



Title	電子ビーム描画作製マイクロレンズに関する研究
Author(s)	藤田, 輝雄
Citation	大阪大学, 1983, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/2450
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

電子ビーム描画作製 マイクロレンズに関する研究

昭和 58 年 3 月

藤 田 輝 雄

電子ビーム描画作製 マイクロレンズに関する研究

昭和 58 年 3 月

藤 田 輝 雄

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在学中、小山研究室において行った“電子ビーム描画作製マイクロレンズに関する研究”をまとめたものであり、8章から構成されている。以下、各章ごとにその内容の概容を述べる。

第1章 序 論

本章では、まず、微小光学 (Microoptics) におけるマイクロレンズの重要性について述べ、マイクロレンズの種類および作製法を概観する。次に、著者が研究を行った電子ビーム描画作製マイクロレンズと従来のホログラフィックレンズ、屈折率分布型ロッドレンズ等との比較を行い、本研究の目的・意義を明らかにする。

第2章 回折型レンズに関する基礎理論

著者が研究を行ったマイクロレンズは円形の周期構造を持つゾーンプレート・レンズおよびフレネルレンズである。本章では、その基礎となる一様周期直線状グレーティングの回折特性について理論的検討を行う。まず、矩形位相形状の一様周期グレーティングの回折効率について考察し、次に、鋸歯状位相形状の一様周期グレーティングの回折効率および回折効率の位相形状依存性について解析を行う。又、矩形位相形状の円形グレーティングで構成されるゾーンプレート・レンズの集光特性を回折積分を用いて数値的に検討し、ゾーンプレート・レンズ、フレネルレンズ、および、単レンズ相互の関係を明らかにする。

第3章 電子ビーム描画装置

著者は、マイクロ・ゾーンプレート・レンズおよびマイクロ・フレネルレンズ作製のため、電子ビームを滑らかな円状に走査できる電子ビーム描画装置を開発した。本装置は市販の走査型電子顕微鏡にミニコンピュータで制御される

外部偏向電圧発生回路を加えたものであり、本章ではこの装置の構成および描画性能について述べる。

第4章 マイクロ・ゾーンプレート・レンズ

本章では、電子ビーム描画を用いたマイクロ・ゾーンプレート・レンズの作製法、および、試作レンズの特性測定結果について述べる。まず、予備実験として、電子ビームレジスト PMMA を用いた矩形断面形状の一樣周期直線状グレーティングの作製を行い、描画時の最適露光条件、作製可能な最小周期、最大回折効率を実験的に明らかにする。次に、これらを基に試作したゾーンプレート・レンズの効率、波面収差、集光特性に関する測定結果について述べる。最後に、電子ビーム描画法のレンズアレイ、円筒型レンズ作製への応用について言及する。

第5章 マイクロ・フレネルレンズ

本章では、前章で検討したゾーンプレート・レンズの効率改善を目的とした、レンズ断面のブレード化法について検討を行う。まず、PMMA 薄膜における電子ビーム露光量とエッチング深さの関係を実験的に明らかにし、これを基に作製した鋸歯状断面をもつブレード化一樣周期グレーティングの回折特性について述べる。次に、円状のブレードドグレーティングから構成されるマイクロ・フレネルレンズの作製を行い、このレンズの諸特性について実験的検討を行う。これにより、電子ビームによるブレード化法が高効率で、しかも、すぐれた集光特性をもつ回折型レンズの作製に有用であることを実証する。

第6章 強度分布変換用ゾーンプレート・レンズ

光信号処理システムやレーザ・プリンタでは、中心部が平坦で急峻なロールオフ特性をもつ光強度分布を必要とすることがある。本章では、レーザの基本モードであるガウス強度分布を中心部が平坦な強度分布に変換する光学素子について検討する。まず、このような変換機能に必要な素子の複素振幅透過率を

求め、これをゾーンプレートで実現する方法を示す。次に、素子仕様が与えられたときの設計手順を示し、試作レンズの強度分布変換特性、効率上の問題点を明らかにする。

第7章 屈折率分布型ルネブルグレンズ

導波路レンズは光集積回路上で光情報処理を行うのに必要な基本素子である。本章では、電子ビーム照射によって屈折率変化を示す As_2S_3 を導波路材料とし、電子ビームによって直接書込みを行う屈折率分布型ルネブルグレンズの作製法、および、試作素子の特性について述べる。

第8章 結 論

本研究で得られた成果を総括し、今後の問題点や課題を指摘する。

電子ビーム描画作製マイクロレンズに関する研究

目 次

第 1 章 序 論	1
第 2 章 回折型レンズに関する基礎理論	6
2.1 緒 言	6
2.2 矩形状位相グレーティングによる回折	6
2.3 鋸歯状位相グレーティングによる回折	8
2.3.1 回折効率	8
2.3.2 回折効率の位相形状依存性	9
2.4 ゾーンプレート・レンズ	12
2.4.1 構 造	12
2.4.2 回折積分	13
2.4.3 集光特性	17
2.5 フレネルレンズ	18
2.6 結 言	20
第 3 章 電子ビーム描画装置	21
3.1 緒 言	21
3.2 装置の構成	21
3.2.1 直線状グレーティング描画時の構成	22
3.2.2 円形グレーティング描画時の構成	23
3.3 標 準 器	24
3.4 描画性能	26
3.5 結 言	27

第4章	マイクロ・ゾーンプレート・レンズ	28
4.1	緒言	28
4.2	試料	29
4.2.1	電子ビームレジスト	29
4.2.2	作製手順	30
4.3	一様周期グレーティングによる予備実験	31
4.3.1	露光, 現像条件	31
4.3.2	作製, 回折効率測定	33
4.4	マイクロ・ゾーンプレート・レンズ	35
4.4.1	作製	35
4.4.2	特性測定	37
4.5	応用	40
4.5.1	マイクロ・レンズアレイ	40
4.5.2	円筒型マイクロレンズ	41
4.6	結言	42
第5章	マイクロ・フレネルレンズ	44
5.1	緒言	44
5.2	ブレース化一様周期直線状グレーティング	45
5.2.1	作製手順	45
5.2.2	PMMA 薄膜の化学エッチング特性	47
5.2.3	直線状グレーティング作製	49
5.2.4	回折効率測定	50
5.3	ブレース化マイクロ・フレネルレンズ	52
5.3.1	作製	52
5.3.2	特性測定	53
5.3.3	円筒型フレネルレンズ	58
5.4	結言	58

第 6 章 強度分布変換用ゾーンプレート・レンズ	59
6.1 緒 言	59
6.2 理論的検討	60
6.2.1 動作原理	60
6.2.2 複素振幅透過率の決定	61
6.2.3 素子径, ビーム径が出力強度分布に与える影響	63
6.3 設 計	67
6.3.1 設計手順	67
6.3.2 複素振幅透過率の実現法	69
6.3.3 変換効率	70
6.4 作製, 特性測定	72
6.4.1 作 製	72
6.4.2 特性測定	73
6.5 変換効率改善に関する検討	74
6.6 結 言	75
第 7 章 屈折率分布型ルネブルグレンズ	77
7.1 緒 言	77
7.2 設 計	77
7.3 素子作製	79
7.3.1 As_2S_3 薄膜の電子ビーム照射による屈折率変化	79
7.3.2 導波路の作製	80
7.3.3 レンズ書込み	81
7.4 集光特性の測定	82
7.5 結 言	83
第 8 章 結 論	84

謝 辭	88
-----------	----

参 考 文 献	89
---------------	----

関連発表論文	97
--------------	----

第 1 章 序 論

1960 年のルビーレーザー発振に始まるレーザー技術は、低損失光ファイバの開発¹⁾や光エレクトロニクス素子の高性能化に伴い、現代そして未来の情報化社会を支える大きな基本技術になろうとしている。たとえば、光を搬送手段として各種の情報を伝送しようとする光通信は、長寿命・高信頼度の半導体レーザー²⁾と理論限界近くまで損失が低減された光ファイバ³⁾の開発によって、将来の高速大容量化に対応できるものとして実用化の道を歩んでいる⁴⁾。又、光ディスク・メモリシステム⁵⁾、デジタル・オーディオ⁶⁾、レーザープリンタ⁷⁾、レーザードプラ流速計⁸⁾などレーザー応用機器の進展にも目をみはるものがある。

このような光通信・光情報処理システムの実用化に伴い、定盤の上に光学部品を並べた従来の大型光学系に比べて、光学部品をより小型化した小さく安定で廉価な光学系が要求されるようになってきた。微小光学⁹⁾(Microoptics)系はこの要求に答えるもので、現在、多くの光応用システムの中で用いられている^{10,12)}。

微小光学系の構成要素としては、マイクロレンズ、偏光子、ミラー、回折格子、光ファイバなどがあるが、特にマイクロレンズ(直径、焦点距離: $100\mu m \sim$ 数 mm)は重要な素子であり、現在までいくつかの種類が研究されてきた。この中で屈折率分布型(GRIN)レンズ¹³⁾は多モード光ファイバを用いた微小光学用レンズの主流といえるもので、イオン交換法によりガラスの円柱に半径の二乗に比例する屈折率分布を与えたものである。このレンズでは、屈折率分布形状の理想形状からのずれが収差を生じさせるが、屈折率分布形状を決定するイオン交換法は微細な調整が非常に困難であるため、レンズ端面を球面に研磨して収差改善を行った報告がある¹⁵⁾。単レンズは2つの曲面で構成される従来からのレンズであり、境界面での光の屈折を光の集光に利用する。単レンズでは表面形状のずれが収差に影響を与えるが、微小な単レンズにおいて表面形状の制御は高価で困難な問題である¹⁶⁾。

これらの他に、グレーティングの回折作用を集光に利用する回折型レンズが

ある。光学的干渉縞記録によって作製するホログラフィックレンズ¹⁷⁾はその一つである。筆者の研究室では、 As_2S_3 膜を記録材料に用いた半導体レーザー多モード光ファイバ結合用ホログラフィックレンズについて検討を行い、良好な結合特性を得た。^{18, 19)}ところが、赤外光に感度を有する適当な記録材料がないため、半導体レーザー用などの赤外光用ホログラフィックレンズは可視光で作製せざるをえず、その結果、記録波長と使用波長の違いによる収差が生じ、単一モードファイバ系への適用には問題が残った。²⁰⁾

