

| 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



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 | • | | À | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | 1 |
|---|---|----|------|---|------------|------------|----|---|---|---|------------|---|---|----|---|---|---|---|---|---|----|-----|---|---|---|---|---|---|----|
| | 1 | .1 | 光 | 集 | 積回 | 路 | Ŀ | 集 | 積 | 化 | 技 | 術 | | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | 1 |
| | 1 | .2 | 光 | 情 | 報訪 | 取 | り | デ | バ | イ | ス | Ø | 光 | 集 | 積 | 回 | 路 | 化 | | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | 3 |
| | 1 | .3 | 集 | 光 | グレ | / | テ | イ | ン | グ | カ | ッ | プ | ラ | (| 導 | 波 | 形 | 集 | 光 | V | ン | ズ |) | | • | • | • | 5 |
| | 1 | .4 | 本 | 論 | 文の |)構 | 成 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | 6 |
| 第 | 2 | 章 | 集 | 光 | グレ | - | テ | イ | ン | グ | カ | ッ | プ | ラ | の | 基 | 礎 | 理 | 論 | | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | 8 |
| | 2 | .1 | 緒 | | - Intra | ŕ | • | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • . | • | ٠ | • | • | • | • | 8 |
| | 2 | .2 | 導 | 波 | モー | - ド | | 放 | 射 | モ | | Ł | 結 | 合 | | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | 8 |
| | | 2 | .2.1 | | 伝搬 | とく | ク | ŀ | N | ダ | イ | ア | グ | ラ | ム | | • | • | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | 8 |
| | | 2 | .2.2 | 2 | 放射 | 損 | 失 | 係 | 数 | | • | • | • | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | • | • | 10 |
| | 2 | .3 | 形 | 状 | 方程 | 試 | 1 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | 11 |
| | 2 | .4 | 集 | 光 | 特性 | Ē | • | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | 13 |
| | | 2 | .4.1 | | 回折 | 限 | 界 | 集 | 光 | ス | ポ | ッ | Ի | 径 | と | 実 | 劾 | 閞 | П | 長 | | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | 13 |
| | | 2 | .4.2 | 2 | 導波 | 光 | 分 | 布 | Ŀ | 集 | 光 | ス | ポ | ッ | ŀ | 径 | | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | 14 |
| | 2 | .5 | 結 | 像 | 関係 | Ę, | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | 15 |
| | 2 | .6 | 結 | 合 | 効率 | 2 | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 18 |
| | | 2 | .6.1 | | 出力 | J 結 | 合 | 効 | 率 | | • | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 18 |
| | | 2 | .6.2 | 2 | 入力 | フ結 | 合 | 効 | 率 | | , • | • | ٠ | .• | • | • | • | ٠ | • | ٠ | •, | • | • | • | • | ٠ | • | • | 18 |
| | 2 | .7 | 髙 | 性 | 能素 | 子 | ·の | 設 | 計 | | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 21 |
| | 2 | .8 | 結 | i | H L | ŕ | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | 24 |

| 第3章 | 集光 | グレー | テ | イ | ン | グ | カ | ッ | プ | ラ | Ø | 収 | 差 | 特 | 性 | | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | 25 |
|-----|------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|---|----|
| 3.1 | 緒 | 言 | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | 25 |
| 3.2 | 収差 | 関数 | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | 26 |
| 3 | .2.1 | 回折波 | Ø | 位 | 相 | | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | 26 |
| 3 | .2.2 | 収差関 | 数 | | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 27 |
| 3.3 | 1 光紡 | 収差 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | 29 |
| 3.4 | 収差 | 関数の | 展 | 開 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | 31 |
| 3 | .4.1 | 収差表 | 現 | 式 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | 31 |
| 3 | .4.2 | 収差係 | 数 | | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | 34 |
| 3.5 | 収差 | の種類 | l | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | 38 |
| 3 | .5.1 | 非点収 | 差 | | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | 38 |
| 3 | .5.2 | コマ収 | 差 | | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | 39 |
| 3 | .5.3 | 球面収 | 差 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | 41 |
| 3.6 | ; 波面 | ī収差 | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | • | ٠ | 41 |
| 3.7 | 1 許容 | 下製誤 | 差 | | • | ٠ | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | • | 42 |
| 3.8 | 1 結 | 言 | ٠ | • | • | ٠ | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | 45 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 第4章 | 光集 | 積回路 | 形 | 読 | 取 | り | デ | バ | イ | ス | Ø | 提 | 案 | | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | 46 |
| 4.1 | 緒 | 营 | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | 46 |
| 4.2 | 導波 | と路内で | Ø | 信 | 号 | 検 | 出 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | 46 |
| 4.3 | トフォ | ーカス | 誤 | 差 | 検 | 出 | 法 | | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | 47 |
| 4.4 | トラ | ッキン | グ | 誤 | 差 | 検 | 出 | 法 | | • | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | 48 |
| 4.5 | ディ | バイスの | 具 | 体 | 的 | 構 | 成 | Ŀ | 動 | 作 | 原 | 理 | | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | 49 |
| 4.6 | 結 | 言 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • . | • | • | 52 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 第5章 | 導波 | を形ビー | Д | ス | プ | y | ッ | タ | | • | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | 54 |
| 5.1 | 緒 | | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | 54 |

