利用する手法としては、金属により物理的に高次モードの強度ピークを抑制するのが最も簡単な方法である[6,7]。また、結果的に半導体／空気界面の反射率に比べ、半導体／金属界面の反射率が小さいことにより、高次モードのミラー損失が相対的に大きくなることも、高次モード抑制の一端を担っている。この原理を利用した報告では、 $3.5\mu\text{m}$ の酸化アパチャー系の面発光レーザにおいて 3.4mW のシングルモード出力が達成されている[7]。

(3)のミラー損失と吸収損失ともに利用する手法としては、高次モードの強度ピークの領域に Zn を拡散させることにより、その領域での自由キャリア吸収を増加させるとともに、反射率を低下させるものがある[8]。この原理を利用した報告では、 $5\mu\text{m}$ の酸化アパチャー径の面発光レーザにおいて 7.3mW のシングルモード出力が達成されている[8]。

(4)の散乱損失を利用する手法としては、ポストプロセスにおいてデバイス表面に高次モードを抑制する構造を形成するものがある。高次モードの強度ピークの領域に三角孔と呼ばれる形状をシリンダー状に形成することで、高モードを積極的に抑制しようとするものである。この原理を利用した報告では、 $14\mu\text{m}$ の酸化アパチャー系の面発光レーザにおいて 7mW のシングルモード出力が達成されている[9]。

これらの他、回折損失を利用する手法やキャリアの分布を利用する手法によるシングルモード出力の高出力化の報告がなされている[10,11]。しかしながら、いずれの報告でも未だ

10mW を超える出力を得られていないことに加え、再成長やポストプロセスなどの複雑且つ多くのプロセスが必要であり、その制御も精密に行う必要がある。現在のところ、高出力化のアプローチとして有効な手段は報告されていない。面発光レーザ単体では困難であった高出力化のアプローチであったが、SOA との集積化により実現の可能性が考えられる。

第2章では面発光レーザとスローライト導波路の横方向集積を実証した。スローライト導波路領域に電流を注入することにより、スローライト導波路はスローライト光増幅器へと置き換わる。本章ではスローライト光増幅器集積による面発光レーザの高出力化について、モデリングによる検討を行うとともに、製作した光増幅器集積デバイスの実験結果について述べる。

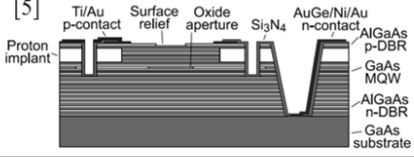
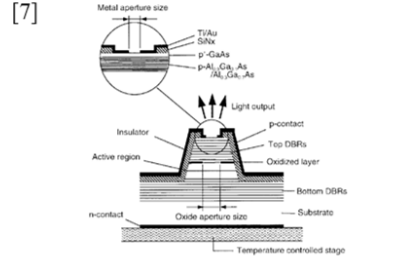
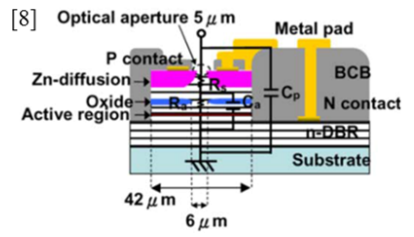
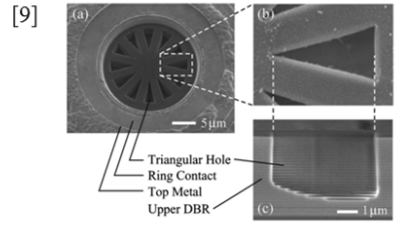
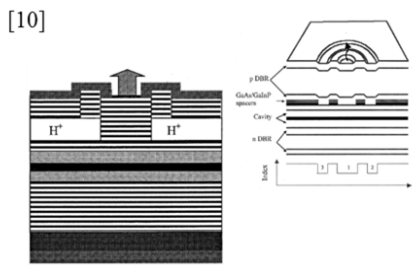
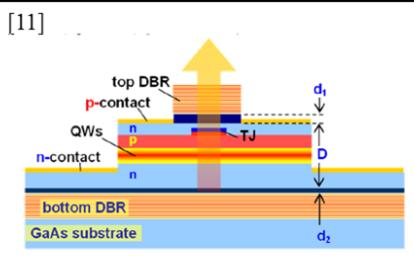
	Aperture size (μm)	Single-mode power (mW)	Wavelength (nm)	Mechanism
[5] 	6	6.5	850	Inverted relief
[7] 	3.5	3.4	780	Metal window
[8] 	5	7.3	843	Impurity-induced disordering
[9] 	14	7	850	Holey structure
[10] 	8	7.1	980	ARROW
[11] 	7	6.5	1566	Tunnel junction

図 3.1 高出力シングルモード面発光レーザの報告例

3.2 スローライト光増幅器集積のモデリング

面発光レーザの横方向に集積したスローライト導波路に電流を注入することで、面発光レーザとスローライト SOA の集積化が可能である。しかしながら、スローライト SOA はその構造が故に通常の SOA と同様とは異なる方法で光出力を取り出す必要がある。図 3.2 は通常の SOA とスローライト SOA の概略図である。通常の SOA では図の左側からの入力光が SOA 内で増幅され、その増幅された光は右側の端面で取り出される。この時、SOA 端面には無反射コーティングを施すことで共振構造を形成せず、レーザ発振を抑制している。一方、スローライト SOA の場合に同様の方法で光出力を取り出そうとした場合問題が起きる。それは電流注入に伴うレーザ発振を構造上抑制が困難であるということである。スローライト SOA は言い換えれば巨大な面発光レーザである。そのため電流注入量を増やしていくとしきい値に達し、レーザ発振してしまう。垂直方向の共振を抑制する構造を取り入れることで、通常の SOA と同様に増幅された光を端面から取り出すことが可能ではあるが、そこにはこれまでの報告例のように複雑且つ多くのプロセスが必要となってしまう。そこで、通常の SOA では不可能であるが、スローライト SOA が故に可能な光の取り出し方を採用する。図 3.2(b)に示すように、放射光を取り出す方法である。この場合、放射損失と吸収損失を補償する電流を注入することで、SOA の長さに対して放射光強度は一定となる。SOA 利得は入力光強度対放射光強度の積分値で示される。また、放射光強度の本質は放射損失であるので、白紙的にはミラー損失が大きい、つまり上部 DBR のペア数は少ない方がよいが、注入可能な電流密度の範囲で設計する必要がある。このようにして設計されるスローライト SOA の小信号利得は SOA の長さに、飽和出力は上部 DBR の反射率を低下させ放射損失を増加させるとともに、注入電流を増加させることで向上させることができる。

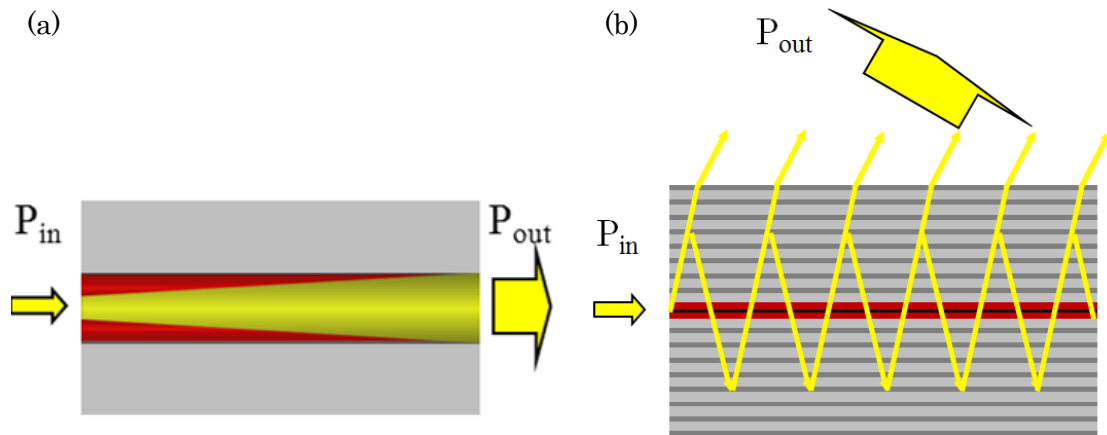


図 3.2 各 SOA の概略図
(a) 通常の SOA, (b) スローライト SOA

先ず, スローライト SOA 集積化による面発光レーザの高出力化の検討するため, フィルムモードマッチング法を用いて上部 DBR のペア数に応じた導波路損失を求めた. 導波路損失には放射損失及び吸収損失が含まれる. 計算モデルは, 第 2 章で用いたモデルと同様であるが, 面発光レーザとスローライト導波路間の酸化膜の幅は $2\mu\text{m}$, 活性層と酸化層の間に 1 ペアの DBR を挿入している. また, スローライト導波路の上部 DBR (p 型半導体) 及び下部 DBR (n 型半導体) にそれぞれ 10cm^{-1} , 5cm^{-1} の吸収損失を仮定し, 3 重量子井戸を含む λ 共振器を設けた.

図 3.3 はスローライト導波路の上部 DBR のペア数に応じた放射損失及び吸収損失である. 上部 DBR のペア数が 12 ペアの場合の導波路損失は 5000cm^{-1} 程度となり, これを補償するために必要な電流密度は 20kA/cm^2 以上が見積もられる. 電流密度は通常の面発光レーザと同様に 10kA/cm^2 程度を上限と定めると, 上部 DBR のペア数が 13 ペアの時に最も高出力になると見積もられる.

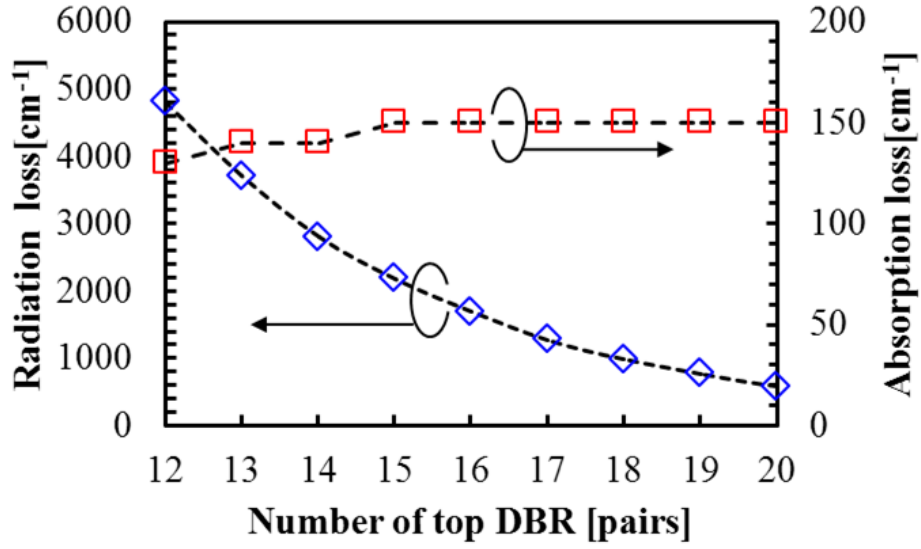


図 3.3 スローライト導波路上部 DBR のペア数に応じた導波路損失

次に、スローライト導波路の量子井戸に材料利得を仮定することで、スローライト SOA 集積のモデリングを行った。フィルムモードマッチング法においては活性層に利得係数を仮定することにより、電流注入動作を再現する。よって、材料利得を電流注入密度に変換するために以下の式を用いた[12]。

$$g = g_o \ln \left[\frac{N + N_s}{N_{tr} + N_s} \right] \quad (3.1)$$

$$J = \frac{qd(BN^2 + CN^3)}{\eta_i} \quad (3.2)$$

ここで、 N はキャリア密度、 N_{tr} は透明キャリア密度、 g_o は利得定数、 N_s は利得飽和の効果を表す定数、 q は電気素量、 d は活性総厚、 B 及び C は再結合係数、 J は SOA への注入電流密度、 η_i 内部量子効率である。ただし、フィルムモードマッチング法における内部量子効率は 100%である。

図 3.4 はスローライト SOA に異なる電流密度を仮定した場合の放射光の横方向光強度分布であり、上部 DBR のペア数は 13 ペアである。電流注入密度は 8.9kA/cm^2 と 4.6kA/cm^2 を

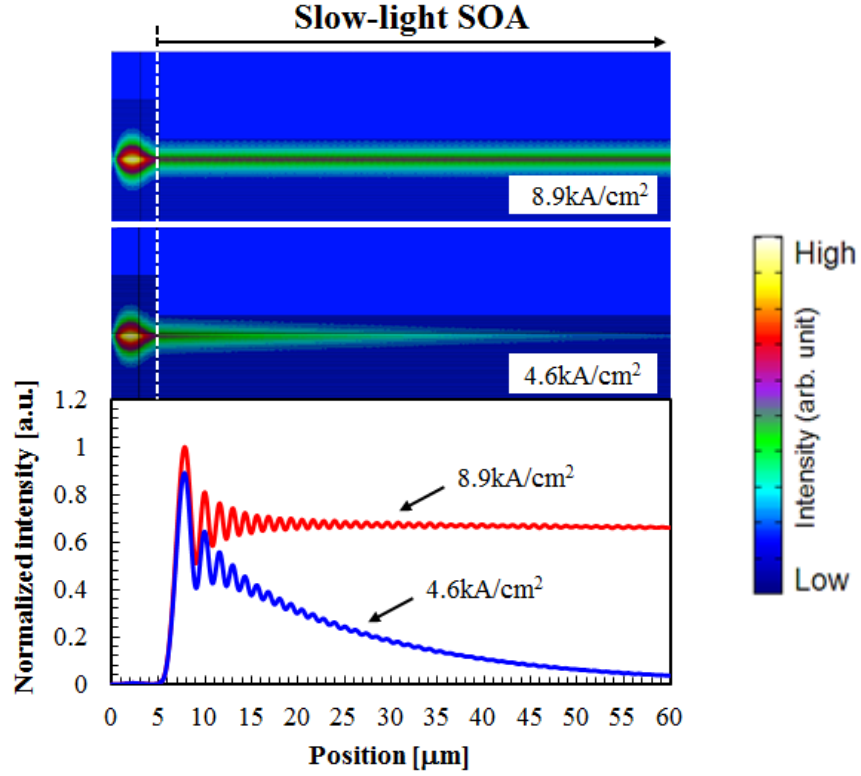


図 3.4 異なる電流密度を仮定したときの横方向光強度分布（上部 DBR : 13 ペア）

仮定した。注入電流密度の増加に伴い損失が補償されており、伝搬距離が増加している様子が確認できる。ここで、スローライト SOA の飽和特性を考える。しかしながら、フィルムモードマッチング法では利得飽和の影響が考慮されないため、解析手法として適切ではない。よって、以下のレート方程式を用いてスローライト SOA の飽和特性の計算を行った。

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = \frac{\eta_i I}{qV} - (BN^2 + CN^3) - f v_g g S \\ \frac{dS}{dz} = \{f \Gamma g - (\alpha_r + \alpha_i)\} S \end{cases} \quad (3.3)$$

ここで、 N はキャリア密度、 S は光子密度、 I は SOA への注入電流、 V は SOA の活性層体積、 q は電気素量、 η_i は内部量子効率、 B 及び C は再結合係数、 v_g は群速度、 Γ は光閉じ込め係数、 g は利得係数、 α_r は放射損失、 α_i は内部損失、 z は伝搬方向をそれぞれ示す。また、 f は第 2 章 式(2.2)で定義されるスローダウンファクターである。

放射光をマルチモードファイバーに直接結合させることを仮定すると、取り出せる放射光強度は以下の式で表すことができる。

$$P_{out} = \int_0^L \frac{(S\alpha_r)wdv_g hv}{\Gamma} dz \quad (3.4)$$

ここで、 w は導波路の幅、 d は活性層厚、 h はプランク定数、 ν は周波数、 α_r は放射損失、 L は SOA の長さである。また、損失を完全に補償する理想状態では、小信号利得は以下の式で表すことができる

$$G = 10 \log(\alpha_r L) \quad (3.5)$$

図 3.5 は上部 DBR のペア数に応じたスローライト SOA の飽和特性である。注入電流密度は損失を十分に補償することができる値を仮定した。また、SOA の長さは $50\mu\text{m}$ を仮定した。上部 DBR のペア数の減少に伴い、得られる最大出力が増加していることがわかる。これは放射光強度の本質が放射損失であるためである。

図 3.5 より、上部 DBR のペア数が 13 ペアの時に得られる出力が最大となり、この時電流密度は 8.9kA/cm^2 である。図 3.6 は横軸を入力光強度、縦軸を出力光強度に書き換えたものである。これらにより、面発光レーザに $50\mu\text{m}$ の小型スローライト SOA を集積することにより 7mW を超えるシングルモード出力が得られる可能性がある（面発光レーザからの結合強度、すなわちスローライト SOA への入力光強度が 1mW の時）。スローライト SOA の導波路幅を $3\mu\text{m}$ と仮定すると、注入電流量は約 13mA となる。面発光レーザの動作電流を含めても、 15mA 程度が見積もられる。これまで報告されている 7mW を超える高出力面発光レーザにおける注入電流量は、 25mA [9]、 23mA [10]と巨大であった。これらに比べると非常に小さい電流値であると言える。一方、 9mA [8]と小さな電流値で実現したという報告もなされているが、光電子光学特性の精密な制御を必要とし、製作が非常に困難である。スローライト SOA 集積による面

発光レーザのシングルモード出力の高出力化は、簡易な製作プロセスであるという点においても有効な手法であると言える。

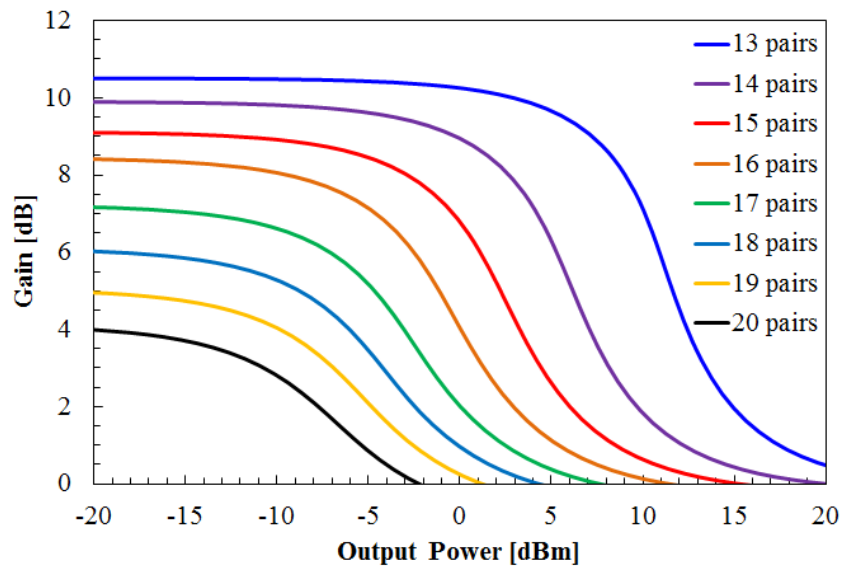


図 3.5 スローライト SOA の飽和特性(上部 DBR のペア数依存性)

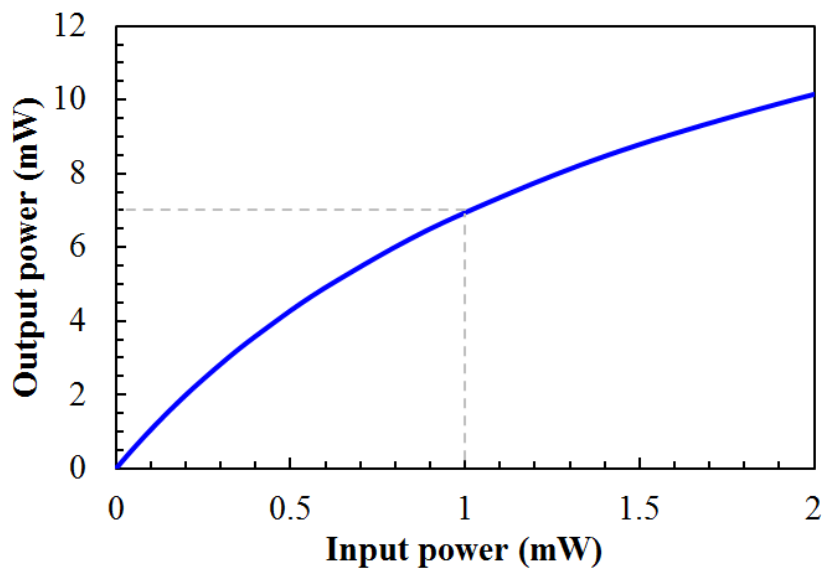


図 3.6 スローライト SOA の入力光強度対出力光強度特性(上部 DBR: 13 ペア)

3.3 スローライト光増幅器集積デバイスの製作及び特性評価

モデリングにより, SOA 集積を集積することで通常の面発光レーザの数倍もの出力が得られる可能性を示した. 面発光レーザの横方向に集積したスローライト導波路に電流注入をすることにより, スローライト SOA の集積化が可能である. 本節では, スローライト SOA 集積化による面発光レーザの高出力化について, その諸特性を基に議論するとともに, モノリシック集積であるが故に生じる課題について説明する.

3.3.1 デバイス構造

集積デバイスの構造は, 第 2 章で示したスローライト導波路集積デバイスと同様の構造である. 面発光レーザの利得領域が $12\mu\text{m}\times 12\mu\text{m}$ である点及び面発光レーザとスローライト SOA 間に電氣的アイソレーション構造が形成されている点が異なる. また, エタロン波長と PL ピーク波長間のオフセット波長は 30nm である. 図 3.7 は完成したデバイスのレーザ顕微鏡画像である. 電氣的アイソレーションは両デバイスの電極間に距離を設ける簡易な方法で形成されている. 第 2 章で説明したスローライト導波路集積デバイスの場合と同様に, 両デバイス間には微小酸化膜は形成されておらず, スローライト SOA と面発光レーザは直接結合されている. スローライト SOA への電流注入により, 放射損失及び吸収損失を含む導波路損失を補償することができる. 面発光レーザからスローライト SOA に結合した光は, 上述のように損失補償されながら一部は放射光として外部へ取り出される. SOA への電流注入量を増加させることにより, 導波路損失を完全に補償することができ, 放射光強度は一定の強度となる. この時, 最も大きな光強度が得られる理想状態となる.

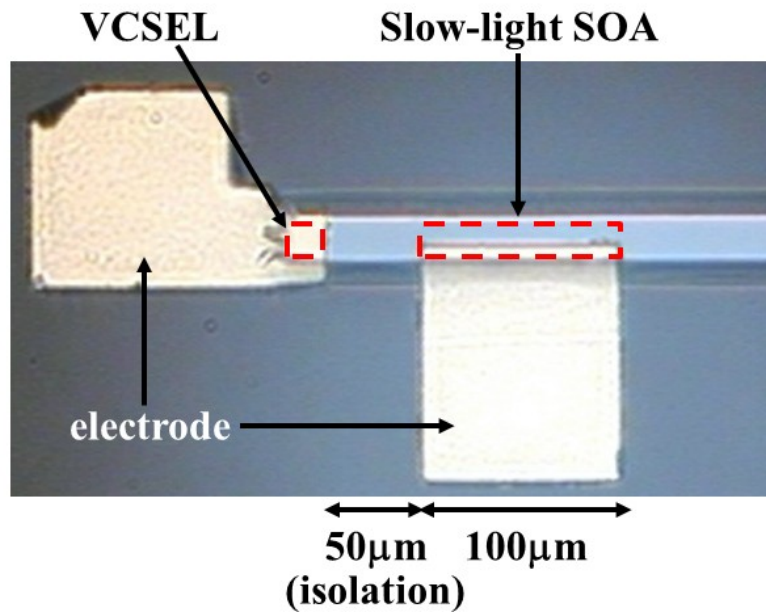


図 3.7 スローライト SOA 集積デバイスのレーザ顕微鏡画像 (俯瞰図)

ここで、電氣的アイソレーションについて考える。横方向集積はモノリシック集積であることで、簡易な製作プロセスで面発光レーザと機能デバイスを集積することが可能である一方で、その構造が故に両デバイス間に電位差が生じた場合に漏れ電流が生じてしまうという問題がある。図 3.8 は集積デバイスの等価回路であるが、両デバイス間の電氣的アイソレーションが十分でない場合、面発光レーザ領域からスローライト SOA 領域またはその逆方向に漏れ電流が流れてしまう。面発光レーザの動作を考えた場合、漏れ電流の存在はしきい値の変動を引き起こすことになり、望ましくない。本集積デバイスにおける、両電極間に距離を取る方法での電氣的アイソレーションでは十分な値が期待できない。例えば、両デバイス間に 2V の電位差を仮定し、漏れ電流を 0.1mA 以下に抑制しようとした場合、20k Ω 以上のアイソレーションが必要であるが、より完全なアイソレーションを確保するには M Ω オーダーが望ましい。本集積デバイスにおいては、十分なアイソレーションが確保できていないが、この点については第 4 章で改善策を示す。

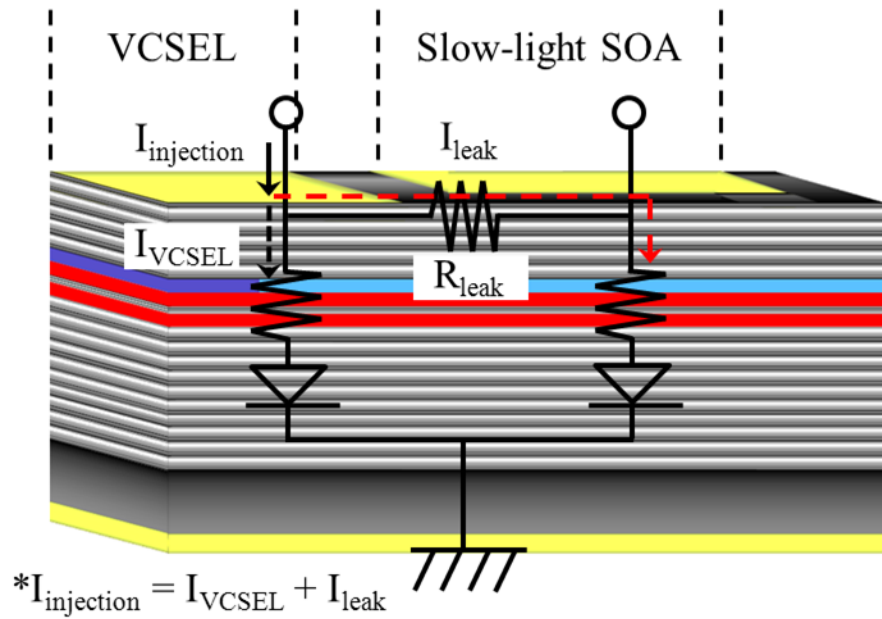


図 3.8 集積デバイスにおける等価回路

3.3.2 スローライト光増幅器によるレーザ出力の向上

先ず、面発光レーザの光出力／電圧対電流 (I - L - V) 特性を測定した (図 3.9)。しきい値が大きいのは、面発光レーザの活性領域が大きい ($12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$) ことに加え、スローライト SOA 領域には開放電圧がかかっており、漏れ電流が生じているためであると考えられる。活性領域の微小化及び第 4 章で説明する漏れ電流抑制策を講じることにより、低しきい値化は可能である。外部微分量子効率は約 9% であり効率が悪いが、これは上記理由に加え上部 DBR の反射率が高いことにより、効率的に出力を取り出せていないためと考えられる。本集積構造においては、先述のとおり放射光強度の本質は放射損失であるので、上部 DBR のペア数が多く反射率が高い場合、放射損失が小さくなり、微分量子効率は低下する。この点におけるより詳しい議論は第 4 章にて取り扱う。また、注入電流 7mA におけるスペクトルの測定を行った。図 3.10 は測定結果であり、第 2 章で言及したように、スペクトル特性の空間分解能を利用して、