これに対して、同じ回折型のレンズであるフレネルレンズ²¹⁾、ゾーンプレート・レンズ²²⁾では、それらを構成する円形グレーティングの半径を正確に偏心なく描くことができれば使用波長での収差の問題はなくなる。グレーティング位置の精確な制御はLSIから超LSIへと指向している半導体微細加工技術によって十分可能であり、又、電子ビーム描画技術では、グレーティングの最小周期もサブミクロンの大きさが期待できる。²³⁾ところで、これらのレンズの効率はグレーティングの位相形状に依存し、フレネルレンズでは100%、ゾーンプレート・レンズでは最高40%の効率が実現可能となる。著者は、このような性質をもつフレネルレンズ、ゾーンプレート・レンズの電子ビーム描画作製法について検討を行った。^{24, 25)}

マイクロ・フレネルレンズ、マイクロ・ゾーンプレート・レンズのフォトリソグラフィによる作製法については種々報告がある。^{26, 27)}これに対し、筆者が採用した電子ビーム描画によるマイクロレンズ作製法は次のような特徴を有している。²⁸⁾

- 1) 実寸大の微細なレンズパターンを直接描くことで、フォトリソグラフィの複雑な手順(レンズパターンの作図、写真縮小、フォトエッチング)を省くことができる。
- 2) レンズパターンを計算するプログラムの入力変更のみで、焦点距離、使用波長などの仕様変更に対処できる。
- 3) サブミクロンの微細加工ができる。

このようなレンズ作製のために、著者らは市販の走査型電子顕微鏡(SEM)

を利用した電子ビーム描画装置を開発した。^{24, 28)} 市販の電子ビーム描画装置は偏向が x 軸 y 軸のみであるので、曲線は直線の階段状近似で表される。そこで、ミニコンピュータで制御される外部偏向電圧発生回路を設計・試作し、レンズ描画に必要な電子ビームの滑らかな円状走査を可能とした。

ホログラフィックレンズでは、記録媒質の厚さを適当に厚くすれば体積的なグレーティングが形成され、100%に近い高い効率が容易に実現できる。^{20, 29)}

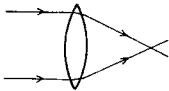
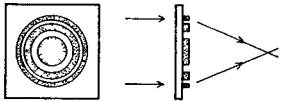
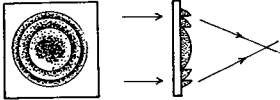
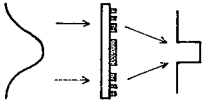
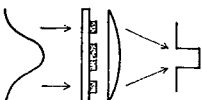
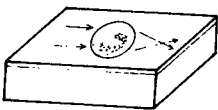
一方、光の代わりに電子ビームによる屈折率変化を利用してこのような厚い記録媒質にレンズパターンを描こうとする場合、媒質中での電子ビームの散乱のためにホログラフィックレンズと同程度の分解能を実現することが極めて困難となる。従って、電子ビーム描画の場合、膜厚を薄くでき(約 $1\ \mu m$) 変調量を大きくとれるレリーフグレーティングが作製の容易さ、分解能の点から得策と考えられる。筆者は、矩形状および鋸歯状の断面をもつ薄い透過型レリーフグレーティングについて検討を行い、^{28, 30)} 同じ断面形状をもつ円形グレーティングで構成されるゾーンプレート・レンズ、フレネルレンズ作製の基礎資料とした。

本論文では、電子ビーム描画を用いたマイクロレンズの作製法、およびレンズ特性について検討を行う。本論文の目的をまとめると次のようになる。

- 1) レンズの基礎となるレリーフグレーティングの回折効率の理論的検討。
- 2) 電子ビーム描画による矩形状レリーフグレーティングおよびゾーンプレート・レンズ作製法の確立。
- 3) 高効率化のための電子ビームによる断面形状ブレード化法の確立。
- 4) レンズ特性の評価。
- 5) 強度分布変換機能を有するゾーンプレート・レンズの設計、特性評価、および効率改善。
- 6) 電子ビーム描画法の導波路レンズ作製への応用。

なお、章間の関係を明らかにするために、本論文で扱うマイクロレンズとその特性および取扱う章節を表 1.1 に示す。

表 1.1 本論文で取扱うマイクロレンズ

	集光原理, 効率	本論文で取扱う章, 節
単レンズ 	屈折 100%	—
ゾーンプレート・レンズ 	回折 $\leq 40\%$	2.4, 4
フレネルレンズ 	回折 $\leq 100\%$	2.5, 5
強度分布変換用 ゾーンプレート・レンズ 	回折 $\leq 40\%$	6
ゾーンプレート・単レンズ 複合型素子 	$\sim 100\%$	6.5
屈折率分布型 ルネブルグレンズ 	屈折 100%	7

本論文の構成は以下の通りである。第2章では、回折型レンズの基礎となる一様周期直線状位相グレーティングの回折特性について理論的検討を行い、次に、円形の位相グレーティングで構成されるゾーンプレート・レンズ、フレネルレンズの集光特性について解析を行う。第3章では、マイクロレンズ作製のために開発した電子ビーム描画装置の構成および描画性能について述べる。第

4 章では、電子ビーム描画を用いたマイクロ・ゾーンプレート・レンズの作製法、および、試作レンズの特性測定結果について述べる。第 5 章では、ゾーンプレート・レンズの効率改善を目的とした、電子ビームによるレンズ断面のブレイズ化法について検討を行い、鋸歯状断面をもつ円形グレーティングで構成されるマイクロ・フレネルレンズの諸特性を実験的に明らかにする。第 6 章では、レーザ光のガウス強度分布を中心部が一様な強度分布に変換する光学素子について検討を行い、これをゾーンプレート・レンズで実現する方法、および、試作レンズの強度分布変換特性について考察する。第 7 章では、第 3 章の電子ビーム描画装置を導波路レンズ作製に応用し、電子ビーム直接書込みによる屈折率分布型ルネブルグレンズの集光機能を確認する。第 8 章では、本研究で得られた成果を総括し、今後の問題点や残された課題に言及する。

第2章 回折型レンズに関する基礎理論^{28,30,31)}

2.1 緒 言

本章では、まず、回折型レンズの基礎となる薄い位相型一様周期直線状グレーティングの回折特性について述べる。取り上げる位相形状は矩形および鋸歯状であり、前者の場合理論的に最大40%の1次回折効率が実現でき、後者の場合には最大1次回折効率は100%に達する。³²⁾さらに、鋸歯状位相グレーティングに関して位相形状ずれに検討を加え、回折効率の位相形状依存性を明らかにする。次に、円形グレーティングで構成されるゾーンプレート・レンズおよびフレネルレンズの集光特性について検討を行う。ゾーンプレート・レンズに関しては2次元フレネル回折積分をBoivinの級数展開法³³⁾により数値計算し、焦点面強度分布が無収差レンズのそれにほぼ一致することを示す。

2.2 矩形形状位相グレーティングによる回折

ここで取り扱うのは図2.1に示すような透過型一様周期の直線状位相グレーティング(膜厚 d 、周期 T)である。グレーティングは式(2.1)で与えられる判別量 Q の大小によって、その回折の性質が異なってくる。³³⁾

$$Q = 2\pi \lambda_0 d / n_0 T \quad (2.1)$$

但し、 n_0 ：媒質の平均屈折率、 λ_0 ：入射波の真空中での波長

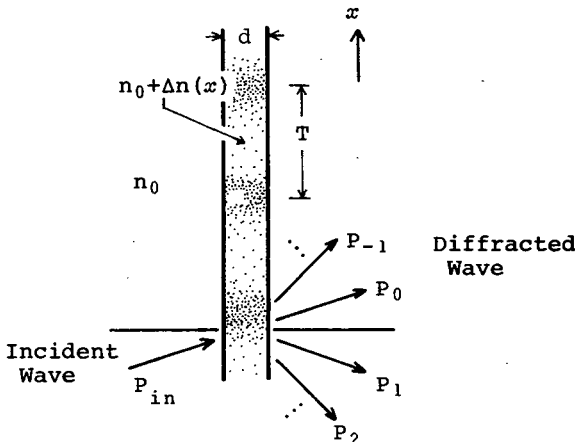


図 2.1
透過型一様周期直線状
グレーティング

通常、 $Q > 10$ のとき、グレーティングは厚い、又は体積的であるといわれる。このとき、回折光の入射角依存性、入射波長依存性は大きく、ブラッグ条件がほぼ満たされる場合にのみ回折光が生じる。 $Q > 10$ のときの光波伝搬の解析には多数波結合理論³⁴⁾が、ブラッグ条件近傍では2波結合理論²⁹⁾が有効である。 $Q < 1$ のときは、グレーティングは薄い、又は平面的であるといわれ、普通、グレーティングの格子ベクトル方向の整合条件を満たすすべての方向に回折光を生じる。以後、本論文で対象とするのは $Q < 1$ の場合である。

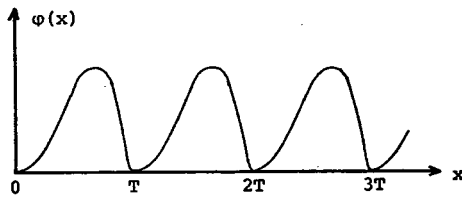


図 2.2

グレーティングの位相
シフト関数

$Q < 1$ のとき、透過型位相グレーティングは、その位相形状に対応した位相遅れを入射波面に与えると考えてよい。従って、図 2.2 に示す位相形状をもつグレーティングに平面波が垂直入射するとき、 m 次の回折波の効率 η_m は、

$$\eta_m = |b_m|^2 \quad (2.2)$$

$$b_m = \frac{1}{T} \int_0^T \exp\{j\varphi(x)\} \exp(-j2\pi mx/T) dx \quad (2.3)$$

但し、 $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

で与えられる。³²⁾ここで、 $\varphi(x)$ はグレーティングの位相シフト関数であり、又、式(2.2)、(2.3)では、境界面での反射損失の効果は含まれていない。

図 2.3 に示す矩形位相形状をもつグレーティングの場合、 $\varphi(x)$ は

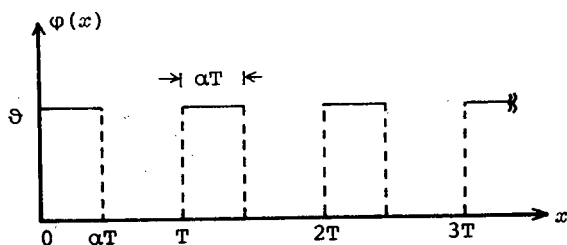


図 2.3

矩形位相グレーティングの
位相シフト関数

$$\varphi(x) = \begin{cases} \Theta & ; 0 \leq x \leq \alpha T \\ 0 & ; \alpha T < x < T \end{cases} \quad (2.4)$$