| | 5 | .2 | 透過 | 形ブ | ラ | ック | グ | V | - | テ | 1 | ン | グ | | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | 54 |
|---|---|----|-----|-----|--------------|-------|------------|---|---|---|---|---|---|---|-----|---|---|---|---|----|---|----|---|---|---|---|----|
| | 5 | .3 | 基本 | 特性 | | • • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | 55 |
| | | 5. | 3.1 | ブラ | ッ: | グ回 | 肵 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 55 |
| | | 5. | 3.2 | 回折 | 劾 | 窲 | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | •, | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | 56 |
| | | 5. | 3.3 | 角度 | 選 | 沢性 | お | よ | び | 波 | 長 | 選 | 択 | 性 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 57 |
| | 5 | .4 | 作製 | パラ | ×- | - 9 | っ の | 最 | 適 | 化 | | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | 58 |
| | 5 | .5 | 形状 | 方程 | 式 | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | 59 |
| | 5 | .6 | 結 | 言 | | ••• | • | ٠ | • | • | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | 60 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 第 | 6 | 章 | 光淜 | と光 | 検 | 出器 | ł | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 61 |
| | 6 | .1 | 緒 | 吉 | | • • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | 61 |
| | 6 | .2 | 半導 | 体レ | -4 | ザ光 | 源 | İ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | 61 |
| | | 6. | 2.1 | 単一 | モ・ | - 1 | 発 | 振 | | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | 61 |
| | | 6. | 2.2 | 端面 | 結 | 合刻 | 拘 率 | | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | 63 |
| | 6 | .3 | 光検 | 出器 | () | フォ | · ŀ | ダ | 1 | オ | | ド |) | | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | 65 |
| | | 6. | 3.1 | テー | パ | 溝凒 | i | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | 65 |
| | | 6. | 3.2 | 設 | M idt | 计 | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | •. | • | ٠ | • | • | 65 |
| | 6 | .4 | 結 | 言 | | ••• | ٠ | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • | . • | • | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | 67 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 第 | 7 | 章 | 光集 | 積回 | 路 | 形話 | 取 | り | デ | バ | イ | ス | Ø | 作 | 製 | | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | 68 |
| | 7 | .1 | 緒 | 言 | | • . • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | 68 |
| | 7 | .2 | 作製 | パラ | メ・ | ータ | , | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | .• | • | • | • | • | • | • | 68 |
| | 7 | .3 | 導波 | 路お | よび | びラ | ' <i>*</i> | ŀ | ダ | 1 | * | - | ۴ | Ø | 作 | 製 | | ٠ | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | 71 |
| | | 7. | 3.1 | フォ | ト : | ダイ | オ | | Ł | 付 | 基 | 板 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | 71 |
| | | 7. | 3.2 | ガラ | スネ | 尊波 | 國 | Ø | 作 | 製 | | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 72 |
| | 7 | .4 | グレ | /ーテ | イ | ンク | /素 | 子 | Ø | 作 | 製 | | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | 72 |
| | | 7. | 4.1 | S i |] | Nク | " レ | _ | テ | イ | ン | グ | 層 | Ø | 成 | 膜 | | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | 72 |

| | | 7 | .4.2 | 僧 | 子 | ピ | ` | ム | V | ジ | ス | Ի | Ø | 塗 | 布 | | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | 73 |
|---|-----|----|------|-----|--|------------|---|---|--------------------|---|---|---|----|---|-----|---|---|---|---------|----|---|---|---|---|---|---|---|---|-----|
| | | 7 | .4.3 | ク | ドレ | | テ | イ | ン | グ | パ | Ø | | ン | Ø | 電 | 子 | ビ | | ム | 直 | 接 | 描 | 画 | | • | ٠ | • | 74 |
| | | 7. | .4.4 | . 5 | S i | _ | N | 層 | ~ | Ø | 転 | 写 | | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | 76 |
| | 7 | .5 | バ | ッフ | 77 | I | ッ | チ | $\boldsymbol{\nu}$ | グ | | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | ٠ | 78 |
| | 7 | .6 | 半 | 導体 | k v | | ザ | Ø | 端 | 面 | 結 | 合 | | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | 80 |
| | 7 | .7 | 電 | 極西 | 已紡 | ŧ | • | • | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | 81 |
| | 7 | •8 | 結 | | 1 1 1 1 | ř | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | • | • | • | 82 |
| 第 | 8 | 章 | デ | バイ | イス | の | 特 | 性 | 測 | 定 | | • | •, | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | 84 |
| | 8 | .1 | 緒 | | ЦШЦ | i | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | ş | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | • | 84 |
| | 8 | .2 | 光 | 学测 | 则定 | - | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | •, | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | 84 |
| | | 8 | .2.1 | 缜 | ě 光 | ス | ポ | ッ | Ի | 径 | | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | 84 |
| | | 8 | .2.2 | 糸 | 皆傷 | 関 | 係 | : | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | 87 |
| | | 8 | .2.3 | 新 | 吉合 | 効 | 率 | | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | 87 |
| | 8 | .3 | 信 | 号枪 | 社 | 模 | 擬 | 実 | 験 | | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | 3 | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | 90 |
| | | 8 | .3.1 | | "オ | Lanna, | カ | ス | 誤 | 差 | 検 | 出 | | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | • | ٠ | 90 |
| | | 8 | .3.2 | I | 、ラ | " " | キ | ン | グ | 誤 | 差 | 検 | 出 | | ٠ | ٩ | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٥ | 91 |
| | | 8 | .3.3 | Þ | 抙生 | 信 | 号 | 検 | 出 | | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | 92 |
| | 8 | .4 | 半 | 導位 | kι | / | ザ | Ø | 結 | 合 | 特 | 性 | | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | 93 |
| | | 8 | .4.1 | 糸 | 吉合 | 効 | 率 | | ٠ | • | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | * | • | ٠ | ٠ | 93 |
| | | 8 | .4.2 | Ż | 首都 | え | ~ | ク | ŀ | ル | Ŀ | 集 | 光 | ス | ж | ッ | ዞ | | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | 94 |
| | | 8 | .4.3 | Þ | そり こうちょう そうしょう そうしょう そうしょう そうしょう そうしょう そうしょう そうしょう ほうしょう ほうしょう しゅうしょう しゅうしょう しゅうしょう しゅうしょう しゅうしょう しゅうしゅう しゅうしょう しゅうしょう しゅうしゅう しゅう | 光 | Ø | 影 | 響 | | ٠ | • | ٠ | ٠ | . • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | 96 |
| | 8 | .5 | 結 | | ШП | Ì | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | • | ٠ | 98 |
| 第 | ; 9 | 章 | デ | バイ | イス | 、特 | 性 | Ø | 考 | 察 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | 100 |
| | 9 | .1 | 緒 | | | 1 | ٠ | • | • | • | • | ٠ | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | 100 |
| | 9 | .2 | 集 | 光フ | くポ | ミッ | Ի | サ | イ | ズ | | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | 100 |