観測点を移動させて測定を行った。面発光レーザ領域から離れる方向に観測点を移動した場合のスペクトルの変化を表している。面発光レーザ領域近傍ではピークが2つ確認できるが、面発光レーザ領域から離れるに従って、短波長側のピークは著しく減少し、SOA領域近傍では長波長側のピークのみが確認できる。放射損失及び吸収損失により、観測点が面発光レーザ領域から離れるに従ってスペクトル強度は減衰するものの、両者の減衰量には明らかに違いがある。両者がスローライトモードであると仮定した場合、第2章で言及したように、通常は短波長側の光の方がスローダウンファクターは小さいため、導波路損失は小さくなる。しかしながら、スペクトルの測定結果では短波長側の光の方が導波路損失が大きいと理解できる。一方、本デバイスの利得領域は大きいと、面発光レーザ共振器内部はマルチモード発振であると考えられる。よって、短波長側のピークはそれらの内、面発光レーザ上部電極端面から漏れ出し、横方向に結合している光であり、高次モードであることから導波路損失が大きいと、強度の減衰が著しいと考えられる。

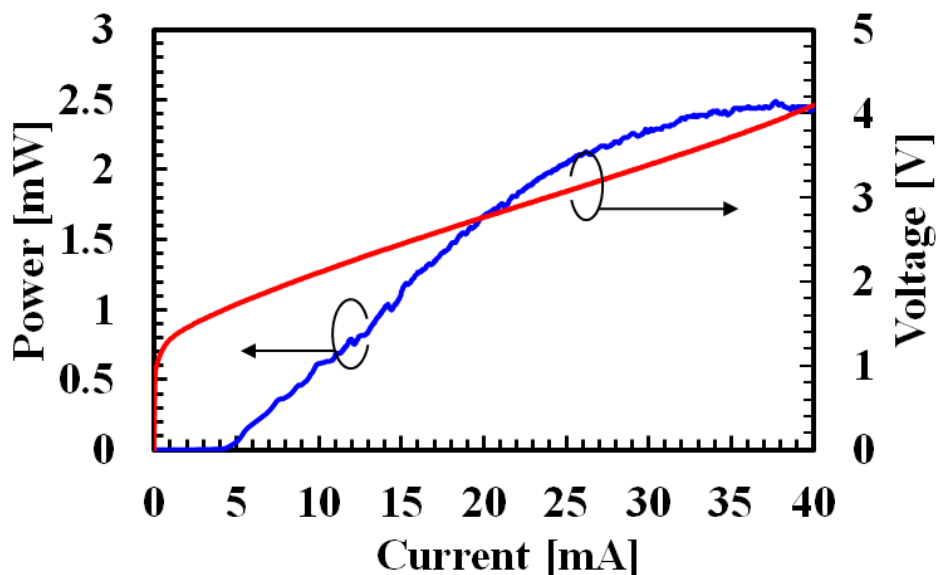


図 3.9 面発光レーザの I-L-V 特性

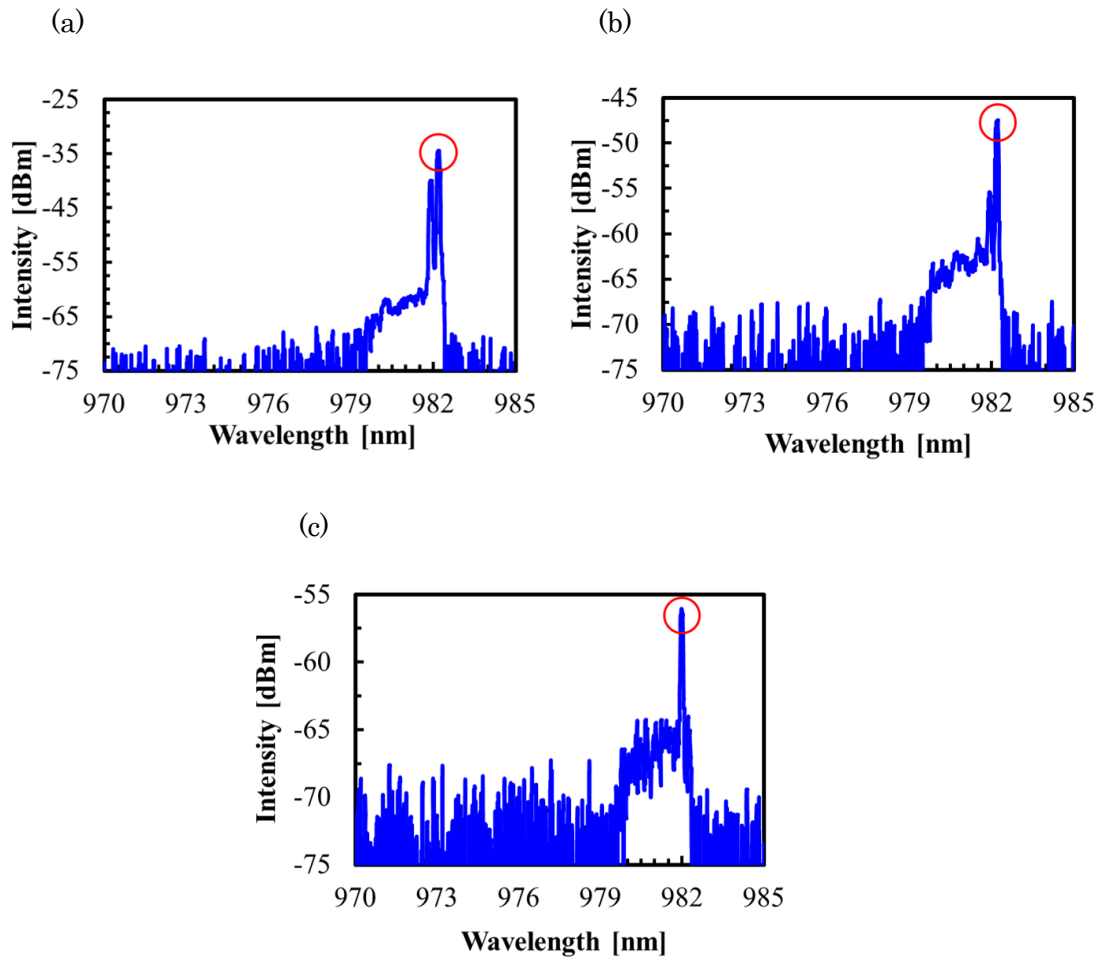


図 3.10 スペクトル特性の観測点依存性

(a) 面発光レーザ領域近傍, (b) 両デバイス間, (c) SOA 領域近傍

次に, 面発光レーザをレーザ発振させた状態でスローライト SOA に電流注入を行うことにより, 面発光レーザからスローライト SOA に結合した光の損失補償を行った. 図 3.11 はスローライト SOA に異なる電流を注入した時の集積デバイスの I-L 特性であり, 横軸は面発光レーザへの注入電流量を示す. ただし, 本集積デバイスにおいては両デバイス間に電位差が生じると漏れ電流が生じるため, その漏れ電流分を補正している. 両デバイスの p 電極間のアイソレーションは約 150Ω と非常に小さい. 漏れ電流分を補正した I-L 特性より, SOA への電流注入

量の増加に伴い出力及びI-Lのスロープは増加しており、スローライトSOAによる損失補償動作が確認できる。SOAへの電流注入量が20mAの時、最大出力は6mW、微分量子効率は43%であることがわかる。微分量子効率はSOAへの電流注入を行わない場合に対して約7dBの向上が確認できる。また、I-L特性からはしきい値の顕著な変化は見られないため、スローライトSOAから面発光レーザへの戻り光が抑制されていると理解できる。

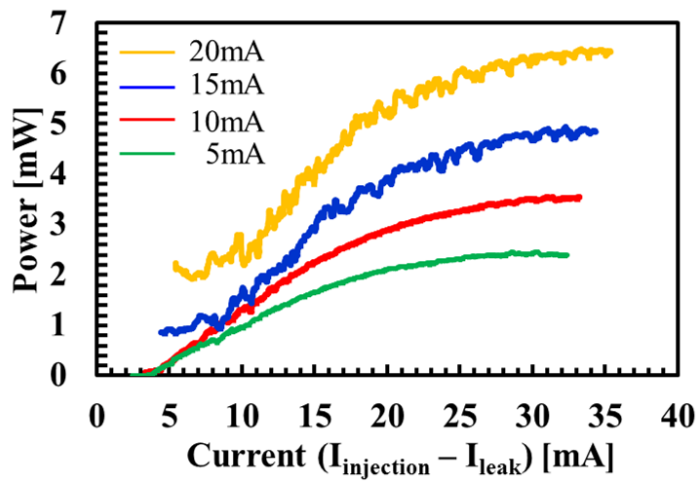
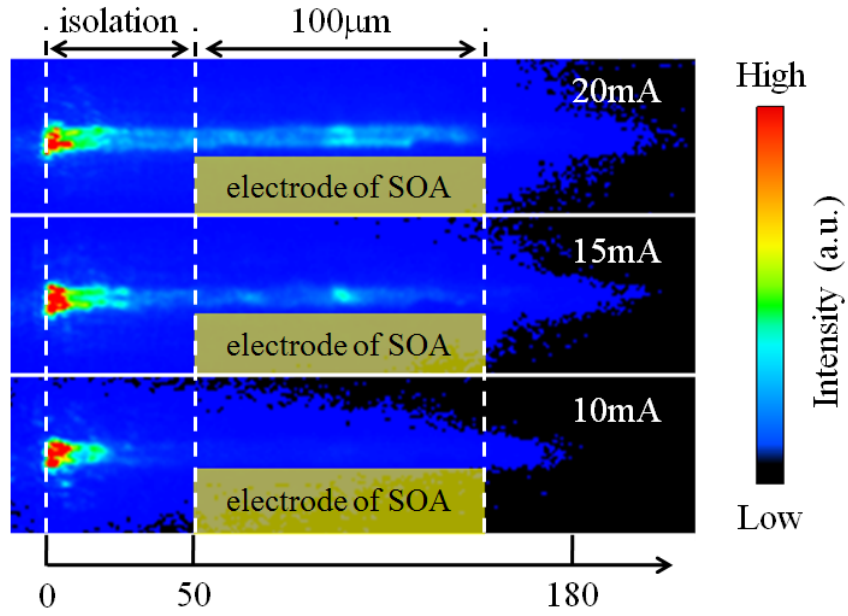


図 3.11 SOA に異なる電流を注入した時の集積デバイスの I-L 特性
(漏れ電流分を補正)

次にスローライト SOA からの放射光の NFP の観察を行った。スローライト SOA への注入電流量は 10mA、15mA 及び 20mA とし、放射光を CCD カメラで捕らえることで観察を行った。また、面発光レーザへの注入電流量は、漏れ電流を考慮して 15mA となるように調整した。図 3.12 は NFP の観察結果であり、(a)は CCD カメラの画像、(b)は横方向光強度分布である。Position 0 [μm]は面発光レーザ上部電極の端の位置を示し、その位置から結合した光は放射する。50 μm のアイソレーション領域を挟み、Position 50 [μm]からスローライト SOA 領域となる。スローライト SOA への注入電流量の増加に伴い、SOA 領域への浸透長が増加している

ことがはっきり確認でき、これは損失補償がなされていると理解できる。ここで、横方向強度分布を見ると、SOA の中心付近において強度が増加していることがわかる。これは SOA の電極が $100\mu\text{m}$ あることにより、電流密度の分布が不均一であるためと考えられる。また、アイソレーション領域において 10% 近くもの強度が失われていることがわかる。これは結合効率を低下させる要因となる。電氣的なアイソレーションを確保するために、両デバイスの電極間に距離をとることとしたが、この領域では損失補償が効率的に行われないため、吸収損失及び放射損失により光強度は減衰してしまう。よって、アイソレーション領域の短尺化が必要となる。これにより、最大出力の向上が見込まれる。また、モデリングのように、上部 DBR のペア数をより少なくし、反射率を低下させることによっても出力の改善が見込まれる。さらに、本デバイスの導波路幅は $12\mu\text{m}$ と大きいため、電流注入の効率が悪いと考えられる。効率的に電流注入を行うためには導波路幅を狭くする必要があり、このことにより効果的な損失補償が期待でき、これは出力の向上に直接つながる。

(a)



(b)

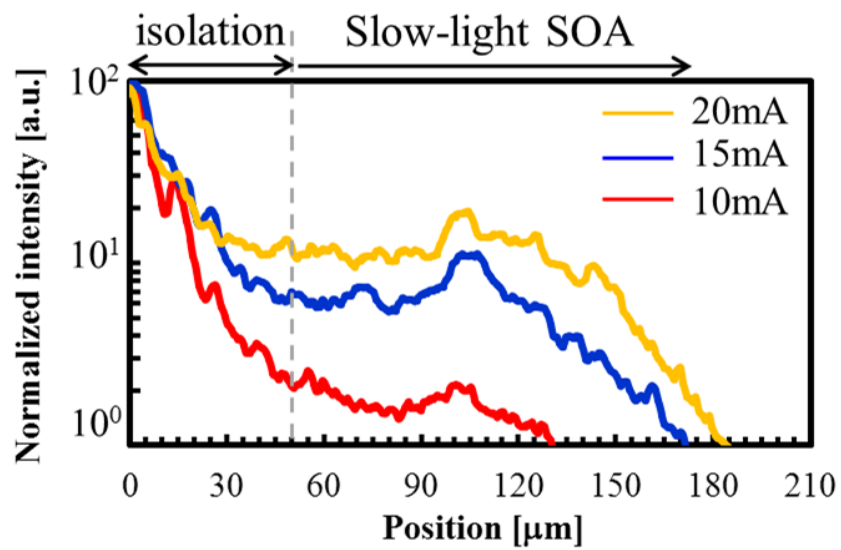


図 3.12 NFP (a) CCD カメラ画像, (b) 横方向光強度分布

次に、スペクトル測定を行うことにより、横方向に結合した光の増幅度を見積もった。先述のとおり、スペクトル測定の空間分解能は高いので、スローライト SOA への注入電流量に応じたスペクトルをスローライト SOA 領域で測定することにより、増幅度を見積もることができる。図 3.13 はスローライト SOA に異なる電流を注入したときのスペクトルピーク強度である。面発光レーザへの注入電流は 10mA とした。図 3.13 の挿入図に示す波長、つまり面発光レーザからスローライト SOA に結合した光の強度を SOA への注入電流量の変化に応じてプロットした。この結果より、スローライト SOA への注入電流量の増加に伴い、スペクトル強度は 15dB 以上増加していることがわかる。よって、スローライト SOA 全体からの放射強度は、注入電流量の増加に伴い増加していることを示している。スペクトル測定では SOA 領域からの強度をすべて受光できているわけではないので、実際にはより大きな増幅度であることが推定される。

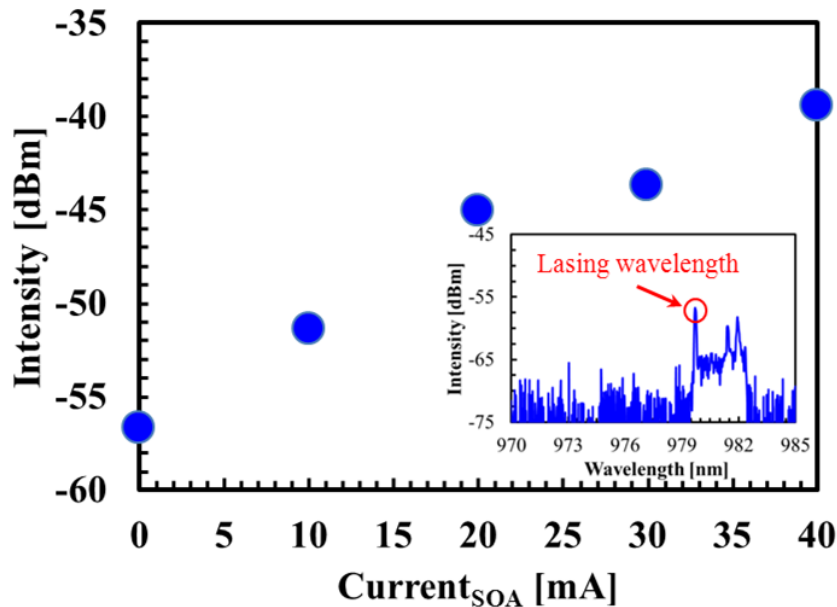


図 3.13 SOA に異なる電流を注入した時のスペクトル特性

3.4 まとめ

第 3 章ではシングルモード面発光レーザの高出力化のため、面発光レーザとスローライト SOA 集積化について、その有用性をモデリング及び実験の両面から示した。モデリングにより、 $50\mu\text{m}$ の小型スローライト SOA を面発光レーザに集積することにより、従来の面発光レーザの数倍の出力 ($> 7\text{mW}$) が得られる可能性を示した。また、実際にスローライト SOA 集積デバイスを製作し、スローライト SOA 領域への電流注入により、面発光レーザから直接励振されたスローライトモードの損失を補償することで、最大出力 6mW , 7dB 以上の微分量子効率の向上を実証した。アイソレーション領域の短尺化及び上部 DBR のペア数を低下させることにより、更なる出力の向上が見込まれる。本集積構造はこれまでの報告に比べ、非常に簡易なプロセスであり、面発光レーザのシングルモード出力の高出力化のための手法として有望であると言える。

第3章参考文献

- [1] A. Syrbu, A. Mereuta, V. Iakovlev, A. Caliman, P. Royo, and E. Kapon, “10Gbps VCSELs with High Single Mode Output in 1310nm and 1550nm Wavelength Bands,” Proc. of Optical Fiber communication Conference / National Fiber Optic Engineers Conference, OThS2, 2008.
- [2] H. J. Unold, M. Golling, F. Mederer, R. Michalzik, D. Supper, and K. J. Ebeling, “Singlemode output power enhancement of InGaAs VCSELs by reduced spatial hole burning via surface etching,” Electron. Lett., **37**, 9, pp. 570-571, 2001.
- [3] A. C. Lehman, E. A. Yamaoka, C. W. Willis, K. D. Choquette, K. M. Geib, and A. A. Allerman, “Variable reflectance vertical cavity surface emitting lasers,” Electron. Lett., **43**, 8, pp. 460-461, 2007.
- [4] K.-S. Chang, Y.-M. Song, and Y.-T. Lee, “Stable single-mode operation of VCSELs with a mode selective aperture,” Appl. Phys B., **89**, 2-3, pp. 231-234, 2007.
- [5] Å. Haglund, J. S. Gustavsson, J. Vukusic, P. Modh, and A. Larsson, “Single Fundamental-Mode Output Power Exceeding 6mW From VCSELs With a Shallow Surface Relief,” IEEE. Photon. Technol. Lett., **16**, 2, pp. 368-370 2004.
- [6] 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., **4**, 4, pp. 374-377, 1993.
- [7] N. Ueki, A. Sakamoto, T. Nakamura, H. Nakayama, J. Sakurai, H. Otomo, Y.

Miyamoto, M. Yoshikawa, and M. Fuse, “Single-Transverse-Mode 3.4-mW Emission of Oxide-Confined 780nm VCSEL's,” *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, **11**, 12, pp. 1539-1541, 1999.

[8] J.-W. Shi, C.-C. Chen, Y.-S. Wu, S.-H. Guo, C. Kuo, and Y.-J. Yang, “High-Power and High-Speed Zn-Diffusion Single Fundamental-Mode Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers at 850-nm Wavelength,” *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, **20**, 13, pp. 1121-1123, 2008.

[9] A. Furukawa, S. Sasaki, M. Hoshi, A. Matsuzono, K. Moritoh, and T. Baba, “High-power single-mode vertical-cavity surface-emitting lasers with triangular holey structure,” *Apply. Phys. Lett.*, **85**, 22, pp. 5161-5163, 2004.

[10] D. Zhou, and J. Mawst, “High-Power Single-Mode Antiresonant Reflecting Optical Waveguide-Type Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers,” *IEEE. J. Quantum. Electron.*, **38**, 12, pp. 1599-1606, 2002.

[11] A. Caliman, A. Mereuta, G. Suruceanu, V. Iakovlev, A. Sirbu, and E. Kapon, “8 mW fundamental mode output of wafer-fused VCSELs emitting in the 1550-nm band,” *Opt. Express.*, **19**, 18, pp. 16996-17001, 2011.

[12] L. A. Coldren, and S. W. Corzine, Book : Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, Gain and Current Relations, CHAPTER 4.

第 4 章 面発光レーザとスローライト変調器の横方向集積

4.1 緒 言

面発光レーザの高速化の取り組みについては第 1 章で述べた. しかしながら, 高速化のためには大きな注入電流密度を必要とすることから, 信頼性に課題があることに加え, 更なる高速化の要求に応えるには消費電力がボトルネックになると考えられる. よって, 面発光レーザ単体での高速化には限界があり, 端面出射型レーザの場合と同様に外部変調器との集積化が必要と考えられる. とりわけ, その高速応答性, 低電圧動作及び他の変調器に比べ小型であることから, EA 変調器が集積する光変調器として有望である[1,2].

ここで EA 変調器の動作原理を簡単に述べる. EA 変調器には多重量子井戸への電圧印加に伴い吸収端波長及び吸収係数が変化する, 量子閉じ込めシュタルク効果 (Quantum Confined Stark Effect: QCSE) が利用される. 図 4.1 に示すのは, 印加電圧の変化に応じたエネルギーバンド変化であり, QCSE の模式図である. 変調器へ逆バイアスを印加することにより, 図 4.1(b)に示すようにエネルギーバンドは歪み, 量子準位が変化することで無バイアス時に比べバンドギャップは小さくなる. これにより, 吸収端波長は長波長側にシフトする. 図 4.2 は EA 変調器による強度変調の様子を表している. 図に示すように, 変調器への入力光の波長を定めると, 無バイアス時は, 光の吸収量は小さい状態であり, これがオン状態となる. 一方, 逆バイアス時は, 光の吸収量は増加し, これがオフ状態となる. このように, 変調器への印加電圧を変化させることで光の強度変調が行われ, デジタル信号を生成することができる.

