The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	高密度光情報読取りデバイスの光集積回路化に関する研究
Author(s)	裏, 升吾
Citation	大阪大学, 1987, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/824
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

高密度光情報読取りデバイスの
光集積回路化に関する研究

裏　升吾

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，西原研究室において行った“高密度光情報読取りデバイスの光集積回路化に関する研究”をまとめたもので，10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

光集積回路と集積化技術の現状を概観するとともに，光集積回路研究における本研究の位置づけを明らかにする．また高密度光情報読取りデバイスを光集積回路化することの意義について述べ，この光集積回路デバイスにおける集光グレーティングカップラの重要性を説明する．

第2章　集光グレーティングカップラの基礎理論

電子ビーム描画作製に必要なグレーティング形状式を求め，光集積回路形読取りデバイスの中心素子としての集光グレーティングカップラの基本特性（集光特性，結像関係，結合効率）の理論解析を行う．また良好な集光特性と高い結合効率を同時に満足する高性能素子の設計について述べる．

第3章　集光グレーティングカップラの収差特性

電子ビーム直接描画法で作製すれば理論的には無収差の集光グレーティングカップラが得られるが，実際には集光特性は作製精度に依存する．そこで本章では，集光グレーティングカップラの収差を解析し，作製パラメータの許容誤差を見積もる．素子の非軸対称性により，収差を表す式は，一般に知られているものに比べて複雑となる．

第４章　光集積回路形読取りデバイスの提案

光情報読取りデバイスには再生信号検出機能だけでなく，集光スポットを精度良くアドレスすることが要求される．本章では，再生信号，フォーカス誤差信号およびトラッキング誤差信号の検出法について検討し，それらを同時に検出できる光集積回路形読取りデバイスの構成を提案する．

第５章　導波形ビームスプリッタ

提案した光集積回路デバイスに要求される機能を満足する導波形ビームスプリッタとして透過形ブラッググレーティングを検討する．基本特性（ブラッグ回折条件，回折効率，角度および波長選択性）を考慮した最適設計について述べ，電子ビーム描画作製に必要な形状式を求める．

第６章　光源と光検出器

光集積回路形読取りデバイスはグレーティングで構成され波長分散を有するので，光源にはモードホッピングを起こさない単一モード発振の半導体レーザが必要であることを示す．また半導体レーザの端面結合効率を求め，その取り付け位置精度を検討する．情報を有する戻り導波光を効率良く検出するフォトダイオードの構造を検討，設計する．

第７章　光集積回路形読取りデバイスの作製

本章では，設計の補足説明および作製パラメータの決定を行い，フォトダイオード付Ｓｉ基板導波路の作製，電子ビーム直接描画法によるグレーティング作製，半導体レーザの端面結合について詳述する．作製した光集積回路は，集光光学系，検出光学系および光源が集積一体化されている．

第８章　デバイスの特性測定

作製したデバイスの基礎実験・特性測定について述べる．まず集光グレーテ

ィングカップラの特性測定の結果を示し，理論解析の結果と比較検討する．次ぎに光集積回路デバイス全体の基本動作（ピット信号検出，フォーカス誤差信号検出，トラッキング誤差信号検出）の確認を模擬ディスク・ピットを用いて行った．

第９章　デバイス特性の考察

解析結果および作製・実験結果を参考に作製した光集積回路形読取りデバイスの評価を行い，デバイスの高性能化に関する課題，作製プロセスに関する課題，半導体レーザの発振スペクトルの問題を取り上げ，その解決の方法・可能性を考察する．

第10章　結　　論

本研究で得られた成果を総括し，今後の課題をまとめる．

高密度光情報読取りデバイスの光集積回路化に関する研究

目　　次

第1章　序　　論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
1.1　光集積回路と集積化技術 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
1.2　光情報読取りデバイスの光集積回路化 ・・・・・・・・・・ 3
1.3　集光グレーティングカップラ（導波形集光レンズ） ・・・ 5
1.4　本論文の構成 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 6

第2章　集光グレーティングカップラの基礎理論 ・・・・・・・・・ 8
2.1　緒　　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 8
2.2　導波モード－放射モード結合 ・・・・・・・・・・・・・・・ 8
2.2.1　伝搬ベクトルダイアグラム ・・・・・・・・・・・・・・ 8
2.2.2　放射損失係数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 10
2.3　形状方程式 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 11
2.4　集光特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 13
2.4.1　回折限界集光スポット径と実効開口長 ・・・・・・・・ 13
2.4.2　導波光分布と集光スポット径 ・・・・・・・・・・・・・ 14
2.5　結像関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 15
2.6　結合効率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 18
2.6.1　出力結合効率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 18
2.6.2　入力結合効率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 18
2.7　高性能素子の設計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 21
2.8　結　　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24

第3章　集光グレーティングカップラの収差特性 ・・・・・・・・・ 25
3.1　緒　　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 25
3.2　収差関数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
3.2.1　回折波の位相 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 26
3.2.2　収差関数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 27
3.3　光線収差 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 29
3.4　収差関数の展開 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 31
3.4.1　収差表現式 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 31
3.4.2　収差係数 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 34
3.5　収差の種類 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38
3.5.1　非点収差 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 38
3.5.2　コマ収差 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 39
3.5.3　球面収差 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
3.6　波面収差 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 41
3.7　許容作製誤差 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 42
3.8　結　　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 45

第4章　光集積回路形読取りデバイスの提案 ・・・・・・・・・・・ 46
4.1　緒　　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46
4.2　導波路内での信号検出 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 46
4.3　フォーカス誤差検出法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 47
4.4　トラッキング誤差検出法 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 48
4.5　デバイスの具体的構成と動作原理 ・・・・・・・・・・・・・ 49
4.6　結　　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 52

第5章　導波形ビームスプリッタ ・・・・・・・・・・・・・・・・ 54
5.1　緒　　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 54

5.2 透過形ブラッググレーティング ・・・・・・・・・・・・・・ 54
5.3 基本特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55
5.3.1 ブラッグ回折 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 55
5.3.2 回折効率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 56
5.3.3 角度選択性および波長選択性 ・・・・・・・・・・・・・ 57
5.4 作製パラメータの最適化 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 58
5.5 形状方程式 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 59
5.6 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 60

第6章 光源と光検出器 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 61
6.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 61
6.2 半導体レーザ光源 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 61
6.2.1 単一モード発振 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 61
6.2.2 端面結合効率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 63
6.3 光検出器（フォトダイオード） ・・・・・・・・・・・・・・ 65
6.3.1 テーパ構造 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
6.3.2 設　計 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 65
6.4 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 67

第7章 光集積回路形読取りデバイスの作製 ・・・・・・・・・・・ 68
7.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68
7.2 作製パラメータ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 68
7.3 導波路およびフォトダイオードの作製 ・・・・・・・・・・・ 71
7.3.1 フォトダイオード付基板 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 71
7.3.2 ガラス導波層の作製 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
7.4 グレーティング素子の作製 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 72
7.4.1 Ｓｉ－Ｎグレーティング層の成膜 ・・・・・・・・・・・ 72

7.4.2 電子ビームレジストの塗布 ・・・・・・・・・・・・・ 73
7.4.3 グレーティングパターンの電子ビーム直接描画 ・・・ 74
7.4.4 Ｓｉ－Ｎ層への転写 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 76
7.5 バッファエッチング ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 78
7.6 半導体レーザの端面結合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 80
7.7 電極配線 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 81
7.8 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 82

第8章 デバイスの特性測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 84
8.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 84
8.2 光学測定 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 84
8.2.1 集光スポット径 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 84
8.2.2 結像関係 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 87
8.2.3 結合効率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 87
8.3 信号検出模擬実験 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
8.3.1 フォーカス誤差検出 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 90
8.3.2 トラッキング誤差検出 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 91
8.3.3 再生信号検出 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92
8.4 半導体レーザの結合特性 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 93
8.4.1 結合効率 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 93
8.4.2 発振スペクトルと集光スポット ・・・・・・・・・・・・ 94
8.4.3 戻り光の影響 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 96
8.5 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 98

第9章 デバイス特性の考察 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100
9.1 緒　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100
9.2 集光スポットサイズ ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 100

9.3 光電流レベル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 101
9.4 半導体レーザ結合 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 103
9.5 半導体レーザ発振スペクトル ・・・・・・・・・・・・・・・ 103
9.6 グレーティングの転写 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 104
9.7 結　言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 105

第10章 結　論 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 106

謝　辞 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 109

参考文献 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 110

第1章　序　論

1.1　光集積回路と集積化技術

光通信，光情報処理システムの発展，実用化に伴い，定盤上にバルク光学部品を配置した大型光学系にかわり，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．これがいわゆる微小光学技術（マイクロオプティクス）と呼ばれるもので，その適用分野・用途も各種計測やオフィス機器・民生機器などにも拡大されつつある．これらの個別部品自身はほぼ満足すべき性能をもつようになったが，光軸調整や位置合わせ（アセンブリング）が面倒であり安定性に欠けるなど依然として問題が残る．そこでより安定でより軽量小型な光学系として光集積回路が多くの光技術者の関心をひくようになった．

光集積回路[1)-4)]とは，一つの基板の表面に設けた光導波路を基本にして光源，光学系，光検出器などを集積し，全体としてある特定の機能を果たすようにした光回路である．光導波路は光波長程度の厚さまたは幅をもち，光波はその中を伝搬する．したがって，微小光学素子で構成されるデバイスが光線光学で扱えたのに対し，光集積回路デバイスは波動光学で扱わなければならない．材料構成から光集積回路を分類すると，Ⅲ－Ⅴ族半導体を基板としレーザ光源や光検出器もモノリシックに集積するものと，主として誘電体を基板とするものに大別される．後者では光源を外付けする必要があるが，光源にとらわれずに比較的自由に材料を選んで各種の受動素子，光波制御素子を実現し集積化できる利点がある．

光集積回路の代表的な特長として以下のような項目を挙げることができる．

(1) 無調整化；一体化集積デバイスとして作製するため，面倒なアセンブリングを必要とせず，また，電子デバイスで発達した各種の薄膜技術・プレーナ技術での作製が可能でプロセスの簡単化が計れる．

(2) 安定化；一体化により常に安定なアライメントが保持され，振動や温度

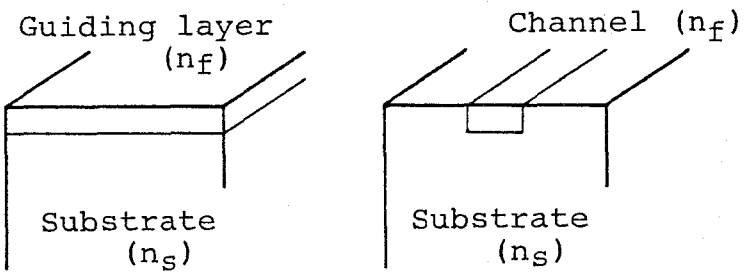
などの環境に対して強く高信頼性のデバイスとなる.

(3) 高性能化；光波は狭い領域に閉じ込められて集中するので，各種の光波制御を行うための相互作用を小さな電極・狭い領域で有効に生じさせることが可能となり，高効率化・高速化・低駆動電力化に有効である.

(4) 小型・軽量化；導波路は光波長程度の厚さであり，極限に近いデバイス小型化と軽量化が可能である.

一方，各素子の位置関係は固定されているので作製誤差は致命的であり，高度な作製技術・精度が要求される.

光集積回路に用いられる導波路には，２次元導波路と３次元導波路の２種類がある．２次元導波路とは，図1.1 (a) に示すように透明な誘電体基板上にわずかに屈折率が高く厚さが光波長オーダの薄膜を設けることにより，光を１方向にのみ閉じ込める平面状の導波路で，スラブ導波路とも呼ばれる．３次元導波路とは，図1.1 (b) に示すように２次元導波路にさらに線路状に屈折率の高い幅数マイクロメートル程度の部分を設けることにより，光を２方向に閉じ込めたもので，チャネル導波路とも呼ばれる．３次元導波路では，一基板上に複数の導波路が作製でき，光波の分岐・曲がり・結合を制御して光変調器やスイッチが構成できる．一方，２次元導波路では，光波の伝搬が２次元なので波面の制御を要するデバイスを構成でき，その構成素子としては波面変換機能を有しかつプレーナ作製容易なグレーティング素子が有力[5),6)] である.



(a) ２次元導波路　　(b) ３次元導波路

図1.1　２次元導波路と３次元導波路

このように光集積回路の作製には，高度な薄膜形成技術および微細パターン加工技術が要求される．光集積回路の概念が提唱されたのが1969年[1]であり，それから現在まで十数年しか経ていないが，その間の光集積回路技術の進展は目覚ましく，光導波路材料のスパッタリングやプラズマＣＶＤ等の薄膜形成技術[7),8)]，およびフォトリソグラフィ，電子ビームリソグラフィ[9)-11)]，レーザビームリソグラフィ[12)-14)]等の微細加工技術[4),15)]が格段に進歩してきた．特にここ２～３年の間に，これらの技術を駆使して種々の光集積回路が提案・試作されている．例えば，光通信用のマトリクス・スイッチ[16),17)]や波長多重／分波器[18)]，ＲＦスペクトル分析器[19)]，光ファイバ・レーザ・ドプラ速度計[20)]，微小変位・位置センサ[21),22)]などが次々に報告されている．しかし，まだ実用化に到った例はほとんどない．

本研究は，現状の集積化技術でのデバイス実現の可能性を探り，さらなる技術促進，応用分野の拡大のために，光集積回路の特長を活かすデバイスとして高密度光情報読取りデバイスを取り上げ，その光集積回路化について検討したものである．

１.２　光情報読取りデバイスの光集積回路化

情報化社会における膨大な情報処理のために，大容量・高密度でかつ取り扱いの容易な記憶装置として光情報記憶の開発，実用化が急速に進展している．なかでも光ディスクの成長は目覚ましく，光ビデオディスク，ＣＤ，画像ファイル，文書ファイル，コードデータ記録用と段階を経て発展してきており，最近では，コンピュータ用メモリ，特にパーソナル・コンピュータ用が期待されＣＤ－ＲＯＭやＤＲＡＷ（追記型）が開発されている[23)]．また，光カードの開発も最近になって急に活発になってきた[24)]．

この光情報記憶システムにおける①非接触で記録・再生ができディスクやヘッドの摩耗がない，②高速ランダムアクセス（テープに比べて）が可能，③傷やほこりに強い，④大容量・高密度である，等の特長は，このシステムのキー

コンポーネントである読取りデバイスにより実現されている．技術開発においても読取りデバイスには特に力が入れられ，種々のタイプが開発，実用化されてきた．しかし，これらはいずれもバルク形の微小光学素子（マイクロレンズやマイクロプリズム等）で構成されており，前節で述べたように，高精度の研磨，位置合わせ作業を必要とするなどバルク形デバイス特有の問題点を残している．

しかし，この読取りデバイスが光集積回路で構成できれば，デバイスの安定化，作製プロセスの簡単化の面での大幅な改善が期待でき，また，デバイスの軽量・小型化により，高速化・マルチヘッド化等の応用の自由度も拡大され得る．そこで，読取りデバイスの集積化を光集積回路技術応用の一つのニーズとしてとらえ，光集積回路デバイスの実現可能性を検討した．

読取りデバイスの例として，図1．2に光ディスクのピックアップの基本構成を示す．半導体レーザからの光は集光レンズにより光ディスク面上に直径1μm

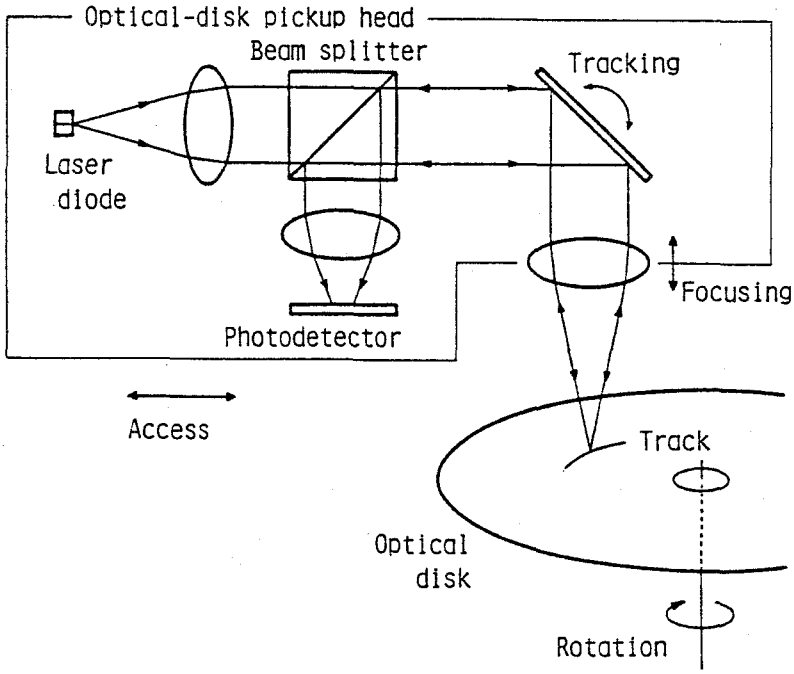


図1．2　光ディスクピックアップの基本構成

程度の微小光ビームに絞られ，情報源（ピット）に照射する．情報はディスクからの反射光の強度変化として光検出器で検出される．また，フォーカス誤差信号およびトラッキング誤差信号を検出し，アクチュエータで微小光ビームを光ディスク面上の決められた位置に精度良くアドレスすることが必要である．このように，読取りデバイスはレーザ光源，集光光学系，検出系およびアクチュエータで構成され，これらすべての集積化が理想である．しかし，レーザ材料であるⅢ－Ⅴ化合物では光集積回路用光学素子が未発達であり，両者のモノリシック集積化に当面の現実性はない．さらに，機械的アクチュエータを不必要とするために考えられる導波形光制御デバイスも，読取りデバイスに必要な性能を得ることは理論的にも困難である．したがって，本研究論文では，現状で最も実現可能性の高いアプローチとして，Ｓｉ基板誘電体薄膜導波路を用いて光学系と光検出器のモノリシック集積化を行い，これに半導体レーザをハイブリッド結合して構成する光集積回路を対象とした．これは，小型化したアクチュエータを組み合わせる必要があり，完全な集積化ではないが，さらに高度な集積化への一段階となると考えられる．

１.３　集光グレーティングカップラ（導波形集光レンズ）

読取りデバイスを光集積回路化するには，導波路内を伝搬する平面的な導波光を自由空間の一点に回折限界まで集光する素子を必要とする．また，その素子はプレーナ技術による作製に適した構造であることが望ましい．集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ；Focusing Grating Coupler）はそれらの要求を満たす．ＦＧＣは，導波路用入出力結合器としてよく知られるグレーティングカップラ[25),26)]にホログラフィの原理に基づく波面変換機能を付加したもの[27)]の一種で，図1.３に示すように，曲がりとチャープ（周期変化）を有するグレーティングパターンを持ち，導波光を外部に結合するとともに集光する導波形素子[28)-32)]である．

ＦＧＣの作製には，ホログラフィックな方法[28),29)]と電子ビームで直接描

画露光する方法[30)-32)]がある．前者は通常のホログラム作製と同様で信号光波と参照光波で導波路上に干渉パターン（グレーティングパターン）を露光する方法であるが，これで作製されたものは作製波長と使用波長が異なると収差を生じ十分な集光特性は期待できないという本質的な問題点がある．一方，電子ビーム直接描画方法とは，あらかじめ求めておいたグレーティングパターンの形状式からパターンデータを算出する計算機を通して電子ビーム走査を制御して露光する方法である．この方法で作製すれば，より理想に近いグレーティングパターンが得られ，回折限界の集光特性を必要とする読取りデバイス等への応用も可能となる．

バルク形光学系においてレンズが重要な役割を果たすことからみても，レンズ機能をもつＦＧＣは光集積回路において種々の用途が考えられる潜在能力の大きな素子である．しかし，これまでの光集積回路に使用された例はなく，本研究の光集積回路形読取りデバイス構成上のキーコンポーネントであり，本論文においてもＦＧＣの解析がかなりの部分を占める．

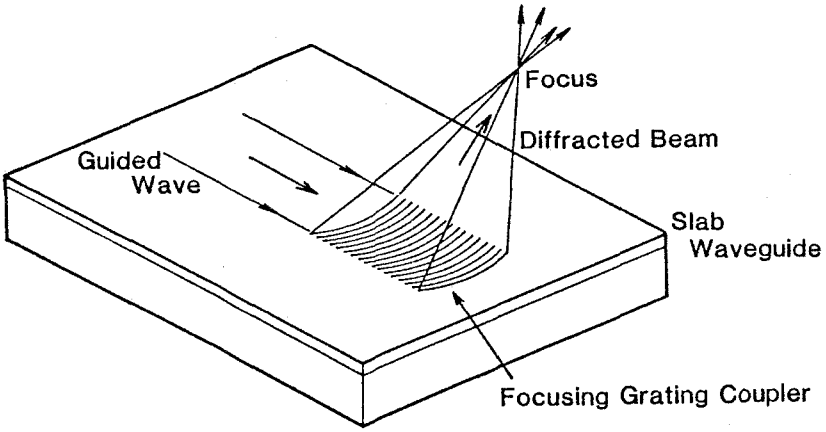


図1．3　集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ）

1.4　本論文の構成

本論文では，まずＦＧＣの特性を明らかにし，その特性を考慮した光集積回路形読取りデバイスの構成を提案する．次ぎに，実際のデバイス作製および動

作確認実験の結果について述べ，デバイス実現の可能性を検討する．

第２章ではＦＧＣの基本特性である集光特性，結像関係，結合効率を理論解析し，高性能ＦＧＣの設計について述べる．第３章ではＦＧＣの収差解析を行い，デバイス設計および作製時に考慮する必要がある許容誤差を見積もる．第４章では読取りデバイスに要求される機能を検討し，それらが実現可能となる光集積回路の構成を提案する．第５章では光集積回路形読取りデバイスの構成決定の際に中心となる導波形ビームスプリッタについて検討する．第６章ではこの光集積回路デバイスの光源と光検出器について述べる．第７章，第８章では第６章までの解析，設計に基づき実際にデバイスを作製し，基礎実験を行う．第９章では前章までで明らかとなった問題点およびその解決策を論じ，デバイス実現の可能性を検討する．以上の各章で得られた結果を総括して第10章に述べる．

第2章　集光グレーティングカップラの基礎理論[33),34)]

2.1 緒　　言

本章では光集積回路形読取りデバイスのキーコンポーネントとしての集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ）の基本特性を理論解析し，高性能ＦＧＣの設計について記述する．第４章で述べるように，ＦＧＣは導波光を空間中の集束球面波に結合するだけでなく光ディスクからの反射光を再び導波路内に導く働きもする．そこでこの章でもそれを念頭に入れた解析を行う．

まず，グレーティングによる導波モード－放射モード結合について述べ，読取りデバイスに適した結合について検討する．ＦＧＣは１.3で述べたように電子ビーム直接描画法を用いて作製する．そこで電子ビーム走査パターンを計算するためのＦＧＣ形状式を導く．次いで，光情報読取りに最も重要な集光特性へのＦＧＣ開口における導波光振幅分布の影響を明らかにする．そして，レンズの基本特性である結像関係を導く．この結果は光集積回路形読取りデバイスの誤差検出機能実現において重要な役割を果たす．高い回折効率は良好な集光特性とともにＦＧＣに要求される基本的な特性である．そこで導波光を集束球面波に変換する出力結合および反射光を再び導波路内に導く入力結合についてその回折効率を論ずる．また，それらの特性と作製パラメータの関係を明らかにし，良好な集光特性と高い回折効率を同時に実現する高性能素子を設計する．

2.2 導波モード－放射モード結合[35)]

2.2.1 伝搬ベクトルダイアグラム

グレーティングカップラに導波光が入射した場合の導波モード－放射モード結合の例とその伝搬ベクトルダイアグラムを図2.１に示す．２次元導波路の導波面（ｘｙ面）に沿って広がり，ｙ方向に格子ベクトルＫをもつグレーティングがある場合，この構造内をｙ方向に伝搬定数$\beta_0 = Nk = 2\pi N/\lambda$をもつ導波光が伝搬するとき，この波に付随してｙ方向伝搬定数

$$\beta_q = \beta_0 + qK \qquad (K = 2\pi/\Lambda,\ q：整数) \tag{2.1}$$

をもつ空間高調波が生ずる．ここでN，λ，Λはそれぞれ導波路実効屈折率，光波の真空中での波長，グレーティング周期を表す．グレーティングはy方向には長いがz方向には薄いので，結合する波動間はy方向の位相整合のみが満たされればよく，空間高調波のうち$|\beta_q| < n_c k$または$|\beta_q| < n_s k$を満たす次数qがある場合，この高調波は

$$\begin{aligned} n_c k \sin\theta_{qc} &= \beta_q = Nk + qK \\ n_s k \sin\theta_{qs} &= \beta_q = Nk + qK \end{aligned} \tag{2.2}$$

で決まる角度θ_{qc}，θ_{qs}でそれぞれ空気側，基板側へ放射する．

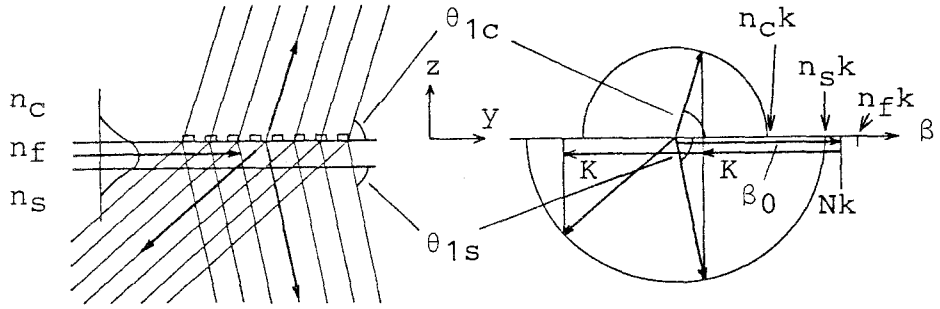


図2.1　導波モード－放射モード結合

読取りデバイスに応用する場合，基板はSiなので空気側への回折光を使用することになる．また，大きな開口数NAおよび高い効率を得るため，導波路面にほぼ垂直に出射する1次の回折光を用いる．しかし，ここで注意しなければならないことは条件

$$2\beta_0 = qK \tag{2.3}$$

では，q次の高調波が導波路内を逆進する導波モードとして生じ1次回折光の回折効率が低下する可能性がある．したがってこの条件はできるだけ避ける方が望ましい．

2.2.2 放射損失係数

グレーティング領域内を伝搬する導波光の振幅を$E_o(y)$とすると，放射モードへの結合によるパワー漏洩のため

$$E_o(y)=E_o\exp(-\alpha y) \tag{2.4}$$

のように書け，その振幅はy方向の進行とともに指数関数的に減衰する．したがって，回折光も導波光減衰の影響をうけ図2.2に示すように指数関数的に減

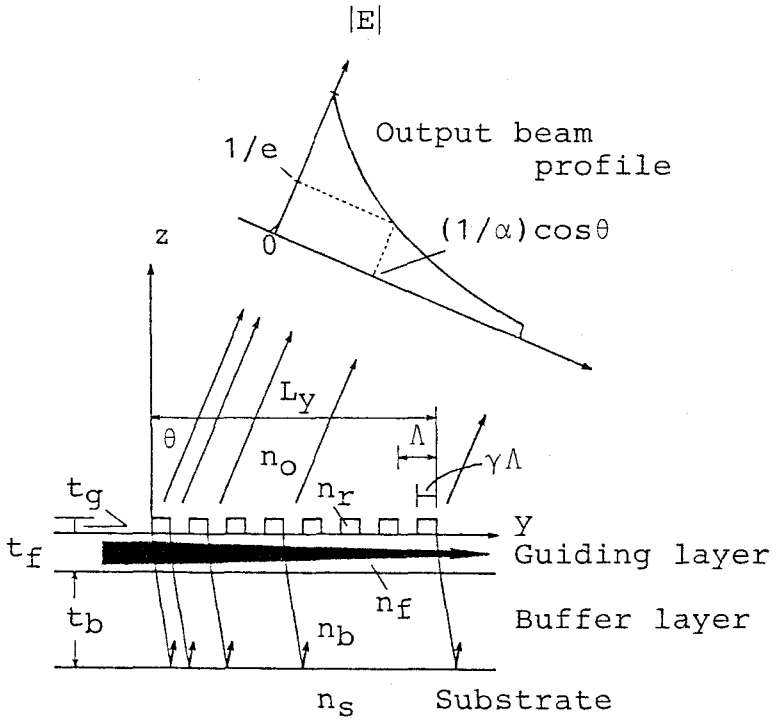


図2.2　グレーティングカップラによる回折

衰する．αはその減衰の度合を表すパラメータで放射損失係数と呼ばれる．この放射損失係数はＦＧＣの基本特性に大きく関与し，高性能ＦＧＣの設計における重要な因子となる．

２.３　形状方程式

導波光を導波路面にほぼ垂直な方向の空間の一点に１次回折により集光させるＦＧＣを考え，その形状方程式を導く．

光源に半導体レーザ（ＬＤ）を採用し端面結合により導波光を励振する場合，その導波光は２次元の発散波（円柱波）となる．そこでＦＧＣとして，図2.３に示すような発散導波光を直接集光させるタイプと，図1.３に示すようなコリメートされた導波光を集光させるタイプを考える．ＦＧＣの形状式は，導波光と集束球面波のＦＧＣ開口（導波路面）上での位相差を考慮することで得られる．集束球面波の出射角，焦点距離をそれぞれθ，ｆとすると次のようになる．

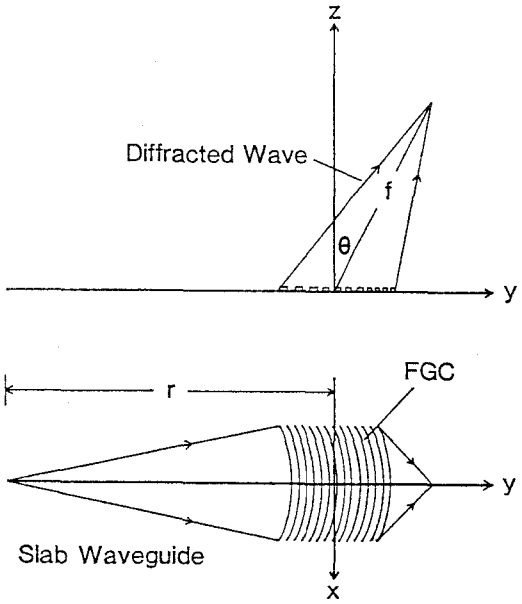


図2.３　発散導波光を結合するＦＧＣ

(a) 発散導波光を直接用いる場合

図2.3に示す座標系を用い，ＦＧＣの中心を原点とし，発散点までの距離をｒとする．ｘｙ平面上の点(ｘ，ｙ)における導波光および集束球面波の位相は，

$$\Phi_{IN} = kN\sqrt{x^2+(y+r)^2} \tag{2.5}$$

$$\Phi_{DF} = -k\sqrt{x^2+(y-f\sin\theta)^2+(f\cos\theta)^2} \tag{2.6}$$

となる．グレーティングのm番目のラインの形状は

$$\Phi_{FG} = \Phi_{DF} - \Phi_{IN} = 2m\pi + \mathrm{const.} \qquad (m：整数) \tag{2.7}$$