| 9.3 | 光電波 | 充レベ | い | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | 101 |
|------|-----|-------|-----|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|-----|
| 9.4 | 半導体 | 本レー | ・ザ糸 | 垥 | | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | 103 |
| 9.5 | 半導体 | 本レー | ザ系 | 話版 | ス | へ | ク | ŀ | N | | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | • | • | 103 |
| 9.6 | グレー | ーティ | ンク | での | 転 | 写 | | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | ٠ | • | 104 |
| 9.7 | 結 | 큡 | •• | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | ٠ | • | • | • | • | • | • | 105 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 第10章 | 結 | 論 | •• | • | ٠ | • | • | ٠ | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | • | ٠ | ٠ | • | • | ٠ | 106 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 謝 | 辞 | • • • | ••• | • | • | • | • | • | ÷ | • | • | • | • | • | ٠ | ٠ | ٠ | • | ٠ | ٠ | • | • | • | 109 |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 参考文 | に献 | • • • | • • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | ٠ | • | ٠ | • | • | ٠ | ٠ | •. | 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.



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 導波モードー放射モード結合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 β_0 = Nk = 2 π N/ λ 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

$$\beta_{\mathbf{q}} = \beta_{\mathbf{0}} + q \mathbf{K} \qquad (\mathbf{K} = 2 \pi / \Lambda, \ \mathbf{q} : \mathbf{\underline{8}} \mathbf{\underline{3}}) \tag{2.1}$$

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 $|\beta_q| < n_c k = t t |\beta_q| < n_s k を満$ たす次数qがある場合、この高調波は

$$n_{c} k \sin \theta_{qc} = \beta_{q} = N k + q K$$

$$n_{s} k \sin \theta_{qs} = \beta_{q} = N k + q K$$
(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

$$2 \beta_0 = q K \tag{2.3}$$

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。(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

 $E_{o}(y) = E_{o} exp(-\alpha y)$ (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

 $1 \ 1$

(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、

$$\Phi_{1N} = k N \sqrt{x^2 + (y + r)^2}$$
(2.5)

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

となる. グレーティングのm番目のラインの形状は

$$\Phi_{FG} = \Phi_{DF} - \Phi_{1N} = 2 \,\mathrm{m}\,\pi + \mathrm{const.} \qquad (m: 2.7)$$

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、

$$N\sqrt{x^{2} + (y + r)^{2}} + \sqrt{x^{2} + (y - f\sin\theta)^{2} + (f\cos\theta)^{2}}$$

= -m \lambda + N r + f (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, x y 平面上の点(x, y)における導波 光の位相は

$$\Phi_{IN} = k N y \tag{2.9}$$

であるから、(a)と同様にして求めると形状式は

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

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/22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

$$2 \sigma_{\mathbf{x}} = 0.88 \text{ f } \lambda / \text{Lx}$$
(2.11)

 $2 \sigma_y = 0.88 f \lambda / Ly$

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; X Y 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,

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

$$\cdot \exp \left\{-i\frac{2\pi}{\lambda f} (X x + Y y)\right\} dx dy \qquad (2.12)$$

となる³⁶⁾ . 焦点の光強度分布は | G | ² で,

 $\mathbf{w} \gg \mathbf{L}\mathbf{x}, \ 1 \neq \alpha \gg \mathbf{L}\mathbf{y}$ (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/ α) 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/ α) \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/ α) \simeq Lyとすればよい。特にw = Lx、(1/ α) = 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

$$\Phi_{1N} = k N \sqrt{(x + r' \sin \delta')^2 + (y + r' \cos \delta')^2}$$
(2.14)

と表され、xy平面における回折波の位相は

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

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'sine', f'cose' sin θ ', f'cos ϵ 'cos θ ')に焦点をもつ球面波(ガウス参照面)のxy面上の位相

$$\Phi_{6} = -k\sqrt{(x-f'\sin\varepsilon')^{2} + (y-f'\cos\varepsilon'\sin\theta')^{2} + (f'\cos\varepsilon'\cos\theta')^{2}}$$
(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

$$\sin \varepsilon' = N \sin \delta'$$
 (2.17)

$$\cos\varepsilon'\sin\theta' = N\left(\cos\delta' - 1\right) + \sin\theta \qquad (2.18)$$

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

 $\frac{N\cos^2 \delta'}{r'} + \frac{1 - N^2 \sin^2 \delta'}{f'} = \frac{N}{r} + \frac{1}{f}$ (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δ'=0の とき

$$\frac{N}{r'} + \frac{1}{f'} = \frac{N}{r} + \frac{1}{f} = const.$$
 (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

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

となる.

式(2.19)~(2.22)からLDの位置設定誤差によりr'≠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y 2 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'≠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 η^o(Ly)を入射導波光パワーPo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、

$$\eta^{\circ}(Ly) = \frac{P^{*}(Ly)}{P_{0}} = \eta^{\circ} \{1 - \exp(-2 \alpha Ly)\}$$
(2.23)

が導かれる³⁰ . αは放射損失係数, η° はη°(∞) 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E₁,H₁;E₂,H₂とす れば

 $\int (E_{1} \times H_{2} - E_{2} \times H_{1}) dS = 0$ (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をだけずれた場合を 考え、出力結合の波を E_1 、 H_1 、入力結合の波を E_2 、 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.

 E_1 , H_1 ; E_2 , 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。波と戻り導波光 P。波,および回折球面波 Pr 波 と反射球面波 P₁ 波である.