但し, $0 \leq \alpha < 1$

で与えられる。垂直入射に対する m 次波の回折効率 η_m は、式 (2.4) を式 (2.2), (2.3) に代入することにより求められ、

$$\eta_m = (4 / m^2 \pi^2) \sin^2(\Theta / 2) \sin^2(m \pi \alpha) \quad (2.5)$$

となる。^{28, 32)} この結果、 η_m は入射波の波長には依存せず、又、1 次回折効率が最大 ($\eta_1 = 4 / \pi^2 (0.405)$) となる条件は

$$\Theta = \pi, \quad \alpha = 0.5 \quad (2.6)$$

である。このとき、奇数次の回折波のみが生じる。

2.3 鋸歯状位相グレーティングによる回折

2.3.1 回折効率

図 2.4 に示すような x 方向に関して位相形状が鋸歯状に変化しているグレーティングの回折効率を求める。位相遅れの最大値を θ とすれば、 $\varphi(x)$ は

$$\varphi(x) = \frac{\Theta}{T} x \quad (0 \leq x < T) \quad (2.7)$$

で与えられる。式 (2.7) を式 (2.2), (2.3) に代入すれば、垂直入射に対する m 次回折波の効率 η_m が求まる。³²⁾

$$\eta_m = \text{sinc}^2\{(\theta - 2\pi m) / 2\} \quad (2.8)$$

(但し, $\text{sinc } x \equiv \sin x / x$)

$\theta = 2\pi$ のとき, 1次回折波の効率 η_1 は最大(100%)となり, 入射光はすべて1次回折光に変換される。

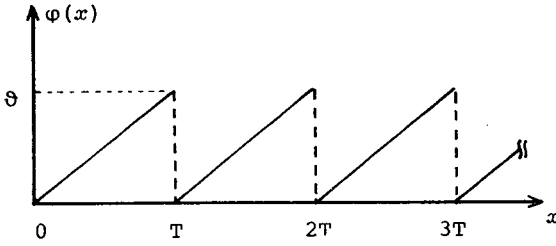


図 2.4

鋸歯状位相グレーティングの
位相シフト関数

2.3.2 回折効率の位相形状依存性

本節では, 位相形状が理想的な鋸歯形状からずれた場合の1次回折効率について考察する。^{30, 31)}

図 2.5 に示す 4 つのパラメータ, 1) 最大位相シフト量 θ , 2) 鋸歯状位相部の底辺とグレーティング周期の比 k , 3) 傾斜面のふくらみ, へこみ(ともに x の 2 次式で表わされる)に対応する最適位相形状からの位相ずれの最大値 $\Delta\theta$, 4) 垂直面のだれに対応する, 最適位相形状に一致する部分の長さ β とグレーティング周期の比 β , それぞれに対する η_1 を計算した。 η_1 は図 2.5 中の $\varphi(x)$ を式 (2.2), (2.3) に代入することによって, それぞれ

$$\eta_1 = \text{sinc}^2\{(\theta - 2\pi) / 2\} \quad (2.9)$$

$$\eta_1 = \text{sinc}^2\{\pi(1 - k)\} \quad (2.10)$$

$$\eta_1 \cong \text{sinc}^2(\Delta\theta / 2) \quad (2.11)$$

$$\eta_1 = \beta^2 \quad (2.12)$$

と計算できる。又、 η_1 と (θ, k) の関係の数値計算結果を図 2.6 に、 η_1 と $(\theta, \Delta\theta)$ の関係を図 2.7, 2.8 に示す。4つのパラメータのうち、 β の最適値からの相対的なずれが η_1 に最も影響を与える。しかし、電子ビーム描画でグレーティングを作製する場合、電子ビームレジストの解像度がサブミクロン程度とグレーティング周期に比べて十分小さい²³⁾ので、グレーティングの垂直面のだれの影響はほとんど無視できると予想できる。 $\theta, k, \Delta\theta$ については、

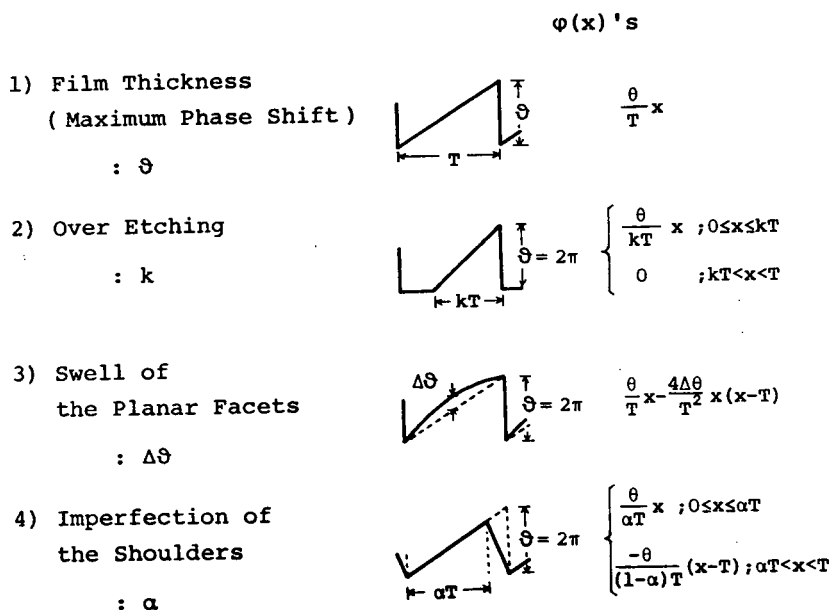


図 2.5 鋸歯状位相グレーティングにおける種々の位相形状ずれ

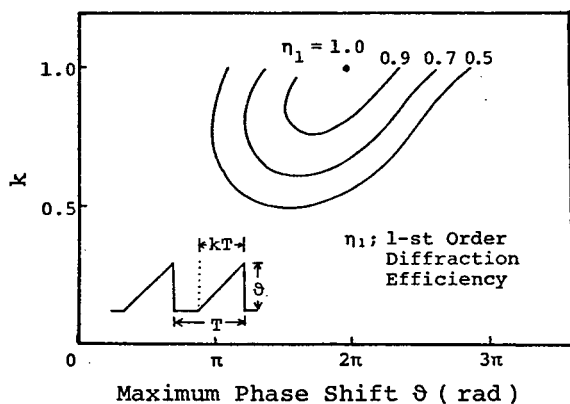


図 2.6

1次回折効率 η_1 の位相形状依存性、 η_1 と (θ, k) の関係

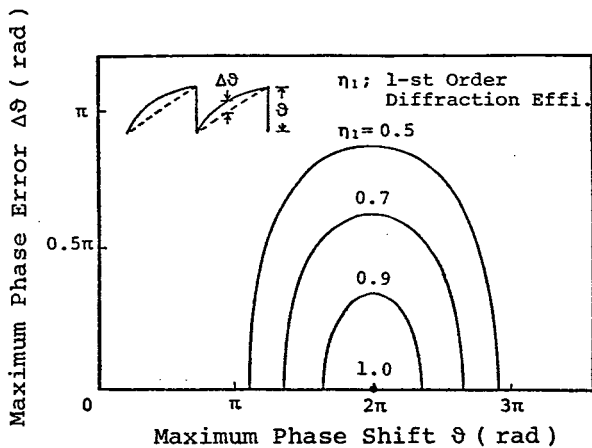


図 2.7

1次回折効率 η_1 の位相形状依存性, η_1 と $(\theta, \Delta\theta)$ の関係

最適値を中心としたかなり広い範囲で、矩形位相形状をもつグレーティングの理論的最大効率40.5%を超える効率が得られることが図 2.6, 2.7 からわかる。

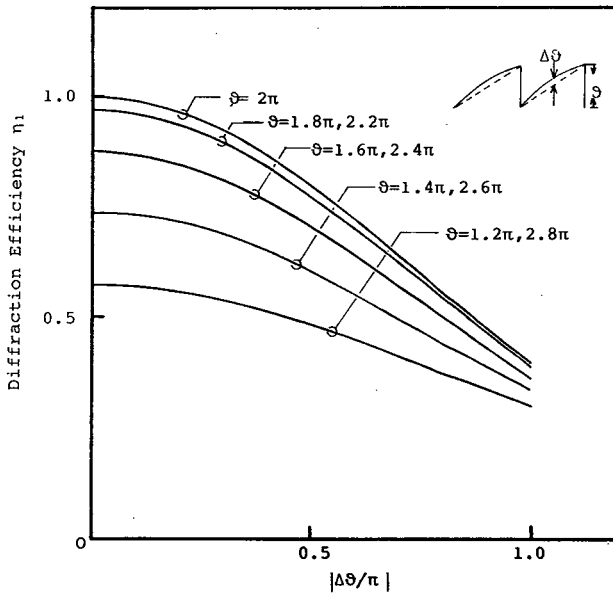


図 2.8 1次回折効率 η_1 の位相形状依存性, η_1 と $(\theta, \Delta\theta)$ の関係

2.4 ゾーンプレート・レンズ²⁸⁾

2.4.1 構 造

波長 λ で集点距離 f をもつ無収差レンズの位相シフト関数 $\varphi(r)$ は

$$\varphi(r) = \pi r^2 / \lambda f \quad (2.13)$$

但し, r : 光軸からの半径
³⁵⁾で与えられる。これに対して, 同じ波長 λ で焦点距離が f であるゾーンプレート・レンズでは, 式 (2.13) の位相シフトが π の整数倍となる半径が各輪帯の境界円半径となる。従って, m 番目の境界円半径 r_m は,

$$\pi r_m^2 / \lambda f = m\pi \quad (2.14)$$

$$r_m = \sqrt{m\lambda f} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.15)$$

を満たし, ゾーンプレート・レンズはこの半径 r_m で区切られる同心円状の位相グレーティングから構成される。図 2.10 はこの位相グレーティングをレリーフ構造で実現したゾーンプレート・レンズの正面および断面図である。

式 (2.15) からわかるように, レンズを構成する円形グレーティングの周期は, 半径が増加するにつれて減少する。レンズの直径を $2d$, 境界円番号の最大値を M とすれば, 式 (2.15) から

$$d = r_M = \sqrt{M\lambda f} \quad (2.16)$$

が成立する。従って, レンズを構成するグレーティングの最小周期 $\Delta_{\min}$ は

$$\begin{aligned} \Delta_{\min} &= 2(r_M - r_{M-1}) \\ &\simeq \lambda f / d \\ &= 2\lambda F \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\text{但し, } F = f / 2d \quad (2.18)$$