から決定され，ｘ＝ｙ＝０でｍ＝０となるように定数をきめると，

$$\begin{aligned} &N\sqrt{x^2+(y+r)^2}+\sqrt{x^2+(y-f\sin\theta)^2+(f\cos\theta)^2} \\ &\quad = -m\lambda + Nr + f \end{aligned} \tag{2.8}$$

となる．

(b) コリメートされた導波光を用いる場合

これは(a)の特殊な場合（ｒ＝∞）で，ｘｙ平面上の点(ｘ，ｙ)における導波光の位相は

$$\Phi_{IN} = kNy \tag{2.9}$$

であるから，(a)と同様にして求めると形状式は

$$Ny + \sqrt{x^2+(y-f\sin\theta)^2+(f\cos\theta)^2} = -m\lambda + f \tag{2.10}$$

となる．

式(2.8)はｘについて複２次式，式(2.10)はｙについて２次式となり，それぞれｘ，ｙについて解析的に解くことによりパターンデータを計算し電子ビーム走査を制御できる．

2.4 集光特性

2.4.1 回折限界スポット径と実効開口長

ＦＧＣが導波路面上の（−Lx／２）＜ｘ＜Lx／２，（−Ly／２）＜ｙ＜Ly／２の位置に設けられているとし，簡単のため出射光軸が導波路面に垂直の場合（$\theta=0$）を考える．ＦＧＣはその開口から焦点に向かう集束球面波を生じさせる．

導波光の振幅がその開口内で一様であれば，焦点の光強度分布はよく知られているようにsinc関数となり，集光スポットの３dB全幅は開口長で決まる回折限界値

$$
\begin{aligned}
2\sigma_x &= 0.88 f \lambda / Lx \\
2\sigma_y &= 0.88 f \lambda / Ly
\end{aligned}
\qquad (2.11)
$$

となる．しかし実際には開口内の振幅は一様でなく，ｘ方向には図2.４に示すように入力導波光の分布を反映したガウス分布となり，ｙ方向にはすでに述べたように導波光の回折（放射）による減衰を反映した指数関数分布となる．し

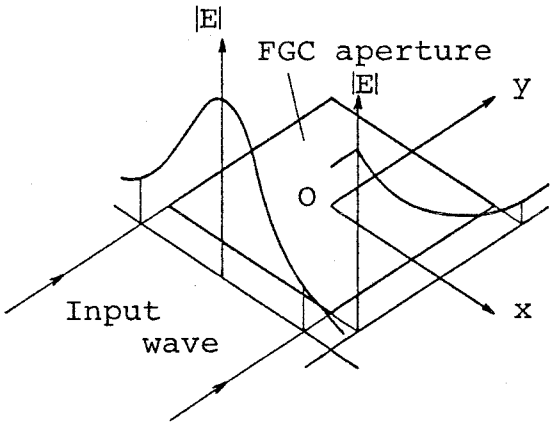


図2.４　ＦＧＣ開口における導波光振幅分布

たがって，実効的な開口長の減少による集光特性の劣化が予想される．そこで以下，これらの影響を定量的に検討する．

2.4.2 導波光分布と集光スポット径

焦点面（z＝f；XY面）における光振幅分布G（X，Y）は開口面での振幅分布のフーリエ変換で与えられ，FGC位置での導波光x方向の1/e半幅をw，放射損失係数をαとすると，

$$G(X,\ Y)=\int_{-Ly/2}^{Ly/2}\int_{-Lx/2}^{Lx/2}\exp\left\{-\left(\frac{x}{w}\right)^2-\alpha y\right\}$$

$$\cdot\ \exp\left\{-i\frac{2\pi}{\lambda f}(Xx+Yy)\right\}dxdy \qquad (2.12)$$

となる[36]．焦点の光強度分布は$|G|^2$で，

$$w \gg Lx,\ 1/\alpha \gg Ly \qquad (2.13)$$

のとき，式(2.12)は矩形開口に対応するものとなり，集光スポット3dB全幅は式(2.11)に一致する．式(2.13)が成立しないときは実効的な開口が小さくなり集光特性は劣化する．一方，wを大きくすることは導波光の利用率の低下を意味し好ましくなく，また後述のように高い回折効率を得るためにはαをできるだけ大きくする必要がある．これらは式(2.13)と相反する条件である．

そこで最適条件を求めるために，回折限界の値で規格化した集光スポット径のw及び$(1/\alpha)$依存性を式(2.12)から計算した．その結果を図2.5に示す．wの減少，αの増加にともない，集光スポット径は，$w \simeq Lx$，$(1/\alpha) \simeq Ly$あたりから，急に増大するのがわかる．すなわち集光特性の劣化を抑えかつ高効率化を実現するためには，双方の条件の妥協点として$w \simeq Lx$，$(1/\alpha) \simeq Ly$とすればよい．特に$w=Lx$，$(1/\alpha)=Ly$のときはスポット幅は回折限界の約3%増となる．

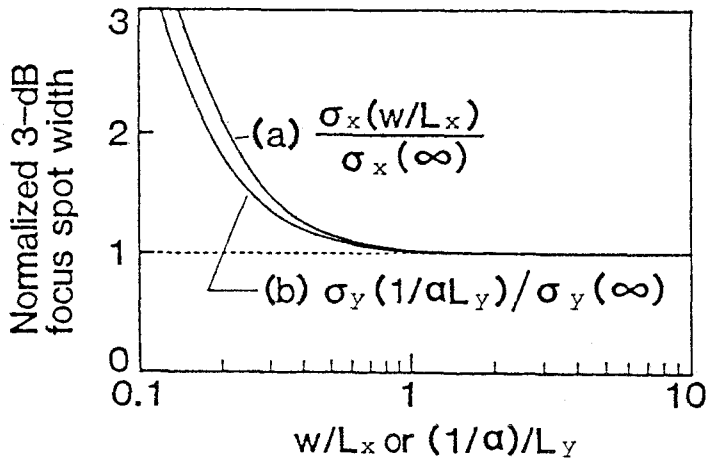


図2.5　集光スポット径3dB全幅のw依存性(a) および (1/α) 依存性(b)

2.5　結像関係

光源と集光点の結像関係を明らかにするために，図2.6に示すように点光源A（$-r'\sin\delta'$，$-r'\cos\delta'$）から発散する導波光が式(2.8) で表されるFGCに入射する場合を考える．ここでr'，δ'はそれぞれ原点と点A間の距離，入射角を表す．入射導波光の位相は

$$\Phi_{IN}=kN\sqrt{(x+r'\sin\delta')^2+(y+r'\cos\delta')^2} \tag{2.14}$$

と表され，xy平面における回折波の位相は

$$\Phi_{DF}=\Phi_{IN}+\Phi_{FG}+\mathrm{const.} \tag{2.15}$$

で与えられる．ここで回折波の集光点を求めるために点B($f'\sin\varepsilon'$，$f'\cos\varepsilon'\sin\theta'$，$f'\cos\varepsilon'\cos\theta'$)に焦点をもつ球面波（ガウス参照面）のxy面上の位相

$$\Phi_G=-k\sqrt{(x-f'\sin\varepsilon')^2+(y-f'\cos\varepsilon'\sin\theta')^2+(f'\cos\varepsilon'\cos\theta')^2} \tag{2.16}$$

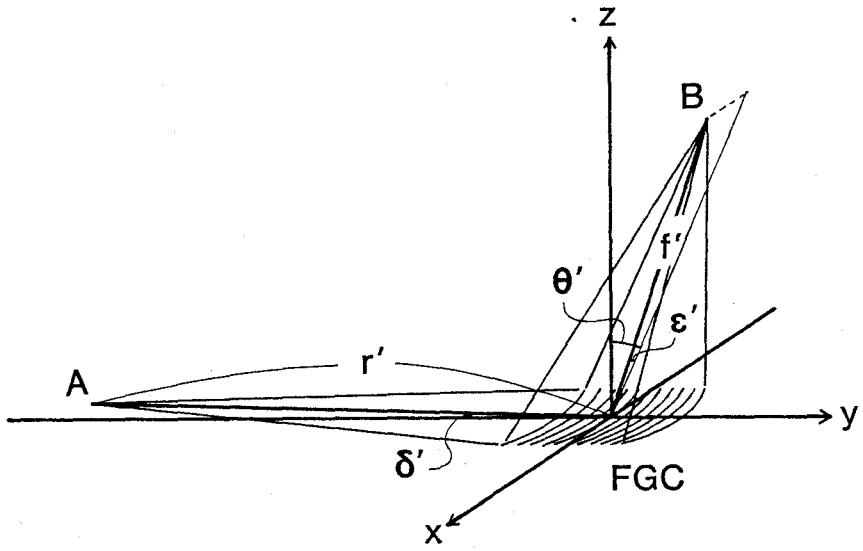


図2.6　ＦＧＣの結像関係

を考え，Φ_{DF}とΦ_G のｘ，ｙに関する２次までの展開係数を比較し発散点Ａと集光点Ｂの関係を求めた．ｘ，ｙの１次の項の係数比較より

$$\sin\varepsilon' = N\sin\delta' \tag{2.17}$$

$$\cos\varepsilon'\sin\theta' = N(\cos\delta' - 1) + \sin\theta \tag{2.18}$$

を得る．これは屈折関係を表している．ｘの２次の項の係数比較より

$$\frac{N\cos^2\delta'}{r'} + \frac{1 - N^2\sin^2\delta'}{f'} = \frac{N}{r} + \frac{1}{f} \tag{2.19}$$

を得る．これは点Ｂがｘ方向に集束する位置を与える結像式で，特に$\delta' = 0$のとき

$$\frac{N}{r'} + \frac{1}{f'} = \frac{N}{r} + \frac{1}{f} = \mathrm{const.} \tag{2.20}$$

となり，Ｎが含まれることを除いて通常のレンズの近軸結像式と同形となる．

ｙの２次の項の係数比較より

$$\frac{N\sin^2\delta'}{r'} + \frac{1-\{N(\cos\delta'-1)+\sin\theta\}^2}{f'} = \frac{\cos^2\theta}{f} \quad (2.21)$$

を得る．これは点Ｂがｙ方向に集束する位置を与える結像式で，特に$\delta'=0$のとき

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f} \quad \text{or} \quad f'=f \quad (2.22)$$

となる．

式(2.19)～(2.22)からＬＤの位置設定誤差により$r' \neq r$となればｘ方向とｙ方向の集束位置が異なり非点収差が生ずることがわかる．これはＦＧＣ特有の結像関係である．また，このことから非点収差がＦＧＣの重要な収差となることが予想される．

点Ｂから発散する球面波が式(2.8) で表されるＦＧＣに入射する場合も，同様の取扱いにより，全く同じ関係式(2.17)～(2.22)が導かれる．したがって，式(2.17)から点Ｂのｘ方向へのずれ(ε')は点Ａのｘ方向変位(δ')として現れ，また式(2.19)から点Ｂの出射光軸に沿ったずれ(f'に対応)は点Ａのｙ方向変位(r'に対応)として現れることがわかる．すなわち，空間中の発散点の位置変化は導波光の集束点の変位を生じさせることがわかった．これは光ディスクのトラック方向がｙｚ平面上にあるように配置すれば，トラッキング誤差がε'に対応しフォーカス誤差がf'に対応するので，それらの誤差が戻り導波光の集束点変位(δ', r'に対応)に反映され，周辺素子の集積化により検出可能であることを意味する．これについては第４章で詳述する．また，$f' \neq f$の場合には式(2.21)，(2.22)は成立せず，後節の反射面変位による入力結合効率の低下に反映される．

2.6 結合効率

2.6.1 出力結合効率

簡単のためx方向には一様であると仮定し，開口長LyのＦＧＣに導波光が入射する場合を考える（図2.2参照）．一般に，回折光は空間側および基板側に放射する．出力結合効率$\eta^{\circ}(Ly)$を入射導波光パワーP_0に対する出力光すなわち空間側への１次回折光パワー$P^a(Ly)$の比で定義すると，

$$\eta^{\circ}(Ly) = \frac{P^a(Ly)}{P_0} = \eta^{\circ}\{1-\exp(-2\alpha Ly)\} \tag{2.23}$$

が導かれる[30]．αは放射損失係数，η°は$\eta^{\circ}(\infty)$で回折光の空間側へのパワー分配比である．この式からわかるように，与えられた長さLyのＦＧＣで高い回折効率を得るためには，η°を大きな値とするとともにαをできるだけ大きくする必要がある．

2.6.2 入力結合効率

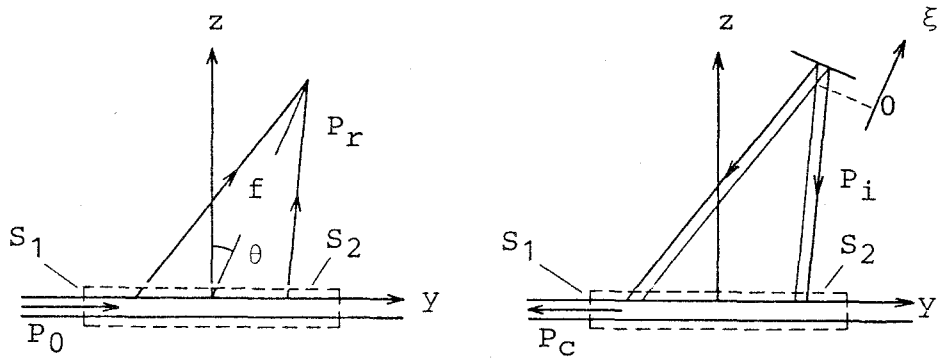
反射光を再び導波路内に導く入力結合の回折効率を求める．この回折効率は反射面の変位に依存するのでその影響をも含めた入力結合効率を，電磁界の相反定理を用いた取り扱い[37]で求める．相反定理はマックスウェルの方程式から導かれるもので，ある構造内の２組の電磁界を$\mathbf{E}_1$，$\mathbf{H}_1$；$\mathbf{E}_2$，$\mathbf{H}_2$とすれば

$$\int(\mathbf{E}_1\times\mathbf{H}_2-\mathbf{E}_2\times\mathbf{H}_1)d\mathbf{S}=0 \tag{2.24}$$

が任意の閉面Ｓについて成立することとして表現される．

図2.7に示すように反射面が焦点面から出射方向に距離ξだけずれた場合を考え，出力結合の波を$\mathbf{E}_1$，$\mathbf{H}_1$，入力結合の波を$\mathbf{E}_2$，$\mathbf{H}_2$として式(2.24)を適用する．積分面は同図破線のようにグレーティングを包含する閉面とし，ＦＧＣの開口を$(-Lx/2)<x<Lx/2$，$(-Ly/2)<y<Ly/2$とする．

$\mathbf{E}_1$，$\mathbf{H}_1$；$\mathbf{E}_2$，$\mathbf{H}_2$ には多数の波成分が含まれるが，式(2.24)の積分では，互いに共役な関係にある波の積以外の項は速い変化のため0となる．共役関係にある波は，入射導波光P_o波と戻り導波光P_c波，および回折球面波P_r波と反射球面波P_i波である．



(a) 入射導波光P_oと回折球面波P_r　(b) 反射球面波P_iと戻り導波光P_c

図2.7　FGCによる出力結合(a)と入力結合(b)

入射導波光として発散波を考えると，S_1面の積分に関するP_o波，P_c波，およびS_2面の積分に関するP_r波，P_i波の電界はそれぞれ

$$\mathbf{E}_o(x,y,z)=c_o\mathbf{E}_g(z)\exp\{+ikN\sqrt{x^2+(y+r)^2}\} \tag{2.25}$$

$$\mathbf{E}_c(x,y,z)=c_c\mathbf{E}_g^*(z)\exp\{-ikN\sqrt{x^2+(y+r')^2}\} \tag{2.26}$$

$$\mathbf{E}_r(x,y,z)=c_r\mathbf{E}_a(z)\exp(-2\alpha y)\cdot\exp\{-ik\sqrt{x^2+(y-f\sin\theta)^2+(f\cos\theta)^2}\} \tag{2.27}$$

$$\mathbf{E}_i(x,y,z)=c_i\mathbf{E}_a^*(z)\exp(+2\alpha y)\exp\{+ik\sqrt{x^2+(y-[f+2\xi]\sin\theta)^2+([f+2\xi]\cos\theta)^2}\} \tag{2.28}$$

で表される．規格化条件

$$\mathrm{Re}\,[(1/2)\int(\mathbf{E}_g(z)\times\mathbf{H}_g^*(z))\,\mathbf{e}_y dz]=1 \tag{2.29}$$

$$\mathrm{Re}\,[(1/2)(\mathbf{E}_a(0)\times\mathbf{H}_a^*(0))\,\mathbf{e}_z]=1 \tag{2.30}$$

を用いると，式(2.24)～(2.28)から入力結合効率η^{i}(Ly, ξ) は

$$\eta^{i}(Ly,\ \xi) = \eta^{o}(Ly)\ \left\{ \frac{2\alpha Ly}{\exp(\alpha Ly)-\exp(-\alpha Ly)} \right\}^{2} \cdot \frac{S^{2}(u)+C^{2}(u)}{u^{2}} \cdot \frac{S^{2}(v)+C^{2}(v)}{v^{2}} \cdot \frac{w^{2}}{S^{2}(w)+C^{2}(w)} \tag{2.31}$$

ただし，

$$S(x)=\int_{0}^{x}\sin\left(\frac{\pi}{2}t^{2}\right)dt,\quad C(x)=\int_{0}^{x}\cos\left(\frac{\pi}{2}t^{2}\right)dt \tag{2.32}$$

$$u=\frac{Lx}{f}\sqrt{\frac{\xi}{\lambda}},\quad v=\frac{Ly\cos\theta}{f}\sqrt{\frac{\xi}{\lambda}},$$

$$w=\frac{Lx}{r}\sqrt{\frac{N(r-r')}{2\lambda}} \tag{2.33}$$

となる．式(2.31)の右辺の積の第１項は出力結合効率である．第２項はＦＧＣの開口面における出射光と反射光の振幅分布が一様でないために生じる効率低下を表し，$\alpha Ly=1$では0.72である．第３項以下は出射光と反射光の波面の相違が生じたとき（$\xi \neq 0$）の効率減少を表し，$\xi=0$のとき１となる．

条件$r'=r$を代入すると，式(2.31)は回折導波光P_c波の波面が入射導波光P_o波の波面に一致する結合効率を与える．例として，$Lx=Ly\cos\theta=a$，$f=2$mm，$\lambda=0.6328$μmとおき，反射鏡変位ξと結合効率$\eta^{i}(\xi)$の関係をａをパラメータとして図2.8に示す．ξの増加とともに結合効率が低下しているのがわかる．また半値半幅は式(2.31)から$\xi=1.2\ f^{2}\lambda/a^{2}$で与えられ，反射面変位がほぼ通常の焦点深度範囲（$|\xi|<f^{2}\lambda/a^{2}$）にあるときにのみ高い結合効率が得られることがわかった．

結像関係式(2.20)を代入すると，式(2.31)は反射光P_i波が導波光に結合す

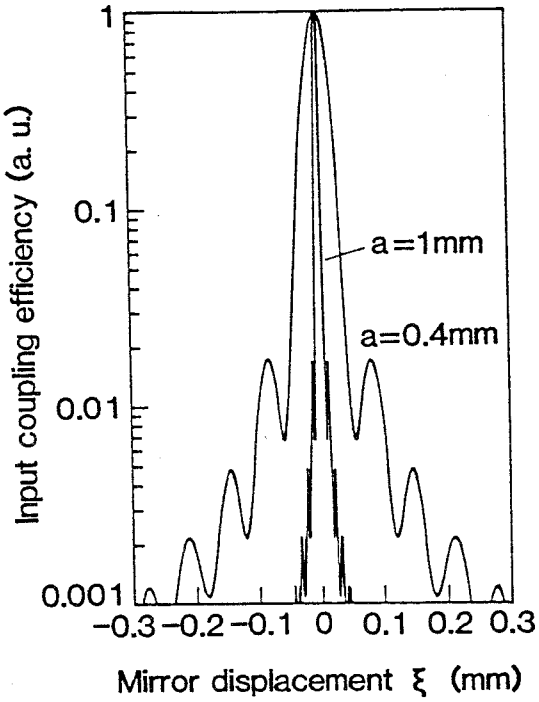


図2.8　反射鏡がξ変化したときに回折導波光が入射導波光と同一の波面をもつ光波に結合する効率

る効率を与える．その効率のξ依存性を計算した結果，図2.8に比べてξの増加による効率低下は緩やかなものとなり，半値半幅は$\xi = 1.7\ f^2\lambda / a^2$となった．導波光励振効率が図2.8の結合効率に比べて大きくなるのは，戻り導波光の入射導波光への結合条件が導波光励振条件より厳しいためである．

2.7　高性能素子の設計

光情報読取りデバイスに必要な集光特性と高い回折効率を同時に満足するＦＧＣを作製するには，放射損失係数αや回折光のパワー分配比η^0をデバイスの作製パラメータと関連づける必要がある．厳密解析は既に当研究室で行われている[30),31)]が，これは煩雑な数値計算を必要とする．むしろ近似的ではあ

るが解析的な表現式を導出し，各パラメータの相互依存性を系統的に明らかにする方が，物理的意味の理解や傾向の把握が容易である．そこで，放射損失係数及び回折光パワー分配比の作製パラメータ依存性の解析的表現を回路論的取扱い[38]で求めた．

解析モデル

2.6.1でも述べたように，高い回折効率を得るためにはη^0を大きくすることが望まれる．しかし2.1.1の議論からわかるように，空気側への回折光を使用する場合でも，同時に基板放射モードも生じパワが分配されてしまう．このような結合領域でパワーを単一ビームに集中させる方法としては，レリーフ形グレーティングではブレーズ効果を利用する方法[39]がある．しかし，ここで対象としているＦＧＣはサブマイクロメートルの周期と複雑なグレーティングパターンを有しており，実際に作製するのは現状では困難である．

そこで図2.2に示す矩形のレリーフ構造をもつグレーティングを考える．ｎは各層の屈折率，ｔは各層の膜厚を表す．γは矩形レリーフのアスペクト比である．この構造でも，Ｓｉ基板を採用すると，バッファ層と基板の屈折率差が大きくとれるので，境界での反射を利用することにより回折効率の向上が期待できる．導波光はTE_0モードで考え，１次回折光のみを扱った．各層でのｚ方向への波数をそれぞれk^0，k^g，k^f，k^b，k^sとおく．

矩形グレーティングであるから，グレーティング層における誘電率のｚ方向依存性はない．また，グレーティング層をその体積平均誘電率をもつ層に置き換えた多層導波路を基準構造とし，グレーティング（誘電率のｘ方向変化）の影響を基準構造からの摂動として考えた．ここで扱うグレーティングカップラは弱結合（$1/\alpha \simeq Ly \simeq 1$ mm）なので，摂動は１次だけ考慮し，グレーティング層厚t_gは非常に薄いとした．

解析結果

導波光の放射損失係数α及び回折光の空間側へのパワー分配比η^0は

$$\alpha = 2(1+\mathrm{Re}\{r_g\}) \cdot \frac{(n_f^2-N^2)(n_r^2-n_o^2)^2}{N(n_f^2-n_o^2)}$$

$$\cdot \frac{2\pi/k^g}{T} \cdot \frac{t_g^2}{\lambda^3} \sin^2(\gamma\pi) \tag{2.34}$$

$$\eta^o = \frac{|1+r_g|^2}{2(1+\mathrm{Re}\{r_g\})} \tag{2.35}$$

で表される．Tは実効導波路厚である．r_g は反射性基板を採用する効果，すなわち，基板面で反射された回折光が空間側への回折光に重畳されるため干渉が生ずることを説明するパラメータで

$$r_g = \frac{k^b-k^s}{k^b+k^s} \cdot \exp\{i\,2(k^b t_b + k^f t_f)\} \tag{2.36}$$

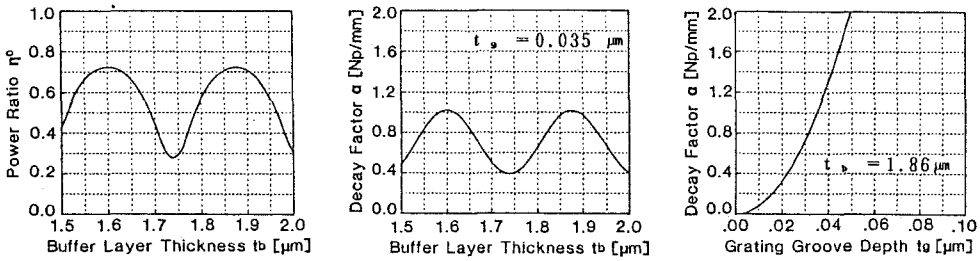
で与えられる．$(n_f^2-N^2)/(n_f^2-n_o^2)$ は導波路中の電界分布を反映し，$(n_r^2-n_o^2)^2 \sin^2(\gamma\pi)$ はグレーティングの形状に起因している．アスペクト比γは，以下，0.5として考える．またαはt_g^2に比例しているが，これはt_gが小さい間は導波光振幅とグレーティングの相互作用はt_gに比例することに起因する．

図2.9にこれらの解析結果の例を示す．厳密解析で求められている場合についての比較から，これらは十分な精度で適用できることがわかった．αおよびη^0のバッファ層厚t_b依存性（図2.9(a),(b)）は周期的な増減を示す．これは上述の干渉効果を反映している．

設　計

高い回折効率を得るためには図2.9(a)からη^0が最大となるようなt_bを決めてやればよい．実際にはt_bの値は導波損失も考慮して決める必要があるが，これについては7.1で述べる．次いで集光特性を考慮に入れた前述の条件（$\alpha Ly=1$）を満たすように図2.9(c)からt_gを決定する．そのとき図2.9

の例ではη^0 =0.72であり，式(2.23)から回折効率は62%となる．



(a) (b) (c)

図2.9 放射損失係数αとパワー分配比η^0 の膜厚依存性（λ=0.79μm, n_s=3.75, n_b=1.46, n_f=1.55, n_r=2.00, n_o=1.00, t_f=0.95μm, γ=0.5, Lx=Ly=1 mm, θ=15°）

2.8 結　言

光情報読取りデバイスのキーコンポーネントとしてのＦＧＣの基本特性を解析し，高効率ＦＧＣの設計について述べた．

その結果，デバイスのパラメータを最適化すれば，回折限界の３%増の集光スポット径と約60%の効率を同時に満足するＦＧＣを実現できることが明らかとなった．また，結像関係を解析することにより，反射光の発散中心の変位が戻り導波光の焦点変位として現れることがわかった．これは周辺素子の集積化により光ディスクのフォーカス誤差やトラッキング誤差が導波路内で検出可能であることを意味する．

第３章　集光グレーティングカップラの収差特性[40)]

３.１ 緒　　言

光集積回路形読取りデバイスでは，集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ）は従来の対物レンズに相当する素子として用いられるので，１μm程度の微小な集光スポット径が要求される．電子ビーム直接描画法によれば，２.3で導いた形状式で与えられる理想的なグレーティングパターンを描画できる．したがって，理論的には無収差のＦＧＣが作製でき，要求される良好な集光特性を実現できる．しかし，実際のデバイスにおける集光特性は作製精度に依存し，設計値と作製値の間に誤差が生じると集光特性は劣化する．すなわち，デバイスの実現可能性や高性能化を検討するには，ＦＧＣの収差を解析し，所望の集光特性を得るための許容作製誤差を見積もる必要がある．一方，このＦＧＣは元来波長分散を有し，また軸対称ではないので，一般に知られている収差の式とは異なった非常に複雑なものとなることが予想される．

そこで本章では，ＦＧＣの収差特性を明らかにしパラメータの許容誤差量を求める．まず，収差を明らかにする上で基本となる収差関数を導く．それを用いて光線収差を計算し，収差による集光スポットの拡がり及び形状を求める．次いで，収差関数を展開し，従来の軸対称系レンズの収差との対応をつけ，ＦＧＣの収差の特徴を明らかにする．また，波面収差を計算し，許容作製誤差を見積もる．

空間中の一点に焦点をもつ回折波を結合するＦＧＣには，２.3で述べたように，入力導波光としてある一点（半導体レーザ（ＬＤ）の位置）からの発散波を直接結合するものと，平行導波光を結合するものがある．この章では前者を対象とするが，後者は前者の特殊な場合であり，解析手法・結果はそのまま適用可能である．

3.2 収差関数

3.2.1 回折波の位相

導波路面（x y 面）上での回折波の位相Φ_{DF}は式(2.7) から

$$\Phi_{DF}=\Phi_{IN}+\Phi_{FG} \tag{3.1}$$

で与えられる．Φ_{IN}およびΦ_{FG}はそれぞれ入力導波光の位相およびＦＧＣの形状を表し，作製誤差が無ければ，

$$\Phi_{IN}=kN\sqrt{x^2+(y+r)^2} \tag{3.2}$$

$$\Phi_{FG}=-k\sqrt{x^2+(y-f\sin\theta)^2+(f\cos\theta)^2}$$
$$-kN\sqrt{x^2+(y+r)^2} \tag{3.3}$$

で表される（図3.1参照）．式(3.1) ～(3.3) を用いると，Φ_{DF}は

$$\Phi_{DF}=-k\sqrt{x^2+(y-f\sin\theta)^2+(f\cos\theta)^2} \tag{3.4}$$

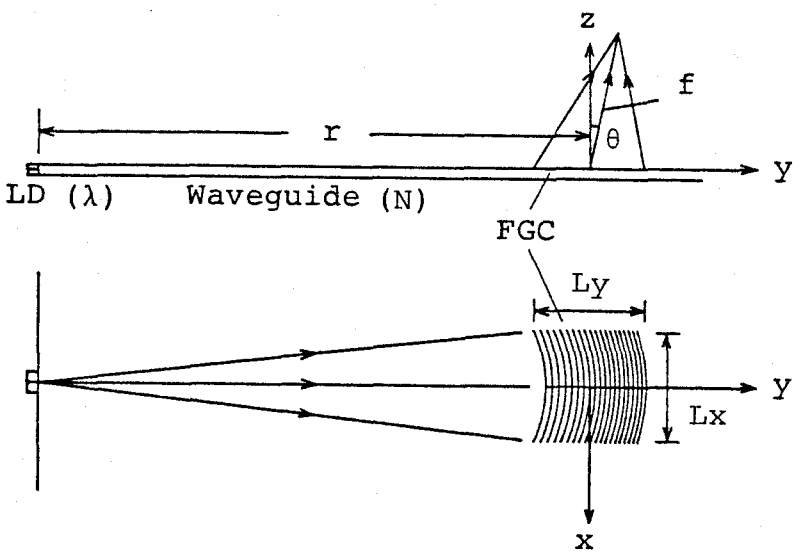


図3.1　収差が無いときの光波の結合

となり，式(2.6) に一致し，無収差の波面が得られる．

3.2.2 収差関数

作製誤差によりΦ_{IN}もしくはΦ_{FG}が設計値からずれると，Φ_{DF}はもはや球面波を表さず，収差を生じる．Φ_{IN}に関する収差の原因には，図3.2に示すように，波長ずれ$\Delta\lambda = (\lambda' - \lambda)/\lambda$，実効屈折率のずれ$\Delta N = (N' - N)/N$，発散中心の位置ずれ$\Delta r = (r' - r)/r$，$\delta'$がある．このようなずれが生じた場合，$\Phi_{IN}$は

$$\Phi_{IN} = k' N' \sqrt{(x + r' \sin\delta')^2 + (y + r' \cos\delta')^2} \tag{3.5}$$

