



Title	グレーティング素子と量子井戸レーザを用いたモノリシック光集積デバイスに関する研究
Author(s)	上向井, 正裕
Citation	大阪大学, 1999, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.11501/3155408
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

グレーティング素子と量子井戸レーザを用いた
モノリシック光集積デバイスに関する研究

1999 年 3 月

上 向 井 正 裕

グレーティング素子と量子井戸レーザを用いた
モノリシック光集積デバイスに関する研究

1999 年 3 月

上 向 井 正 裕

内容梗概

本論文は、著者が大阪大学大学院工学研究科電子工学専攻博士課程に在学中、集積電子システム工学講座集積光電子工学領域(西原研究室)において行った“グレーティング素子と量子井戸レーザを用いたモノリシック光集積デバイスに関する研究”をまとめたもので、4章から構成されている。以下、その各章について内容の梗概を述べる。

第1章 序論

光集積デバイスと集積化技術の現状を概観する。グレーティング素子および量子井戸レーザの基本特性について述べ、グレーティング素子と量子井戸レーザを用いたモノリシック光集積デバイスが超小型軽量、高性能光集積デバイスの有力な候補であることを示す。さらにモノリシック集積化の問題点を指摘した上で、本研究の目的と課題を明らかにする。

第2章 モノリシック光集積センサ

高機能モノリシック光集積デバイスとして光集積位置/変位センサと光集積ディスクピックアップを取り上げ、その理論的・実験的検討を通じてモノリシック光集積デバイス実現の可能性と問題点を明らかにする。それぞれのデバイス構成、動作原理を述べ、分布屈折率分離閉じ込め導波路におけるグレーティング素子の設計、特に集光グレーティングカップラ的设计を中心に行う。さらに微細周期グレーティング素子作製技術、量子井戸無秩序化による受動導波路吸収損失低減技術を用いて実際に光集積デバイスを作製し、そのセンサ特性を評価するとともに性能改善の検討を行う。

第3章 グレーティング結合器集積化半導体レーザ

新規モノリシック光集積デバイスとして、1度のエピタキシャル成長で作製でき平行ビームを出射するグレーティング結合器集積化高出力半導体レーザを提案する。デバイスを構成する各素子の設計、特に理論シミュレーションによるパワー

増幅器の性能予測を行い、波面歪補正機能を付加したグレーティング出力結合器の設計について述べる。微細周期グレーティング作製技術とともに電極形成、リッジ構造形成、実装などのデバイス作製技術を確立し、これらを用いてデバイスを作製、評価する。さらにその結果を検討し、モノリシック集積化の問題点を明らかにする。

第 4 章 結 論

本研究で得られた成果を総括し、今後の課題を明らかにする。

グレーティング素子と量子井戸レーザを用いたモノリシック光集積デバイス に関する研究

目 次

第 1 章	序論	1
1.1	光集積デバイス研究の背景	1
1.2	モノリシック集積化の問題点	2
1.3	本研究の目的と課題	4
1.4	本論文の構成	7
第 2 章	モノリシック光集積センサ	9
2.1	緒言	9
2.2	モノリシック光集積センサの動作原理	10
2.2.1	モノリシック光集積位置/変位センサ	10
2.2.2	モノリシック光集積ディスクピックアップ	11
2.3	分布屈折率分離閉じ込め導波路グレーティング素子の設計	12
2.3.1	導波モードおよび放射モード	13
2.3.2	集光グレーティングカップラ	15
2.3.3	グレーティングビームスプリッタ	21
2.3.4	ブラッグ反射器	23
2.4	デバイス作製	24
2.5	光学実験	34
2.5.1	モノリシック光集積位置/変位センサ	34
2.5.2	モノリシック光集積ディスクピックアップ	38
2.6	結言	40

第 3 章	グレーティング結合器集積化高出力半導体レーザ	41
3.1	緒言	41
3.2	デバイス構成	42
3.3	各素子の設計	44
3.3.1	曲線 DBR 発振器 (MO)	44
3.3.2	テーパ型パワー増幅器 (PA)	48
3.3.3	グレーティング出力結合器 (GO)	54
3.4	デバイス作製	55
3.5	実験結果	61
3.5.1	発振器 (MO) の特性	61
3.5.2	出力光のパワーとスペクトル	62
3.5.3	近視野像	64
3.5.4	遠視野像	65
3.6	結言	66
第 4 章	結論	67
	謝辞	70
	参考文献	71
	関連発表文献	77

第 1 章 序論

1.1 光集積デバイス研究の背景

光通信、光情報処理システムの発展、実用化にともない、小型で取り扱い易い光学系が望まれ、バルクの光学部品をそのまま小型にする光学技術が発達した。これは微小光学技術(マイクロオプティクス)と呼ばれるもので、その適用分野・用途も各種計測や民生機器などに拡大されつつある。これらの個別部品自身はほぼ満足できる性能を持つようになったが、相互に接続する際の光軸調整や位置合わせが面倒であり、調整後の固定も安定性に欠けるなど組立て(アセンブリング)が困難であるという問題が依然として残る。そこでより安定で小型・軽量化が図れる光学系として、光集積デバイスが多くの光技術者の関心を引くようになった。

光集積デバイス[1]とは、基板表面に屈折率のわずかに高い部分を作って光導波路とし、これに半導体レーザなどの光源、スイッチ・変調器などの受動素子、フォトダイオードなどの光検出素子を形成・集積化することによって、独立した高度な機能を実現するようにした光デバイスである。光集積デバイスは次のような特徴を持っている。

- (1) 安定：各素子を集積するため光軸調整や位置合わせが不要であり、常に安定なアライメントが保持されるので振動や温度などの環境に対して強く、高信頼性が得られる。
- (2) 高性能：デバイスは主として単一モード導波路で構成されており、ビームや多モード導波に比べ各種制御が容易である。また光波は狭い領域に閉じ込められるため、各種の光波制御を小さな電極・狭い領域で行うことが可能となり、高速化・高効率化・低駆動電力化に有利である。
- (3) 小型・軽量：導波路は波長程度の厚さであり相互作用長も短いことから、極限に近い小型・軽量化が可能である。

光集積デバイスは導波路材料の観点から分類すると、ハイブリット型とモノリシック型に大別される。まずハイブリット型は誘電体材料を用いるため受動要素は容易に作製できるが、光源は作製できないため図 1.1(a)のように外付けした半導

体レーザや光ファイバーからのレーザ光を導波路端面に結合させる必要がある。そのため光源の位置合わせや端面での結合損失、戻り光などの問題がある。一方、モノリシック型は化合物半導体を導波路材料に用いるため、図 1.1 (b) のように同一基板上に全素子を集積化でき先ほどの問題を解消できる。しかし電流非注入部では発振波長において不透明であるので、受動要素を実現するためには導波路吸収損失を低減するための手法を必要とする。このようにハイブリッド型とモノリシック型の光集積デバイスはそれぞれ利点と欠点があるが、集積度が高く、高性能化が期待できる後者の実現が強く望まれる。

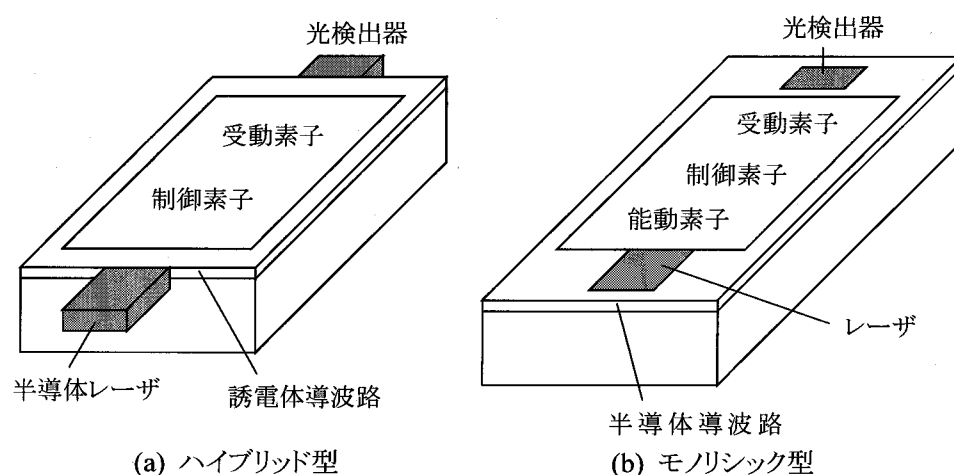


図 1.1 光集積デバイス

1.2 モノリシック集積化の問題点

モノリシック光集積デバイスにグレーティング素子を集積化すれば、デバイスで実現できる機能が格段に増え、その応用分野を拡大することができる。グレーティング素子は波長分散、位相整合、波面変換などの多くの機能を実現でき、しかも類似の作製技術で多様な機能を実現できることから、モノリシック光集積デバイスを構成する受動要素としてきわめて有用である。しかしグレーティング素子は導波

路吸収損失のため実効的開口長の減少や回折効率の低下などが起こるため、発振波長における低損失受動導波路の形成が不可欠である。また従来の半導体レーザは発振波長個体差や縦モード不安定などの問題があり、これも大きな波長分散を持つグレーティング素子を用いた光集積デバイスの高性能達成の障害となっていた。このように、グレーティング素子と半導体レーザを用いたモノリシック光集積デバイスを実現するうえで、従来のレーザでは発振波長が十分安定でない、および受動導波路吸収損失が大きいという問題があった。

[発振波長の安定化]

近年、有機金属気相エピタキシ(MOVPE)や分子線エキタピシ(MBE)などの新しい薄膜結晶成長技術が開発され、これにより最大利得波長における受動導波路吸収損失が小さい、高いレーザ利得が得られるなどの利点を有する量子井戸(QW)レーザ[2]の作製が可能となった。さらに光波閉じ込めがより強く、キャリア注入効率がより高い分布屈折率分離閉じ込め(GRIN-SCH)QW構造などが開発されている。またフォトリソグラフィや電子ビームリソグラフィなどの微細加工技術も格段に発展し、鋭い波長選択性を有するグレーティングで共振器を構成した分布帰還型(DFB)グレーティングや分布ブラッグ反射型(DBR)グレーティングが開発されている[3]-[6]。さらにこれらを改良した位相シフト DFB レーザ[7]や、波長可変 DFB レーザ[8]、DBR レーザ[9],[10]などが実現されている。

QW の採用と光導波路構造の最適化を行うとともに、リブ構造やリッジ構造のチャンネル光導波路を形成して安定な単一横モードを実現できる。さらに DFB 型または DBR 型の共振器を組み合わせることで、高い発振波長安定性の実現、発振しきい値電流の低減、変調帯域の拡大、狭スペクトル幅、低雑音化などの顕著な成果が得られている。これらのレーザはすでに多くの分野で実用化されており、今後も大きく発展するものと期待される。

[受動導波路吸収損失の低減]

また受動導波路吸収損失の問題においても、QW 構造を採用し QW 無秩序化あるいは選択成長などの技術を用いることにより、部分的に低損失受動導波

路の形成が可能となった。前者の無秩序化は結晶成長後に不純物拡散やイオン注入と熱処理[11],[12]、またはマスク層装荷と熱処理[13]-[15]などの方法で構成原子の相互拡散を行わせることにより、QW を部分的に消去させる技術である。後者の選択成長は同時成長する QW 層の発光波長を基板面内で制御するという方法であり、1 度の結晶成長で活性領域と受動領域の集積構造を実現できる[16],[17]。これらの技術はモノリシック光集積デバイス実現のための要素技術として利用されており、光集積デバイスの多機能化、高性能化に向けて期待が大きい。

このように、種々の技術開発やデバイス構成の改善により、モノリシック光集積デバイスはモード同期レーザ[18],[19]、スポットサイズ変換器集積レーザ[20]および光波長多重ネットワーク[21]など光ファイバー通信の分野では大きな発展を遂げている。しかし光計測、光信号処理や光インターコネクションなどの分野での研究は遅れており、モノリシック集積化マイケルソン干渉型変位センサ[22]などが報告されてはいるが、実用化例はほとんど見られないのが現状である。上記のデバイスはいずれもチャンネル導波路型デバイスであり、集積されるグレーティング素子としては DFB または DBR グレーティングが中心である。これに対し、プレーナ導波路を用い、良好な集光特性が得られるよう広面積の開口を有するグレーティング結合器を集積したモノリシック光集積デバイスの例は非常に少ない。しかしこの種のデバイスはレーザ光の入出力を直接行えることから、光計測、光信号処理および光インターコネクションなどの応用分野で、その実現が強く望まれている。

1.3 本研究の目的と課題

本研究では、モノリシック光集積デバイスの応用分野拡大を目指し、グレーティング素子と量子井戸レーザを用いた高機能モノリシック光集積デバイスを提案する。これらの理論的・実験的検討を通じて、設計理論、作製技術などの各種要素技術を確立するとともに、モノリシック光集積デバイス実現の可能性を明らかにす

ることを目的とする。

当研究室では誘電体光導波路を用いグレーティングを利用した光集積デバイスの研究を長年続けており、これまでに、集光グレーティングカップラ(FGC)を中心素子として用い半導体レーザを外付けするハイブリッド光集積デバイスを提案し、その理論的・実験的検討を行ってきた。近年、半導体光導波路を用い、グレーティング素子および光源などを 1 チップに集積化するモノリシック光集積デバイスの検討を始めており、その第 1 歩として AlGaAs 導波路における FGC の作製の検討を行ってきた[23]。FGC は導波光を任意の波面に変換する出力結合器であり、曲線で周期変化を有するグレーティングパターンをもつ。このような形状のグレーティング素子を半導体光導波路上に実現したという報告は、本研究グループ以外には見られない。

また横河電機およびチャルマース工科大学はいずれも GRIN-SCH-QW DFB/DBR レーザに関する優れた技術を蓄積しており、さらにこの種のレーザと導波路レンズまたはグレーティング出力結合器の集積化に関しても成果をあげている。

このようにいずれのグループもグレーティング素子と量子井戸レーザを用いたモノリシック光集積デバイスへと、その研究分野を拡大している。そこで当方の得意とする曲線で周期変化を有するグレーティング素子と、横河電機およびチャルマース工科大学の得意とする GRIN-SCH-QW DFB/DBR レーザを高度に融合させたモノリシック光集積デバイスに関する共同研究を行い、実際にモノリシック集積化を行うことにより生じる問題を明らかにするとともに、モノリシック光集積デバイス実現可能性を実証する。モノリシック光集積デバイスを実現するためには、導波路設計、受動導波路吸収損失の低減、高い発振波長安定性の実現および微細周期グレーティング素子作製技術の確立がきわめて重要である。また、デバイス構成素子設計理論の確立や作製プロセスの簡略化も必要である。このような要求を満たすため、本研究を始めるにあたり、いくつかの課題がある。

1) グレーティング素子設計理論の確立

この課題に対し、本研究では分波、偏向、集光など複数の機能を有するグレーティング素子について、導波路構造の最適化を図り、良好な集光特性、高い回折効率が得られるよう設計を行う。また位相整合を考慮し、グレーティン

グ形状式を導出する。(第 2 章)

2) 微細周期グレーティング素子作製技術の確立

この課題に対し、本研究ではグレーティング素子の作製に適した電子ビーム直接描画と反応性イオンエッチングを用い、ディープサブミクロンオーダー周期のグレーティング素子作製技術を確立する。(第 2 章)

3) デバイスの試作・評価

この課題に対し、本研究ではデバイスを試作、評価し、モノリシック集積化によるレーザ発振特性の劣化やグレーティング素子作製誤差、デバイスのセンサ特性などについて検討を行い、実用化への問題点と可能性を明らかにする。(第 2 章)

以上の課題に対し、モノリシック光集積センサを提案し検討を行う。

4) 高いレーザ発振波長安定性の実現

この課題に対し、本研究では種々のモノリシック光集積デバイスの光源に適した狭活性チャンネルと曲線表面グレーティングから構成される DBR レーザを提案する。また曲線表面グレーティングの設計を行う。(第 3 章)

5) 理論シミュレーションを用いたパワー増幅器の設計

この課題に対し、本研究ではビーム伝搬法を用いた理論シミュレーションにより、デバイスに集積されるパワー増幅器の最適設計を行う。またパワー増幅器内で生じる波面歪補正機能を付加したグレーティング出力結合器の設計を行う。(第 3 章)

6) デバイス作製技術の確立

この課題に対し、本研究では表面グレーティングを採用し、1 度のエピタキシャル成長で作製可能な構成とすることで、デバイス作製プロセスを簡略化する。また蒸着・リフトオフによる電極形成、in situ モニタ反応性イオンエッチングによるリッジ構造形成、はんだ付け・ボンディングによる実装技術など、当研究室内での一貫したデバイス作製技術を確立する。(第 3 章)

7) デバイスの試作・評価

この課題に対し、本研究ではデバイスを試作、評価し、提案した曲線表面 DBR レーザおよびデバイスの出力特性を評価する。また平行出力ビームの広

がり角からグレーティング出力結合器に付加した波面歪補正機能について検討を行うとともに、デバイス高性能化への課題を明らかにする。(第 3 章)

以上の課題に対し、グレーティング結合器集積化高出力半導体レーザを提案し検討を行う。

1.4 本論文の構成

図 1.2に本論文の構成を示す。第 2 章ではモノリシック光集積デバイスの例として 2 種の光集積センサを取り上げ、これらのデバイス構成および動作原理について述べる。また分布屈折率分離閉じ込め導波路におけるグレーティング素子の設計を行い、これをもとに実際にデバイスを作製し、センサ特性を評価する。第 3 章では新規のモノリシック光集積デバイスとして、1 度の結晶成長で作製でき平行ビームを出力するグレーティング結合器集積化高出力半導体レーザを提案する。デバイスを構成する各素子の設計、特に理論シミュレーションによるパワー増幅器の性能予測を行い、波面歪補正機能を付加したグレーティング出力結合器の設計について述べる。実際にデバイスを作製、評価し、その結果について検討を行う。第 4 章では、本研究において得られた成果を総括するとともに、今後の問題点・課題を指摘する。

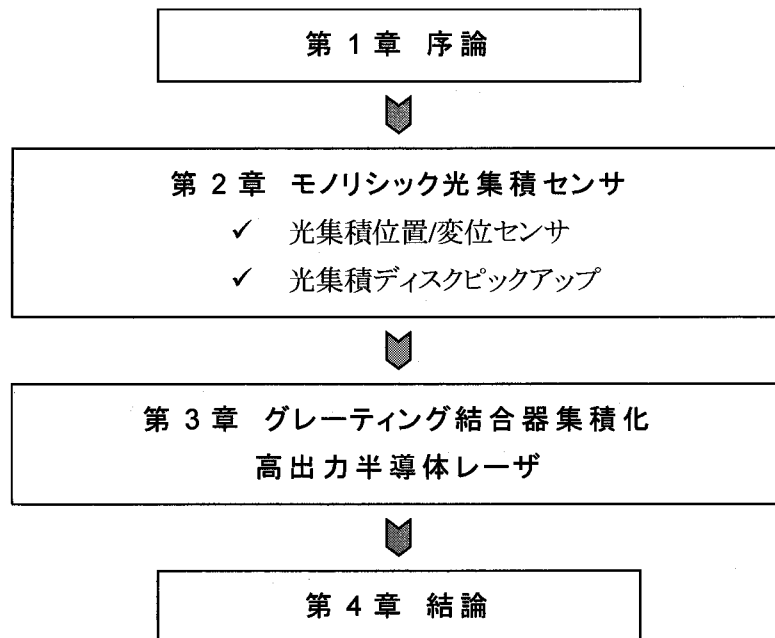


図 1.2 本論文の構成

第 2 章 モノリシック光集積センサ

2.1 緒言

本研究グループでは、薄膜光導波路で集光グレーティングカップラ(FGC)を中心素子として用いた干渉型光集積位置/変位センサ[24](図 2.1)や光集積ディスクピックアップ[25]などの種々のハイブリッド型光集積デバイスを提案し、理論的・実験的検討を行ってきた[26]。

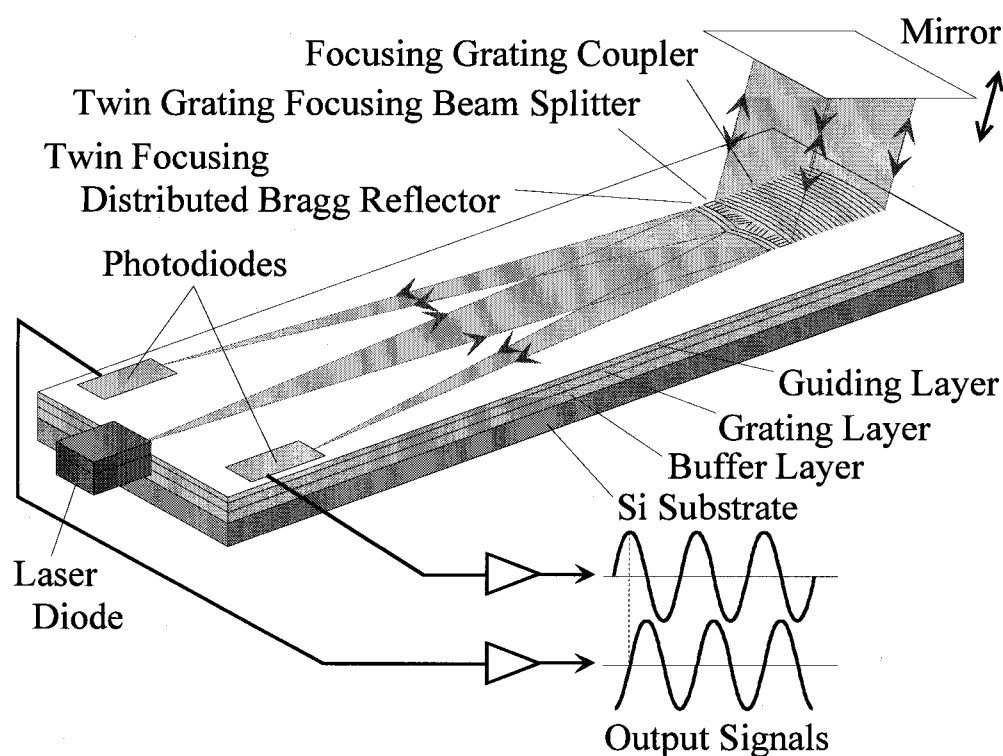


図 2.1 ハイブリッド光集積位置/変位センサ

このようなデバイスには誘電体導波路を用いていたため、外付けした半導体レーザー(LD)または光ファイバからレーザ光を導波路端面に結合させていた。そのため光源の精密な位置合わせが必要で、端面におけるレーザ光の結合損失、小型軽量化への限界などの問題があった。しかし化合物半導体を導波路材料に用い

れば、グレーティング素子を LD とともにモノリシックに集積化することができる。これにより上記の問題が解決され、超小型・高性能なデバイスの実現が可能となる。

このような光集積デバイスの光源には、グレーティング素子を応用する際に重要な、優れた波長安定性を有する単一量子井戸分布帰還型 (DFB) レーザ[27]、[28]が適している。モノリシック集積化にはレーザ発振波長において低損失な受動導波路が必要であるが、このレーザの導波路構造は量子井戸の選択的無秩序化によって、そのような受動導波路を形成できる。

本章では、これまでハイブリッド光集積デバイスで達成してきた機能を、半導体導波路を用い、より高性能で実用的なモノリシック光集積デバイスとして実現する。その例として光集積位置/変位センサ (MIOPS) [29]と光集積ディスクピックアップ (MIODPU) [30]を取り上げ、その理論的・実験的検討を通じてモノリシック光集積デバイス実現の可能性を実証する。まずそれぞれのデバイス構成、動作原理を述べた後、分布屈折率分離閉じ込め導波路におけるグレーティング素子の設計を行う。さらに実際にデバイスを作製し、センサ特性を評価する。

また MIOPS と類似の機能を持つデバイスとして、外部レンズ系を必要とするが変位量とその方向を測定できるモノリシック集積化マイケルソン干渉型変位センサ[22]が Hofstetter らによって報告されている。

2.2 モノリシック光集積センサの動作原理

2.2.1 モノリシック光集積位置/変位センサ

図 2.2 にモノリシック光集積位置/変位センサ (MIOPS) の概略図を示す。MIOPS は平行出射型集光グレーティングカップラ (FGC)、グレーティングビームスプリッタ (TGFBS)、ブラッグ反射器 (TFDBR) を SQW-DFB レーザ (LD) とフォトダイオード (PD) とともに AlGaAs 導波路上にモノリシックに集積したデバイスである。LD からの導波光が FGC から平行光として空気中に出射し、可動鏡で反射され再び FGC で導波路に結合される。この信号光はさらに TGFBS により PD に

集光される。また LD からの導波光の一部が TFDBR により PD に集光され参照光となる。信号光と参照光の干渉により、可動鏡変位が光電流の周期的変化として検出される。