(a) 入射導波光P。と回折球面波Pr
 (b) 反射球面波Piと戻り導波光P。
 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。波、P。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

$$E_{o}(x, y, z) = c_{o}E_{g}(z)\exp \{ + i k N \sqrt{x^{2} + (y + r)^{2}} \}$$
(2.25)

$$E_{c}(x, y, z) = c_{c} E_{g}^{*}(z) \exp \{-i k N \sqrt{x^{2} + (y + r')^{2}}\}$$
(2.26)

$$\sum_{\mathbf{r}} (\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = c_{\mathbf{r}} E_{\mathbf{a}}(\mathbf{z}) \exp\left(-2 \alpha \mathbf{y}\right)$$

$$\cdot \exp\left\{-i k \sqrt{\mathbf{x}^{2} + (\mathbf{y} - \mathbf{f} \sin \theta)^{2} + (\mathbf{f} \cos \theta)^{2}}\right\}$$
 (2.27)

$$E_{i}(x, y, z) = c_{i}E_{a}^{*}(z)\exp(+2\alpha y)\exp\{+i k\sqrt{x^{2}}\}$$

$$+(\mathbf{y} - [\mathbf{f} + 2\boldsymbol{\xi}] \sin\theta)^2 + ([\mathbf{f} + 2\boldsymbol{\xi}] \cos\theta)^2 \} \qquad (2.28)$$

で表される. 規格化条件

Re $((1/2) \int (E_{g}(z) \times H_{g}^{*}(z)) e_{y} dz) = 1$ (2.29)

$$\operatorname{Re}\left[\left(1/2\right)\left(\operatorname{E}_{a}(0)\times\operatorname{H}_{a}^{*}(0)\right)\operatorname{e}_{2}\right] = 1 \tag{2.30}$$

を用いると、式(2.24)~(2.28)から入力結合効率 nⁱ(Ly、 §) は

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

ただし,

$$S(\mathbf{x}) = \int_{0}^{\mathbf{x}} \sin\left(\frac{\pi}{2}t^{2}\right) dt, \quad C(\mathbf{x}) = \int_{0}^{\mathbf{x}} \cos\left(\frac{\pi}{2}t^{2}\right) dt \quad (2.32)$$
$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{L}\mathbf{x}}{\mathbf{f}} \sqrt{\frac{\mathbf{\xi}}{\lambda}}, \quad \mathbf{v} = \frac{\mathbf{L}\mathbf{y}\cos\theta}{\mathbf{f}} \sqrt{\frac{\mathbf{\xi}}{\lambda}},$$
$$\mathbf{w} = \frac{\mathbf{L}\mathbf{x}}{\mathbf{r}} \sqrt{\frac{\mathbf{N}(\mathbf{r} - \mathbf{r}')}{2\lambda}} \quad (2.33)$$

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、 α 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。波の波面が入射導波光 P。波の波面に一致する結合効率を与える、例として、Lx=Ly cos θ =a, f = 2 mm, λ =0.6328µmとおき、反射鏡変位をと結合効率 $\eta^{i}(\xi)$ 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 ξ =1.2 f² λ /a² で与えられ、反射 面変位がほぼ通常の焦点深度範囲(| ξ | < f² λ /a²) 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:波が導波光に結合す



図2.8 反射鏡が § 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、その効率のを依存性を計算した結果、図2.8に比べてをの増加による効率低下は緩やかなものとなり、半値半幅はを=1.7 f² λ / a² 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F GC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η⁰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

 $2\ 1$

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 n^o 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³⁰ 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.r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。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^o,k^o,k^o,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 ($1/\alpha \simeq Ly \simeq 1 \text{ mm}$) なので、摂動は1次だけ考慮し、グレーティング 層厚 t 。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。は

$$\alpha = 2 \left(1 + \operatorname{Re} \{r_{g}\}\right) \cdot \frac{(n_{f}^{2} - N^{2})(n_{r}^{2} - n_{o}^{2})^{2}}{N(n_{f}^{2} - n_{o}^{2})}$$
$$\cdot \frac{2 \pi / k^{g}}{T} \cdot \frac{t_{g}^{2}}{\lambda^{3}} \sin^{2}(\gamma \pi) \qquad (2.34)$$
$$\eta^{\circ} = \frac{|1 + r_{g}|^{2}}{2(1 + \operatorname{Re} \{r_{g}\})} \qquad (2.35)$$

で表される。Tは実効導波路厚である。r。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

$$\mathbf{r}_{g} = \frac{\mathbf{k}^{b} - \mathbf{k}^{s}}{\mathbf{k}^{b} + \mathbf{k}^{s}} \cdot \exp \{i \ 2 \ (\mathbf{k}^{b} \mathbf{t}_{b} + \mathbf{k}^{f} \mathbf{t}_{f})\}$$
(2.36)

で与えられる. $(n_r^2 - N^2)/(n_r^2 - n_o^2)$ は導波路中の電界分布を反映し, $(n_r^2 - n_o^2)^2 \sin^2(\tau \pi)$ はグレーティングの形状に起因している. アスペ クト比 τ は、以下、 0.5として考える. また α は t_o^2 に比例しているが、これ は t_o 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_o 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° 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° 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 (α Ly=1)を満たすように図2.9(c)から t_{o} を決定する、そのとき図2.9 の例では 7°=0.72であり、式(2.23)から回折効率は62%となる.



図2.9 放射損失係数 α とパワー分配比 η° の膜厚依存性 ($\lambda = 0.79 \mu m$, $n_s = 3.75$, $n_b = 1.46$, $n_f = 1.55$, $n_r = 2.00$, $n_o = 1.00$, $t_f = 0.95 \mu m$, r = 0.5, $Lx = Ly = 1 \mu m$, $\theta = 15^{\circ}$)

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、F GC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Фъгは式(2.7) から

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

で与えられる。 Φ_{1N} 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、

$$\Phi_{IN} = k N \sqrt{x^{2} + (y + r)^{2}}$$

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

$$-k N \sqrt{x^{2} + (y + r)^{2}}$$
(3.2)
(3.3)

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

$$\Phi_{\mathrm{DF}} = -k\sqrt{\mathbf{x}^2 + (\mathbf{y} - \mathbf{f}\sin\theta)^2 + (\mathbf{f}\cos\theta)^2}$$
(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 $\Delta r = (r' - r)/r$ 、δ'がある、このようなずれが生じた 場合、 Φ_{IN} は

$$\Phi_{1N} = k' N' \sqrt{(x + r' \sin \delta')^2 + (y + r' \cos \delta')^2}$$
(3.5)