と書ける．ここで$k' = 2\pi/\lambda'$である．Φ_{FG}に関するものでは，作製上ＦＧＣパターンのｘ，ｙ方向の伸縮が生じ易いので，この影響を検討する．伸縮倍率を$Mx = Lx'/Lx \equiv 1 + \Delta Lx$，$My = Ly'/Ly \equiv 1 + \Delta Ly$とすると，$\Phi_{FG}$は

$$\begin{aligned}\Phi_{FG} = &-k\sqrt{(x/Mx)^2 + (y/My - f\sin\theta)^2 + (f\cos\theta)^2} \\ &-kN\sqrt{(x/Mx)^2 + (y/My + r)^2}\end{aligned} \tag{3.6}$$

で表される．

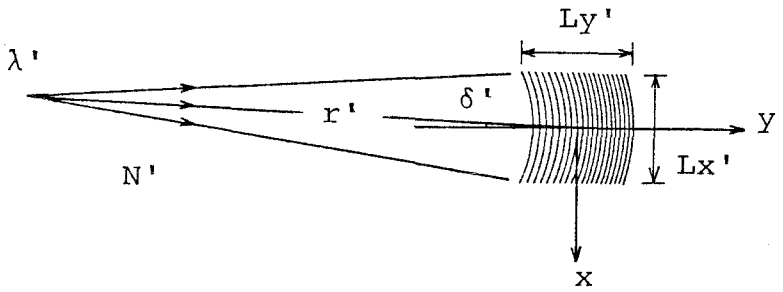


図3.2　検討する作製誤差

収差は一般に回折波の球面波からのずれで評価される．そこで点（f'_x, f'_y, f'_z）に焦点をもつガウス参照面，すなわち，図3.3の破線で示す参照球面波

を導入する．収差がなければ，回折波はガウス参照面に一致する．この参照波の導波路面上での位相

$$\Phi_G = -k'\sqrt{(x-f'_x)^2+(y-f'_y)^2+f'_z{}^2} \tag{3.7}$$

を用い，収差関数[41] Φ_A を

$$\Phi_A = \Phi_{DF} - \Phi_G = \Phi_{IN} + \Phi_{FG} - \Phi_G \tag{3.8}$$

で定義すると，式(3.1),(3.5) ～(3.8) から

$$\begin{aligned}\Phi_A = {} & k'N'\sqrt{(x+r'\sin\delta')^2+(y+r'\cos\delta')^2} \\ & -k\sqrt{(x/Mx)^2+(y/My-f\sin\theta)^2+(f\cos\theta)^2} \\ & -kN\sqrt{(x/Mx)^2+(y/My+r)^2} \\ & +k'\sqrt{(x-f'_x)^2+(y-f'_y)^2+f'_z{}^2}\end{aligned} \tag{3.9}$$

となる．この収差関数を用いて光線収差および波面収差が計算できる．

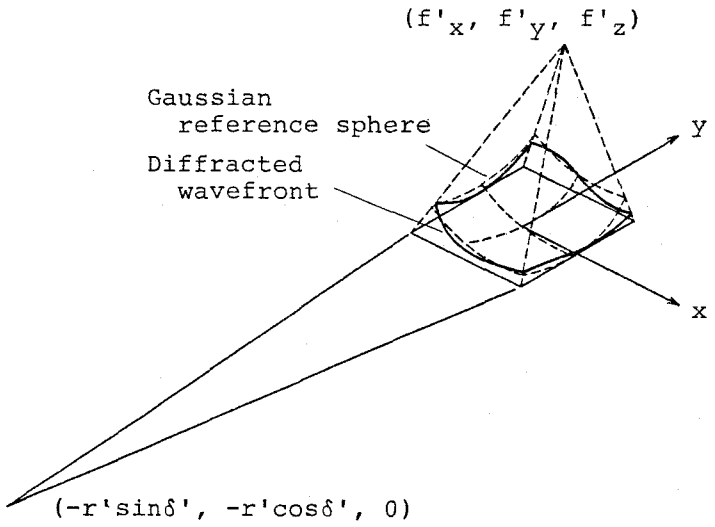


図3.3　誤差が生じたときの回折波（実線）と参照球面波（破線）

3.3 光線収差

ＦＧＣによる回折波がガウス参照面に一致するということは，回折光線がＦＧＣ開口上の出射位置によらず全てその参照面の焦点（ガウス像点）を通るということを意味する．すなわち，誤差が生じ回折波がガウス参照面からずれると，図3.4に示すように，回折光線が像面を横切る位置は開口上の出射位置に依存しガウス像点からずれる．このずれを光線収差という[41]．ガウス像点の座標を（f'_x, f'_y, f'_z），回折光線が像面 $z = f'_z$ を横切る位置座標を（$f'_x + \Delta X$，$f'_y + \Delta Y$，f'_z）とすると，ガウス参照波および回折波の位相 Φ_G および Φ_{DF} との間に，図3.4から

$$\frac{\partial \Phi_G}{\partial x} = -\frac{k'(x - f'_x)}{\sqrt{(x - f'_x)^2 + (y - f'_y)^2 + f'^2_z}} \tag{3.10}$$

$$\frac{\partial \Phi_{DF}}{\partial x} = -\frac{k'(x - f'_x - \Delta X)}{\sqrt{(x - f'_x)^2 + (y - f'_y)^2 + f'^2_z}} \tag{3.11}$$

の関係が成り立つ．したがって，光線収差 ΔX は収差関数 Φ_A を用いて

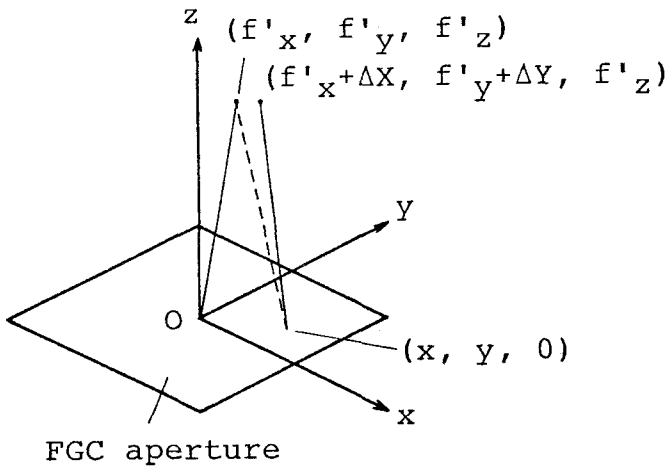


図3.4　ＦＧＣ開口からの回折光線と光線収差

$$\Delta X = \frac{\sqrt{(x-f'_x)^2+(y-f'_y)^2+f'^2_z}}{k'} \cdot \frac{\partial \Phi_A}{\partial x} \tag{3.12}$$

で与えられる．光線収差 ΔY も同様に Φ_A を用いて

$$\Delta Y = \frac{\sqrt{(x-f'_x)^2+(y-f'_y)^2+f'^2_z}}{k'} \cdot \frac{\partial \Phi_A}{\partial y} \tag{3.13}$$

で与えられる．この式を用いて光線収差を計算した．図3.5に示すようにＦＧＣの開口をメッシュ状に分割し，後節で決定される（f'_x, f'_y, f'_z）を用いてその境界線の像を求めた．計算結果の例を図3.6に示す．像の形状から図(b)の場合はザイデル収差における非点収差が支配的な収差であることがわかる．非点収差だけがある場合はこの形状は正方形となる．また，図(a)，(c)の形状はこの場合にはコマ収差が支配的な収差であることを示している．さて，これらの場合の回折限界スポット径は $1/e^2$ 全幅で 1.4μmと計算され，回折によ

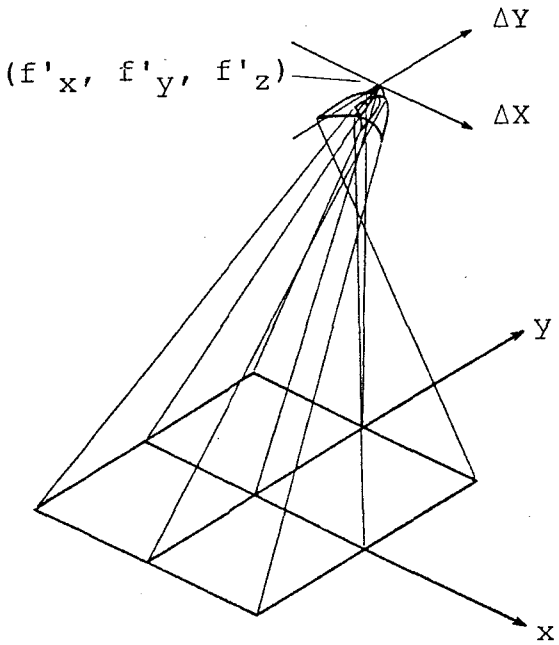
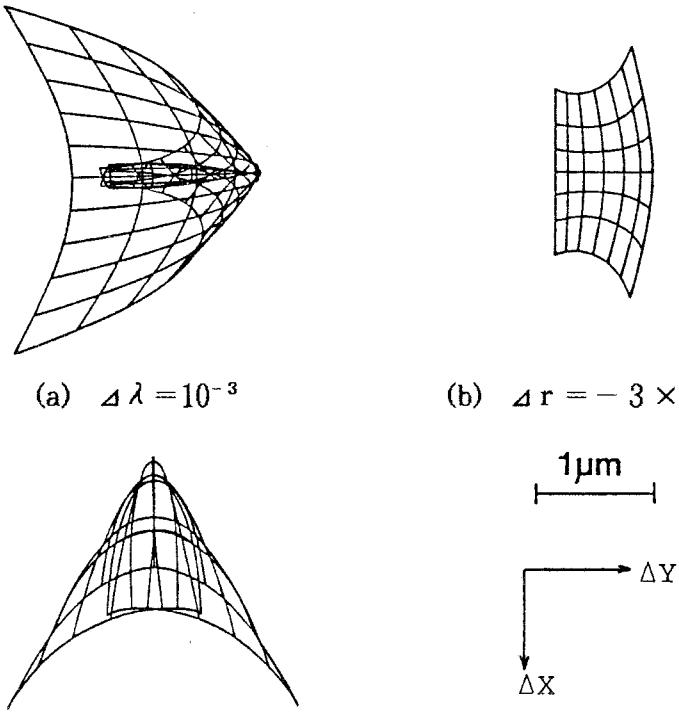


図3.5　光線収差の計算

る拡がりと光線収差の大きさが同程度である．したがって，このＦＧＣではこの付近（$\Delta\lambda=10^{-3}$，$\Delta r=3\times10^{-3}$，$\delta'=10^{-3}$）が誤差の許容限界の目安となる．



(a) $\Delta\lambda=10^{-3}$　　(b) $\Delta r=-3\times10^{-3}$

(c) $\delta'=10^{-3}$

図3.6　光線収差の計算例　（$\lambda=0.78\mu m$，$N=1.52$，$r=20mm$，$f=3mm$，$\theta=0$，$Lx=Ly=3mm$）

3.4　収差関数の展開

3.4.1　収差表現式

近軸領域を考えると式(3.9) は微小量

$$\frac{x}{r},\ \frac{y}{r},\ \frac{x}{r'},\ \frac{y}{r'},\ \frac{x}{f},\ \frac{y}{f},\ \frac{x}{f'},\ \frac{y}{f'} \tag{3.14}$$

ただし，

$$f' = \sqrt{f'_x{}^2 + f'_y{}^2 + f'_z{}^2} \tag{3.15}$$

で展開できる．定数項を除外しx，yの次数に関してまとめると，

$$\begin{aligned}\Phi_A = {} & D_{10}x + D_{01}y + \frac{A_{20}}{2}x^2 + A_{11}xy + \frac{A_{02}}{2}y^2 \\ & + \frac{C_{30}}{3}x^3 + C_{21}x^2y + C_{12}xy^2 + \frac{C_{03}}{3}y^3 \\ & + \frac{S_{40}}{4}x^4 + S_{31}x^3y + \frac{S_{22}}{2}x^2y^2 + S_{13}xy^3 + \frac{S_{04}}{4}y^4 \\ & + \cdots\cdots\end{aligned} \tag{3.16}$$

と書ける．

ここでガウス像点位置（f'_x, f'_y, f'_z）は上式の1次および2次の項の係数から決定される．すなわち，x，yの係数

$$D_{10} = k'(N'\sin\delta' - f'_x/f') \tag{3.17}$$

$$D_{01} = k'(N'\cos\delta' - f'_y/f') - k(N - \sin\theta)/My \tag{3.18}$$

を0とする条件

$$f'_x/f' = N'\sin\delta' \tag{3.19}$$

$$f'_y/f' = N'\cos\delta' - (k/k')(N - \sin\theta)/My \tag{3.20}$$

はFGC中心からの回折光の出射方向を表す．焦点距離f'は，誤差のない場合は$A_{20} = A_{11} = A_{02} = 0$から決定されるが，誤差のある場合では$A_{20}$，$A_{02}$は

$$A_{20} = k'\left(N'\frac{1 - \sin^2\delta'}{r'} + \frac{1 - (f'_x/f')^2}{f'}\right)$$

$$-\frac{k}{Mx^2}\left(\frac{N}{r}+\frac{1}{f}\right) \tag{3.21}$$

$$A_{02}=k'\left(N'\frac{1-\cos^2\delta'}{r'}+\frac{1-(f'_y/f')^2}{f'}\right)$$

$$-\frac{k}{My^2}\left(\frac{1-\sin^2\theta}{f}\right) \tag{3.22}$$

となり同時に0とすることはできない．そこで取り扱いの便宜上A_{20}，A_{02}が

$$A_{20}=-A_{02}\equiv A_2 \tag{3.23}$$

を満たすように焦点距離f'を決定した．そのとき，f'は

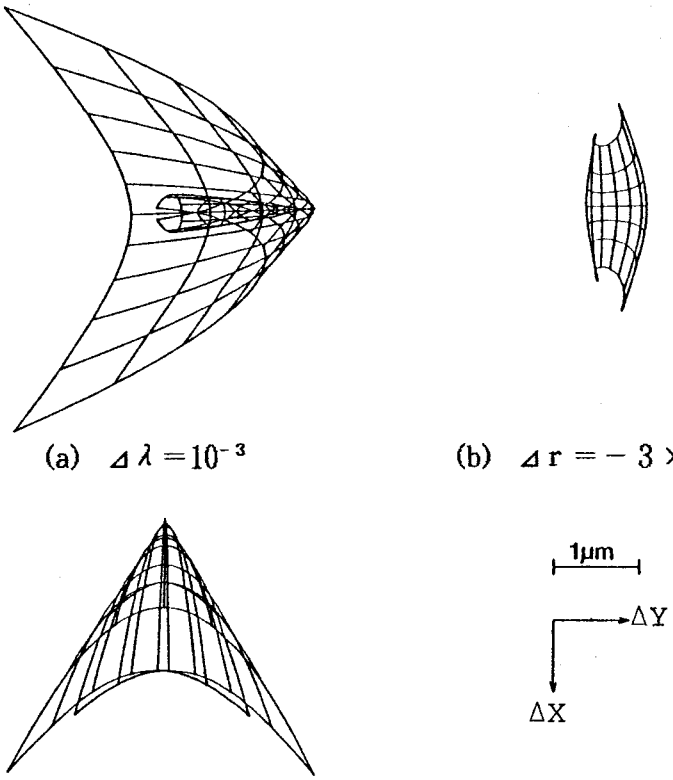
$$f'=\frac{k'\{1+(f'_z/f')^2\}}{\frac{k}{f}\left(\frac{1}{Mx^2}+\frac{\cos^2\theta}{My^2}\right)+\frac{kN}{Mx^2r}-\frac{k'N'}{r'}} \tag{3.24}$$

となる．このようにガウス像点を決定すると，式(3.16)は式(3.19)，(3.20)，(2.23)を用いて

$$\begin{aligned}\Phi_A=&\frac{A_2}{2}(x^2-y^2)+A_{11}xy\\&+\frac{C_{30}}{3}x^3+C_{21}x^2y+C_{12}xy^2+\frac{C_{03}}{3}y^3\\&+\frac{S_{40}}{4}x^4+S_{31}x^3y+\frac{S_{22}}{2}x^2y^2+S_{13}xy^3+\frac{S_{04}}{4}y^4\\&+\cdots\cdots\end{aligned} \tag{3.25}$$

と書き改められる．これが求める収差表現式である．展開次数が高くＮＡが小さいと近似度は良くなる．４次項までの展開で計算した光線収差の例を図3．7

に示す．図3．6とよく一致しており4次まで展開すれば十分であるとわかった．3．5でも述べるが，x，yの2次の項はザイデル収差における非点収差に相当し，3次，4次の項はそれぞれコマ収差，球面収差に相当する．よく知られている従来の軸対称系の場合の収差係数は1個づつであるが，この場合はそれぞれ2個および4個，5個と多数個生じ，複雑なものとなっている．これはFGCが2次元導波路と3次元空間を結ぶ特異な機能と形状を有することに起因している．



(a) $\Delta\lambda = 10^{-3}$　　(b) $\Delta r = -3\times10^{-3}$

(c) $\delta' = 10^{-3}$

図3．7　4次項までを用いて計算した光線収差の例　（λ＝0.78μm，N＝1.52，r＝20mm，f＝3mm，θ＝0，Lx＝Ly＝3mm）

3．4．2　収差係数

式(3.25)の係数の計算結果を4次まで示す．その際，$\sin\theta$を式(3.14)と同

程度の微小量として扱った．また，パラメータ誤差は極めて微小なので１次のみを考慮した．

$$A_2 = -\frac{k}{1+\cos^2\theta}\left(\frac{N\cos^2\theta}{r} + \frac{2N\sin\theta - 2\sin^2\theta}{f}\right)\Delta\lambda$$
$$+\frac{kN}{1+\cos^2\theta}\left(\frac{2\sin\theta}{f} + \frac{\cos^2\theta}{r}\right)\Delta N$$
$$-\frac{kN\cos^2\theta}{(1+\cos^2\theta)\ r}\Delta r$$
$$+\frac{2k\cos^2\theta}{1+\cos^2\theta}\left(\frac{1}{f} + \frac{N}{r}\right)\Delta Lx$$
$$+\frac{2k(N\sin\theta - 1)}{(1+\cos^2\theta)f}\Delta Ly \tag{3.26}$$

$$A_{11} = -kN\left(\frac{1}{r} + \frac{\sin\theta}{f}\right)\sin\delta' \tag{3.27}$$

$$C_{30} = \frac{3kN}{2}\left(\frac{1}{f^2} - \frac{1}{r^2}\right)\sin\delta' \tag{3.28}$$

$$C_{21} = \frac{k}{2}\left(\frac{2\sin\theta - N}{f^2} + \frac{N\sin\theta}{fr} + \frac{N}{r^2}\right)\Delta\lambda$$
$$+\frac{kN}{2}\left(\frac{1}{f^2} - \frac{1}{r^2} - \frac{\sin\theta}{fr}\right)\Delta N$$
$$+\frac{kN}{2r}\left(\frac{2}{r} + \frac{\sin\theta}{f}\right)\Delta r$$
$$+\frac{kN}{r}\left(\frac{\sin\theta}{f} - \frac{1}{r}\right)\Delta Lx$$
$$+\frac{k}{2}\left(\frac{N - 2\sin\theta}{f^2} - \frac{N}{r^2}\right)\Delta Ly \tag{3.29}$$

$$C_{12}=\frac{kN}{2}\left(\frac{1}{f^2}+\frac{2}{r^2}\right)\sin\delta' \tag{3.30}$$

$$\begin{aligned}C_{03}=&\frac{3k}{2f}\left(\frac{2\sin\theta-N}{f}+\frac{N\sin\theta}{r}\right)\Delta\lambda\\&+\frac{3kN}{2f}\left(\frac{1}{f}-\frac{\sin\theta}{r}\right)\Delta N\\&+\frac{3kN\sin\theta}{2fr}\Delta r\\&-\frac{3k\sin\theta}{f}\left(\frac{1}{f}+\frac{N}{r}\right)\Delta Lx\\&+\frac{3kN}{2f^2}\Delta Ly\end{aligned} \tag{3.31}$$

$$\begin{aligned}S_{40}=&\frac{k}{2}\left(\frac{N}{r^3}-\frac{3N}{2f^2r}-\frac{2}{f^3}\right)\Delta\lambda\\&+\frac{kN}{2r}\left(\frac{3}{2f^2}-\frac{1}{r^2}\right)\Delta N\\&+\frac{3kN}{2r}\left(\frac{1}{r^2}-\frac{1}{2f^2}\right)\Delta r\\&+\frac{k}{2}\left(\frac{3N}{f^2r}-\frac{1}{f^3}-\frac{4N}{r^3}\right)\Delta Lx\\&+\frac{3k}{2f^3}\Delta Ly\end{aligned} \tag{3.32}$$

$$S_{31}=\frac{3kN}{2r^3}\sin\delta' \tag{3.33}$$

$$S_{22}=-k\left(\frac{1}{f^3}+\frac{N}{r^3}+\frac{3N}{4f^2r}\right)\Delta\lambda$$

$$+\frac{kN}{r}\left(\frac{3}{4f^2}+\frac{1}{r^2}\right)\Delta N$$

$$-\frac{3kN}{r}\left(\frac{1}{4f^2}+\frac{1}{r^2}\right)\Delta r$$

$$+\frac{k}{2}\left(\frac{1}{f^3}+\frac{4N}{r^3}+\frac{3N}{f^2r}\right)\Delta Lx$$

$$+\frac{k}{2}\left(\frac{1}{f^3}+\frac{4N}{r^3}\right)\Delta Ly \tag{3.34}$$

$$S_{13}=-\frac{kN}{r^3}\sin\delta' \tag{3.35}$$

$$S_{04}=-\frac{k}{2f^2}\left(\frac{2}{f}+\frac{3N}{2r}\right)\Delta\lambda$$

$$+\frac{3kN}{4f^2r}\Delta N$$

$$-\frac{3kN}{4f^2r}\Delta r$$

$$+\frac{3k}{2f^2}\left(\frac{1}{f}+\frac{N}{r}\right)\Delta Lx$$

$$-\frac{k}{2f^3}\Delta Lx \tag{3.36}$$

系がy軸に関して対称であればxの奇数次の項は存在しなくなる．したがって，xの奇数次の係数にはその対称性を崩すδ'の寄与しか無く，逆に，δ'はxの奇数次項にのみ影響を及ぼす．一方，xの偶数次の係数は系の対称性を保存する$\Delta\lambda$，ΔN，Δr，ΔLxおよびΔLyの線形結合で表されている．

3.5 収差の種類

3.5.1 非点収差

式(3.25)においてx，yの2次の項は，ザイデル収差における非点収差に相当する．ただし，光源，FGCおよび集光点が同一直線上にないため，A_2 と A_{11} とは独立である．しかし極座標

$$x = \rho \sin\psi, \quad y = \rho \cos\psi \tag{3.37}$$

を導入すると，光線収差

$$\Delta X = -(\Phi_G / k'^2)\, \rho\, (A_2 \sin\psi + A_{11} \cos\psi) \tag{3.38}$$

$$\Delta Y = -(\Phi_G / k'^2)\, \rho\, (A_{11} \sin\psi - A_2 \cos\psi) \tag{3.39}$$

は座標系の回転により，

$$\Delta X = \mp (\Phi_G / k'^2) \sqrt{A_2^2 + A_{11}^2}\, \rho \sin\psi \tag{3.40}$$

$$\Delta Y = \pm (\Phi_G / k'^2) \sqrt{A_2^2 + A_{11}^2}\, \rho \cos\psi \tag{3.41}$$

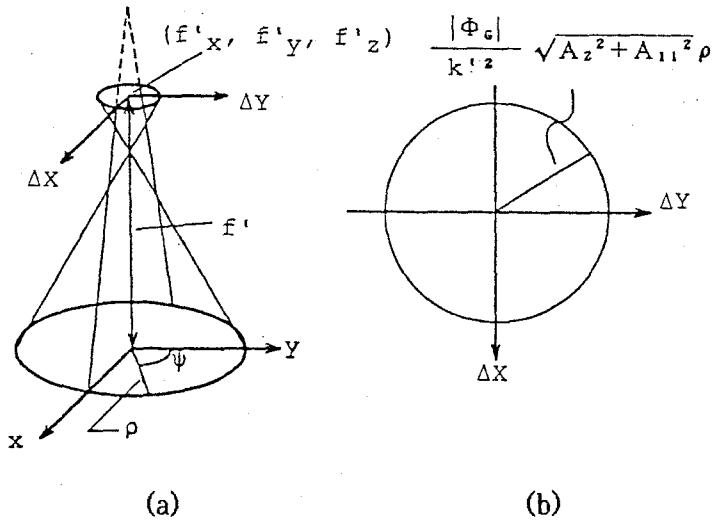


図3.8　非点収差により回折光が一点に結像しない様子(a)とガウス像面における光線収差(b)

となり，通常の非点収差を表す式に帰着する．ここで$\sqrt{A_2{}^2+A_{11}{}^2}$が非点収差を表すパラメータとなる（図3.8参照）．この収差は，ＦＧＣにおける最低次の収差で，ｘ方向とｙ方向とでは異なる機構（グレーティングパターンの曲率と周期変化）により集光するということに起因している．条件式(3.23)はこの収差によるｘ，ｙ方向のスポット拡がりが等しくなる面を焦点面と考えたことに相当する．

3.5.2 コマ収差

ｘ，ｙの３次の項は，ザイデル収差におけるコマ収差に相当し，読取りデバイス等へ応用するＮＡの大きなＦＧＣでは図3.6(a)，(c)のように支配的な収差となることが多い．計算した結果，この収差の波面収差への寄与は非点収差と同程度であった．

$C_{30}=C_{12}=0$のとき，すなわち，系がｙ軸に関して対称であるとき，光線収差は，

$$\Delta X=-(\Phi_G/k'^2)C_{21}\rho^2\sin 2\phi \tag{3.42}$$

$$\Delta Y=-\frac{\Phi_G}{k'^2}\left(\frac{C_{03}+C_{21}}{2}\rho^2+\frac{C_{03}-C_{21}}{2}\rho^2\cos 2\phi\right) \tag{3.43}$$

で表され，図3.9(a)に示すようにｙ軸に沿ってのびるコマとなる．従来の軸対称系でのコマは，$C_{03}=3C_{21}$を満たし，あるρに対する軌跡は円で開き角は60°となる．しかし，ＦＧＣの場合は，一般に$C_{03}\neq 3C_{21}$であるから，歪んだ形状をもつコマとなる．

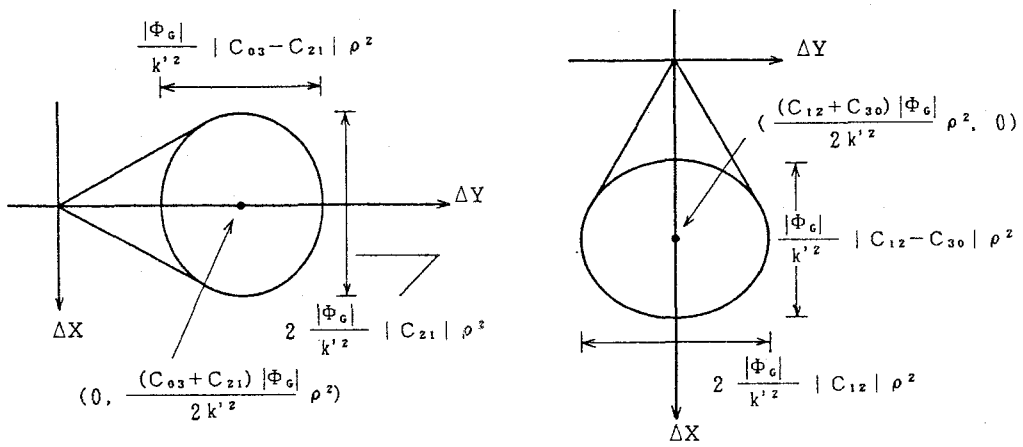
同様に，$C_{21}=C_{03}=0$のときは，

$$\Delta X=-\frac{\Phi_G}{k'^2}\left(\frac{C_{12}+C_{30}}{2}\rho^2+\frac{C_{12}-C_{30}}{2}\rho^2\cos 2\phi\right) \tag{3.44}$$

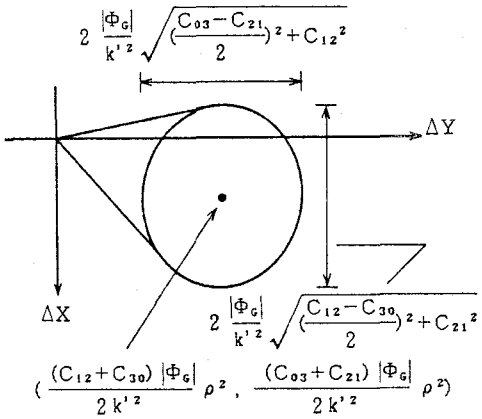
$$\Delta Y=-(\Phi_G/k'^2)C_{12}\rho^2\sin 2\phi \tag{3.45}$$

となり，図3.9(b) に示すようにx軸に沿ってのびるコマが見られる．

両者が在るときは，x方向の光線収差は式(3.42)と(3.44)を加算したもの，y方向は式(3.43)と(3.45)を加算したものとなり，図3.9(c) に示すように斜めにのびるコマとなる．



(a) y軸コマ（$C_{30}=C_{12}=0$）　　(b) x軸コマ（$C_{21}=C_{03}=0$）



(c) 斜めにのびるコマ

図3.9　展開係数の条件とコマ収差の形状

3.5.3　球面収差

x，yの4次の項は，ザイデル収差における球面収差に相当する．非点収差

やコマ収差のある場合，この球面収差の波面収差に対する影響はそれらに比べて１桁程度小さい．そこで，この収差は非点収差とコマ収差が無い場合でのみ考慮すればよい．光線収差は，

$$\Delta X = -(\Phi_G / k'^2)(S_{40} x^3 + 3 S_{31} x^2 y + S_{22} x y^2 + S_{13} y^3) \tag{3.46}$$

$$\Delta Y = -(\Phi_G / k'^2)(S_{31} x^3 + S_{22} x^2 y + 3 S_{13} x y^2 + S_{04} y^3) \tag{3.47}$$

と表される．係数S_{40}，S_{22}，S_{04}，S_{31}およびS_{13}は互いに独立で一般には歪んだ球面収差となる．

3.6 波面収差

回折波の点Ｐにおける規格化光強度[41]

$$i(P) = \frac{I(P)}{I^0} \tag{3.48}$$

を導入する．ここでI^0は収差が無いときの焦点の光強度，$I(P)$は点Ｐにおける回折波の光強度である．$I(P)$は，回折波の位相をΦ_{DF}，点Ｐに焦点をもつガウス参照波の位相を$\Phi_G(P)$とすると，回折積分公式を用いて

$$I(P) \propto \left| \iint \exp\left[i\left(\Phi_{DF} - \Phi_G(P)\right)\right] dS \right|^2 \tag{3.49}$$

で表される．面積分はＦＧＣ開口で行う．収差がないときは，Φ_{DF}は$\Phi_G(P)$に一致し被積分関数は１となる．したがって，式(3.48)は

$$i(P) = \frac{\left| \iint \exp(i\Phi_A(P))\, dS \right|^2}{\left| \iint dS \right|^2} \tag{3.50}$$

となる．ただし，$\Phi_A(P)$は

$$\Phi_A(P) = \Phi_{DF} - \Phi_G(P) \tag{3.51}$$

である．収差が小さい場合のみを考慮すればよいので式(3.50)は

$$i(P) = 1 - (2\pi/\lambda)^2 \Delta\Phi_P^2 \tag{3.52}$$

ただし

$$\Delta\Phi_P = \frac{\lambda}{2\pi}\sqrt{\frac{\iint(\Phi_A(P))^2 dS}{\iint dS} - \left(\frac{\iint\Phi_A(P)dS}{\iint dS}\right)^2} \tag{3.53}$$