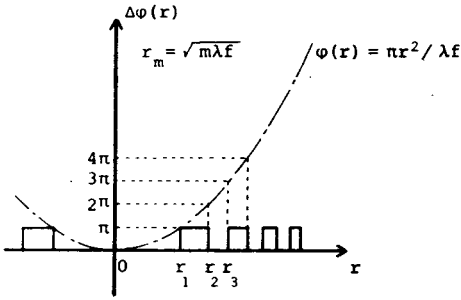


図 2.9 ゾーンプレート・レンズ
の位相シフト関数

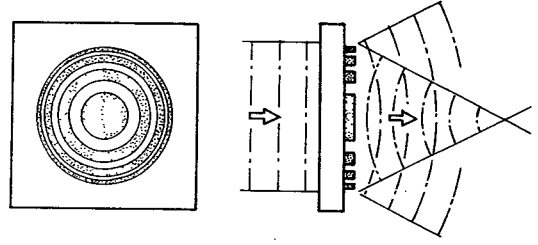


図 2.10 ゾーンプレート・レンズ
の構造

で与えられ、 $\Lambda_{\min}$ は F 数と波長 λ の積に比例することになる。たとえば、 $F = 5$ 、 $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ のとき $\Lambda_{\min}$ は $6.3 \mu\text{m}$ となる。

2.4.2 回折積分

本節では、ゾーンプレート・レンズの集光特性について検討する。同心の円環状開口群（即ちゾーンプレート）からのフレネル回折の回折積分を無限級数展開を用いて解く方法については Boivin が詳述しており³⁶⁾、著者はこの方法を用いてゾーンプレートの焦点面強度分布を計算した。

図 2.11 に示すように、 z_1 面上での複素振幅分布を $u_1(x_1, y_1)$ 、 u_1 が距離 l 伝播したときの z_2 面上の複素振幅分布を $u_2(x_2, y_2)$ とすれば、 u_1 のフレネル回折 u_2 は

$$u_2(x_2, y_2) = \frac{j \exp(-jk l)}{\lambda l} \exp(-jk \frac{x_2^2 + y_2^2}{2l}) \iint u_1(x_1, y_1) \cdot \exp(-jk \frac{x_1^2 + y_1^2}{2l}) \exp(j2\pi \frac{x_1 x_2 + y_1 y_2}{\lambda l}) dx_1 dy_1 \quad (2.19)$$

但し、 λ : 入射波の波長、 $k = 2\pi / \lambda$

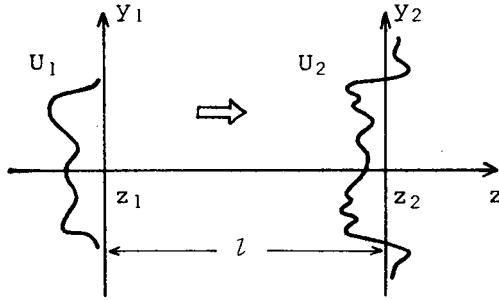


図 2.11

フレネル回折における座標系

で表わされる。³⁷⁾ u_1 が光軸 (z 軸) に対称な分布をとるときは、円柱座標で表現される式 (2.19) を z 軸の回りに積分し、

$$u_2(r) = \frac{2j\pi}{\lambda l} \exp(-jk l) \exp(-j \frac{kr^2}{2l}) \int u_1(\rho) \cdot \exp(-j \frac{\pi \rho^2}{\lambda l}) \rho J_0(\frac{2\pi r}{\lambda l} \rho) d\rho \quad (2.20)$$

$$\text{但し,} \quad \rho = \sqrt{x_1^2 + y_1^2}, \quad r = \sqrt{x_2^2 + y_2^2} \quad (2.21)$$

$J_0(x)$; 0 次のベッセル関数

をえる。

次に、ゾーンプレートによるフレネル回折を求めるための Boivin の級数展開表示を示す。光軸に平行な平面波が入射するとき半径 a の円形開口によるフレネル回折は、式 (2.20) に

$$u_1(\rho) = \begin{cases} 1 & ; 0 \leq \rho \leq a \\ 0 & ; a < \rho \end{cases} \quad (2.22)$$

を代入すれば求まる。その結果、

$$u_2 = 2j\omega \int_0^a \exp(-ju\rho^2/2) \rho J_0(v\rho) d\rho \quad (2.23)$$

$$\text{但し, } \omega \triangleq (\pi/\lambda l) \exp(-jkl) \exp(-jkr^2/2l) \quad (2.24)$$

$$u \triangleq 2\pi/\lambda l \quad (2.25)$$

$$v \triangleq 2\pi r/\lambda l \quad (2.26)$$

をえる。ここで、式(2.23)の積分を

$$x^{n+1} J_n(bx) = \frac{1}{b} \frac{d}{dx} \{ x^{n+1} J_{n+1}(bx) \} \quad (2.27)$$

但し、 $J_n(x)$; n 次のベッセル関数

の関係を用いて部分積分をくり返すと、

$$u_2 = \begin{cases} \frac{2\omega a^2}{y} \{ e^{-jz^2/2y} - e^{-jy/2} [V_0(y, z) + jV_1(y, z)] \} ; z \leq y \\ \frac{2\omega a^2}{y} e^{-jy/2} [-U_2(y, z) + jU_1(y, z)] ; z \geq y \end{cases} \quad (2.28)$$

$$\text{但し, } y \triangleq ua^2, z \triangleq va \quad (2.29)$$

³⁶⁾がえられる。ここで、 U_n 、 V_n はロンメル関数と呼ばれ、

$$U_n \triangleq \sum_{p=0}^{\infty} (-1)^p (y/z)^{n+2p} J_{n+2p}(z) \quad (2.30-a)$$

$$V_n \triangleq \sum_{p=0}^{\infty} (-1)^p (z/y)^{n+2p} J_{n+2p}(z) \quad (2.30-b)$$

と定義されるものである。

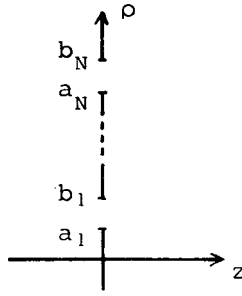


図 2.12 N個の円環状開口

次に、図 2.12 に示す N 個の同心円環状開口による回折を考える。式 (2.28) で表わされる半径 a の円形開口によるフレネル回折振幅を新たに $\phi(a)$ と書けば、円環状開口群による回折振幅 u_2 は

$$u_2 = \sum_{n=1}^N \{ \phi(b_n) - \phi(a_n) \} \quad (2.31)$$

と表わせる。ここで、各 a_n , b_n に対するロンメル関数 U , V の変数の値を統一するためにロンメル関数の相乗定理³⁶⁾ を用いると、 u_2 は

$$u_2(y, z) = \begin{cases} 2\omega \frac{\epsilon^2}{y} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m y^m}{2^m m!} [V_m(y, z) + jV_{m+1}(y, z)] \\ \quad \cdot (f_m - jg_m) & ; z \leq y \\ 2\omega \frac{\epsilon^2}{y} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{y^m}{2^m m!} [U_{2-m}(y, z) - jU_{1-m}(y, z)] \\ \quad \cdot (f_m - jg_m) & ; z \geq y \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\text{但し, } y = u\epsilon^2, z = v\epsilon \quad (2.33)$$

$$f_m - jg_m = \sum_{n=1}^N \{ [(\frac{a_n}{\epsilon})^2 - 1]^m \exp[-j(\frac{a_n}{\epsilon})^2 \frac{y}{2}] - [(\frac{b_n}{\epsilon})^2 - 1]^m \exp[-j(\frac{b_n}{\epsilon})^2 \frac{y}{2}] \} \quad (2.34)$$

と表わされる。式(2.34)で与えられる $(f_m - jg_m)$ は円環の分布 a_n, b_n と観測点の開口からの距離 ℓ のみの関数であるため、この表現は同一面上での振幅分布を数値計算するのに適当である。

2.4.3 集光特性

2.4.1で述べた構造をもつゾーンプレート・レンズ(波長 λ で焦点距離 f)による垂直入射平面波の回折を求めるには

$$a_n = \sqrt{(2n-1)\lambda f}, \quad b_n = \sqrt{2n\lambda f} \quad (2.35)$$

とし、式(2.32)でそれぞれ求まる。 $a_n < r < b_n$ ($n = 1, 2, \dots, N$)の円環からの回折振幅と $b_{n-1} < r < a_n$ ($n = 1, 2, \dots, N; b_0 = 0$)の円環からの π 位相推移した回折振幅を加え合わせればよい。

図2.13は、 $\lambda = 0.6328 \mu m$ 、直径 $2d = 1 mm$ 、 $f = 5 mm$ のゾーンプレート・レンズ(円形グレーティングの数は40)の焦点面強度分布を計算したもので、ほとんど無収差レンズの焦点面強度分布であるエアリー分布³⁹⁾

$$u_p(r)^2 = \{2J_1(R)/R\}^2 I_0 \quad (2.36)$$

$$\text{但し, } R = (2\pi d / \lambda f) r \quad (2.37)$$

I_0 : 定数

に一致した。(ゾーンプレート・レンズを構成する円形グレーティングの数が14以上であれば、焦点面強度分布のエアリー分布からのずれは中心強度の5%以下である。⁴⁰⁾従って、強度が中心の $1/2$ 、 $1/e^2$ となる所でのスポット直径をそれぞれ $2W_{1/2}$ 、 $2W_{1/e^2}$ とすれば、

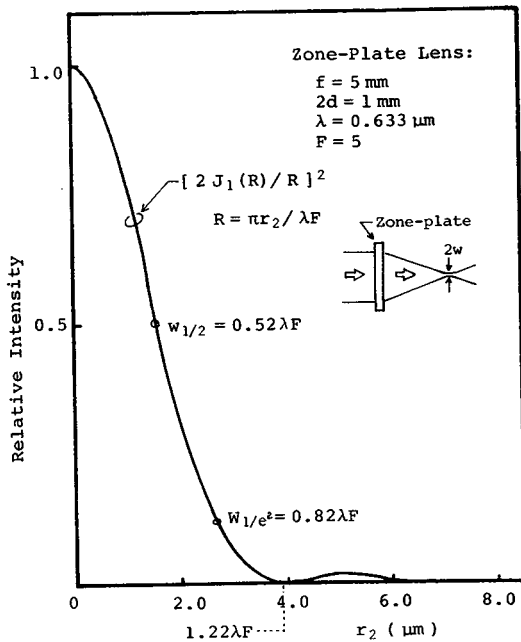


図 2.13

ゾーンプレート・レンズの焦点
面強度分布

$$2w_{1/2} = 1.03 \lambda F \quad (2.38)$$

$$2w_{1/e^2} = 1.64 \lambda F \quad (2.39)$$

が成立し、焦点面のスポット径はF数に比例することがわかる。

又、ゾーンプレート・レンズの断面位相形状は矩形状であるため、その回折特性は矩形位相グレーティングと似ている。本来の焦点距離 f に集束する波以外に、 $-f/n$ (n ; 奇数) から発散する波および f/m (m ; 1 以外の奇数) に集束する波が生じ、本来の焦点に集束する波の効率は矩形位相グレーティングと同じく 40.5% である。