と書ける、ここでk' = 2 π / λ '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=1 + Δ Lx、My=Ly'/Ly=1 + Δ Lyとすると、 Φ_{FG} は

$$\Phi_{FG} = -k \sqrt{(x / Mx)^{2} + (y / My - f \sin \theta)^{2} + (f \cos \theta)^{2}} -k N \sqrt{(x / Mx)^{2} + (y / My + r)^{2}}$$
(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

$$\Phi_{\rm g} = -k' \sqrt{(x - f'_{x})^2 + (y - f'_{y})^2 + f'_{z}^2}$$
(3.7)

を用い、収差関数41) ΦAを

$$\Phi_{\mathbf{A}} = \Phi_{\mathbf{DF}} - \Phi_{\mathbf{G}} = \Phi_{\mathbf{1N}} + \Phi_{\mathbf{FG}} - \Phi_{\mathbf{G}} \tag{3.8}$$

で定義すると、式(3.1),(3.5) ~(3.8) から

$$\Phi_{A} = k' N' \sqrt{(x + r' \sin \delta')^{2} + (y + r' \cos \delta')^{2}} - k \sqrt{(x / Mx)^{2} + (y / My - f \sin \theta)^{2} + (f \cos \theta)^{2}} - k N \sqrt{(x / Mx)^{2} + (y / My + r)^{2}} + k' \sqrt{(x - f'_{x})^{2} + (y - f'_{y})^{2} + f'_{z}^{2}}$$
(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 + ΔX , f'y + ΔY , f'z)とすると、ガウス参照波および回折波の位相中。および中_{DF}との間に、図3.4から

$$\frac{\partial \Phi_{\rm G}}{\partial x} = -\frac{k'(x-f'_{x})}{\sqrt{(x-f'_{x})^{2} + (y-f'_{y})^{2} + f'_{z}^{2}}}$$
(3.10)
$$\frac{\partial \Phi_{\rm DF}}{\partial x} = -\frac{k'(x-f'_{x} - \Delta X)}{\sqrt{(x-f'_{x})^{2} + (y-f'_{y})^{2} + f'_{z}^{2}}}$$
(3.11)

の関係が成り立つ、したがって、光線収差 ⊿X は収差関数Φ & を用いて



FGC aperture

図3.4 FGC開口からの回折光線と光線収差

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

で与えられる.光線収差 ⊿Yも同様にΦA を用いて

$$\Delta Y = \frac{\sqrt{(x - f'_x)^2 + (y - f'_y)^2 + f'_z^2}}{k'} \cdot \frac{\partial \Phi_A}{\partial y}$$
(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FG C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/e² 全幅で 1.4mと計算され、回折によ





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 ($\Delta \lambda = 10^{-3}$, $\Delta r = 3 \times 10^{-3}$, $\delta' = 10^{-3}$)が誤差の許容限界の目安となる。





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



(b) $\Delta r = -3 \times 10^{-3}$



(c) δ'=10⁻³
 図3.6 光線収差の計算例 (λ=0.78μm, 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

$$\frac{\mathbf{x}}{\mathbf{r}}, \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{r}}, \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{r}'}, \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{r}'}, \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{f}}, \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{f}}, \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{f}}, \frac{\mathbf{y}}{\mathbf{f}'}, \frac{\mathbf{x}}{\mathbf{f}'}$$
(3.14)

ただし,

$$f' = \sqrt{f'_{x}^{2} + f'_{y}^{2} + f'_{z}^{2}}$$
(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,

$$\Phi_{A} = D_{10} \mathbf{x} + D_{01} \mathbf{y} + \frac{A_{20}}{2} \mathbf{x}^{2} + A_{11} \mathbf{x} \mathbf{y} + \frac{A_{02}}{2} \mathbf{y}^{2}$$

$$+ \frac{C_{30}}{3} \mathbf{x}^{3} + C_{21} \mathbf{x}^{2} \mathbf{y} + C_{12} \mathbf{x} \mathbf{y}^{2} + \frac{C_{03}}{3} \mathbf{y}^{3}$$

$$+ \frac{S_{40}}{4} \mathbf{x}^{4} + S_{31} \mathbf{x}^{3} \mathbf{y} + \frac{S_{22}}{2} \mathbf{x}^{2} \mathbf{y}^{2} + S_{13} \mathbf{x} \mathbf{y}^{3} + \frac{S_{04}}{4} \mathbf{y}^{4}$$

$$+ \cdots \qquad (3.16)$$

と書ける.

ここでガウス像点位置(f'x, f'y, f'₂)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

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

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

を()とする条件

$$f'_{x} / f' = N' \sin \delta'$$
(3.19)

$$f'_{y} / f' = N' \cos \delta' - (k / k') (N - \sin \theta) / My$$
(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

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

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

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

$$-\frac{k}{My^{2}} \left(\frac{1 - \sin^{2}\theta}{f}\right)$$
(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А20、А02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

$$f' = \frac{k' \{1 + (f'_{z} / f')^{2}\}}{\frac{k}{f} (\frac{1}{Mx^{2}} + \frac{\cos^{2}\theta}{My^{2}}) + \frac{k N}{Mx^{2} r} - \frac{k' N'}{r'}}$$
(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

$$\Phi_{A} = \frac{A_{2}}{2} (x^{2} - y^{2}) + A_{11} x y$$

$$+ \frac{C_{30}}{3} x^{3} + C_{21} x^{2} y + C_{12} x y^{2} + \frac{C_{03}}{3} y^{3}$$

$$+ \frac{S_{40}}{4} x^{4} + S_{31} x^{3} y + \frac{S_{22}}{2} x^{2} y^{2} + S_{13} x y^{3} + \frac{S_{04}}{4} y^{4}$$

$$+ \cdots \qquad (3.25)$$

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FG C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.