で近似できる[41]．i(P)の最大値を与える$\Delta\Phi_P$(ＲＭＳＤ；Root Mean Square Deformation)が集光特性を評価する指数となる．１種類の誤差のみ生じたときのＲＭＳＤを数値計算により求めた．点Ｐの座標を３次元的に変化させながら，式(3.53)を面積分を数値的に実行し，$\Delta\Phi_P$ の最小値を求めた．計算結果の例を図3.10に示す．図(a) は現在普及している読取りデバイスの仕様に合わせた作製パラメータ（ＮＡ＝0.45）に対する結果を示し，図(b) はそれより少し小さいＮＡ（＝0.24）と焦点距離ｆ（＝２mm）を持つＦＧＣに対する結果である．ＲＭＳＤは算出した範囲内では各誤差量に比例している．

３.７　許容作製誤差

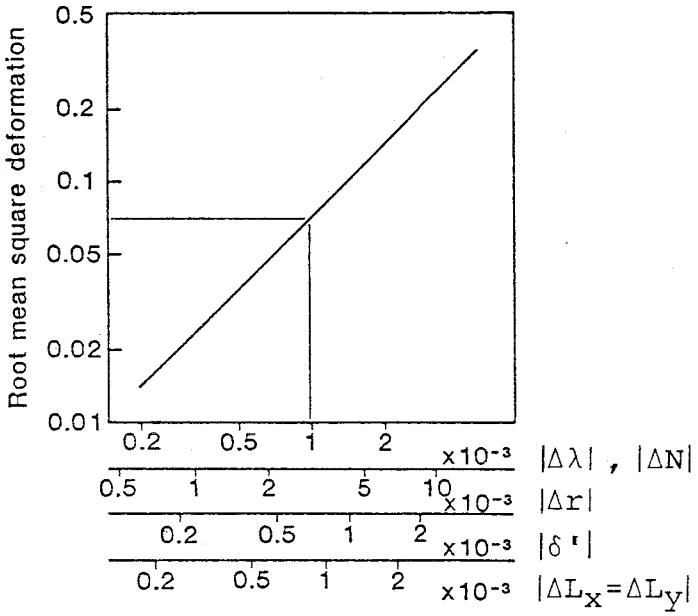
読取りデバイスでは回折限界のスポット径を必要とする．したがってＲＭＳＤの値としては0.07λ以下が要求される[42]．すなわち，

$$\mathrm{RMSD} < 0.07\lambda \tag{3.54}$$

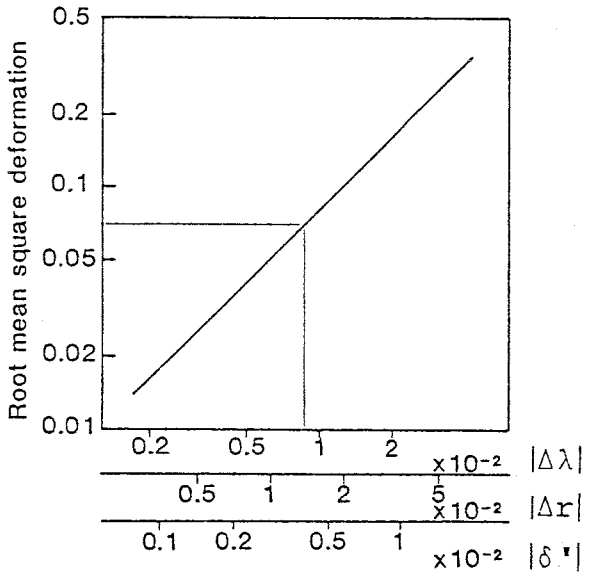
が許容誤差を見積もる際の判定条件となる．

波長ずれ$\Delta\lambda$のみ生じた場合，条件式(3.54)を満たすには，図3.10(a) から

$$|\Delta\lambda| < 9.8\times10^{-4} \tag{3.55}$$



(a) $\lambda = 0.78\mu m$, N = 1.52, r = 20mm, f = 3 mm, $\theta = 0$, Lx = Ly = 3 mm



(b) $\lambda = 0.78\mu m$, N = 1.52, r = 10mm, f = 2 mm, $\theta = 0$, Lx = Ly = 1 mm

図3.10　ＲＭＳＤの作製誤差依存性

でなければならないことがわかる．右辺の値が許容誤差の上限を与え，値が小さいほど条件は厳しい．この値を波長に換算すると，±0.78nmとなり，通常の0.78μm帯ＬＤの縦モード間隔数本分に相当する．

ずれ ΔN，Δr，δ'または $\Delta Lx = \Delta Ly$に対しても同様に，条件式(3.54)を満たすには，それぞれ，

$$|\Delta N| < 9.8\times10^{-4} \tag{3.56}$$

$$|\Delta r| < 3.0\times10^{-3} \tag{3.57}$$

$$|\delta'| < 6.9\times10^{-4} \tag{3.58}$$

$$|\Delta Lx = \Delta Ly| < 8.7\times10^{-4} \tag{3.59}$$

でなければならない．式(3.57)，(3.58)はＬＤの位置合わせ精度の上限を示し，ｙ方向には±６μm，ｘ方向には±1.4 μmとなる．また，図3.10には示していないが，ΔLx，ΔLyだけが生じた場合，それぞれに対する条件は

$$|\Delta Lx| < 3.0\times10^{-4} \tag{3.60}$$

$$|\Delta Ly| < 3.6\times10^{-4} \tag{3.61}$$

となる．すなわち，ＦＧＣの開口の縦横の伸縮比が異なる場合は，等しい場合（式(3.59)）に比べて条件が厳しくなる．これは後者が出力波面の曲率を全体的に変化させ焦点距離を変化させるのに対して，前者はｘ方向とｙ方向の曲率に差を生じさせて非点収差を誘起するからである．

一方，図3.10(b) の場合，式(3.55)～(3.61)に対応する条件は，

$$|\Delta\lambda| < 8.6\times10^{-3} \tag{3.62}$$

$$|\Delta N| < 8.2\times10^{-3} \tag{3.63}$$

$$|\Delta r| < 1.4\times10^{-2} \tag{3.64}$$

$$|\delta'| < 3.9\times10^{-3} \tag{3.65}$$

$$|\Delta Lx = \Delta Ly| < 5.9\times10^{-3} \tag{3.66}$$

$$|\Delta Lx| < 1.6\times10^{-3} \tag{3.67}$$

$$|\Delta Ly| < 2.1\times10^{-3} \tag{3.68}$$

となり，(a) の場合に比べて約１桁ほど緩和されている．すなわち，ＮＡを少し小さくすれば，回折限界スポット径はやや増大するが，条件は桁違いに緩和されるので，現段階でも，収差のないスポットを得ることが期待できる．

以上の議論は１種類の誤差のみ生じた場合についてであったが，一般には複数の誤差が同時に生じる可能性があり，そのような場合，あるパラメータの許容誤差は，他のパラメータの作製精度に影響をうけ，条件はさらに厳しいものとなる．

3.8 結　言

デバイスの実現可能性や高性能化を検討するため，ＦＧＣの収差特性を明らかにした．具体的な検討は第９章に譲るとして，この章で得られた結果をまとめておく．ＦＧＣの収差関数を導き，それを展開して従来の軸対称系ザイデル収差と比較した結果，当初から予想されたように，ＦＧＣの収差を表す式はかなり複雑となることが明らかとなった．光線収差の計算および展開次数から，ＦＧＣでは非点収差とコマ収差に対応するものが支配的であり，微小光学素子で主要な収差である球面収差は比較的小さいことがわかった．また，波面収差を計算し，許容作製誤差を見積もった．その結果，条件式(3.55)～(3.61)を満たすのはそれほど簡単ではなく楽観は許されない．しかし一方，ＮＡを少し小さくすれば（式(3.62)～(3.68)），回折限界スポット径はやや増大するが，条件は桁違いに緩和されるので，現段階でも収差のないスポットを得ることが期待できる．すなわち，作製精度への要求はＮＡ等のＦＧＣ仕様に著しく依存するので，応用上の要求と作製精度の両面から仕様を最適化する必要がある．

第４章　光集積回路形読取りデバイスの提案

４.１　緒　　言

集積回路は一体化集積デバイスとして作製されるので，構成素子の取替が不可能であり，集積素子数が増すと急に再現性が劣化する．これは光集積回路の場合も同じであり，素子数を可能な限り少なくすることはデバイス構成を考案する上で重要なポイントとなる．作製の難易度も考慮にいれるべきである．

これらに留意して，必要な機能を持つデバイスを設計する．本論文で対象としているのは光情報読取りデバイスで，その機能は再生信号の検出である．それには，光記録媒体（例えば，光ディスク）からの反射光を検出する機構以外に，一般には微小光ビームを決められた位置に精度良くアドレスするためのサーボ機構が必要である．現用のものではサーボ機構はフォーカス誤差およびトラッキング誤差の検出系とアクチュエータで構成されており，これらの検出機能を光集積回路で実現可能かどうかを検討することが重要な課題となる．

そこで本章では，まず，再生信号検出のための基本的なデバイス構成について検討する．次ぎに，フォーカス誤差検出法とトラッキング誤差検出法について，現在のバルク形読取りデバイスに用いられている誤差検出法が光集積回路形に適用可能かどうかを考察する．検討の結果，決定した光集積回路形読取りデバイス（光集積ピックアップ；ＩＯＤＰＵ；Integrated-Optic Disc PickUp device）の具体的構成を示し，その動作原理について述べる．

４.２　導波路内での信号検出

フォトダイオード（ＰＤ）を含む検出系および集光光学系はＳｉ基板導波路に集積化し，光源には化合物半導体レーザ（ＬＤ）を使用しハイブリッド結合とするのが，現状で最も実現可能性が高い．光ディスクからの反射光を導波路中のＰＤに集光するために，集光光学系と別の光学系を構成するのは素子数が増加し好ましくない．したがって，同一の集光グレーティングカップラ（ＦＧ

C）でＬＤからの光を光ディスク上に集光するとともに光ディスクからの反射光を導波路内に導き，それを導波形ビームスプリッタでＰＤに集光するのが最善の方法であると考えた．

このような構成にするとＬＤで導波光を励振することが必要となる．端面結合は，励振用素子を用いずに導波光を励振させるので，光集積回路に適した方法である．この方法は劈開により簡単に導波路端面の露出が可能というＳｉ基板導波路の特長を利用できる．

ＬＤからの出力光は通常は発散光であり，端面結合を介して励振された導波光は２次元の発散波となる．したがって，ＩＯＤＰＵが導波路内で２次元平行波を必要としない限り，この発散波をそのまま結合するＦＧＣを使い，コリメータ等の余分な素子は省略することが望ましい．

再生信号は反射光の強度変化であるから，戻り導波光をＰＤで検出することで再生できる．ＰＤの位置は４.3および４.4で検討する誤差検出法と導波形ビームスプリッタの特性で決定される．

４.３　フォーカス誤差検出法

レンズと光ディスクの信号面の距離のずれをフォーカス誤差といい，信号の再生には，このずれを検出し距離を一定に保つことが必要である．バルク形光ピックアップのフォーカス誤差検出法の主なものとして非点収差法，偏心光束法，臨界角法，ウォブリング法，ナイフエッヂ法，フーコー法がある[43),44)]．これらのＩＯＤＰＵへの適用可能性を検討する．

非点収差法は空間の３次元性を利用した検出法であり，２次元の導波路内での検出に利用するには困難な点が多い．

偏心光束法は原理的には適用可能であるが，大きなレンズ開口を必要とするのでＦＧＣ開口の拡張が難しい現状では，十分な検出感度を得にくい方法である．

臨界角法にはプリズムの臨界角条件を利用しており，光集積回路への適用は

難しい．

ウォブリング法は，光ビームスポットを光ディスク面に垂直な方向に高周波で微小揺動（ウォブリング）させ，反射光からの検出信号を揺動駆動信号で同期検波することにより，フォーカス誤差を検出する方法である．ＦＧＣの入力結合効率は２.6.2で述べたようにフォーカス誤差に敏感であり，これを利用することで高感度の検出ができる．また光集積回路は，一体・小型・軽量であるから高速のフォーカス方向ウォブリングが比較的容易である．したがって，ＩＯＤＰＵに十分適用可能であり，構成も単純なビームスプリッタを設けるだけでよい．すなわち，この検出法はＩＯＤＰＵに適した方法のひとつである．

ナイフエッジ法は戻り光の焦点位置にナイフエッジを設け，フォーカス誤差が生じると光ビームの一部をナイフエッジがマスクし，これにより生じる光強度分布変化を差動フォトダイオードで検知する方法であり，ＩＯＤＰＵに適用可能である．ただし，ビームスプリッタは単純機能のものでよいが，金属膜や導波層エッチング等でナイフエッジを作製する必要があり，その位置精度は厳しい．したがって，最適な方法とは思われない．

フーコー法は２分割機能とレンズ機能をもつビームスプリッタを使用すればＩＯＤＰＵに十分適用可能（４.5で詳述）である．この複合機能導波形ビームスプリッタはグレーティングで構成すれば比較的容易に作製できる．ＰＤの位置精度（ビームスプリッタの偏向角精度）は比較的厳しいが，これはＩＯＤＰＵに適した方法のひとつである．

４.４　トラッキング誤差検出法

光ビームのピット列（トラック）からの横ずれをトラッキング誤差といい，信号再生には，このずれを検出し光ビームでピットを照射する必要がある．バルク形光ピックアップのトラッキング誤差検出法の主なものとしてツイン・ビーム法，プッシュプル法，ウォブリング法，ヘテロダイン法がある[43),44)]．これらのＩＯＤＰＵへの適用可能性を検討する．

ツイン・ビーム法は，レーザ光を３分割し，光ディスク上に３つのスポットを作りその反射光をそれぞれ３つのフォトダイオードで検出する方法であり，ビーム分割用グレーティングを必要とすることや構成が複雑となることから，ＩＯＤＰＵに適した方法とは思われない．

プッシュプル法は，ピット像を２分割フォトダイオード上に形成しトラッキング誤差をその２分割フォトダイオードの差信号として検出する方法であり，２分割機能をもつ導波形ビームスプリッタを用いれば，ＩＯＤＰＵに十分適用可能（４.5で詳述）である．すなわち，この検出法はＩＯＤＰＵに適した方法のひとつである．

ウォブリング法は，光ビームスポットをトラック方向と垂直な方向に高周波で微小揺動（ウォブリング）させ，反射光からの検出信号を揺動駆動信号で同期検波することにより，トラッキング誤差を検出する方法である．光集積回路は一体・小型・軽量であり，高速のウォブリングが比較的容易である．したがって，ＩＯＤＰＵに十分適用可能である．また，構成も単純なビームスプリッタを設けるだけでよい．すなわち，この検出法はＩＯＤＰＵに適した方法のひとつである．

ヘテロダイン法は空間の３次元性を利用した検出法であり，２次元の導波路内での検出への適用には不可能と考えられる．

４.5　デバイスの具体的構成と動作原理[45)-47)]

以上の検討の結果，ＩＯＤＰＵにおけるフォーカス誤差検出法としてはウォブリング法とフーコー法が有力であり，トラッキング誤差検出法としてはプッシュプル法とウォブリング法が適している．残る問題は同時検出するための構成の可能性であるが，これらの方法はどの組み合わせも可能である．そこで，外部アクチュエータの負担が少ないフーコー法とプッシュプル法の組み合わせでＩＯＤＰＵを構成することにした．

決定したＩＯＤＰＵの構成を図4.１に示す．基板にはＳｉを採用する．Ｓｉ

基板による導波光の損失を避けるため，十分厚いＳｉO_2 バッファ層をはさんで導波層を作製する．この単一モードスラブ導波路に集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ），導波形ビームスプリッタおよびＰＤアレイをモノリシックに集積し，ＬＤを端面結合して構成する．

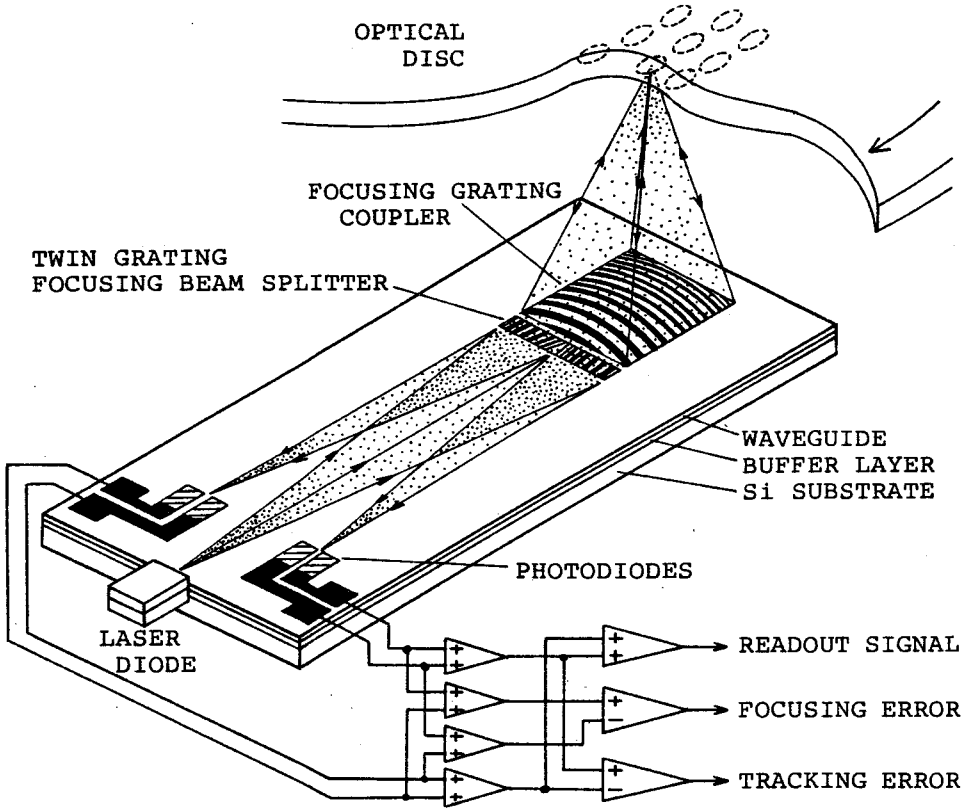
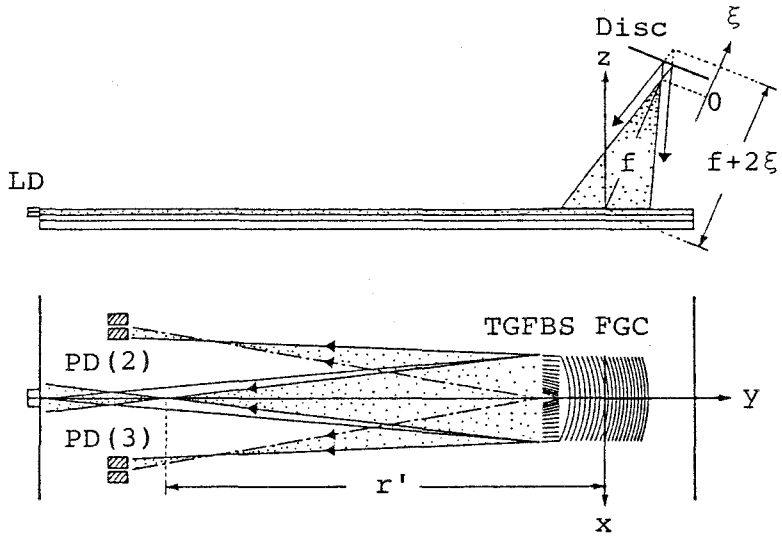


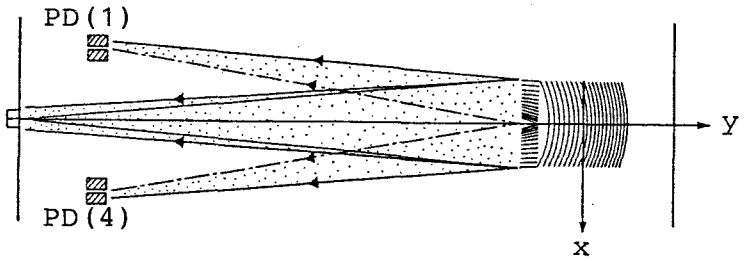
図4.1　光集積ピックアップ（ＩＯＤＰＵ）

ＬＤは端面結合により２次元の発散導波光（ＴＥ$_0$ モード）を励振する．ＦＧＣはその発散導波光を回折（波面変換）して光ディスク面上に集光するとともに，ディスクからの反射光を逆結合により再び導波路内に導く．ＦＧＣに隣接する導波形ビームスプリッタは透過形ブラッググレーティングであり，その機能は戻り導波光を波面２分割してＰＤアレイに集光することである．この導

波形ビームスプリッタ（ツイングレーティング集光ビームスプリッタ；ＴＧＦＢＳ；Twin Grating Focusing Beam Splitter ）には，ＩＯＤＰＵの構成素子数が最少となるように複数の機能（波面分割，偏向，集光）を持たせている．４個のＰＤを図のように配置すれば，その出力光電流の簡単な演算で，再生信号，フォーカス誤差信号およびトラッキング誤差信号が同時に検出できる．ＴＧＦＢＳは戻り導波光だけでなくＬＤからの発散導波光も回折する．この回折導波光もＦＧＣで回折され集光スポットの両サイドに出射するが，その反射光は，波面および伝搬方向が出射光のものと異なっているので，ＦＧＣで再び導



(a) $\xi > 0$



(b) $\xi < 0$

図4.2　フォーカス誤差検出法

波光として励振されることはない．

フォーカス誤差検出

反射面がＦＧＣの焦点面から出射方向にξ変位した場合（図4.2参照）を考えると，式(2.20)から

$$\frac{N}{r'} + \frac{1}{f + 2\xi} = \frac{N}{r} + \frac{1}{f} \tag{4.1}$$

が成立する．r'はＦＧＣから戻り導波光の集光点までの距離，$f + 2\xi$は入射球面波の発散中心までの距離である．したがって戻り導波光の集光点の焦点距離からのずれ$\zeta \equiv r - r'$は

$$\zeta \simeq \frac{2r^2}{Nf^2}\xi \tag{4.2}$$

となる．そこで，図に示すようにＰＤアレイを配置すれば，$\xi > 0$のときは内側のＰＤ((2),(3))に照射する導波光パワーが大きく（図4.2(a)），逆に$\xi < 0$のときは外側のＰＤ((1),(4))に照射する導波光パワーが大きく（同図(b)）なり，内側と外側のＰＤの検出信号の差から，ξの正負すなわちフォーカス誤差が検出できる．

トラッキング誤差検出

ディスクトラック方向がyz平面上にくるようにＩＯＤＰＵを配置する．その結果トラックずれはx方向に生ずる．ずれが無いときは反射光はyz平面に関して対称な光強度分布をしているが，ずれが生ずると非対称となる．したがって，戻り導波光の$x < 0$（ＰＤ(1),(2))と$x > 0$（ＰＤ(3),(4))における光強度差からトラッキング誤差を検出できる．

4.6 結　言

光集積回路形読取りデバイス（光集積ピックアップ；ＩＯＤＰＵ）の構成を

検討し，その結果，決定したデバイス構成を示した．

ＦＧＣはバルク形デバイスの対物レンズに代わる素子として使用し，出力結合での集光機能と導波光を励振する入力結合の両者を利用するのが，ＩＯＤＰＵを構成するには最も実現性が高いと考えた．

ＩＯＤＰＵに最適な誤差検出法を検討した結果，フォーカス誤差検出にはフーコー法とウォブリング法が有力で，トラッキング誤差検出にはプッシュプル法とウォブリング法が適していると考えた．

以上の考察をもとに，ＩＯＤＰＵの具体的構成を提案した．提案したデバイスでは，モノリシック集積化した４個のＰＤの光電流の簡単な演算で，再生信号，フォーカス誤差信号およびトラッキング誤差信号が同時に検出できる．

第5章　導波形ビームスプリッタ[45)-48)]

5.1 緒　　言

第4章で提案した光集積ピックアップ（ＩＯＤＰＵ）では，光記録媒体からの反射光は導波路内を半導体レーザ（ＬＤ）へ戻ることになる．したがってビームスプリッタは，ＬＤと集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ）の間で，戻り光（TE_0 モード）を偏向しフォトダイオード（ＰＤ）へ照射しなければならない．また，同時にフォーカス誤差およびトラッキング誤差を検出可能な構成とすることが要求される．

そこで本章では，これらを実現するための導波形ビームスプリッタの構成，基本特性および設計を論じ，ＩＯＤＰＵが4.5で述べたような構成に決定された経緯について述べる．

5.2 透過形ブラッググレーティング

導波形ビームスプリッタは導波モード－導波モード結合機能（コプレーナ結合）をもつグレーティング素子（図5.1参照）で構成する．その主な理由に，複数の機能を一つの素子で実現できるという特長が挙げられる．すなわち，結合長や結合係数の設計により任意の効率（回折効率）のパワースプリッティング機能が実現容易であり，またグレーティングパターンの変調により波面変換機能（レンズ機能や偏向機能）が可能なので，これらの機能を利用すれば，ひとつのグレーティング素子で導波光の分波，偏向，集光，等の多機能を実現できる．その特長以外にも，グレーティングビームスプリッタは，他の切り込み形ビームスプリッタ等に比べて，冗長性が高いのでキズ・ホコリに強く波面散乱が少ない，作製が比較的容易である，等の利点をもっている．

ビームスプリッタはＬＤとＦＧＣの間に作製されるので，検出系ではビームスプリッタの回折光を用い，集光系では非回折光を利用することになる．したがって，ビームスプリッタの回折効率をη_{BS}とすると，ＩＯＤＰＵのパワー伝

達効率はη_{BS}（$1-\eta_{BS}$）に比例し，$\eta_{BS}=50\%$とすることがパワー伝達効率を最大にする必要条件となる．そこで，この高い回折効率を実現するためにブラッグ回折（ラマン－ナス回折の最大効率は34%）を利用する．

グレーティングはレリーフ形を採用する．これはＦＧＣと同じ作製プロセスを使用できるので，屈折率変調形のものに比べて，ＩＯＤＰＵの作製が簡単となる利点がある．

また，反射形グレーティングに対して，透過形のものは，小面積で光波の干渉距離が短い，グレーティング周期が長く作製が簡単，等の利点を有する．

以上，導波形ビームスプリッタにはレリーフ構造をもつ透過形ブラッググレーティングで構成するのが最善であると考えた．

5.3 基本特性

5.3.1 ブラッグ回折

グレーティングの結合長，周期をそれぞれD，Λとすると，ブラッグ回折を利用するには

$$Q \equiv 2\pi\lambda D/\Lambda^2 \tag{5.1}$$

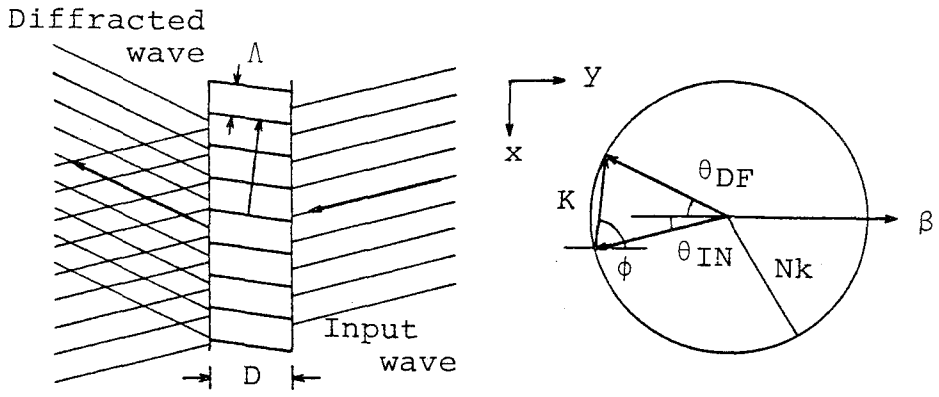


図5.1　導波モード－導波モード結合（コプレーナ結合）

で定義されるパラメータQが条件

$$Q \gg 1 \quad (Q \geqq 10) \tag{5.2}$$

を満たす必要がある[49]．また，図5.1に示すようにグレーティングの入射角，回折角をそれぞれθ_{IN}，θ_{DF}とするとΛは

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2N} \left[\sin\left(\frac{\theta_{IN} + \theta_{DF}}{2} \right) \right]^{-1} \tag{5.3}$$

で表される．

5.3.2 回折効率

回折効率は

$$\eta_{BS} = \sin^2(\kappa D / \sqrt{\cos\theta_{IN} \cdot \cos\theta_{DF}}) \tag{5.4}$$

で与えられ[35]，$\eta_{BS}=50\%$とするための条件は

$$\kappa D / \sqrt{\cos\theta_{IN} \cdot \cos\theta_{DF}} = \pi / 4 \tag{5.5}$$

となる．ここで，κは結合係数であり，図5.2に示されるような導波路構造に

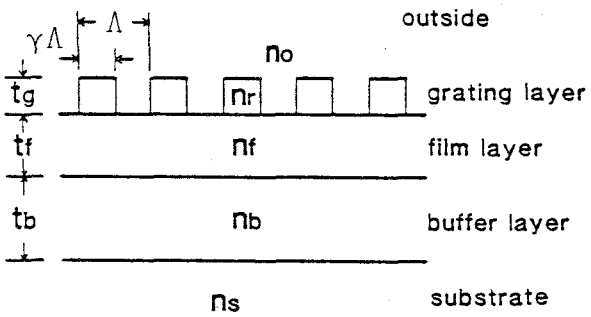


図5.2　グレーティング断面

おいては

$$\kappa = \frac{2\,t_g}{\lambda T}\sin(\gamma\pi)\ \frac{(n_f^2-N^2)(n_r^2-n_o^2)}{N(n_f^2-n_o^2)}\cos(\theta_{IN}+\theta_{DF}) \tag{5.6}$$

と書ける[50]．ここでTおよびNは導波路の実効厚および実効屈折率である．したがって，式(5.5)，(5.6)からη_{BS}=50%とする結合長Dは

$$D = \frac{\pi\lambda TN(n_f^2-n_o^2)\sqrt{\cos\theta_{IN}\cdot\cos\theta_{DF}}}{8\,t_g\sin(\gamma\pi)(n_f^2-N^2)(n_r^2-n_o^2)\cos(\theta_{IN}+\theta_{DF})} \tag{5.7}$$

となる．アスペクト比γは，通常は 0.5でよい．しかし，Dが短すぎてブラッグ回折条件式(5.2) を満たさない場合は，γを適当な値に定めDを長くしてブラッグ回折を得ることも可能である．

5.3.3 角度選択性および波長選択性

これらの選択性は入射角ずれや波長ずれが生じたときの回折効率低下を示すパラメータであり，グレーティングの設計にはこの評価は不可欠である．

回折効率が 1/2となる入射角ずれを$\Delta\theta_{IN}$とすると角度選択性$2\Delta\theta_{IN}$は

$$2\Delta\theta_{IN} = \frac{\sqrt{3}\Lambda\cos\theta_{DF}}{2D\sin(\phi-\theta_{IN})} \tag{5.8}$$

となる．$\phi = (\pi+\theta_{IN}-\theta_{DF})/2$である．

回折効率が 1/2となる波長ずれを$\Delta\lambda$とすると波長選択性$2\Delta\lambda$は

$$2\Delta\lambda = \frac{\sqrt{3}\Lambda\cos\theta_{DF}}{2D\cos(\theta_{DF}+\phi)}\lambda \tag{5.9}$$

となる.