2.5 フレネルレンズ^{30, 31)}

波長 λ で焦点距離 f をもつフレネルレンズの位相シフト関数を $\Delta\varphi$ とする。フレネルレンズの場合実現できる位相シフトは 0 から 2π の範囲であるから、 $\Delta\varphi$ は、図 2.14 に示すように

$$\Delta\varphi = \varphi(r) \pmod{2\pi} \quad (2.40)$$

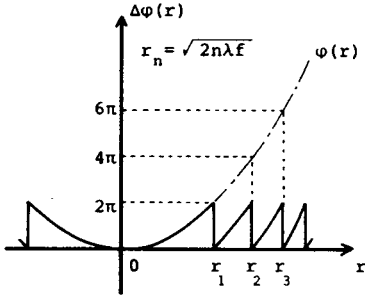


図 2.14 フレネルレンズの
位相シフト関数

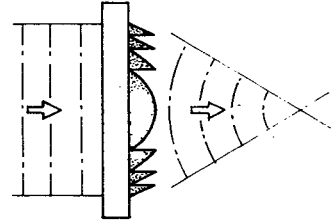


図 2.15 フレネルレンズの
断面構造

となる。²⁷⁾ここで、 $\varphi(r)$ は式(2.13)で表わされる無収差レンズの位相シフト関数である。従って、中心から m 番目の境界円半径 r_n ($n = 1, 2, \dots$)は

$$\pi r_n^2 / \lambda f = 2n\pi \quad (2.41)$$

から

$$r_n = \sqrt{2n\lambda f} \quad (2.42)$$

となる。図2.15は、 $\Delta\varphi$ をレリーフグレーティングで実現したフレネルレンズの断面構造である。

次に、フレネルレンズの集光特性について考える。フレネルレンズの平面波垂直入射時の集光特性は、その位相構造上、同仕様の無収差レンズの集光特性と一致する。無収差レンズによる集光は、レンズと同じ直径をもつ開口によって制限された集束球面波の集光と同じであるから、焦点面上での強度分布 $I(r)$ は、

$$I(r) = \{ 2 J_1(R) / R \}^2 I_0 \quad (2.43)$$

$$\text{但し, } R = 2\pi a r / \lambda f \quad (2.44)$$

$2a$; レンズ直径, I_0 ; 定数

39)
で与えられる。これはゾーンプレート・レンズの焦点面強度分布形状と一致する。又、効率普通の単レンズと同じく、100%の値が実現可能である。

2.6 結 言

本章では、マイクロ・ゾーンプレート・レンズおよびマイクロ・フレネルレンズの基礎となる薄い様周期直線状位相グレーティングの回折効率について理論的検討を行い、さらに、円形状のゾーンプレート・レンズ、フレネルレンズの集光特性について述べた。

この章の結果をまとめると次のようになる。

- 1) 矩形位相形状および鋸歯状位相形状をもつ直線状グレーティングの回折効率を与える理論式を示した。
- 2) 鋸歯状位相グレーティングについて1次回折効率の位相形状依存性を計算し、矩形位相グレーティングの最大回折効率 40.5 % を越える高効率が形状パラメータのかなり広い範囲で実現できることがわかった。
- 3) ゾーンプレート・レンズによるフレネル回折の無限級数展開式を示し、焦点面での光強度分布を計算した。この結果、ゾーンプレート・レンズは、フレネルレンズとも、無収差レンズのスポット径（回折限界）まで入射平面波を集束できることがわかった。

第3章 電子ビーム描画装置^{21,28)}

3.1 緒 言

ゾーンプレート・レンズ、フレネルレンズの作製法としては、ホログラフィによる方法⁴¹⁾、フォトリソグラフィによる方法^{26, 42)}、電子ビームリソグラフィによる方法^{24, 28)}などがある。ホログラフィの場合には、記録波長と使用波長が異なる場合の収差発生²⁰⁾や作製レンズパラメータ変更の際の光学系再調整の複雑さなどの問題点があり、又、フォトリソグラフィの場合には、レンズパターンの作図、原図の写真縮小、フォトエッチングという作製プロセスの複雑さやフォトエッチングにおけるレジスト解像度に問題点があった。これらに対し、電子ビームリソグラフィでは実寸大のレンズパターンを直接描くことができ、微細性においてもサブミクロンの解像度をえることができる。²³⁾このような特徴をもつ電子ビームリソグラフィはLSIマスクパターン作成に利用されているのはもちろんのこと、光回路素子作製にも用いられ、作製素子に関して良好な光学特性が報告されている。^{43, 44, 45)}

著者は、電子ビームリソグラフィをマイクロレンズ作製に利用するために、走査型電子顕微鏡を用いた電子ビーム描画装置を開発した。市販の電子ビーム露光装置は偏向がx軸およびy軸のみであるので、曲線は直線の階段状近似で表わされ、滑らかに描くことはできない。そこで、市販のミニコンピュータで制御される外部偏向電圧発生回路を新たに設計・付加し、レンズパターン描画に必要な電子ビームの滑らかな円状走査を可能とした。

本章では、まず、3.2で開発した電子ビーム描画装置の構成および基本動作について説明し、3.3では走査円半径校正用の標準器、3.4では装置の性能について述べる。

3.2 装置の構成

開発した電子ビーム描画装置は、走査型電子顕微鏡(日立明石製MSM102型)、ミニコンピュータ(Melcom 70/10)、自作したインターフェースと外

部偏向電圧発生回路，および測定系から構成される。電子ビームを直線状に走査するときには，著者の研究室の半田，栖原氏が作製した外部偏向電圧発生回路⁴⁶⁾を用いた。又，電子ビームを滑らかな円状に走査するための外部偏向電圧発生回路を新たに設計・試作し，自作したインターフェースを介してミニコンピュータで制御できるようにした。

3.2.1 直線状グレーティング描画時の構成

図 3.1 に直線状グレーティング描画のための描画装置の構成図を示す。この装置により，スラント（グレーティングラインの傾き）角一定な直線グレーティングの描画が可能となる。⁴³⁾以下にこの装置の基本動作を示す。

- 1) グレーティングの仕様から各走査線の y 座標 $\{y_n\}$ がコンピュータで計算され，外部記憶に一旦蓄積される。
- 2) 描画時，まず，走査線データ $\{y_n\}$ が外部記憶からミニコンピュータの

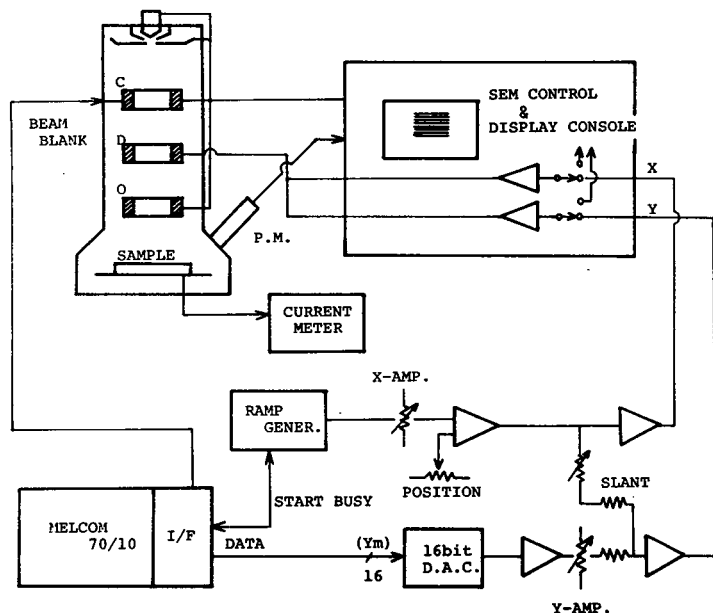


図 3.1 直線状グレーティング描画時の描画装置の構成図

主記憶へ転送される。転送完了後、各走査線の y 座標が順次主記憶から読出され、D/A変換器(16 bit)によって電子ビームの y 座標となる。

- 3) 描画中、 x 方向の走査はランプ電圧発生器によって行われる。一走査線当りの走査時間はランプ電圧波形の幅で決まり、 $100\ \mu\text{s}$ から $10\ \text{sec}$ の間に設定が可能である。又、走査線のスラント発生は y 出力にランプ出力電圧を混合することで行われる。
- 4) 描画中、コンピュータはランプ電圧発生器の BUSY 出力を常に監視し、BUSY 出力の終了とともに y 座標データの更新を行う。
- 5) 電子ビームのブランキングはコンデンサレンズの電流を変化し、集束条件を外し、ビーム径を大きくすることで行われる。

3.2.2 円形グレーティング描画時の構成

ゾーンプレート・レンズ、フレネルレンズ作製のためには、図 3.2 に示すように、電子ビームを円形に走査し、走査円半径 (r_m) と走査回数 (t_m) を制御する必要がある。図 3.3 は円形グレーティング描画のための装置の構成図であり、その動作を以下に説明する。

- 1) 焦点距離・使用波長などのレンズ仕様に従って電子ビームの走査円半径・走査回数がミニコンピュータで計算され、結果が外部記憶に一旦蓄積さ

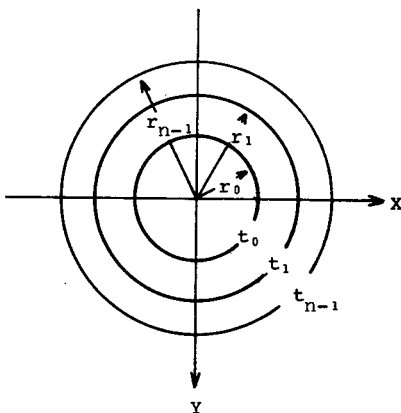


図 3.2 円形グレーティングの描画パラメータ

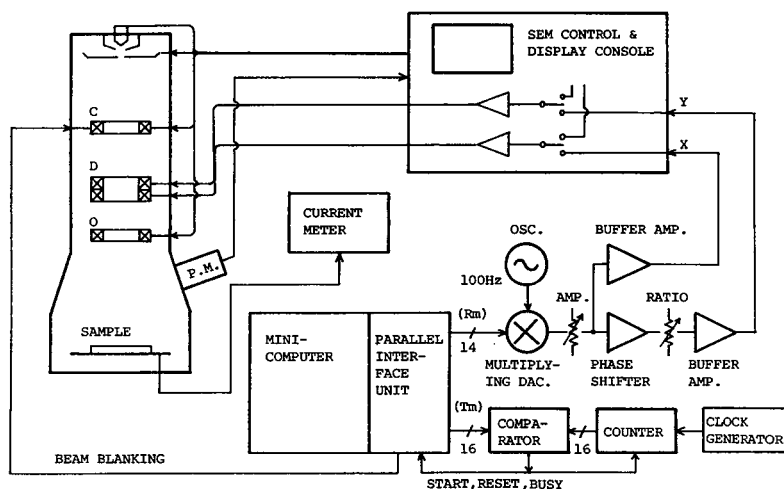


図 3.3 円形グレーティング描画時の描画装置の構成図

れる。

- 2) 描画時、走査円半径に対応するデータは14 bit の掛算型 D/A 変換器の入力に加えられる。D/A 変換器の出力には、半径に比例した正弦波電圧（100 HZ）が生じ、走査型電子顕微鏡の外部偏向入力の一つ（x 入力）に与えられる。もう一方の入力（y 入力）には、位相推移器を通した正弦波電圧が加えられ、x，y 入力間に適当な位相推移量を与えることにより、電子ビームが円形に走査される。