(b) $\Delta r = -3 \times 10^{-3}$



図3.7 4次項までを用いて計算した光線収差の例 ($\lambda = 0.78 \mu m$, N=1.52, r=20mm, f=3 mm, $\theta = 0$, Lx=Ly=3 mm)

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 θ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.

$$A_{2} = -\frac{k}{1+\cos^{2}\theta} \left(\frac{N\cos^{2}\theta}{r} + \frac{2N\sin\theta - 2\sin^{2}\theta}{f}\right) \Delta \lambda$$

$$+ \frac{kN}{1+\cos^{2}\theta} \left(\frac{2\sin\theta}{r} + \frac{\cos^{2}\theta}{r}\right) \Delta N$$

$$- \frac{kN\cos^{2}\theta}{(1+\cos^{2}\theta)r} \Delta r$$

$$+ \frac{2k\cos^{2}\theta}{(1+\cos^{2}\theta)r} \left(\frac{1}{f} + \frac{N}{r}\right) \Delta \lambda$$

$$+ \frac{2k(N\sin\theta - 1)}{(1+\cos^{2}\theta)f} \Delta \lambda$$

$$A_{11} = -kN \left(\frac{1}{r} + \frac{\sin\theta}{f}\right) \sin\delta^{3} \qquad (3.26)$$

$$A_{11} = -kN \left(\frac{1}{r^{2}} - \frac{1}{r^{2}}\right) \sin\delta^{3} \qquad (3.27)$$

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

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

$$+ \frac{kN}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r^{2}} - \frac{\sin\theta}{fr}\right) \Delta N$$

$$+ \frac{kN}{2r} \left(\frac{2}{r} + \frac{\sin\theta}{f}\right) \Delta r$$

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

$$(3.29)$$

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

$$C_{03} = \frac{3k}{2f} \left(\frac{2\sin\theta - N}{f} + \frac{N\sin\theta}{r} \right) \Delta \lambda$$

$$+ \frac{3kN}{2f} \left(\frac{1}{f} - \frac{\sin\theta}{r} \right) \Delta N$$

$$+ \frac{3kN\sin\theta}{2fr} \Delta r$$

$$- \frac{3k\sin\theta}{f} \left(\frac{1}{f} + \frac{N}{r} \right) \Delta x$$

$$+ \frac{3kN}{2f^2} \Delta y \qquad (3.31)$$

$$S_{40} = \frac{k}{2} \left(\frac{N}{r^3} - \frac{3N}{2f^2r} - \frac{2}{f^3} \right) \Delta \lambda$$

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

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

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

$$(3.32)$$

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

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

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

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

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

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

$$S_{13} = -\frac{kN}{r^{3}} \sin\delta^{3} \qquad (3.35)$$

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

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

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

$$+ \frac{3k}{2f^{2}} \left(\frac{1}{f} + \frac{N}{r}\right) \Delta Lx \qquad (3.36)$$

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るの寄与しか無く、逆に、るは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 ΔLyO 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、A₂ と A₁₁とは独立である、しかし極座標

 $\mathbf{x} = \boldsymbol{\rho} \sin \boldsymbol{\phi}, \quad \mathbf{y} = \boldsymbol{\rho} \cos \boldsymbol{\phi} \tag{3.37}$

を導入すると、光線収差

$$\Delta X = -(\Phi_{\rm G}/k^{2}) \rho \left(A_{2}\sin\psi + A_{11}\cos\psi\right)$$
(3.38)

$$\Delta Y = -\left(\Phi_{\rm G}/k^{\prime 2}\right)\rho\left(A_{11}\sin\psi - A_{2}\cos\psi\right) \tag{3.39}$$

は座標系の回転により,

$$\Delta X = \mp (\Phi_{G} / k^{2}) \sqrt{A_{2}^{2} + A_{11}^{2}} \rho \sin \psi$$

$$\Delta Y = \pm (\Phi_{G} / k^{2}) \sqrt{A_{2}^{2} + A_{11}^{2}} \rho \cos \psi$$
(3.40)
(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、

$$dX = -(\Phi_{G}/k^{2}) C_{21} \rho^{2} \sin 2 \phi \qquad (3.42)$$

$$\Delta Y = -\frac{\Phi_{G}}{k^{\prime 2}} \left(\frac{C_{03} + C_{21}}{2} \rho^{2} + \frac{C_{03} - C_{21}}{2} \rho^{2} \cos 2 \psi \right)$$
(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、

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

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

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,

$$\Delta X = -(\Phi_{G}/k^{2})(S_{40}x^{3} + 3S_{31}x^{2}y + S_{22}xy^{2} + S_{13}y^{3})$$

$$(3.46)$$

$$\Delta Y = -(\Phi_{G}/k^{2})(S_{31}x^{3} + S_{22}x^{2}y + 3S_{13}xy^{2} + S_{04}y^{3})$$

$$(3.47)$$

と表される.係数S40, S22, S04, S31およびS13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)

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

を導入する.ここで I^o 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 Φ_G(P)とすると、回折積分公式を用いて

$$I(P) \propto | \sum \exp [i(\Phi_{DF} - \Phi_{G}(P))] dS |^{2}$$
 (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

$$i(P) = \frac{| SSexp(i\Phi_{A}(P))dS |^{2}}{| SS dS |^{2}}$$
(3.50)

となる.ただし、Φ_A(P)は

$$\Phi_{\mathbf{A}}(\mathbf{P}) = \Phi_{\mathbf{DF}} - \Phi_{\mathbf{G}}(\mathbf{P}) \tag{3.51}$$

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

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

ただし

$$\Delta \Phi_{P} = \frac{\lambda}{2 \pi} \sqrt{\frac{\int \int (\Phi_{A}(P))^{2} dS}{\int \int dS} - (\frac{\int \int \Phi_{A}(P) dS}{\int \int dS})^{2}}$$
(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 (= 2 mm)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RMS Dの値としては0.07 λ以下が要求される⁴²⁾.すなわち,

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

が許容誤差を見積もる際の判定条件となる.