$\Delta\theta_{IN}$および$\Delta\lambda$が大きいほど回折効率に関する許容作製誤差が大きい.

5.4 作製パラメータの最適化

ビームスプリッタの作製位置

導波形ビームスプリッタ（TGFBS）は図5.3に示すようにFGCに隣接して作製する．これは，主に作製上の理由による．TGFBSはFGCと同様に電子ビーム直接描画法で作製する．この電子ビーム直接描画法というのは走査型電子顕微鏡を基盤としたもので電子ビームを偏向制御することで試料面上にグレーティングパターンを描画するものである．したがって，TGFBSとFGCを隣接させると，余分な機械的位置合わせが不要となり，正確な位置関係が期待できる．

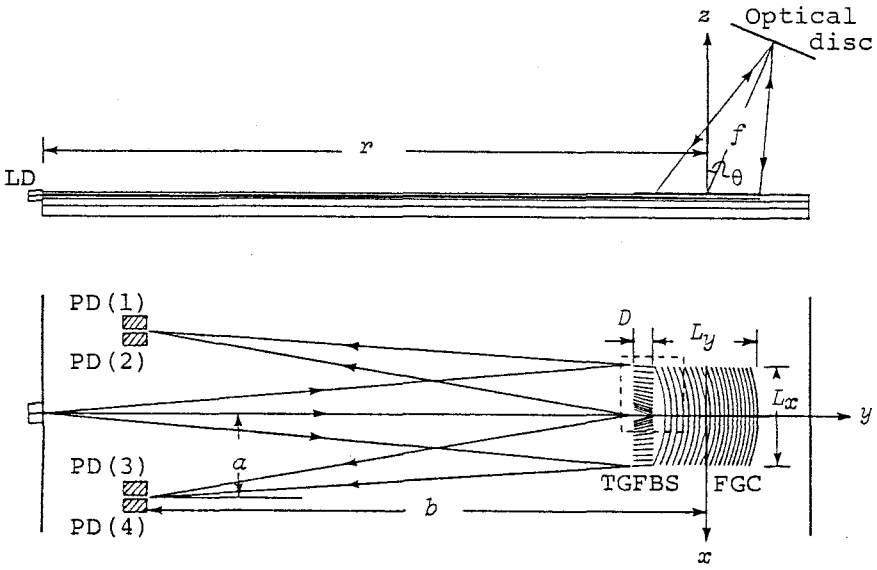


図5.3　IODPUの構成

回折角θ_{DF}

式(5.2) を満たすためには回折角θ_{DF}をある値より大きくする必要がある.

しかし，θ_{DF}が小さい方が，グレーティング周期が大きく作製が簡単，ＴＧＦＢＳのサイズエラによる回折角変化$\Delta\theta_{DF}$が小さい，角度選択性２$\Delta\theta_{IN}$や波長選択性２$\Delta\lambda$が大きい，等の利点がある．そこで$\theta_{DF}=7.8^{\circ}$と決定した．$\theta_{IN}=0$，$N=1.52$，$\lambda=0.79\mu m$，$D=95\mu m$のとき$Q=33$となる．

結合長Ｄ

結合係数κは式(5.6)で表されるように導波路構造およびθ_{IN}，θ_{DF}で決まる．導波路構造はＦＧＣのパラメータ最適化のときに決定される．また，入射角θ_{IN}はＦＧＣの位置ｒおよび開口長L_Xで決まり，出射角θ_{DF}は上述のように決定された．そこで，式(5.7)から結合長Ｄを決定した．導波路パラメータはＦＧＣの設計の際に決定される．例えば，表7.1に示す導波路パラメータでは$\gamma=0.5$に対して$\kappa=8.22\times10^{-3}(\mu m^{-1})$となるので，$D=95\mu m$とした．

検出点位置

ＴＧＦＢＳの集光作用を弱くし，検出点とＴＧＦＢＳの間隔ｂを長くした．その理由は，フォーカス誤差による戻り導波光の集光スポット変位（$\simeq\zeta b/r$）が大きくなり，その検出が容易となるからである．

5.5 形状方程式

ＴＧＦＢＳもＦＧＣと同様に電子ビーム直接描画法を用いて作製する．そこで電子ビームを走査させるべきグレーティングパターンを求める．パターンを表す形状式は入射光と回折光の位相差から得られる．

ＴＧＦＢＳへの入射光はＦＧＣの入力結合により導波路内に励振された戻り導波光で，ＬＤの位置に集束する波面を持つ．図5.3の座標系およびパラメータに従うと，その波の点（ｘ，ｙ）における位相Φ_{IN}は

$$\Phi_{IN}=-kN\sqrt{x^2+(y+r)^2} \tag{5.10}$$

である．$k=2\pi/\lambda$である．回折光を点（±ａ，－ｂ）に集光するＴＧＦＢＳを考えると，その回折光の点（ｘ，ｙ）における位相Φ_{DF}は

$$\Phi_{DF} = -kN\sqrt{(x \mp a)^2 + (y + b)^2} \tag{5.11}$$

となる．グレーティングのm番目のラインの形状は

$$\Phi_{DF} - \Phi_{IN} = 2m\pi + \mathrm{const.} \qquad (m : \mathrm{Integer}) \tag{5.12}$$

から決定され，$x = y = 0$ で $m = 0$ となるように定数を決めると

$$\sqrt{x^2 + (y + r)^2} - \sqrt{(x \mp a)^2 + (y + b)^2} = m\lambda / N + r - \sqrt{a^2 + b^2} \tag{5.13}$$

となる．

5.6 結　言

ＴＧＦＢＳの構成および設計について述べた．

ＴＧＦＢＳは，要求される複合機能を比較的容易な作製で実現できる透過形ブラッググレーティングで構成し，電子ビーム直接描画法でＦＧＣに隣接して作製するのが最善であろう．基本特性を明らかにし，ブラッグ回折の条件，回折効率，作製の難易度，作製誤差に対する評価，ＦＧＣとの関係を考慮してＩＯＤＰＵを構成するのに最適なＴＧＦＢＳを設計した．これによりＩＯＤＰＵの構成素子の具体的配置が決定された．

第６章　光源と光検出器

６.１　緒　　言

本章では，光源に用いる半導体レーザ（ＬＤ）およびフォトダイオード（ＰＤ）の集積化について記述する．

グレーティングは波長分散素子であり，キーコンポーネントが集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ）である光集積ピックアップ（ＩＯＤＰＵ）は単一波長で設計されている．一方，ＬＤは固有の発振スペクトルをもっている．すなわち，ＩＯＤＰＵを正常に動作させるためには，使用状態での発振スペクトルに対して厳しい制限があることが予想される．そこで，ＬＤ発振スペクトルと集光スポットの関係を明らかにし，発振スペクトルに対する要求とＬＤの使用・結合条件を調べる．

導波光励振効率はＬＤの拡がり角，導波路厚，ＬＤとＩＯＤＰＵチップとの空隙，等に依存する．そこで，効率面からの結合条件の最適化の指針を得るために，ＬＤの取り付け精度と導波光励振効率の関係を明らかにする．

また，導波光を効率よく検出するための導波形ＰＤを設計する．

６.２　半導体レーザ光源

６.２.１　単一モード発振[51)]

波長λで設計したＦＧＣを波長λ'で使用する場合を考える．ＦＧＣの回折波の出射角をθ'とすると，式(3.20)において$\delta'=0$，$My=1$，$f'_y/f=\sin\theta'$を代入して

$$(N'-\sin\theta')/\lambda'=(N-\sin\theta)/\lambda \qquad (6.1)$$

が導かれる．この式から波長ずれが生じると出射角がずれ，図6.１に示すように，集光スポット位置がζ方向すなわちトラック方向にずれることがわかる．波長ずれによる実効屈折率Ｎの変化を無視すると，集光スポットの変位量$\Delta\zeta$

は波長ずれ $\Delta\lambda \equiv \lambda' - \lambda$ を用いて

$$\Delta\zeta = f\sin(\theta' - \theta) = -f(N - \sin\theta)/\cos\theta \cdot (\Delta\lambda/\lambda) \qquad (6.2)$$

で表され，$\Delta\lambda$ に比例する．

例えば，$\lambda = 0.78\mu m$，$f = 2mm$，$N = 1.52$，$\theta = 15^\circ$ の場合，$\Delta\lambda = 0.3nm$ に対して $\Delta\zeta = 1\mu m$ となる．$\Delta\lambda$ の 0.3nmは通常の0.78μm帯ＬＤの隣接モード間波長に相当しており，それだけ波長がずれると集光スポットが光ディスクのピット長程度ずれることがわかる．すなわち，ＬＤがマルチモード発振状態であれば集光スポットはマルチスポットもしくは ζ 方向に拡がったスポットとなり，モードホッピングを起こすと集光スポットの位置跳びが現れ，情報読取りが不可能もしくは不完全となる．したがってＩＯＤＰＵにはホッピングを起こさない縦単一モード発振のＬＤを使用する必要がある．一方，そのようなＬＤを用いると，使用中に波長ずれが生じても，そのずれが収差の影響を無視できる程度（第３章参照）であれば集光スポットの位置ずれを生じるだけで情報読

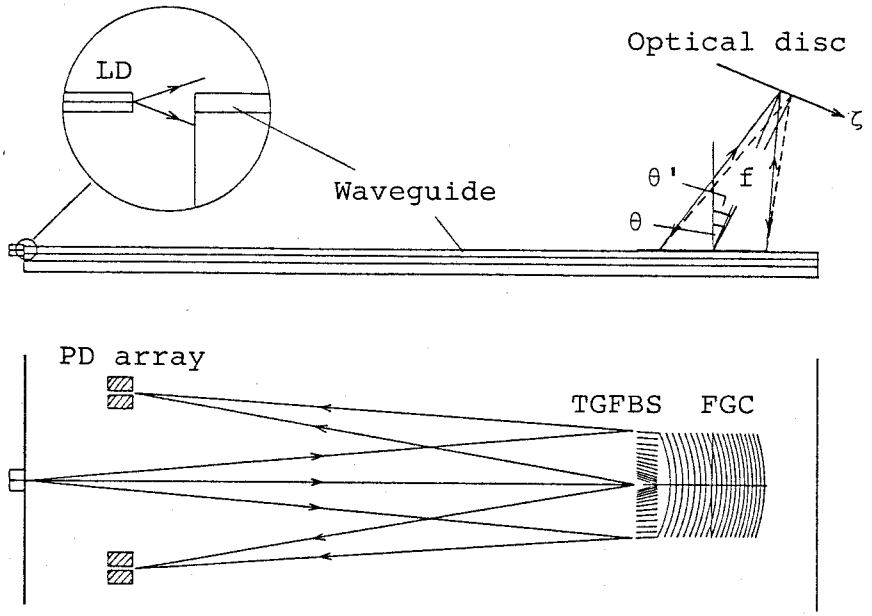


図6．1　波長ずれと集光スポット変位

取りに支障はない．

6.2.2 端面結合効率

ＬＤとＩＯＤＰＵ導波路の端面結合効率を計算する．ＬＤ導波路端面の中心を原点にとり，図6.2に示すように，電界方向をｘ軸，出射方向をｙ軸とする．

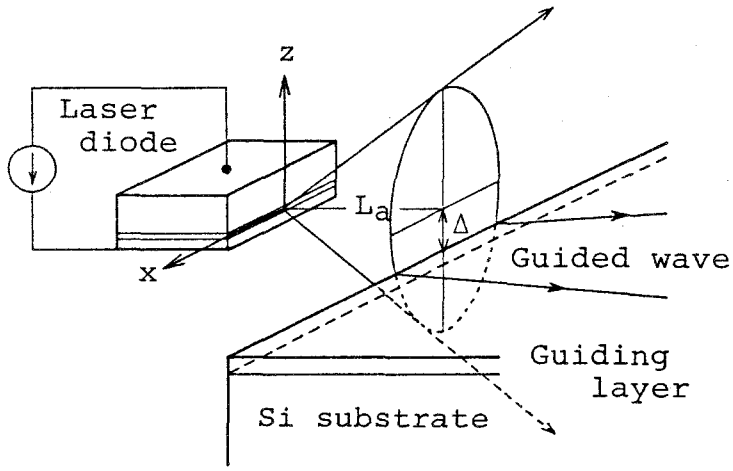


図6.2　ＬＤの端面結合の様子

ＬＤの導波路はｘ方向およびｚ方向に閉じ込められたチャネル導波路であるが，ＩＯＤＰＵ導波路はｚ方向閉じ込めのスラブ導波路なので，結合効率の計算においてはｘ方向依存性はなく一様であると考えた．両者共に導波光のｚ方向界分布がガウス分布であると近似し，ＬＤ導波光，ＩＯＤＰＵ導波光の1/e半幅をそれぞれw_{10}，w_{20}とする．また，導波路のｚ方向ずれ，導波路間空隙長をΔ，Laとする．電磁界の相反定理（式(2.24)参照）を用いて端面結合効率η_{LD}を求めると

$$\eta_{LD}=\frac{\eta_{LD}^{0}}{\sqrt{1+\chi}}\ \exp\left[-\left(\frac{(w_{20}/w_{1}(y))\ \eta_{LD}^{0}+2\chi}{1+\chi}\right)\frac{\Delta^{2}}{w_{20}^{2}}\right] \tag{6.3}$$

$$\chi = \left(\frac{k}{2R_1(y)} \right)^2 \left(\frac{w_1(y) w_{20} \eta_{LD}^0}{2} \right)^2 \tag{6.4}$$

となる[52]．ここで$w_1(y)$および$R_1(y)$はそれぞれyにおける光波の拡がりおよび光軸上の位相面の曲率半径で

$$w_1^2(y) = w_{10}^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda y}{\pi w_{10}^2} \right)^2 \right] \tag{6.5}$$

$$R_1(y) = y \left[1 + \left(\frac{\pi w_{10}^2}{\lambda y} \right)^2 \right] \tag{6.6}$$

で表される．またη_{LD}^0 は$\Delta = 0$，$R_1(y) = \infty$のときの結合効率であり，

$$\eta_{LD}^0 = \frac{2 w_1(y) w_{20}}{w_1^2(y) + w_{20}^2} \tag{6.7}$$

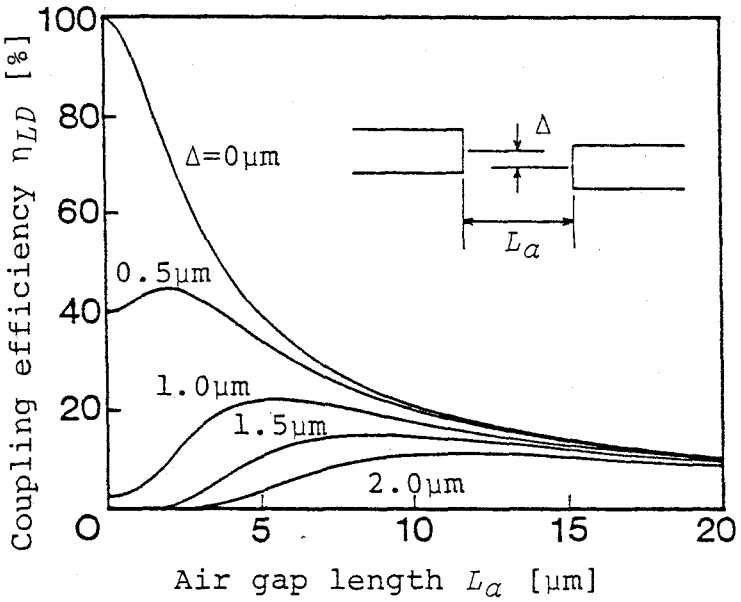


図6.3　端面結合効率（$w_{10} = w_{20} = 0.52$μmのとき）

である．実際に近い例として，$w_{10}=w_{20}=0.52\mu m$とした場合の，導波路間空隙長Laに対する結合効率η_{LD}を図6．3に示す．この図からｚ方向ずれが無い場合（Δ＝０）はLaが小さいほうが効率は高いが，ｚ方向ずれがある場合はLaを小さくすると効率は低下することがわかる．そこでＬＤのｚ方向の取り付け精度を考慮してLaを決定する必要がある．Laを20μmとすれば｜Δ｜≦２μmで10％程度の端面結合効率が得られる．

６．３　光検出器（フォトダイオード）

６．３．１　テーパ構造

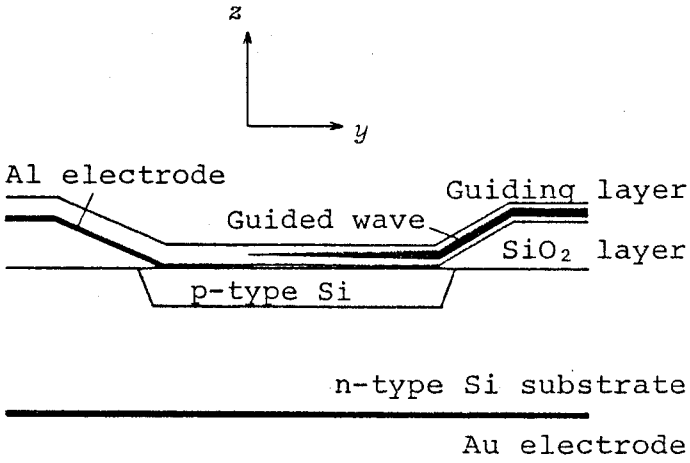
図6．4 (a) にｎ形Si基板を用いた場合の導波光検出領域の断面図を示す．ＰＤはｐ型不純物を光検出位置にドーピングして作製するｐｎ接合で構成する．導波領域では，SiO_2 バッファ層はＳｉ基板による導波光の減衰が無視できるほど十分厚くなければならない．一方，検出領域では光がｐｎ接合領域に侵入することが必要である．したがって，両者の導波路構造は互いに異なるが，その境界が不連続であると導波光が散乱され効率が低下する．そこで境界における導波光の散乱を抑えるため，SiO_2 層にテーパ[53] (≃1/5)を設けることにした．

６．３．２　設　　計

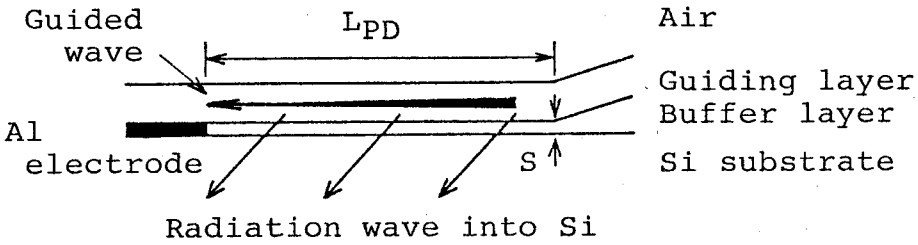
ＰＤ領域における導波光の吸収係数をα_{PD}とおくと，ＰＤに吸収される導波光パワーP_{PD}は

$$P_{PD}=P_{IN}\{1-\exp(-2\alpha_{PD}L_{PD})\} \tag{6.8}$$

と表される．ここで，P_{IN}，L_{PD}はそれぞれＰＤに入射する導波光パワー，結合長である．α_{PD}は，光検出領域のｚ方向プロファイル（図6．4 (b) 参照）で決まる．Ｓｉをプリズム領域，バッファ層をギャップ領域とみなしてプリズム結合理論[54] を適用すれば



(a)



(b)

図6.4　光検出領域断面図

$$\alpha_{PD}=\frac{\sin 2\phi_b'\sin 2\phi_b}{T\tan\theta_f}\exp(-2\gamma_b S)\ , \tag{6.9}$$

$$\phi_b=\tan^{-1}\frac{\sqrt{N^2-n_b^2}}{\sqrt{n_f^2-N^2}}\ ,\quad \phi_b'=\tan^{-1}\frac{\sqrt{N^2-n_b^2}}{\sqrt{n_s^2-N^2}}\ ,$$

$$\gamma_b=\frac{2\pi}{\lambda}\sqrt{N^2-n_b^2}\ ,\quad \theta_f=\sin^{-1}(N/n_f)$$

で与えられる．ここで，Tは実効導波路厚，Sは検出領域におけるバッファ層

厚，n_f, n_b, n_s はそれぞれ導波層，バッファ層，Ｓｉ基板の屈折率を表す．検出電流を大きくするにはL_{PD}を大きくすればよいが，これは同時に信号光以外の光（迷光；ノイズ）の吸収の増加も招く．したがって，信号光を効率よく検出するには，$\alpha_{PD}L_{PD} \simeq 1$となるように$L_{PD}$を決定するのが良い．例えば，$\lambda=0.78\mu m$, $T=1.35\mu m$, $N=1.52$, $S=0.25\mu m$, $n_f=1.55$, $n_b=1.46$, $n_s=3.75$の場合では，$\alpha_{PD}=6.2\times10^{-3}$(Np/μm) と計算され，$L_{PD} \simeq 160\mu m$とすればよいことがわかる．

同様にＰＤのｘ方向の長さW_{PD}もノイズの増加を抑えかつ再生信号やフォーカス誤差が十分検出できるように決定する．

Ｓｉによる光の吸収係数は波長0.78μmに対して～0.1 (Np/μm) である[55] からＰＤの空乏層の深さT_{DP}は

$$T_{DP} \gg 10\mu m \tag{6.10}$$

が望ましい．しかし，T_{DP}を大きくすると個々のＰＤを電気的に分離するためには分離帯幅を広くする必要がある．一方，ＰＤ間の分離帯幅は，効率面からも誤差検出機能からも，狭いほうがよい．そこで両者のかねあいで空乏層深さとＰＤの間隔を決定しなければならない．

6.4 結　言

ＬＤ発振スペクトルと集光スポットの関係を明らかにし，その結果，モードホッピングを起こさない単一縦モードＬＤが必要であることを示した．集積化した場合は戻り光の影響が懸念されるが，それについては第８章および第９章で述べる．また，ＬＤの取り付け精度と導波光励振効率の関係を明らかにし，結合条件の最適化の指針を得た．

光検出器はｐｎ接合を使用する．導波領域と検出領域の境界での導波光散乱を抑えるために，バッファ層にテーパ構造を設けた．また，ＰＤの設計について述べた．

第７章　光集積回路形読取りデバイスの作製

７.１　緒　　言

本章と次章では，前章までの解析・設計に基づいて行った光集積回路デバイス（ＩＯＤＰＵ）の作製および実験結果について述べる．

まず，実際に作製したデバイスの設計仕様を示し，前章までに触れなかった部分については補足説明をする．次いで，デバイスの作製プロセスについて述べる．作製プロセスを大別すると

1) 導波路およびフォトダイオード（ＰＤ）の作製
2) グレーティング素子の作製
3) 半導体レーザ（ＬＤ）の端面結合．

となる．この中で，2)がＩＯＤＰＵ作製のキープロセスであり，特別設計の電子ビーム直接描画装置を用いる．

７.２　作製パラメータ[45)-48)]

作製したデバイスの構成および作製パラメータを，図7.１，図7.２および表7.１に示す．

光源には，市販されている通常のファブリペロ化合物半導体レーザで，波長0.78μm帯の単一モード発振のものを使用した．

Ｓｉ基板には厚さ 0.5mmのｎ型の（１１１）面ウェハを用いた．このウェハ上にプレーナプロセスで複数個の試料を同時に作製し，最後に分割する．この分割にはＳｉの劈開を利用する．また，ＬＤの結合端面の露出にも劈開を利用する．使用するＳｉウェハの（１１１）面は劈開方向を考慮して決定した．

バッファ層および導波層にはそれぞれ熱酸化SiO_2(屈折率n_b =1.46) およびCorning#7059ガラススパッタ膜（屈折率n_f =1.55）を使用する．バッファ層は，導波光のＳｉ基板への漏洩による伝搬損失を避けるために設ける．導波層が厚い方が漏洩は少ないので，バッファ層は薄くてよい．そこで導波層の

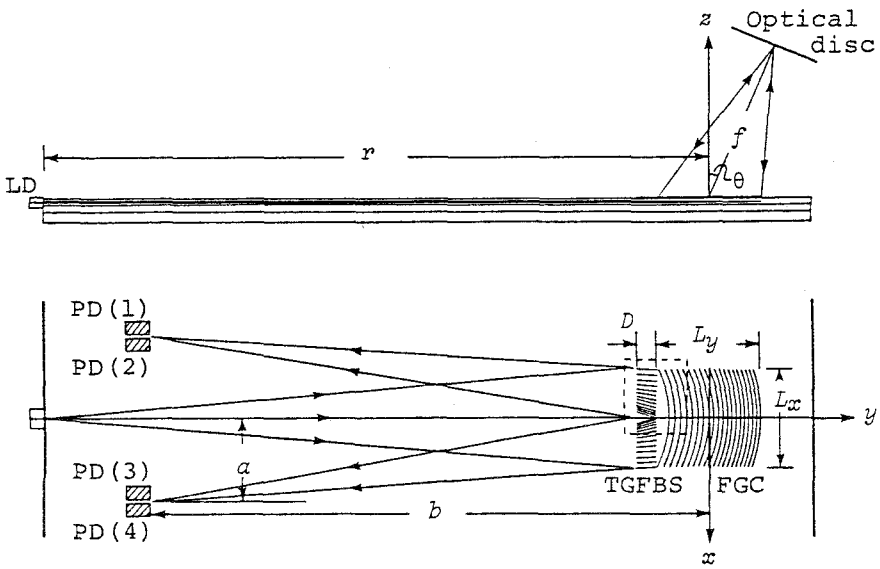


図7.1　デバイス構成と作製パラメータ

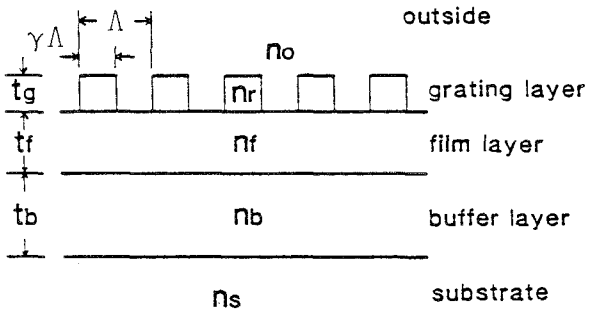


図7.2　グレーティング領域での導波路断面図

厚さは，導波路分散曲線からＴＥ単一モード条件を満たすできるだけ厚い値を選び，0.95μmとした．Ｓｉ基板への漏洩による導波損失を0.1dB/cm以下にするために必要なバッファ層厚はこの場合 1.8μm以上である．また，実効屈折率Nは1.52となる．

グレーティング素子はＳｉ－N層（屈折率n_r =2.00）をレリーフ加工して作製した．この材質の選択は，#7059ガラス導波層とのエッチングレート比を

表7.1　作製パラメータ

Light Source GaAlAs LD	Wavelength	λ=0.79 μm
Waveguide Single Mode Glass/SiO_2/Si	Guiding Layer (#7059 glass) Buffer Layer (SiO_2) Mode Index (TE_0)	0.95 μm t_b=1.86 μm 1.52
Grating Components FGC	Cladding Layer (Si-N) Focal Lengths Output Angle Aperture Period Theoretical Coupling Efficiency Diffraction-limited Focus Spot Width	t_g=0.035 μm f=2.0 mm r=10.5 mm θ=15.0 Deg 1.0 x 1.0 mm^2 0.52 - 0.75 μm 60 % 1.4 μm
TGFBS	Detecting Point Size Period Theoretical Diffraction Efficiency	a=1.165 mm b=9.00 mm 1.0 x 0.095 mm^2 3.80 - 4.04 μm 50 %
Photodiode Array	Element Size	150 x 50 μm^2 (10 μm Gap)

高くとることができグレーティング深さの制御が容易である，屈折率が高く同じ放射損失係数をより薄い層で実現できる，等の理由による．

集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ）の１次回折光を基板面からほぼ垂直に出射させるためにはグレーティング周期はλ／Ｎ（≃ 0.5μm）程度になる．作製に用いた電子ビーム直接描画装置[56]の描画能力と第３章で評価した許容作製誤差を考慮して，ＦＧＣの開口面積を１×１mm^2と決定した．

ＦＧＣの回折効率は高次回折光が導波光となると劣化するので，式(2.3)の条件は避ける方がよい．一方，ＦＧＣでは，その集光機能のため出射角は出射位置の関数となる．すなわち，式(2.2)から格子ベクトルの大きさもＦＧＣ開口内で変化する．そこで，ＦＧＣの出射角θおよび焦点距離ｆは，ＦＧＣ開口内全域にわたり条件式(2.3)を避けるように決定した．その値がｆ＝２mm，θ

=15° である．そのときの回折限界集光スポット径は半値全幅で 1.4μm，グレーティング周期は0.52～0.75μmと計算された．

以上の値で，２.7でのべた設計方針に従い，バッファ層厚およびグレーティング層厚をそれぞれ1.86μmおよび35nmにした．理論回折効率は60%である．

ＬＤとＦＧＣの距離ｒは，発散導波光の拡がり角から決定した．

決定した導波路パラメータを用いて，５.4で示した手続きで，導波形ビームスプリッタ（ＴＧＦＢＳ）を設計した．グレーティング周期は3.80～4.04μmである．

７.３ 導波路およびフォトダイオードの作製

７.3.1 フォトダイオード付基板

ＰＤは６.3.1で述べたようにテーパ構造をもったものを作製する．まず，ｐｎ接合を作製する部分をマスクし，水蒸気雰囲気中でＳｉ基板を加熱する．するとマスクされてない部分のみが酸化され，SiO_2 バッファ層が選択的に成長する．マスクの端では酸素がまわりこむので図6.４に示すようにバッファ層

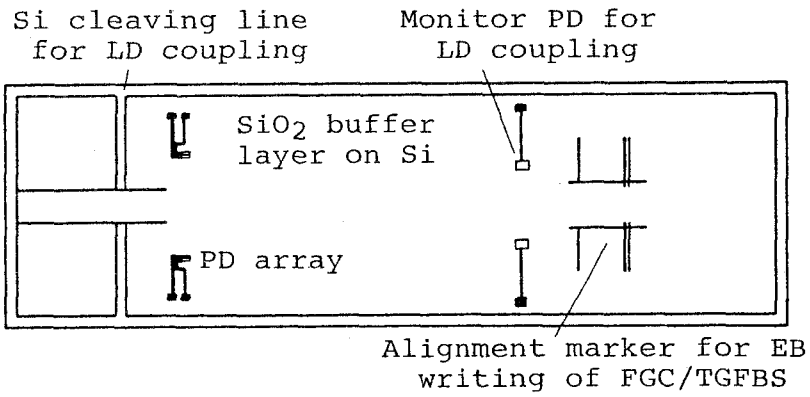


図7.３　ＰＤ付基板

がテーパ状となる．ｎ型のＳｉ基板を使用しているのでｐ型不純物（ボロン）をドープし，ｐｎ接合を作製し，ｐ側にはＡｌ電極，ｎ側にはＡｕ電極を蒸着

する．また，ウェハを個別の試料に分割するラインを，SiO_2 層を選択的にエッチングして露出する．このエッチングプロセスで同時にグレーティング描画および端面劈開のための位置合わせマーカを切る．図7．3に作製されたＰＤ付基板の概要を示す．信号検出用の他にＬＤによる導波光励振をモニタするためのＰＤも加えた．

7.3.2 ガラス導波層の作製

Corning#7059ガラス導波層はスパッタ法で作製する．

使用したスパッタ装置は２極マグネトロン構造のスパッタダウン形のものである．ベルジャ内の圧力を一旦 2×10^{-6}Torr以下にし，Ａｒガスを導入する．ターゲット－試料間距離50mm，ＲＦパワー 100watt，基板水冷，Ａｒガス圧 2×10^{-2}Torrで 85minスパッタし，0.95μmの膜圧を得た．

7.4 グレーティング素子の作製

7.4.1 Ｓｉ－Ｎグレーティング層の成膜

Ｓｉ－Ｎグレーティング層はプラズマＣＶＤ（ＰＣＶＤ）で作製する．

Ｓｉ－Ｎ膜はスパッタリングまたはＣＶＤにより作製できるが，前者では良質な膜は得られていない．ＰＣＶＤは，減圧下（10^{-1}～数Torr）で導入した反応成分をグロー放電下で励起しプラズマ化学反応により薄膜として形成させる方法で，放電エネルギを利用するので高温減圧ＣＶＤに比べて基板温度が低温（200～400 ℃）でよいのが特長である．

使用したＰＣＶＤ装置の概略図を図7．4に示す．平行平板電極（間隔30mm）の中央に試料を載せ，基板温度を400 ℃に保つ．ベルジャー内を真空ポンプで低圧(0.6mbar）にしながら，希釈シラン(5% SiH_4/N_2)とアンモニア(NH_3）をそれぞれ20cc/minづつ電極間に導入する．高周波（～14MHz)パワー(8 watt)を印加しＳｉ－Ｎを堆積させる．レーザの干渉を利用し，成長膜厚を実時間でモニタする．成長速度は～10nm/minである．

以上の装置・操作手順で７.3で用意したＳｉ基板導波路上に35nm厚のＳｉ－Ｎ層を作製した.