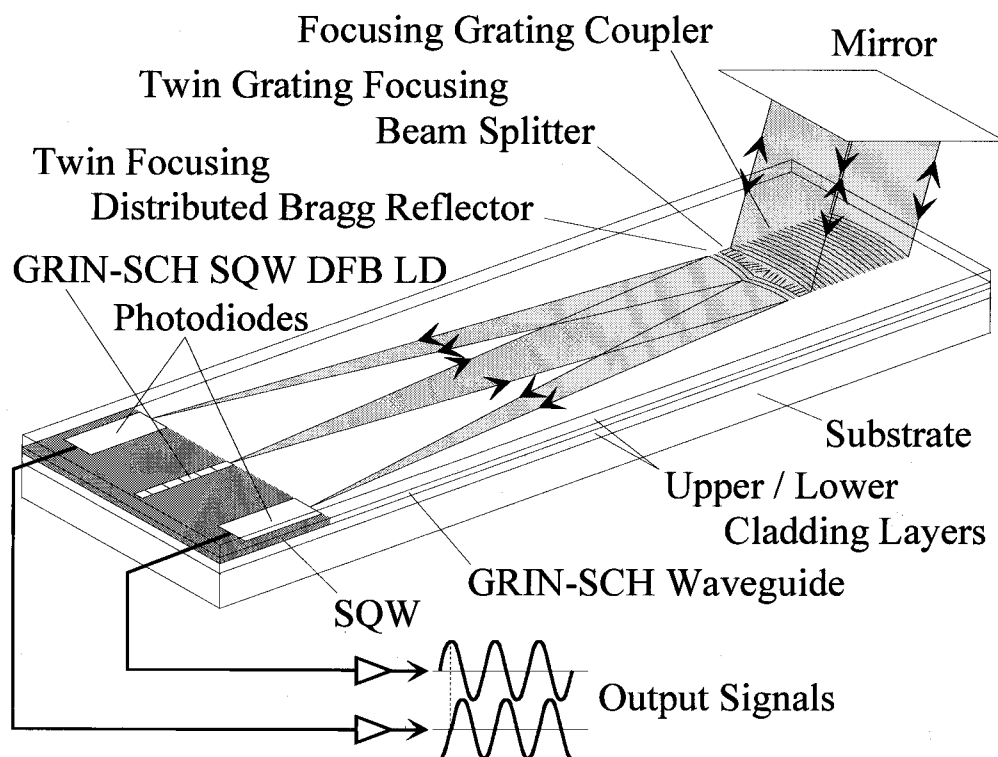


図 2.2 モノリシック光集積位置/変位センサ

2.2.2 モノリシック光集積ディスクピックアップ

図 2.3にモノリシック光集積ディスクピックアップ (MIODPU) の概略図を示す。MIODPU は FGC、TGFBS を LD、PD とともにモノリシックに集積したデバイスである。MIOPS の平行出射型 FGC に対し、ここでは外部焦点距離 1.0 mm の 1 点集光型 FGC を用いる。また TFDBR がなく、検出系が 4 素子 PD であること以外は MIOPS と同様の構成である。

LD からの導波光が FGC により外部の 1 点に集光する。これが焦点位置に置かれた光ディスク面で反射され、同じ FGC で導波路に戻る。さらに TGFBS で回

折され PD に集光する。これから、フーコー法/プッシュプル法により光ディスク情報とトラッキング/フォーカシング誤差を検出することができる。

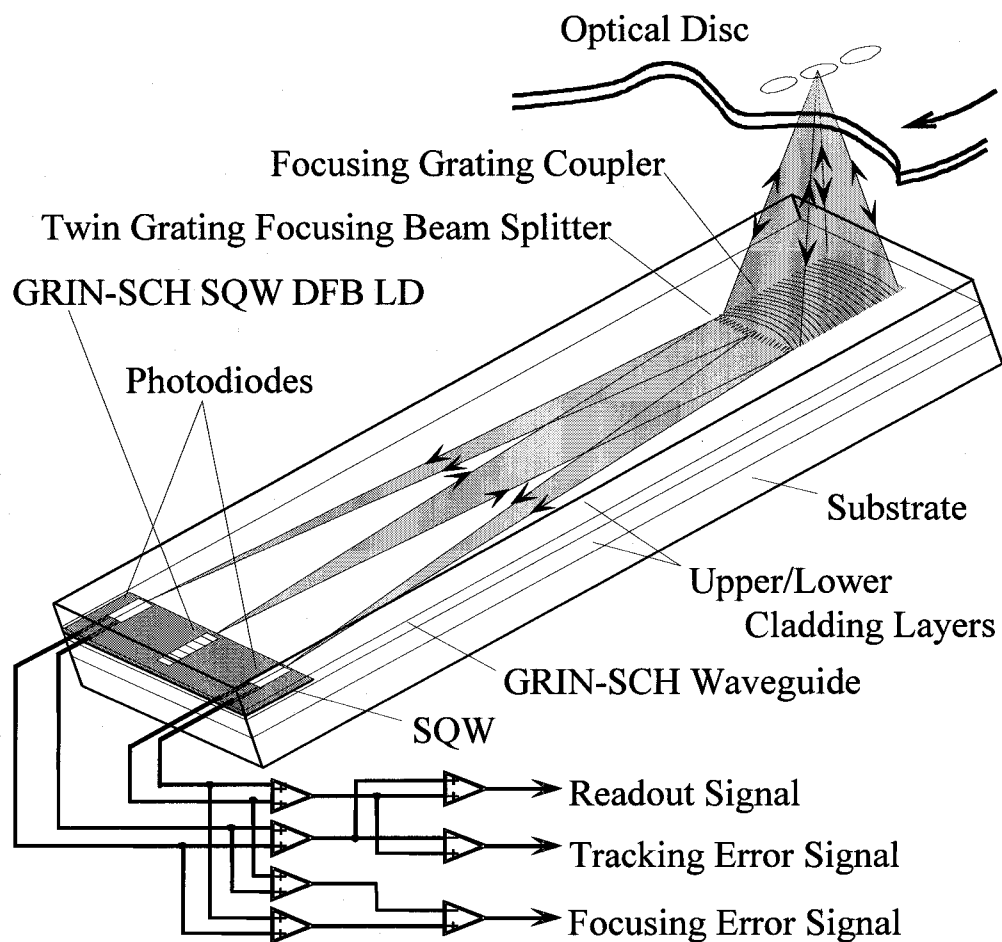


図 2.3 モノリシック光集積ディスクピックアップ

2.3 分布屈折率分離閉じ込め導波路グレーティング素子の設計

分布屈折率分離閉じ込め (GRIN-SCH) 単一量子井戸 (SQW) 導波路構造の厚み方向 (x 方向) の屈折率分布を図 2.4 に示す。GRIN-SCH-SQW 構造中の量子井戸を無秩序化して形成される受動導波路 (GRIN-SCH 導波路) にグレーティング層を設けた構造を考える。グレーティング層をエッチングして矩形グレーテ

ングを作製するものとし、集光グレーティングカップラ(FGC)、グレーティングビームスプリッタ(TGFBS)およびブラッグ反射器(TFDBR)の設計を行う[31]。

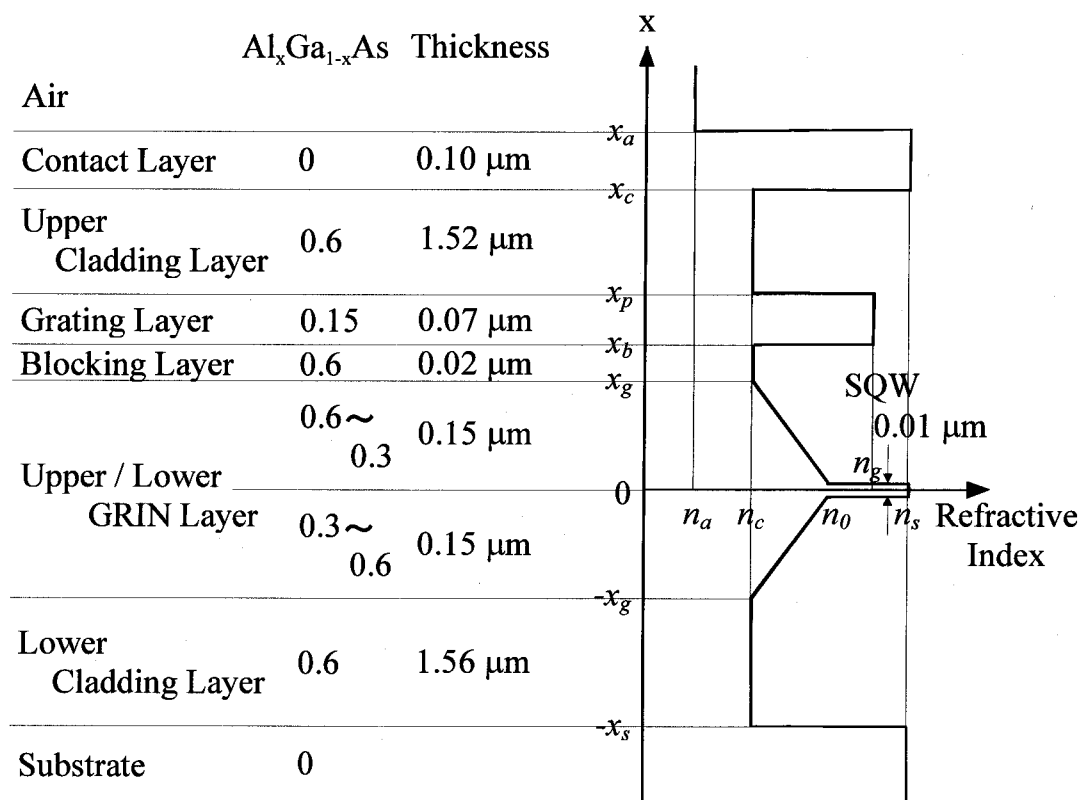


図 2.4 GRIN-SCH-SQW 導波路構造の屈折率分布

2.3.1 導波モード および放射モード

まず QW を無秩序化した GRIN-SCH 導波路における TE 導波モードおよび TE 放射モードの電界分布 $E(x)$ を波動方程式

$$\left[\frac{d^2}{dx^2} + k_0^2(n^2 - N^2) \right] E(x) = 0 \quad (2.1)$$

から求めた。ここで $k_0 = 2\pi/\lambda$ 、 λ は真空中の波長、 n は各層の屈折率、 N は実効屈折率とし、座標およびパラメータは図 2.4 に従うものとする。またグレーティング層全厚にわたり矩形グレーティングを作製するものとし、グレーティング層の平均

屈折率 n_p は線幅比を d として

$$n_p^2 = dn_g^2 + (1-d)n_c^2 \quad (2.2)$$

となる。

導波モードの電界分布 $E_g(x)$ は、導波モードの実効屈折率を N_g とすると、図 2.4 中の上部クラディング層から下部クラディング層までの各層で

$$E_g(x) = \begin{cases} a_1 \exp[-\gamma(x-x_p)] \\ a_2 \cos[k_p(x-x_b)] + a_3 \sin[k_p(x-x_b)] \\ a_4 \exp[-\gamma_c(x-x_g)] + a_5 \exp[+\gamma_c(x-x_g)] \\ a_6 \text{Ai}[c(x-x_t)] + a_7 \text{Bi}[c(x-x_t)] \\ a_8 \text{Ai}[-c(x+x_t)] + a_9 \text{Bi}[-c(x+x_t)] \\ a_{10} \exp[+\gamma_c(x-x_g)] \end{cases} \quad (2.3)$$

$$k_p = k_0 \sqrt{n_p^2 - N_g^2}, \gamma_c = k_0 \sqrt{N_g^2 - n_c^2}, c = \sqrt[3]{\frac{k_0(n_0^2 - n_c^2)}{t_g}}, x_t = \frac{n_0^2 - N_g^2}{n_0^2 - n_c^2} x_g$$

と表される。ここで比誘電率が線形に変化する GRIN 層については、波動方程式(2.1)の解はエアリー関数 Ai、Bi を用いて表される。これから境界条件を適用して特性方程式を導き、LD 発振波長 $0.853 \mu\text{m}$ のとき N_g は 3.280 と計算された。なお、導波モードの電界分布を

$$\frac{k_0 N}{2\omega\mu} \int_{-\infty}^{\infty} |E_g(x)|^2 dx = 1 \quad (2.4)$$

となるようパワーで規格化した。

次に同様にして放射モードの電界分布を求める[1]。放射モードは 2 重に縮退しており、互いに直交する(a)モードと(s)モードに分けられる。この(a)モード、(s)モードとは、それぞれ空気側、基板側で導波層から遠ざかる平面波成分を含むモードである。周期 Λ のグレーティング領域で導波モードが q 次回折により放射モードに結合するとき、 q 次放射モードの実効屈折率 N_r^q は

$$k_0 N_r^q = k_0 N_g + q \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (q: \text{integer}) \quad (2.5)$$

で与えられ、基板垂直方向に対し

$$N_r^q = n_a \sin \theta_{qa} = n_s \sin \theta_{qs} \quad (2.6)$$

で決まる角度 θ_{qa} 、 θ_{qs} でそれぞれ空気側、基板側へ放射する。 q 次放射モードの

電界分布は N_r^q を用いて、図 2.4 の空気から基板までの各層で

$$E_i(x) = \begin{cases} r_1 \exp[-jk_a(x-x_a)] + r_2 \exp[+jk_a(x-x_a)] \\ r_3 \exp[-jk_s(x-x_c)] + r_4 \exp[+jk_s(x-x_c)] \\ r_5 \exp[-jk_c(x-x_p)] + r_6 \exp[+jk_c(x-x_p)] \\ r_7 \exp[-jk_p(x-x_b)] + r_8 \exp[+jk_p(x-x_b)] \\ r_9 \exp[-jk_c(x-x_g)] + r_{10} \exp[+jk_c(x-x_g)] & i = a, s \\ r_{11} \text{Ai}[c(x-x_t)] + r_{12} \text{Bi}[c(x-x_t)] \\ r_{13} \text{Ai}[-c(x+x_t)] + r_{14} \text{Bi}[-c(x+x_t)] \\ r_{15} \exp[-jk_c(x-x_g)] + r_{16} \exp[+jk_c(x-x_g)] \\ r_{17} \exp[-jk_s(x-x_s)] + r_{18} \exp[+jk_s(x-x_s)] \end{cases} \quad (2.7)$$

$$k_l = k_0 \sqrt{n_l^2 - N_r^2} \quad l = a, c, s$$

と表される。ただし、(a)モードのとき $r_{18} = 0$ で、(s)モードのとき $r_1 = 0$ である。これから境界条件を満たすよう係数 r を決定し、(a)モードのときは

$$|r_1|^2 = \frac{\omega\mu}{k_a\pi} \quad (2.8)$$

(s)モードのときは

$$|r_{18}|^2 = \frac{\omega\mu}{k_s\pi} \quad (2.9)$$

となるよう規格化し、放射モードの電界分布を求めた。

2.3.2 集光グレーティングカップラ

導波モードを 1 次回折 ($q = -1$) によって放射モードに変換する集光グレーティングカップラ (FGC) の設計を行う。簡単のため、周期一定の直線溝パターンをもつグレーティングカップラについて考える。図 2.5 にグレーティングカップラによる回折の概略を示す。

(i) 放射損失係数、回折効率

グレーティング内を伝搬する導波光は、放射モードへの結合により図 2.5 に示すように z 方向に伝搬するとともに指数関数的に減衰する。また回折光も導波光減衰の影響により、指数関数的に減衰する。この減衰定数 α_r は放射損失係数と

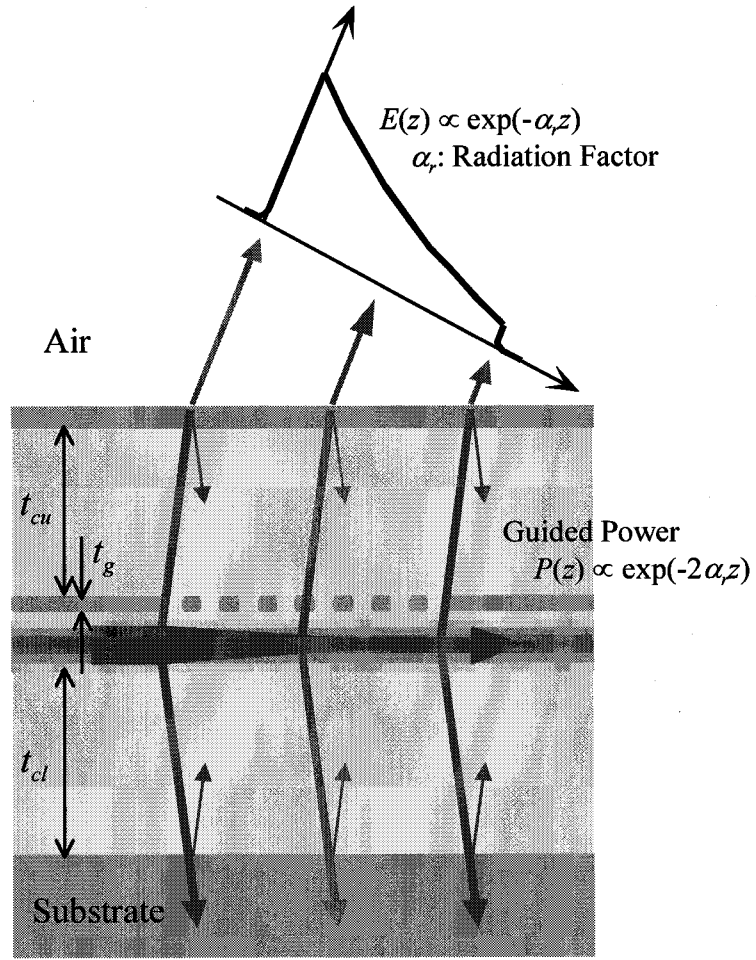


図 2.5 グレーティングカップラによる回折

呼ばれ、FGC の特性を左右する重要なパラメータである。パワーで規格化した導波モードの電界分布 $E_g(x)$ および放射モードの電界分布 $E_i(x)$ を使い、モード結合理論から導いた

$$\kappa_i = \frac{\omega \epsilon_0}{4} \int_{-\infty}^{\infty} E_g(x) \Delta \epsilon_{-1}(x) E_i(x) dx \quad (2.10)$$

から結合係数 κ を計算した[1]。ここで $i = a, s$ はそれぞれ空気側、基板側への結合を表し、 $\Delta \epsilon_{-1}(x)$ はグレーティング層の比誘電率分布をフーリエ展開したときの-1次フーリエ成分振幅であり、矩形グレーティングのとき線幅比 d を用いて

$$\Delta \epsilon_{-1}(x) = (n_g^2 - n_c^2) \frac{\sin d\pi}{\pi} \quad (2.11)$$

で表される。ここで大きな結合係数が得られるよう $d = 0.5$ とした。さらに

$$\alpha_r = \sum_i \alpha_i, \quad \alpha_i = \pi |\kappa_i|^2 \quad (2.12)$$

より、放射損失係数 α を求めた。また FGC の開口長を L_{FGC} とすると、空気側への回折効率 η_{FGC} は次式で表される。

$$\eta_{FGC} = \frac{\alpha_a}{\alpha_r} \{1 - \exp(-2\alpha_r L_{FGC})\} \quad (2.13)$$

放射損失係数 α のグレーティング層厚 t_g 依存性を図 2.6 に示す。高い回折効率を得るためには $\alpha_r L_{FGC}$ が大きい方がよいが、大きくしすぎると逆に FGC の実効的開口が小さくなり集光特性は劣化する。その妥協点として $\alpha_r L_{FGC} = 1$ となるよう FGC を設計することが望ましい。そこで $L_{FGC} = 0.40 \text{ mm}$ のとき $\alpha_r = 2.5 \text{ mm}^{-1}$ となるようグレーティング層の膜厚を $0.105 \text{ }\mu\text{m}$ とすべきであるが、グレーティング溝が後述の 2 段階転写で確実に作製できる最も深い値である $0.07 \text{ }\mu\text{m}$ に決定した。

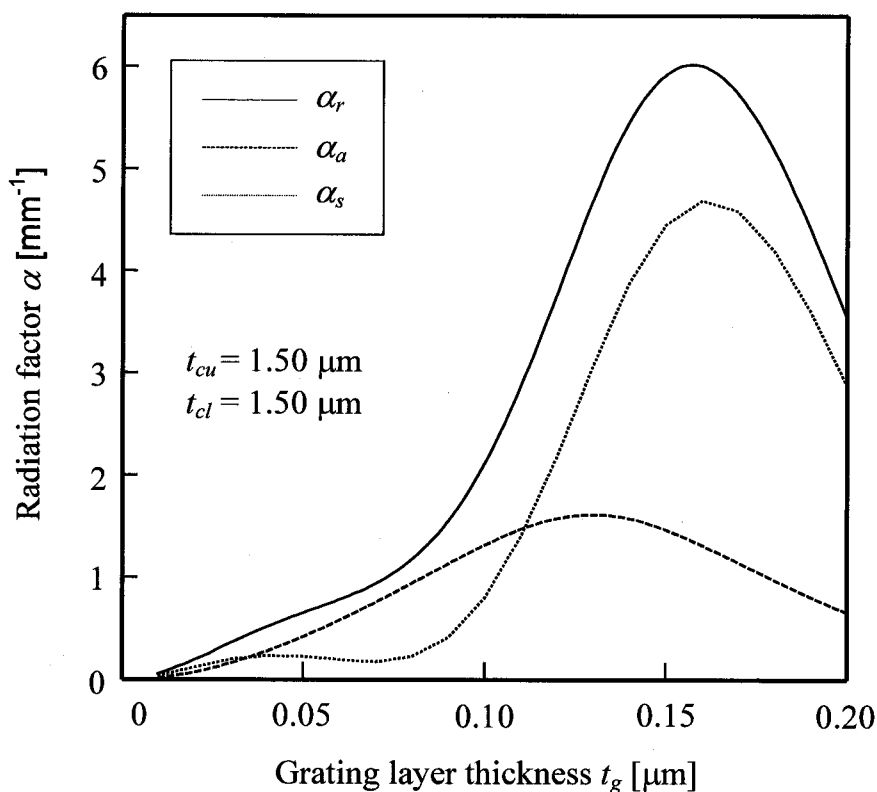


図 2.6 放射損失係数のグレーティング層厚依存性

さらに $t_g = 0.07 \mu\text{m}$ としたときの、FGC における回折光パワーの空気側への分配比 (α_a/α_r) の上下クラディング層厚 t_{cu} 、 t_{cl} 依存性を調べた。図 2.7 にこの依存性を示す。FGC の空気側への分配比が最大となる上下クラディング層厚は周期的に現れる。これは図 2.5 に示すように主に空気/コンタクト層境界および下部クラディング層/基板境界で反射が生じ、これらが基板側放射光と空気側放射光とそれぞれ干渉するためである。空気/コンタクト層境界で反射される光パワーは下部クラディング層/基板境界で反射される光パワーより強いため、分配比は上部クラディング層厚に大きく依存する。電流注入構造を有する LD 部で低損失な導波特性を得るためには $1.3 \mu\text{m}$ 以上のクラディング層厚を必要とするので、上下クラディング層厚をそれぞれ $1.52 \mu\text{m}$ 、 $1.56 \mu\text{m}$ とした。このとき放射損失係数 α_r は 0.94 mm^{-1} 、空気側への分配比は 81 % となる。ここで開口長 $L_{FGC} =$

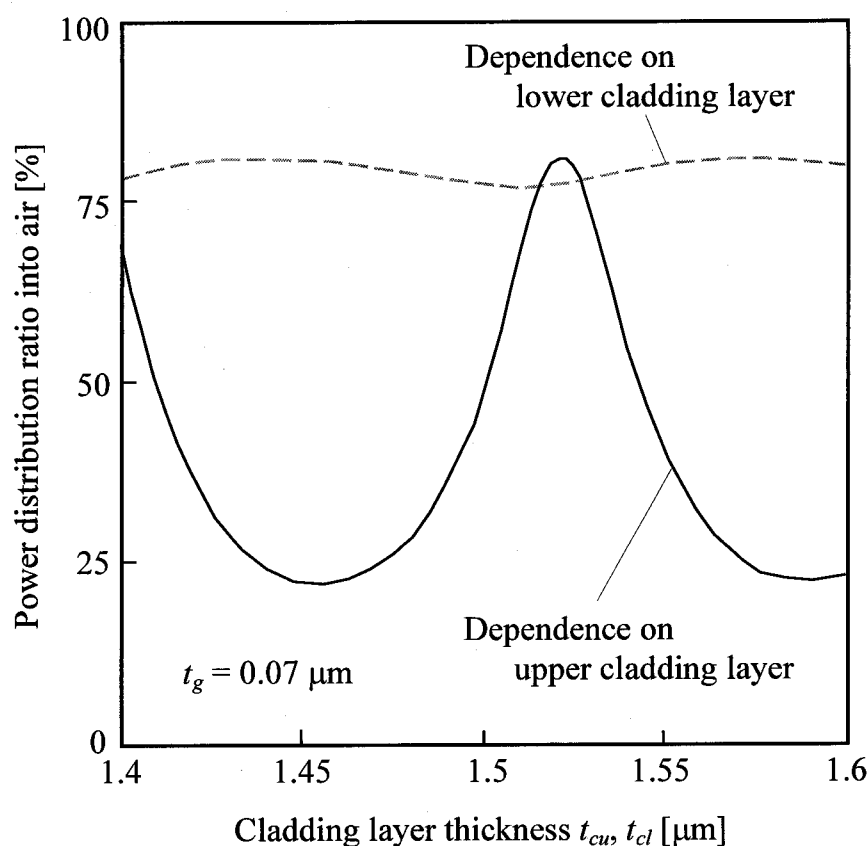


図 2.7 回折パワー分配比の上下クラディング層厚依存性

0.40 mm とすると、空気側への回折効率 43 % が得られることがわかった。また LD 出力光の発散角 (半値全角 4°) と FGC 開口幅 0.40 mm に対する導波光利用率を考慮し、LD/FGC 間距離を 5.00 mm と決定した。このとき FGC 開口での導波光強度の半値全幅は 0.35 mm となる。

(ii) 形状式

平行出射型

LD からの発散導波光を出射角 θ で平行光として空間中に出射する平行出射型 FGC を考える。これは MIOPS に集積する素子であり、図 2.8 に MIOPS の各