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

 $|\Delta\lambda| < 9.8 \times 10^{-4} \tag{3.55}$



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



(b) λ=0.78μm, N=1.52, r=10mm, f=2mm, θ=0, Lx=Ly=1mm
 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 \times 10^{-4}$ | (3.56) |
|--|--------|
| $ \Delta r < 3.0 \times 10^{-3}$ | (3.57) |
| $ \delta' < 6.9 \times 10^{-4}$ | (3,58) |
| $ \Delta Lx = \Delta Ly < 8.7 \times 10^{-4}$ | (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±1.4μmとなる.また,図3.10には示していな いが, ⊿Lx, ⊿Lyだけが生じた場合,それぞれに対する条件は

 $|\Delta Lx| < 3.0 \times 10^{-4} \tag{3.60}$

 $| \Delta Ly | < 3.6 \times 10^{-4}$ (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,

| 1 | $\Delta \lambda \mid < 8.6 \times 10^{-3}$ | | (3.62) |
|---|--|--|--------|
| | $\Delta N \mid < 8.2 \times 10^{-3}$ | | (3.63) |

- $| \Delta \mathbf{r} | < 1.4 \times 10^{-2} \tag{3.64}$
- $|\delta'| < 3.9 \times 10^{-3}$ (3.65)
- $| \Delta Lx = \Delta Ly | < 5.9 \times 10^{-3}$ (3.66)

$$|\Delta Lx| < 1.6 \times 10^{-3}$$
 (3.67)

 $| \Delta Ly | < 2.1 \times 10^{-3}$ (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、I ODPU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IODP U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. ッイン・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SiO₂ 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。モード)を励振する.F GC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;TGF BS;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.T GFBS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) $\xi < 0$



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 § 変位した場合(図4.2参照)を考えると、式(2.20)から

$$\frac{N}{r'} + \frac{1}{f+2\xi} = \frac{N}{r} + \frac{1}{f}$$
(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をは入射 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

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

となる. そこで, 図に示すように PDアレイを配置すれば, §>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 §< 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, §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y z 平面上にくるように I ODPU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 y z 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、 IODP U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ビックアップ(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(TEo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ー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7 BSとすると、 IODPUのパワー伝

達効率は η_{BS} (1 – η_{BS}) に比例し、 η_{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

 $Q \equiv 2 \pi \lambda D / \Lambda^2$

(5.1)



図5.1 導波モードー導波モード結合(コプレーナ結合)

で定義されるパラメータQが条件

$$Q \gg 1 \qquad (Q \ge 10) \tag{5.2}$$

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

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

で表される.

5.3.2 回折効率

回折効率は

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

で与えられ³⁵⁾, n_{BS}=50%とするための条件は

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

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

$$\kappa = \frac{2 t_{g}}{\lambda T} \sin(\gamma \pi) \frac{(n_{f}^{2} - N^{2})(n_{r}^{2} - n_{o}^{2})}{N(n_{f}^{2} - n_{o}^{2})} \cos(\theta_{IN} + \theta_{DF})$$
(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

$$D = \frac{\pi \lambda T N (n_{f}^{2} - n_{o}^{2}) \sqrt{\cos \theta_{IN} \cdot \cos \theta_{BF}}}{8 t_{g} \sin(\gamma \pi) (n_{f}^{2} - N^{2}) (n_{r}^{2} - n_{o}^{2}) \cos(\theta_{IN} + \theta_{DF})}$$
(5.7)

となる. アスペクト比τ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、τ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

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

となる、 $\phi = (\pi + \theta_{1N} - \theta_{DF}) / 2$ である、

回折効率が 1/2となる波長ずれを ⊿λとすると波長選択性 2 ⊿λは

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

となる.

△ θ INおよび △ λ 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 pr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、TGF BS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 μm 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_{1N} , 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_{1N} はFGCの位置 r および開口長Lx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 r = 0.5に対して $\kappa = 8.22 \times 10^{-3}$ (μm^{-1})となるので, D=95 μm 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(≃ζb/ 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_{1N}は

 $\Phi_{1N} = -k N \sqrt{x^2 + (y + r)^2}$ (5.10)

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

$$\Phi_{BF} = -k N \sqrt{(x \mp a)^2 + (y + b)^2}$$
(5.11)

となる、グレーティングのm番目のラインの形状は

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

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

$$\sqrt{x^{2} + (y + r)^{2}} - \sqrt{(x \mp a)^{2} + (y + b)^{2}}$$

= $m \lambda / N + r - \sqrt{a^{2} + b^{2}}$ (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 I ODPU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(P D)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 δ = 0、My = 1、f'y/f = sin θ を代入して

$$(N' - \sin\theta') / \lambda' = (N - \sin\theta) / \lambda$$
(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く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 ⊿く は波長ずれ ⊿ λ ≡ λ' – λを用いて

 $\Delta \zeta = f \sin(\theta' - \theta) = -f (N - \sin \theta) / \cos \theta \cdot (\Delta \lambda / \lambda) \quad (6.2)$ で表され、 $\Delta \lambda$ に比例する、

例えば、 $\lambda = 0.78\mu$ m, f = 2 mm, N = 1.52, $\theta = 15^{\circ}$ の場合, $\Delta \lambda = 0.3$ nm に対して $\Delta \zeta = 1 \mu$ mとなる. $\Delta \lambda$ の 0.3nmは通常の0.78 μ m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く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
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 2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 2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 2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w₁₀、w₂₀とする。また、導波路の 2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

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

63

$$\chi = \left(\frac{k}{2 R_{1}(y)}\right)^{2} \left(\frac{W_{1}(y) W_{20} \eta_{L0}^{0}}{2}\right)^{2}$$
(6.4)

となる 5^{22} . 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

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

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

$$\eta_{LD}^{0} = \frac{2 w_{1}(y) w_{20}}{w_{1}^{2}(y) + w_{20}^{2}}$$
(6.7)



図6.3 端面結合効率(w₁₀=w₂₀=0.52µm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_{1D} を図6.3に示す.この図から 2 方向ずれが無い場 合($\Delta = 0$)はLaが小さいほうが効率は高いが、2 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 2 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20 μm とすれば | Δ | \leq 2 μm 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. P Dは p 型不純物を光検出位置にドーピングして作製する p n 接合で構成する. 導波領域では、S i O₂ バッファ層はS i 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 p n 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、S i O₂ 層にテーパ⁵³⁾ (\simeq 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