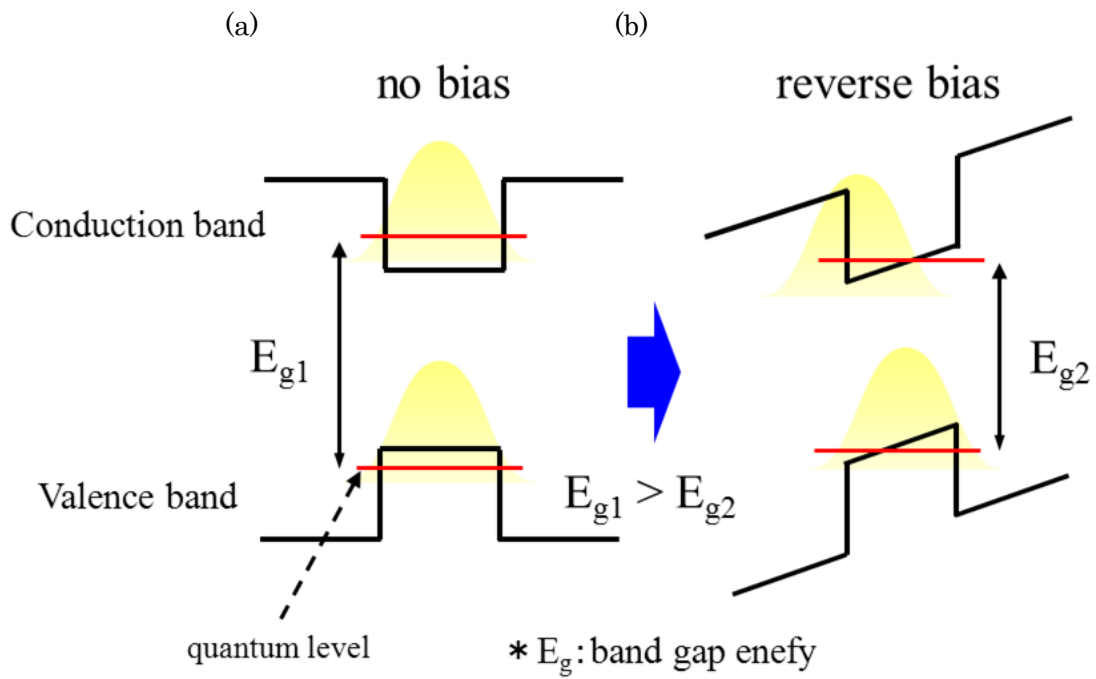


図 4.1 印加電圧の変化に応じたエネルギーバンド図 (a) 電圧オフ, (b) 電圧オン

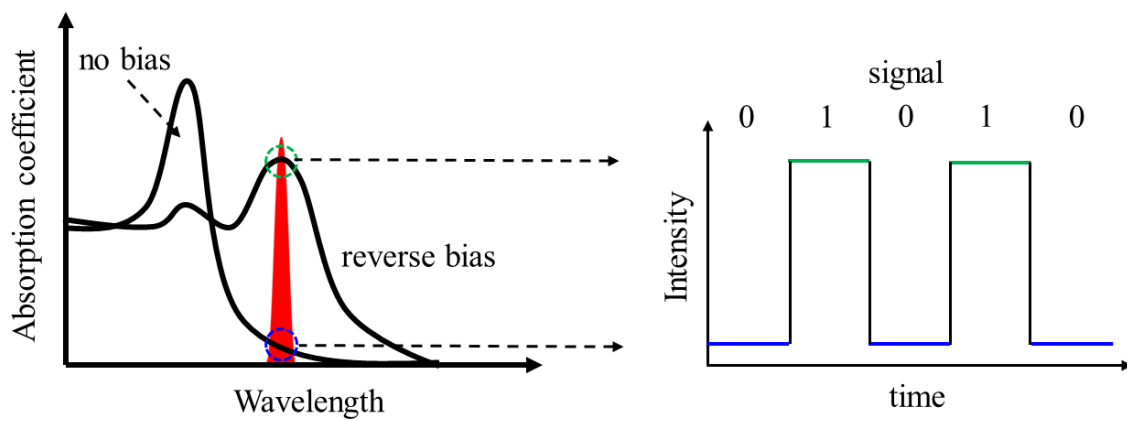


図 4.2 EA 変調器による強度変調の模式図

このような動作原理を持つ EA 変調器の高速化及び低消費電力化のための設計論について少し触れたい。EA 変調器の 3dB 周波数帯域は CR 時定数にのみ制限され、特に寄生容量による影響が大きい。寄生容量は面積に比例するため、一般的に変調器サイズの小型化（ここでは主として短尺化）により寄生容量の低減を図ることで高速動作を実現している。しかしながら、小型化することにより、短い距離で所望の消光比を得るにはより大きな吸収係数差を実現する必要がある、必要な変調電圧は大きくなってしまう。一方、消費電力は変調電圧の 2 乗に比例するので[3]、変調電圧の低減が鍵となる。しかしながら、両者はトレードオフの関係にあり、両立は困難である。近年、進行波電極を用いることにより、低消費電力かつ高速 EA 変調器を実証した報告はあるものの、変調器サイズは $200\mu\text{m}$ 以上であり十分に小型であるとは言えない[4,5]。

以上のように、EA 変調器において小型化と低電圧化の両立が困難である理由は、小型化による吸収量の低下である。そこで、EA 変調器に対しスローライト効果を適用することを考える。スローライトを利用することで小型光変調器内を伝搬する光は、見かけ上スローダウンファクター倍の長さの変調器を伝搬していることと等価となる。つまり、スローライトにより単位長さあたりの吸収量を増加させることができるため、素子サイズが小型であっても変調電圧を低く抑えることが可能である。以上より、スローライトを利用した EA 変調器により、従来の EA 変調器における小型化（≒高速化）と低電圧化（≒低消費電力化）間のトレードオフを解決できる可能性があり、小型で高速かつ低消費電力動作する光変調器の実現が期待できる。

第 2 章で実証した面発光レーザとスローライト導波路集積デバイスの導波路領域に電圧を印加することにより、スローライト導波路はスローライト変調器へと置き換わる。本章では面発光レーザと小型光変調器（スローライト変調器）集積化について、モデリングによる検討を行うとともに、製作したスローライト変調器集積デバイスの実験結果について述べる。

4.2 電界吸収型スローライト変調器集積化のモデリング

面発光レーザの横方向に集積したスローライト導波路に電圧を印加することで、面発光レーザとスローライト変調器の集積化が可能である。これまで本グループで実証してきたスローライト変調器はすべて外部光源を用いており、図 4.3 に示すようにスローライト変調器に対して斜めに光を入射する、斜め入射法を用いて変調器に対してスローライトを励振していた[6]。しかしながら、精密なアライメントが必要であり、結合部での結合損失の低減が困難である。また、スローダウンファクターの大きいスローライトを励振させるためには、 10° 以下の入射角での入射が必要であるが、結合部での等価屈折率差が大きく、大きな結合損失を生むため本質的に困難である。現状、スローダウンファクター < 10 のスローライトの励振に留まっており、スローライトの効果を十分に発揮できていない。集積デバイスにおいては、本質的に光結合の問題を回避できるとともに、面発光レーザ共振器により直接励振されるスローライトモードは、スローダウンファクターの大きな光であるので、スローライトの効果を十分に発揮できる可能性がある。

面発光レーザとスローライト変調器の集積化を考える場合、集積したスローライト変調器により生成されたデジタル信号を取り出す方法として 2 つ考えられる(図 4.4)。1 つ目は、スローライト SOA 集積の場合と同様に、放射光の積分強度を受光する方法であり(放射型)、2 つ目は、変調器端面において光を放射させ受光する構造であり(伝搬放射型)、どちらの方法がよいかは、消光比、変調電圧等及び挿入損失等の様々な要因を検討する必要がある。スローライトを利用することでどちらの方法を採用しても、従来の EA 変調器よりも小型化できる可能性があるが、伝搬放射型の場合は図 4.3(b)のように本質的に変調器端面からの戻り光が発生してしまう。面発光レーザとの集積を考えた場合、面発光レーザに対して複合共振器を形成するこ

とになってしまうため、戻り光を抑制する必要がある。伝搬放射型においても戻り光を抑制する手法は考えられるが、本研究では本質的に戻り光の抑制が可能な放射型を検討する。

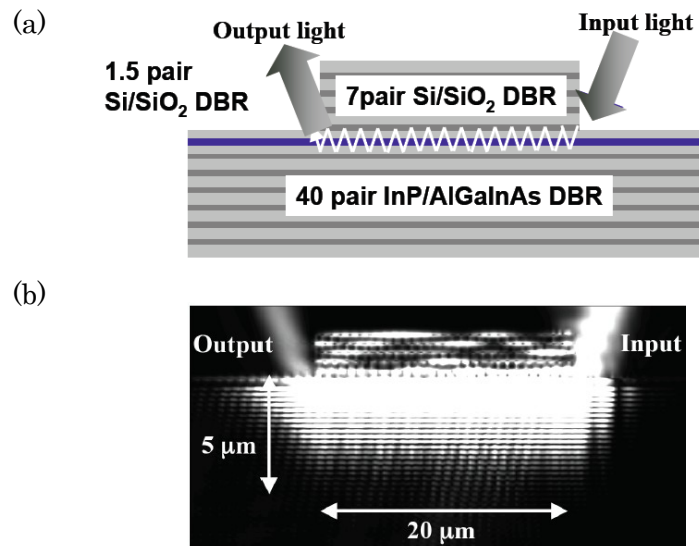


図 4.3 斜め入射法によるスローライトモードの励振

(a) 計算モデル, (b) 強度分布

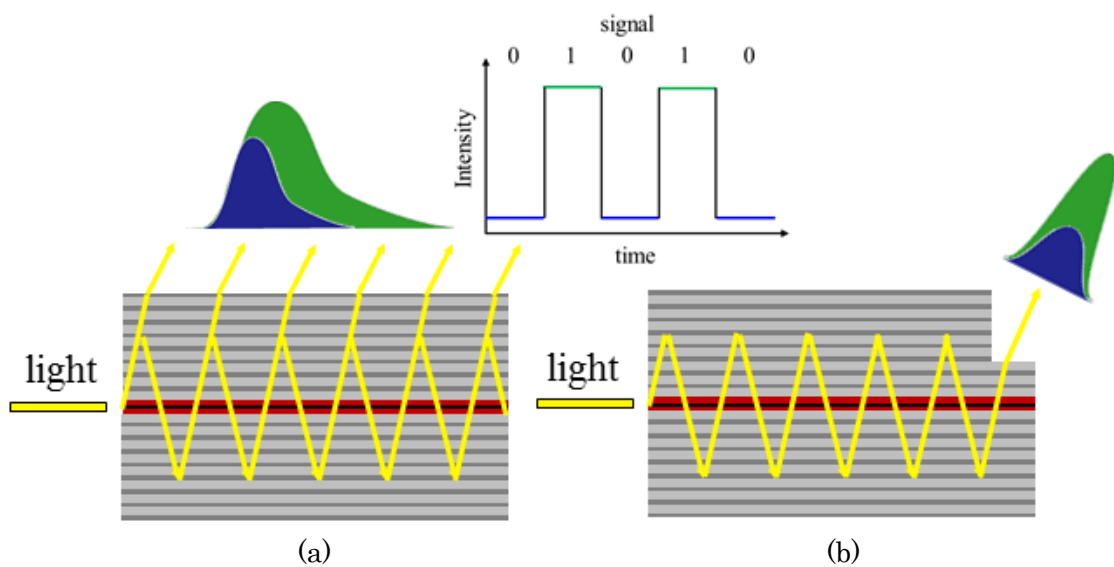


図 4.4 スローライト変調器からの受光方法

(a) 放射型, (b) 伝搬放射型

先ず, 小型スローライト変調器集積化の検討のため, フィルムモードマッチング法を用いて上部 DBR のペア数に応じた消光比を求めた. 計算モデルは, 第3章で用いたモデルと同様であるが, 量子井戸に異なる吸収係数を仮定することにより QCSE を再現した. 仮定した吸収係数は無バイアス時に 200cm^{-1} , 逆バイアス時に 1200cm^{-1} とし, 1V 未満の変調電圧での動作を想定した[7]. 図 4.5 は上部 DBR のペア数が 21 ペアの時の放射光の横方向光強度分布である. 変調器の吸収係数の変化に伴い, 光が消光している様子が確認できる. ここで, 放射型の変調器の場合, 吸収がなければ入力した光のすべてを放射損失としてすべて取り出すことができるが, 吸収により失われた強度は挿入損失として扱う必要がある.

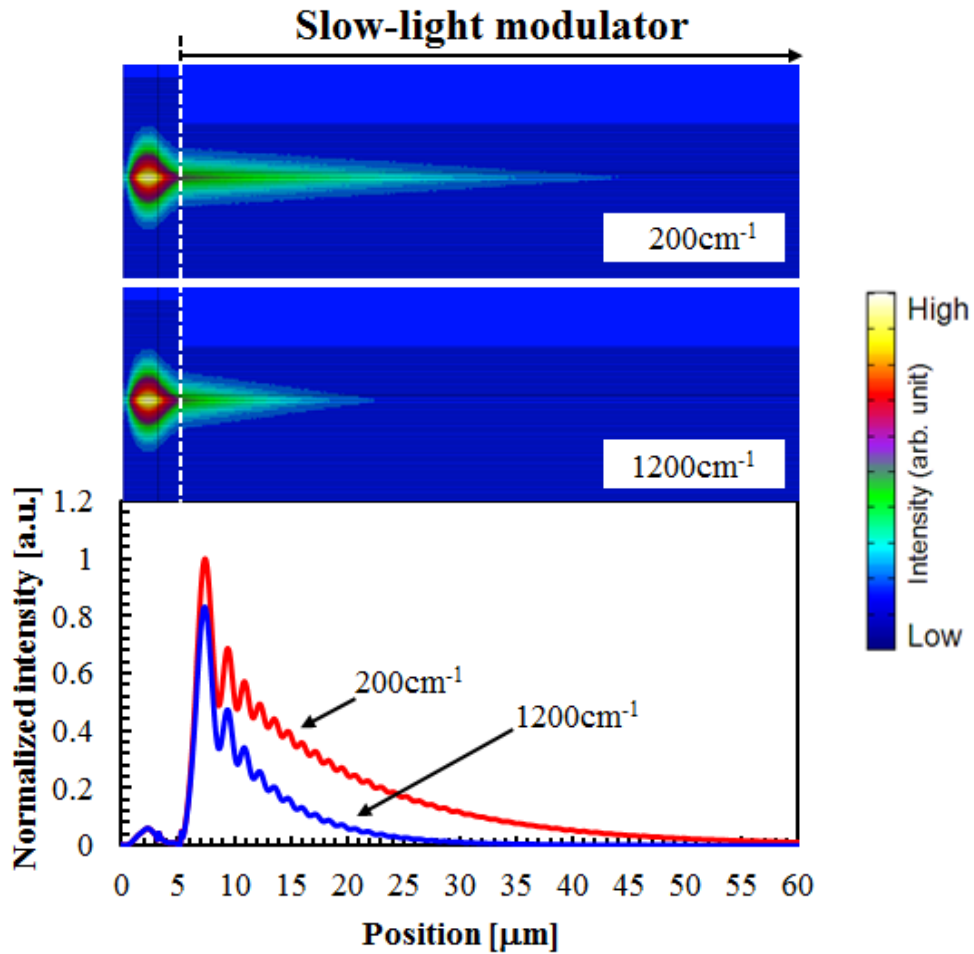


図 4.5 異なる吸収係数を仮定したときの横方向光強度分布 (上部 DBR: 21 ペア)

図 4.6 は上部 DBR のペア数に応じた消光比及び挿入損失である. 変調器の長さは $50\mu\text{m}$ を仮定した. 上部 DBR のペア数の増加に伴い, 消光比が増加する一方で挿入損失も増加している. 上部 DBR のペア数が少ない場合, 変調器領域当初の部分での放射光強度が放射光強度全体に占める割合が多くなり, 吸収係数差による光の消光比を劣化させるため, 消光比確保のためには上部 DBR のペア数を多くしたほうが良い. 一方, 上部 DBR のペア数を多くした場合は放射損失が小さくなるので, 導波路損失のうち吸収損失が占める割合が多くなり, 挿入損失が増加してしまう. 挿入損失の許容値を 2dB と仮定すると, 最適ペア数は 22 ペアになる. しかしながら, 消光比は 4dB であり十分ではない.

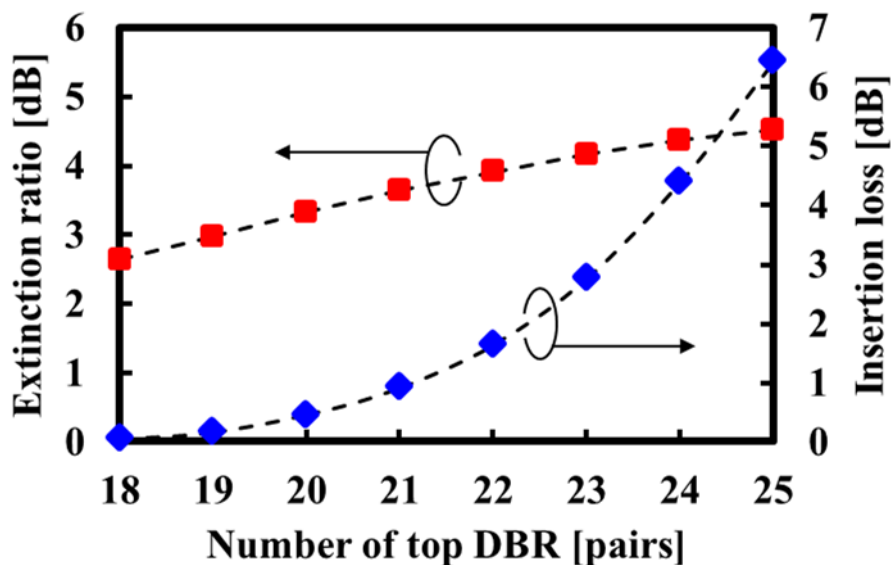


図 4.6 上部 DBR のペア数に応じた消光比及び挿入損失

ここで, 図 4.5 の横方向光強度分布を見ると, 変調器領域当初の光強度は吸収係数が変化してもさほど変化していないことがわかる. また, この点での強度が全体の放射強度分布の中で最も強いことから, 消光比を劣化させる主たる要因であると考えられる. よって, 変調器当初の領域数 μm を遮蔽することにより消光比が向上すると考えられる. ただし, 遮蔽したことにより

受光できない分の強度は損失であるので、上記挿入損失に遮蔽したことによる損失を合わせて挿入損失と定義し、遮蔽距離とともに上部 DBR のペア数依存性を計算した。消光比が 5dB となるために必要な遮蔽距離とその時の挿入損失を図 4.7 に示す。上部 DBR のペア数が少ないほど、変調器当初の領域での放射光強度の占める割合が大きいため、消光比を確保するために必要な遮蔽距離は長くなる。一方、挿入損失に関しては先述のとおりペア数が増えると放射損失が小さくなり、吸収損失の占める割合が多くなるため、図 4.7 に示すように最適点が存在する。以上より、面発光レーザの横方向に $50\mu\text{m}$ の小型スローライト変調器を集積することにより、挿入損失 2dB 以下で 5dB 以上の消光比の外部光変調が得られる可能性が示された。この計算においては、遮蔽した箇所での光は外部へ放射されるが受光できないと仮定したが、遮蔽領域に高反射ミラーを仮定し、外部へ放射させないことを仮定すると挿入損失は 1dB 以下に低減できる。また、仮定した吸収係数は変調電圧 1V 以下での値であるので、低消費電力動作も期待できる。スローライト変調器により、素子の小型化による高速化と低消費電力化のトレードオフを解決できる可能性がある。

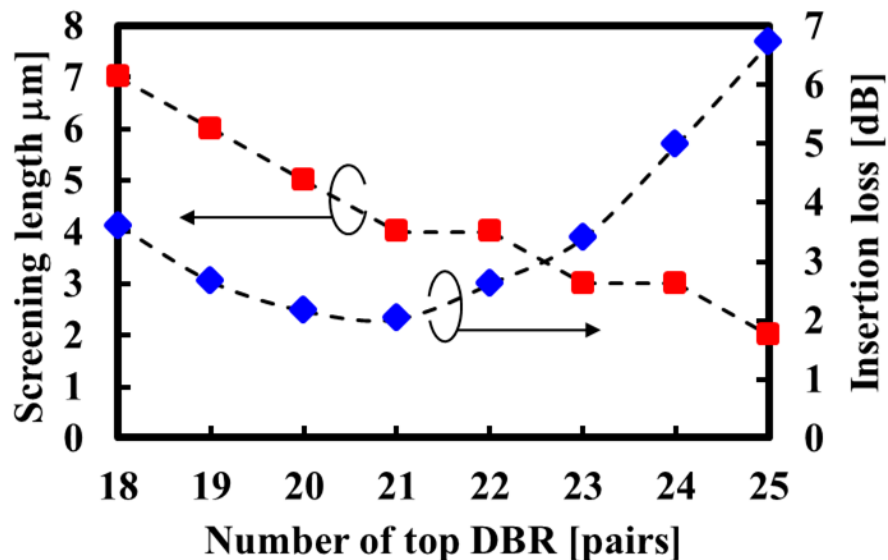


図 4.7 上部 DBR のペア数に応じた遮蔽距離及び挿入損失

4.3 スローライト変調器集積デバイスの製作及び特性評価

モデリングにより、面発光レーザの横方向に小型スローライト変調器集積化の可能性を示した。面発光レーザの横方向に集積したスローライト導波路に電圧を印加することにより、スローライト変調器の集積化が可能である。しかしながら、第3章で示したように両デバイス間に電位差が生じると漏れ電流が生じる。本説では、面発光レーザの横方向に集積した小型スローライト変調器について、その諸特性を示すとともに、両デバイス間の電氣的アイソレーションの課題克服への取り組みについて示す。

4.3.1 デバイス構造

集積デバイスの構造は、第3章で示したスローライト SOA 集積デバイスと同様の構造である。上部 DBR のペア数が 21 ペアである点、面発光レーザの活性領域が $4\mu\text{m}\times 10\mu\text{m}$ である点及び面発光レーザとスローライト変調器間の電氣的アイソレーション確保のための策が講じられている点が異なる。また、エタロン波長と PL ピーク波長間のオフセット波長は 30nm である。

ここで面発光レーザとスローライトデバイス間の電氣的アイソレーションの問題を解決するための策について示す。先述のとおり、両デバイス間には $\text{M}\Omega$ オーダーのアイソレーションの確保が望まれる。よって、電極間に距離を取る方法や、エッチングにより両デバイス間の体積を減少させる類の方法では到底到達できない値である。そこで、両デバイス間にイオン注入による絶縁化のプロセスを導入した。イオン注入プロセスは第2章で示したデバイスの製作のプロセスの中で、最初のメサ形成のためのパターニング前に行った。フォトレジストによるパターニングを行い、イオンを注入する領域を選択し、外注プロセスによりイオン注入はなされる。イオ

ンを注入する領域以外にもイオンが注入されてしまうとレーザ動作及び変調器動作を実現できなくなってしまうので、マスクとして使用するレジストは $8\mu\text{m}$ 程度の厚さになるように調整を行った。また、イオン注入の注入深さは活性層近傍まで到達する条件とし、間隙がないように多段注入を採用した[8]。イオン注入の条件は Table. 3-1 に示すとおりである。

Table. 3-1 イオン注入の条件

イオンの種類	H^+
注入エネルギー [keV]	60～350keVの6段の多段注入
注入量 [cm^{-2}]	1.00×10^{15} (注入エネルギー毎)
基板温度 [$^{\circ}\text{C}$]	加熱なし

電氣的なアイソレーションはイオン注入の深さに強く依存するため、文献値は参考になるものの、実際のウエハにおいてどの位置までイオンが到達しているかを確認する必要がある。図 4.8 は二次イオン質量分析法 (Secondary Ion Mass Spectrometry: SIMS) の観測結果である。本デバイスの活性層はウエハ表面から約 $3.5\mu\text{m}$ に位置することから、活性層の領域までイオンが届いていることが確認できる。漏れ電流が発生するのは主として上部 DBR 及び活性層領域であると考えられるので、活性層に至るまでイオンが到達している状態は望ましいと言える。これより面発光レーザとスローライトデバイス間の電氣的アイソレーションの問題の解決が期待できる。

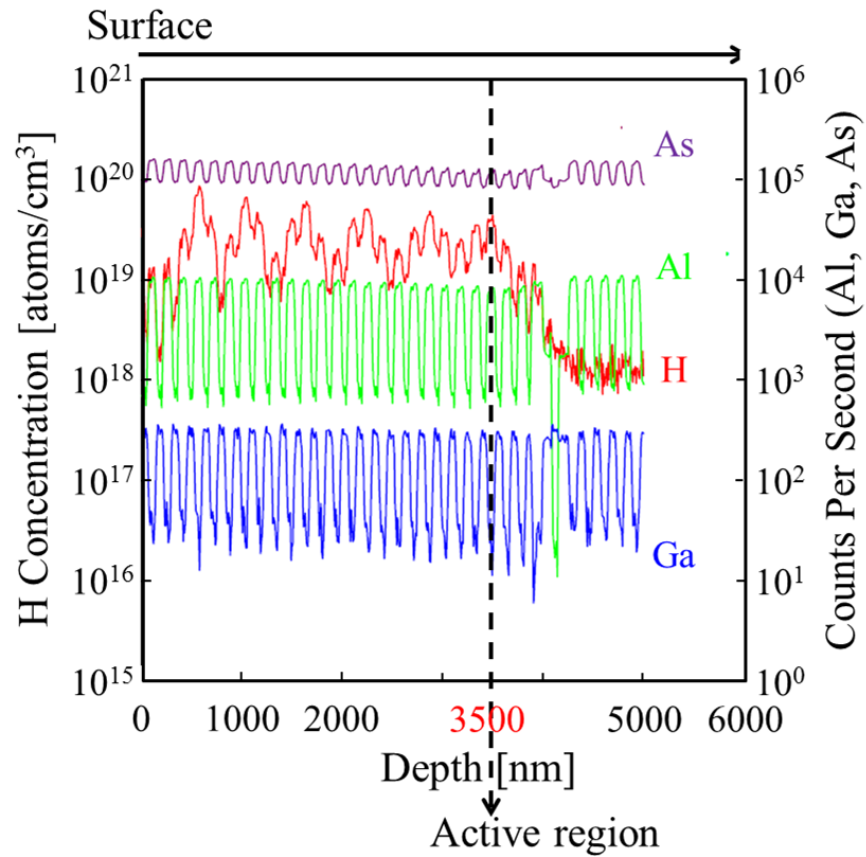


図 4.8 SIMS プロファイル

図 4.9 は完成した集積デバイスのレーザ顕微鏡画像である。面発光レーザとスローライト変調器の上部電極の距離は $7\mu\text{m}$ であり、その領域にイオン注入が施されている。面発光レーザからスローライト変調器に結合した光は、変調器への印加電圧の変化に応じて強度変調されるが、イオン注入領域では強度変調はなされない。つまり、その点での光強度は消光比を劣化させる要因となってしまうので、イオン注入領域はできるだけ狭いほうが望ましい。また、結合効率を見積もるために、面発光レーザ上部には垂直方向成分を抑制する高反射ミラーは形成していない。スローライト SOA 集積デバイスに比べ、活性層体積が小さいことに加え、アイソレーションの改善が見込まれるため、低しきい値での動作が期待できる。

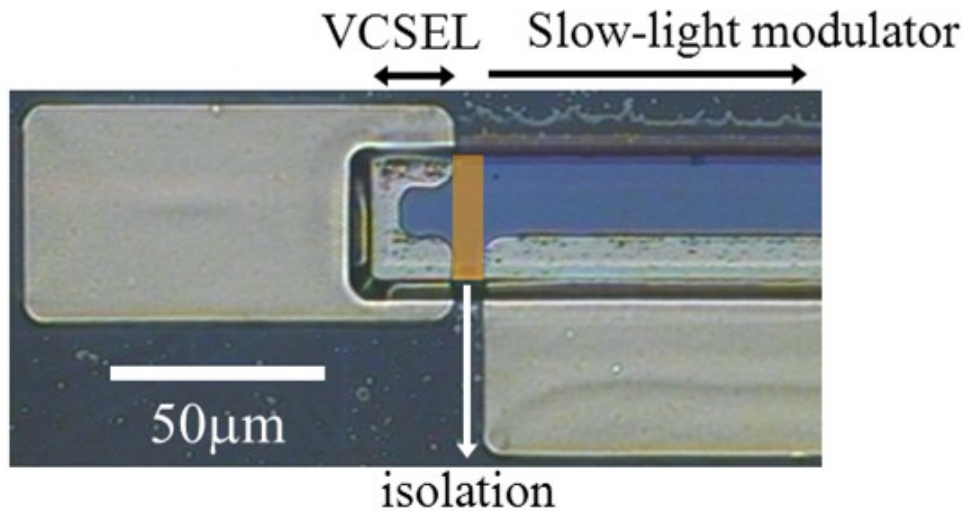


図 4.9 スローライト変調器集積デバイスのレーザ顕微鏡画像(俯瞰図)

4.3.2 面発光レーザの特性

先ず, 集積デバイスにおけるアイソレーションの測定を行った. 結果は, $10\text{M}\Omega$ 以上という十分な値が得られ, イオン注入によるアイソレーションの改善が確認された. 次に, 面発光レーザの I-L-V 特性を測定した(図 4.10). しきい値は 0.7mA であり, 第 3 章の SOA 集積デバイスに比べ大幅な改善が見られる. また, 電流密度換算においても半分以下となっており, 利得領域の微小化及びイオン注入によるアイソレーションの改善効果が見られる. 利得領域のうち, 長さ方向の短尺化により更にしきい値の低減が期待できる. また, 外部微分量子効率は 40% 近くが得られているが, 本集積デバイスでは, 面発光レーザ共振器から垂直方向に加え, 横方向にも光が放射されており, 横方向に結合した光は一部が吸収されるため, 通常的面発光レーザよりも本集積デバイスの外部微分量子効率は若干小さい. しかしながら, 後述のとおり伝搬距離は小さいことに加え, 上部 DBR の反射率はそこまで高くないため, 大きな欠点となるとは考えられない. また, 図 4.11 は面発光レーザに 1.5mA の電流を注入した時のスペクトル特性である. シングルモード動作が確認できるが, これは導波路幅を $4\mu\text{m}$ まで狭くした効果に

よるものと考えられる. シングルモード動作であることから, 第2章で言及したように結合効率の改善が期待される.