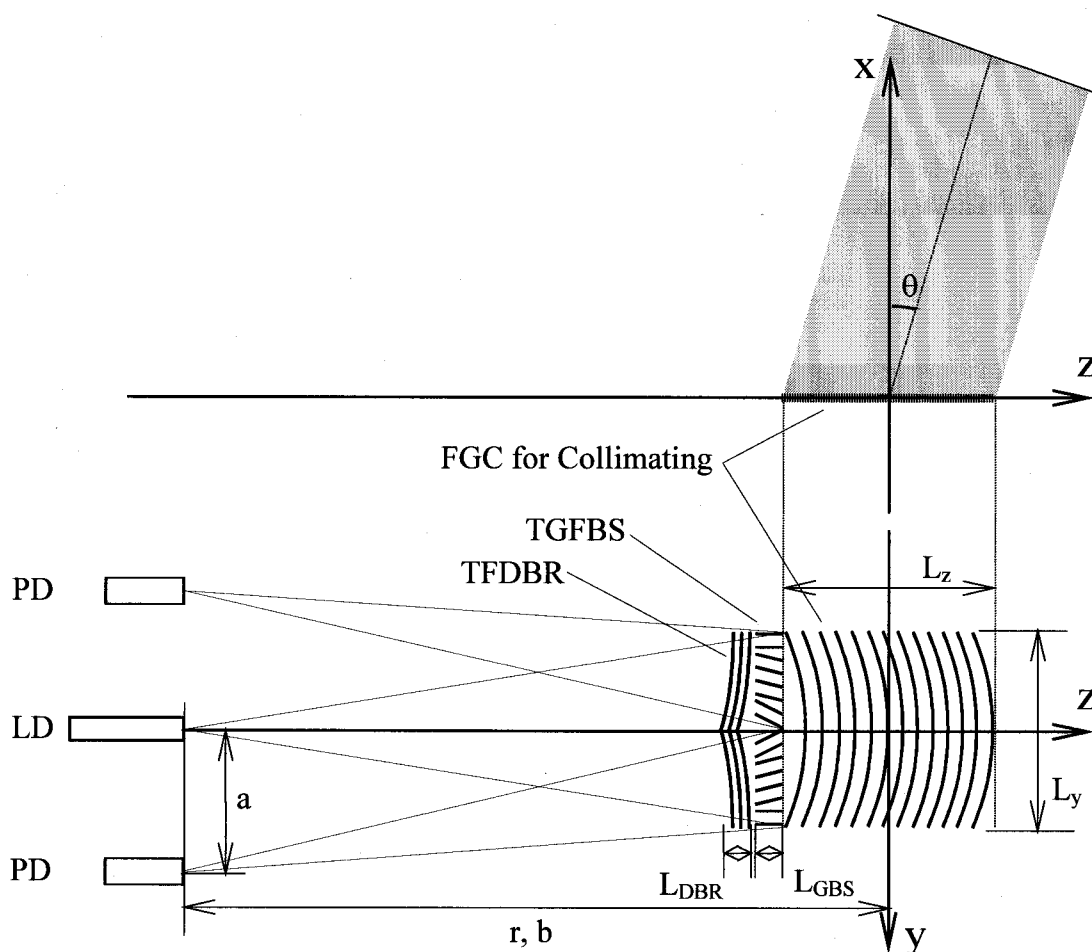


図 2.8 光集積位置/変位センサの素子の位置関係

素子の位置関係を示す。以下、座標およびパラメータは図 2.8 に従うものとする。

FGC のパターン形状は、導波路面での導波光と回折光の位相整合を考慮することで得られる。LD からの発散導波光の位相 ϕ_m および出力平行光の位相 ϕ_{df} はそれぞれ

$$\phi_m = k_0 N_g \sqrt{y^2 + (z+r)^2} \quad (2.14)$$

$$\phi_{df} = k_0 z \sin \theta \quad (2.15)$$

で表され、FGC の第 m 番目ラインの形状式は

$$\phi_m - \phi_{df} = 2m\pi + \text{const.} \quad (m: \text{integer}) \quad (2.16)$$

となる。ここで $y = z = 0$ で $m = 0$ となるよう定数を決めると、

$$N_g \sqrt{y^2 + (z+r)^2} - z \sin \theta = -m\lambda + Nr \quad (2.17)$$

が得られる。

ここで 1 次回折光が導波路面に対しほぼ垂直に出射するようグレーティング周期を選ぶと、導波路内を逆進する導波モードが生じ 1 次放射モードの回折効率が著しく低下する可能性がある。現段階で作製できる最小グレーティング周期が $0.30 \mu\text{m}$ 程度であることを考慮して、出射角 θ を 15° と決定した。このときグレーティング周期は $0.31 \mu\text{m}$ であり、出力平行ビームの理論広がり角は 4.9 mrad (出射面に平行) $\times 4.3 \text{ mrad}$ (垂直) である。

1 点集光型

次に LD からの発散導波光を出射角 θ 、焦点距離 f の空間中の点に集光させる 1 点集光型 FGC を考える。これは MIODPU に集積する素子であり、図 2.9 に MIODPU の各素子の位置関係を示す。以下、座標およびパラメータは図 2.9 に従うものとする。

MIOPS と同様、入射光が LD からの発散導波光であり回折光が導波路外部の 1 点に集束する球面波であることから、1 点集光型 FGC の形状式は、

$$N\sqrt{y^2 + (z+r)^2} - \sqrt{y^2 + (z-f\sin\theta)^2 + (f\cos\theta)^2} = -m\lambda + Nr + f \quad (2.18)$$

と表される。

ここでグレーティング周期は FGC 開口内の LD 側で大きく、その反対側で小さい。そこで集光スポット径の理論回折限界値と FGC 開口内での最小グレーティング周期を考慮して、出射角 θ 、焦点距離 f をそれぞれ 30° 、 1.00 mm と決定した。このときグレーティング周期は $0.32\text{ }\mu\text{m}$ (LD 側) $\sim 0.29\text{ }\mu\text{m}$ (反対側) であり、集光スポットの理論回折限界は $2.17\text{ }\mu\text{m}$ (出射面に平行) $\times 1.88\text{ }\mu\text{m}$ (垂直) である。

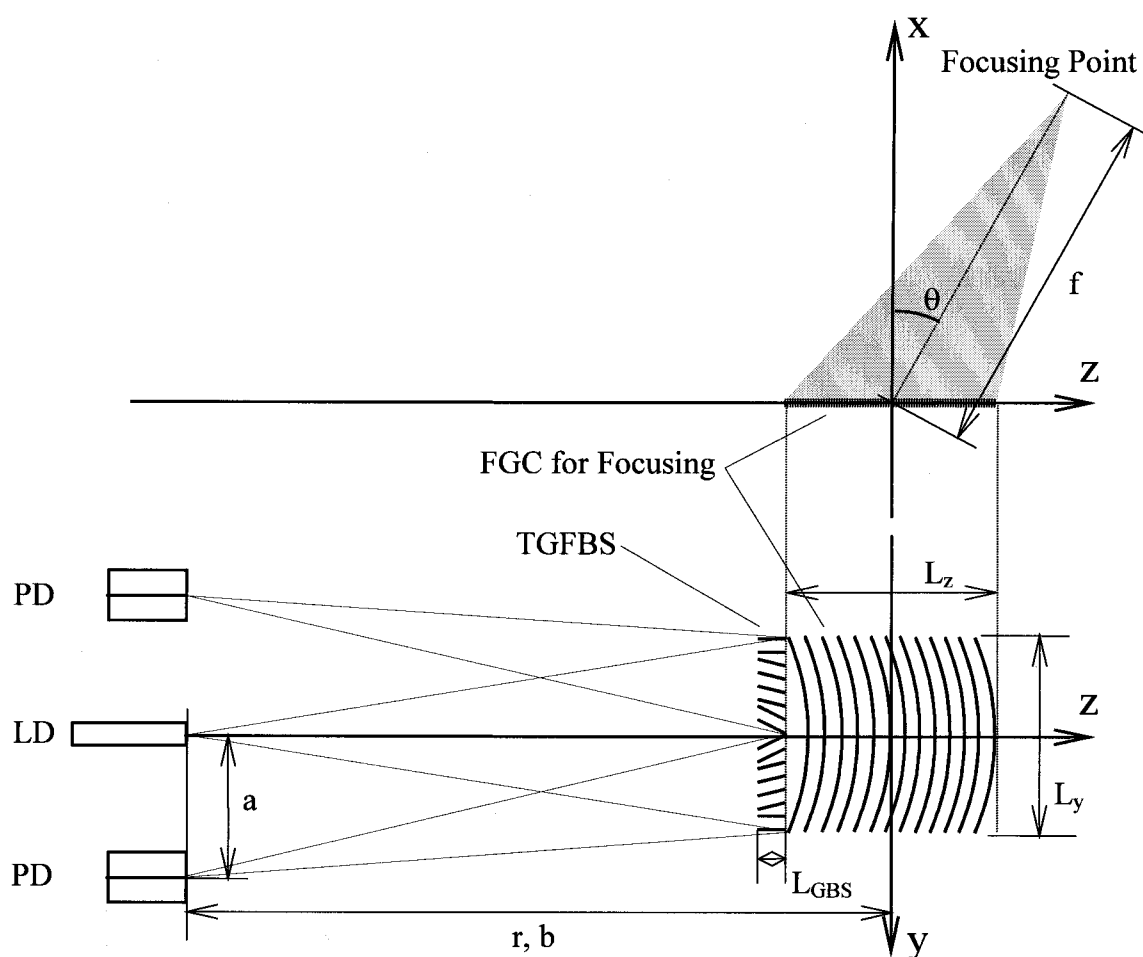


図 2.9 光集積ディスクピックアップの素子の位置関係

2.3.3 グレーティングビームスプリッタ

MIOPS および MIODPU において、グレーティングビームスプリッタ (TGFBS) は

FGC からの戻り光を 2 つの PD 位置に集光する素子である。以下に述べる特性、設計は MIOPS および MIODPU に共通である。TGFBS は導波モード-導波モード結合 (コプレーナ結合) 機能をもつグレーティング素子で構成する。グレーティング素子は 1 つの素子で分波、偏向、集光など複数の機能を実現でき、結合長や結合係数の設計により任意の回折効率が得られる。TGFBS は図 2.8、図 2.9 に示すように FGC に隣接して作製することとし、回折には 1 次のブラッグ回折を利用する。以下、座標およびパラメータは図 2.8、図 2.9 に従うものとする。

(i) 回折効率

集光系では非回折光を、検出系では回折光を利用するため、TGFBS の回折効率を η_{GBS} とすると信号光の光強度は $(1 - \eta_{GBS}) \eta_{GBS}$ に比例する。従って $\eta_{GBS} = 50\%$ のとき信号光の光強度が最大となる。結合係数 κ_{GBS} は、入射角を θ_{in} 、回折角を θ_{df} とすると、

$$\kappa_{GBS} = \frac{\omega \epsilon}{4} \cos(\theta_{df} - \theta_{in}) \int \Delta \epsilon_{-1} |E_g(x)|^2 dx \quad (2.19)$$

で表される。また TGFBS の結合長を L_{GBS} とすると、

$$\eta_{GBS} = \sin^2(|\kappa_{GBS}| L_{GBS} / \sqrt{\cos \theta_{in} \cdot \cos \theta_{df}}) \quad (2.20)$$

となる。ここで一括したプレーナプロセスにより作製できるよう、FGC、TGFBS および TFDBR は同じ導波路構造およびグレーティング深さとした。これから κ_{GBS} を求め、 $\eta_{GBS} = 50\%$ を与える $L_{GBS} = 11.9 \mu\text{m}$ が得られた。

(ii) 形状式

TGFBS への入射光は可動鏡または光ディスクからの反射光が FGC により導波路内に励振された戻り導波光で、その回折光は LD 位置に集束する。従って入射光が LD 位置への集束波であり回折光が PD 位置 ($\pm a, -b$) への集束波であることから、TGFBS の形状式は位相整合を考慮して

$$\sqrt{y^2 + (z+r)^2} - \sqrt{(y \mp a)^2 + (z+b)^2} = m\lambda / N + r - \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.21)$$

となる。

2.3.4 ブラッグ反射器

MIOPS において、ブラッグ反射器 (TFDBR) は LD からの導波光の一部を反射し、PD 位置に集光する素子である。波面分割、反射、集光という複数の機能を実現する TFDBR の特性および設計について述べる。TFDBR は導波モード-導波モード結合 (コプレーナ結合) 機能をもつグレーティング素子で構成する。TFDBR は図 2.8 に示すように TGFBS に隣接して作製することとし、回折にはブラッグ回折を利用する。以下、座標およびパラメータは図 2.8 に従うものとする。

(i) 回折効率

一括したプレーナプロセスにより作製できるよう、FGC、TGFBS および TFDBR は同じ導波路構造およびグレーティング深さとした。また 1 次グレーティングは周期が短くなり作製が困難であるので、グレーティング次数を 3 次 ($q = -3$) とした。3 次の結合係数 κ_{GBS} は、入射角を θ_{in} 、回折角を θ_{df} とすると、

$$\kappa_{DBR}^{(-3)} = \frac{\omega \varepsilon_0}{4} \cos(\theta_{df} - \theta_{in}) \int \Delta \varepsilon_{-3} |E_g(x)|^2 dx \quad (2.22)$$

で表される。また TFDBR の結合長を L_{DBR} とすると、

$$\eta_{DBR}^{(-3)} = \tanh^2(|\kappa_{DBR}^{(-3)}| L_{DBR} / \sqrt{\cos \theta_{in} \cdot \cos \theta_{df}}) \quad (2.23)$$

となる。

3 次のグレーティングを用いると、1 次回折により導波モードと基板側放射モード間で結合が生じ、損失となる。ここで導波モード-放射モード間の回折効率を計算し、 $\eta_{DBR}^{(-1)}$ とする。MIOPS において、信号光と参照光の光強度が等しくなることが望ましいので、これを式で表すと

$$\eta_{DBR}^{(-3)} = (1 - \eta_{DBR}^{(-1)} - \eta_{DBR}^{(-3)})^2 \cdot \eta_{GBS} (1 - \eta_{GBS}) \cdot \eta_{FGC}^2 \cdot R_{MR} \quad (2.24)$$

となる。ここで R_{MR} は鏡の反射率で 80 % とした。これから $\eta_{DBR}^{(-3)} = 2\%$ となり、これを与える L_{DBR} は $8.3 \mu m$ と計算された。

(ii) 形状式

入射光が LD からの発散波であり、回折光が PD 位置 ($\pm a$, $-b$) への集束波で

あることから、TFDBR の形状式は位相整合を考慮して

$$\sqrt{y^2 + (z+r)^2} + \sqrt{(y \mp a)^2 + (z+r)^2} = m\lambda / N + r - \sqrt{a^2 + b^2} \quad (2.25)$$

となる。

2.4 デバイス作製

表 2.1 に作製した MIOPS および MIODPU のパラメータを示す。また作製プロセスを図 2.10 に示す。作製プロセスを要約すると

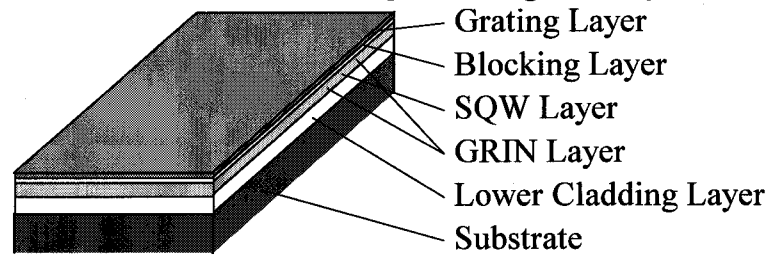
- (1) エピタキシャル成長
- (2) グレーティング素子作製
- (3) Si イオン注入
- (4) 再成長
- (5) 電極形成、電氣的・光学的分離

となる。

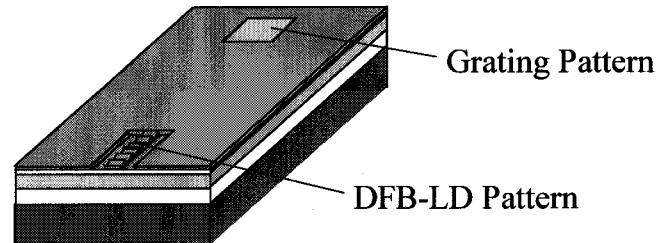
表 2.1 設計パラメータ

GRIN-SCH-SQW DFB-LD	Wavelength: 0.853 μm Active channel: $2.0 \times 600 \mu\text{m}^2$
GRIN-SCH Waveguide	Effective index: 3.280 LD to FGC distance: 5.00 mm
FGC	Aperture: $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ Focal length: ∞ (MIOPS) / 1.00 mm (MIODPU) Exit angle: 15° (MIOPS) / 30° (MIODPU) Period: 0.31 μm (MIOPS) / 0.29~0.32 μm (MIODPU) (1-st order) Radiation factor: 0.94 cm^{-1} Coupling efficiency: 43 %
TGFBS	Aperture: 400 μm Interaction length: 11.9 μm Period: 3.3 μm (1-st order) Coupling efficiency: 50 %
TFDBR	Aperture: 400 μm Interaction length: 8.3 μm Period: 0.39 μm (3-rd order) Coupling efficiency: 2 %
Photodiodes	Area: $250 \times 335 \mu\text{m}^2$
Chip Size	Area: $7 \times 2 \text{ mm}^2$

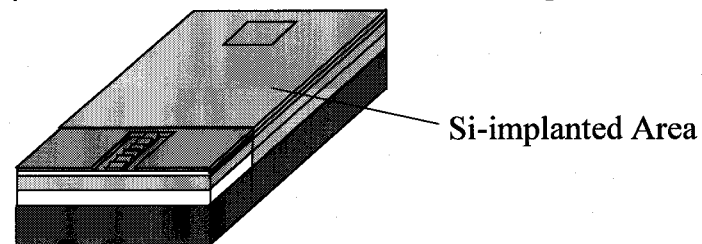
- Preparation of GRIN-SCH-SQW waveguide by MOVPE



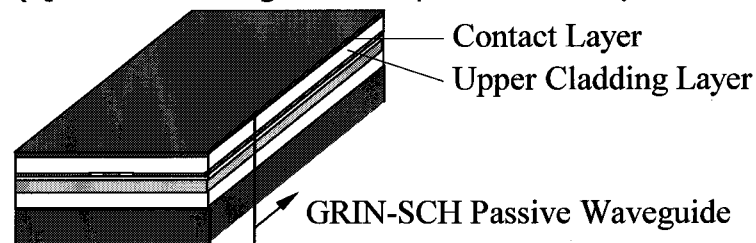
- Fabrication of grating components and channel/DFB grating for LD



- Si implantation over outside LD/PD region



- Regrowth of upper layers
(QW disordering in Si-implanted area)



- Formation of deep grooves around PD area for isolation
Metallization and chip separation

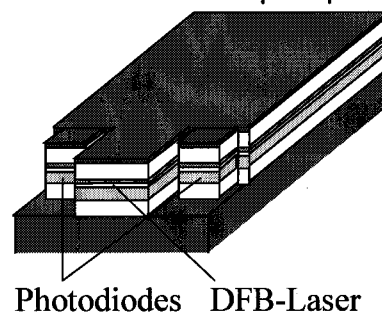


図 2.10 作製プロセス

(i) エピタキシャル成長

まず、MOVPE 法により n-GaAs 基板上に下部クラディング層、下部 GRIN 層、単一量子井戸層、上部 GRIN 層、ブロッキング層、グレーティング層を 780 °C でエピタキシャル成長した。

(ii) グレーティング素子作製

半導体導波路を用いて光集積デバイスを実現するとき、屈折率が誘電体導波路のそれとくらべて高いため、ディープサブミクロンオーダーの微細周期グレーティングを作製する必要がある。このような周期をもつグレーティング素子を作製する際に生じた問題とその解決法を以下に示す。

a) 微細周期グレーティングの描画

微細周期グレーティングの描画には、通常ワーキングディスタンスが短く最小ビーム径が数 10 nm 程度の電子ビーム描画装置が用いられる。このような装置ではグレーティング開口を 100 nm×100 nm 程度の区域に分割し、ステージ移動と描画を繰り返しながら大きな開口のグレーティングを描画する。このような方法ではグレーティング周期や線幅比の制御は正確に行えるが、ステージ移動により生じる描画区域間のずれが問題となる。本研究には当研究室で開発された電子ビーム描画装置を使用した。これはワーキングディスタンスが長く広面積の描画に適した装置であり、ステージ移動せずに開口 1 mm×1 mm 程度のグレーティングが描画できる。

CD 読み取りデバイスの仕様は波長 0.78 μm 、開口数 $\text{NA} = 0.45$ であり、これから集光スポット径の半値全幅は 1.4 μm となる。これを MIODPU で実現すると、発振波長、焦点距離をそれぞれ 0.853 μm 、1.0 mm とし、回折限界集光スポット径が得られるとしても 0.5 mm 以上の FGC 開口が必要である。また、DFB レーザからの導波光発散角を考慮すると、7 mm 以上のデバイス長が必要となり好ましくない。

使用した電子ビーム描画装置は、描画条件を加速電圧 40 kV、ビーム電流 0.04 nA とすることで 0.1 μm 程度のビーム径が得られ、高分解能レジスト ZEP-520

を用い線幅比を 0.5 とすると、現段階で作製できる最小グレーティング周期は $0.30\ \mu\text{m}$ 程度である。そこでステージ移動せずに FGC、TGFBS および TFDBR が一様に描画でき、最小グレーティング周期が $0.3\ \mu\text{m}$ 程度となるよう、FGC の焦点距離、開口をそれぞれ $1.00\ \text{mm}$ 、 $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ と決定した。

b) 線幅比

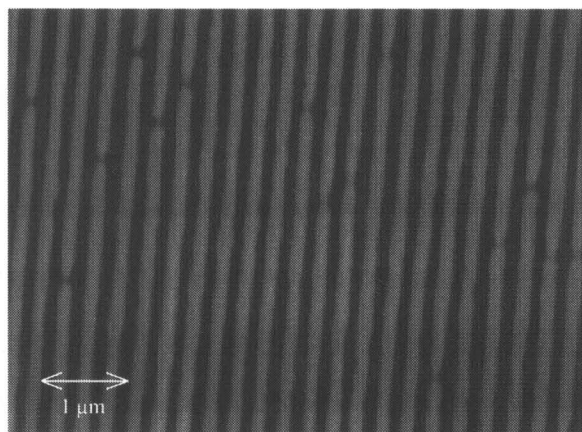
平行出射型 FGC のグレーティング周期は $0.31\ \mu\text{m}$ で一定であり、一定のドーズで線幅比 0.5 のグレーティングパターンが描画できる。しかし 1 点集光型 FGC では、開口 LD 側からその反対側までグレーティング周期が $0.32 \sim 0.29\ \mu\text{m}$ と変化する。そこでドーズを変化させることで、開口内全域で線幅比がほぼ 0.5 となるようにした。また FGC および TFDBR のグレーティングの半周期はビーム径とほぼ同じであるため、各グレーティング周期の半周期に対応するドーズを用い 1 回の走査でグレーティングパターンの描画を行った。これに対し TGFBS のグレーティング半周期は $1.65\ \mu\text{m}$ とビーム径に比べて大きく、走査位置をずらしながら複数の走査で半周期を描画した。

c) 電子ビームの揺れ

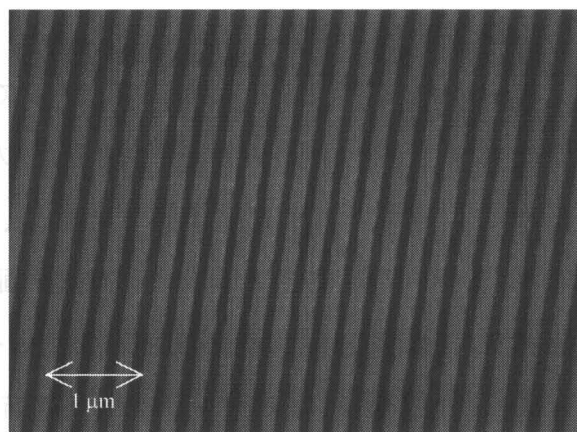
電子ビームは $60\ \text{Hz}$ で揺れており、これは微細周期グレーティングパターンの描画の際に深刻な問題となる。1 回の走査で FGC グレーティングを描画したとき、揺れの影響で図 2.11 (a) に示すようにグレーティングパターンはとぎれとぎれとなる。そこで 1 本のグレーティングラインを複数回の走査で描画することで、電子ビームの揺れを平均化することを試みた。走査回数を 5 回とし、1 回あたりの走査スピードを 5 倍にして描画したグレーティングパターンを図 2.11 (b) に示す。揺れの影響はほぼ取り除かれ、良好なグレーティングパターンを描画することが可能となった。

d) 2 段階転写

当初、基板表面に直接電子ビームレジスト(日本ゼオン社製 ZEP-520)を塗布し、これをマスクとして反応性イオンエッチング(RIE)を行うことでグレーティング素子を作製しようと試みた。しかし使用した高分解能レジストは還元性のあるエッチングガスに対する耐性が弱く、 CH_4/H_2 (体積比 1:5)を用いた RIE 中にレジスト



(a) 走査回数 1 回

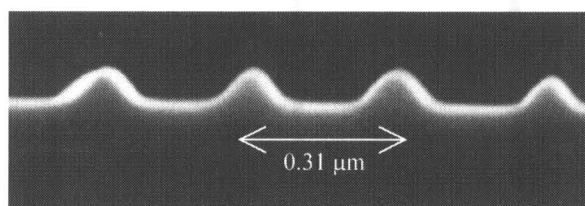


(b) 走査回数 5 回

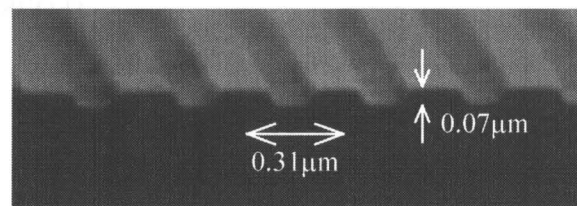
図 2.11 レジストグレーティングの SEM 写真

が損傷を受け、図 2.12 (a) に示すようにグレーティング断面が矩形にならないという問題が生じた。

そこで SiO_2 膜を中間層として用い、描画したグレーティングパターンを CF_4/H_2 (同 9:1) を用いた RIE でレジストから SiO_2 膜に、 H_2/CH_4 (同 1:5) を用いた RIE で SiO_2 膜からグレーティング層に、2 段階で転写した。この方法により、図 2.12 (b) のような矩形断面のグレーティングが作製可能となった。2 回目の RIE 後 SiO_2 膜上に重合物が薄く堆積しているのが見られ、これが SiO_2 膜を保護していたと考えられる。グレーティング素子設計当時、作製可能なグレーティング深さは $0.07 \mu\text{m}$ であったが、2 段階転写法を用いることでより深い矩形グレーティングの作製が可能であると考えられる。