- 3) 走査回数に対応するデータは、コンパレータによってカウンタの内容と比較される。ミニコンピュータは常にコンパレータ出力を監視し、走査円半径、走査回数の更新を順次行う。

試作した描画装置の主な仕様を表 3.1 に示す。

3.3 標準器

描画時の走査円半径校正のために標準器を作製した。作製にはフォトリソグ

表 3.1 電子ビーム描画装置の主な仕様

Writing Area		3 x 3 mm ² (Stage fixed)
Electron Beam		Voltage : E = 15, 30 kV Current : I = 0.5~1.0 nA Diameter : 2w = 0.1~1.0 μm
Scanning	Linear	x : Analogue Scanning by Ramp Generator Scanning Time : τ = 100 μs ~ 10 sec y : Digital Scanning by 16-bit DAC
	Circular	r : Scanning by Sinusoidal Oscillator (100 Hz) (Radius values are determined by 14-bit DAC.)

ラフィを用い、以下に述べる手順で行った。まず、ストリップコート上に同心円の原図を描き、これをHRPプレート(サクラ社)上に $1/200$ に光学縮小した。なお、円の真円度が $1/1000$ 以下となるようにフォトマスクの撮影を行った。次に、ガラス基板上にフォトレジストAZ 1350 J(約1 μm厚)を塗布し、このHRPプレートをマスクに露光・現像した。標準器はこのレジストレリーフに金を数千Å真空蒸着し、電子ビームにより観測できるようにしたものである。図 3.4 は作成した標準器の写真で、各同心円の直径はそれぞれ 2.99, 2.49, 1.99, 1.55 mm (±0.005 mm) あった。又、走査型電子顕微鏡で観測したところ、レリーフのエッジのぼけは5 μm 以内であった。なお、走査円半径の校正

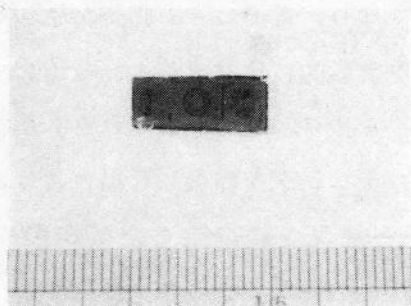


図 3.4 標準器

は、円状走査される電子ビームが標準器の円形レリーフ・エッジに一致するように x 、 y 軸偏向電圧の振幅、比、位相を調整することにより行う。電子ビームがレリーフ・エッジに一致したことは、SEMの観測用CRT上に明るい円形の輝線が生じることでわかる。

3.4 描画性能

円状走査の場合、偏向回路に用いられているD/A変換器の分解能は14bit（直線走査では16bit）である。このD/A変換器の誤差は ± 1 LSB程度であるので、最大出力電圧に対する相対誤差は $\pm 1/16000$ となる。その結果、半径1mm（この大きさがほぼ最大走査円半径）のレンズを描画する際の走査円半径の絶対誤差は $\pm 0.06\mu\text{m}$ となる。又、外部偏向電圧発生回路からのノイズは、測定の結果、出力端子において約1mV_{p-p}であった。この回路の出力振幅は約10Vであるから、最大出力振幅に対するノイズの相対的な大きさは $1/10000$ となる。最大出力振幅を半径1mmに対応させると、ノイズは走査線に $0.1\mu\text{m}$ のゆらぎを生じさせることになる。

一方、電子ビームレジストをガラス基板上に $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 塗布した場合、通常、 $1.0\mu\text{m}$ 周期の直線状グレーティングの実現は十分可能である（電子ビームレジスト自体の解像度は $10\sim 20\text{nm}$ とこれより十分小さく、解像度を悪くする原因は、主に、基板からの電子の後方散乱である²³⁾）。従って、外部偏向回路の出力ノイズによるゆらぎ、DA変換器の分解能は電子ビームレジストの解像度より十分小さく、描画面積が小さい場合には、装置の性能は $1\mu\text{m}$ 以下のパターンの描画には問題がないと結論できる。しかしながら、描画面積が大きくなる場合には、電子ビーム偏向角が大きくなり、電子ビーム収差が生じ始め、分解能に影響を与えることになる。これを実験的に検討すると、電子ビームレジストPMMA（ポリメチル・メタクリレート⁴⁷⁾）を $0.65\mu\text{m}$ 厚ガラス基板に塗布し、デューティ0.5のレリーフ・グレーティングを作製した場合には、周期 $1\mu\text{m}$ は実現可能であった。ただ、グレーティングの走査全域作製には問題があり、ほぼ全域に作製できるのは、図3.5に示すように、周期1, $2\mu\text{m}$ で

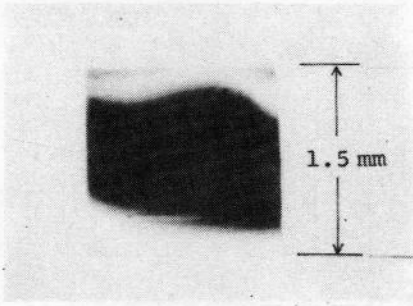


図 3.5 走査全域に作製されていない一様周期グレーティング (周期 $2\ \mu\text{m}$)

は、 $1 \times 1\ \text{mm}^2$ 程度であった。周期 $4\ \mu\text{m}$ 以上では、 $1.5 \times 1.5\ \text{mm}^2$ の領域が問題なく露光・現像できた。

最後に、電子ビームの時間的変動について測定を行った。その結果、本装置の場合、50 分の連続使用に対して $8\ \mu\text{m}$ のずれが認められた。

3.5 結 言

マイクロ・ゾーンプレート・レンズ、マイクロ・フレネルレンズ作製に適した電子ビーム描画装置を開発した。本装置は市販の走査型電子顕微鏡にミニコンピュータで制御される外部偏向電圧発生回路を付加したもので、レンズ描画に必要な電子ビームの滑らかな円状走査を可能としている。又、描画装置の性能はサブミクロンの解像度を必要とするレンズ作製に適当なものであることが示された。

計算機制御による電子ビーム描画レンズ作製技術をフォトリソグラフィ、ホログラフィによる作製技術と比較すれば、次のような特徴をあげることができる。

- 1) レンズ作製の自由度が大きく、作製プログラムの変更のみで焦点距離・使用波長などに対する仕様変更が容易にできる。
- 2) 微小なレンズが容易に作製でき、所望の素子径・焦点距離が精確に実現できる。
- 3) 実寸大のレンズパターンを直接描画するため、フォトリソグラフィに比べて作製手順が簡単である。

第4章 マイクロ・ゾーンプレート・レンズ^{24,25,28,47~50)}

4.1 緒 言

近年、光通信システム・光情報処理システムの実用化に伴い、種々の機能をもつ光回路素子が要求されるようになってきた。特にマイクロレンズは重要な光回路素子の一つであり、現在実用化されているマイクロオプティクスに広範囲に使用されはじめた。マイクロレンズには種々あるが、筆者の研究室ではホログラフィックレンズの任意の波面変換機能に注目し、これを用いた半導体レーザー・光ファイバ結合に関し理論的・実験的検討を重ねてきた¹⁷⁾。それによって幾つかの問題点が明らかになった。例えば、赤外光用ホログラフィックレンズ作製の場合には、赤外光に感度を有する適当な記録材料がないため可視光で作製せざるをえず、その結果、作製波長と使用波長の違いによる収差が生じ、レンズ焦点面上でのスポット径を十分小さくすることができなかつた²⁰⁾。又、光学系配置の制約からインライン (in-line) 型のレンズの作製が困難であった。

筆者はこのようなホログラフィックレンズの問題点を解決するために、レンズのフリンジパターンを計算機制御された電子ビームで直接描画することを検討した⁴⁷⁾。この方法はホログラフィックレンズに要求される所望のフリンジパターンを描けるため、使用波長での収差を非常に小さくできるという特徴を有する。又、レンズ設計の自由度が大きく、インライン型にもできることに加えて、作製プログラムの変更のみで焦点距離・使用波長などの仕様変更に対処できるという利点をもっている。

本章では、電子ビーム描画を用いたマイクロ・ゾーンプレート・レンズ作製法、および、試作レンズの特性測定結果について述べる。まず、4.2では、電子ビームレジストおよび試料作製手順について説明する。次に、4.3では、予備実験として一様周期直線状レリーフグレーティングを作製し、露光条件・最大回折効率・レジスト分解能を調べた。4.4では、これらを基に可視光および赤外光用マイクロ・ゾーンプレート・レンズを作製し、集光特性・波面収差・効率について測定を行った。最後に、4.5では、電子ビーム描画法のマイクロ・

レンズアレイ，円筒型レンズ作製への応用について述べる。

4.2 試 料

4.2.1 電子ビームレジスト^{23,51,52)}

電子ビームレジストによる透過型レリーフグレーティングを作製する上でレジストに必要な特性としては，1)高分解能，2)使用波長において透明であること，3)高感度，4)安定であること，などが上げられる。種々の電子ビームレジストの中でポリメチル・メタクリレート (PMMA) は、感度が他のレジストに比べて若干低い ($2 \times 10^{-4} \text{ C/cm}^2$) 点を除けば上記の条件に合致し，なによりも入手が容易であった。これらの理由から著者はグレーティング作製用レジストとして PMMA を採用した。