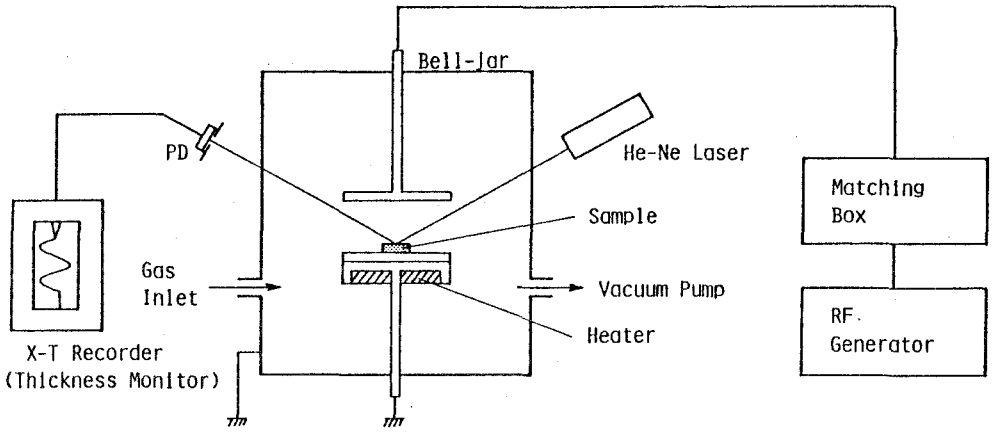


図7.4　プラズマＣＶＤ装置

７.4.2　電子ビームレジストの塗布

電子ビームレジストにはポジ型のレジストＯＥＢＲ1010を使用した．このレ

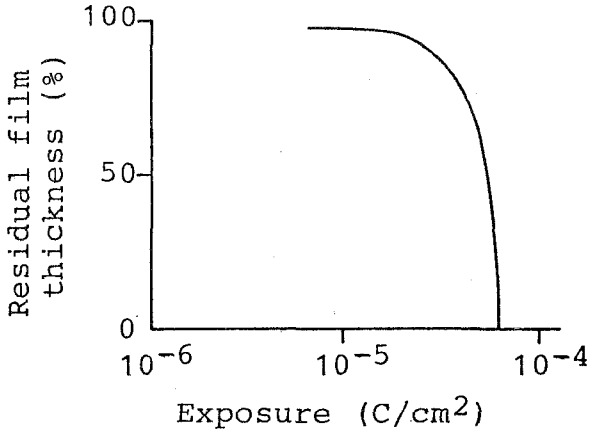


図7.5　レジスト（ＯＥＢＲ1010）感度曲線

ジストは感度曲線が急峻（図7.5）で描画・現像後のラインースペースのエッ

ジが鋭いので，矩形断面を持つ良好なグレーティングパターンが得られる．現液を１：１に希釈したものをＳｉ－Ｎ層上に 8000rpm，30sec でスピンコーティングし，150 ℃で 20minプリベークした．

7.4.3 グレーティングパターンの電子ビーム直接描画

図7.6に，当研究室で開発され，ＩＯＤＰＵ用グレーティングの作製に用いた，電子ビーム直接描画装置のブロックダイアグラム[56] を示す．装置は通常

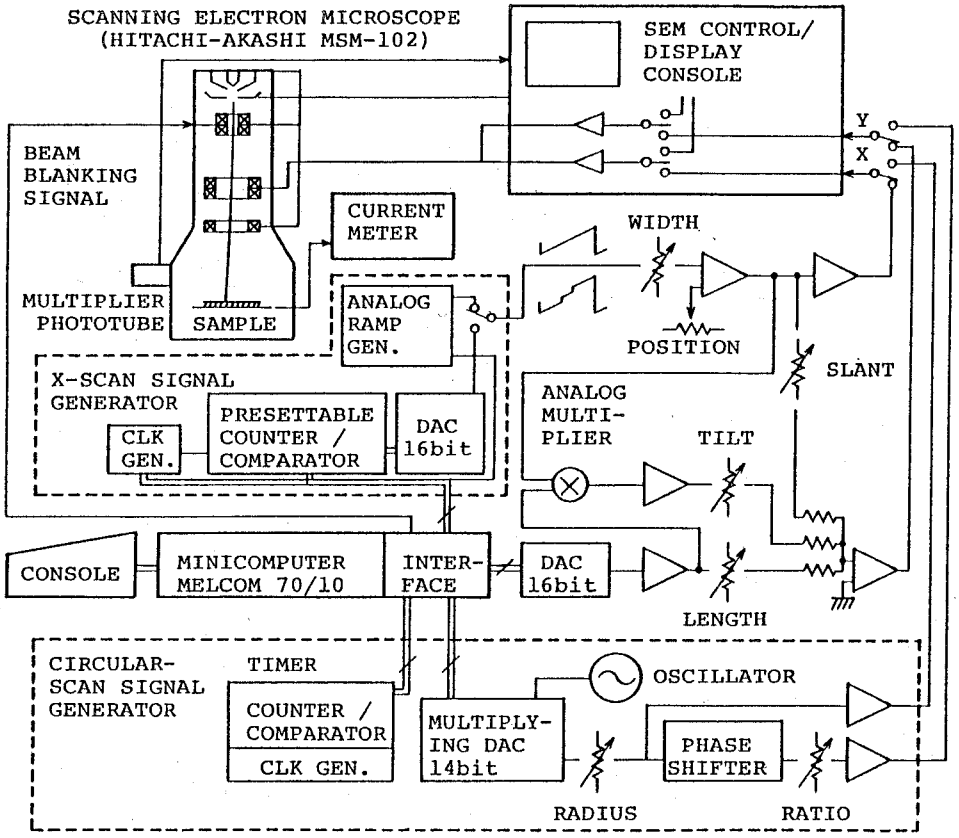


図7.6　光集積回路作製用電子ビーム直接描画装置

の走査形電子顕微鏡（ＳＥＭ）に走査制御用電子回路を付加し，ミニコンピュータに結合することにより構成されている．電子光学系，像観察機能および試

料台はＳＥＭのものをそのまま用いている．数値パラメータは16ビットのＤＡコンバータを通してコンピュータプログラムによりディジタル制御されるが，同時にｘ，ｙ方向の相対的寸法はアナログ的に調整する．このように曲線走査にもディジタル信号を用いるが，そのステップは電子ビーム径に比べて十分小さいので，十分滑らかな走査線を得ることができる．

ＦＧＣのグレーティング周期は～0.6 μmと短いので，１周期を１本の走査線（ビーム径～0.3 μm）に対応させて描画する．ミニコンピュータは式(2.8) で表されるグレーティングラインの座標点を最大16ビットの分解能で計算する．ＦＧＣのライン数は2000本近くあり，各１本づつに対して16ビット分の座標点を求めるのは，計算量が膨大となり時間がかかりすぎる．そこで図7.７に示す計算量の軽減を計った[30]．まず，隣接する４本のグレーティングラインの曲

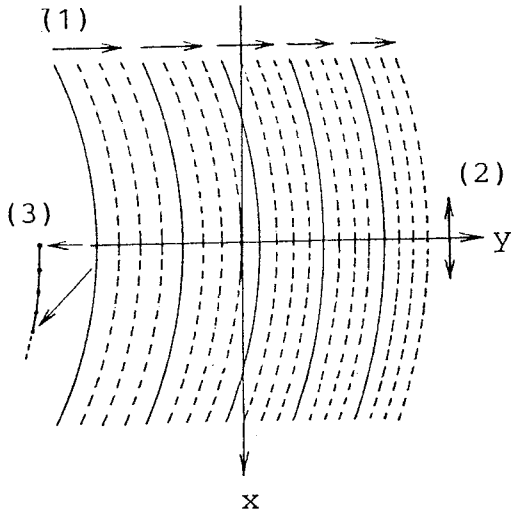


図7.７　計算時間の軽減

(1) 平行移動近似　(2) ｙ軸対称性　(3) 折線近似

率を同一とみなし，４本ごとのグループに分け，その内の１本について式どおりの計算を行い，他はｙ軸方向への平行移動でラインデータを求めた．また，

式どおりの計算で求める１本についても，ｘ軸方向を5000個の点列とし，ｙ軸対称性より計算分を半分にした．さらに，曲率が小さいので数十点の屈曲点をもつ折線で近似し，完全に式どおりの計算は屈曲点と端点でのみ行った．以上の近似計算で得られた座標点の位置誤差は，最大でもグレーティング周期の1/10で十分な精度である．描画条件は，加速電圧30kV，試料電流 0.5nA，露光量 8×10^{-5} C/cm^{2}で，ＦＧＣ描画時間は計算時間を含めて約30分である．

ＴＧＦＢＳはＦＧＣの描画に連続して同一の条件で描画した．ＴＧＦＢＳのグレーティングの半周期は～２μmとビーム径に比べて大きく，アスペクト比を0.5とするため，図7.８に示すように半周期を複数の走査線で塗り潰す方法で

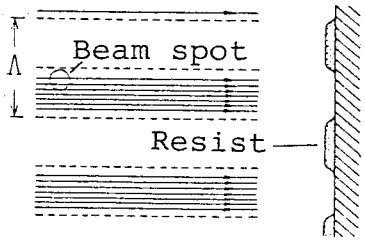


図7.８　ＴＧＦＢＳパターニングのための塗り潰し法

描画する．ミニコンピュータは式(5.13)で表されるグレーティングラインの座標点を計算する．このラインも厳密には曲率をもつが小さく，またライン長が短いので，直線近似をした．すなわち，一つの半周期分（セグメント）を塗り潰すのに，その位置と傾きおよびｘ軸方向の幅を計算する．計算量が少なく，描画面積も短いので，描画時間は計算時間を含めて約１分である．

このように電子ビームで描画した後，20℃，2min現像すると，グレーティングパターンが抜ける．

7.4.4　Ｓｉ－Ｎ層への転写

レジストに得られたグレーティングパターンを反応性イオンエッチング（R

ＩＥ）でＳｉ－Ｎ層に転写する．

ＲＩＥでは，サイドエッチングの小さい垂直に近いエッチング特性により，明確なグレーティングパターンが転写できる．また，良好な選択比をもっているので，グレーティング深さはＳｉ－Ｎ層厚と一致しその制御が容易となる．

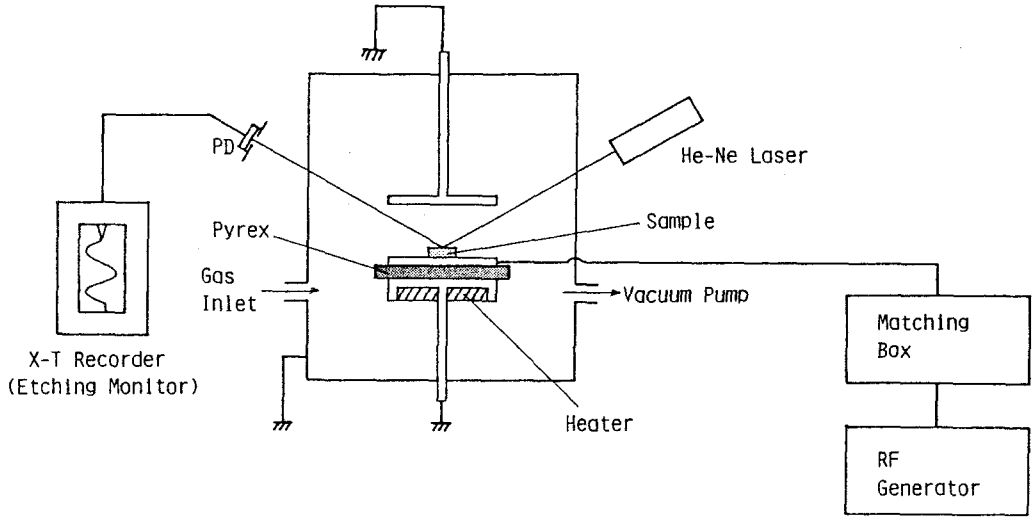


図7．9　反応性イオンエッチング装置

図7．9に装置の基本構成を示す．平行平板電極（間隔30mm）の中央に試料を載せ，基板温度を100 ℃に保つ．ベルジャー内を真空ポンプで低圧(0.2mbar)に引きながら，フロン(CF_4) を導入する．試料側の電極に高周波（～14MHz)パワー(5 watt)を印加すると，プラズマが発生するが，電子と正イオンの易動度の大きな違いにより試料表面に陰極降下が発生する．その陰極降下内では，活性ガスイオンは試料表面に垂直な電界にそって入射し，その方向に，Ｓｉ－Ｎとフロンの間の化学反応が進み反応生成物が気体となりエッチングが進行する．このようにして，良好な選択比をもつ異方性エッチングにより，グレーティングパターンを転写した．エッチングの様子はレーザの干渉を利用した膜厚モニタを利用して実時間で観察した．

最後にアセトンでレジストを取り除く.

図7.10にグレーティングの作製手順をまとめて図示しておく.

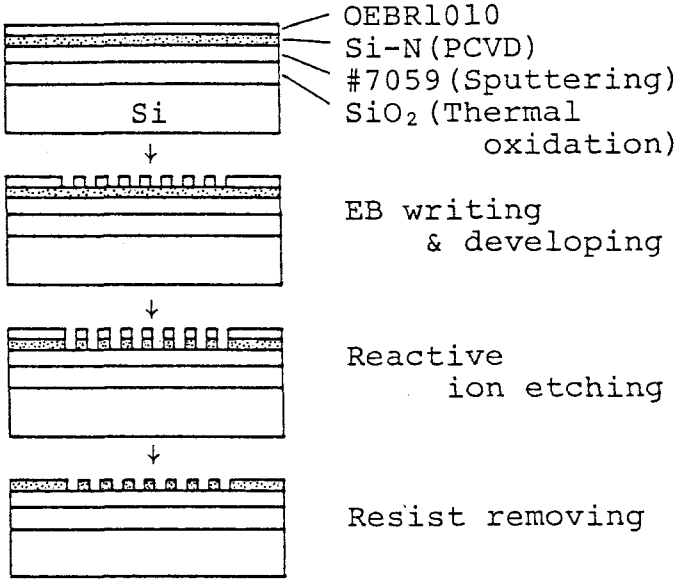


図7.10　グレーティングの作製プロセス

作製したＦＧＣ／ＴＧＦＢＳの一部の顕微鏡写真（図7.１の点線枠内）を図7.11に示す.

7.5　バッファエッチング

この段階では，ＩＯＤＰＵ導波路上のＰＤアレイのＡｌ電極上には0.95μm厚のガラス層と35nmのＳｉ－Ｎ層が堆積している．したがってボンディング配線をするためには電極上の誘電体絶縁層を除去しておく必要がある．そこでＬＤを集積化するまえに誘電体層のエッチングを行った.

エッチングマスクの作製

バッファエッチングを選択的に行うためにフォトリソグラフィでエッチングマスクを作る.

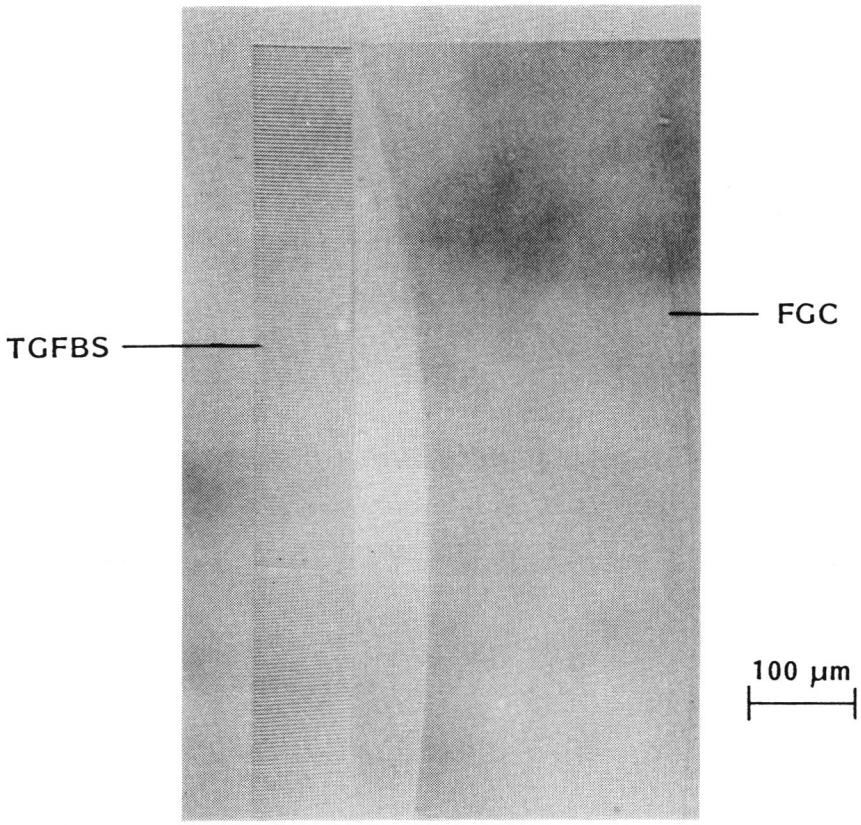


図7.11　作製したＦＧＣ／ＴＧＦＢＳの顕微鏡写真

フォトレジストにはShipley ＭＰ1300－31を用いた．これを試料表面に5000 rpm，30secでスピンコートし，95℃，30min でプリベークした．電極パターンのフォトマスクを用いて 20sec露光（超高圧水銀灯）し，20℃，75sec で現像し， 110℃，30min でポストベークした．このようにして試料上に電極部分だけが露出したレジストマスクを作製した．

選択バッファエッチング

試料をバッファエッチング液（40%弗化アンモニウム水溶液：弗酸＝10：1）でエッチングした．条件は20℃，300secである．この後，アセトンでレジストマスクを除去した．

このようにしてＡｌ電極を露出させた．

7.6 半導体レーザの端面結合

まず，旋盤でＬＤのキャップを取り外し，パッケージの不要な部分を切り除き，図7.12に示すようにＩＣベースにハンダ付けした．ＬＤの電源用ピンは折り曲げてＩＣベースのピンに並べた．ＩＣベースはＬＤのヒートシンクの役目もする．配線を施し固定したＩＣソケットに，これを接続した．

一方，ＩＯＤＰＵチップの結合端面はＳｉの劈開を利用して露出し，微動台に取り付けた自作の電磁石クランプ機構付ホルダーにマウントした．

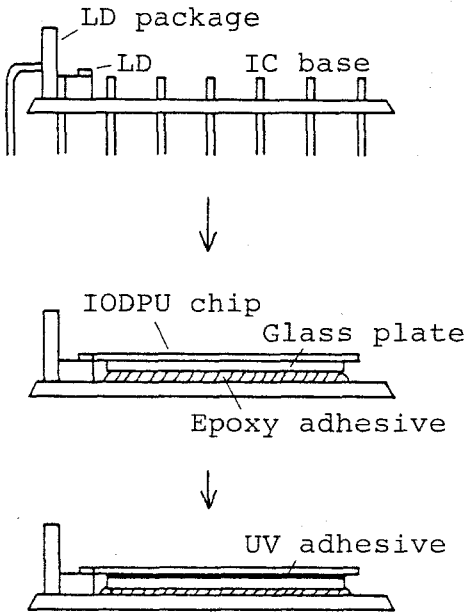


図7.12　ＬＤの端面結合プロセス

端面結合では，６.2.2で説明したようにｚ方向の位置合わせが最も厳しい．そこで，図7.12に示すように，ガラスの板枕を利用した２段階接着により，ＬＤを集積化した．ｘおよびｙ方向の位置合わせは，結合部を上方から立体顕微鏡で観察しながら微動台を微調節した．ｚ方向は，ＬＤを発振させながら，導波路中に設けた励振導波光モニタ用ＰＤの光電流を測定して，位置合わせを行った．まず，ＩＣベース面に粘性のある接着剤を塗布し，その上にガラス板を

乗せた．次ぎに，導波光励振効率が最大となるように，上方からＩＯＤＰＵチップを下方にのみ動かしてガラス板を押し下げ，その状態で接着剤を硬化させた．接着剤は硬化すると収縮するので，ガラス板枕とＩＯＤＰＵチップの間に隙間を生じる．次ぎの段階として，その隙間に粘性の薄い紫外線硬化形の接着剤を塗布し，紫外線を照射して硬化させた．そのときも，硬化による収縮は生じるが，収縮量は小さい．すなわち，収縮率を 0.1とし始めの付けしろを 100 μmとすると，１段階接着だけではｚ方向に10μmの誤差を生じるが，２段階接着では１μmの誤差しか生じない．ｙ方向の空隙長は６.2.2に従って～30μmで作製した．

７.７　電極配線

ＰＤアレイの配線をしてＩＯＤＰＵの作製を完了する．ｎ側の配線として，ＩＣベースのピンにハンダ付けした銅線を，Ｓｉ基板裏面の蒸着Ａｕ電極に，Ａｇペーストで接続した．

一方，ｐ側では，ＩＯＤＰＵ導波路上のＰＤアレイのＡｌ電極パッドとＩＣベースのピンとをボンディング配線した．これには，超音波ワイヤボンダを用

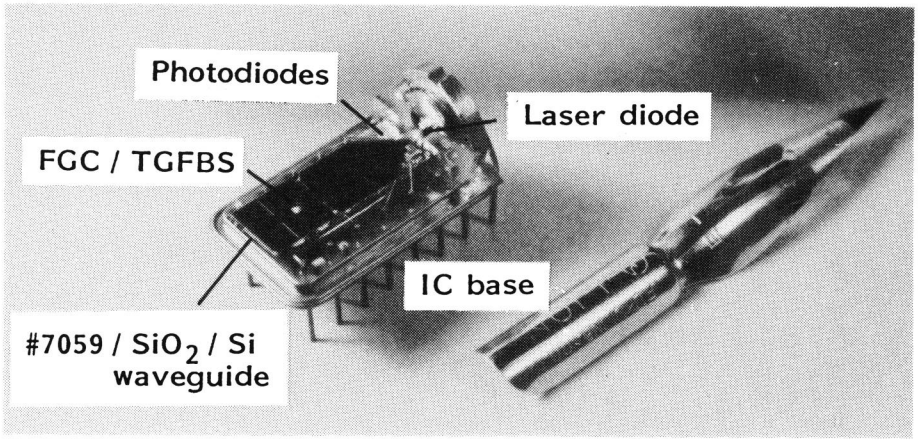


図7.13　作製したＩＯＤＰＵの全体写真

い，50μmφのＡｌ線を超音波溶融で接合した．

作製したＩＯＤＰＵの全体写真を図7.13に示す．全長20mm，全幅12mm，総重量 3.5ｇである．図7.14はＬＤを発振させたときの写真で，ＦＧＣ回折光の集光スポットが観察できる．

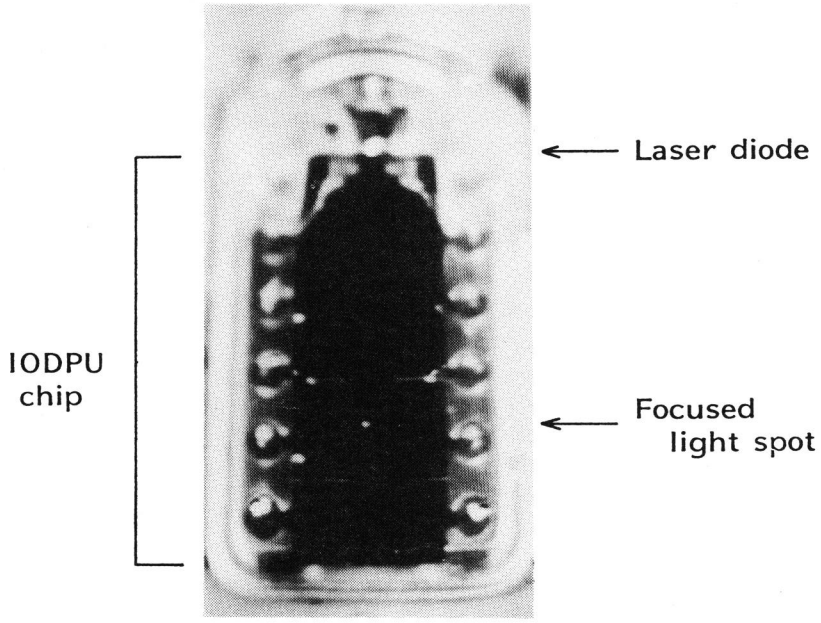


図7.14　ＬＤ発振状態でのＩＯＤＰＵの写真

7.8 結　言

ＩＯＤＰＵの作製パラメータを示し，デバイスの作製プロセスについて順次説明した．

前章までの解析・設計の結果に基づき，導波光のＳｉ基板への漏洩による伝搬損失，電子ビーム直接描画装置の描画能力，許容作製誤差等も考慮して，作製パラメータを決定した．導波層にはCorning#7059ガラスを用いた．ＦＧＣ，ＴＧＦＢＳはＳｉ－Ｎ層をレリーフ加工して作製した．

作製プロセスを要約すると以下のようになる．

1) 熱酸化でＳｉO_2 バッファ層を成長させる.

2) フォトリソグラフィを用いてＰＤアレイを作製する.

3) スパッタ法でCorning#7059ガラス導波層を作製する.

4) ＰＣＶＤでＳｉ－Ｎクラッド層を成膜する.

5) 電子ビームレジストＯＥＢＲ1010をスピンコートする.

6) 電子ビーム直接描画装置でグレーティングパターンを描画する.

7) ＲＩＥでＳｉ－Ｎクラッド層に転写する.

8) 選択バッファエッチングでＰＤ電極を露出させる.

9) 基板を劈開して導波路端面を露出させ，２段階接着法でＬＤを直接結合する.

10) ワイヤボンダで電極配線を行う.

作製したデバイスは全長20㎜，全幅12㎜，総重量 3.5ｇで，焦点距離２㎜，開口率ＮＡ＝0.24である.