(a) 直接転写



(b) 2 段階転写

図 2.12 グレーティングの断面 SEM 写真

e) 各素子の位置関係

モノリシック光集積デバイスにおいて各能動素子、受動素子が適切な位置関係を有することが重要であり、素子間のずれはデバイス性能を著しく低下させる。正確な位置に各素子を作製するため、まず倍率 80 倍で図 2.13に示すグレーティング素子用位置合わせマーカを描画し、ステージを移動させ 3 カ所の LD/PD 位置に LD/PD 用マーカを描画した。その後倍率 200 倍に変更し、グレーティング素子用位置合わせマークをもとに描画位置を決定し、各グレーティング素子をステージ移動せずに連続して描画した。グレーティング素子作製後、各位置合わせマーカを参照し LD/PD を所定の位置に作製した。5.00 mm 離れたグレーティング素子と LD/PD のずれは 2 μm 程度に収まっており、これは十分な精度であるといえる。またステージ移動せずに各グレーティング素子を描画したため、これらの位置関係は非常に正確である。

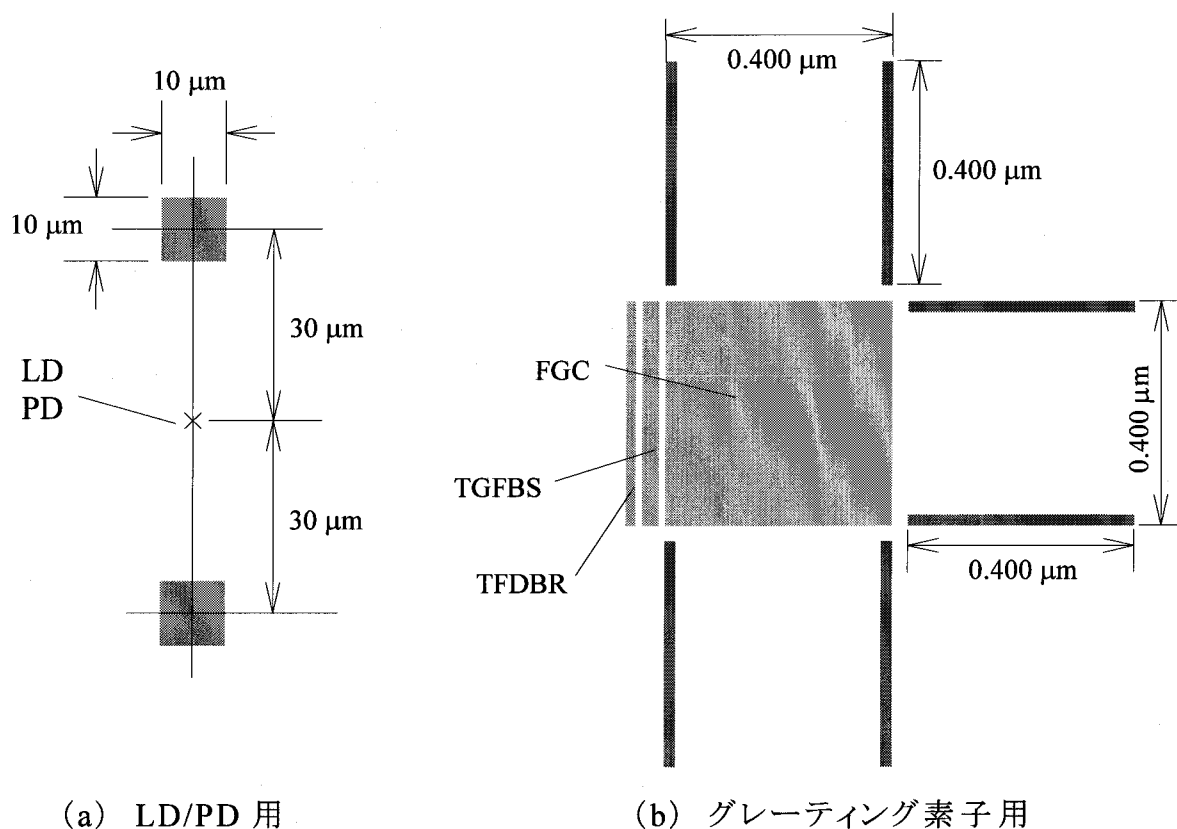


図 2.13 位置合わせマーカ

以上のようにいくつかの問題点を解決し、微細周期グレーティング素子作製技術を確立した。これらの技術を用い、3 種のグレーティング素子を一括作製した。 SiO_2 膜(厚さ 60 nm)を PCVD 法により基板表面に堆積後、電子ビームレジストを 0.2 μm 厚で塗布、加速電圧 40 kV、ビーム電流 0.04 nA の電子ビームで各グレーティングパターンを線幅比 0.5 となるよう描画した。これらのパターンを 2 段階転写法を用いてグレーティング層に転写した。作製したグレーティング素子の SEM 写真を図 2.14 に示す。

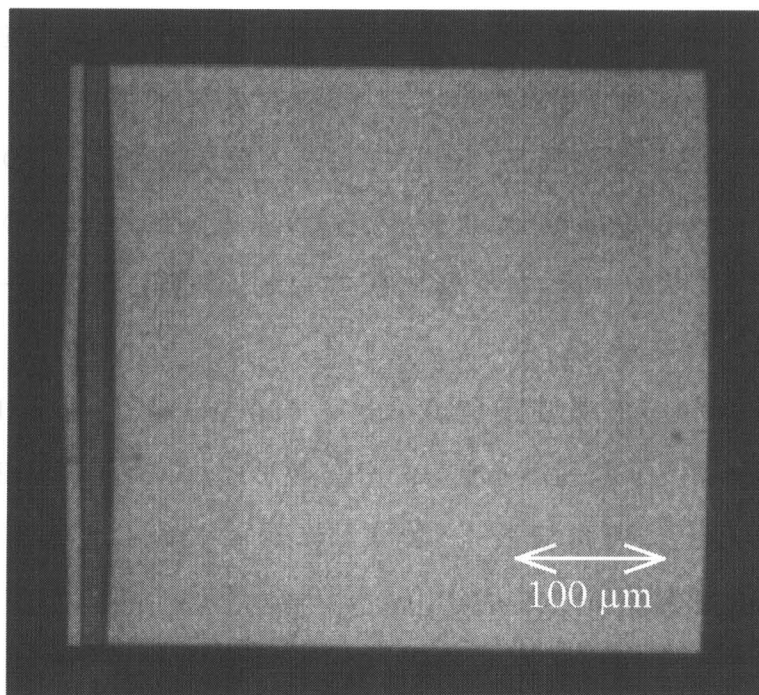
また DFB レーザのリブ導波路 (2.0 $\mu\text{m} \times 600 \mu\text{m}$) と 1 次 DFB グレーティングを、電子ビーム描画とウエットエッチングで作製した。このとき DFB グレーティングのブラッグ波長を最大利得波長よりわずかに長波長側にずらすことにより、受動導波路損失の低減を図った。

(iii) Si イオン注入

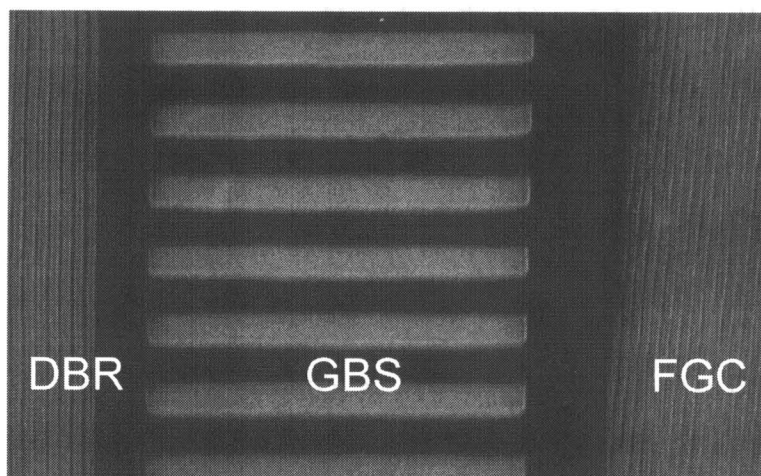
次に量子井戸の無秩序化による低損失受動導波路形成のため、LD/PD 領域以外に選択的に Si イオン(加速エネルギー 120 keV, ドーズ $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$)を注入した。

(iv) 再成長

2 回目のエピタキシャル成長により、グレーティング層上に上部クラディング層、コンタクト層を 750 °C で再成長させると同時に、アニールによって Si イオン注入領域の量子井戸を無秩序化した。これにより導波路吸収損失は、無秩序化しないときと比較して 1 桁程度低い 4 cm^{-1} となる。



全体写真



拡大写真

図 2.14 グレーティング素子の SEM 写真

(v) 電極形成、電氣的・光学的分離

LD の電流狭窄用リッジ構造を形成した。LD/PD 間の電氣的・光学的分離のために、LD 周辺のコンタクト層を除去し PD 周辺に Cl_2 を用いた RIBE エッチングで深さ $2.5\ \mu\text{m}$ の溝を形成した[32]。電流狭窄用 SiO_2 膜を形成し、LD、PD、FGC 領域の窓開けを行った。次に Cr/Au の蒸着およびリフトオフで p 型電極を形成した。このとき光学的分離のため、PD の導波光入射面以外の側面を電極で覆う構造とした。基板を約 $200\ \mu\text{m}$ 厚に研磨し、Au-Ge/Au を裏面に蒸着し n 型電極を形成した。最後に基板を $7 \times 2\ \text{mm}^2$ のチップサイズに劈開した。図 2.15 に LD/PD 周辺写真を示す。

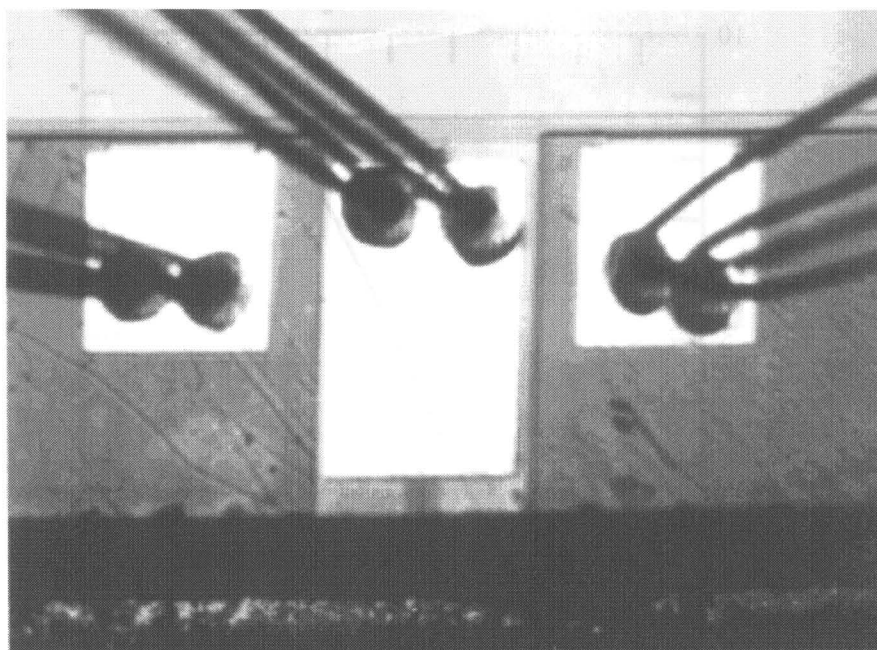


図 2.15 LD/PD 周辺写真

2.5 光学実験

2.5.1 モノリシック光集積位置/変位センサ

LD 後方端面から測定した出力光パワーの注入電流依存性と、出力光パワー 3 mW のときの発振スペクトルを図 2.16 に示す。しきい値 (28 mA) から出力光パワー 10 mW まで、波長 0.855 μm 付近で安定な単一モード発振が得られていることを確認した。また LD/PD 間の絶縁抵抗は 1 G Ω 以上と測定された。このデバイス構成では導波光伝搬領域には大きな屈折率境界は存在しないので戻り光の影響は無視できると考えられ、実際にモノリシック集積化したことによる LD 発振特性の劣化はほとんど見られなかった。

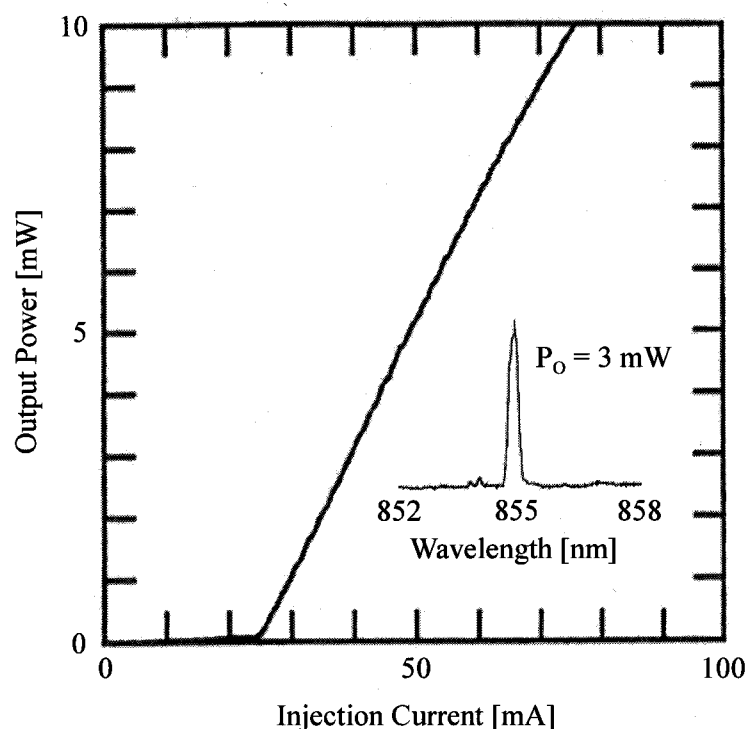


図 2.16 出力光パワーの注入電流依存性と発振スペクトル

LD 注入電流が 60 mA のとき、LD 後方端面で測定した出力パワーは約 7 mW であった。このとき図 2.17 に示すように、FGC から 0.62 mW の平行な主ビームと

その両脇に TGFBS の回折による 2 本の 0.18 mW の副ビームが得られた。これから TGFBS の回折効率は 37% と見積もられた。

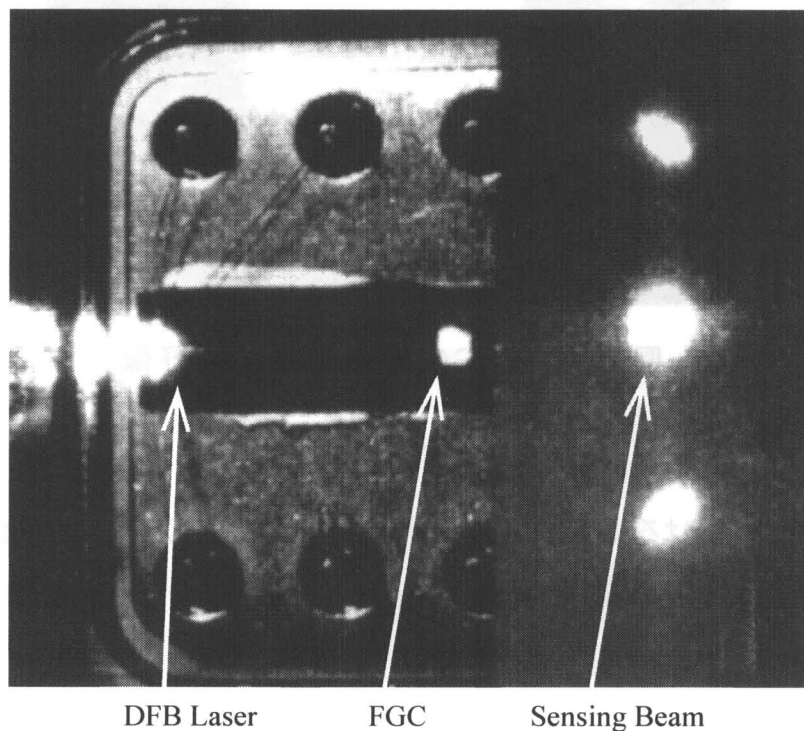


図 2.17 FGC からの出射光

図 2.18に FGC からの出射平行光の遠視野像を示す。ビーム広がり理論値 4.9 mrad (出射面に平行) $\times 4.3 \text{ mrad}$ (垂直) に対し $5.9 \text{ mrad} \times 4.7 \text{ mrad}$ と測定され、回折限界の 1.1-1.2 倍という良好な結果が得られた。

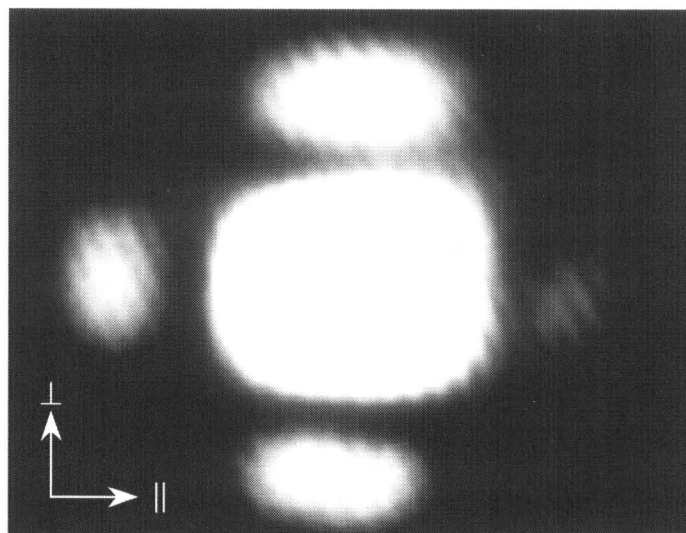


図 2.18 FGC 出力光の遠視野像

また FGC 面における主ビームの強度分布 (図 2.19) から放射損失係数 α_r は 0.9 mm^{-1} が得られ、理論値 0.94 mm^{-1} によく一致した。これから作製した FGC の出力回折効率は 40 % と見積もられた。

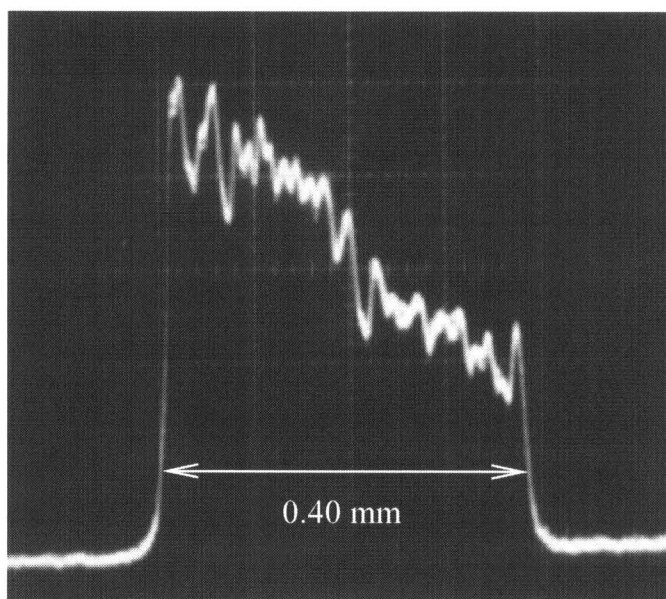


図 2.19 近視野像の光強度分布 (導波光伝搬方向)

次に piezo アクチュエータに取り付けた可動鏡を用いて変位センサ特性を調べた。その実験系を図 2.20 に示す。MIOPS から約 20 mm 離れたところに可動鏡を設置し、これを微動したときの光電流の周期的変化を図 2.21 に示す。このとき LD/PD 間の光学的分離が不十分であったために、測定した光電流は約 10 nA の定常成分を含んでいた。可動鏡の変位とともに $0.43\text{ }\mu\text{m}$ ($= 1/2$ 波長) 周期、振幅 1.0 nA の光電流変化が得られ、センサ機能を確認できた。約 10 cm の距離まで、ほぼ同様の信号が得られた。この周期と作動距離はハイブリッド型センサ [24] で得られていた結果と同等である。しかしモノリシック型では受動導波路部の損失が大きいため、光電流レベルとコントラストは 1 桁程度低い値に留まった。

なお本デバイスのような光波長を基準として測定がなされる干渉計型センサでは LD 発振波長の温度依存性により測定精度が直接に制限されるので、作動距離が長く安定に動作するデバイスを実現するには高精度な温度制御を行う必要がある。また PD 位置の変更やその周辺のエッチング領域の変更など、完全な LD/PD 間の光学的分離を行うことにより、より明瞭なコントラストが得られ長い作動距離を実現できる。さらに TFDBR の左右の領域を z 方向に $1/8$ 周期ずらすことにより、左右の PD から得られる干渉信号に $1/4$ 周期の位相差を与えることができ、変位量だけでなく変位方向も検出できるデバイスが実現できる。

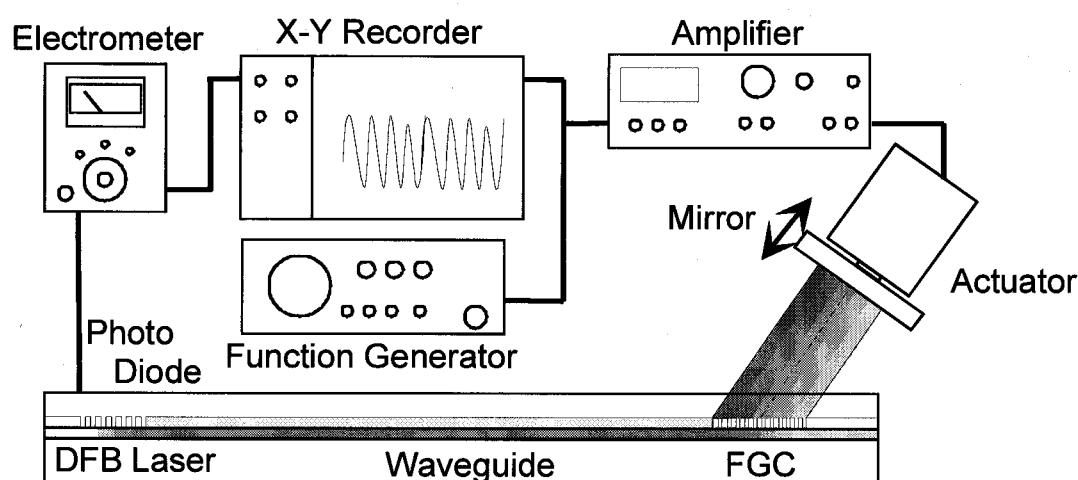


図 2.20 光学実験系

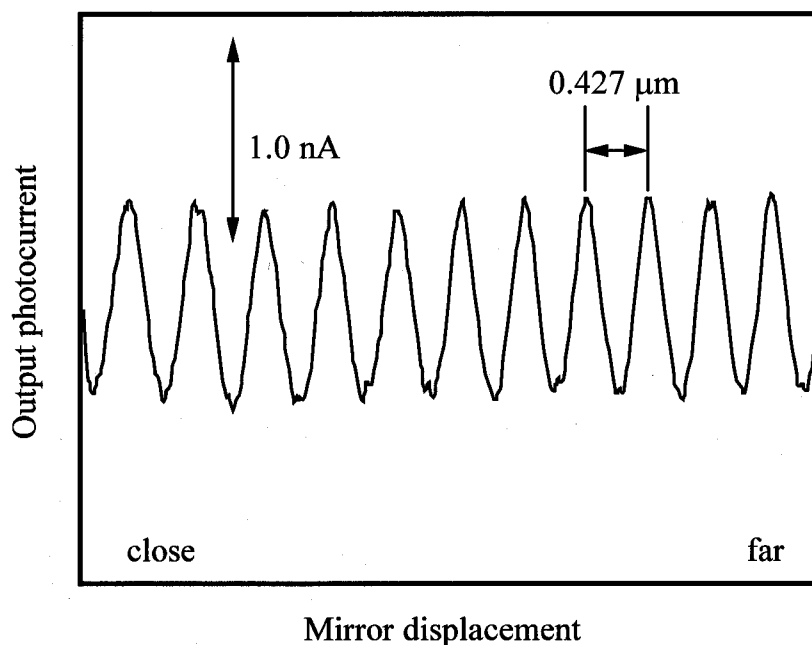


図 2.21 可動鏡変位に対する光強度変化

2.5.2 モノリシック光集積ディスクピックアップ

LD から 23 mA のしきい値で、波長 $0.853 \mu\text{m}$ の安定単一モード発振が得られた。LD への注入電流 60 mA のとき約 5 mW の LD 出力パワーが得られ、FGC からは 0.2 - 0.3 mW の出射光パワーが得られた。注入電流 39 mA のときの集光スポットの近視野像と強度分布を図 2.22 に示す。スポットサイズは理論回折限界 $2.17 \mu\text{m}$ (出射面に平行) $\times 1.88 \mu\text{m}$ (垂直) に対し、 $2.4 \mu\text{m} \times 2.2 \mu\text{m}$ と測定された。また焦点隔差は $35 \mu\text{m}$ であった。なおハイブリッド型 IODPU[33]では、開口 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 、焦点距離は 1.7 mm の仕様ではほぼ理論回折限界に近い $1.4 \mu\text{m}$ 程度のスポットサイズが得られている。また集光スポットの両側に TGFBS の回折による 2 つのスポットが観察され、TGFBS の機能が確認された。

光ディスクの代わりに可動鏡を用いて、図 2.20 と同様の実験系で予備的光学実験を行った。出射方向に沿う可動鏡の変位に対する光電流変化を図 2.23 に示す。LD/PD 間の不十分な光学的分離による約 5 nA の定常成分を含んでいたが、焦点位置での 0.03 nA の光電流の増加が得られた。FGC/可動鏡/FGC/TGFBS を通った LD からの光を PD で検出することができ、これにより