PMMA は非常に大きな分子量をもつアクリル樹脂であり，可視領域での屈折率は $1.49^{53)}$ ，透明である。PMMA に電子ビームが照射された場合，各モノマーを接続する炭素-炭素鎖が切断され，分子量が低下する。このため現像液に対する溶解性に変化が生じ，電子ビーム照射により炭素鎖が短くなった部分の溶解度が大きくなる (ポジ形)。PMMA の現像液としては，メチルイソブチルケトン (MIBK)，メチルイソブチルケトンとイソプロピルアルコール (IPA) の混合液，エチルアルコールがあるが，⁵²⁾ 著者は MIBK と IPA の 1 : 3 又は 1 : 1 混合液を用いた。

次に PMMA 溶液の作成法について述べる。使用した PMMA はデュポン社のエルバサイト 2041 (粉末) である。これをメチルイソブチルケトンとモノクロルベンゼン (MCB) の 1 : 1 (体積比) 混合液に溶かすことによって PMMA 溶液をえた。PMMA 溶液の濃度が 7 ~ 10 % (重量比) の場合，50℃，48 時間の湯浴により PMMA は完全に溶解する。なお，MIBK の比重 (d_{20}^{20}) は 0.8042，MCB の比重 (d_{20}^{25}) は 1.105 である。

作製した 7 % および 10 % PMMA 溶液のガラス基板に対する塗布特性，即ち，塗布膜厚とスピナー回転数の関係を図 4.1 に示す。膜厚測定には 4.2.2 で述べる手順で作製した試料を用いた。この試料に電子ビームの一樣照射を行い，現

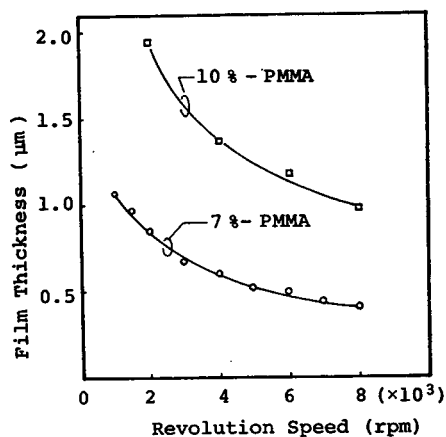


図 4.1 PMMAのスピンナー塗布特性

像後の凹部（電子ビーム被照射部）の縁の深さを干渉顕微鏡で測定した。

実験条件を以下に示す。

基 板：パイレックス（#7740）ガラス，表面研磨済

$17 \times 17 \text{ mm}^2$

スピナー：1000～8000回転/分，60秒

露 光：一様露光（ドーズ； $2.5 \times 10^{-4} \text{ C/cm}^2$ ）

現 像：MIBK + IPA（1：3）混合液中で60秒の攪拌

その後，IPAでリンス

4.2.2 作製手順

試料の作製手順を以下に示す。

i) 基板洗浄

- ① 中性洗剤を基板にたっぷりかけ，綿棒により表面を十分こする。
- ② 中性洗剤による超音波洗浄
- ③ フィルタを通した流水で洗剤を洗い流す。
- ④ 重クロム酸混液に6時間以上浸す。

（重クロム酸混液は50%（体積比）希硫酸による重クロム酸カリウムの過飽和溶液の上透みである。）

- ⑤ フィルタを通した流水によるリンス

⑥ 精製水による超音波洗浄

⑦ アセトンによる超音波洗浄

ii) 基板のベーキング (150℃, 30分)

iii) スピナーによる電子ビームレジストの塗布

: 基板の温度が常温になったら直ちに行う。

iv) レジストのプリベーキング (170℃, 1時間)

v) 金薄膜の真空蒸着

: 電子ビーム露光中の試料の帯電を防止するための導電膜として金をレジスト上面に蒸着する。膜厚は約200Åである。

プリベークされた後のPMMAは安定なので, かなりの期間(1ヶ月)放置しても問題はない。ただ, 金を蒸着したまま放置すると, 露光後, 金がエッチング液で除去されない場合があるので注意を要する。なお, ガラス基板としてはBond Optics社のパイレックスガラス(#7740, 表面研磨済, 1.5 mm厚)を $17 \times 17 \text{ mm}^2$ に切って用いた。以後の実験にもすべてこれを用いている。

4.3 一様周期グレーティングによる予備実験

マイクロ・ゾーンプレート・レンズは矩形状の断面をもつ同心の円形グレーティングから構成されている。そこで, これを作製する前に透過型一様周期直線状レリーフグレーティングを電子ビーム描画法で作製し, 露光・現像条件, レジスト分解能, 実現できる最大回折効率を確かめた。

4.3.1 露光・現像条件

作製する一様周期直線状グレーティングは図4.2に示すようなPMMAの露光・現像後の矩形状レリーフ溝を利用したレリーフグレーティングである。PMMA膜が十分薄く, 式(2.1)で与えられる Q が1より小さいとき, このグレーティングには2.2の理論が適用できる。PMMAの膜厚を d_f , PMMAと空気の屈折率差を Δn , 垂直入射する入射波の波長を λ とすれば, グレーティングが入射平面波に与える位相差 θ は

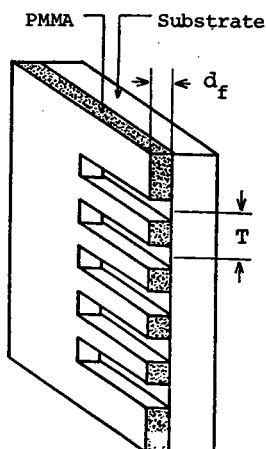


図 4.2 一様周期直線状レリーフグレーティングの構造

$$\vartheta = (\Delta n d_f / \lambda) \cdot 2\pi \quad (4.1)$$

で与えられる。1次回折効率 η_1 を最大 (0.405) とする条件は、式 (2.6) で与えられるように $\theta = \pi$ 、 α (デューティ) = 0.5 であるから、最大回折効率を与える膜厚は

$$d_f = \lambda / 2 \Delta n \quad (4.2)$$

となる。波長 $0.633 \mu\text{m}$ で PMMA と空気の屈折率差は 0.490 であるから、この波長での最適膜厚は

$$d_f = 0.645 \text{ (}\mu\text{m)} \quad (4.3)$$

である。

次に、一様周期レリーフグレーティング作製における露光・現像条件について説明する。まず、作製グレーティングの仕様を以下に示す。

面 積 : $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$

周 期 : $T = 1, 2, 4, 5, 10, 20, 50 \mu\text{m}$

デューティ : $\alpha = 0.5$

膜 厚 : $d_f = 0.65 \mu\text{m} (0.55, 0.75 \mu\text{m})$

又、作製時の露光条件は次の通りである。

ビーム加速電圧： $E = 30 \text{ kV}$

ビーム電流 ： $I = 0.5 \text{ nA}$

ビーム径 ： $2w = 0.2 \sim 0.3 \text{ } \mu\text{m}$

ドーズ ： $Q_D = 2.0 \times 10^{-4} \text{ C/cm}^2$

走査線間隔 ： $\Delta d = 0.1 \text{ } \mu\text{m}$

電子ビーム走査線一本当たりの走査時間 τ によってドーズを制御した。グレーティングラインの長さを L とすれば、

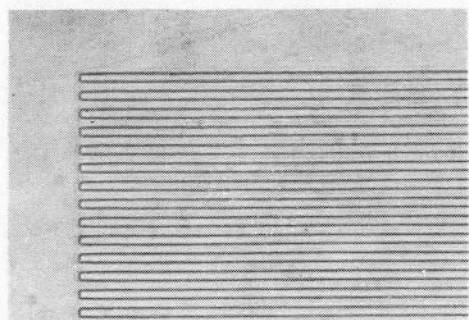
$$Q_D = I\tau / L \Delta d \quad (4.4)$$

が成立するから、 τ は

$$\tau = Q_D L \Delta d / I \quad (4.5)$$

で与えられる。上記露光条件の場合、 τ は 600 ms となり、グレーティング 1 個当たりの露光時間は 75 分であった。

露光終了後、試料表面の金蒸着膜をエッチ液（水 100g にヨウ化カリウム 20g，ヨウ素 1g を加えたもの）で除去し、MIBK と IPA の 1 : 3（体積比）混合液で 20°C ，60 秒の攪拌現象を行った。図 4.3 は作製したグレーティングの顕微鏡写真である。



($T = 4 \text{ } \mu\text{m}$)

図 4.3 作製した一様周期レリーフグレーティング

4.3.2 回折効率測定

4.3.1 で説明した一様周期レリーフグレーティングに He-Ne レーザ光（ λ

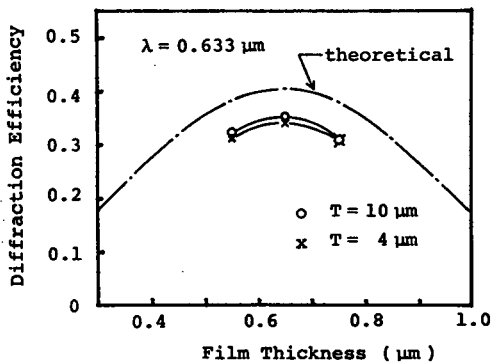


図 4.4 1 次回折効率の PMMA 膜厚依存性

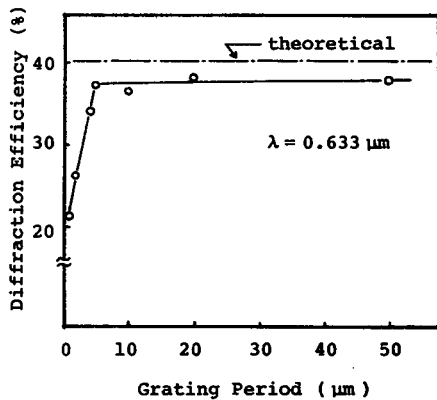


図 4.5 1 次回折効率のグレーティング周期依存性

$\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ ビーム径 $2w_1/e^2 \approx 1 \text{ mm}$) を垂直入射させ、回折効率を測定した。図 5.4 は、PMMA 膜厚 d_f を最適膜厚 $0.65 \mu\text{m}$ 前後で変化させた場合の 1 次回折効率測定結果であって、膜厚 $0.65 \mu\text{m}$ で $34 \sim 35\%$ の 1 次回折効率 (空気境界面でのフレネル反射による損失を考慮したグレーティング自身の 1 次回折効率) が得られた。このときの偶数次の回折波の効率は 1 次回折効率の 3% 以下と極めて小さかった。理論的には偶数次の回折波は生じない。