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

と表される. ここで, P_{1N}, 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. S i 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









$$\alpha_{PD} = \frac{\sin 2 \phi_{b}' \sin 2 \phi_{b}}{T \tan \theta_{f}} \exp(-2 \tau_{b} S) , \qquad (6.9)$$

$$\phi_{b} = \tan^{-1} \frac{\sqrt{N^{2} - n_{b}^{2}}}{\sqrt{n_{f}^{2} - N^{2}}} , \qquad \phi_{b}' = \tan^{-1} \frac{\sqrt{N^{2} - n_{b}^{2}}}{\sqrt{n_{s}^{2} - N^{2}}} ,$$

$$\tau_{b} = \frac{2 \pi}{\lambda} \sqrt{N^{2} - n_{b}^{2}} , \qquad \theta_{f} = \sin^{-1} (N / n_{f})$$

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, S i 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 μ m, N=1.52, S=0.25 μ m, n_f =1.55, n_b =1.46, n_s =3.75の場合では, $\alpha_{PD} = 6.2 \times 10^{-3}$ (Np/ μ m) 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Wpb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}≫10µm

(6.10)

が望ましい。しかし、Tpr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.

67

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SiO₂(屈折率n_b =1.46) お よびCorning#7059ガラススパッタ膜(屈折率n_r =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

68



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ΤΕ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nr=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 | t _g =0.035 μm f=2.0 mm r=10.5 mm |
| | Output Angle | θ=15.0 Deg |
| | Aperture | $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ |
| | Period | 0.52 - 0.75 µm |
| | Theoretical Coupling | |
| | Efficiency | 60 % |
| | Diffraction-limited | |
| | Focus Spot Width | 1.4 µm |
| TGFBS | Detecting Point | a=1.165 mm |
| | | b=9.00 mm |
| | Size | $1.0 \times 0.095 \text{ mm}^2$ |
| | Period | 3.80 - 4.04 µm |
| | Theoretical Diffraction | |
| • | Efficiency | 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1×1mm²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,p n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,SiO2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A1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、SiO₂ 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2×10⁻⁶Torr以下にし, Arガスを導入する. ターゲットー試料間距離50mm, RFパワー 100watt, 基板水冷, Arガス圧2 ×10⁻²Torr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髙温減圧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% SiH₄/N₂)とアンモニア(NH₃)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-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 8×10⁻⁵C/cm²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(CF4)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A1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A1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 2 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、L D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. 2 方向は、L D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 P D の光電流を測定して、位置合わせを行 った、まず、I C 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ΙΟDPU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、50µm ØのA1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SiO₂ 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20mm, 全幅12mm, 総重量 3.5gで, 焦点距離2mm, 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, A1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A1 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 光学测定

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、 c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







→ ← 2.5 µm

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 6

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 ⊿ x a に対する集光スポットの x 方向の変位 ⊿ x a 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 ($- \Delta y_a$),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 定結果を〇印で示す.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は閉口面積 1×1mm²、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(ミ軸)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









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A1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(ミ方向)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 検出電流のミ依存性を示す.ミ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を依存性

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.



Lateral displacement

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く方向に駆動し、 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



Focusing beam





Displacement of pseudodisc along ζ axis 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∆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∆が大きくてもかなりの励振効率が得られてい る、

93





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電流とな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,集光スポットのく方向変位と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

隊長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∆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 2 方向にずらし(△<0), S i 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



(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A1蒸着ミラーを用い、模擬ピットの検出機能、フォ

98
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 I O D P U の回折限界集光スポット径は 3 dB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)の描画精度は閉口長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措画 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) = (LD発振パワー; P_{LD} (W))

×(端面結合効率; ηլ)

×(導波光利用率; η_{GW})

101

×(1-TGFBS回折効率; $1-\eta_{BS}$)

×(FGC出力結合効率; η°(Ly))

×(光ディスク反射率;Ron)

×(FGC入力結合効率; $\eta^{i}(Ly, \xi)$)

×(TGFBS回折劾率; n_{Bs})

×(1-導波光伝搬損失;1-η_{Ls})

- ×(PD結合効率; η_{PD}≡P_{PD}/P_{IN})
- ×(光-電流変換率;Qoa [A/W])

×(PDの個数)

(9.1)

で表せる、導波光利用率 7 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Ropにはディスク 基板のフレネル反射も考慮に入れる、光ー電流変換率QoA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、 $\eta_{BS}=0.50$ 、 $\eta^{\circ}(Ly)=0.60$ 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Rop=0.9 と計算される、 $\eta_{LS}=0.06$ 、 $\eta_{PD}=0.86$, QoA= 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Δ≧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(L D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 I O D P U 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L Dを必要とするかどうかはこれからの課題であ る.



(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

104

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~20mm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SiO₂ 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勞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.

108

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㈱LS I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、

- S. E. Miller: "Integrated optics; An introduction," Bell Syst. Tech. J., vol.48, p.2059 (1969).
- 2) T. Tamir: "Integrated Optics," Springer Verlag (1975).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).
- 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).

- 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:LiNbO₃," 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:LiNbO₃ 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).
- 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 integratedoptic 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).

 $1 \, 1 \, 4$

- 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

- 裏升香 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).
- S. Ura, T. Suhara, H. Nishihara and J. Koyama: "An integratedoptic disk pickup device," IEEE J. Lightwave Technol., vol.LT-4, pp.913-918 (1986,7).
- (2) 研究会
 - 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, 00E-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, 00E-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, 0QE-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, 0QE-86-130 (1986,11).
- (3) 国際会議・シンポジウム等
 - T. Suhara, S. Ura, H. Nishihara and J. Koyama: "An integratedoptic 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).
 - S. Ura, T. Suhara and H. Nishihara: "Laser diode spectrum in integrated-optic disc pickup device," First Optoelectronics Conference '86, A8-4 (1986,7).
 - 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
 - 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).
- 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).
- 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).