MIODPU 実現に向けての第 1 歩が達成できた。

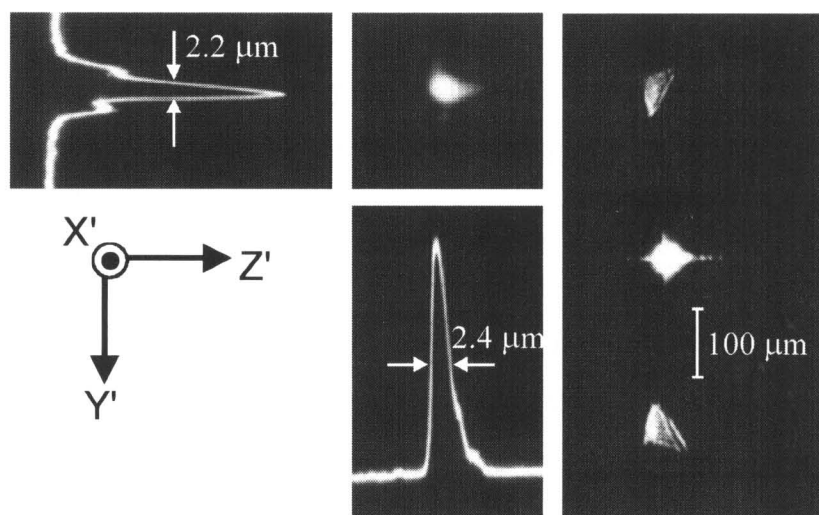


図 2.22 FGC 出力光の近視野像と強度分布

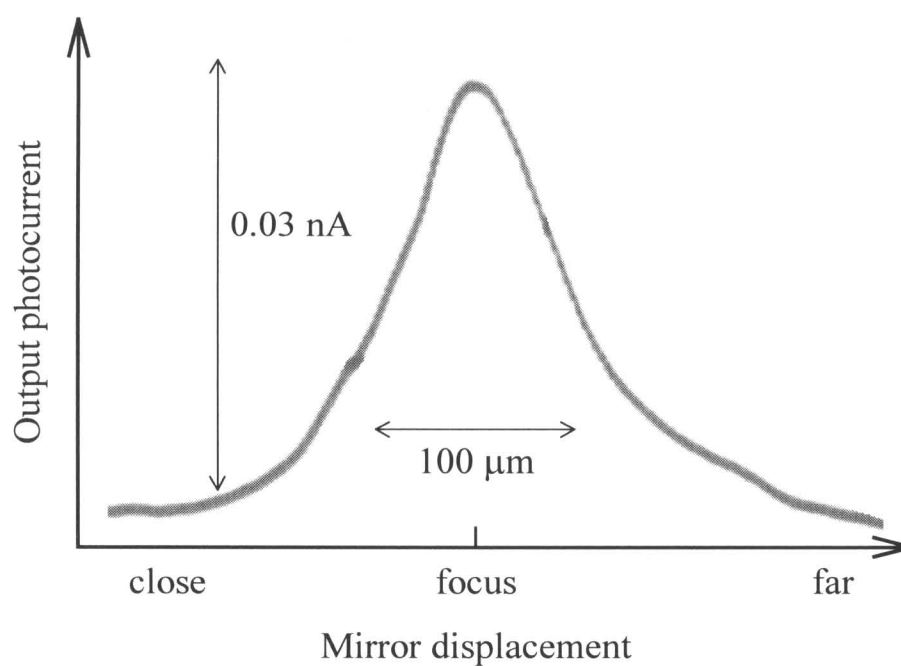


図 2.23 可動鏡変位に対する光電流変化

2.6 結言

グレーティング素子と量子井戸レーザを半導体導波路上にモノリシックに集積化したデバイスである、光集積位置/変位センサと光集積ディスクピックアップの設計、作製およびその評価を行った。前者から周期 $0.43\ \mu\text{m}$ の光電流変化が得られ、1 チップで完全に機能するモノリシック光集積デバイスの実現に成功した。これにより種々の機能を有する光集積デバイス実現の可能性が見い出された。

今後の課題として、グレーティング素子作製プロセスの改善による理論予測効率・集光特性の達成、LD/PD 間の遮光の改良による光学的分離の改善、受動導波路の損失低減等による光電流レベルの増大などがある。ディスクピックアップでは実際の読み出しに必要なスポット径と作動距離は原理的には開口を拡大した設計で実現できるが、デバイスが大型化するとともに精度要求もさらに厳しくなるので、上記の改善とともに新たなデバイス構成法も含めて検討を行う。

第 3 章 グレーティング結合器集積化高出力半導体レーザー

3.1 緒言

化合物半導体基板上にレーザー(マスター)発振器(MO)とパワー増幅器(PA)を集積化したモノリシック MOPA レーザ(図 3.1)は、小型で高出力な光源として、光通信や光計測、光ファイバー増幅器・固体レーザー・非線形デバイスのポンプ光源などへの応用が期待されている。これまでに分布ブラッグ反射型(DBR)レーザーとテーパ型パワー増幅器からなる MOPA が報告されている[34]-[36]。しかしこれらの端面出射型デバイス出力光は縦横異なる曲率の発散光であり、この出力光を平行または集光ビームとして利用するためには複雑な外部レンズ系が必要である。

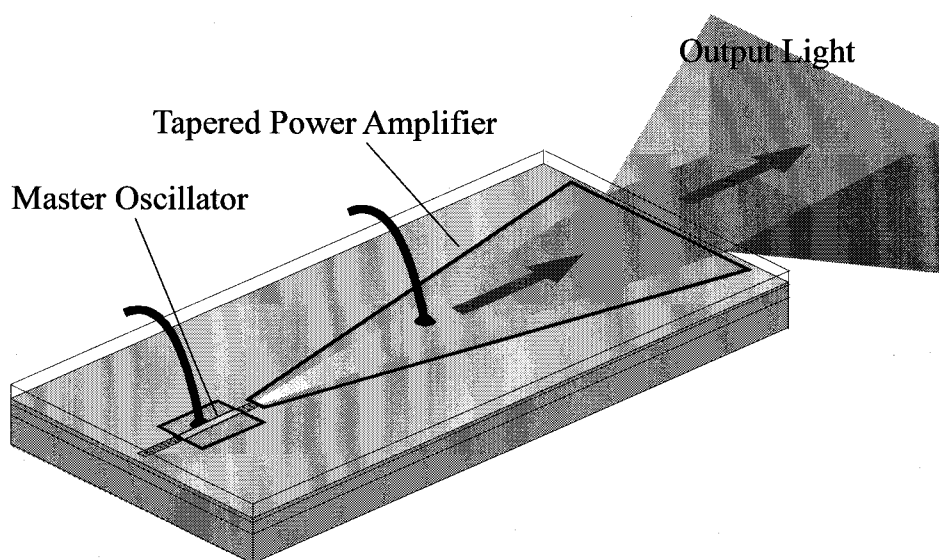


図 3.1 モノリシック MOPA レーザ

グレーティング出力結合器(GO)は導波光を自由空間に任意の波面で出力することが可能であり、これを集積化すれば出力光を平行または集光ビームとして取り出せるので利用が容易になる。これまでに平行ビーム出射型[29]、1点または複数点への集光ビーム出射型[30]、[37]など各種の GO を用いたモノリシック光

集積デバイスが報告されている。また MOPA と直線型 GO の集積化[38]や、MOPA と平行ビーム出力用の曲線型 GO の集積化[39]も報告されている。これらの MOPA に用いられた DBR レーザや分布帰還型 (DFB) レーザの作製には、2 度のエピタキシャル成長が必要であった。しかし表面グレーティングを用いた DBR レーザ[40]や表面 GO を採用することにより再成長の必要がなくなり、光集積デバイス作製プロセスの大幅な簡略化が図れる。

本章では新規のモノリシック光集積デバイスとして、1 度のエピタキシャル成長で作製でき、その出力を平行ビームとして取り出せるグレーティング結合器集積化高出力半導体レーザ[41]を提案する。デバイスを構成する各素子の設計、特にビーム伝搬法を用いた理論シミュレーションによる PA 部の設計と PA 内で生じる波面歪を補正する機能を付加した GO の設計について述べる。これらをモノリシック集積したデバイスを作製、評価し、その結果について検討を行う。

3.2 デバイス構成

DBR レーザ (MO)、テーパ型パワー増幅器 (PA) および平行出射型グレーティング出力結合器 (GO) からなる集積化レーザを図 3.2 に示す。デバイスはリッジ構造の活性素子 (MO 活性チャンネルとテーパ型 PA) と、プレーナ導波路上の受動素子 (曲線表面 DBR と GO) から構成される。MO からの出力光がテーパ型 PA で増幅され広がりながら伝搬し、GO から外部に平行ビームとして出射される。また GO を適当に設計することにより、任意の波面を出力したり PA 内で生じる波面歪を補正する機能を付加することができる。

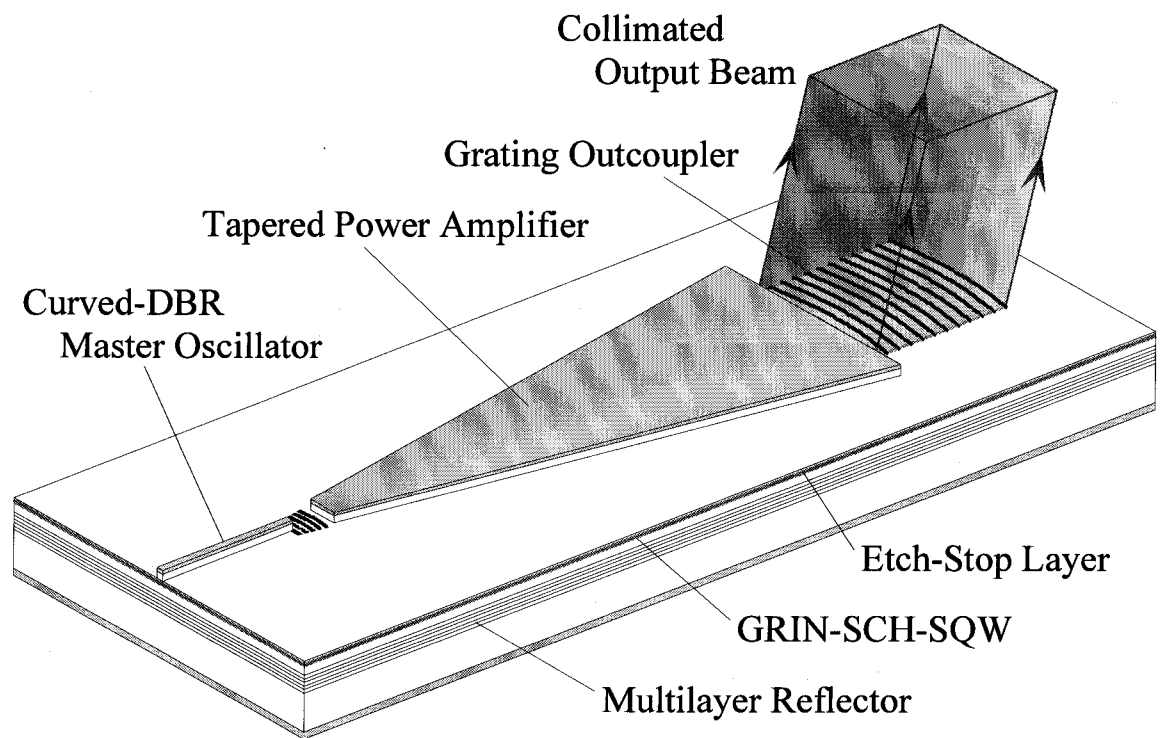


図 3.2 グレーティング結合器集積化高出力半導体レーザ

デバイスには、図 3.3に示した InGaAs-AlGaAs 分布屈折率分離閉じ込め (GRIN-SCH) 単一歪量子井戸 (SQW) 導波路構造[42]を使用した。これは GaAs エッチストップ層[43]と 10 対の GaAs-AlGaAs 多重反射層[42]を含む。表面グレーティング素子は、コンタクト層、上部クラディング層をエッチング除去したプレーナ導波路上に作製する。また PA から GO に入射した導波光は空気側および基板側への 2 つのビームに回折されるが、多重反射層を適当な位置に設けることで基板側への回折光を空気側への回折光と同位相になるよう反射する構造とする。このような最適化により、空気側分配比の高い GO を設計した[42]。

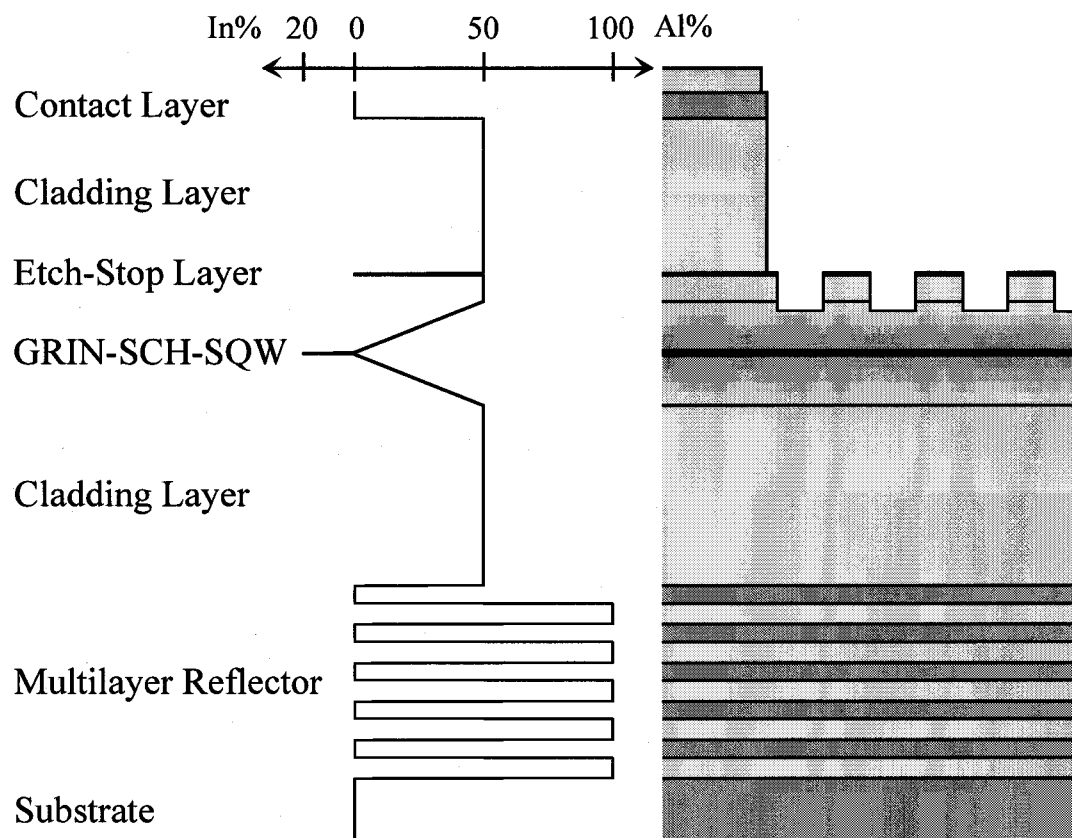


図 3.3 GRIN-SCH-SQW 導波路/グレーティング構造

3.3 各素子の設計

3.3.1 曲線 DBR 発振器 (MO)

DBR レーザは波長安定性に優れ、モノリシック光集積デバイスの光源として広く利用されている。この種のレーザの作製には 2 度のエピタキシャル成長が必要であったが、表面グレーティングを用いることで作製プロセスの簡略化が図れる。これまでにブロードエリア活性チャンネルと直線表面グレーティングからなる DBR レーザ[44]や、狭活性チャンネルと横閉じ込め構造を有する直線表面グレーティングからなる DBR レーザ[45]などが報告されている。

本研究では、図 3.4に示す狭活性チャンネルと曲線表面グレーティングから構成される DBR レーザ[40]を提案し、これを MO として採用する。狭活性チャンネルは単一横モード発振を実現し、活性チャンネル端からの発散導波光は大き

な広がり角を持つ。MOPA レーザ[36]やモノリシック光集積センサ[29],[30]を含む種々の光集積デバイスにおいて、この大きな導波光広がり角は PA 内での利得飽和の緩和やデバイス長の短縮などの点で有利である。また発散導波光に対し高い反射率が得られるよう、直線ではなく曲線の DBR グレーティングを採用する。このレーザは 1 度のエピタキシャル成長で作製でき、種々のモノリシック光集積デバイスの光源に適している。

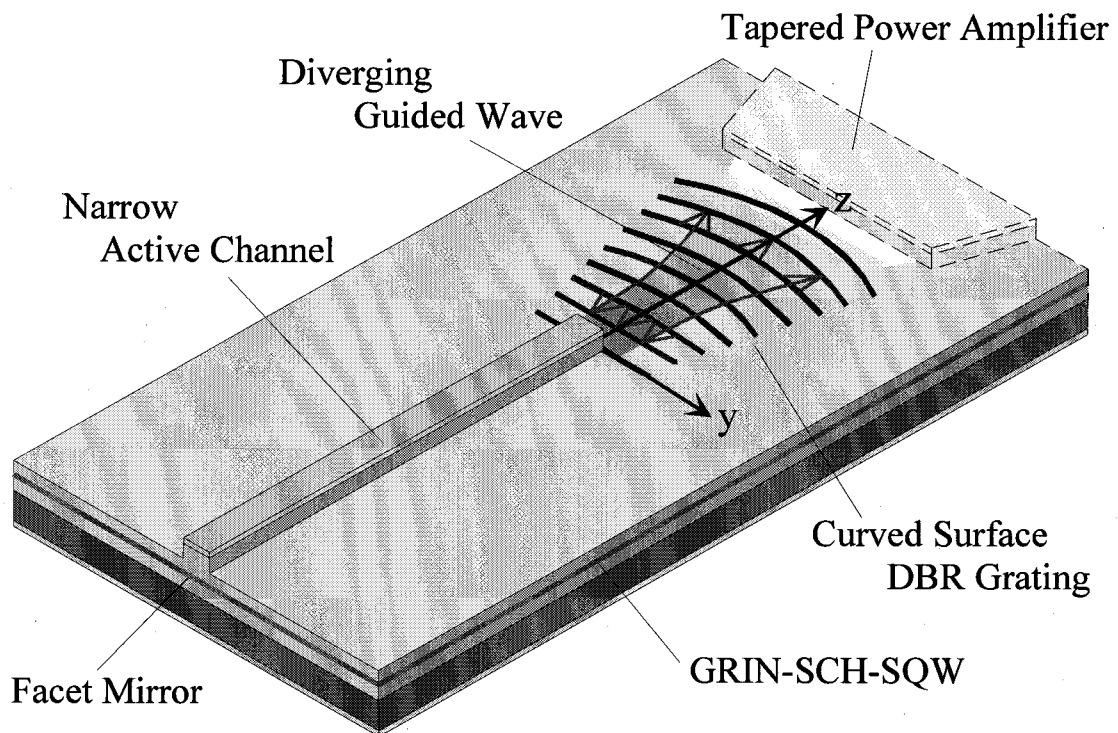


図 3.4 曲線表面グレーティングを用いた DBR レーザ

発散導波光は、活性チャンネル端での横方向強度分布の $1/e^2$ 全幅をビームウエスト $2w_0$ とする二次元ガウシアンビームに近似できる。発振波長 $\lambda = 980 \text{ nm}$ 、活性チャンネル幅を $2.0 \text{ }\mu\text{m}$ とすると、 $2w_0$ および導波光広がり角 (パワーの $1/e^2$ 全角) はそれぞれ $1.62 \text{ }\mu\text{m}$ 、 6.6° となる。ここで曲線 DBR の形状式は、活性チャンネル端からの発散導波光と、その波面を反転した集束導波光の位相整合を考

慮することで得られる。 q 次の曲線 DBR グレーティングの第 m 番目ラインのパターンは、

$$2kz + \frac{kzy^2}{z^2 + (kw_0^2/2)} - \tan^{-1}\left(\frac{2z}{kw_0^2}\right) = 2qm\pi \quad (m, q: \text{integer}) \quad (3.1)$$

で表される。ここで $k = 2\pi n_{\text{eff}}/\lambda$ 、 n_{eff} は実効屈折率である。座標は図 3.4 に従うものとする。ただし DBR グレーティングのブラッグ波長を最大利得波長よりわずかに長波長側にずらし、受動導波路損失の低減を図る。

グレーティング深さは 150 nm とし、作製の容易さからグレーティング次数を 3 次とした。このとき 3 次の結合係数 κ は 140 cm^{-1} と計算され、グレーティング領域の吸収損失 α_L は 76 cm^{-1} [46] と見積もられる。反射率 R および透過率 T は、DBR 長を L とすると次式で求まる [47]。

$$R = \left| \frac{\kappa \sinh(\gamma L)}{\gamma \cosh(\gamma L) - \alpha \sinh(\gamma L)} \right|^2 \quad (3.2)$$

$$T = \left| \frac{\gamma}{\gamma \cosh(\gamma L) - \alpha \sinh(\gamma L)} \right|^2 \quad (3.3)$$

$$\gamma^2 = \alpha^2 + |\kappa|^2, \quad \alpha = -\alpha_L/2$$

反射率 R 、透過率 T の DBR 長依存性を図 3.5 に示す。これから理論反射率および透過率がそれぞれ 9 %、75 % となるよう、DBR 長を 24 μm と決定した。本来、高いサイドモード抑圧比 (SMSR) が得られ、また破局的光学損傷は多くの場合劈開面近くで起こることから、両側に DBR を用いて共振器を構成することが望ましい。しかし DBR グレーティング作製誤差を考慮すると、DBR 長を 100 μm とし、ても図 3.5 通りの 50 % 程度の反射率を得ることは困難であるので、PA 側の DBR グレーティングと劈開面で共振器を構成するものとした。このとき PA 側出力光パワーの劈開面側出力光パワーに対する比は 1.9 と見積もられる。

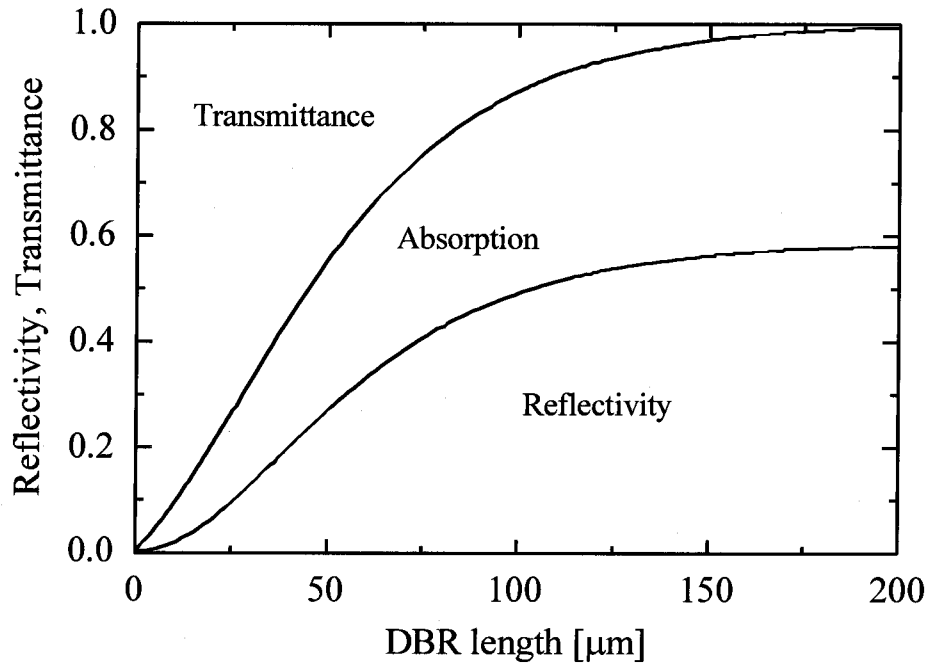


図 3.5 反射率と透過率の DBR 長依存性

また作製した DBR の反射率は、劈開面側出力光の外部量子効率を測定することで求められる。劈開面側出力光および PA 側出力光の外部量子効率をそれぞれ $\eta_{\text{diff } c}$ 、 $\eta_{\text{diff } g}$ とし、劈開面および DBR の反射率をそれぞれ R_c 、 R_g とすると、これらの関係式は実験的に得られる内部量子効率 η_i 、内部損失 α_i および DBR 長 L を用いて次式のように表される。

$$\eta_{\text{diff } c} + \eta_{\text{diff } g} = \eta_i \frac{\frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_c R_g} \right)}{\alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_c R_g} \right)} \quad (3.4)$$

$$\frac{\eta_{\text{diff } c}}{\eta_{\text{diff } g}} = \frac{1 - R_g}{1 - R_c} \sqrt{\frac{R_c}{R_g}} \quad (3.5)$$

3.3.2 テーパ型パワー増幅器 (PA)

PA の電極形状を最適化しデバイスの性能予測を行うために、理論シミュレーション[48]を行った。

(i) 解析モデル

PA 中で TE モードの導波光が増幅されながら伝搬する過程を、ビーム伝搬法 (BPM) を用いて計算する。図 3.6 に各素子の位置関係および座標軸を示す。導波路構造内の電界を $E(x,y,z) = E(x)E(y,z)$ 、厚み方向のモード界分布を $E(x)$ とし、PA 面内の分布 $E(y,z)$ を求める。

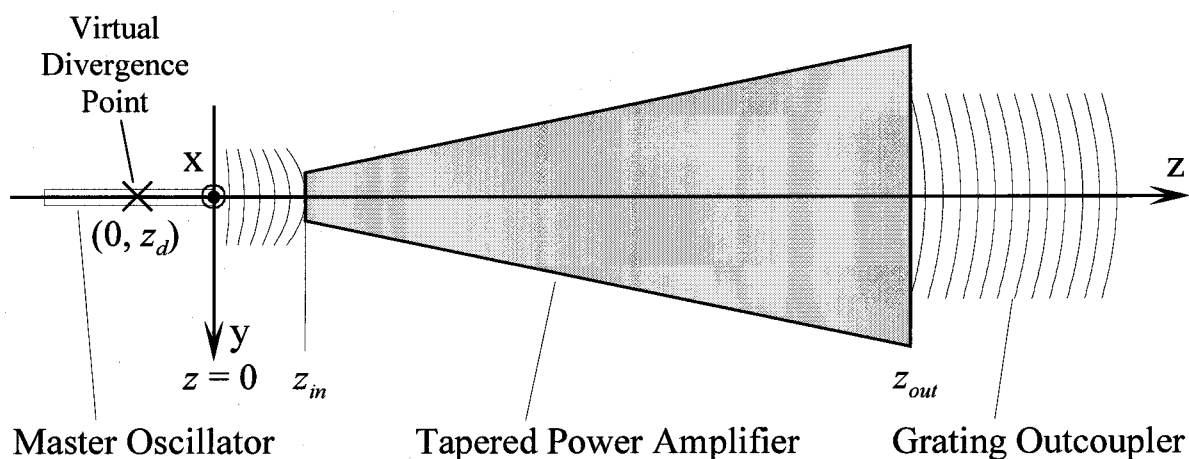


図 3.6 各素子の位置関係

利得飽和を考慮に入れた量子井戸導波路のモード利得分布 $\gamma_m(y,z)$ は、導波光パワー密度 $P(y,z) = |E(y,z)|^2$ を用いて次式で表される。但し注入電流密度 J は PA 内で一定であると仮定した。

$$\gamma_m(y,z) = \frac{\Gamma g_0 \ln(J/J_0)}{1 + \frac{P(y,z)}{P_{sat}}} \quad (3.6)$$