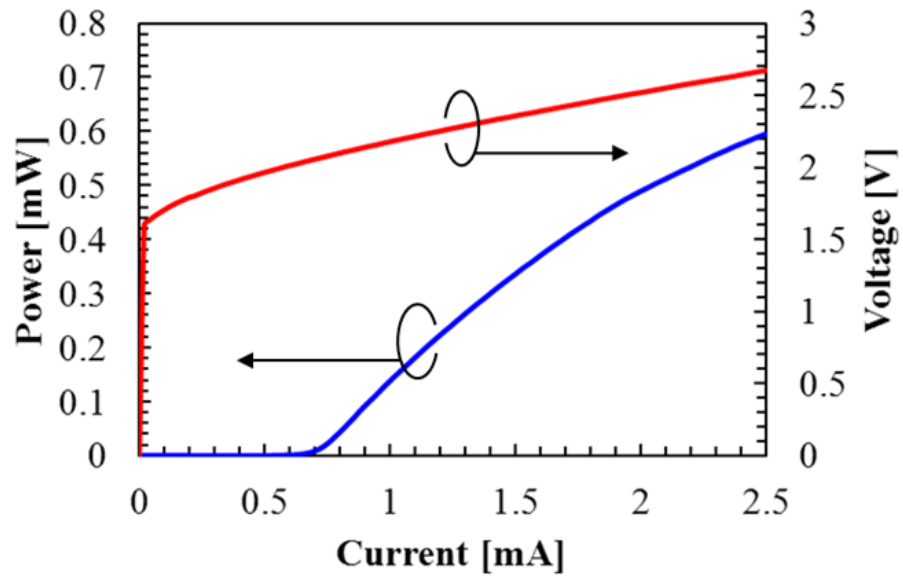


図 4.10 面発光レーザの I-L-V 特性

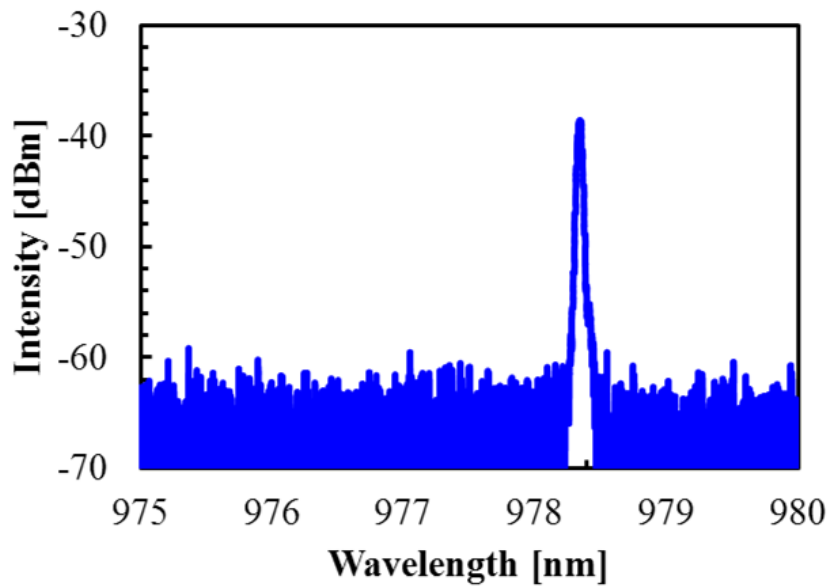


図 4.11 面発光レーザのスペクトル特性(注入電流:1.5mA)

本デバイスの面発光上部には垂直方向成分を抑制する高反射ミラーが形成されていないため、面発光レーザの垂直方向成分が支配的となる。しかしながら、第2章で示したように FFP の観測においては、垂直方向成分と横方向結合成分を空間的に分離できる可能性がある。図 4.12 は面発光レーザに 1.5mA の電流を注入した時の FFP の観測結果である。垂直方向成分を抑制していないため垂直方向成分が支配的ではあるが、横方向結合成分が確認できる FFP の観測結果より偏向角は約 6° であることが確認でき、2.2 節の図 2.7 よりスローダウンファクター ≈ 25 のスローライトモードが、面発光レーザからスローライト変調器に結合していることが確認できる。また、若干のオーバーラップがあるものの、垂直方向成分と横方向結合成分が空間的に分離されている。I-L 特性及び FFP の観測結果より、面発光レーザからスローライト変調器への横方向光結合効率は約 13%が見積もられる。面発光レーザの酸化アパチャー径の微小化によるシングルモード動作実現の効果が現れていると考えられる。しかし、面発光レーザの垂直方向成分を抑制していないため効率は小さい。垂直方向成分により約 3 倍の結合効率の改善が見込まれる。

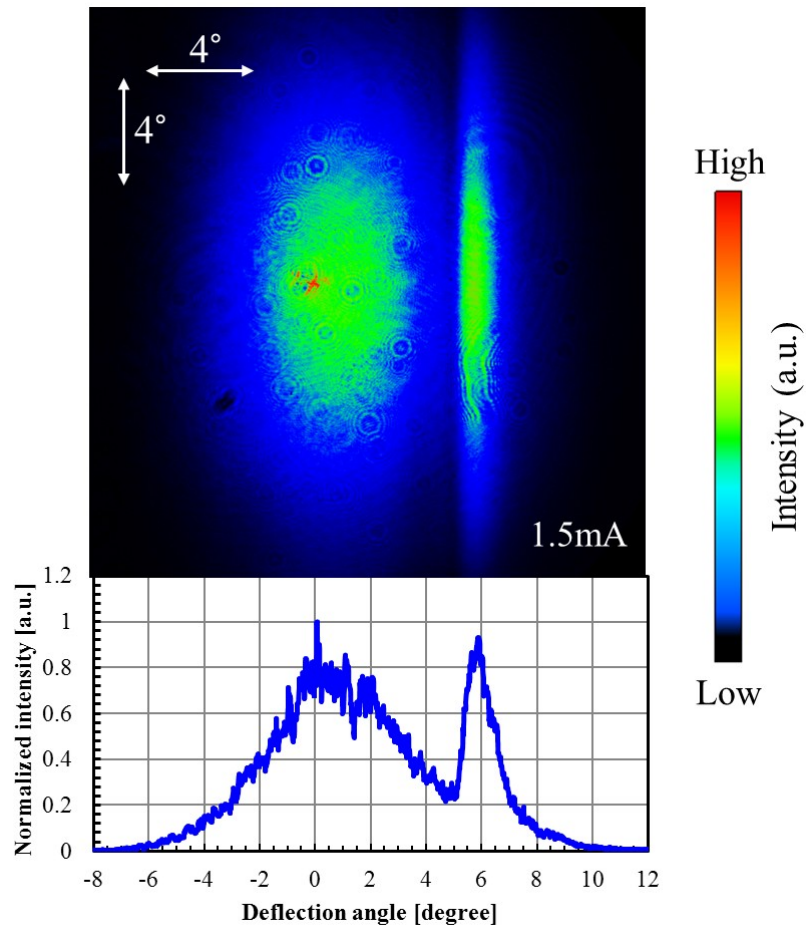


図 4.12 FFP の観察結果(注入電流:1.5mA)

4.3.3 スローライト変調器の静特性

次に、面発光レーザをレーザ発振させた状態で、スローライト変調器への印加電圧を変化させることにより、面発光レーザからスローライト変調器に結合した光の強度変調を行った。先述のとおり、変調器における消費電力は変調電圧の 2 乗に比例する。よって、変調電圧は小さく設定するのが良いが、オン状態での吸収損失は挿入損失となるので、オン状態では量子井戸での吸収が少ない状態が望ましい。本集積デバイスにおいては、変調器に対し 0V の電圧を印加した場合と-0.6V 印加した場合の I-L 特性に顕著な変化が見られなかったため(図 4.13)、-0.6V 印加時をオン状態とした。図 4.14 はスローライト変調器に異なる電圧を印加した時の集積

デバイスの I-L 特性であり、横軸は面発光レーザへの注入電流量を示す。上述のように-0.6V 印加時をオン状態とし、オフ状態は-2V 印加時とした。変調器への印加電圧の変化に伴い I-L の出力及びスロープは変化しており、スローライト変調器による外部光変調が確認できる。印加電圧の変化に伴う顕著なしきい値変化及びリップルは確認できないため、スローライト変調器から面発光レーザへの戻り光が抑制されていると理解できる。この時、消光比は約 1.8dB であるが、この小さな消光比は、面発光レーザの垂直方向成分の存在によるものと考えられる。また、図 4.15 は印加電圧の変化に応じたスペクトル特性であり、面発光レーザへの注入電流量は 1.5mA である。I-L 特性と同様に垂直方向成分が消光比を劣化させていることがわかる。印加電圧の変化に伴うピーク強度の差は約 1.5dB であり、I-L 特性の結果と概ね等しい。一方、印加電圧の変化に応じたスペクトルの変化は $\Delta\lambda < 0.02\text{nm}$ であり、これは面発光レーザへの戻り光が抑制されている明らかな証拠である。

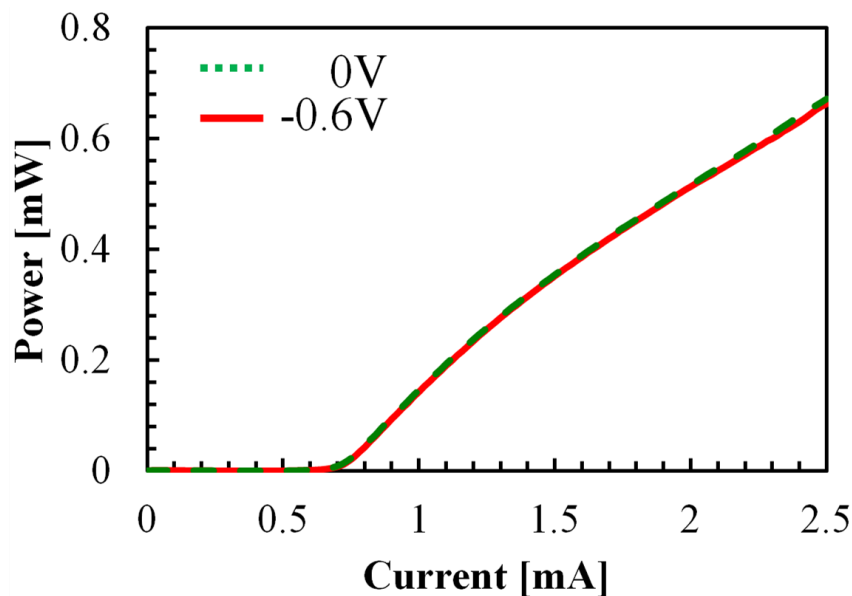


図 4.13 変調器に異なる電圧を印加した時の集積デバイスの I-L 特性
(印加電圧:0V 及び-0.6V)

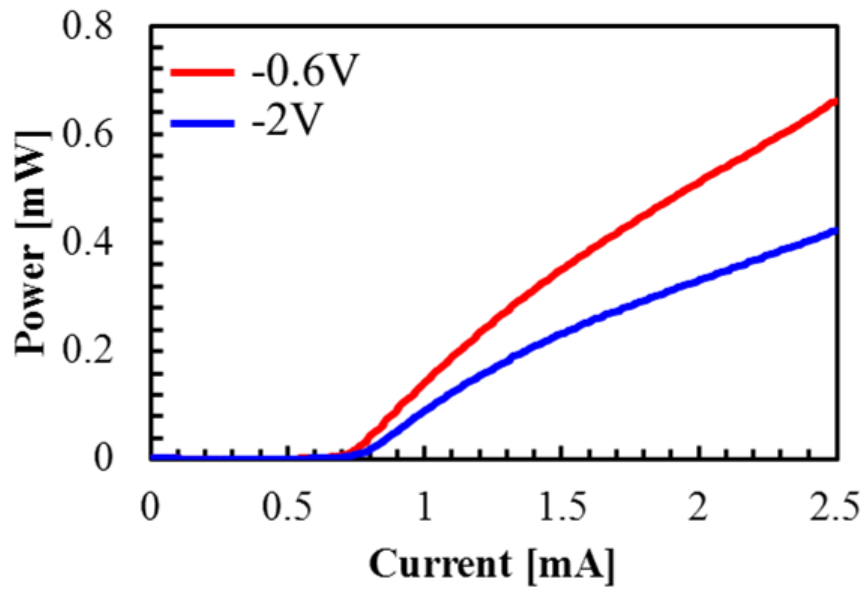


図 4.14 変調器に異なる電圧を印加した時の集積デバイスの I-L 特性
(印加電圧:-0.6V 及び-2V)

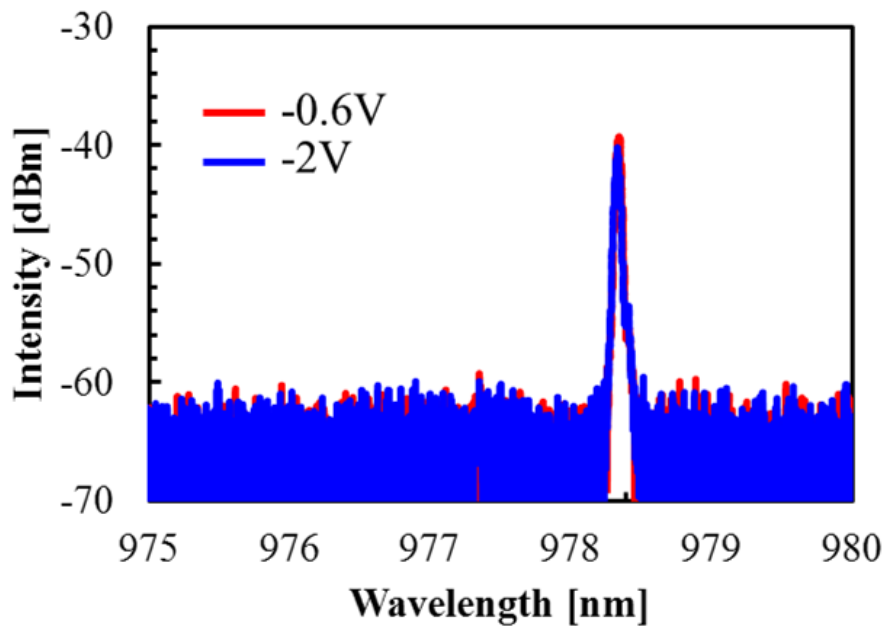


図 4.15 変調器に異なる電圧を印加した時の集積デバイスのスペクトル特性
(印加電圧:-0.6V 及び-2V)

次に、消光比劣化の要因である面発光レーザの垂直方向成分を物理的に遮蔽することでスローライト変調器からの放射強度のみの測定を行った(図 4.16). ここで、プローブを用いて垂直方向成分を抑制する場合、プローブでの光の散乱が生じると考えられる. I-L 測定系の空間分解能は高くないので、測定結果にはこの散乱光が含まれてしまい、スローライト変調器の特性を議論する上で適切ではないと考えられる. よって、空間分解能の高いスペクトル特性にてスローライト変調器の特性を議論する. 図 4.17 は、印加電圧の変化に応じたスペクトル特性であり、面発光レーザへの注入電流は 1.5mA で垂直方向成分抑制後のものである. 垂直方向成分抑制前後でのスペクトルピーク波長に変化は見られない. よって、プローブでの散乱光がレーザ共振器に対して、戻り光の発生などの何かしらの悪影響を及ぼしている様子は確認できない. これにより、変調電圧 1.4V 以下で 15dB 以上の消光比の外部光変調が確認できる. また、プローブ遮蔽前と同様に印加電圧の変化に伴うスペクトル変化は $\Delta\lambda < 0.02\text{nm}$ である.

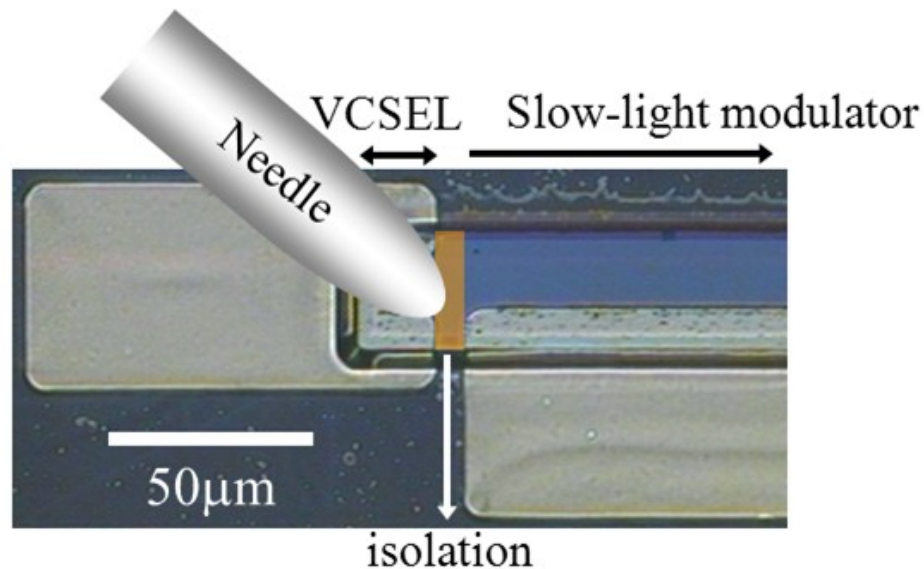


図 4.16 スローライト変調器集積デバイスのレーザ顕微鏡画像
(プローブによる面発光レーザの垂直方向成分を遮蔽)

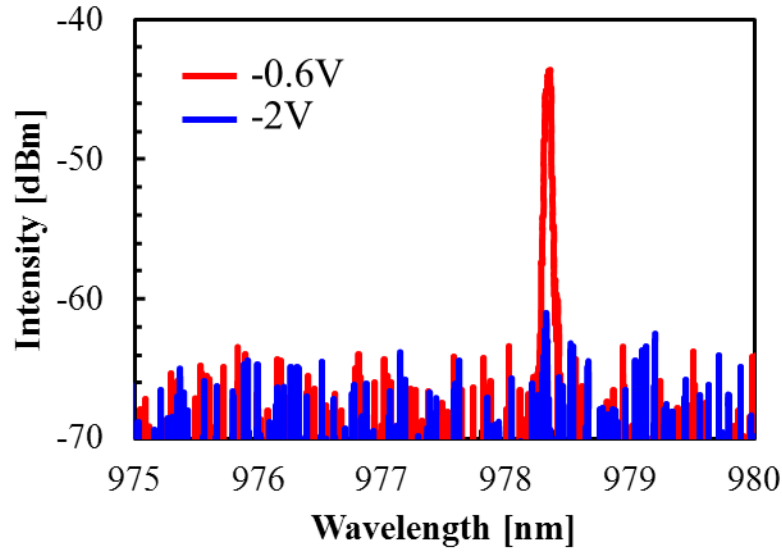


図 4.17 変調器に異なる電圧を印加した時のスペクトル特性
(印加電圧: -0.6V 及び -2V)

次に, NFP 及び FFP の観察を行った. 図 4.18 に NFP の観察結果, 図 4.19 に FFP の観察結果をそれぞれ示す. 面発光レーザからスローライト変調器への横方向光結合が確認できる. また, 変調器における QCSE による強度変調が確認できる. オン状態 ($V = -0.6\text{V}$) での NFP の観察結果より, 等価的な変調器長は $30\mu\text{m}$ 以下が見積もられる. また, FFP の観察結果より偏向角は約 6.5° であることが確認でき, 第 2 章 2.2 節の図 2.7 よりスローダウンファクター ≈ 23 のスローライトモードが, 面発光レーザからスローライト導波路に結合していることが確認できる. また, 図 4.19(b) に示す FFP の 2 次元イメージより得られる広がり角は約 11° であり, マルチモードファイバーの開口数 (Numerical Aperture: NA) を考慮すると, 光学レンズを用いることなくスローライト変調器からの放射光を直接結合させることが可能と考えられる. -2V 印加時の FFP によると, 強度は十分に抑制されており, FFP の観察結果からもスローライト変調器による 15dB 以上の消光比の外部光変調が確認できる. よって, 図 4.14 に示した I-L 特性において, -2V 印加時の出力は面発光レーザの垂直方向成分が支配的であると言える. これ

より、本集積デバイスの出力のうち、変調器領域からの最大出力は、注入電流 2.5mA の時約 0.24mW と見積もられる。スペクトル特性から得られた消光比 15dB を考慮すると、面発光レーザからスローライト変調器への横方向光結合効率は約 12% となり、先述のプローブ遮蔽前に見積もった結果と同様の値が得られる。一方、図 4.12 で観察された偏向角と図 4.19(a) で観察された偏向角は若干異なるが、図 4.12 と同じ条件(印加電圧なし)でのプローブ遮蔽後の FFP の観察結果から、同様の偏向角が得られている(図 4.20)。プローブ遮蔽後の FFP において広がり角が若干大きいのは、プローブ遮蔽により FFP の観測領域が狭くなり、伝搬距離が短く見えているためと考えられる。以上より、プローブ遮蔽による FFP の影響は考えにくく、偏向角の微小変化は電圧印加に伴う電気光学効果による屈折率変化が起きているためと考えられる。

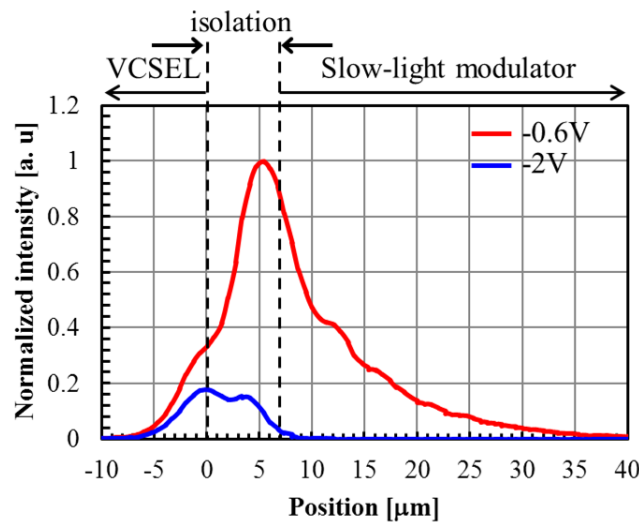


図 4.18 変調器に異なる電圧を印加した時の NFP の観察結果
(印加電圧: -0.6V 及び -2V)

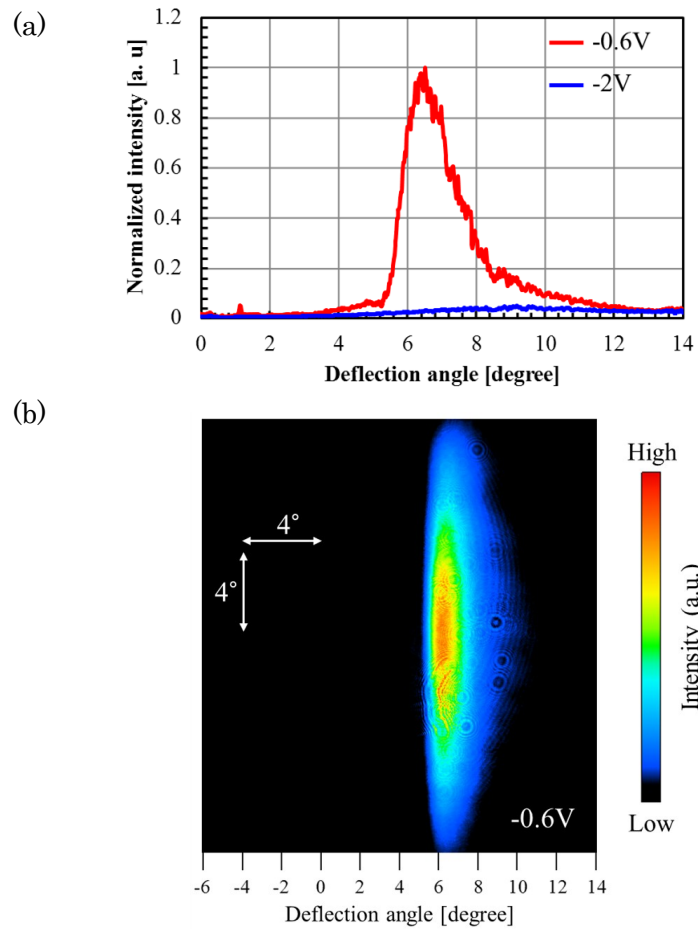


図 4.19 (a) 変調器に異なる電圧を印加した時の FFP の観察結果
(b) -0.6V 印加時の FFP の 2 次元イメージ

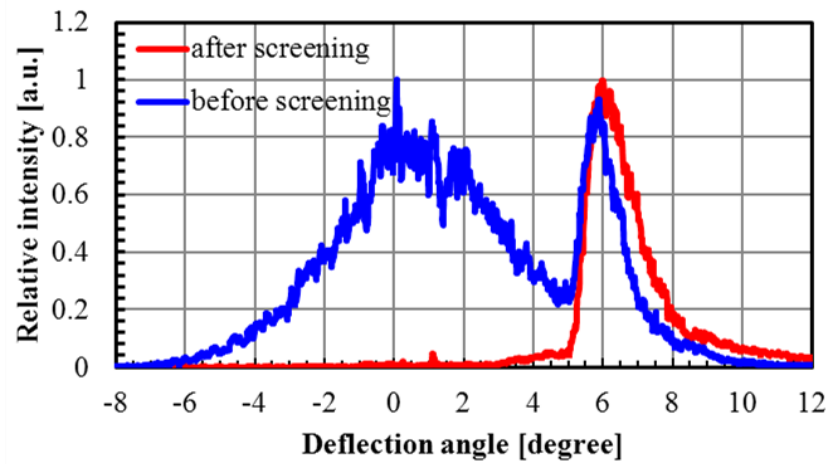


図 4.20 プローブ遮蔽前後の FFP
(注入電流: 1.5mA)

4.3.4 スローライト変調器の動特性

スローライト変調器の動特性として、小信号応答の測定を行った。面発光レーザ上部には垂直方向抑制のための高反射ミラーは形成されていないが、マルチモードファイバーの位置を調整することにより、変調器領域からの放射光を選択的に受光できる。

小信号応答の測定系は図 4.21 に示す。直流電源を面発光レーザにつなぎレーザ発振させ、スローライト変調器に光を結合させる。変調器はバイアスティーを介して、直流電源及びネットワークアナライザーにつながれており、変調器からの放射光はマルチモードファイバーで直接受光する。マルチモードファイバーで受光した光は、フォトディテクターで電気信号に変換され、ネットワークアナライザーによりその信号を読み取る。また、使用したフォトディテクターの 3dB 帯域は 12GHz である。