第８章　デバイスの特性測定

８.１　緒　　言

本章では作製した光集積ピックアップ（ＩＯＤＰＵ）の基礎実験・特性測定について述べる．

まず，集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ）からの出力回折光を観察し，集光スポット径を測定し，結像関係の確認実験を行った．その結果について述べる．また，ＦＧＣの入出力結合効率の結果も示す．以上の結果を第２章の理論解析の結果と比較する．

次いで，ＩＯＤＰＵの基本動作確認の実験結果を示す．模擬ピットの検出実験，Ａｌ蒸着ミラーを用いたフォーカス誤差検出機能の確認実験，およびＡｌ段差蒸着ミラーを用いたトラッキング誤差検出機能の確認実験を行った．

半導体レーザ（ＬＤ）の発振スペクトルとＩＯＤＰＵの特性の関連を調べ，６.１の議論を実験的に検討した．その議論によるとＩＯＤＰＵにはホッピングを起こさないシングルモードＬＤを使用する必要がある．しかし，一般に言われているように，単体ではそれらの要求を満たすＬＤを使用しても，集積化するとＬＤへの戻り光により発振スペクトルが乱れる可能性がある．そこで，戻り光の発振スペクトルへの影響も調べた．

８.２　光学測定

８.２.１　集光スポット径

ＩＯＤＰＵの集光スポット径を測定した．図8.１に測定系を示す．ＦＧＣからの出力回折光を×40の顕微鏡対物レンズを用い拡大し，ＣＣＤカメラ上に結像させた．これをＣＲＴモニタで観測すると同時に，シンクロスコープで集光スポットの光強度分布を測定した．焦点面における集光スポットのＣＲＴ写真およびｘ，ζ方向に沿ったスポットの光強度分布を図8.２に示す．集光スポット３dB全幅はそれぞれ 2.2μmおよび 2.5μmで，回折限界スポット径 1.4μmに近

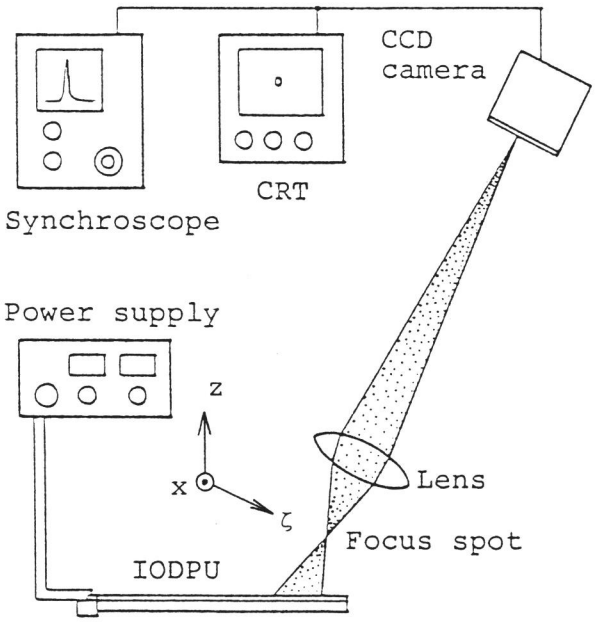


図8.1　集光スポット測定系

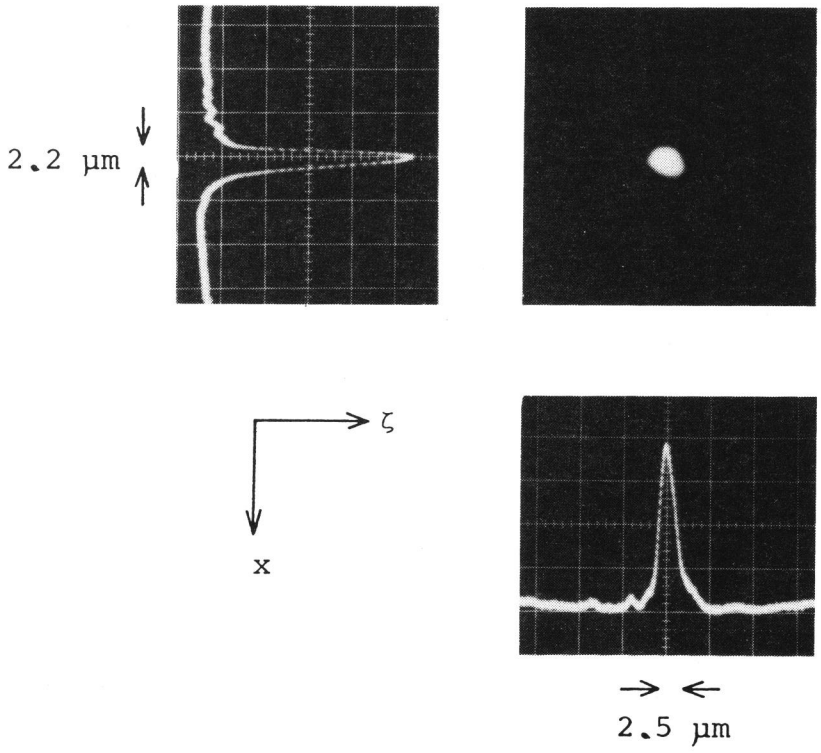
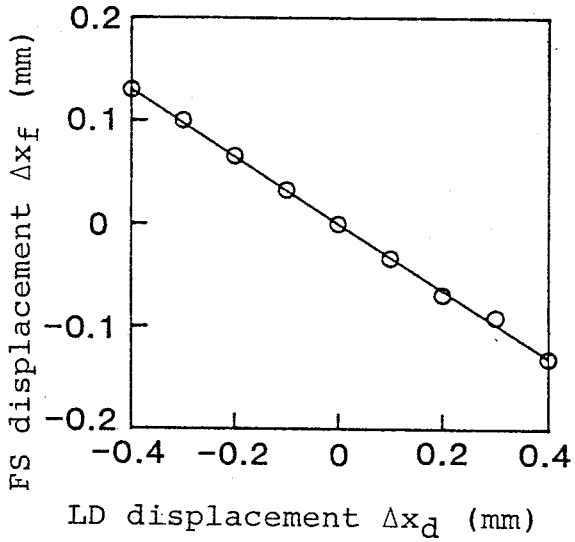
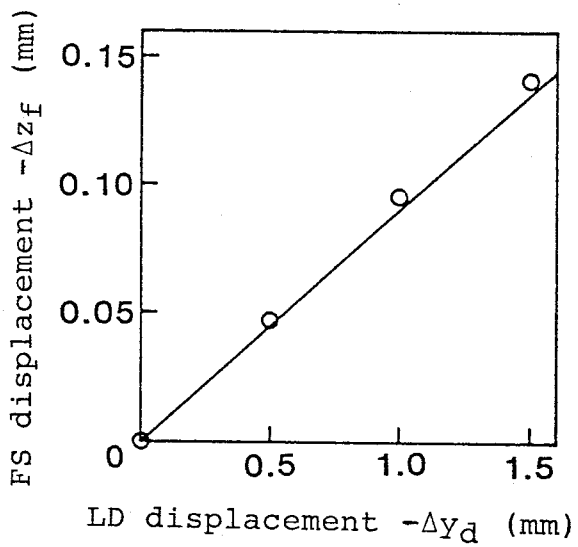


図8.2　集光スポットのＣＲＴ写真および光強度分布

い値が得られた．これは作製精度が向上すれば，さらに回折限界値に近づくと考えている．



(a) ＬＤをｘ方向に変位させたときのＦＳのｘ方向変位



(b) ＬＤをｙ方向に変位させたときのＦＳのｚ方向変位

図8．3　ＬＤ変位と集光スポット（ＦＳ）変位

8.2.2 結像関係

ＬＤを集積一体化する前の段階の試料を用いて結像関係を確認した．導波光発散中心（ＬＤ）の位置をｘ，ｙ方向に変位させてＦＧＣ回折光の集光スポット（ＦＳ；Focus Spot）の変位を測定した．

ｘ方向変位

発散中心のｘ方向の変位 Δx_d に対する集光スポットのｘ方向の変位 Δx_f の測定値（○印）を図8.3(a)に示す．実線は2.5で求めた結像関係式(2.17)に基づく計算値である．

ｙ方向変位

発散中心をｙ方向に遠ざけたとき（$-\Delta y_d$），集光スポットのｘ方向に絞られる位置のｚ方向変位（$\Delta z_f = \Delta f \cos\theta$）を測定した．図8.3(b)に測定結果を○印で示す．実線は結像関係式(2.20)に基づく計算値である．また，集光スポットがｙ方向に集束する位置の変化は認められなかった．これは結像関係式(2.22)と一致する．

以上，両者ともに測定値と計算値は測定誤差内で完全に一致することを確認した，

8.2.3 結合効率

ＦＧＣの入出力結合効率を測定し，理論解析の結果と比較する．ここで使用したＦＧＣは，平行導波光を回折集光するもので，実験に用いた波長0.6328μm Ｈｅ－Ｎｅレーザ用に設計・作製したものである．

出力結合効率[30]

ＦＧＣの出力結合効率は導波光パワーに対する出力光パワーで定義される．プリズムカップラで取り出した導波光に集光出力光の強度比として得られた出力結合効率は，理論効率60%に対して，40%であった．

入力結合効率[57]

入力結合効率を測定するため図8.4に示すような試料を用意した．この試料

では，導波光を励振しかつ戻り導波光を外部に取り出すために，一様線型なグレーティング（ＬＧＣ）をＦＧＣと対にして作製した．このＬＧＣは開口面積１×１mm^2，周期 0.5μmで，ＦＧＣ－ＬＧＣ間の距離は５mmとした．光源には偏光したＨｅ－Ｎｅレーザを用いた．ＬＧＣにより励振された導波光はＦＧＣにより回折され焦点に集光した後，焦点面付近に設置された反射鏡によって反射されＦＧＣの入力結合で再び導波光となる．この導波光をＬＧＣによって空間中に取り出し，外部のビームスプリッタとピンホールを通して光電子増倍管で光強度を測定した．反射鏡を法線方向（ξ軸）に沿って変位させ検出光強度の変化を測定した．結果を図8.５に示す．散乱等のバックグラウンドレベルに対する最大検出光強度の比は約 300倍（約25dB）で，焦点深度（半値半幅）は約20μmである．この測定は，戻り導波光の入射導波光と同一波面をもつ導波光への結合効率を求めたことになり，理論解析で求めた図2.８に対応する．両図を比較すると図8.５はＦＧＣの開口が 0.4mm長のときの計算結果と微細構造を除いてよく一致しており，実験結果は理論解析の正当性を支持する．

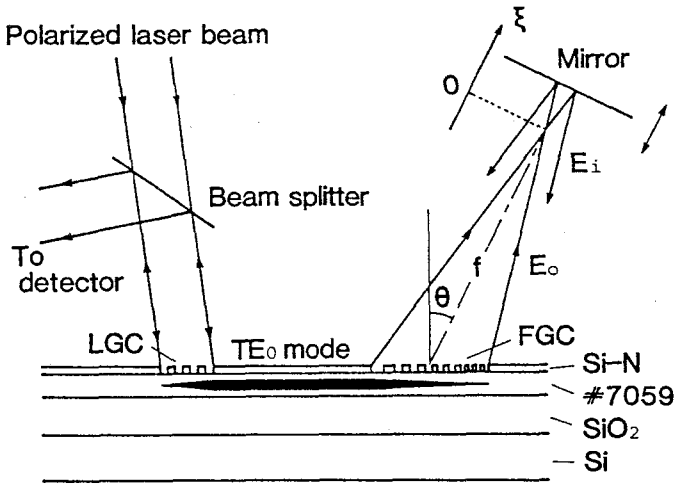


図8.４　ＦＧＣの入力結合効率測定系

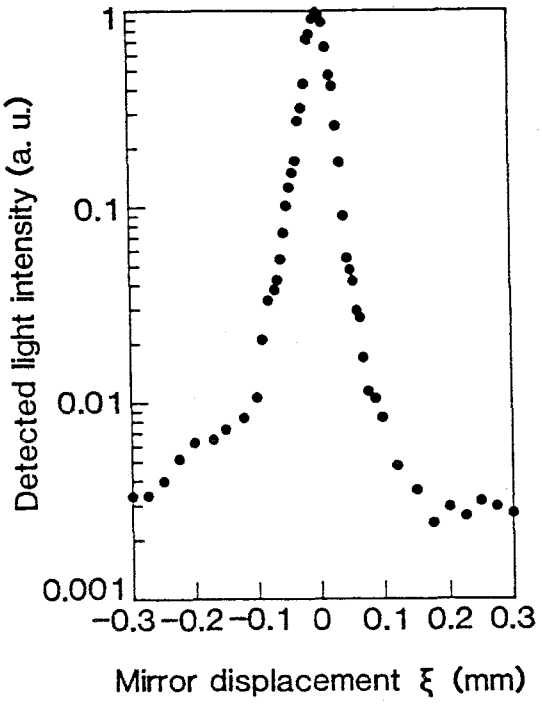


図8. 5　ミラーをξ方向に変位させたときの検出光強度変化

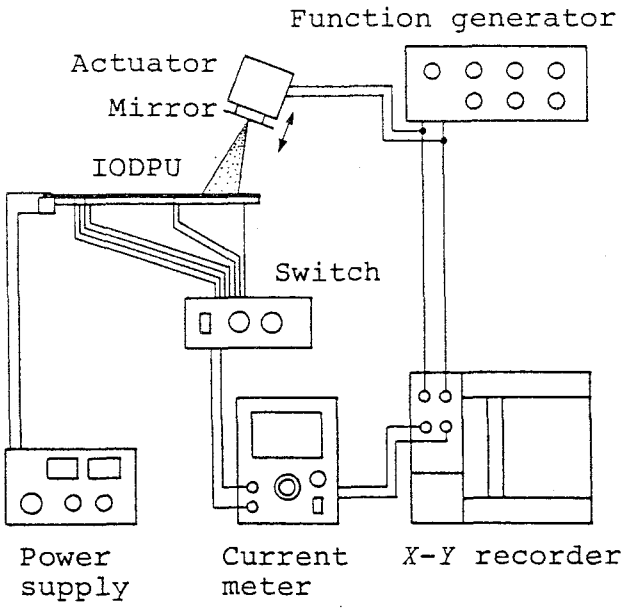


図8. 6　フォーカス誤差検出実験系

8.3 信号検出模擬実験

8.3.1 フォーカス誤差検出

図8.6に示す実験系でフォーカス誤差の検出を試みた．ＬＤを３mWで発振させ，ＩＯＤＰＵ出力光の焦点付近にアクチュエータに取り付けたＡｌ蒸着ミラーを置き，フォトダイオード（ＰＤ）の光電流を電流計で検出した．関数発生器でミラーをフォーカス方向（ξ方向）に駆動し，そのときの検出電流の変化をＸ－Ｙレコーダで記録した．図8.7にＰＤ(1) とＰＤ(2) （図7.1参照）の検出電流のξ依存性を示す．ξの負から正へミラーが変位するにつれて，まず外側のＰＤ(1) 電流の最大値が現れ，続いて内側のＰＤ(2) 電流の最大値が現れている．これはフォーカス誤差信号が（ＰＤ(1) 電流）－（ＰＤ(2) 電流）

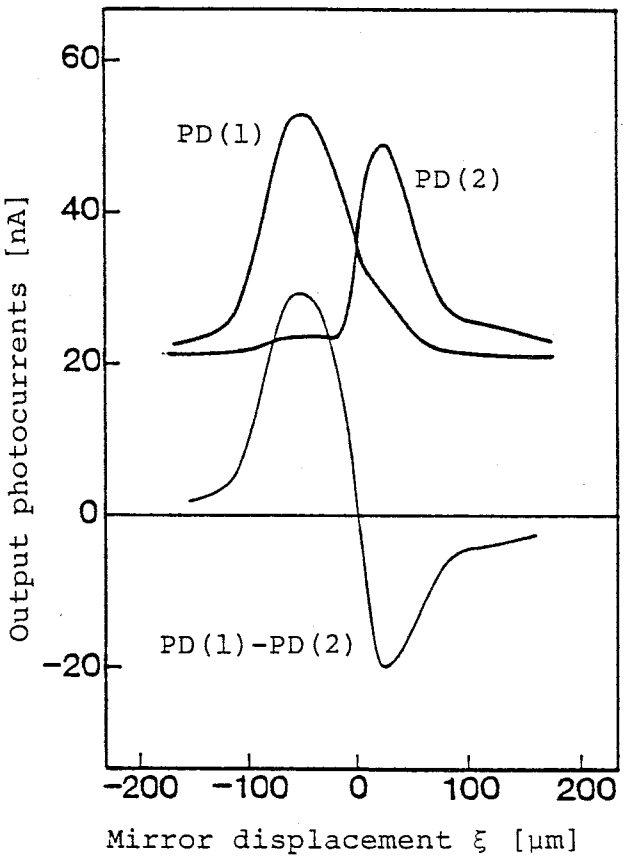


図8.7　出力光電流のミラー変位ξ依存性

で得られることを示しており，この検出法が実際に適用可能であることを確認した．

8.3.2 トラッキング誤差検出

図8.6と同様の実験系でトラッキング誤差の検出を試みた．電子ビームリソグラフィで，ピットのエッジを模擬した段差ミラー（0.11μm段差）を作製（図8.8）し，平板ミラーの代わりにＩＯＤＰＵ出力光の焦点面に配置した．これ

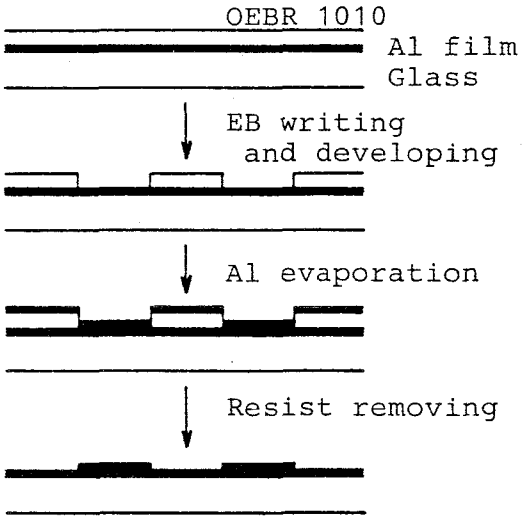


図8.8　段差ミラーの作製

を関数発生器およびアクチュエータでｘ方向に駆動し，そのときの検出電流の変化をＸ－Ｙレコーダで記録した．図8.9にＰＤ(2) およびＰＤ(3) の検出電流の測定結果を示す．段差位置で検出電流が互いに反対方向に変化する．これは（ＰＤ(2) 電流）－（ＰＤ(3) 電流）がディスクのｘ方向ずれを表すことを意味しており，これがトラッキング誤差検出法に実際に適用可能であることを確認した．

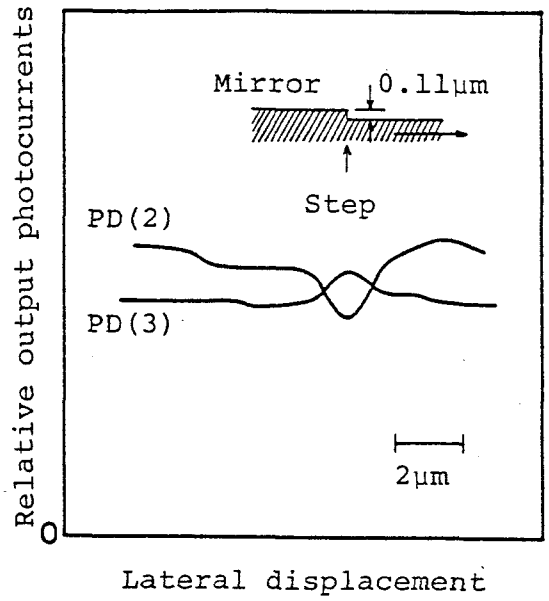


図8.9　段差ミラー変位による出力光電流変化

8.3.3　再生信号検出

電子ビームリソグラフィで図8.10に示すような模擬ピットを作製（図8.8参照）し，図8.6の実験系において平板ミラーの代わりにＩＯＤＰＵ出力光の焦点面に配置した．これを関数発生器およびアクチュエータでζ方向に駆動し，そのときの検出電流の変化をＸ－Ｙレコーダで記録した．図8.11に検出電流の

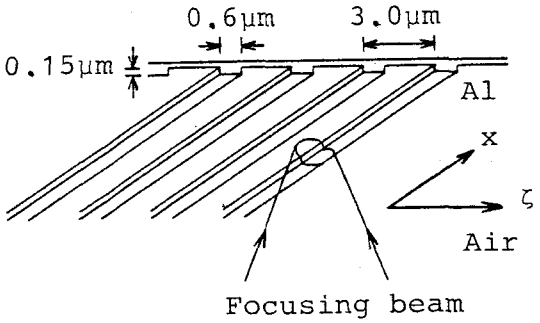


図8.10　模擬ピット

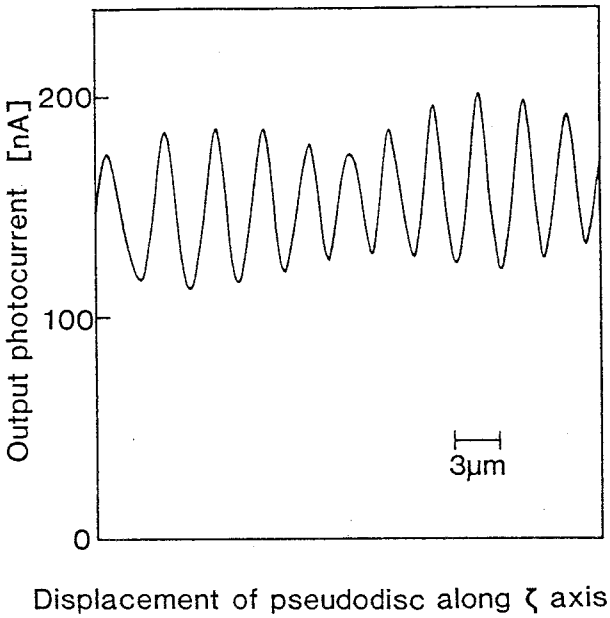


図8.11　模擬ピットによる出力光電流変化

測定結果を示す．ＬＤ発振パワーはこの場合５mWである．ピットの位置に対応して検出電流の変化が見られる．すなわち，ピットの有無（再生信号）が検出できることを確認した．

８.４　半導体レーザの結合特性

８.４.１　結合効率

ＬＤを一体化するまえの試料を用いて，ＬＤ結合位置のｚ方向ずれΔと導波光励振効率の関係を測定した．導波路間空隙長Laを25μmとし，発振状態のＬＤをｚ方向に変位させて，励振導波光モニタ用のＰＤの光電流を測定した．結果を図8.12の○印で示す．実線は式(6.3) から求めた理論曲線である．両者はよく一致している．Laが長いのでΔが大きくてもかなりの励振効率が得られている．

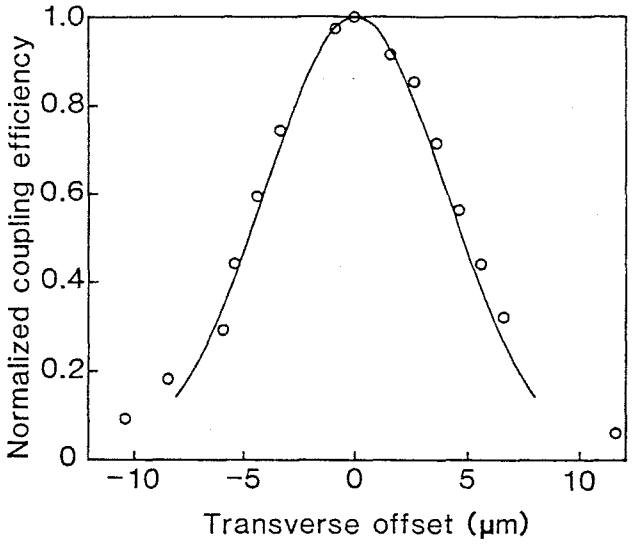


図8.12　ＬＤの結合効率

8.4.2　発振スペクトルと集光スポット

発振スペクトルの測定系を図8.13に示す．ＬＤ発散光の上方への漏れ光を，入射側スリットを最小にした分光器（Nikon モノクロメータＧ-250）に入射さ

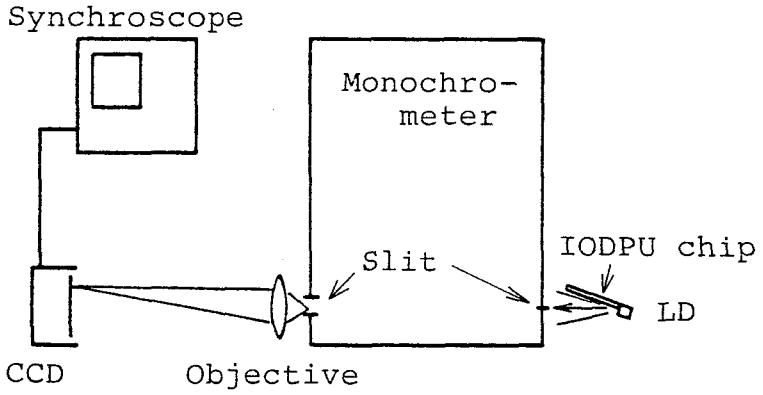


図8.13　ＬＤ発振スペクトルの測定系

せ，最大にした出射側スリットでの像を×10の顕微鏡対物レンズでＣＣＤカメ

ラ上に投影した．これをＣＲＴモニタで観測すると同時に，シンクロスコープでスペクトル分布を測定した．また，図8.１の実験系を用い，ＬＤ駆動電流を変化させ，そのときの集光スポット径および変位を測定した．

図8.14に作製したＩＯＤＰＵのＬＤ駆動電流と発振波長の関係の実験結果を示す．このＬＤは60mAまではマルチモード，それ以上の電流ではシングルモードであるがホッピングを起こしている．

ＬＤ電流とζ方向集光スポット径の測定結果を図8.15に示す．６.1.1で述べたようにマルチモード領域ではその度合によってスポット径が拡がっている．すなわちこのマルチモード領域では読取り動作は不可能となる．

また，集光スポットのζ方向変位とＬＤ電流の関係を図8.16に示す．モードホッピングによる集光スポットの位置跳びが見られる．この位置跳び量とモード間波長は式(6.2) を満たす．実際に使用するときは電流は一定とするが，温度変化等によりホッピングが起こると同様の跳びが見られ，正常な読取り動作ができなくなる．

以上，これらの結果は６.1.1の議論を実験的に裏付けるものである．

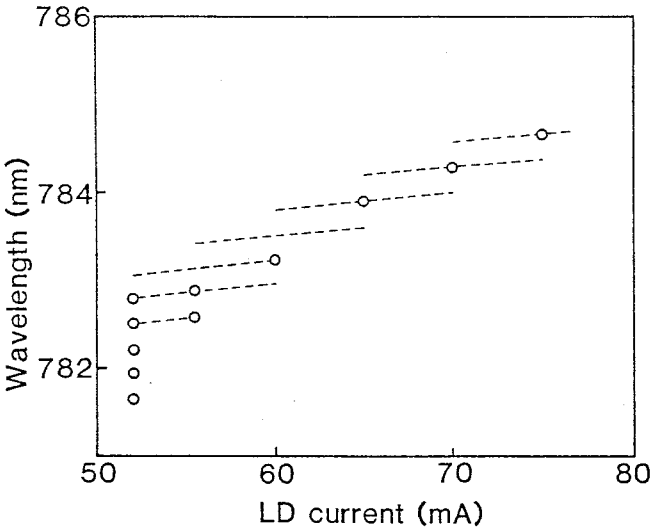


図8.14　ＬＤ駆動電流と発振波長

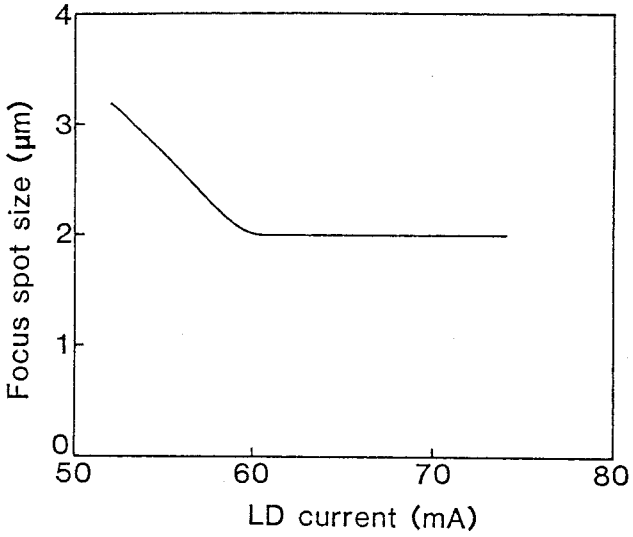


図8.15　ＬＤ駆動電流と集光スポット径

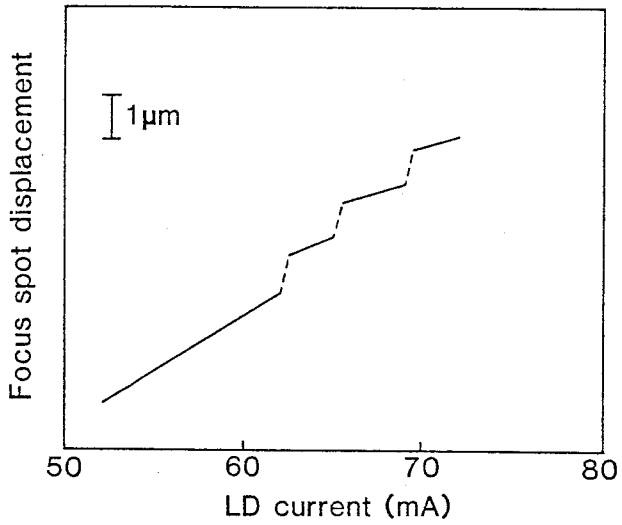


図8.16　ＬＤ駆動電流と集光スポット変位

8.4.3　戻り光の影響

発振状態の安定性，すなわち環境変化下での戻り光の影響を調べるため，空

隙長Laを微小量変化させて，戻り光の位相を変化させた．

まず，ＬＤのｚ方向ずれΔを０とし，導波路のガラス端面からの戻り光の影響を調べた．空隙長Laを微小量変化させながら発振スペクトルの変化を図8.13の測定系を用いて観察した．そのときのスペクトル分布を図8.17(b) に示す．図8.17(a) は結合前のスペクトル分布である．戻り光の位相を変化させてもスペクトルは変化せず，戻り光の影響は見られなかった．

次ぎに，ＬＤをｚ方向にずらし（Δ＜０），Ｓｉ基板劈開端面からの戻り光の影響を調べた．そのときの発振スペクトルの一例を図8.18に示す．シングル

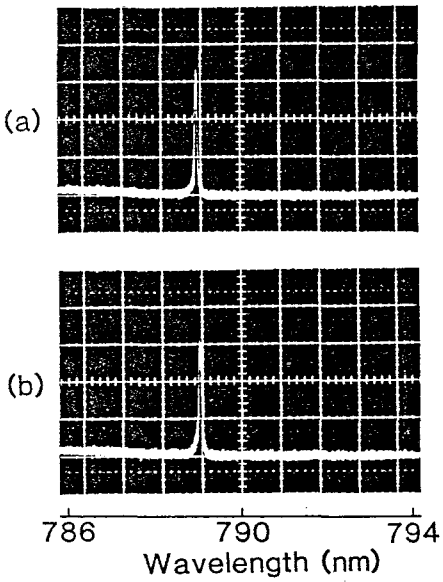


図8.17　ＬＤ発振スペクトル
(a) ＬＤ単体発振の場合
(b) ガラス端面からの戻り光がある場合

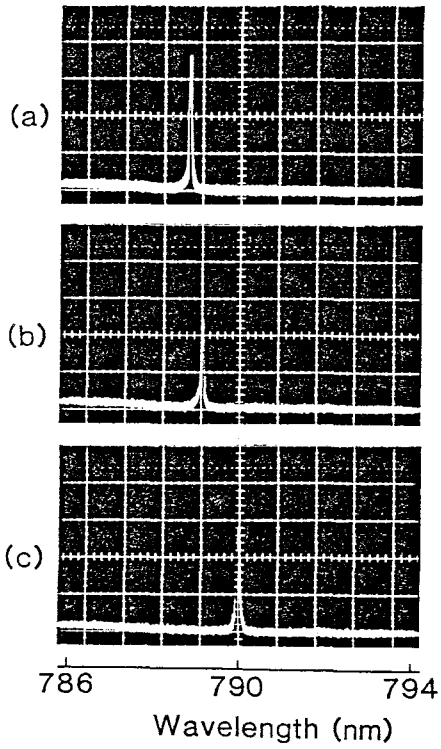


図8.18　Ｓｉ端面からの戻り光がある状態で，空隙長を微小量変化させたときのＬＤ発振スペクトルの変化

モードは維持しているが，ホッピングを起こし，発振状態が不安定となっている．もう一例を図8.19に示す．この例ではＬＤ駆動電流を各値にしてそのときの集光スポット変位を測定した．このＬＤは単体でホッピングを起こすものであるが，結合後はある電流範囲にわたって安定化されている．これはＳｉ端面がＬＤと複合共振器を形成しホッピングを抑制したためであると考えられる．このＳｉ劈開面からの戻り光の影響は，図8.12の－３μm以下，規格化効率70%以下の領域で観察された．

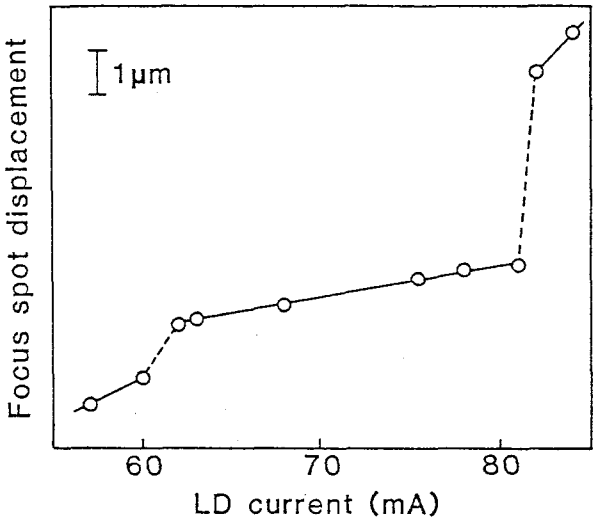


図8.19　ＬＤ駆動電流と集光スポット変位

8.5 結　言

作製したＩＯＤＰＵの基礎実験・特性測定を行い，基本動作を確認した．

集光スポット径を測定した．回折限界値 1.4μmに近い２μm（半値全幅）を得た．また，ＬＤを集積一体化する前の試料を用いて結像関係を調べ，実験値と理論値がよく一致することを確認した．ＦＧＣの入出力結合効率を測定した結果，解析結果と半定量的に一致することを確認した．

光ディスクを模擬したＡｌ蒸着ミラーを用い，模擬ピットの検出機能，フォ

ーカス誤差検出機能およびトラッキング誤差検出機能を定性的に確認し，提案したＩＯＤＰＵの構成で光情報を読取ることが原理的に可能であることを実証した．

ＬＤ発振スペクトルと集光スポットの関係を観察し，ＩＯＤＰＵが正常に動作するにはホッピングを起こさないシングルモード発振状態を維持する必要があることを実験的に確認した．また，集積化した状態で発振スペクトルの安定性を調べ，その結果，結合状態によってはＬＤへの戻り光が発振スペクトルに重大な影響を与えることがわかった．

第９章　デバイス特性の考察

９.１　緒　　言

前章では，作製した光集積ピックアップ（ＩＯＤＰＵ）の基本特性の測定および動作原理の定性的確認を行い，提案したＩＯＤＰＵ構成で読取り動作が原理的に可能であることを示した．しかし，例えばＣＤなどの現在普及しつつあるシステムや光カードなどの開発中のシステムへの応用を考える場合，それらの特性を定量的な見地からも検討する必要がある．