上式右辺の分子は非飽和利得の対数関数近似表現であり、 g_0 は利得定数、 Γ

は閉じ込め係数、 J_0 は透明化電流密度である。分母は導波光パワー増大による利得飽和を表しており、飽和光パワー密度 P_{sat} は $P \rightarrow \infty$ で $\gamma_m P = (\eta_i \hbar \omega / q)(J - J_0)$ であるべきなので次式のように表される。

$$P_{sat} = \left(\frac{\eta_i \hbar \omega}{q} \right) \frac{(J - J_0)}{\Gamma g_0 \ln(J/J_0)} \quad (3.7)$$

ここで $\hbar \omega$ は光子エネルギー、 q は電荷素量、 η_i は内部微分量子効率である。

また PA 内では、電氣的発熱 Q_{elect} 、光吸収による発熱 $Q_{abs}(y, z)$ および誘導放出による発熱 $Q_{stim}(y, z)$ があり、不均一な温度分布が生じる。各 BPM ステップでの温度分布 $T(y, z)$ は、 z での総発熱量分布 $Q(y, z)$ と z 軸に平行な線熱源に対するインパルスレスポンス $f_T(y)$ を用いて、近似的にこれらのコンボリューション積分で求めることができる。

$$T(y, z) = f_T(y) * Q(y, z) \quad (3.8)$$

$$Q(y, z) = Q_{elect} + Q_{abs}(y, z) - Q_{stim}(y, z) \quad (3.9)$$

$$Q_{elect} = \left(\frac{\hbar \omega}{q} + V_d + \rho J \right) J \quad (3.10)$$

$$Q_{abs}(y, z) = \alpha_L P(y, z) \quad (3.11)$$

$$Q_{stim}(y, z) = \gamma_m(y, z) P(y, z) \quad (3.12)$$

ここで V_d はオフセット電圧、 ρJ は直列抵抗による電圧降下、 α_L は導波路吸収損失である。

このような利得分布と温度分布により導波路の屈折率も不均一となり、複素実効屈折率分布 $n_{eff}(y, z)$ は次式で与えられる。

$$n_{eff}(y, z) = n_{eff}^{(0)} + \frac{1}{2k_0} [\gamma_m(y, z)(j+b) - j\alpha_L] + \alpha_T T(y, z) \quad (3.13)$$

ここで $n_{eff}^{(0)}$ は透明化時の実効屈折率、 k_0 は真空中の波数、 $b (< 0)$ はアンチガイディングファクター、 α_T は温度係数である。

各 BPM ステップ間の光電界の変化は、 dz をステップ幅、 \mathcal{F} を y に関するフーリエ変換として次式で計算される。

$$E(y, z + dz) = \mathcal{F}^{-1} [\mathcal{F} [E(y, z)] A] B \quad (3.14)$$

$$A = \exp \left[-j \sqrt{k_0^2 n_{eff}^{(0)2} - \eta^2} dz \right] \quad (3.15)$$

$$B = \exp \left[-jk_0 (n_{eff}(y, z) - n_{eff}^{(0)}) dz \right] \quad (3.16)$$

ここで A は自由伝搬の効果、 B は PA 動作に伴う複素振幅変化を表している。 η は y 方向波数である。初期条件として $E(y, 0)$ を MO 活性チャンネル端での横方向モード分布をガウス分布で近似した分布で与え、式 (9) を繰り返し適用することにより、各ステップの電界分布および PA 出力の光強度分布 $P_{out}(y) = |E(y, z_{out})|^2$ を計算できる。なお DBR 領域 ($0 < z < z_{in}$) は、 $\gamma_m = 0 \text{ cm}^{-1}$ 、 $\alpha_L = 76 \text{ cm}^{-1}$ の受動導波路として取り扱った。PA 長は $z_{out} - z_{in}$ である。

(ii) 出力波面解析

PA 出力光の波面は PA 内の不均一な屈折率分布によって歪みが生じ、MO の活性チャンネル端から発散する二次元球面波ではなく、図 3.6 に示した仮想発散点 (VDP) ($0, z_d$) からの二次元球面波に近いものとなる。PA 出力光波面の位相分布を $\Phi(y) = \arg\{E(y, z_{out})\}$ とし、($0, z_d$) からの 2 次元球面波の $z = z_{out}$ での位相分布を $\Phi_{z_d}(y)$ とすると、仮想発散点は次式の荷重 RMS 波面差 $\Delta\Phi_{RMS}(z_d)$ を最小とする z_d を計算することで得られる。

$$\Delta\Phi_{RMS}(z_d) = \left\{ \frac{\int P(y) \Delta\Phi_{z_d}(y)^2 dy}{\int P(y) dy} - \left(\frac{\int P(y) \Delta\Phi_{z_d}(y) dy}{\int P(y) dy} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (3.17)$$

$$\Delta\Phi_{z_d}(y) = \Phi(y) - \Phi_{z_d}(y)$$

ここで $\Delta\Phi_{RMS}(z_d)$ の最小値は PA 出力光の波面収差を表す。

(iii) シミュレーション結果

デバイス作製に使用したエピタキシャル基板に対して実測または推定したパラメータ (表 3.1) を用い、種々の PA 電極形状および動作条件について理論シミュレーションを行った。これから高い出力光パワーと収差の少ない出力波面が得られる電極形状として、PA 増幅器長および入力端幅、出力端幅をそれぞれ $2000 \mu\text{m}$ 、 $20 \mu\text{m}$ 、 $600 \mu\text{m}$ と決定した。PA 入力光パワー P_{in} をパラメータとしたときの、

PA 出力光パワーの PA 注入電流依存性を図 3.7 に示す。 $P_{in} = 10 \text{ mW}$ と 100 mW のときの出力光パワーの比は、入力光パワーの比に対してかなり小さい。これは増幅器中の利得飽和が原因であり、これから P_{in} は 10 mW 程度が適当である。さらに P_{in} に多少の変動がある場合でも、これが PA 出力光パワーに与える影響は小さいことが予想される。PA 出力端での光強度分布を図 3.8 に示す。不均一な利得(光軸付近で小さく、端で大きい)のために増幅された導波光は広がり、上記の形状の PA では $1/e^2$ 全幅は $400 \text{ }\mu\text{m}$ 余りになることがわかった。 $P_{in} = 10 \text{ mW}$ 、PA 注入電流 $2.0 - 3.0 \text{ A}$ のとき、 $440 - 870 \text{ mW}$ の PA 出力光パワーが得られることがわかった。

表 3.1 理論シミュレーションに用いた PA パラメータ

Parameter	Symbol	Value	Unit
Wavelength	λ	980	nm
Effective refractive index	$n_{eff}^{(0)}$	3.34	
Effective gain factor	Γg_0	30.0	cm^{-1}
Transparency current density	J_0	58.7	A/cm^2
Internal differential quantum efficiency	η_i	0.87	
Internal loss in active region	α_L	5.27	cm^{-1}
Loss in DBR region	α_L	76	cm^{-1}
Offset voltage	V_d	0.2	V
Series resistance	ρ	1.5×10^4	$\Omega\text{-}\mu\text{m}^2$
Antiguinding factor	b	-2.5	
Index thermal coefficient	α_T	2.4×10^{-4}	K^{-1}

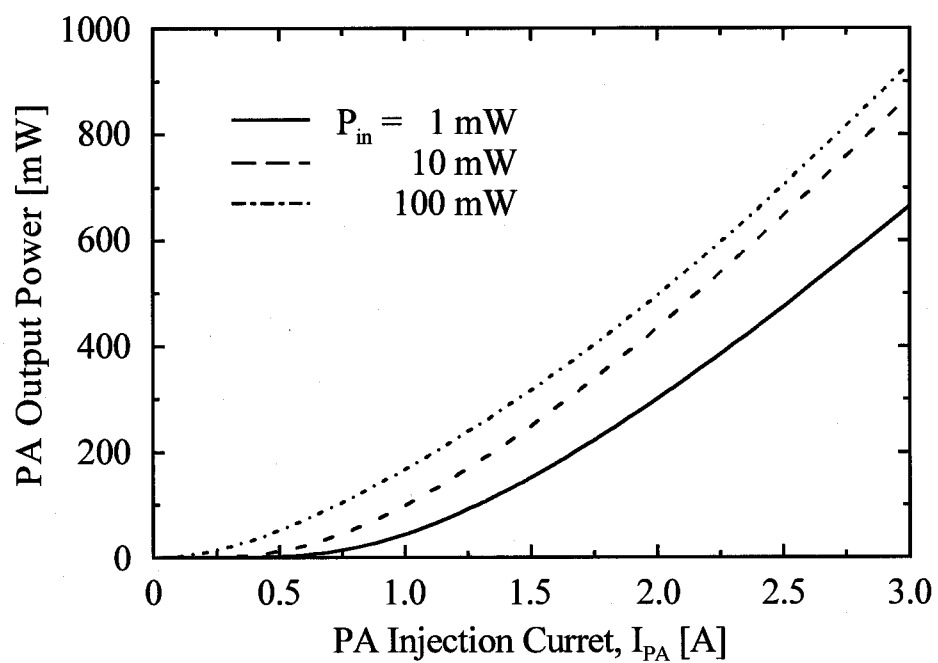


図 3.7 PA 出力光パワーの PA 注入電流依存性

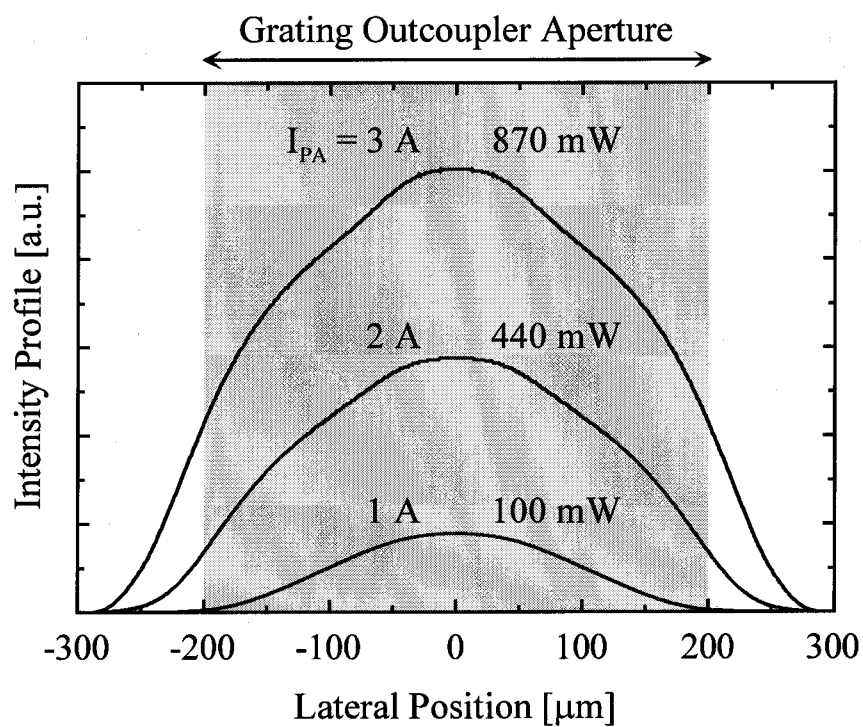


図 3.8 PA 出力端での光強度分布

またシミュレーション結果から、VDP は主として熱レンズ効果により MO 活性チャンネル端 $(0,0)$ より PA から遠ざかる方向 ($z_d < 0$) へ移動し、その移動距離 $|z_d|$ は PA 注入電流を増加すると増大することがわかった。そこでこの移動を見込んで適当に選んだ点 $(0,\delta)$ から発散する二次元球面波を自由空間の平行ビームに無収差波面変換する GO を設計すれば、高い PA 注入電流の領域でも良好な平行ビーム出力が期待できる。このとき、GO から出力される 3 次元波面の RMS 波面収差は PA 出力波面と点 $(0,\delta)$ から発散する二次元球面波との RMS 波面差に対応する。この RMS 波面差の PA 注入電流依存性を図 3.9 に示す。通常のレンズにおいて RMS 波面収差が $(\lambda/2\pi) \Delta\Phi_{RMS} < 0.07\lambda$ ならば無収差と見なせる[49]が、この判定基準は GO にも適用できると考えられる。これから $\delta = -75 \mu\text{m}$ の VDP 移動補正を行った GO を作製すれば、PA 注入電流 1.0 A から 3.0 A の範囲で、波面収差が無視できる良好な平行ビーム出力が得られることがわかった。

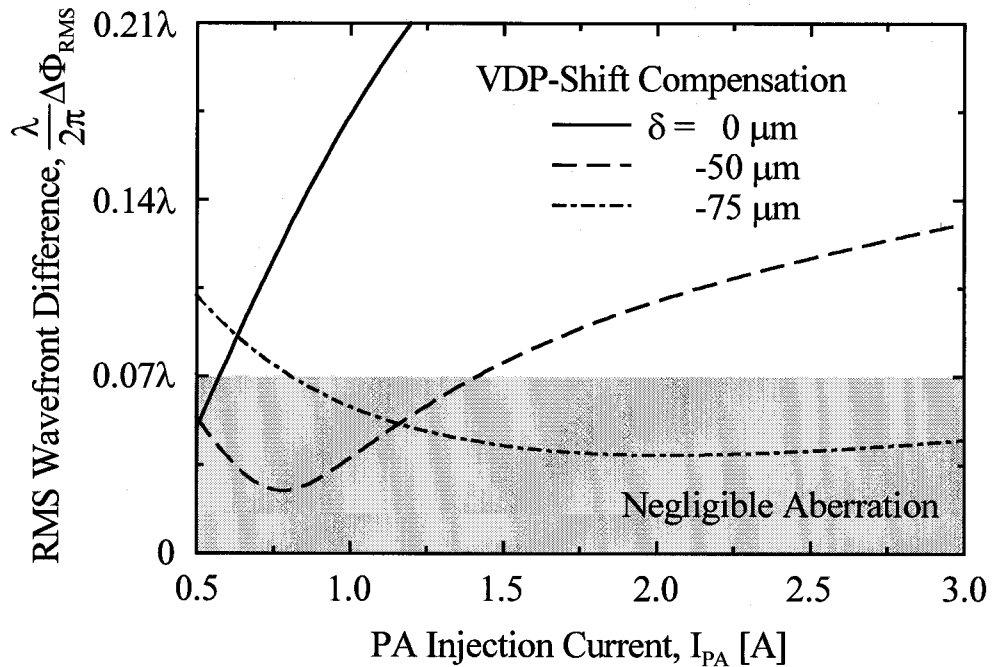


図 3.9 RMS 波面差の PA 注入電流依存性

3.3.3 グレーティング出力結合器 (GO)

PA 出力光を1次の回折により平行ビームとして外部に出射する開口 $400\ \mu\text{m} \times 400\ \mu\text{m}$ の GO の設計を行った。図 3.10に GO の断面構造を示す。作製プロセス簡略化のため、グレーティング深さを曲線 DBR グレーティングと同じ $150\ \text{nm}$ とした。これから GO の放射損失係数 α_{rad} および空気側への分配比 P_{air} は、多重反射層を考慮に入れそれぞれ $150\ \text{cm}^{-1}$ 、97 %と計算された。グレーティング領域の吸収損失 α_{abs} を $76\ \text{cm}^{-1}$ と仮定すると、開口長 $L = 400\ \mu\text{m}$ の GO の空気側への回折効率

$$\eta_{air} = \frac{\alpha_{rad}}{\alpha_{rad} + \alpha_{abs}} P_{air} [1 - \exp\{-(\alpha_{rad} + \alpha_{abs})L\}] \quad (3.18)$$

より 64 %と計算された。PA 注入電流 $3.0\ \text{A}$ のとき、図 3.8の光強度分布の内 GO

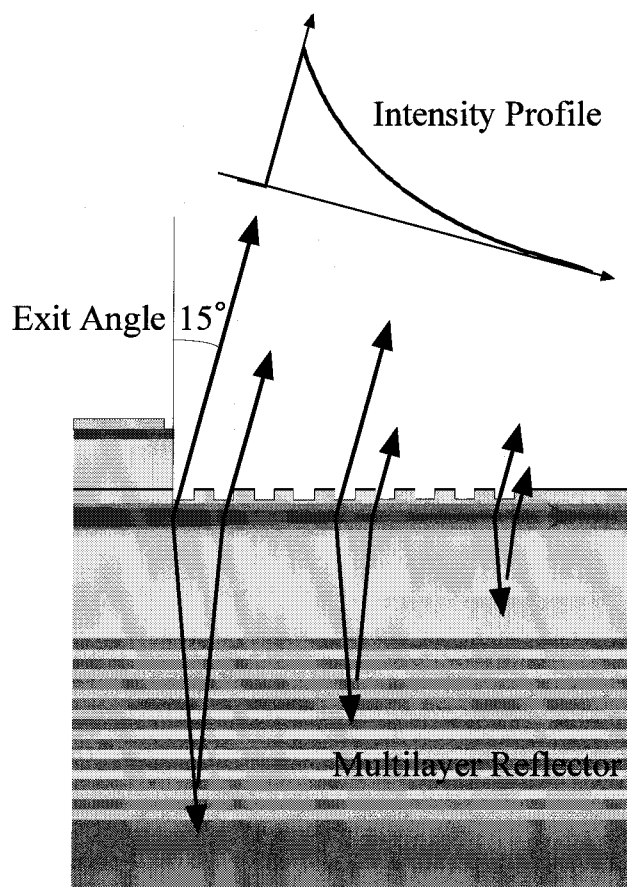


図 3.10 GO 断面構造

開口内に入射する出力光パワーは 90 %であるので、デバイス出力光パワーは 500 mW と見積もられる。なお上記数値の GO 設計では伝搬方向の実効開口長さなわち減衰長 $1/(\alpha_{rad} + \alpha_{abs})$ は L よりもかなり小さいので、この方向の出力ビーム広がり角は L に対する回折限界値よりかなり大きくなる。この広がり角は $\alpha_{rad} + \alpha_{abs}$ を小さな値にすれば低減できるが、現構造では比較的大きな α_{abs} の値で制限されるのでこの方向の広がり角を最小にするための α_{rad} 最適化は行わなかった。

また GO パターンの形状式は式 (2.4) を用い、導波路内焦点を MO 活性チャネル端ではなく VDP 移動を見込んで選んだ点とする。

3.4 デバイス作製

作製したデバイスの仕様を表 3.2 に、その作製プロセスを図 3.11 に示す。作製プロセスを要約すると

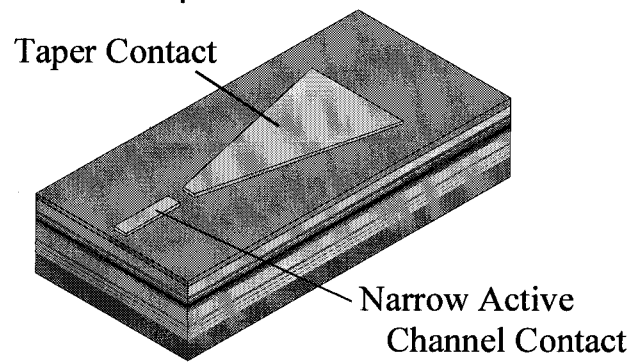
- (1) p 型電極形成
- (2) リッジ構造形成
- (3) グレーティング素子作製
- (4) 電極形成・劈開

となる。図 3.3 の導波路構造の結晶成長は、Epitaxial Products International Ltd. 社に委託して行った。ここでは GO に VDP 移動補正なしのデバイス(内部焦点距離 2226 μm)と-50 μm の移動補正機能を付加したデバイス(同 2276 μm)を作製した。

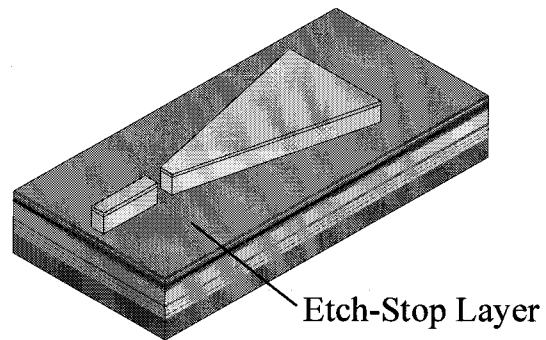
表 3.2 作製したデバイスの仕様

Master Oscillator	Wavelength: 980 nm Active channel: $2.0 \times 600 \mu\text{m}^2$ DBR length: $24 \mu\text{m}$ period: 450 nm (3rd-order) depth: 150 nm Coupling efficiency: 140 cm^{-1}
Power Amplifier	Input width: $20 \mu\text{m}$ Output width: $600 \mu\text{m}$ Amplifier length: $2000 \mu\text{m}$
Grating Outcoupler	Aperture: $400 \times 400 \mu\text{m}^2$ Exit angle: 15° Focal length: 2226 / 2276 μm (int.), ∞ (ext.) Grating period: 326 nm (1st-order) depth: 150 nm Radiation factor: 150 cm^{-1} Directionality into air: 97 %
Chip Size	$1.1 \times 4 \text{ mm}^2$

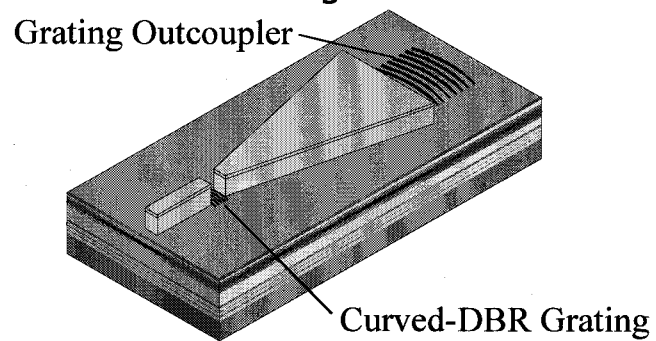
- Fabrication of p-Electrode



- Ridge Formation



- Fabrication of Grating Elements



- Metallization and Cleaving

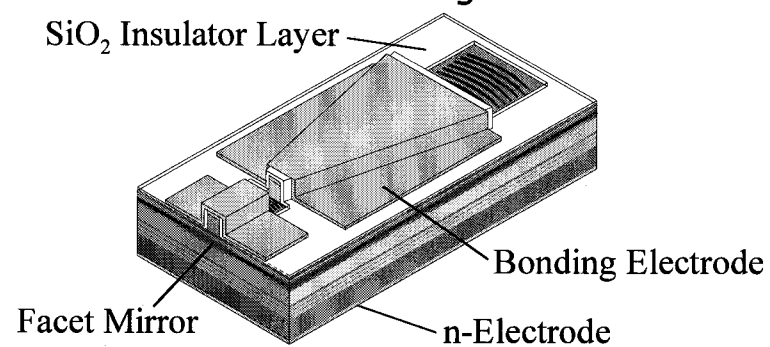


図 3.11 作製プロセス

(i) p 型電極形成

MOVPE 法により図 3.3の構造を成長させた基板に、電子ビームレジストを塗布した。図 3.12のように MO 活性チャンネル電極と曲線 DBR 用位置合わせマーカをステージ移動せず正確な位置関係で描画し、テーパ型 PA 電極をステージ移動して描画した。Cr(10 nm)/Au(200 nm)/SrF₂(100 nm)を蒸着し、リフトオフを行って p 型電極を形成した。当初 Cr/Au のみを蒸着、リフトオフした後、リッジ構造形成のための反応性イオンエッチング(RIE)を行うと、Au 上に堆積物が生成されこれを除去することができないという問題が生じた。そこで SrF₂ 膜を Au の上に蒸着し、RIE 後に SrF₂ 膜ごと堆積物を除去する方法を採用した。

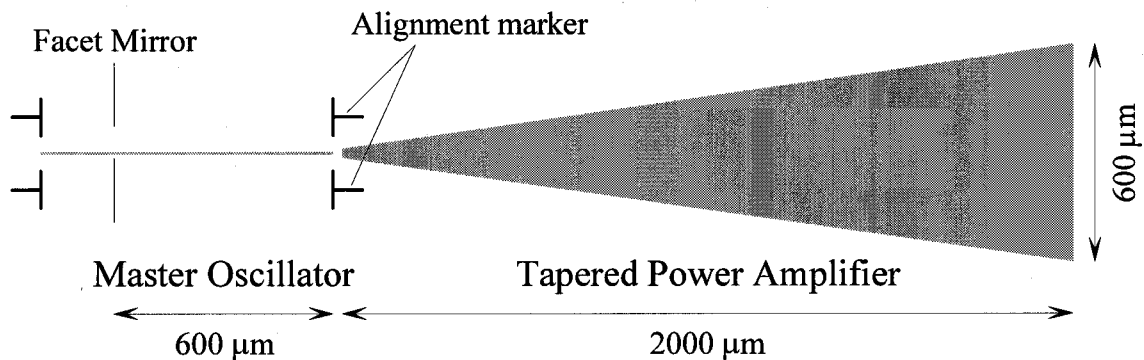


図 3.12 電極パターンと DBR 用位置合わせマーカ

(ii) リッジ構造形成

この電極をマスクとし、堆積物生成の少ない体積比 1:10 の CH₄/H₂ を用いて RF パワー 50 W で 75 分間 RIE を行い、リッジ構造を形成した。このときエッチストップ層を参照層とし、He-Ne レーザを用いた in situ モニタ[50]により、エッチストップ層上までを正確に除去した。このとき得られた干渉信号を図 3.13に示す。これは計算で求めた信号とほぼ同じであり、エッチング時間が 75 分と長いことから、エッチング深さの誤差は 2 nm 以下に抑えられている。その後基板を HCl に浸し、SrF₂ 膜ごと堆積物を除去した。