図 4.22 に直流電圧 = -0.5V の時の小信号応答測定の結果を示す。3dB 周波数帯域は約 4GHz であることがわかる。変調器の寄生容量を見積もる場合、電極パッドでの寄生容量の寄与は小さいので、p-n 接合部での寄生容量を見積もることで概算できる。本集積デバイスにおける変調器領域は長さ方向に約 200 μm である。また、幅方向には 30 μm の長さがあり、参考文献[9]の変調器と比べ面積にして約 6 倍である。本集積デバイスにおける小信号応答帯域が小さい主たる原因は、p-n 接合部が巨大であることで寄生容量が大きいためと考えられる。よって、周波数帯域拡大のためには、集積する変調器のサイズ自体を小型化する必要が有ると考える。

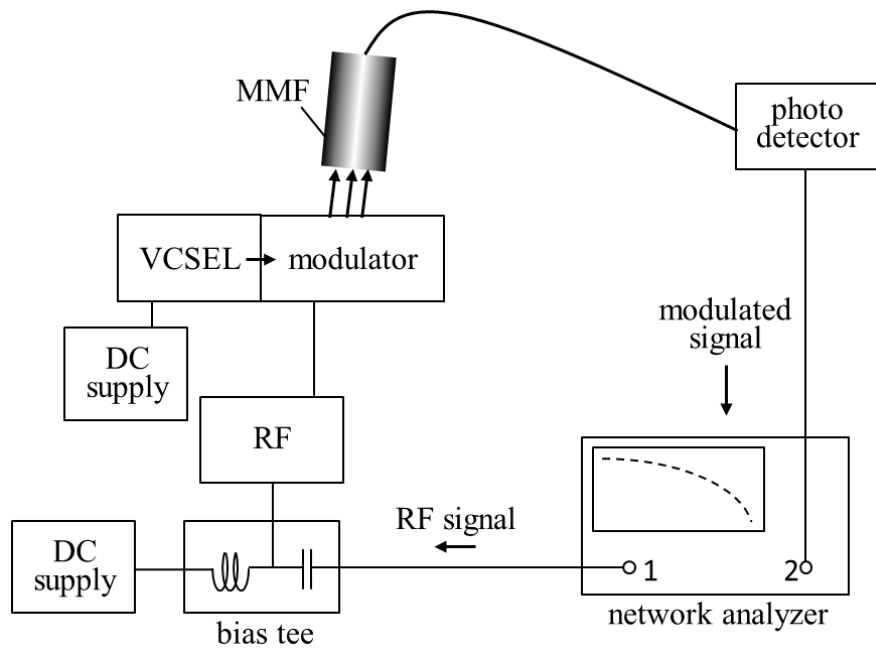


図 4.21 小信号応答の測定系

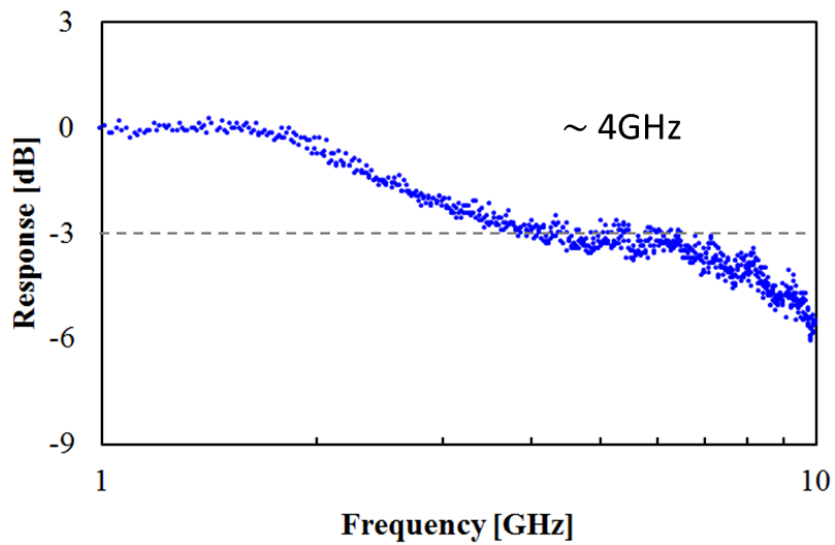


図 4.22 スローライト変調器の小信号応答

4.4 高反射ミラーによる垂直方向成分の抑制

面発光レーザの横方向に集積した小型光変調器による強度変調を実証できたものの、結合効率は十分に大きいとは言えず、その主たる要因は面発光レーザの垂直方向成分を抑制していないことである。本節では、面発光レーザ表面に Au をスパッタすることで面発光レーザの垂直方向成分を抑制し、結合効率の改善を試みるとともに、変調器の諸得性について示す。

4.4.1 デバイス構造

デバイス構造は第2章2.5節のくびれ構造を持つ集積デバイスと同様である。面発光レーザとスローライト変調器間の距離は $3\mu\text{m}$ であり、完成した集積デバイスのレーザ顕微鏡画像は図4.23に示すとおりである。面発光レーザ表面には Au がスパッタされており、垂直方向成分を抑制する高反射ミラーが形成されている。面発光レーザ表面にスパッタされる Au の厚さが薄い場合、面発光レーザの垂直方向成分は一部透過してしまうので、ある程度の厚さが必要であるが、 50nm 程度の厚さでは透過光の存在を確認しており、今回は約 200nm の厚さになるように Au をスパッタした。Au の屈折率は非常に小さいため、面発光レーザ上部には高反射ミラーが形成されていると考えられる。よって、面発光レーザのしきい値の低下が期待できるとともに、スローライト変調器領域への光結合効率の向上が期待される。

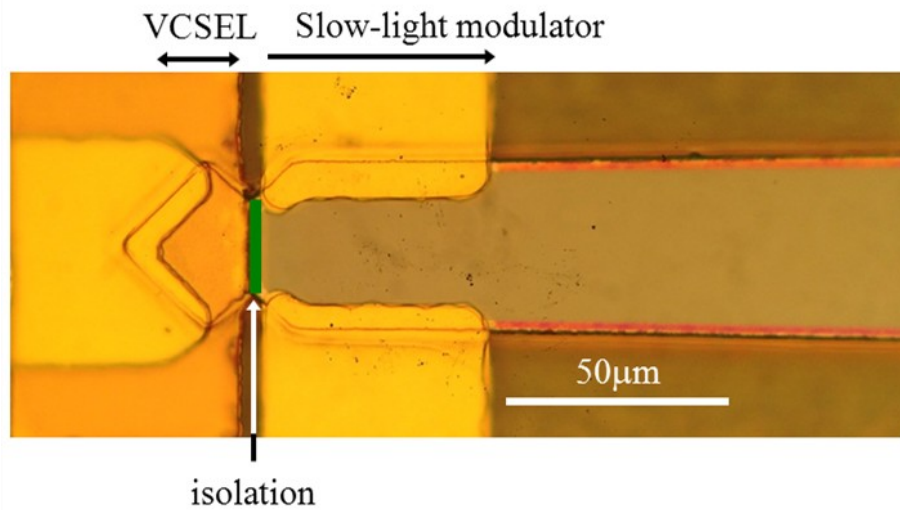


図 4.23 スローライト変調器集積デバイスのレーザ顕微鏡画像(俯瞰図)
(面発光レーザ表面への Au スパッタ後)

4.4.2 スローライト変調器集積デバイスの静特性

まず、面発光レーザの I-L-V 特性を測定した(図 4.24)。しきい値は 1mA であり、高反射ミラーを形成したにもかかわらず、しきい値はむしろ増加している。加えて、面発光レーザの垂直方向出射を抑制したにもかかわらず強度は減少している。理論的には、反射率増加に伴いミラー損失が減少し、しきい値は下がるはずである。また、垂直方向に放射していた成分が、レーザ共振器内に閉じ込められることにより横方向に放射する成分は増加するはずである。しかしながら、全く逆方向の特性になってしまった要因としては、面発光レーザ表面の半導体とスパッタした Au の界面での過剰損失の存在が考えられる。Au をスパッタすることによりミラー損失が減少したと仮定すると、新たな過剰損失の存在がしきい値を増加させたと考えざるを得ない。過剰損失の存在を認めると、レーザの外部微分量子効率低下するので必然的に出力も低下する。半導体界面とスパッタした Au の界面の状況の観察により定量的にその影響を見積もることは困難であるが、上述の理由から、Au をスパッタすることによる高反射ミラー形成

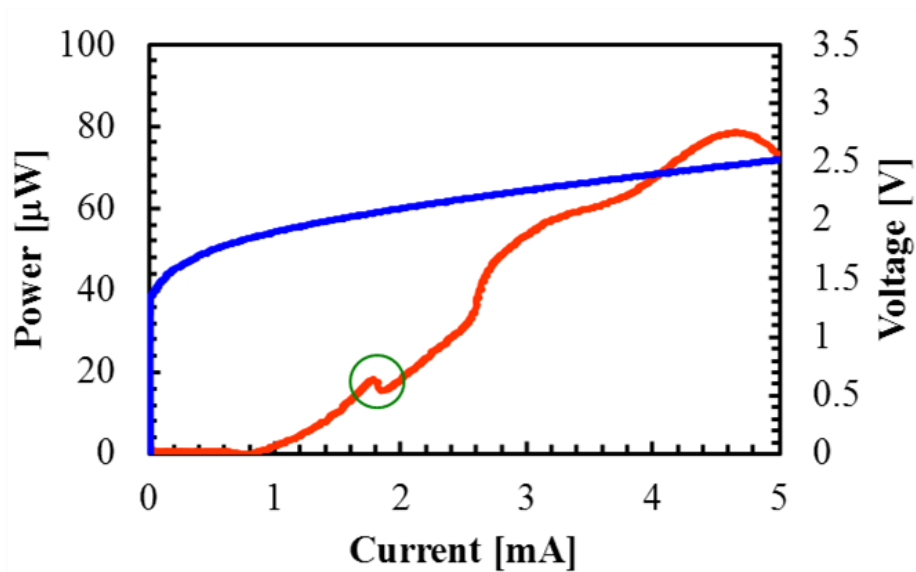


図 4.24 スローライト変調器集積デバイスのレーザ顕微鏡画像(俯瞰図)
(面発光レーザ表面への Au スパッタ後)

は、光学特性に悪影響を及ぼすことが確認された。

ここで、結合効率改善のための策を考えたい。鍵となるのは VCSEL 表面への高品質ミラーの形成である。以下、考えられる策を 4 つ挙げる(図 4.25)。

1 つ目は VCSEL 表面に誘電体 DBR を成膜する方法である。本研究室では SiO_2 を含む誘電体 DBR 成膜による高反射ミラー形成の実績があり、これを適用できると考えられる。しかしながらリフトオフプロセスが必要であり、成膜する厚さが厚い場合に困難になるというデメリットが考えられる。

2 つ目は SiO_2 をスパッタ後に Au をスパッタする方法であり、半導体と Au の界面の状態が悪影響を及ぼしていると考えられるため、その間に SiO_2 を挿入することでその影響を緩和できると考えられる。上記の誘電体 DBR 成膜に比べ、リフトオフプロセスが簡易であるというメリットが考えられる。

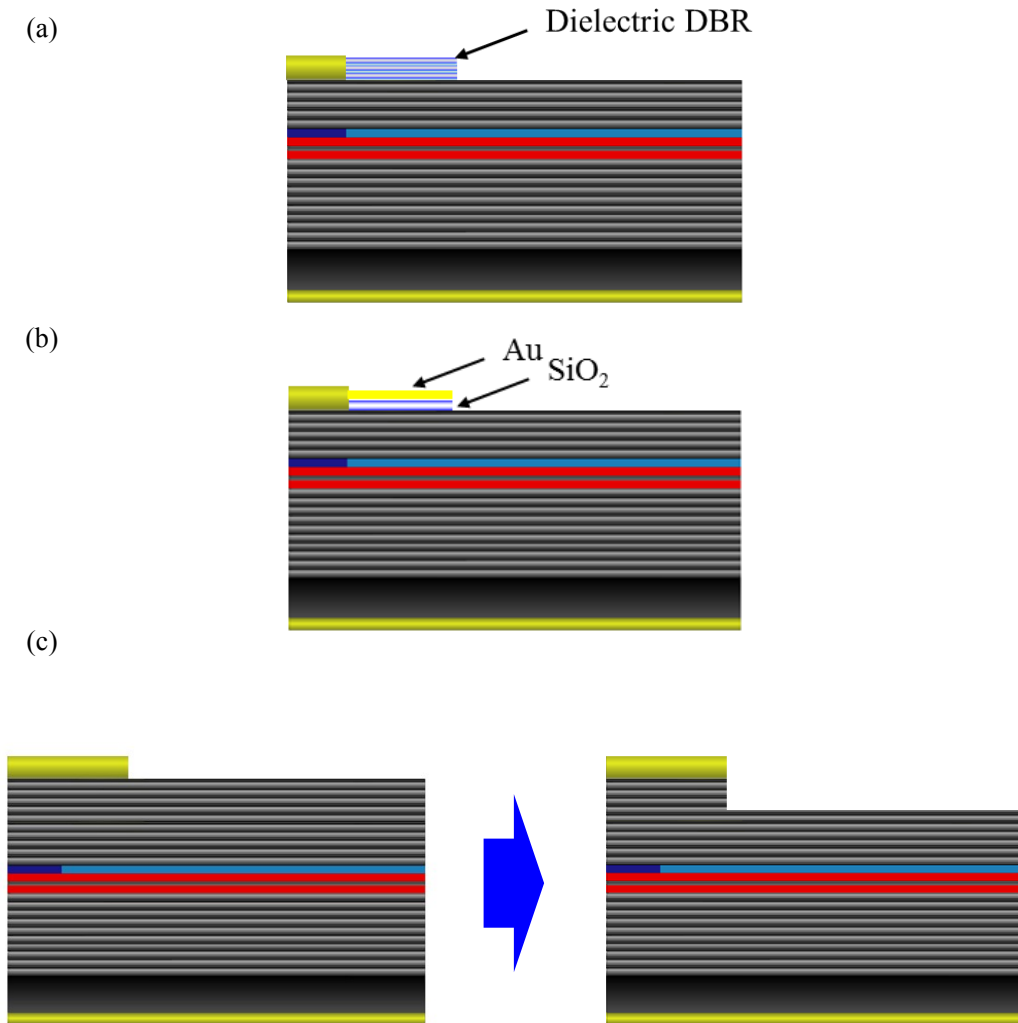


図 4.25 結合効率改善のための策

(a) 誘電体 DBR 成膜による高反射ミラーの形成, (b) Au ミラーと半導体界面への SiO₂ のスパッタ, (c) ポストプロセスによる半導体多層膜のエッチング

3つ目は、最初のエピ構造において上部 DBR のペア数を増加し、ポストプロセスにおいてスローライトデバイス領域の DBR をエッチングする方法である。この場合、VCSEL とスローライトデバイスの境界の状態が光学特性に及ぼす影響が少なからずあると考えられるが、境界の状態はエッチングに依存するため、ここでは定量的に見積もることは困難である。

最後は今回行った Au のスパッタであり、これは最も簡易な方法である。VCSEL 上部へ Au スパッタによる垂直方向成分抑制は何度も試みたわけではないため、この方法が適切ではな

いと判断するのは時期尚早であり、再現性を含めて検討が必要と考えられる。

ここからデバイスの特性に話を戻す。面発光レーザの I - L 特性について、注入電流 1.8mA 付近で確認できるキンクについては図 4.26 に示すとおり、注入電流の増加に伴いモードが変化している点である。面発光レーザ表面へ Au をスパッタすることによる、しきい値の低下及び結合効率の改善は果たせなかったが、面発光レーザの垂直方向成分は抑制できるため、4.3 節で行ったように物理的に垂直方向成分を抑制する必要はない。以下、スローライト変調器の特性について議論する。

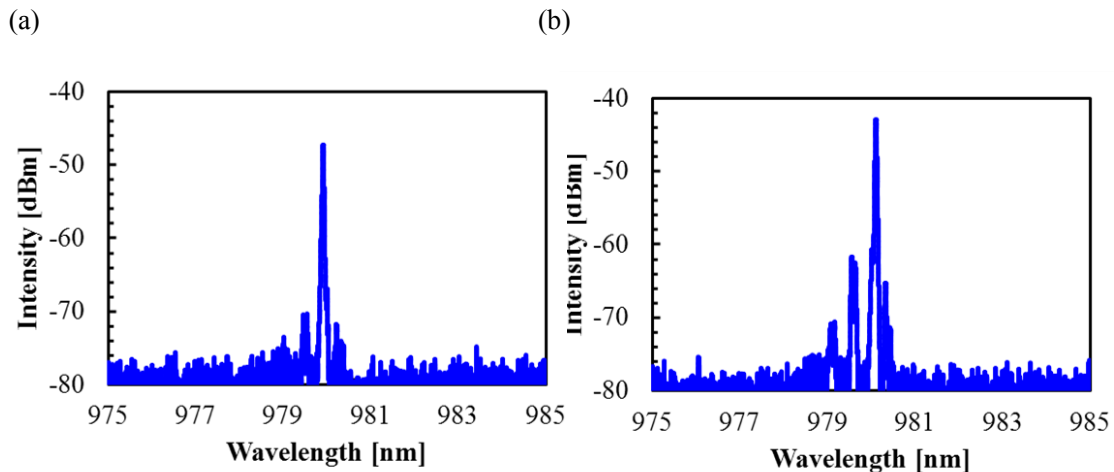


図 4.26 スペクトル特性の注入電流依存性

(a) 注入電流 1.5mA, (b) 注入電流 2mA

面発光レーザをレーザ発振させた状態で、スローライト変調器への印加電圧を変化させことにより、面発光レーザからスローライト変調器に結合した光の強度変調を行った。本集積デバイスにおいては、面発光レーザの垂直方向成分は Au ミラーにより抑制されるので、出力はスローライト変調器領域からの放射光のみとなる。図 4.27 はスローライト変調器に異なる電圧を印加した時の集積デバイスの I - L 特性であり、横軸は面発光レーザへの注入電流量を示す。0V 印加時をオン状態とし、-1.3V 印加時をオフ状態と設定した。変調器への印加電圧の変化

に伴い I-L の出力及びスロープは変化しており、スローライト変調器による外部光変調が確認できる。この時、消光比は約 3dB であり、4.3 節のデバイスで得られた消光比 15dB に比べ小さい。要因の 1 つは I-L 測定系の空間分解能にある。4.2 節で示したように、変調器領域当初の光強度は消光比を劣化させる。また、面発光レーザとスローライト変調器界面では少なからず散乱光が含まれると考えられる。空間分解能が高いスペクトル測定や FFP 測定では、面発光レーザからスローライト変調器に結合したスローライトモードのみを分離することができるが、I-L 測定系ではそれができないため、相対的に消光比は小さくなる。後述のように本集積デバイスにおいても 8dB 以上の消光比が得られている。また、印加電圧の値が異なることも要因の 1 つであると考えられる。4.3 節の集積デバイスのオフセット波長は 25nm、本集積デバイスのオフセット波長は 30nm であり、オフセット波長が短い方が小さな変調電圧で、大きな消光比が得られるはずである[7]。この観点で考えると、4.2 節の変調器において本集積デバイスと同様の 8dB の消光比を得ようとした場合、より小さな変調電圧で十分であったと予想できる。

図 4.28 はスローライト変調器への印加電圧の変化に応じたスペクトル特性であり、面発光レーザへの注入電流量は 2.5mA である。スペクトル特性から見積もられる消光比は約 8dB である。また、印加電圧の変化に応じたスペクトルの変化は $\Delta\lambda < 0.07\text{nm}$ であり、これは面発光レーザへの戻り光が抑制されている明らかな証拠である。

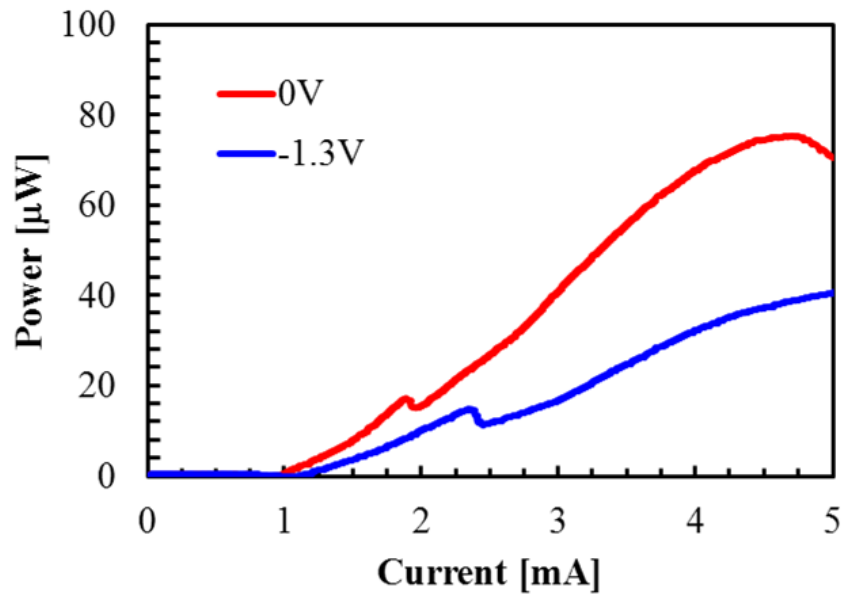


図 4.27 変調器に異なる電圧を印加した時の集積デバイスの I-L 特性
(印加電圧:0V 及び-1.3V)

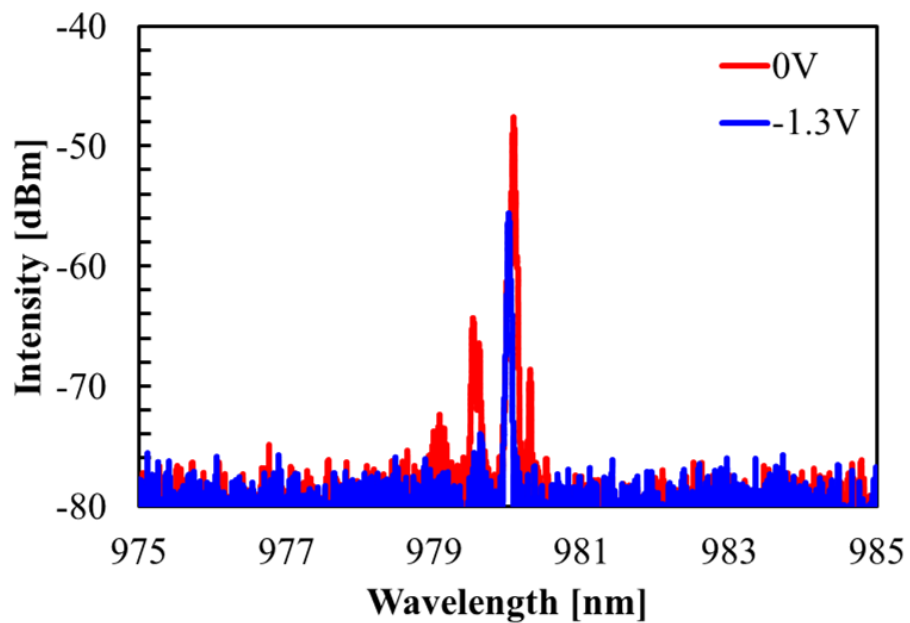


図 4.28 変調器に異なる電圧を印加した時の集積デバイスのスペクトル特性
(印加電圧:0V 及び-1.3V)

次に、NFP 及び FFP の観察を行った。図 4.29 は注入電流 2.5mA の時の NFP の観察結果であり、面発光レーザからスローライト変調器への横方向光結合が確認できる。ここで、NFP における Position 0 μ m は面発光レーザ上部電極の端である。また、変調器における QCSE による強度変調が確認でき、消光比は約 3dB であり、I-L 特性と一致する。しかしながら、強度変調が行われているのはアイソレーション領域後 (Position = 3 μ m 以降) であり、アイソレーション領域での強度が消光比を劣化させている。QCSE の効果が実質的にはアイソレーション領域後に現れているとして、印加電圧の変化に応じた損失を見積もったところ、0V 印加時は 770cm⁻¹、-1.3V 印加時 2430cm⁻¹ となった。これには放射損失及び吸収損失が含まれる。アイソレーション領域が限りなくゼロに近い理想状態を考える場合、消光比は上記損失により見積もることができ、強度変調は図 4.30 に示す挙動を示す。この時、30 μ m の変調器長 5dB 以上の消光比が見積もられる。NFP の空間分解能はスペクトルや FFP に比べ低いので、実際の消光比は更に大きい値が得られることが期待できる。

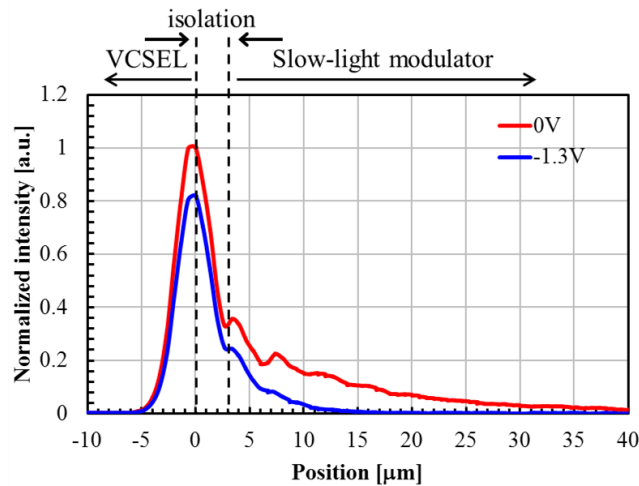


図 4.29 変調器に異なる電圧を印加した時の NFP の観察結果
(印加電圧:0V 及び-1.3V)

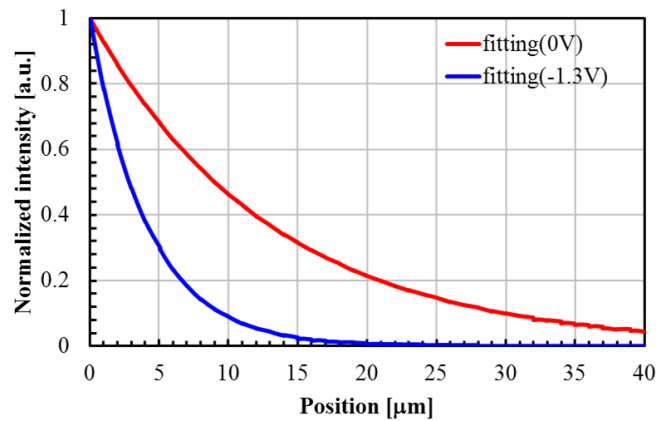


図 4.30 NFP から見積もられる損失に基づく横方向強度分布
(印加電圧:0V 及び-1.3V)

一方, 注入電流 2.5mA の時の FFP を図 4.31 に示す. 観察結果より偏向角は約 6.5° であることが確認でき, 第 2 章 2.2 節の図 2.7 よりスローダウンファクター ≈ 23 のスローライトモードが, 面発光レーザからスローライト導波路に結合していることが確認できる. この値は面発光レーザ表面に Au をスパッタする前後で顕著な変化はなく, 上部 Au ミラーによる共振モードへの影響は確認できない. また, FFP の観察結果から得られる消光比はスペクトルの測定結果と同様に約 8dB であることが確認できる.