本章では解析結果および実験結果を参考にＩＯＤＰＵの評価を行い，より高性能なデバイスを作製するためのいくつかの問題点を取り上げ，その解決の可能性について考察する．

９.２　集光スポットサイズ

作製したＩＯＤＰＵの回折限界集光スポット径は３dB全幅で 1.4μmで，実験で得られた最小値は２μmである．この理論値と実験値の違いは，デバイスの作製誤差，および導波路，各集積化素子の微小欠陥による導波光の散乱が原因であると考えている．

このデバイス（焦点距離２mm，ＮＡ0.24）において回折限界スポット径を得るための許容誤差は式(3.62)～(3.68)にまとめられている．式(3.62)によると許容できる波長ずれは± 6.7nmである．これは他の作製誤差がないと仮定したときの値であり，実際はこの数分の１が許容値となる．一方，現在普及している0.78μm帯シングルモード半導体レーザ（ＬＤ）の隣接縦モード間隔は 0.3nm程度であり，波長のばらつきや波長ずれを考慮するとホッピングを起こさない条件で使用するかぎり，現状でも実現可能と思う．また，ＬＤの取り付け位置精度は式(3.64)，(3.65)で与えられ，ｘ，ｙ方向にそれぞれ±40μm，± 150μmであり，この数分の１の値でも十分に実現可能と思われる．式(3.67)，(3.68)によると集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ）の描画精度は開口長１mmに対

してその伸縮長±２μm程度となり，実際にはサブミクロンとかなり厳しい描画精度が要求される．すなわち，このＦＧＣのサイズ誤差が現状では最も影響が大きいと考えられ，このサイズ合わせをより正確に制御することで，回折限界集光スポット径を得ることが期待できる．

集光スポットを１μm以下のサイズとするためには，ＦＧＣのＮＡを大きくする必要があるが，３.7の結果は開口率ＮＡを大きくすると許容作製誤差は急に厳しくなることを示している．例えば，焦点距離を３mm，ＮＡを0.45とすると，波長に対する許容誤差は約１桁程厳しくなり，縦モードを安定化したＬＤが必要となる．ＬＤの取り付け位置精度もｘ，ｙ方向にそれぞれ± 1.4μm，±６μmと計算され，高精度の取り付け装置を必要とする．ＦＧＣの描画精度も開口長３mmに対して伸縮長±１μm程度となる．このように焦点距離を少し長くしＮＡを２倍にすると，許容作製誤差は全体的に１桁程度厳しくなり，デバイス実現は困難もしくは集積化技術の発展を待つことになる．したがって，現状の作製技術と応用上の要求の両面からデバイスの仕様を最適化する必要がある．

実際の光ディスク等には反射膜の上に厚さ約１μmの透明なディスク基板があり，集光ビームはその表面で屈折する．しかし，その影響による収差は，屈折を考慮にいれたＦＧＣの形状を描画することで，排除できる．

９.３　光電流レベル

ＬＤ発振パワー３mWにおけるフォトダイオード（ＰＤ）１個あたりの検出光電流の測定値は，最大50nA程度で信号成分と直流雑音成分がほぼ同程度であった（図8.７参照）．

ＰＤ１個あたりの検出電流レベルI_{PU}は

$$I_{PU}〔A〕=(\text{ＬＤ発振パワー；}P_{LD}〔W〕)$$
$$\times(\text{端面結合効率；}\eta_{LD})$$
$$\times(\text{導波光利用率；}\eta_{GW})$$

×（１－ＴＧＦＢＳ回折効率；$1-\eta_{BS}$）

×（ＦＧＣ出力結合効率；$\eta^{o}(Ly)$）

×（光ディスク反射率；R_{OD}）

×（ＦＧＣ入力結合効率；$\eta^{i}(Ly, \xi)$）

×（ＴＧＦＢＳ回折効率；η_{BS}）

×（１－導波光伝搬損失；$1-\eta_{LS}$）

×（ＰＤ結合効率；$\eta_{PD} \equiv P_{PD}/P_{IN}$）

×（光－電流変換率；Q_{OA}〔Ａ／Ｗ〕）

×（ＰＤの個数）　　(9.1)

で表せる．導波光利用率η_{GW}は，ＬＤからの発散導波光のＦＧＣに入射する割合で，ＬＤのｘ方向拡がり角に依存する．光ディスク反射率R_{OD}にはディスク基板のフレネル反射も考慮に入れる．光－電流変換率Q_{OA}はＰＤの空乏層厚さと量子効率で決まる．

理論的に計算すると，導波路間空隙長La＝20μm，ＬＤの拡がり角を半値全角でｘ方向11°ｙ方向33°では，$\eta_{LD}=0.09$，$\eta_{GW}=0.48$となる．$\eta_{BS}=0.50$，$\eta^{o}(Ly)=0.60$で，$\eta^{i}(Ly, \xi)$の最大値は0.43である．光ディスク基板の屈折率を 1.5とすると$R_{OD}=0.9$ と計算される．$\eta_{LS}=0.06$，$\eta_{PD}=0.86$，$Q_{OA}=0.3$ A/W と見積もると，$P_{LD}=3$ mWで$I_{PU}=460$ nAとなる．

この理論値と測定値の違いは，各効率の設計値からのずれが主な理由であると思われるが，その他にＰＤの構成にも原因があると考えている．すなわち，提案・作製した構成では最も信号強度が大きい場合（フォーカス誤差がない）には，戻り導波光はＰＤの分離帯に照射し電流として検出されないという欠点がある．したがって，ＰＤを片側に３個ずつ配置するなどしてＰＤアレイの構成を最適化し，各効率を設計値どおりに実現することにより，検出光電流I_{PU}は約１桁ほど改善できると思う．

また，直流雑音成分はＬＤから直接的および間接的にＰＤに入射する迷光が

原因で，実験によると実験器具からの反射など外部経由のものが半分を占めており，ＰＤにカバーを設けることでそれらは除去可能と考えている．残り半分の迷光の大部分は導波路内での散乱等によるものと考えている．そこで，その散乱の原因を取り除くためには基板の位置合わせマーカの影響の検討やチリ・ホコリの無い環境での導波路作製などが必要と考えている．

９.４　半導体レーザ結合

ＬＤの端面結合法は，プレーナプロセスが適用できず高精度の位置合わせを必要とする欠点がある．したがって，なんらかのセルフアライメント機構を取り入れたマウント法の考案が望まれる．また，将来的にはＩＯＤＰＵチップ上へのＬＤ直接成長作製などの技術開発が望まれる．

９.５　半導体レーザ発振スペクトル

第８章で確認したように，ＬＤがマルチモード化したりホッピングを起こすと，集光スポットのマルチ化やホッピングが生じ，正常な読取り動作ができなくなる．また，単一縦モードＬＤを用いても，ＩＯＤＰＵに集積化した状態では戻り光があり，結合状態によっては発振状態の変化が観察された．ここでは戻り光の影響について考察する．

ＬＤへの主な戻り光には，図9.１に示すように，ガラス導波路端面の反射によるもの，Ｓｉ劈開面の反射によるもの，光ディスク面で反射され導波路内を戻るもの，の３種類がある．導波路間空隙長が25μmの場合を考える．ガラス端面反射，Ｓｉ劈開面反射による戻り光量はそれぞれ，ＬＤ発振パワに対して，0.06%，0.45%と計算された．これらはいずれも固定端による反射で光量は一定である．また，ディスク面反射による戻り光量はピットの有無やフォーカス誤差により変化するが，最大で0.02%と計算された．

このように，戻り光の中ではＳｉ劈開面反射によるものが最大であり，実験でもこれが発振状態を変化させたが，この影響は$\Delta \geqq 0$となるようにＬＤを結

合すれば避けることができる．ガラス端面反射による影響は実験では見られなかったが，条件によっては不安が残る．しかし，これも～1μm＞Δ＞0とすること（ＬＤ取り付け精度が向上すれば）で，端面結合効率を劣化させずに戻り光の心配を除くことができる．一方，Δ≃0ではディスク面反射による戻り光量はΔにほとんど依存せず，しかも，光量はＩＯＤＰＵ動作状態では常に変動している．これに関する実験は行っていないが，最も影響の心配される戻り光であり，単一縦モード安定化ＬＤを必要とするかどうかはこれからの課題である．

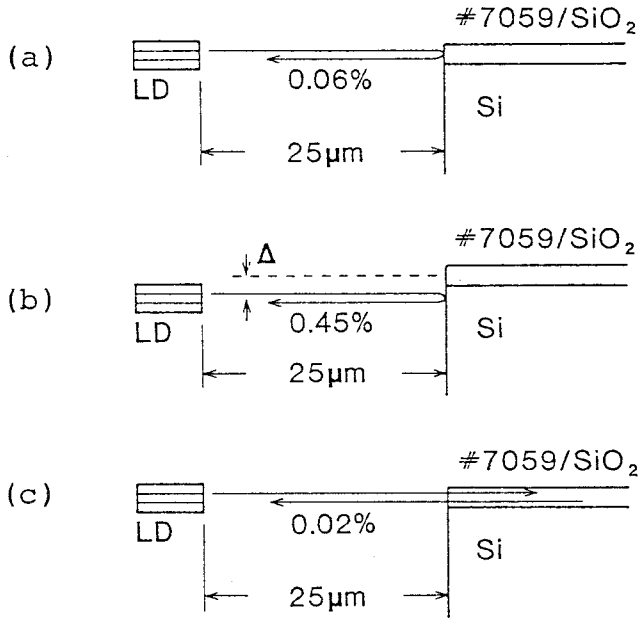


図9.1　ＬＤへの戻り光

(a) ガラス導波路端面の反射によるもの

(b) Ｓｉ基板劈開端面の反射によるもの

(c) 光ディスク面で反射されて戻るもの

9.6 グレーティングの転写

ＦＧＣ／ＴＧＦＢＳは電子ビーム直接描画法で作製するが，現在の装置では

１個の試料の描画に約30分ほどかかる．また，描画時間以外にも個々の試料に対して位置合わせ，焦点合わせ，サイズの調整などを必要とする．短時間でばらつきの無いグレーティングパターンを得るために，簡便な転写複製法の確立が望まれる．通常のフォトマスク転写法はＦＧＣの周期が～0.5 μmであるから適用できない．また，短波長の光を用いれば転写は可能であるが，現状では簡便とは言い難い．しかし，転写パターンがグレーティングであることを考慮すると，ホログラフィック密着転写法[58),59)] の適用が期待できる．これは，グレーティングの回折光と透過光の干渉縞を利用して転写する方法で，通常のフォトマスク転写装置を変形することで可能となる．

9.7 結　言

デバイスの高性能化に関する問題として，集光スポットサイズおよび光電流レベルを取り上げた．第３章の収差解析で求めた許容作製誤差を考慮すると，現在の集積化技術ではサブマイクロメートルの集光スポット径（ＮＡ＝0.45, ｆ＝３mm）を得るのはかなり難しい．しかし，ＮＡを少し小さくすれば（ＮＡ＝0.24, ｆ＝２mm），回折限界スポット径はやや増大するが，作製条件は桁違いに緩和されるので，現段階でも収差のないスポットを得ることが期待できる．また，光電流レベルはＬＤパワー３mWでＰＤ１個あたり50nAほどであったが，計算で見積もると１桁程度の改善の余地がある．

デバイスの作製プロセスに関する問題として，ＬＤ結合とグレーティング転写を取り上げた．ホログラフィック密着転写法よればグレーティングが容易に転写複製できるので，ＩＯＤＰＵの作製に有力と考えている．ＬＤ結合には高精度の位置合わせが必要で，その手法の確立が望まれる．

ＬＤの発振スペクトルの問題は，波長分散を有するグレーティングをキーコンポーネントにしているＩＯＤＰＵにとって最も重要であり，安定な単一モードをいかにして維持するかが今後の課題である．

第１０章　結　論

光集積回路技術の応用として高密度光情報読取りデバイスの光集積回路化を取り上げ，その可能性を理論的・実験的に検討し，数多くの成果を挙げることができた．光集積回路にはこれまで殆ど実用化例がないのが現状であるが，これらの成果は，新しい応用分野を開拓し，同技術の普及啓発に寄与すると思われる．以下，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改めて要約して述べ，本論文の結論とする．

第２章では集光グレーティングカップラ（ＦＧＣ）の基本特性を解析し，高性能素子の設計について述べた．

(1) まず，電子ビーム直接描画作製に必要なグレーティング形状式を求めた．その式を用いてＦＧＣの結像関係を求めた．ＦＧＣは異なる媒質間を結び，光軸が折れ曲がっているため，特異な関係式が得られた．

(2) 放射損失係数と集光特性，および発散導波光プロファイルと集光特性の関係を解析し，良好な集光特性を得るための条件を明らかにした．また，入出力結合効率を求めた．高い回折効率を得るための条件は良好な集光特性を得るための条件と相反しており，最適化が必要であるとわかった．

(3) 集光特性，回折効率と作製パラメータの関係を解析し，高性能素子を設計した．作製パラメータの最適化により回折限界の３％増の集光スポットと60％の回折効率を同時に満たすＦＧＣが実現できることを明らかにした．

第３章ではＦＧＣの収差特性を明らかにし，回折限界集光スポット径を得るための許容作製誤差量を見積もった．

(1) まず，収差解析の出発点となる収差関数を導出した．収差関数を展開して通常のザイデル収差と比較した結果，ＦＧＣの非軸対称性のため各収差係数が複数個存在するかなり複雑なものであることが明らかとなった．

(2) 光線収差の計算結果からＦＧＣでは非点収差とコマ収差が支配的であることがわかった．また，波面収差を計算し，作製パラメータの許容誤差量を見

積もった．その許容量はＦＧＣのＮＡ等に敏感であることも明らかとなった．

第４章では光集積回路形読取りデバイス（ＩＯＤＰＵ）の具体的構成を提案した．Ｓｉ基板導波路上にＦＧＣ，導波形ビームスプリッタ，フォトダイオード（ＰＤ）アレイをモノリシックに集積し，半導体レーザ（ＬＤ）を端面結合する構成とし，フォーカス誤差検出，トラッキング誤差検出にはそれぞれフーコー法，プッシュプル法を適用することにした．

第５章では導波形ビームスプリッタの構成を検討し，その基本特性を明らかにした．導波形ビームスプリッタは，要求される複合機能（偏向，分波，波面分割，集光）を１素子で実現可能なグレーティング（透過形ブラッググレーティング）で構成（ＴＧＦＢＳ）することとし，回折効率，ブラッグ回折条件，作製難易度などを考慮して回折効率50％のＴＧＦＢＳの最適設計を行った．

第６章ではＬＤとＰＤの集積化について述べた．

(1) グレーティングの波長分散のため，ＩＯＤＰＵにはホッングを起こさない単一モードＬＤが要求されることを示した．また，端面結合効率を計算し，導波路間空隙長はＬＤの高さ方向の取り付け精度に依存することを定量的に示し，現在の作製精度を考慮した空隙長～20μmを選択した．

(2) 導波光を効率よく検出するためのＰＤを設計した．導波領域と検出領域の境界での光の散乱を避けるためバッファ層にテーパ構造を設けることにし，ＰＤのサイズの最適化を行った．

第７章ではデバイスの作製プロセスについて述べた．熱酸化によるSiO_2バッファ層の成長，フォトリソグラフィを用いたＰＤ作製，スパッタ法によるCorning#7059ガラス導波層の堆積の順でＳｉ基板スラブ導波路を作製した．次ぎに，プラズマＣＶＤ法により作製したＳｉ－Ｎ層に当研究室で開発された電子ビーム直接描画装置でＦＧＣ／ＴＧＦＢＳのパターンを描画作製した．最後に，Ｓｉ劈開により端面を露出してＬＤを結合し，電極配線を行った．

第８章では作製したＩＯＤＰＵの特性測定・動作確認実験の結果を述べた．

(1) 集光スポット径を測定し，回折限界 1.4μmに対し，２μmを得た．また，

ＦＧＣの結像関係を調べ解析結果と一致することを確認した．ＦＧＣの入力結合効率を測定し，理論解析と比較検討した．

(2) 模擬光ディスクを用いて，反射光をＰＤで検出することに成功した．検出光電流はＬＤパワー３mWに対してＰＤ１個あたり50nAであった．フォーカス誤差，トラッキング誤差信号検出機能を確認した．また，模擬ピットを用い，ピットの有無をＰＤ光電流の変化で検出できることを確認した．

第９章では解析結果・実験結果から，読取りデバイスの光集積回路化におけるいくつかの課題について考察した．

(1) 許容作製誤差を検討した結果，ＮＡが0.45のデバイスで回折限界集光スポット径を得るのは現状ではかなり難しいと思われる．また，ＮＡを少し小さくすると，回折限界スポット径はやや増大するが作製条件は桁違いに緩和されるので，作製精度と応用の両面から仕様を最適化する必要がある．

(2) ホログラフィック密着転写法によれば，通常のフォトマスク転写装置の変形でグレーティングの転写が可能であるので，その適用が期待できる．

(3) ＩＯＤＰＵにおいては，安定な単一モード発振の維持が今後の重要な課題である．また，ＬＤの結合方法の確立は今後の課題である．

第２章と第３章で述べたＦＧＣの解析の手法および結果は，このデバイス設計の中心となるだけでなく，他の光集積回路へＦＧＣを用いる際にも設計指針を与える重要なものであると考えている．

第４章以下で提案，設計，作製，動作確認した光集積回路形読取りデバイスは，集光光学系，検出光学系および光源を集積化しており，誤差信号も検出可能な完成度の高い光集積回路である．それだけに高性能化や作製プロセスに解決すべき課題は少なくない．しかし，読取りデバイスは応用範囲の広い需要の大きなデバイスであるので，集積化技術を考慮した応用および同技術の水準向上が期待される．

謝　　辞

本研究を行うに際し，終始懇切な御指導，御鞭撻を賜った大阪大学工学部西原浩教授，小山次郎教授（現在，芝浦工業大学），終始一貫して直接御指導頂いた栖原敏明博士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った大阪大学工学部浜口智尋教授，一岡芳樹教授に深謝の意を表します．

さらに，著者が大阪大学大学院博士課程に在学中，御指導と御教授を賜った大阪大学工学部寺田浩詔教授，児玉慎三教授，裏克己教授，塙輝雄教授，および大阪大学産業科学研究所中村勝吾教授，角所収教授に深謝の意を表します．

本研究に関して集積化フォトダイオードの作製で御援助を頂いた三菱電機㈱電子商品開発研究所所長糸賀正巳，主幹河野慶三の両氏および三菱電機㈱ＬＳＩ研究所主幹坪内夏朗，日根史郎の両博士に感謝の意を表します．

また，本研究を行うにあたって終始有益なる御助言，種々の御援助を頂いた西原研究室春名正光講師に心から感謝します．各過程において直接実験に協力を得た堀田昌克，浜名優の両君に感謝します．

参 考 文 献

1) S. E. Miller: "Integrated optics; An introduction," Bell Syst. Tech. J., vol.48, p.2059 (1969).

2) T. Tamir: "Integrated Optics," Springer Verlag (1975).

3) R. G. Hunsperger: "Integrated Optics: Theory and Technology," Springer Verlag (1982).

4) 西原, 春名, 栖原："光集積回路," オーム社 (1985).

5) A. Yariv and M. Nakamura: "Periodic structures for integrated optics," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-13, p.233 (1977).

6) T. Suhara and H. Nishihara: "Integrated optics components and devices using periodic structures," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-22, p.845 (1986).

7) 早川, 和佐："薄膜化技術," 共立出版 (1982).

8) 菅野卓雄 編著："半導体プラズマプロセス技術," 産業図書 (1980).

9) J. J. Turner, B. Chen, L. Yang, J. M. Ballantyne and C. L. Tang: "Gratings for integrtated optics fabricated by electron microscope," Appl. Phys. Lett., vol.23, p.333 (1973).

10) J. C. Tracy, L. F. Thompson, R. D. Heidenreich and J. L. Merz: "Gratings for integrated optics by electron lithography," Appl. Opt., vol.13, p.1695 (1974).

11) H. Nishihara, Y. Handa, T. Suhara and J. Koyama: "Electron-beam directly written micro gratings for integrated optical circuits," Proc. SPIE, vol.239, p.134 (1980).

12) K. E. Wilson, C. T. Mueller and E. M. Garmire: "Laser writing of masks for integrated optical circuits," IEEE Trans. Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, vol.CHMT-5, p.202 (1982).

13) I. Ben-David, S. Berlowitz, M. Itzkowitz, S. Ruschin and N. Croitoru: "Laser beam photolithographic system for integrated optics applications," 3rd European Conference on Integerated Optics '85, B1, Berlin (1985).

14) 吉田，春名，西原："光集積回路用レーザビーム直接描画装置，" 信学技報，ＯＱＥ85－159 (1986).

15) 応用物理学会光学懇話会　編："オプトエレクトロニクス　材料と加工技術，" 朝倉書店 (1986).

16) P. Granestrand, L. Thylen, B. Stoltz, K. Bergvall, W. Doldissen, H. Heidrich and D. Hoffmann: "Strictly nonblocking 8×8 integrated-optic switch matrix in Ti:$LiNbO_3$," Topical Meeting on Integrated and Guided-Wave Optics '86, WAA3, Georgia (1986).

17) 池田正宏："モノリシックＬＤ光マトリックス・スイッチの作製，" 昭61秋応物講演会，28p-X-5 (1986).

18) T. Ito, M. Takami, M. Ito, T. Atsumi, H. Fujima, H. Okuda and M. Kanazawa: "Wavelength division multiplexing system using a monolithically integrated laser array and an integrated multi/demultiplexer," Conference on Optical Fiber Communication '86, MH-5, Georgia (1986).

19) T. Suhara, S. Fujiwara and H. Nishihara: "Proton-exchanged Fresnel lenses in Ti:$LiNbO_3$ waveguides," 6th Topical Meeting on Gradient-Index Optical Imaging Systems '85, A3, Palermo (1985).

20) H. Toda, M. Haruna and H. Nishihara: "Integrated-optic fiber laser Doppler velocimeter: Proposal and first demonstration," 4th International Conference on Optical Fiber Sensors '86, 4.7, Tokyo (1986).

21) T. Yamashita and J. Takagi: "Integrated optic microdisplacement

sensor using two asymmetric X junctions and a rod lens," 4th International Conference on Optical Fiber Sensors '86, 2.2, Tokyo (1986).

22) 堀田，裏，栖原，西原："グレーティング素子構成による干渉型光集積位置センサ," 信学技報，ＯＱＥ86－130 (1986).

23) 伏木薫："大市場を期待し，応用展開を模索する光ディスク," 日経エレクトロニクス，no.386，p.137 (1986).

24) 伏木薫："１～２年後の実用化を目指して装置と用途開発が活発になる光カード・システム," 日経エレクトロニクス，no.401，p.107 (1986).

25) M. L. Dakss, L. Kuhn, P. F. Heidrich and B. A. Scott: "Grating coupler for efficient excitation of optical guided waves in thin fiilms," Appl. Phys. Lett., vol.16, p.523 (1970).

26) H. Kogelnik and T. P. Sosnowski: "Holographic thin film couplers," Bell Syst. Tech. J., vol.49, p.1602 (1970).

27) T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "Waveguide holograms: A new approach to hologram integration," Opt. Commun., vol.19, p.353 (1976).

28) M. Miler and M. Skalsky: "Stigmatically focusing grating coupler," Electron. Lett., vol.15, p.275 (1979).

29) D. Heitmann and C. Ortiz: "Calculation and experimental verification of two-dimensional focusing couplers," IEEE J. Quantum Electron., vol.QE-17, p.1257 (1981).

30) 松岡，栖原，西原，小山："電子ビーム描画作製による集光グレーティングカップラ," 信学技報，ＯＱＥ83－84 (1983).

31) T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "High-performance focusing grating coupler fabricated by electron-beam writing," Topical Meeting on Integrated and Guided-Wave Optics '84, ThD4,

Florida (1984).

32) G. Hatakoshi, H. Fujima and K. Goto: "Waveguide grating lenses for optical couplers," Appl. Opt., vol.23, p.1749 (1984).

33) 裏, 栖原, 西原, 小山："光ディスクピックアップ用集光グレーティングカップラの特性," 信学技報, ＯＱＥ84－109 (1985).

34) 裏, 栖原, 西原, 小山："光集積ディスクピックアップ用集光グレーティング," 信学論 (C), vol.J68-C, p.803 (1985).

35) 西原, 春名, 栖原："光集積回路," オーム社, 4章 (1985).

36) 栖原敏明："光導波路を用いたホログラム集積化に関する研究," 博士論文, 大阪大学工学部, 3章 (1978).

37) J. H. Harris, R. K. Winn and D. G. Dalgoutte: "Theory and design of periodic couplers," Appl. Opt., vol.11, p.2234 (1972).

38) T. Tamir and S. T. Peng: "Analysis and design of grating couplers," Appl. Phys., vol.14, p.235 (1977).

39) T. Aoyagi, Y. Aoyagi and S. Namba: "High-efficiency blazed grating couplers," Appl. Phys. Lett., vol.29, p.303 (1976).

40) 裏, 栖原, 西原："光集積ピックアップ用集光グレーティングの収差特性," 信学技報, ＯＱＥ86－84 (1986).

41) M. Born and E. Wolf: "Principles of Optics," Pergamon Press, chs.5,9 (1970).

42) G. Bouwhuis, J. Braat, A. Huijser, J. Pasman, G. V. Rosmalen and K. S. Immink: "Principles of Optical Disc Systems," Adam Hilger, ch.2 (1985).

43) G. Bouwhuis and J. J. M. Braat: "Video disk player optics," Appl. Opt., vol.17, p.1993 (1978).

44) 後藤顕也　編著："最新光学ヘッドの設計と組立て・評価技術," トリケップス, 1章 (1986).

45) 裏，栖原，西原，小山："光ディスクピックアップの光集積回路化，" 光メモリシンポジウム'85，16 (1985).

46) 裏，栖原，西原，小山："光ディスクピックアップの光集積回路化，" 信学論（C），vol.J69-C，p.609 (1986).

47) S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "An integrated-optic disk pickup device," IEEE J. Lightwave Technol., vol.LT-4, p.913 (1986).

48) 裏，栖原，西原，小山："光ディスクピックアップの光集積回路化，" 信学技報，ＯＱＥ85－72 (1985).

49) W. R. Klein, C. B. Tipnis and E. A. Hiedemann: "Experimental study of Fraunhofer light diffraction by ultrasonic beams of moderately high frequency at oblique incidence," J. Acoust. Soc. Am., vol.38, p.229 (1965).

50) H. A. Hauss and R. V. Schmidt: "Approximate analysis of optical waveguide grating coupling coefficients," Appl. Opt., vol.15, p.774 (1976).

51) S. Ura, T. Suhara and H. Nishihara: "Laser diode spectrum in integrated-optic disc pickup device," Optoelectronics Conference '86, A8-4, Tokyo (1986).

52) D. G. Hall, R. R. Rice and J. D. Zino: "Simple gaussian-beam model for GaAlAs double-heterostructure laser-diode-to-diffused waveguide coupling calculations," Opt. Lett., vol.4, p.292 (1979).

53) J. D. Spear-Zino, R. R. Rice, J. K. Powers, D. A. Bryan, D. G. Hall, E. A. Dalke and W. R. Reed: "Multiwavelength monolithic integrated fiber optics terminal: An update," Proc. SPIE, vol.239, p.293 (1980).

54) P. K. Tien and R. Ulrich: "Theory of prism-film coupler and thin-film light guides," J. Opt. Soc. Am., vol.60, p.1325 (1970).

55) M. V. Schneider: "Schottky barrier photodiodes with antireflection coating," Bell Syst. Tech. J., p.1611 (1966).

56) 西原，春名，栖原："光集積回路，" オーム社，p.220 (1985).

57) 裏，栖原，西原，小山："光情報読み出し用集光グレーティングカップラの基礎実験，" 昭59信学全大，315 (1984).

58) 栖原，西原，小山："密着法によるホログラム複製の最適条件，" 信学論（C），vol.59-C，p.443 (1976).

59) 栖原，田中，裏，西原："光ＩＣ用ＥＢ描画サブミクロングレーティングのホログラフィック転写，" 昭61春応物講演会，4p-L-13 (1986).

関 連 発 表 論 文

(1) Papers

1) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光集積ディスクピックアップ用集光グレーティング，” 信学会論文誌（C），vol.J68-C, pp.803-811 (1985,10).

2) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光ディスクピックアップの光集積回路化，” 信学会論文誌（C），vol.J69-C, pp.609-615 (1986,5).

3) S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "An integrated-optic disk pickup device," IEEE J. Lightwave Technol., vol.LT-4, pp.913-918 (1986,7).

(2) 研究会

1) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光ディスクピックアップ用集光グレーティングカップラの特性，” 輻射科学研究会, RS-84-13 (1984,12).

2) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光ディスクピックアップ用集光グレーティングカップラの特性，” 信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料, OQE-84-109 (1985,1).

3) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光ディスクピックアップの光集積回路化，” 信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料, OQE-85-72 (1985,9).

4) 堀田昌克　裏升吾　栖原敏明　西原浩：“グレーティング素子構成による干渉型光集積位置センサ，” 輻射科学研究会, RS-86-6 (1986,7).

5) 裏升吾　栖原敏明　西原浩：“光集積ピックアップ用集光グレーティングの収差特性，” 信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料，OQE-86-84 (1986,9).

6) 堀田昌克　裏升吾　栖原敏明　西原浩：“グレーティング素子構成による干渉型光集積位置センサ，” 信学会光・量子エレクトロニクス研究会資料，OQE-86-130 (1986,11).

(3) 国際会議・シンポジウム等

1) T. Suhara, S. Ura, H. Nishihara and J. Koyama: “An integrated-optic disc pickup device,” 5th International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication-11th European Conference on Optical Communication '85, p.117, Venezia, October 1-4, 1985.

2) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光ディスクピックアップの光集積回路化，” 光メモリシンポジウム'85, 16 (1985,12).

3) S. Ura, T. Suhara and H. Nishihara: “Laser diode spectrum in integrated-optic disc pickup device,” First Optoelectronics Conference '86, A8-4 (1986,7).

4) S. Ura, T. Suhara and H. Nishihara: “Integrated-optic sensors using grating components,” 4th International Conference on Optical Fiber Sensors '86, 7-6, Tokyo, October 7-9, 1986.

(4) 学術講演全国大会

1) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光ディスク情報読み出し用集光グレーティングカップラの基礎実験，” 昭和59年信学会光・電波部門全国大会，315 (1984,10).

2) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光集積ディスクピックアップ用ＬＤ直接結合集光グレーティング，” 昭和60年信学会総合全国大会，1050 (1985,3).

3) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光ディスクピックアップの光集積回路化，” 昭和60年秋季応物講演会，2p-L-15 (1985,10).

4) 裏升吾　栖原敏明　西原浩　小山次郎：“光集積ディスクピックアップの半導体レーザ結合，” 昭和61年春季応物講演会，4p-L-14 (1986,4).

5) 堀田昌克　裏升吾　栖原敏明　西原浩：“グレーティング素子構成による干渉型光集積位置センサー，” 昭和61年春季応物講演会，4p-L-15 (1986,4).

6) 栖原敏明　田中英明　裏升吾　西原浩：“光ＩＣ用ＥＢ描画サブミクロングレーティングのホログラフィック転写，” 昭和61年春季応物講演会，4p-L-13 (1986,4).