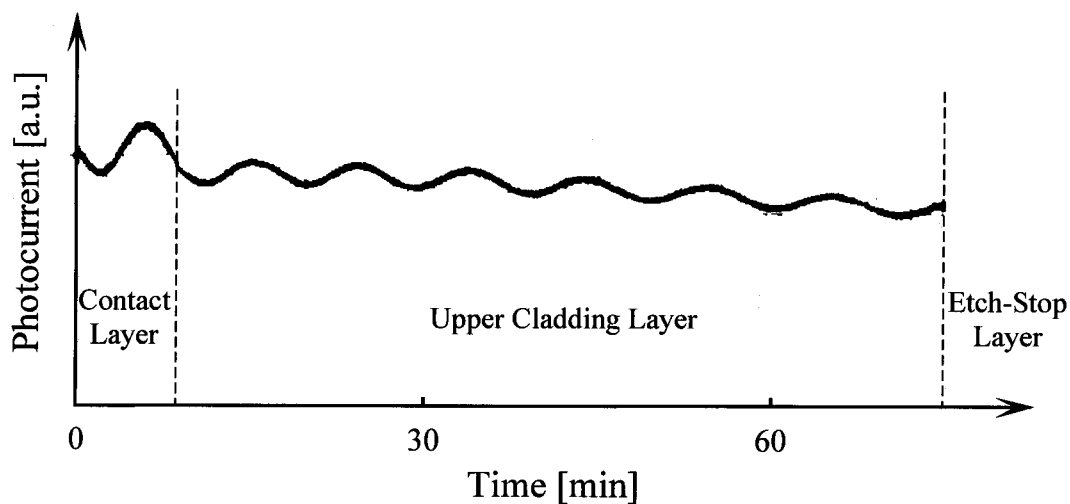


図 3.13 In situ モニタ干渉信号

(iii) グレーティング素子作製

次に、PCVD により SiO_2 膜を全面に堆積し、電子ビームレジスト塗布した。MO 活性チャンネルと曲線 DBR のずれは MO 発振特性に多大な影響を及ぼすため、マーカをもとに正確に位置合わせを行い 3 次の曲線 DBR (周期 450 nm) を電子ビーム描画した。次にステージ移動し、1 次の GO (周期 326 nm) のグレーティングパターンを描画した。その後 2 段階転写により、レジストのグレーティングパターンを半導体層上に 2 段階転写した。作製した曲線 DBR の周辺および断面の SEM 写真を図 3.14 に、GO の断面 SEM 写真を図 3.15 に示す。

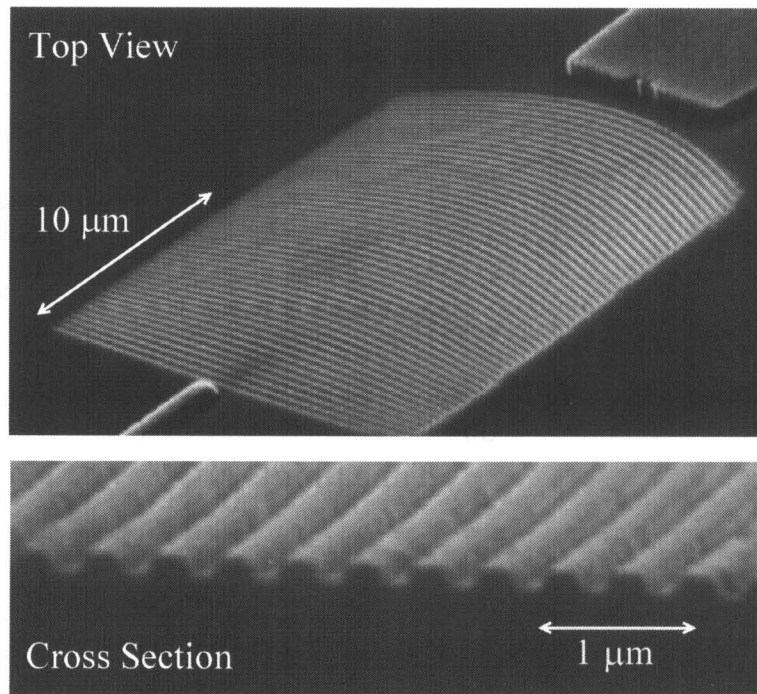


図 3.14 曲線表面 DBR グレーティングの SEM 写真

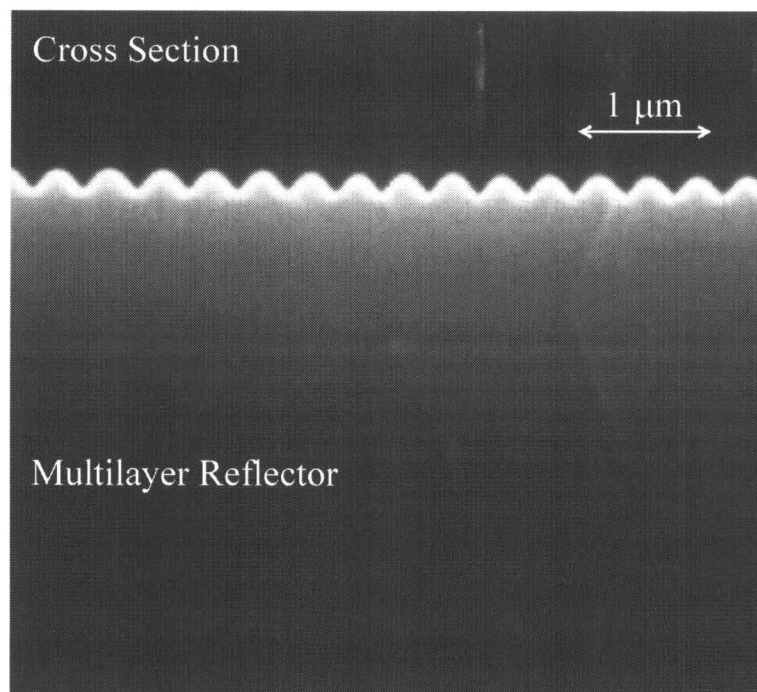


図 3.15 グレーティング出力結合器の断面 SEM 写真

(iv) 電極形成・劈開

さらに電氣的絶縁膜として SiO_2 膜を堆積し、MO 活性チャンネルと PA の電極パターン上に p 型コンタクト電極用の窓を開け、ボンディング用電極を形成した。基板を約 $100\ \mu\text{m}$ 厚にし、裏面に $\text{Au-Ge}(40\ \text{nm})/\text{Au}(2000\ \text{nm})$ を蒸着・アニールし n 型電極を形成した後、 $1.1 \times 4\ \text{mm}^2$ のチップサイズに劈開した。作製したデバイスを図 3.16 に示す。最後にこの基板をヒートシンクにはんだ付けし、MO 活性チャンネルには 2 本、PA には 10 本のアルミワイヤ(直径 $30\ \mu\text{m}$) をボンディングした。

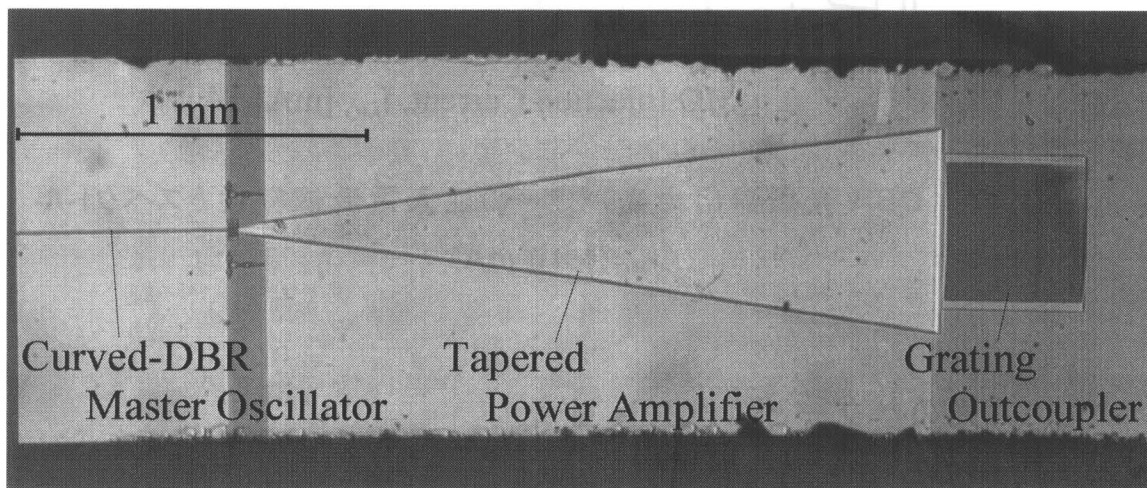


図 3.16 作製したデバイス

3.5 実験結果

3.5.1 発振器 (MO) の特性

MO の出力光パワーを CW 動作で測定した。MO 劈開面側で測定した出力光パワーの MO 注入電流依存性とスペクトルを図 3.17 に示す。しきい値 ($8.4\ \text{mA}$) から出力 $35\ \text{mW}$ まで、波長 $981\ \text{nm}$ での安定単一モード発振が得られた。 $I_{\text{MO}} = 3 \times I_{\text{th}}$ のとき、SMSR は $20\ \text{dB}$ 程度であった。通常の DFB、DBR レーザでは $40\ \text{dB}$ 程度の SMSR が得られている。SMSR を改善するためには、1 次 DBR グレーティングを利用する、両側に DBR グレーティングを用いて共振器を構成するなどがあげられる。また得られた外部量子効率から、DBR の反射率は 9% と計算された。

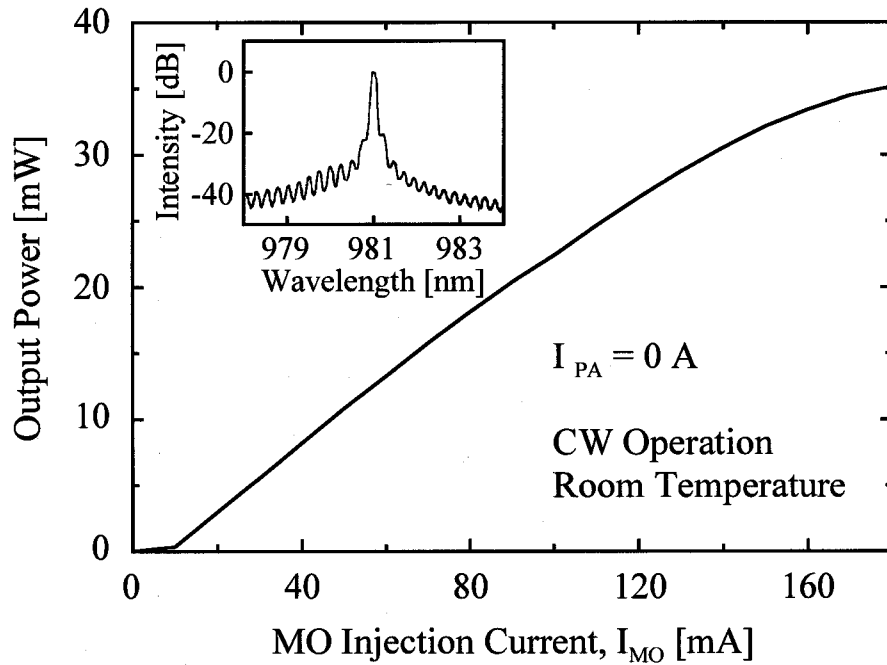


図 3.17 DBR 発振器出力光パワーの注入電流依存性とスペクトル
($I_{MO} = 40 \text{ mA}$)

3.5.2 出力光のパワーとスペクトル

図 3.18に MO 注入電流をパラメータとしたときのデバイス出力光パワーの PA 注入電流依存性とスペクトルを示す。MO 注入電流、PA 注入電流がそれぞれ 160 mA、3.0 A のとき、GO から 124 mW の出力ビームが得られた。0.5 A から 3.0 A までの PA 注入電流の増加とともに、982 nm から 985 nm の発振波長変化が観察された。これは PA での発熱による温度上昇のため、DBR のブラッグ波長が変化するからである。温度上昇によりモード利得が減少するだけでなく導波路実効屈折率も変化させるので、これを見越したグレーティング素子の設計が必要である。またデバイス出力ビームの SMSR 抑圧比は、MO 出力光のそれに近い 20 dB 程度であった。なお MO 注入電流 0 mA のときの出力光は、スペクトルの広い増幅自然放出 (ASE) であった。また図 3.19に、 $I_{MO} = 40 \text{ mA}$ のときの V-I 特性を示す。これから式 (3.10) 中の V_d 、 ρ は、それぞれ 0.094 V、 $2.5 \times 10^5 \Omega \cdot \mu\text{m}^2$ と見積もられた。ただしこれはアルミワイヤ、はんだ付け部分の抵抗を含んでいる。

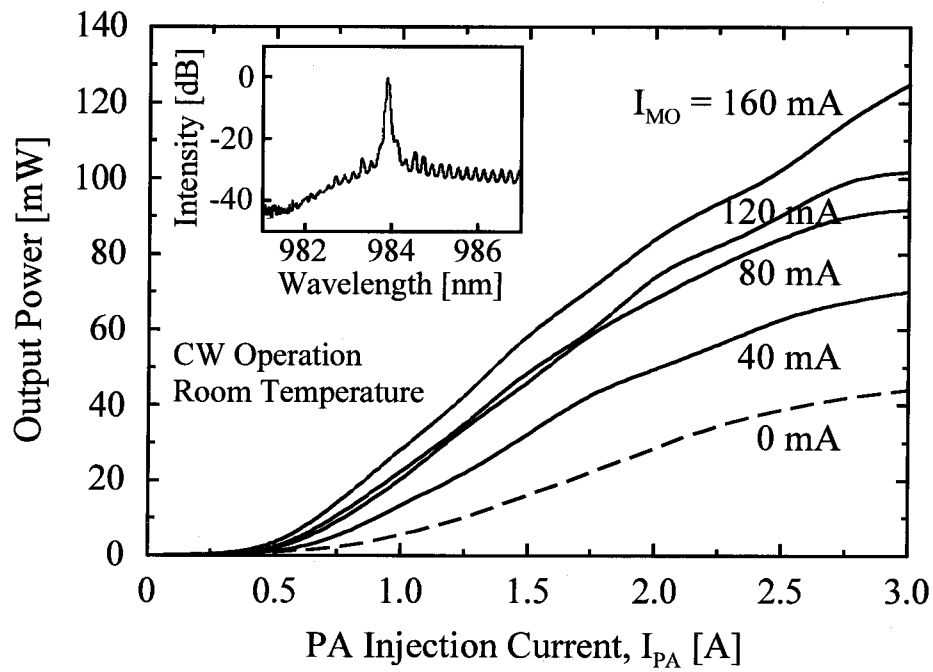


図 3.18 デバイス出力光パワーの PA 注入電流依存性とスペクトル
($I_{MO} = 40$ mA, $I_{PA} = 2.0$ A)

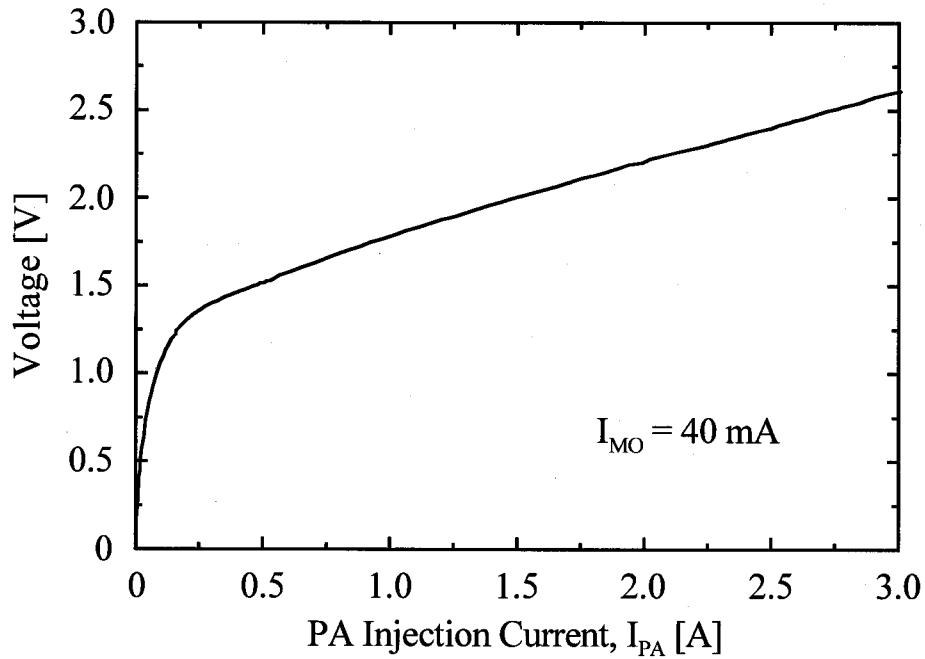


図 3.19 V-I 特性 ($I_{MO} = 40$ mA)

3.5.3 近視野像

CCD カメラを用いて GO 面上の近視野像を観察した。図 3.20に近視野像と横方向の光強度分布を示す。PA 注入電流変化とともに、図 3.8に示したシミュレーション結果にほぼ一致する光強度分布変化が観測された。また導波光伝搬方向の光強度分布は指数関数的に減少し、その減衰定数($\alpha_{rad} + \alpha_{abs}$)は 250 cm^{-1} と測定された。この測定値を用い α_{rad} が設計値 150 cm^{-1} とすると、 α_{abs} および η_{air} はそれぞれ 100 cm^{-1} 、58 %と見積もられる。また PA 出力光パワーの 90 % が GO 開口内に入射するとすると、PA 出力端での光パワーは 237 mW と見積もられる。得られた出力光パワーがシミュレーション結果と異なるのは、ヒートシンクによる放熱が不十分なため PA 内のモード利得が低下したことが原因であると考えられる。

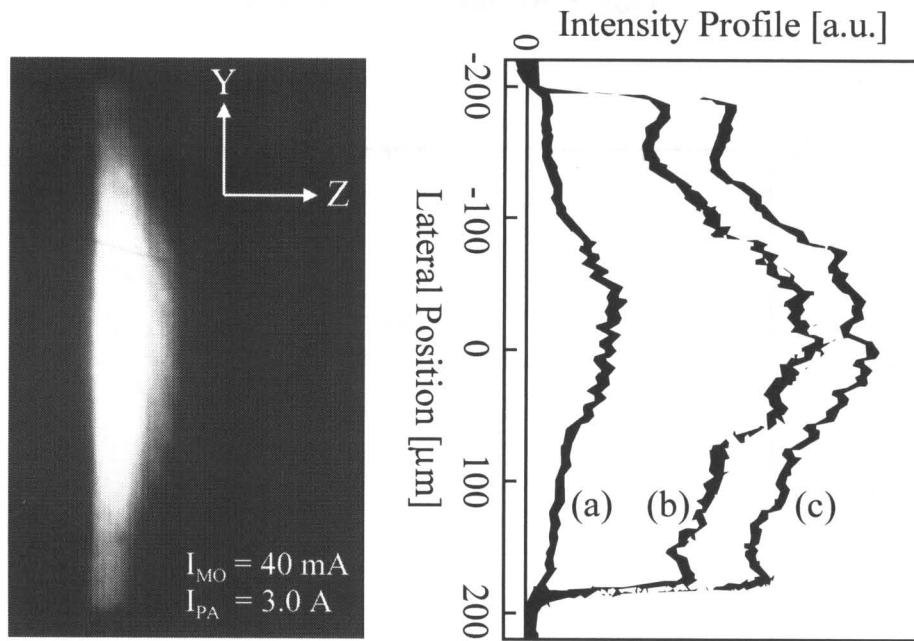


図 3.20 近視野像と光強度分布

3.5.4 遠視野像

MO 注入電流 40 mA のときの出力ビームの遠視野像を観測した。PA 注入電流 1.0 A のときの遠視野像と出射面垂直方向の光強度分布を図 3.21 に示す。また出射面垂直方向の出力ビーム広がり角 ($1/e^2$ 全角) の PA 注入電流依存性を図 3.22 に示す。VDP 移動補正なしのデバイスでは、PA 注入電流 1.0 A 以下のとき出射面垂直方向で理論回折限界値 0.28° に対し 0.29° のビーム広がり角

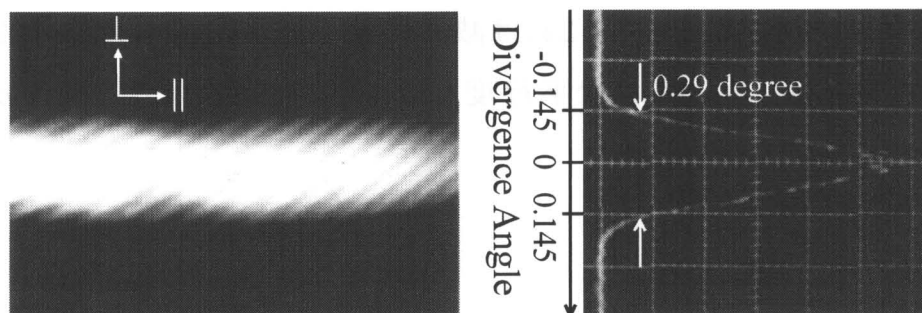


図 3.21 出力ビームの遠視野像と光強度分布(出射面垂直方向)

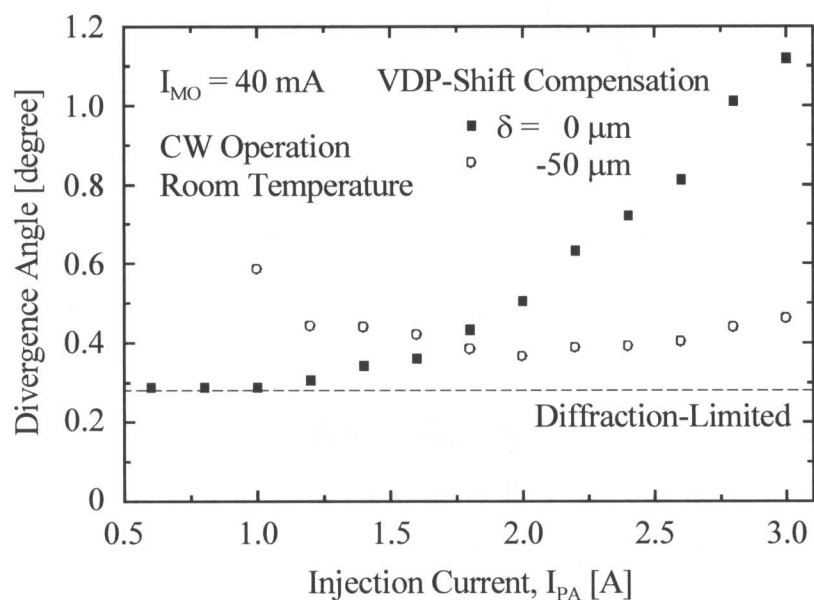


図 3.22 デバイス出力ビーム広がり角(出射面垂直方向)の PA 注入電流依存性

が得られた。それ以上の PA 注入電流では、電流の増加とともに波面歪の増大によるビーム広がり角の増加が観測された。一方 GO に $-50\text{ }\mu\text{m}$ の VDP 移動補正機能を付加したデバイスでは、PA 注入電流 2.0 A のとき最小ビーム広がり角 0.37° が得られた。また PA 注入電流 3.0 A のとき、VDP 移動補正なしのデバイスでビーム広がり角が回折限界の 4.0 倍であったのに対し、VDP 移動補正ありのデバイスでは 1.6 倍であった。以上の結果から GO に VDP 移動を補正する機能を付加することで、PA 内で生じる波面歪の影響を低減できることを確認した。しかしながら、出射面垂直方向で良好な平行度が得られたのに対し、出射面平行方向には約 3° の広がりがあった。これは減衰定数 ($\alpha_{rad} + \alpha_{abs}$) の最適化が不十分なためであり、両方向ともに良好な平行度を得るためには α_{abs} の低減や α_{rad} の最適設計などが必要である。

3.6 結言

曲線表面グレーティングを用いた DBR 発振器、テーパ型パワー増幅器、グレーティング出力結合器をモノリシック集積した高出力半導体レーザを提案した。ビーム伝搬法を用いた理論シミュレーションによるパワー増幅器の設計および波面歪補正機能を付加したグレーティング出力結合器の設計を行い、実際に光集積デバイスを作製し測定した。CW 動作で波長 985 nm 、最大出力 124 mW の安定単一モード出力が得られた。また平行出力ビームの出射面垂直方向ビーム広がり角の測定により、発散点移動補正機能をグレーティング出力結合器に付加することで高い PA 注入電流領域で波面歪の影響を低減できることを確認した。

今後の課題として、利得の温度依存性を考慮に入れたシミュレーションでの設計や、受動導波路領域の量子井戸選択的無秩序化を用いた吸収損失低減によるさらなる高出力化とビーム平行度の改善、集光ビーム出射型デバイスへの発展などがあげられる。

第 4 章 結論

グレーティング素子と量子井戸レーザを用いた高機能モノリシック光集積デバイスとして、2 種のモノリシック光集積センサおよびグレーティング結合器集積化高出力半導体レーザを取り上げ、その理論的・実験的検討を通じて多くの成果を得ることができた。モノリシック光集積デバイスは光通信以外の分野での実用化例がほとんど見られないのが現状であるが、これらの成果はより高度な光集積デバイス実現の可能性を実証するとともに新しい応用分野を開拓するものと思われる。本研究において得られた結果および考察した課題を以下に要約し、本研究の結論とする。