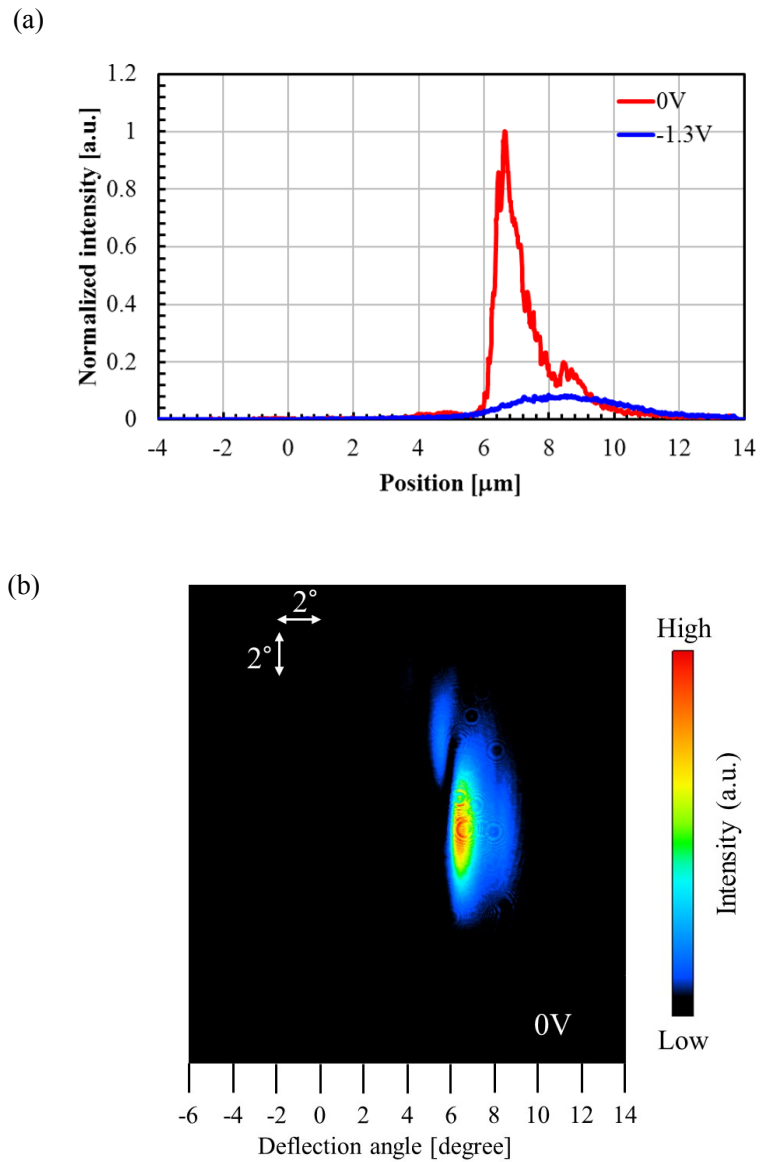


図 4.31 (a) 変調器に異なる電圧を印加した時の FFP の観察結果
(b) 0V 印加時の FFP の 2 次元イメージ

4.5 まとめ

第 4 章では面発光レーザの高速化のため、面発光レーザと小型スローライト変調器集積化について、その有用性をモデリング及び実験の両面から示した。モデリングにおいて、面発光レーザの横方向に集積した小型スローライト変調器($< 50\mu\text{m}$)により、挿入損失 2dB 以下で 5dB 以上の消光比の外部光変調が得られる可能性を示した。また、実際にスローライト変調器集積デバイスを製作し、変調電圧 1.4V 以下で 15dB 以上の外部光変調を実証した。この時、等価的な変調器長は $30\mu\text{m}$ 以下である。スローライト変調器の動特性の測定として、小信号応答の測定を行い、約 4GHz の 3dB 周波数帯域を得た。この周波数帯域の制限は、製作した変調器のデバイスサイズによるものであり、変調器の小型化により改善が見込まれる。

第4章参考文献

- [1] T. Ido, S. Tanaka, M. Suzuki, M. Koizumi, H. Sano, and H. Inoue, “Ultra-high-speed multiple-quantum-well electro-absorption,” *J. Lightwave. Technol.*, **14**, 9, pp. 2026-2034, 1996.
- [2] N. E. Dahdah, G. Aubin, J.-C. Harmand, A. Ramdane, A. Shen, F. Devaux, A. Garreau, and B.-E. Benkelfat, “Ultrafast InGaAs-InGaAlAs multiple-quantum-well electro-absorption modulator for wavelength conversion at high bit rates,” *Apply. Phys. Lett.*, **84**, 21, pp. 4268-4270, 2004.
- [3] D. A. B. Miller, “Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips,” *Proc. IEEE*, **97**, 7, pp. 1166-1185, 2009.
- [4] H. Fukano, T. Yamanaka, M. Tamura, and Y. Kondo, “Very-Low-Driving-Voltage Electroabsorption Modulators Operating at 40Gb/s,” *J. Lightwave. Technol.*, **24**, 5, pp. 2219-2224, 2006
- [5] T.-H. Wu, Y.-J. Chiu, and F.-Z. Lin, “High-Speed (60 GHz) and Low-Voltage-Driving Electroabsorption Modulator Using Two-Consecutive-Steps Slective-Undercut-Wet-Etching Waveguide,” *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, **20**, 14, pp. 1261-1263, 2008.
- [6] G. Hirano, F. Koyama, K.Hasebe, T. Sakaguchi, N. Nishiyama, C. Caneau, and C-E. Zah, “Slow Light Modulator with Bragg Reflector Waveguide,” *Proc. of Optical Fiber Communications Conference*, PDP34, 2007.

- [7] A. Stöhr, O. Humbach, S. Zumkley, G. Wingen, G. David, D. Jäger, B. Bollig, E. C. Larkins, and J. D. Ralston, “InGaAs/GaAs multiple-quantum-well modulators and switches,” *Optical and Quantum Electron.*, **25**, 12, pp. S865-S883, 1993.
- [8] C. Wilmsen, H. Temkin, and L. A. Coldren, Book : Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, Fabrication and Performance of Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, CHAPTER 5.
- [9] X. Gu, T. Shimada, A. Matsutani, and F. Koyama, “35- μm Bragg Reflector Waveguide Modulator for High-Speed and Energy-Saving Operation,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **25**, 8, pp. 1766-1769, 2013.

第 5 章 ビーム偏向器の集積化

5.1 緒 言

ビーム偏向器はセンシング、イメージングまたはプリンティングなどの様々なアプリケーションにおいて応用されており、高解像点数であることは重要な性能である。よって、サイズが大きく速度は遅いという欠点がありながら、高解像点数を実現できることからポリゴンミラーを用いた機械式のビーム偏向器が広く用いられている[1,2]。しかしながら、このような大型のデバイスを小型な光通信システムに取り入れるのは困難である。一方、レーザダイオードを利用したアプローチとして、in-plane レーザアレイ[3]、フォトリソグラフィを用いたレーザアレイ[4]、フェイズロック面発光レーザアレイなどがある[5]。しかしながら、100 を超える高解像点数を得るのは困難であり、実用レベルで求められる 1000 を超える解像点数実現には程遠い。一方、フェーズドアレイによる高解像点数を実現するアプローチがあるが[6]、理論的には高解像点数を実現できるものの、多くのアレイ素子を必要とするため製作は困難である。このように、未だ非機械式ビーム偏向器による高解像点数の実現はなされていない。

第 2 章においてブラッグ反射鏡導波路におけるスローライト生成の原理について述べ、その本質はカットオフ波長近傍での巨大な構造分散であることを示した。また、それにより偏向角の波長依存性が大きく、僅かな波長変化で大きな偏向角の変化が得られることを示した。この特性を利用して、従来の非機械式ビーム偏向器では実現できなかった高解像点数が、小型スローライトビーム偏向器により実現できる[7]。

本章では、スローライトビーム偏向器の原理について述べるとともに、高解像点数が実現できる仕組みを説明する。また、面発光レーザとビーム偏向器集積化の取り組みとして行った、熱駆動によるオンチップビーム偏向器の実験結果について示す。

5.2 スローライトビーム偏向器集積化のモデリング

ビーム偏向器は図 5.1 に示すように、ビームの角度を変化させることでビームが当たる位置を制御する素子であるが、その性能指標の 1 つに解像点数がある。解像点数 N は最大ビーム偏向角 θ_{rmax} とビームの広がり角 θ_{div} により定義され、 $N = \theta_{rmax}/\theta_{div}$ と表すことができる。つまり解像点数を増加させるには、

- (1) 最大ビーム偏向角を大きくする
- (2) ビームの広がり角を小さくする

以上 2 点が重要である。ブラッグ反射鏡導波路におけるスローライトを利用することで、上記 2 点ともに実現できる。

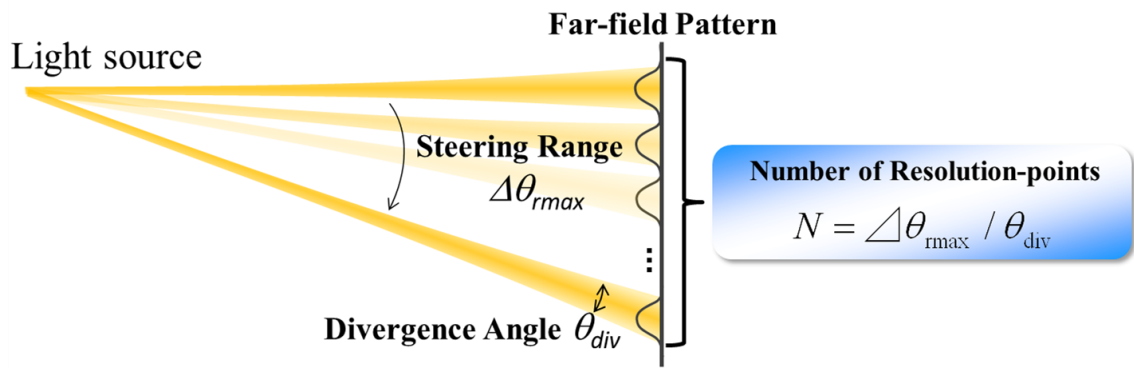


図 5.1 ビーム偏向器の概略図

まず, (1)について説明する. 第 2 章図 2.7 に示したとおり, ブラッグ反射鏡導波路における偏向角(放射角)の波長依存性は大きく, 特にカットオフ波長近傍では顕著である. この本質は, ブラッグ反射鏡導波路におけるカットオフ波長近傍での大きな構造分散であることを説明した. 偏向角は第 2 章式(2.7)で表され, ブラッグ反射鏡導波路を伝搬する光の波長とカットオフ波長との差に大きく依存する. スローライト導波路から放射される光の偏光角が, 入射光の波長に大きく依存する様子を確認するため, フィルムモードマッチング法を用いて計算を行った. 計算モデルは第 2 章図 2.4 と同様であるが, 放射光の様子を確認するために上部 DBR を 20 ペアとし, 放射損失を補償する利得を入力波長毎に仮定している. 図 5.2 はスローライト導波路に対し, 異なる波長を入力した時の放射光の空間的な電界強度分布である. 図に見られる縞模様は波面を表す. 入力光波長の変化に伴い, 偏向角が大きく変化する様子が確認できる. このように, ブラッグ反射鏡導波路におけるスローライトを利用することにより, 30nm 程度の波長変化で 50° を超える大きな偏向角を実現できる.

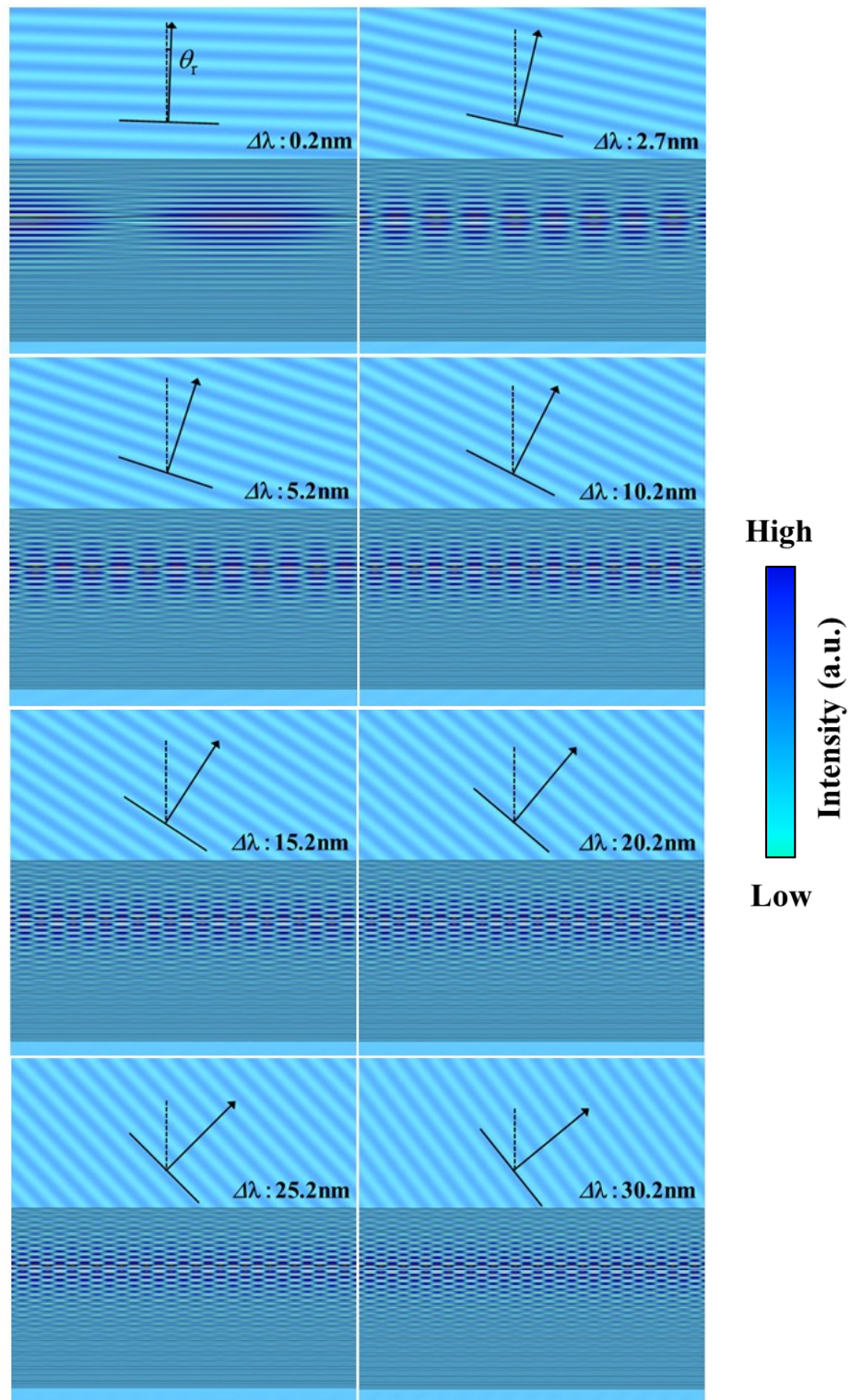


図 5.2 放射光の電界強度分布(入力光波長依存性; $\theta_r = 2.4^\circ \rightarrow 51.8^\circ$)

次に(2)について説明する. ビームの広がり角を小さくするために最も簡単な方法は, 長さ方向に対して光の強度分布を一定に保つことである. 図 5.3 に示すのは, NFP と FFP の関係の模式図であるが, 図に示すステップ関数のように長さ方向に対して強度が一定となるような NFP が得られれば, FFP はそのフーリエ変換で表すことができ, 図に示すようなビームを得ることができる. また, 強度が一定となる距離が長さ方向に対して長ければ長いほど, 生成されるビームはシャープになる. ここで, 第 3 章で扱ったスローライト SOA を仮定すると, 電流注入により損失を補償することで図 5.2 に示すような NFP が得ることができることがわかる. また, SOA のモデリングにおいては高出力を得ることを仮定していたため, 上部 DBR のペア数を減らし, 放射損失が大きくなるような設計を行ったが, ビーム偏向器への応用において大きな出力を必要としない場合は, 上部 DBR のペア数を増加させ, 放射損失を抑制することにより同様の NFP を得ること方法も可能である. このように, 放射光強度をステップ関数に似た形で取り出せるのは, ブラッグ反射鏡導波路におけるスローライトの特徴が故のことであり, 非常に興味深い現象である.

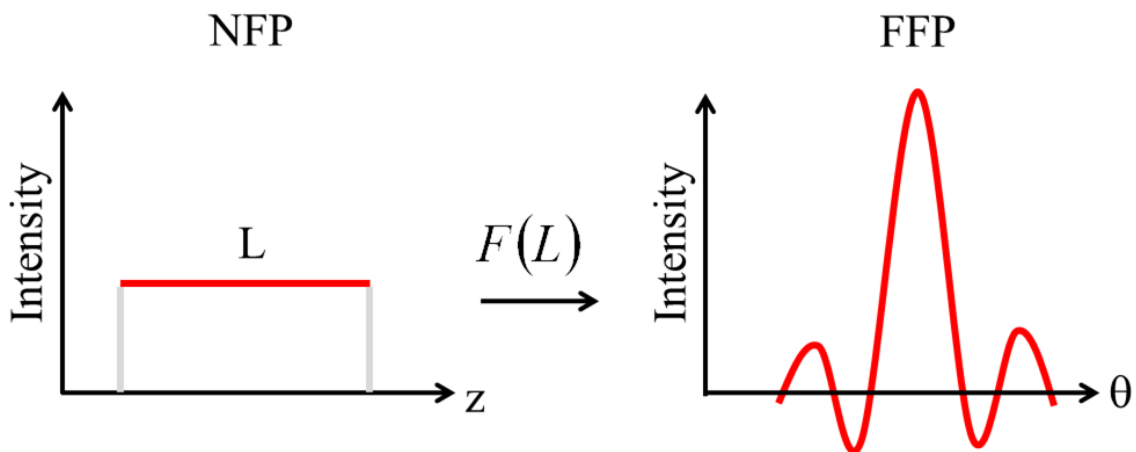


図 5.3 NFP と FFP の関係の模式図 (NFP にはステップ関数を仮定)

スローライトビーム偏向器による解像点数を見積もるため、フィルムモードマッチング法を用いて計算を行った。最大ビーム偏向角は既に第 2 章で示したが、解像点数を計算するためには広がり角を見積もる必要がある。NFP が図 5.3 に示すようなステップ関数形状であると仮定した場合、広がり角は θ_{div} は $\theta_{div} = \lambda/w$ で与えられ、 w は放射光の偏向角を考慮して $w = L \times \cos \theta_r$ である。以下、光は長さ L のスローライトビーム偏向器から放射されるとし、 L をビーム偏向器の長さとして定義する。

図 5.4 はスローライトビーム偏向器の長さに応じたビームの広がり角及び解像点数の計算結果である。また、波長可変幅を 20nm とした。非機械式ビーム偏向器では実現困難である、100 を超える解像点数を 300 μm 以下の小型ビーム偏向器により得られる可能性が示されている。また実用レベルで必要とされる 1000 を解像点数も 3mm 以下のデバイス長で実現できる可能性が示されている。

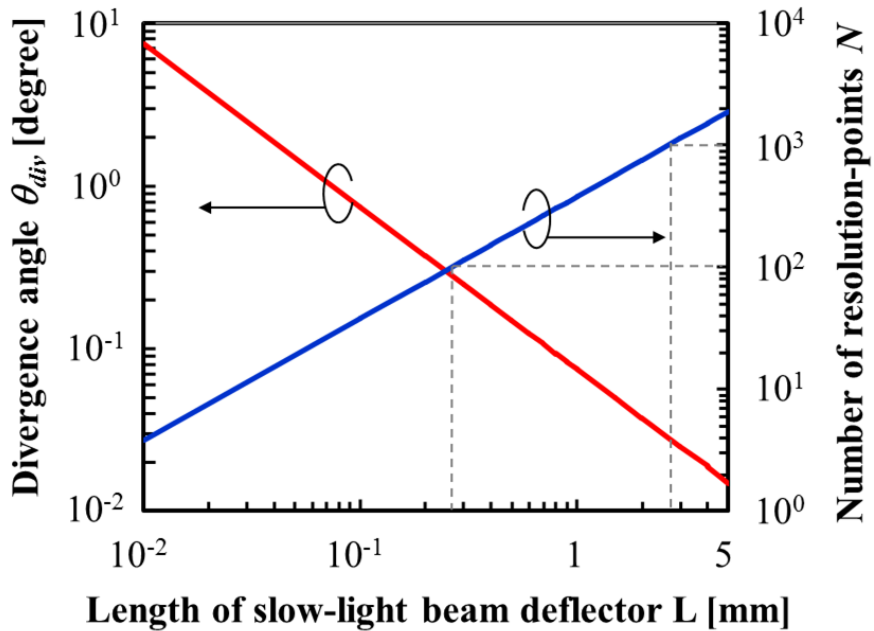


図 5.4 ビーム偏向器の長さに応じたビームの広がり角及び解像点数
(20nm の波長可変幅を仮定)

このようにスローライトビーム偏向器により、大きな解像点数が実現できるわけであるが、課題はその光源にある。スローライトビーム偏向器もその他のスローライトデバイスと同様に、外部光源を用いた斜め入射法によりデバイスにスローライトモードを励振しており、光源との集積化が望ましい。光源との集積化を考えた場合、波長可変光源が必要となるがこの点については第 6 章にて扱う。

5.3 ビーム偏向器の製作及び特性評価

5.2 節で述べたように、スローライトビーム偏向器と光源デバイスとの集積化が望ましい。大きな偏向角を実現する光源デバイスとの集積化には様々な克服すべき課題が存在し容易ではない。そこで、これまで述べてきた集積デバイスを応用し、熱光学効果を基礎としたビーム偏向器の実証に取り組んだ。本節では、熱駆動オンチップビーム偏向器の動作原理及びその構造について説明するとともに、製作したビーム偏向器修正デバイスの実験結果について述べる。

5.3.1 動作原理

本章で扱うビーム偏向器は熱光学効果を基本原理として動作する。第 2 章式(2.7)より、ビームを偏向するには

- (1) ビーム偏向器へ入射する光の波長＝面発光レーザの発振波長を変化させる
- (2) ビーム偏向器のカットオフ波長を変化させる

以上 2 つの方法が考えられる。図 5.5 は上記それぞれの場合におけるビーム偏向方法を示した模式図である。具体的に(1)の場合は、面発光レーザへの注入電流量を増加させることに

による発振波長の長波長化を利用する. これによりビームは放射角が小さくなる方向に動く. 一方, (2)の場合は集積デバイスの表面にヒーター電流を流すことによる, ビーム偏向器のカットオフ波長の長波長化を利用する. これによりビームは放射角が大きくなる方向に動く.