第 2 章ではモノリシック光集積位置/変位センサおよび光集積ディスクピックアップの設計、作製を行い、センサ特性を測定した。

- 1) 量子井戸を無秩序化した低損失受動導波路における集光グレーティングカップラの設計を行った。放射損失係数のグレーティング層厚依存性および空気側分配比の上下クラディング層厚依存性を計算して、これから導波路構造を最適化し、良好な集光特性と高い回折効率が得られるよう設計を行った。またグレーティングビームスプリッタおよびブラッグ反射器についても最適設計を行い、これによりグレーティング素子の設計理論を確立した。
- 2) 電子ビーム描画と反応性イオンエッチングを用い、グレーティング素子の作製を行った。1 本のグレーティングを複数回の走査で描画する方法や SiO_2 膜を中間層として用いた 2 段階転写法により、周期 $0.3 \mu\text{m}$ 程度の矩形断面グレーティング素子の作製が可能となり、微細周期グレーティング作製技術の確立に成功した。
- 3) 量子井戸の選択的無秩序化により受動導波路領域を低損失化したデバイスを試作し、評価を行った。このときモノリシック集積化によるレーザ発振特性の劣化は見られなかった。モノリシック光集積位置/変位センサから、理論広がり角に近い良好な平行度の出力ビームが得られた。また可動鏡を用いたセンサ特性の測定により $0.43 \mu\text{m}$ 周期の干渉信号が得られ、1 チップで

完全に機能するモノリシック光集積デバイスの実現に初めて成功した。光集積ディスクピックアップからは、理論回折限界に近い集光スポット径が得られるとともに焦点位置での光電流の増加が確認され、デバイス実現に向けての第 1 歩を達成した。

第 3 章ではグレーティング結合器集積化高出力半導体レーザを提案し、その設計、作製、評価を行った。

- 4) 種々のモノリシック光集積デバイスの光源に適した、狭活性チャンネルと曲線表面グレーティングからなる DBR レーザを提案した。狭活性チャンネルからの発散導波光に対し高い反射率が得られる曲線 DBR グレーティングの設計を行い、安定な単一モード発振を実現した。
- 5) ビーム伝搬法を用いた理論シミュレーションを行い、パワー増幅器電極形状の最適設計および性能予測を行った。またグレーティング出力結合器について、パワー増幅器内で生じる波面歪を補正する機能を付加するとともに、多重反射層を採用することで高い回折効率が得られる設計とした。
- 6) 表面グレーティングを採用し、1 度のエピタキシャル成長で作製可能な構成とすることで、デバイス作製プロセスを簡略化した。また蒸着・リフトオフによる電極形成、in situ モニタ反応性イオンエッチングによるリッジ構造形成、微細周期グレーティング素子作製、はんだ付け・ワイヤボンディングによる実装技術など、当研究室内でのデバイス作製技術の確立に成功した。
- 7) デバイスを試作、評価し、CW 動作で最大出力 124 mW の平行出力ビームが得られた。またグレーティング出力結合器に付加した補正機能により、高い増幅器注入電流領域でも波面歪による出力ビーム平行度の劣化を低減できることを確認した。またデバイスの高性能化には、量子井戸無秩序化による受動導波路吸収損失の低減が不可欠であることが明らかになった。

本研究ではモノリシック光集積デバイスの応用分野拡大を目指し、グレーティング素子と量子井戸レーザを用いた高機能モノリシック光集積デバイスを提案し、その理論的・実験的検討を行ってきた。これらを通じて、導波路構造設計や作製

プロセス簡略化を含むデバイス構成法、複数の機能を有するグレーティング素子設計理論、ビーム伝搬法を用いた理論シミュレーションに基づく高機能グレーティング素子設計理論、およびディープサブミクロンオーダーの微細周期グレーティング作製を含む当研究室内でのデバイス作製技術などの各種要素技術の確立に成功するとともに、モノリシック光集積デバイス実現の可能性を実証した。本研究で得られたこれらの成果は新規モノリシック光集積デバイスに適用可能であるが、まだいくつかの課題が残されている。高性能デバイスを実現するためには低損失受動導波路形成技術の確立が不可欠であり、当研究室内で実現可能な技術としては結晶成長後のマスク層装荷と高速熱処理による量子井戸無秩序化があり、この確立が最重要課題である。またデバイスの実用化には、高精度な基板温度制御やデバイス構成の改善、さらにデバイス作製技術、特に微細周期グレーティング素子作製技術の改善も不可欠である。これらの課題を解決することにより、光通信以外の応用分野においてもモノリシック光集積デバイスの一層の発展が期待できる。

謝 辞

本研究を行うに際し、終始懇切な御教示と御指導、御鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科西原浩教授、終始一貫して直接御指導を頂くとともに数々の御討論、御助言の中から有益なる研究の指針を与えて頂きました栖原敏明助教授に深甚なる感謝の意を表します。

論文作成にあたり、懇篤なる御指導を頂くとともに種々の御高配を賜りました大阪大学大学院工学研究科濱口智尋教授に深謝の意を表します。

さらに著者が大阪大学に在学中、御指導と御鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科尾浦憲治郎教授、森田清三教授、吉野勝美教授に深謝の意を表します。

本研究の遂行に際し、特にモノリシック光集積センサの共同研究を行うにあたり、デバイス設計に関する御討論、御助言を頂くとともに、結晶成長、DFB レーザ作製などデバイス作製に関し多大な御尽力を頂きました横河電機開発プロジェクトセンター岩岡秀人氏、平田隆昭氏、オプトエレクトロニクス研究所和田守夫氏、飯尾晋司氏、末広雅幸氏、テラテック細松春夫氏に深く感謝いたします。

本研究の遂行に際し、特にグレーティング結合器集積化高出力半導体レーザの共同研究を行うにあたり、4 ヶ月にわたる留学の機会を頂き直接御指導を賜るとともに、デバイス設計、作製全般において有益な御討論、御協力を頂きましたチャルマース工科大学 Prof. Anders Larsson、並びに公私にわたり有益で多大な御助言、御尽力を頂きました Dr. Niklas Eriksson に厚く感謝の意を表します。

本研究を行うにあたって、数々の御協力を頂きました西原研究室の諸先生、諸先輩、諸氏に深く感謝いたします。

本研究に関し補助を頂きました横河電機、Swedish National Board for Industrial and Technological Development (NUTEK)、および魚本国際奨学基金に深く感謝いたします。

最後に、本研究は理解と援助を惜しまず協力して頂いた両親上向井照彦、節子並びに山田奈津子に支えられたものであることを記し、心から感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 西原浩, 春名正光, 栖原敏明, “光集積回路(改訂増補版),” オーム社, 1993.
- [2] 栖原敏明, “半導体レーザの基礎,” 共立出版, 1998.
- [3] H. Kogelnik and C.V. Shank, “Coupled-wave theory of distributed feedback lasers,” *J. Appl. Phys.*, vol.43, pp. 2327-2335, 1972.
- [4] C.V. Shank, R.V. Schmidt, and B.I. Miller, “Double-heterostructure GaAs distributed feedback laser,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 25, pp. 20-201, 1974.
- [5] D.R. Scifres, D.R. Burnham, and W. Streifer, “Distributed feedback single heterostructure laser,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 25, pp. 203-205, 1974.
- [6] M. Nakamura, K. Aiki, J. Umeda, A. Yariv, H.W. Yen, and T. Morikawa, “GaAs-GaAlAs double-heterostructure distributed feedback diode lasers,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 25, pp. 487-488, 1974.
- [7] H. Soda, Y. Kotaki, H. Ishikawa, S. Yamakoshi, and H. Imai, “Stability in single longitudinal mode operation in GaInAsP/InP phase-adjusted DFB lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-23, no. 6, pp. 804-814, 1987.
- [8] H. Ishii, Y. Kondo, F. Kano, and Y. Yoshikuni, “A tunable distributed amplification DFB laser diode (TDA-DFB-LD),” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 30-32, 1998.
- [9] T. Hirata, M. Maeda, M. Suehiro, and H. Hosomatsu, “Fabrication and characteristics of GaAs-AlGaAs tunable laser diodes with DBR and phase-control sections integrated by compositional disordering of a quantum well,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-27, no. 6, pp. 1609-1615, 1991.
- [10] M. Öberg, P.-J. Rigole, S. Nilsson, T. Klinga, L. Bäckbom, K. Streubel, J. Wallin, and T. Kjellberg, “Complete single mode wavelength coverage over 40 nm with a super structure grating DBR laser,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 13, no. 10, pp. 1892-1898, 1995.
- [11] M. O'Neill, J.H. Marsh, R.M. De la rue, J.S. Roberts, C. Button, and R. Gwilliam, “Reduction of the propagation losses in impurity disordered

- quantum well waveguides,” *Electron. Lett.*, vol. 26, no. 19, pp. 1613-1615, 1990.
- [12] T. Hirata, M. Suehiro, M. Hihara, M. Dobashi, and H. Hosomatsu, “Demonstration of a waveguide lens monolithically integrated with a laser diode by compositional disordering of a quantum well,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 698-700, 1993.
 - [13] D.G. Deppe, L.J. Guido, N. Holonyak, Jr., K.C. Hsieh, R.D. Burnham, R.L. Thornton, and T.L. Paoli, “Stripe-geometry quantum well heterostructure $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -GaAs lasers defined by defect diffusion,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 49, no. 9, pp. 510-512, 1986.
 - [14] D. Hofstetter, H.P. Zappe, J. Epler, P. Riel, “Monolithically integrated DBR laser, detector, and transparent waveguide fabricated in a single grown step,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 9, pp. 1022-1024, 1995.
 - [15] P. Cusumano, J.H. Marsh, M.J. Rose, and J.S. Roberts, “High-quality extended cavity ridge lasers fabricated by impurity-free vacancy diffusion with a novel masking technique,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 3, pp. 282-284, 1997.
 - [16] 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.*, vol. 27, no. 23, pp. 2138-2140, 1991.
 - [17] E. Colas, C. Caneat, M. Frei, E.M. Clausen, W.E. Quinn, and M.S. Kim, “In situ definition of semiconductor structures by selective area growth and etching,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 59, no. 16, pp. 2019-2021, 1991.
 - [18] E. Zielinski, E. Lach, J. Bouayad-Amine, H. Kühm, M. Schilling, and J. Weber, “Monolithic multisegment mode-locked DBR laser for wavelength tunable picosecond pulse generation,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 230-232, 1997.
 - [19] A.C. Bryce, F. Camacho, P. Cusumano, and J.H. Marsh, “CW and mode-locked integrated extended cavity lasers fabricated using impurity free vacancy disordering,” *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3,

- no. 3, pp. 885-892, 1997.
- [20] Y. Itaya, Y. Tohmori, and H. Toba, "Spot-size converter integrated laser diodes," *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, vol. 3, no. 3, pp. 968-974, 1997.
 - [21] C. Zah, M.R. Amersfoort, B.N. Pathak, F.J. Favire, Jr., P.S.D. Lin, N.C. Anderadakis, A.W. Rajhel, R. Bhat, C. Caneau, M.A. Koza, and J. Gamelin, "Multiwavelength DFB laser arrays with integrated combiner and optical amplifier for WDM optical networks," *IEEE J. Select. Quantum Electron.*, vol. 3, no. 2, pp. 584-597, 1997.
 - [22] D. Hofstetter, H.P. Zappe, and R. Dändliker, "A monolithically integrated double michelson interferometer for optical displacement measurement with direction determination," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 8, no. 10, pp. 1370-1372, 1996.
 - [23] T. Suhara, K. Okada, T. Saso, and H. Nishihara, "Focusing grating coupler in AlGaAs optical waveguide," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 8, pp. 903-905, 1992.
 - [24] T. Suhara, S. Ura, and H. Nishihara, "An integrated-optic interferometer position sensor," *Conf. Laser and Electro-Optics*, FQ3, Baltimore, MD, April 1987.
 - [25] S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara, and J. Koyama, "An integrated-optic disk pickup device," *J. Lightwave Technol.*, vol. LT-4, no. 7, pp. 913-918, 1986.
 - [26] T. Suhara, and H. Nishihara, "Integrated optics components and devices using periodic structures," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-22, no. 6, pp. 845-867, 1986.
 - [27] T. Hirata, M. Maeda, and H. Hosomatsu, "A novel GRIN-SCH-SQW laser diode monolithically integrated with low-loss passive waveguides," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 28, no. 8, pp. L1429-L1432, 1989.
 - [28] T. Hirata, M. Suehiro, M. Hihara, M. Dobashi, and H. Hosomatsu, "Demonstration of a waveguide lens monolithically integrated with a laser diode by compositional disordering of a quantum well," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 6, pp. 698-700, 1993.

- [29] T. Suhara, T. Taniguchi, M. Uemukai, H. Nishihara, T. Hirata, S. Iio, and M. Suehiro, "Monolithic integrated-optic position/displacement sensor using waveguide gratings and QW-DFB laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 10, pp. 1195-1197, 1995.
- [30] T. Suhara, T. Taniguchi, M. Uemukai, A. Yoshimoto, H. Nishihara, T. Hirata, S. Iio, and M. Suehiro, "Monolithic integration of waveguide gratings and quantum-well distributed-feedback laser for implementation of subminiature optical-disc pickup head," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, no. 1B, pp. 369-371, 1996.
- [31] 谷口健博, 上向井正裕, 栖原敏明, 西原浩, 平田隆昭, 飯尾晋司, "AlGaAs GRIN-SCH 導波路におけるグレーティング素子の設計と集積化," 信学技報, LQE94-66, pp. 31-36, 1994.
- [32] T. Hirata, S. Iio, M. Suehiro, M. Hirata, T. Suhara, M. Uemukai, T. Taniguchi, and H. Nishihara, "Integration of laser diodes and photodiodes in photonic integrated circuit for measurement," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 10A, pp. L1288-L1290, 1995.
- [33] 栖原敏明, 岡田訓明, 河村政宏, 西原浩, "光源分離型光集積ディスクピックアップ," 光メモリシンポジウム, pp. 109-110, 1992.
- [34] S. O'Brien, D.F. Welch, R.A. Parke, D. Mehuys, K. Dzurko, R.J. Lang, R. Waarts, and D. Scifres, "Operating characteristics of a high-power monolithically integrated flared amplifier master oscillator power amplifier," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2052-2057, 1993.
- [35] J.S. Osinski, D. Mehuys, D.F. Welch, K.M. Dzurko, and R.J. Lang, "High-power, spectrally coherent array of monolithic flared amplifier-master oscillator power amplifiers (MFA-MOPAs)," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 6, no. 10, pp. 1185-1187, 1994.
- [36] S. O'Brien, R. Lang, R. Parke, J. Major, D.F. Welch, and D. Mehuys, "2.2-W continuous-wave diffraction-limited monolithically integrated master oscillator power amplifier at 854 nm," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 4, pp. 440-442, 1997.
- [37] N. Eriksson, J. Bengtsson, M. Li, P. Modh, and A. Larsson, "Surface-

- emitting unstable-resonator lasers with integrated diffractive beam-forming elements," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 9, no. 12, pp. 1570-1572, 1997.
- [38] J.H. Abeles, R. Amantea, J.T. Andrews, P.K. York, J.C. Connolly, R. Rios, W.F. Reichert, J.B. Kirk, T. Zamerowski, D.B. Gilbert, S.K. Liew, N.A. Hughes, N.W. Carlson, J.K. Butler, G.A. Evans, S.Y. Narayan, and D.J. Channin, "Monolithic high power fanned-out amplifier lasers," *SPIE Proc.*, vol. 1850, Laser Diode Technology and Applications V, pp. 337-348, 1993.
- [39] T. Suhara, M. Uemukai, A. Yoshimoto, N. Matsumoto, H. Nishihara, S. Iio, M. Suehiro, and M. Wada, "Monolithic integration of QW-DFB laser master oscillator power amplifier and grating outcoupler," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 14, pp. 1228-1229, 1997.
- [40] M. Uemukai, A. Yoshimoto, N. Matsumoto, T. Suhara, H. Nishihara, N. Eriksson, and A. Larsson, "InGaAs/AlGaAs distributed Bragg reflector lasers with curved surface gratings for monolithic integration," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 17, pp. 1464-1465, 1997.
- [41] M. Uemukai, N. Matsumoto, T. Suhara, H. Nishihara, N. Eriksson, and A. Larsson, "Monolithically integrated InGaAs-AlGaAs master oscillator power amplifier with grating outcoupler," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 8, pp. 1097-1099, 1998.
- [42] N. Eriksson, M. Hagberg, and A. Larsson, "Highly directional grating outcouplers with tailorable radiation characteristics," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 1038-1047, 1996.
- [43] T. Kjellberg, M. Hagberg, N. Eriksson, and A.G. Larsson, "Low-threshold grating-coupled surface-emitting lasers with etch-stop layer for precise grating positioning," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 5, no. 10, pp. 1149-1152, 1993.
- [44] N. Eriksson, M. Hagberg, and A. Larsson, "Highly efficient grating-coupled surface-emitters with single outcoupling elements," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 12, pp. 1394-1396, 1995.
- [45] D. Hofstetter, H.P. Zappe, J.E. Epler, and J. Söchtig, "Single-growth-step

- GaAs/AlGaAs distributed Bragg reflector lasers with holographically-defined recessed gratings," *Electron Lett.*, vol. 30, pp. 1858-1859, 1994.
- [46] M. Hagberg, N. Eriksson, and A. Larsson, "Investigation of high-efficiency surface-emitting lasers with blazed grating outcouplers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 9, pp. 1596-1605, 1996.
- [47] W. Streifer, D.R. Scifres, and R. D.Burnham, "Coupled wave analysis of DFB and DBR lasers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. QE-13, no. 4, pp. 134-141, 1977.
- [48] R.J. Lang, A. Hardy, R. Parke, D. Mehuys, S. O'Brien, J. Major, and D.W. Welch, "Numerical analysis of flared semiconductor laser amplifiers," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 29, no. 6, pp. 2044-2051, 1993.
- [49] M. Born, and E. Wolf, "Principles of Optics," Fourth Edition, *Pergamon Press*, p. 468, 1970.
- [50] K. Hamamoto, H. Chida, T. Miyazaki, and S. Ishikawa, "High-power 0.98- μm strained quantum-well lasers fabricated using in situ monitored reactive ion beam etching," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 6, pp. 602-604, 1995.

関連発表文献

[論文,レター]

- 1) T. Suhara, T. Taniguchi, M. Uemukai, H. Nishihara, T. Hirata, S. Iio, and M. Suehiro, "Monolithic integrated-optic position/displacement sensor using waveguide gratings and QW-DFB laser," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 7, no. 10, pp. 1195-1197, 1995.
- 2) T. Hirata, S. Iio, M. Suehiro, M. Hihara, T. Suhara, M. Uemukai, T. Taniguchi, and H. Nishihara, "Integration of laser diodes and photodiodes in photonic integrated circuit for measurement," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 34, part 2, no. 10A, pp. L1288- L 1290, 1995.
- 3) T. Suhara, T. Taniguchi, M. Uemukai, A. Yoshimoto, H. Nishihara, T. Hirata, S. Iio, and M. Suehiro, "Monolithic integration of waveguide gratings and quantum-well distributed-feedback laser for implementation of subminiature optical-disc pickup head," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 35, part 1, no. 1B, pp. 369-371, 1996.
- 4) T. Suhara, M. Uemukai, A. Yoshimoto, N. Matsumoto, H. Nishihara, S. Iio, M. Suehiro, and M. Wada, "Monolithic integration of QW-DFB laser master oscillator power amplifier and grating outcoupler," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 14, pp. 1228-1229, 1997.
- 5) M. Uemukai, A. Yoshimoto, N. Matsumoto, T. Suhara, H. Nishihara, N. Eriksson, and A. Larsson, "InGaAs/AlGaAs distributed Bragg reflector lasers with curved surface gratings for monolithic integration," *Electron. Lett.*, vol. 33, no. 17, pp. 1464-1465, 1997.
- 6) 上向井正裕, 谷口健博, 栖原敏明, 西原浩, 平田隆昭, 飯尾晋司, 末広雅幸, "グレーティング素子と量子井戸レーザを用いたモノリシック光集積センサ," 電子情報通信学会論文誌 C-I, vol. J81-C-I, no. 1, pp. 1-8, 1998.
- 7) N. Eriksson, A. Larsson, M. Uemukai, and T. Suhara, "Parabolic-confocal unstable-resonator semiconductor lasers — modeling and experiments," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 34, no. 5, pp. 858-868, 1998.
- 8) M. Uemukai, N. Matsumoto, T. Suhara, H. Nishihara, N. Eriksson, and A.

Larsson, "Monolithically integrated InGaAs-AlGaAs master oscillator power amplifier with grating outcoupler," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 10, no. 8, pp. 1097-1099, 1998.

- 9) 上向井正裕, 松本尚寛, 栖原敏明, 西原浩, N. Eriksson, A. Larsson, "InGaAs-AlGaAs 発振器-増幅器-グレーティング結合器集積化レーザ," 電子情報通信学会論文誌 C-I, (投稿済).

[国際会議]

- 1) T. Suhara, T. Taniguchi, M. Uemukai, A. Yoshimoto, H. Nishihara, T. Hirata, S. Iio, and M. Suehiro, "Monolithic integration of waveguide gratings and QW-DFB laser for implementation of subminiature disc pickup head," *International Symposium on Optical Memory*, P-4, Ishikawa, Aug. 1995.
- 2) T. Suhara, T. Taniguchi, M. Uemukai, H. Nishihara, T. Hirata, S. Iio, and M. Suehiro, "Monolithic integrated-optic position/displacement sensor using waveguide gratings and QW-DFB laser," *Microoptics Conference*, L2, Hiroshima, Oct. 1995. [A MOC Paper Award]
- 3) M. Uemukai, A. Yoshimoto, N. Matsumoto, T. Suhara, H. Nishihara, S. Iio, M. Suehiro and M. Wada, "Monolithic integration of QW-DFB laser master oscillator power amplifier and grating outcoupler," *The Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics*, FT2, Chiba, July 1997.
- 4) M. Uemukai, A. Yoshimoto, N. Matsumoto, T. Suhara, H. Nishihara, N. Eriksson, and A. Larsson, "InGaAs/AlGaAs distributed Bragg reflector lasers with curved surface gratings for monolithic integration," *Microoptics Conference and Topical Meeting on Gradient-Index Optical Systems*, J3, Tokyo, Oct. 1997.
- 5) N. Eriksson, S. Kristjansson, P. Modh, A. Larsson, M. Uemukai, A. Yoshimoto, N. Matsumoto, T. Suhara, and H. Nishihara, "Grating coupled surface emitters with built-in beam control," *Electrochemical Society Meeting*, San Diego, May 1998. [Invited Paper]
- 6) M. Uemukai, N. Matsumoto, T. Suhara, H. Nishihara, N. Eriksson, and A.

Larsson, "Monolithically integrated InGaAs-AlGaAs master oscillator power amplifier with grating outcoupler," *IEEE International Semiconductor Laser Conference*, TuE16, Nara, Oct. 1998.

[研究会]

- 1) 谷口健博, 上向井正裕, 栖原敏明, 西原浩, 平田隆昭, 飯尾晋司, "AlGaAs GRIN-SCH 導波路におけるグレーティング素子の設計と集積化," 電子情報通信学会 信学技報, LQE-66, 1994 年 12 月.
- 2) 上向井正裕, 吉本亮裕, 谷口健博, 栖原敏明, 西原浩, 平田隆昭, 飯尾晋司, 末広雅幸, "グレーティング素子と量子井戸レーザを用いたモノリシック光集積センサ," 電子情報通信学会 信学技報, LQE-115, 1995 年 12 月.
- 3) 吉本亮裕, 上向井正裕, 栖原敏明, 西原浩, 飯尾晋司, 末広雅幸, 和田守夫, "DFB レーザ発振器・テーパ型パワー増幅器・集光グレーティングカップラのモノリシック集積化," 電子情報通信学会 信学技報, LQE-115, 1996 年 12 月.
- 4) 松本尚寛, 上向井正裕, 栖原敏明, 西原浩, ニクラス・エリクソン, アンダース・ラルソン, "InGaAs/ AlGaAs 歪量子井戸構造 DBR 発振器・パワー増幅器・グレーティング結合器集積化レーザ," 電子情報通信学会 信学技報, LQE-139, 1998 年 1 月.

[学会発表]

- 1) 谷口健博, 上向井正裕, 栖原敏明, 西原浩, 平田隆昭, 飯尾晋司, "AlGaAs GRIN-SCH 導波路におけるグレーティング素子の集積化," 第 55 回応用物理学会学術講演会, 19p-R-2, 1994 年 9 月.
- 2) 平田隆昭, 飯尾晋司, 末広雅幸, 日原衛, 栖原敏明, 上向井正裕, 谷口健博, 西原浩, "計測用光集積回路における LD と PD の集積化," 第

56 回応用物理学会学術講演会, 28a-SQ-30, 1995 年 8 月.

- 3) 上向井正裕, 谷口健博, 栖原敏明, 西原浩, 平田隆昭, 飯尾晋司, 末広雅幸, “グレーティング素子と QW-DFB レーザを用いたモノリシック光集積位置センサ,” 第 43 回応用物理学関係連合講演会, 28p-D-5, 1996 年 3 月.
- 4) 上向井正裕, 吉本亮裕, 栖原敏明, 西原浩, 飯尾晋司, 末広雅幸, 和田守夫, “モノリシック集積化高出力半導体レーザ用テーパ型パワー増幅器の理論シミュレーション,” 第 57 回応用物理学会学術講演会, 7p-KG-1, 1996 年 9 月.
- 5) 吉本亮裕, 上向井正裕, 栖原敏明, 西原浩, 飯尾晋司, 末広雅幸, 和田守夫, “DFB レーザ発振器・テーパ型パワー増幅器・集光グレーティングカップラのモノリシック集積化,” 第 57 回応用物理学会学術講演会, 7p-KG-2, 1996 年 9 月.
- 6) 上向井正裕, 松本尚寛, 栖原敏明, 西原浩, ニクラス・エリクソン, アンダース・ラルソン, “曲線表面グレーティングを用いたモノリシック集積化用 InGaAs DBR レーザ,” 第 45 回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZH-10, 1998 年 3 月.
- 7) 松本尚寛, 上向井正裕, 栖原敏明, 西原浩, ニクラス・エリクソン, アンダース・ラルソン, “InGaAs DBR 発振器・パワー増幅器・グレーティング結合器集積化レーザ,” 第 45 回応用物理学関係連合講演会, 30a-ZH-11, 1998 年 3 月.
- 8) 宮田美知太郎, 島田尚往, 上向井正裕, 栖原敏明, 西原浩, “水素プラズマ処理と高速熱処理による InGaAs 歪量子井戸の選択的無秩序化,” 第 59 回応用物理学会学術講演会, 16p-T-5, 1998 年 9 月.