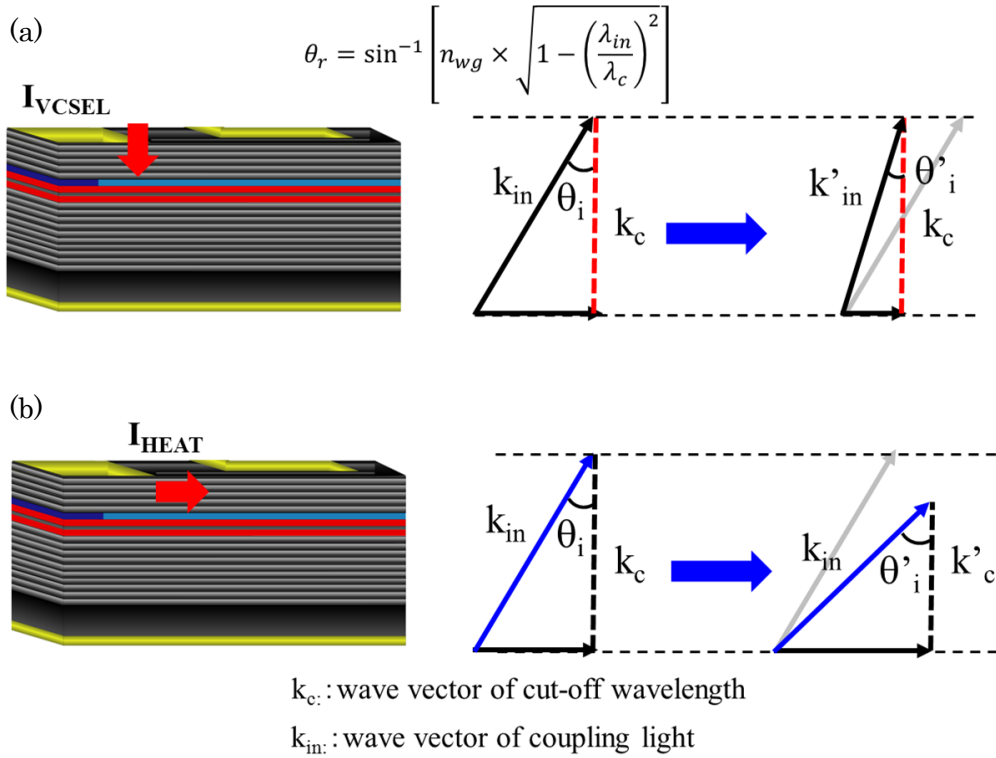


図 5.5 熱駆動オンチップビーム偏向器の動作原理

(a) ビーム偏向器への入射波長の制御, (b) ビーム偏向器のカットオフ波長の制御

5.3.2 デバイス構造

オンチップビーム偏向器の構造を図 5.6 に示す. 基本的な構造は第 2 章～第 4 章までで扱った集積デバイスと同様である. 上部 DBR のペア数は 25 ペア, 面発光レーザの利得領域は $12\mu\text{m} \times 12\mu\text{m}$ であり, エタロン波長と PL ピーク波長間のオフセット波長は 30nm である. オンチップビーム偏向器におけるヒーター電流の本質は, 両デバイス間の漏れ電流であるため, イオン注入によるアイソレーションは施されていない. また, 熱によるチューニングの効率を向上

させるため、面発光レーザとビーム偏向器の一部は ICP エッチングが施されており、両デバイス間の距離は $40\mu\text{m}$ である。面発光レーザ表面は Au で覆われており、垂直方向成分は抑制される。

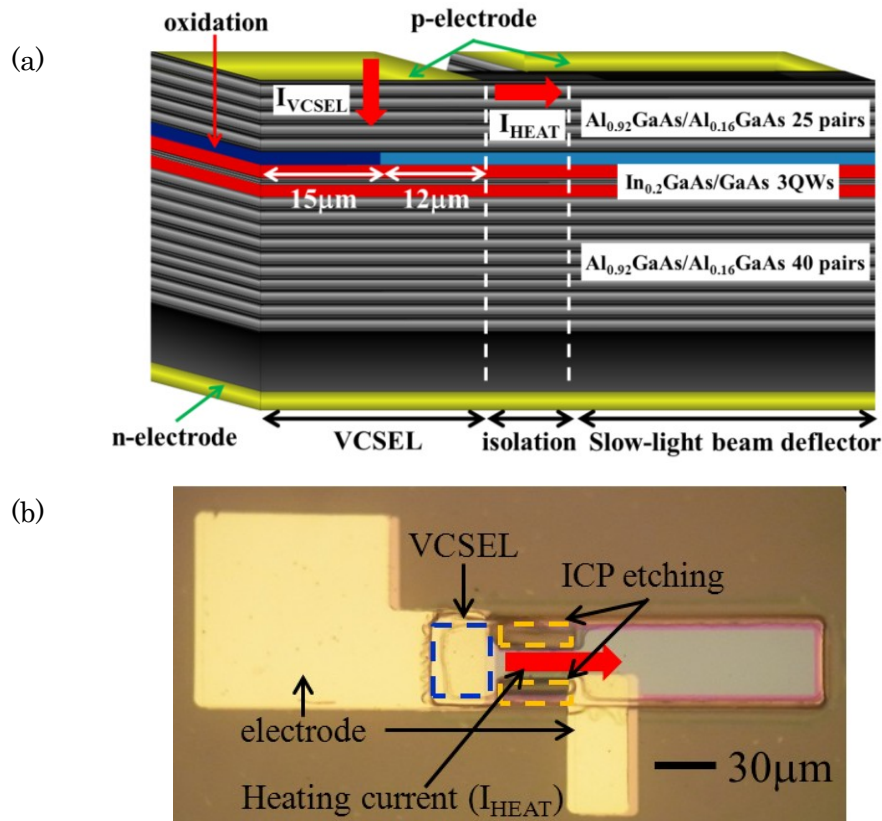


図 5.5 (a) 熱駆動オンチップビーム偏向器の構造,
(b) 製作したデバイスのレーザ顕微鏡画像

5.3.3 偏向特性

まず、面発光レーザの I - L - V 特性及びスペクトル特性を測定した(図 5.6). しきい値が 5.6mA と大きいのが、これは利得領域が大きいことに加え、第 4 章で説明したように面発光レーザ上部の Au ミラーでの過剰損失のためと考えられる。また、イオン注入によるアイソレーションが施されていないことも要因の 1 つである。スペクトル特性は注入電流 6.8mA のときのものがあり、シングルモード動作が確認できる。利得領域が大きいにも関わらずシングルモードである

のは、エッチング領域においてモードが選択されているためと考えられる。また、この時の NFP 及び FFP は図 5.7 の通りである。NFP における Position 0 μm は面発光レーザ上部電極の端を示す。面発光レーザからビーム偏向器への横方向光結合が確認できる。また、FFP より偏向角は 2.2° であることが確認でき、カットオフ波長に非常に近いスローライトモードであることがわかる。よって、本集積デバイスにより小さなビーム広がり角の実現は困難と予想される。

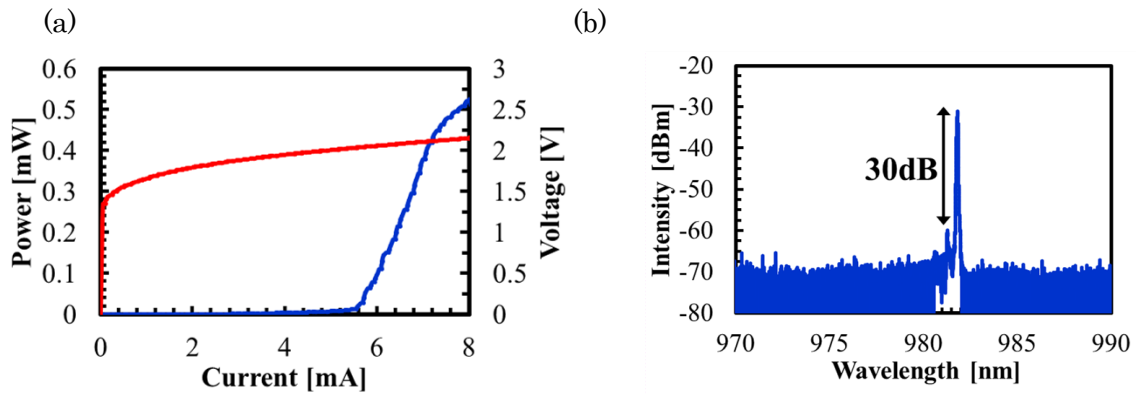


図 5.6 (a) I-L-V 特性
(b) スペクトル特性 (注入電流 : 6.8mA)

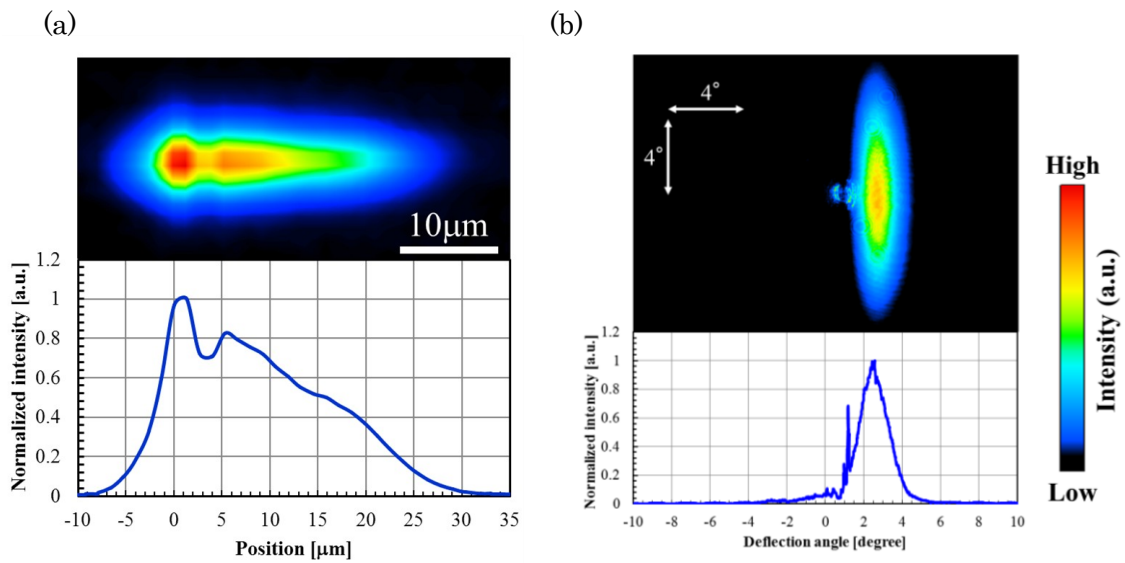


図 5.7 (a) NFP の観察結果, (b) FFP の観察結果
(注入電流 : 6.8mA)

次に、ビーム偏向動作のため 5.3.1 で示した動作原理に基づき FFP の観察を行った。面発光レーザへの注入電流量を変化させる場合は、基準となる注入電流量からの差分をパラメータとして表現した (ΔI_{VCSEL})。一方、ヒーター電流はその値がパラメータとなる (I_{HEAT})。図 5.8 は FFP の測定結果であり、(a)は注入電流による面発光レーザの発振波長を制御した場合のビーム偏向の様子、(b)はヒーター電流によるビーム偏向器のカットオフ波長を制御した場合のビーム偏向の様子を表す。また、(c)は電流制御に応じた偏向角を示している。面発光レーザへの注入電流の増加に伴い、偏向角は小さくなる方向に動き、一方でヒーター電流増加に伴い偏向角は大きくなる方向に動いており、動作原理に従った偏向動作が確認できる。ここで、ヒーター電流制御によるビーム偏向の場合、FFP に多重ピークが確認できる。これは熱によるチューニング効率を高めるために形成した ICP エッチング領域における散乱光との干渉ではないかと考えられる。面発光レーザへの注入電流制御の場合に観察されないのは、大きな広がり角の中に多重ピークが含まれているためと考えられる。チューニング効率を向上のための構造としては、ポストプロセスでメサ幅を狭くするのではなく、当初のメサ幅を狭くしておくことで、エッチング領域がない状態でもチューニング効率を低下させない構造が形成できると考える。後述するが、エッチング領域のない構造において観察されたビーム偏向特性では、多重ピークは確認されていないので、この多重ピークは横方向集積が故の本質的な問題ではなく、構造を変えることにより抑制可能である。

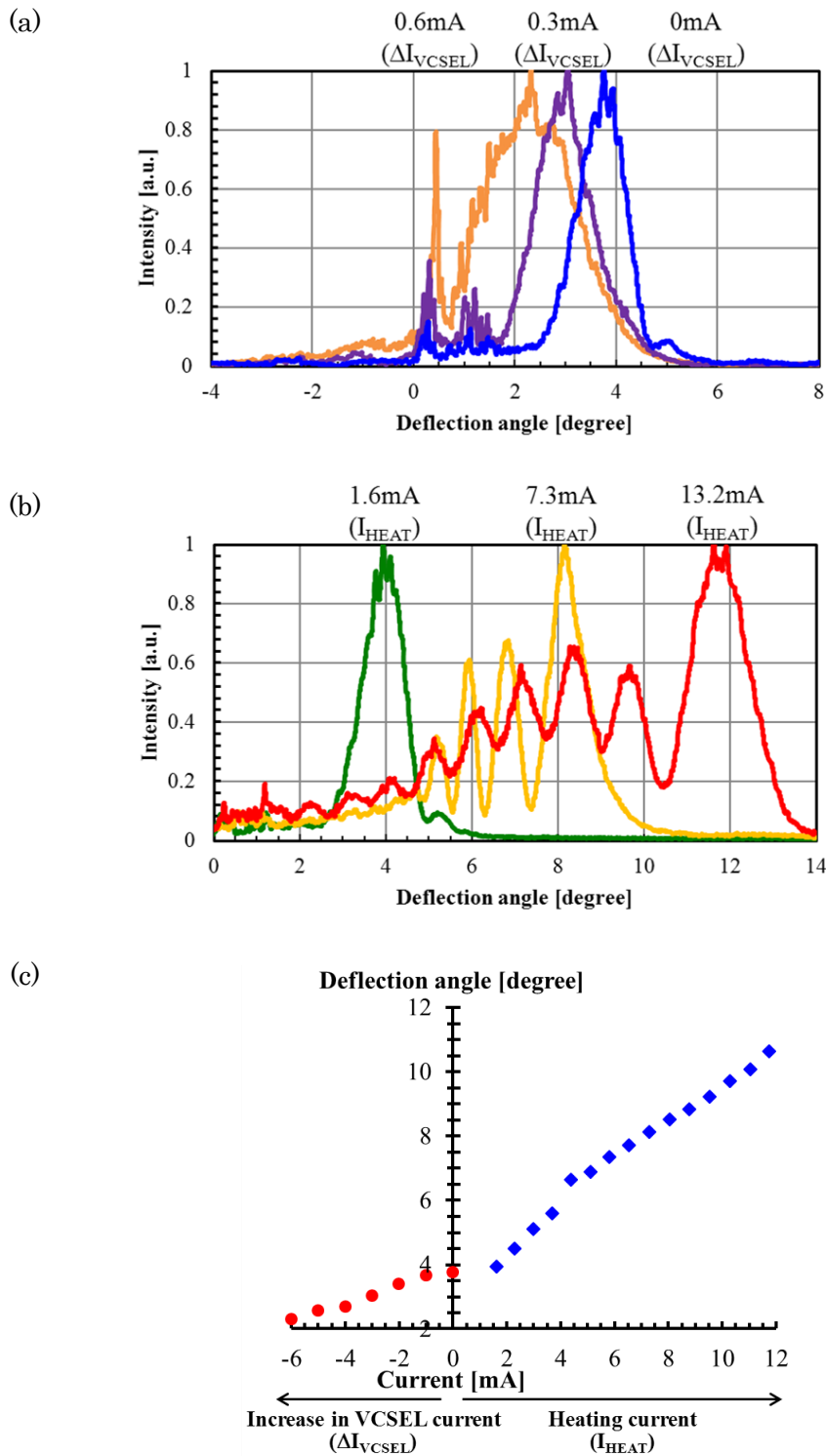


図 5.8 (a) 面発光レーザへの注入電流制御によるビーム偏向
 (b) ヒーター電流制御によるビーム偏向
 (c) 制御電流に応じた偏向角

上述のように、FFP における多重ピークはビーム偏向器に結合したスローライトモードの放射角を観測していることにならないので、FFP におけるメインローブを観測することで、ある制御電流における偏向角と判断できる。図 5.8(c)より、オンチップビーム偏向器により 9° 以上のビーム偏向が得られた。また、制御電流による局部温度変化は約 50K が見積もられた。本集積デバイスにおける解像点数は約 4 であり、解像点数を増加させるにはより大きな偏向角と小さなビーム広がり角が必要である。熱駆動を前提とした場合、温度変化を大きくすることによりビーム偏向角を大きくすることができる。一方、小さなビーム広がり角を実現するには、ビーム偏向器に結合した光の損失補償を行い、伝搬距離を伸ばす必要がある。本集積デバイスの広がり角が大きい理由は、吸収損失及び放射損失により伝搬距離が短いためである。

5.3.4 くびれ構造を持つビーム偏向器の特性

先述のビーム偏向器では、エッチング領域での散乱光による影響で、FFP に多重ピークの存在が確認された。そこで、第 2 章で扱ったくびれ構造を持つ集積デバイスを用いてビーム偏向の実証を試みた。エッチング領域を有しないため、散乱光の影響が排除できる可能性がある。一方、くびれ構造を導入することで、スローライト導波路に結合するモードが選択出来るため、シングルピークの FFP が得られる可能性が高く、伝搬距離が長ければ広がり角の小さいシングルピークの FFP が得られる。

デバイス構造は第 2 章 2.5 節のデバイスと同様である。また、ビーム偏向の動作原理は先述の熱光学効果を用いた熱駆動方式である。ただし、本集積デバイスにはヒーター電流を流すことができなかったため、面発光レーザへの注入電流制御によるビーム偏向動作のみを行った。

図 5.9 は FFP の観測結果であり、面発光レーザへの注入電流は 0.74mA ～ 4mA の範囲で

変化させている。面発光レーザの垂直方向成分が抑制されていないため、注入電流量を増加させることにより、垂直方向成分が支配的になってしまう。しかしながら、垂直方向成分と横方向結合成分は空間的によく分離されている。この時、偏向角は 4.5° 以上、解像点数 9 以上が得られた。また、スペクトルの注入電流依存性を合わせて測定を行うことで、偏向角の波長依存性を見積もることができる。図 5.10 は偏向角の波長依存性であり、フィルムモードマッチング法による計算結果と実験値を比較している。両者の傾向は概ね一致していることがわかる。本集積デバイスに対してヒーター電流を流すことはできなかったが、先述のデバイスと同様の温度変化を与えられたと仮定した場合、解像点数は 20 を超える可能性がある。本集積デバイスの偏向角が 4.5° と先述のそれに比べ小さいにもかかわらず解像点数では多くなった理由は、ビームの広がり角の小ささにある。電流注入による損失補償が可能であれば、ビームの広がり角はより小さくなり、解像点数はさらに増加する可能性がある。

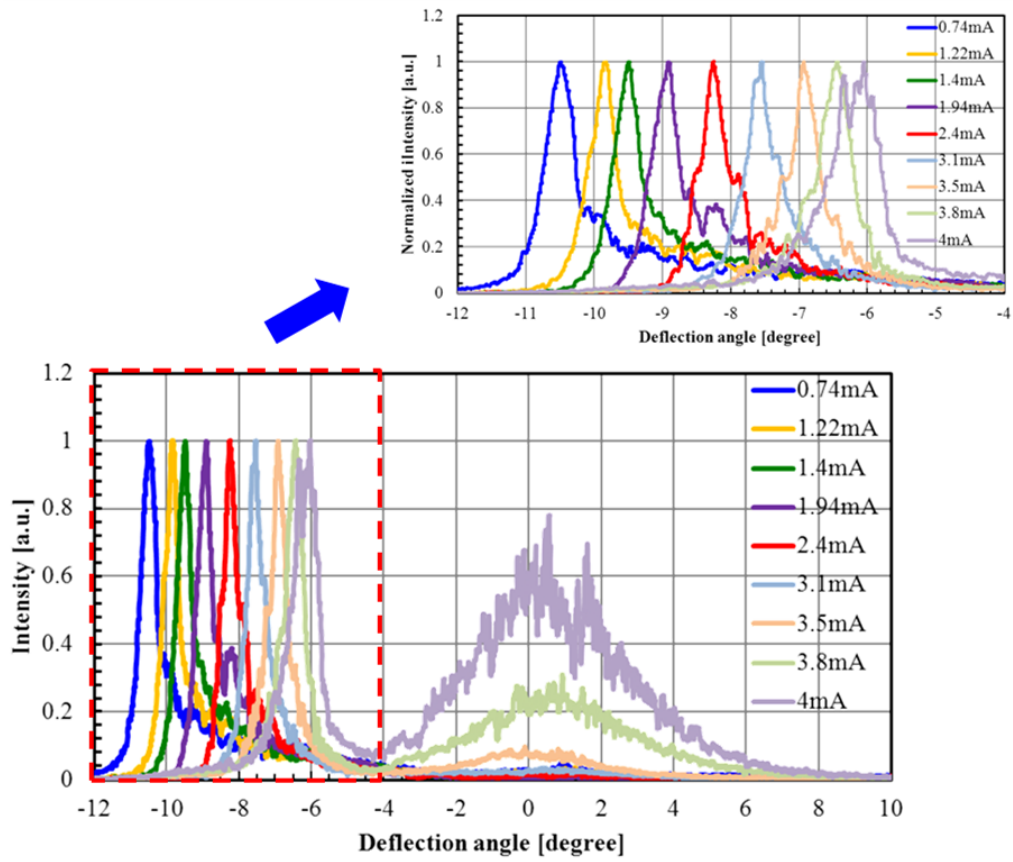


図 5.9 面発光レーザへの注入電流量に応じた FFP

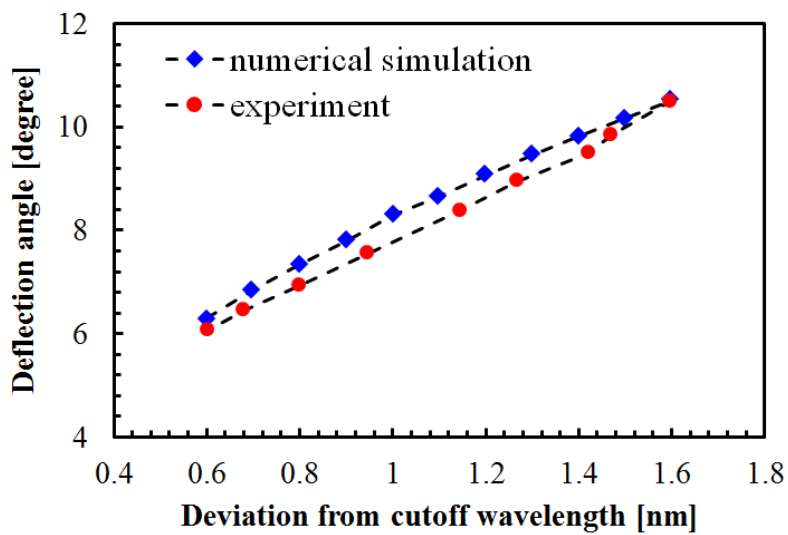


図 5.10 伝搬距離及び温度変化に応じた解像点数

5.4 まとめ

第 5 章ではブラッグ反射鏡導波路におけるスローライトを利用したビーム偏向器について、ビーム偏向の原理及び高解像点数が実現できる仕組みを示した。また、面発光レーザとビーム偏向器集積化の初期実験として、熱光学効果を基礎とした熱駆動オンチップビーム偏向器を製作し、その諸特性について議論した。偏向角 4.5° 以上、解像点数 9 以上が得られ、熱駆動によるオンチップビーム偏向器の実証に成功した。また、さらに大きな温度変化及び導波路損失低減による伝搬距離の増大により、大きな解像点数が得られる可能性がある。

第 5 章参考文献

- [1] J. C. Wyant, "Rotating diffraction grating laser beam scanner," *Appl. Opt.*, **14**, 5, pp. 1057-1058, 1975.
- [2] T. Matsuda, F. Abe, and H. Takahashi, "Laser printer scanning system with a parabolic mirror," *Appl. Opt.*, **17**, 6, pp. 878-884, 1988.
- [3] Y. Sun, D. A. Francis, S. A. Biellak, A. E. Siegman, and C. J. Chang-Hasnain, "Beam steerable semiconductor lasers with large steering range and resolvable spots," *Electron. Lett.*, **30**, 24, pp. 2034-2035, 1994.
- [4] Y. Kurosaka, S. Iwahashi, Y. Liang, K. Sakai, E. Miyai, W. Kunishim D. Ohnishi, and S. Noda, "On-chip beam-steering photonic-crystal lasers," *Nat. Photon.*, **4**, 7, pp. 447-450, 2010.
- [5] D. F. Siriani, and K. D. Choquette, "Electrically controlled two-dimensional steering of in-phase coherently coupled vertical-cavity arrays," *IEEE. Photon. Technol. Lett.*, **23**, 3, pp. 167-169, 2011.
- [6] F. Xiao, W. Hu, and A. Xu, "Optical phased-array beam steering controlled by wavelength," *Appl. Opt.*, **44**, 26, pp. 5429-5433, 2005.
- [7] 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.*, **4**, 5, pp. 1712-1719, 2012.

第 6 章 面発光レーザ横方向集積化の展望

6.1 緒 言

これまで面発光レーザの高性能化・高機能化のため、面発光レーザと機能デバイスの新しい集積手法として、横方向光結合を用いた横方向集積の提案を行い、モデリング及び実験によりその有用性を議論してきた。本章ではこれまで得られた知見を基に、各機能デバイス集積についての展望について議論する。

6.2 スローライト変調器集積デバイスの展望

光インターコネクトで用いられる変調器には高速動作 ($>40\text{Gbit/s}$) と低消費電力動作 ($<10\text{fJ/bit}$) の両立が求められる。従来の EA 変調器では、小型、低消費電力、高速といった特性すべてを満たすことは困難であり、これらに存在するトレードオフの打破が望まれる。それに対し、EA 変調器に対してスローライトを適用するとトレードオフを打破できる可能性がある。本節ではスローライト変調器による高速化、低消費電力化の可能性について議論する。

(1) 高速化

第 4 章では面発光レーザの横方向に集積した変調器の静特性及び動特性について示した。両特性のうち動特性では、小信号応答測定において 3dB 周波数帯域が 4GHz に制限されており、望ましい結果を得ることができなかった。EA 変調器の 3dB 周波数帯域は CR 時定数に

のみ制限される。一般的に、変調帯域の拡大のためには変調器の寄生容量を低減する必要がある[1]。変調器の素子容量を構成するものには、電極パッド部分での寄生容量と p-n 接合部での寄生容量がある。このうち電極パッド部分での寄生容量は p-n 接合部での容量に比べて $< 1/100$ とその影響は大きくはない。よって、帯域を制限する主たる要因は p-n 接合部での寄生容量(C)と考えられる。今回製作したデバイスの変調器領域は $30\mu\text{m} \times 200\mu\text{m}$ であり p-n 接合部領域は非常に大きく、これが変調帯域制限の最大の要因と考えられる。寄生容量は変調器領域の面積を小さくことで低減可能である。例えば、変調器の幅を $30\mu\text{m} \rightarrow 20\mu\text{m}$ 、長さを $200\mu\text{m} \rightarrow 50\mu\text{m}$ にすることで、寄生容量は約 $1/6$ に、更に長さを $25\mu\text{m}$ まで短尺化することで約 $1/12$ にまで低減できると見積もられる。変調器サイズの小型化の可能性は第4章で既に示されており、図 4.18 に示す NFP の観察結果より、等価的な変調器長は $30\mu\text{m}$ 以下であると見積もることができる。また幅方向の短尺化はパターニングにより容易に可能であることから、小型化の見積もりは妥当なものであると考えられる。図 6.1 は小信号応答の実験値、実験値とフィットする $C = 1.2\text{pF}$ での計算値及び変調器サイズ小型化により寄生容量を低下させた時の小信号応答の計算値を示す。周波数応答の帯域の変調器サイズ依存性は顕著であり、変調器の小型化により 50GHz を超える周波数帯域が得られる可能性がある。

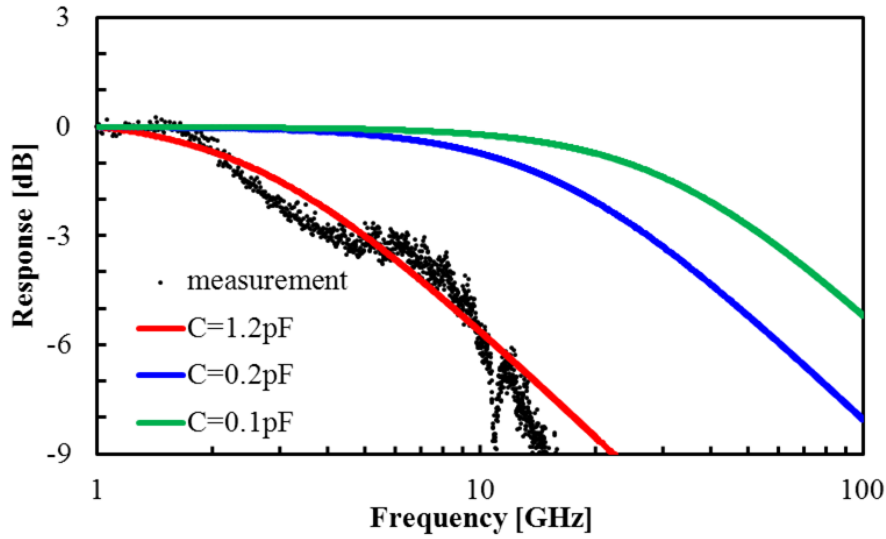


図 6.1 小信号応答の実験値及び計算値 ($C = 1.2\text{pF}$, 0.2pF , 0.1pF)

一方、大信号においては巨大な構造分散は高速動作時に波形劣化を引き起こす原因となる。しかしながら、図 2.5 及び図 4.18 によると、製作した変調器集積デバイスにおける -0.6V 印加時の構造分散及び伝搬距離は、 1300ps/nm/cm 及び $30\mu\text{m}$ であると見積もられ、 40Gbps NRZ 信号を仮定し周波数帯域を 40GHz 、つまり 980nm を中心波長とすると約 0.1nm の線幅を仮定することで、パルス広がり は 0.4ps 以下と見積もることができる。この値は 40Gbps の高速動作においても問題にならない程度の値であると考えられる。白紙的には大きな構造分散は帯域を制限するが、スローライトの効果により伝搬距離が短尺化されるため、広い帯域を確保できると考えられる。よって、デバイスの小型化による周波数帯域の拡大により、高速光変調器実現が期待できる。

(2) 低消費電力化

変調器の消費電力 (E) は変調器の寄生容量 (C) 及び変調電圧 ($V_{\text{on}} - V_{\text{off}}$) として、 $E = C(V_{\text{on}}^2 - V_{\text{off}}^2)/4$ で与えられる[2]。よって変調器の低消費電力化のために重要なパラ

メータは変調電圧である。また、高速化のための寄生容量低減の取り組みは同時に低消費電力化につながる事がわかる。変調器の吸収曲線は量子井戸で決定され、吸収端波長は PL ピーク波長と等価である。一方、レーザの発振波長はウエハのエタロン波長と等価であり、低変調電圧で所望の消光比を得るには両者のオフセット波長が鍵となる。第4章の結果から、オフセット波長 30nm に比べ 25nm の場合の方が低電圧動作が実現できる傾向が視え、この傾向は文献とも一致する[3]。実際には上述の傾向を考慮し、オフセット波長が異なるウエハにより実験的に最適なオフセット波長を見積もる必要がある。

例えば 1V の変調電圧、実験値とのフィッティングで得られた 1.2pF での変調動作を仮定すると、1bit 当たりの消費電力は 300fJ/bit となり許容できない。しかしながら高速変調を仮定する場合は、先述のとおりデバイスの小型化により 0.1pF 程度の寄生容量を仮定する必要がある。これに加えてオフセット波長の最適化により変調電圧を 0.5V まで低減できた場合、1bit 当たりの消費電力は 6.25fJ/bit まで低減できる。既に外部光源を用いた小型スローライト変調器により、変調電圧 0.5V は実証されており[4]、オフセット波長を約 15nm に設計することで実現可能であると見積もられる。この際、デバイスの小型化による変調電圧の増大といったペナルティは想定されない。実際には負荷電力も考慮する必要がある。50Ωの終端抵抗を仮定した場合、負荷電力は 5mW であり、ビットレートに応じた 1bit 当たりの消費電力は図 6.2 のようになる。変調電圧は 1V と 0.5V を仮定した。

以上より、スローライト変調器は小型化と低消費電力化のトレードオフを打開できる有望な変調器であり、従来の変調器では実現が困難であった、小型、低消費電力かつ高速な変調器実現が期待できる。

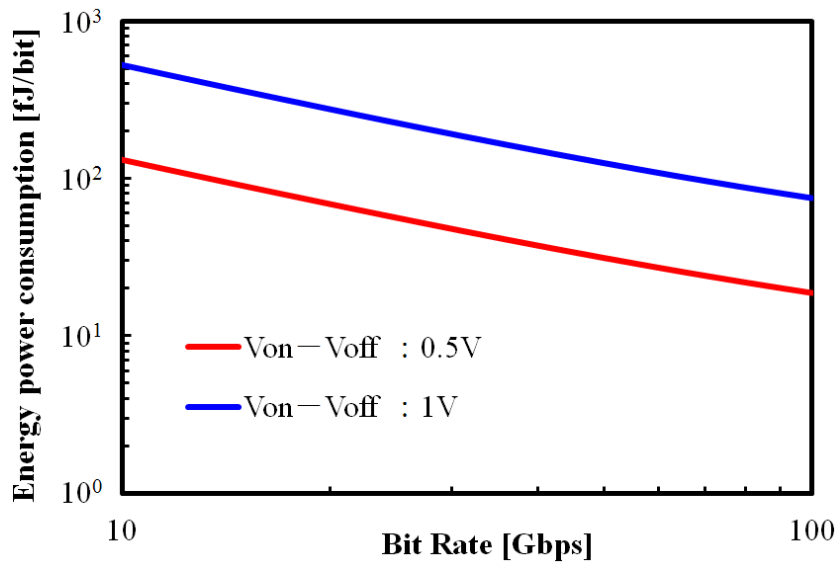


図 6.2 ビットレートに応じた 1bit 当たりの消費電力

6.3 スローライト光増幅器集積デバイス／ビーム偏向器の展望

第 3 章において小型スローライト光増幅器集積デバイスによる、面発光レーザシングルモード出力の高出力化について述べ、第 5 章において熱駆動オンチップビーム偏向器の初期実験の結果について述べた。ビーム偏向器の高性能化(=高解像点数実現)にはスローライト SOA の利用が必要であり、両デバイスは密接に関係しているが、先ず、スローライト SOA による高出力化についてのみ検討する。

第 3 章のモデリングではスローライト SOA の長さは $50\mu\text{m}$ に制限し、小型スローライト増幅器集積による高出力化の検討を行った。 $50\mu\text{m}$ という小型スローライト SOA 集積により、これまで報告されているシングルモード出力と同程度の出力が得られることを示し、構造が簡易であることからその有効性を主張した。一方、スローライト導波路における損失を補償しながら放射光を取り出す方法では、SOA の長さを長尺化することにより、さらに大きな出力を得ることができ

る. 図 6.3 は SOA 長を変化させた時の飽和特性であり, 面発光レーザに $100\mu\text{m}$ のスローライト SOA を集積することにより, 10mW を超えるシングルモード出力が得られる可能性が示されており, これまでの報告でのシングルモード出力の限界打破が期待される

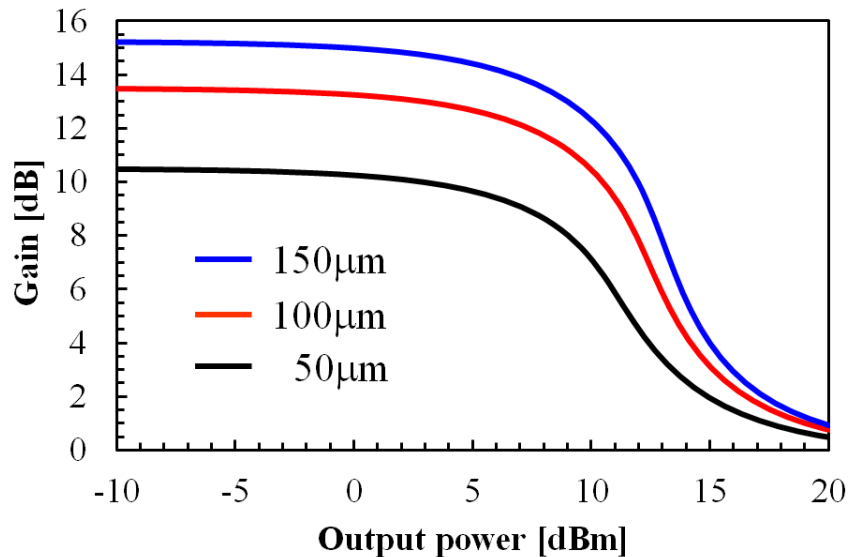


図 6.3 スローライト SOA の飽和特性 (SOA 長依存性)

一方, ビーム偏向器についての高性能化については解像点数が鍵となる. 第 5 章で述べたように, 非機械式ビーム偏向器において 100 を超える解像点数を得ることは困難であり, この値が高性能ビーム偏向器の 1 つの指標となる. 第 5 章で扱った熱駆動オンチップビーム偏向器による解像点数増大は,

1. 更なる温度変化を仮定する
2. 広がり角の小さいビームを生成する

以上 2 点の組み合わせにより可能であると考えられる. 今回は初期実験として, 両デバイス間の漏れ電流をヒーター電流として利用することで, 熱駆動によるビーム偏向を行ったが, より大きな温度変化を仮定する場合は, ヒーターを集積するまたは電流注入を行う必要があると考ええる. 一方, 広がり角の小さいビームを生成するには, 放射光強度の減衰を抑制する必要がある

ある。そのためには、上部 DBR のペア数を増加させることにより放射損失を低減させる、電流注入により損失を補償するまたはそれらの組み合わせである。広がり角の小さいビーム得るとともに高出力が必要である場合は、スローライト SOA の設計方針が適用される。図 6.4 は温度変化及び伝搬距離の変化に応じた解像点数であり、第 5 章の実験結果に相当する部分を黒丸で示している。以上より、400 μm 以下のビーム偏向器により 100 を超える解像点数実現の可能性がある。また、応答速度に関しては 10kHz 以下が見積もられる[5]。

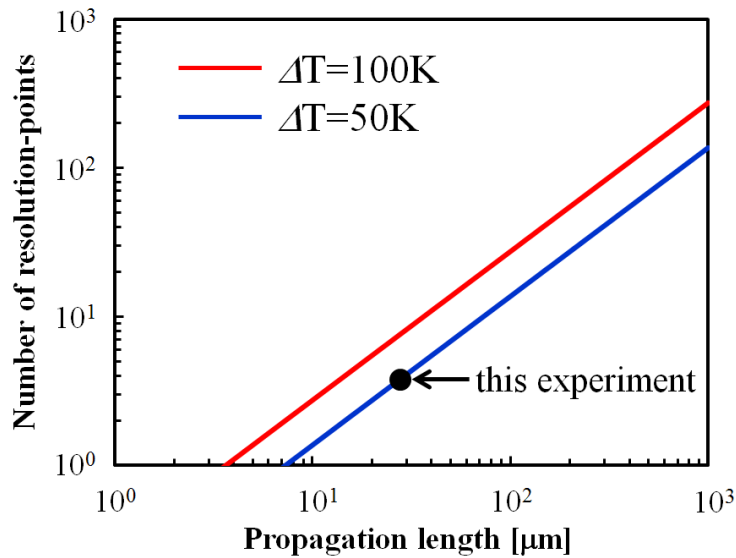


図 6.4 伝搬距離及び温度変化に応じた解像点数

また、更なる高速化及び解像点数の増大を実現するための方法として、MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) VCSEL を光源として用いる方法がある[6]。図 6.5 は集積構造の概略図である。広がり角の小さなビームを生成する方法は上述と同様であるが、MEMS VCSEL を光源として利用することにより、30°以上の大きな偏向角を得ることができ、1mm 以下のビーム偏向器により 300 を超える解像点数実現の可能性がある。MEMS VCSEL は非機械式の素子ではないが、チューニング速度は数百 kHz であり、ポリゴンミラーを用いたビーム偏向器のそれに比べ 100 倍の速度である。よって、従来の機械式のビーム偏

向器におけるサイズや速度に関する欠点を有しない、機械式ビーム偏向器であると言える。解像点数及び動作速度を考慮すると、光干渉断層計(OCT:Optical Coherence Tomography)への応用も可能となると見積もられる。

伝搬損失を低減することによる広がり角の小さいビームの生成, MEMS VCSELとの集積化による大きな偏向角の実現など, 様々な技術を組み合わせることにより, 高解像点数オンチップビーム偏向器の実現が期待できる。

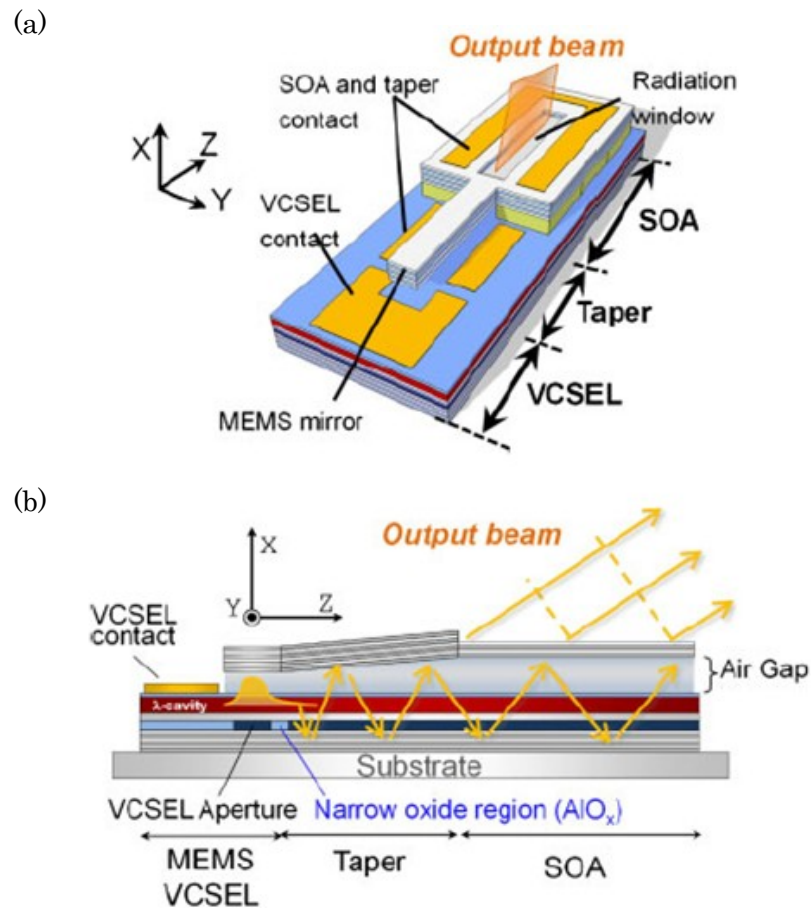


図 6.5 MEMS VCSEL とスローライト SOA 集積によるビーム偏向器

(a) 俯瞰図, (b) 断面図

6.4 まとめ

本章では面発光レーザに集積する各機能デバイスの高性能化に焦点を当てて議論を行った. スローライト変調器について, 寄生容量の低減による高速化 ($>40\text{Gbps}$) の可能性を示すとともに, 低消費電力動作 ($<10\text{fJ/bit}$) との両立の可能性を示した. スローライト光増幅器集積について, SOA 長の長尺化による 10mW を超えるシングルモード出力の可能性を示した. また, ビーム偏向器集積について, あらゆる技術を組み合わせることにより, 数百を超える解像点数実現の可能性を示した.

第 6 章参考文献

- [1] R. Olshansky, P. Hill, V. Lanzisera, and W. Powazinik, “Frequency response of 1.3 μ m InGaAsP high speed semiconductor lasers,” *IEEE. J. Sel. Quantum. Electron.*, **QE-23**, 9, pp. 1410-1418, 1987.
- [2] D. A. B. Miller, “Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips,” *Proc. IEEE.*, **97**, 7, pp. 1166-1185 , 2009.
- [3] A. Stöhr, O. Humbach, S. Zumkley, G. Wingen, G. David, D. Jäger, B. Bollig, E. C. Larkins, and J. D. Ralston, “InGaAs/GaAs multiple-quantum-well modulators and switches,” *Optical and Quantum Electron.*, **25**, 12, pp. S865-S883, 1993.
- [4] X. Gu, T. Shimada, A. Matsutani, and F. Koyama, “35- μ m Bragg Reflector Waveguide Modulator for High-Speed and Energy-Saving Operation,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **25**, 8, pp. 1766-1769, 2013.
- [5] T. Amano, T. Hino, F. Koyama, M. Arai, and A. Matsutani, “A Thermally Tunable GaAlAs-GaAs Micromachined Optical Filter With Submillisecond Tuning Speed,” *IEEE. Photon. Techonol. Lett.*, **16**, 6, pp. 1501-1503, 2004.
- [6] M. Nakahama, X. Gu, T. Shimada, and F. koyama, “On-Chip High-Resolution Beam Scanner Based on Bragg Reflector Slow-Light Waveguide Amplifier and Tunable Micro-Electro-Mechanical System Vertical Cavity Surface Emitting Laser,” *Jpn. J. Appl. Phys., Part 1* **51**, pp. 040208-1-3, 2012.

第7章 結 論

本研究では面発光レーザの高出力化、高速化及び高機能化の観点から予想される面発光レーザ単体での性能限界を打破すべく、面発光レーザとスローライトデバイスの集積化による面発光レーザの高性能化・高機能化を目的とし、面発光レーザとスローライトデバイスの新しい集積手法を提案するとともに、集積化により得られる特性を理論及び実験の両面から検討してきた。

各種機能デバイス集積化の取り組みにより得られた成果を以下に示す。

1. 面発光レーザとスローライトデバイスの新しい集積手法の提案

横方向光結合を用いた面発光レーザとスローライトデバイスの横方向集積手法を提案し、提案構造により 50%以上の高い結合効率が得られることを示した。また、しきい値上昇を生む過剰損失は十分に小さいことを確認している。この結合効率は通常的面発光レーザの外部微分量子効率に相当するので、提案構造が面発光レーザとスローライトデバイスの集積化に対して有効であると言える。また、集積デバイスの製作技術として、面発光レーザとスローライトデバイス間にイオン注入を施すことにより、両デバイス間の電氣的アイソレーション確保に成功した。

2. 面発光レーザからスローライト導波路への横方向光結合の実証

モデリングの結果を基にスローライト導波路集積デバイスを製作し、面発光レーザにより励振されたスローライトモードが、スローライト導波路に直接結合することを確認した。また、くびれ

構造を導入することにより面発光レーザからスローライト導波路に結合するモードを選択できることを示した.

3. 面発光レーザと各種機能デバイス集積の設計及び高性能化の検討

(1) スローライト SOA の集積

面発光レーザの横方向に $50\mu\text{m}$ の小型 SOA を集積することにより, 従来の面発光レーザのシングルモード出力の数倍の出力 ($> 7\text{mW}$) が得られる可能性を示すとともに, SOA の長尺化により 10mW 以上のシングルモード出力が得られる可能性を示した.

(2) スローライト変調器の集積

面発光レーザの横方向に $50\mu\text{m}$ の小型光変調器を集積することにより, 挿入損失 2dB 以下で, 消光比 5dB 以上の外部光変調の可能性を示した.

(3) ビーム偏向器の集積

$400\mu\text{m}$ 以下の熱駆動オンチップビーム偏向器により, 100 を超える解像点数が得られる可能性を示した. これは非機械式かつ光源を集積したビーム偏向器としては非常の多い解像点数である.

4. スローライト SOA 集積による面発光レーザ出力向上の実証

面発光レーザの横方向にスローライト SOA を集積することにより, 最大出力 6mW 及び 7dB 以上の微分量子効率の向上を実証した. アイソレーション領域の短尺化及び上部 DBR のペア数を減少させることに加え, 導波路幅を狭くすることにより電流注入の効率を上げることで更なる出力の向上が見込まれる.

5. 小型スローライト変調器による外部光変調の実証

面発光レーザの横方向に集積したスローライト変調器により、変調電圧 1.4V 以下で、15dB 以上の消光比の外部光変調を実証した。また、等価的な変調器長は 30 μm 以下であり、面発光レーザに小型光変調器を集積することに成功した。エピウエハのエタロン波長と PL ピーク波長間のオフセット波長の設計により、変調電圧を小さくすることが可能であり、変調器の小型化と組み合わせることにより、小型、低消費電力かつ高速な変調器実現が見込まれる。

6. 熱駆動によるオンチップビーム偏向の実証

面発光レーザとビーム偏向器集積化の初期実験として、熱光学効果を基礎とした熱駆動オンチップビーム偏向器を製作し、偏向角 4.5°以上、解像点数 9 以上を得た。ヒータ集積による温度変化量の増加及び導波路損失を低減する構造を適用することにより解像点数増大が見込まれる。

本研究を通じて、面発光レーザとスローライト光増幅器、光変調器及びビーム偏向器の集積化が実現可能であることを示した。本研究で扱った機能デバイス以外にも、光スイッチやフォトディテクターとの集積など、面発光レーザを基盤とした様々な機能デバイスとの集積化が見込まれる。また、本集積手法は本質的に波長帯を選ばないので、様々な波長帯の面発光レーザ高性能化・高機能化に寄与すると考えられる。

本研究の進展により、面発光レーザフォトリクスに新たな展開が期待できるとともに、スローライトフォトリクスを基盤とした、超小型光回路実現の可能性が期待できる。

本研究に関する発表

1 学術論文誌

- 1) Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, and Fumio. Koyama, “Compact Beam Deflector Based on Slow-Light Bragg Reflector Waveguide Monolithically Integrated with VCSEL,” IEICE Electronics Express., vol. 5, no. 22, pp. 1-7, Nov. 2013.
- 2) Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, and Fumio. Koyama, “Compact Slow-Light Electro-Absorption Modulator Laterally Integrated with 980 nm Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser,” Applied Physics Express., vol. 6, no. 12, pp. 122102-1-4, Dec, 2013.
- 3) Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, and Fumio. Koyama, “Lateral Integration of Vertical Cavity Surface Emitting Laser and Slow Light Bragg Reflector Waveguide Devices,” Applied Optics., in press, Feb. 2014.

2 国際会議

- 1) Toshikazu Shimada, and Fumio. Koyama, “Lateral Integration of VCSEL with Slow Light Amplifier/Modulator,” IEEE Photonics Society 23rd Annual Meeting, IEEE2010, TuQ4, Denver, USA, Nov. 2010.
- 2) Toshikazu Shimada, and Fumio. Koyama, “Lateral Integration of VCSEL and Slow Light Amplifier,” 16th Opto-Electronics and Communications Conference,

OECC2011, 6D2-3, Kaohsiung, Taiwan, Jul. 2011.

3) Toshikazu Shimada, and Fumio. Koyama, “Lateral Integration of VCSEL and Slow Light Modulator,” International Nano-Optoelectronics Workshop, iNOW2011, P-10, St. Petersburg (Russia) and Würzburg (Germany), Jul. 2011.

4) Toshikazu Shimada, Ayumi Fuchida, and Fumio. Koyama, “Lateral Integration of VCSEL and Slow Light Modulator,” 37th EUROPEAN CONFERENCE AND EXHIBITION ON OPTICAL COMMUNICATION, ECOC2011, We.10.P1.36, Geneva, Switzerland, Sep. 2011.

5) Toshikazu Shimada, and Fumio. Koyama, “SLOW LIGHT AMPLIFIER LATERALLY INTEGRATED WITH VCSEL,” 17th Microoptics Conference, MOC'11, C-5, Sendai, Japan, Oct. 2011.

6) Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, and Fumio. Koyama, “On-Chip Electro-Thermal Beam Steering based on Slow-light Bragg Reflector Waveguide Laterally Integrated with VCSEL,” IEEE PHOTONICS CONFERENCE 2012, IPC2012, TuF2, Sep. 2012.

7) Toshikazu Shimada, Akihiro Matsutani, and Fumio. Koyama, “On-Chip Electro-Thermal Beam Steering based on Slow-light Bragg Reflector Waveguide Laterally Integrated with VCSEL,” 2013 Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim CLEO-PR, WK-2-5, Jul. 2013.

3 国内学会・研究会

- 1) 島田敏和, 小山二三夫. "横方向結合を用いた面発光レーザとスローライト光変調器集積化の検討," 電子情報通信学会エレクトロニクスソサイエティ大会, C-3-73, 新潟大学, 2009 年 9 月.
- 2) 島田敏和, 小山二三夫. "横方向結合を用いた面発光レーザとスローライト光変調器集積化の検討Ⅱ," 電子情報通信学会総合大会, C-3-67, 東北大学, 2010 年 3 月.
- 3) 島田敏和, 小山二三夫. "面発光レーザとスローライト光デバイスの新しい集積構造の提案," 光エレクトロニクス研究会, 信学技報, pp. 131-134, 千歳アルカディアプラザ, 2010 年 8 月.
- 4) 島田敏和, 小山二三夫. "横方向結合を用いた面発光レーザとスローライト SOA 集積化の検討," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-40, 大阪大学, 2010 年 9 月.
- 5) 島田敏和, 小山二三夫. "面発光レーザからスローライト導波路への横方向光結合," 電子情報通信学会総合大会, C-3-42, 東京都市大学, 2011 年 3 月.
- 6) 島田 敏和, 小山 二三夫. "面発光レーザとスローライト光変調器の横方向集積," 第 72 回応用物理学会学術講演会, 1a-ZL-4, 山形大学, 2011 年 8 月.
- 7) 島田敏和, 小山二三夫. "面発光レーザとスローライト光増幅器の横方向集積," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, C-3-89, 北海道大学, 2011 年 9 月.
- 8) 島田敏和, 小山二三夫. "VCSEL の横方向に集積したスローライト光変調器の動作特性," レーザ・量子エレクトロニクス研究会, 信学技報, pp. 7-10, 機械振興会館, 2011 年 12 月.
- 9) 島田 敏和, 松谷 晃宏, 小山 二三夫. "VCSEL とスローライト導波路の横方向集積によるオンチップビーム偏向," 第 73 回応用物理学会学術講演会, 12a-C6-4, 松山大学, 2012 年 9 月.

- 10) 島田敏和, 松谷 晃宏, 小山二三夫. "面発光レーザとスローライト変調器の横方向集積ーイオン注入プロセス導入によるアイソレーションの改善ー," 電子情報通信学会総合大会, C-3-18, 岐阜大学, 2013 年 3 月.
- 11) 島田敏和, 松谷 晃宏, 小山二三夫. "面発光レーザとスローライトデバイスの結合効率改善の検討," C-3-54, 福岡工業大学, 2013 年 9 月.

4 特 許

- 1) 特願 2010-187242 面発光型半導体レーザおよび光伝送装置(小山二三夫, Hamed Dalir, 島田敏和)

謝 辞

本研究を進めるに当たりご指導を賜った指導教員小山二三夫教授に深く感謝致します。また、輪講等で有益な助言を頂いた植之原裕行教授、宮本智之准教授、実験を進めるに当たりお世話になった坂口孝浩助教、松谷晃宏技官に感謝致します。

研究を進める上でお世話になった諸先輩方に感謝致します。また、学生の中で 1 人だけ社会人である私に対し、通常の学生と同様に接してくれた同期の皆さんに感謝致します。さらに、5 年間の在学中にお世話になった研究室の学生の皆さんに感謝致します。

秘書の伊藤節子氏、吉田ひろみ氏、千葉とみ江氏、苔口祥子氏に深く感謝致します。研究生活を暖かくサポートしていただき、書類上の不備等があった時もいつでも快くご対応頂きました。

本研修の機会を与えて下さった、陸上幕僚監部関係各位に感謝致します。組織外に出ること、内部にいては経験できない多くのことを経験し、学ぶことが出来ました。

本研究は以上の方々のほか、数多くの方々の御指導と御協力により達成されたものであり、ここに謹んで感謝の意を表します。

最後に、北海道の地から常に気遣ってくれた父と弟、自身の仕事が忙しいにもかかわらず、日常生活の様々な場面でサポートしてくれ、如何なる時も味方でいてくれた妻と心を癒してくれた愛猫のクゥに感謝する。また、天国から見守ってくれている母に感謝する。