図 4.5 は膜厚を $0.65 \mu\text{m}$ に固定してグレーティング周期を $1 \mu\text{m}$ から $50 \mu\text{m}$ まで変えたときの 1 次回折効率測定結果であり、周期 $4 \mu\text{m}$ 以上に対しては 1 次回折効率が $34 \sim 38\%$ と理論的 (40.5%) に近い値を示した。グレーティング周期が小さくなると電子の後方散乱や近接効果⁵¹⁾の影響でレジストみぞの形状を正確に制御することが難しくなってくる。図 4.5 において周期 $4 \mu\text{m}$

以下で効率の低下が生じているのはこのためと考えられる。露光量・現像時間を厳密に制御すれば更に効率の向上が期待できるが、今回の実験では周期 $1\mu\text{m}$ で 20% 以上の効率を得られることがわかった。

4.4 マイクロ・ゾンプレート・レンズ

電子ビーム描画によるマイクロレンズ作製法は、レンズが必要とするフリッジパターンを直接描くため、使用波長において収差の非常に小さなレンズが得られるという特徴をもっている。本節では、このレンズの基本的特性を確認するために波長 $0.6328\mu\text{m}$ 、 $1.064\mu\text{m}$ 用マイクロ・ゾンプレート・レンズを作製し、集光特性・効率を測定した。

4.4.1 作 製

図 4.6 に電子ビーム描画によるゾンプレート・レンズ作製の様子を示す。図において、電子ビームは円状に走査され、4.2.2 で述べた手順で作製した試料上にゾンプレート・レンズのパターンが描かれる。露光される部分は式 (2.15) で与えられる r_{2m-1} と r_{2m} ($m=1, 2, 3, \dots$) の間であり、露光終了後、この部分が現像除去され、図 4.7 に示すような矩形断面をもつゾンプレート・レンズができ上がる。PMMA 膜厚は、波長 $0.633\mu\text{m}$ で効率が最大となるように $0.65\mu\text{m}$ に設定し、露光・現像条件は 4.3 の一様周期直線状グレーティングと同じであった。図 4.8 に作製した波長 $0.6328\mu\text{m}$ 用、直径 1mm 、

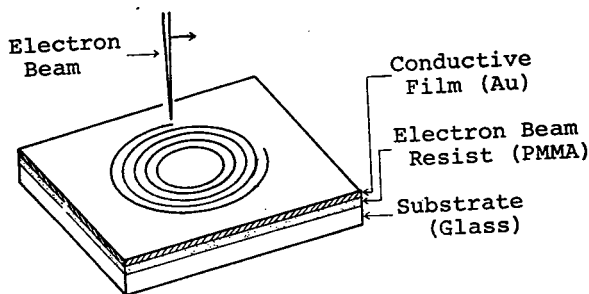


図 4.6 電子ビーム描画によるゾンプレート・レンズ作製の様子

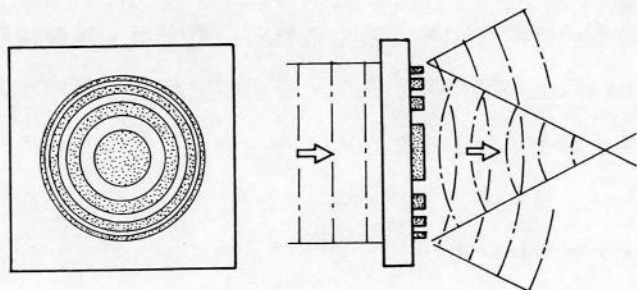


図 4.7 ゾーンプレート・レンズの構造

焦点距離 5 mm のレンズの顕微鏡写真を示す。このレンズの周辺でのグレーティング最小周期は $6.3\text{ }\mu\text{m}$ ，円形グレーティングの総数は 40 である。又，図 4.9 は波長 $0.6328\text{ }\mu\text{m}$ 用，直径 0.4 mm ，焦点距離 0.26 mm のレンズであり，グレーティングの最小周期は約 $1\text{ }\mu\text{m}$ ，グレーティング総数は 214 である。

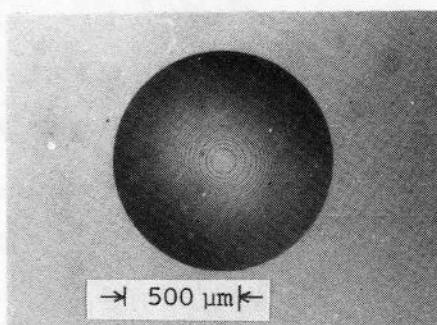


図 4.8 作製したマイクロ・ゾーンプレート・レンズ
($f=5\text{ mm}$ ， $2d=1\text{ mm}$ ； $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$)

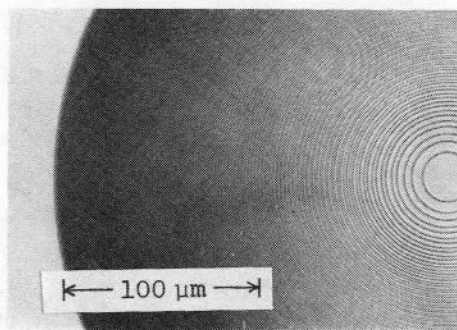
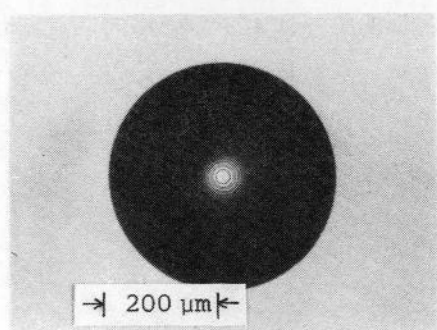


図 4.9 作製したマイクロ・ゾーンプレート・レンズ
($f=0.26\text{ mm}$ ， $2d=0.4\text{ mm}$ ； $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$)

4.4.2 特性測定

ここでは、作製レンズの焦点面強度分布、波面収差、および効率の測定結果について述べる。

まず、作製レンズに He - Ne レーザ光を垂直入射させて焦点面での光強度分布を測定した。測定系を図 4.10 に示す。測定には、焦点面光強度分布を拡大

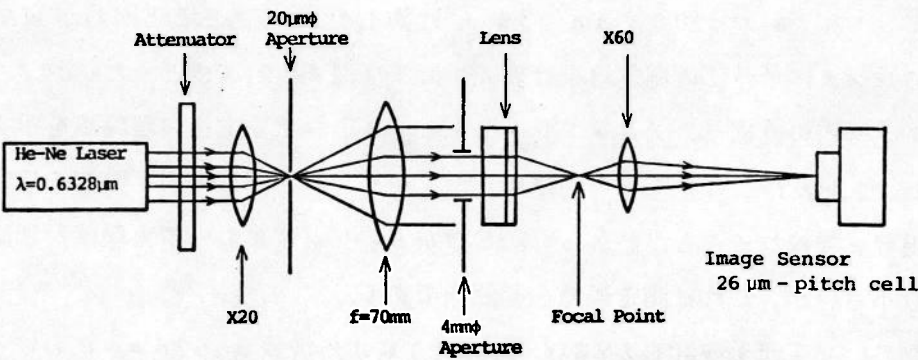
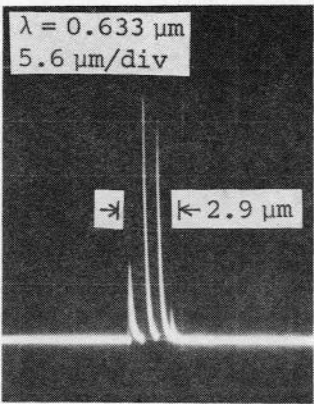
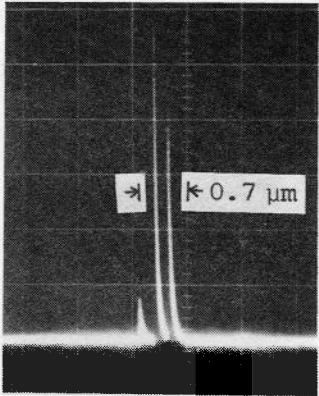


図 4.10 スポット径測定系



($f = 5\text{ mm}$, $2d = 1\text{ mm}$)



($f = 0.26\text{ mm}$, $2d = 0.4\text{ mm}$)

図 4.11 イメージセンサで測定した焦点面での光強度分布
(包絡線が焦点面での強度分布を表わす)

するための顕微鏡用対物レンズ（20倍，60倍）とイメージセンサ（松下ME-L512K，画素間隔 $28\mu\text{m}$ ）を用いた。図4.11(a)は図4.7に示したレンズ（A； $f=5\text{mm}$ ， $2d=1\text{mm}$ ）の焦点面で得られた結果であり，このパルス出力波形の包絡線が強度分布プロファイルを示す。又，図4.11(b)は図4.8に示したレンズ（D； $f=0.26\text{mm}$ ， $2d=0.4\text{mm}$ ）のものである。

図4.11(b)のパルス間隔が $0.46\mu\text{m}$ に対応していることから，このレンズのスポット径 $2W_{1/2}$ は約 $0.7\mu\text{m}$ ， $2W_{1/e^2}$ は約 $1.1\mu\text{m}$ であることがわかった。他のレンズについての測定結果は表4.1および図4.12にまとめた。図4.12のグラフ内の直線は，ゾーンプレート・レンズのスポット径の理論値を示す式（239）を表わしており，今回作製したマイクロレンズは入射平面波をほぼ回折限界まで絞れることがわかった。F数が5のレンズにおいて実験値が理論値より小さいが，これは測定誤差の範囲内である。

次に，レーザ干渉計（ZYGO ZAPP）による波長 $0.6328\mu\text{m}$ におけるゾーンプレート・レンズ（A； $f=5\text{mm}$ ， $2d=1\text{mm}$ ）の波面収差測定結果を図4.13に示す。図4.13(a)は参照球面波とこのゾーンプレート・レンズによって集束される波面との干渉縞を示したものの，図4.13(b)は波面収差を等高線表示したものである。波面収差（被測定波面の理想波面からのずれの量）は最大 0.266 波長，平均 0.054 波長と極めて小さく，Rayleighの $4\frac{1}{5}$ 波長則⁵⁴⁾が

表 4.1 作製レンズの仕様・性能

Lens	f (mm)	2d (mm)	λ (nm)	$2W_{1/2}$ (μm)	$2W_{1/e^2}$ (μm)	η
A	5	1	0.633	2.9 (3.3)	4.6 (5.2)	0.31
B	0.8	0.4	0.633	1.3 (1.3)	2.0 (2.1)	0.31
C	0.4	0.4	0.633	1.0 (0.65)	1.6 (1.0)	0.30
D	0.26	0.4	0.633	0.7 (0.42)	— (0.67)	0.20
E	5	1	1.064	7.4 (5.5)	12.9 (8.7)	0.19

※ ()はスポット径の理論値を示している。

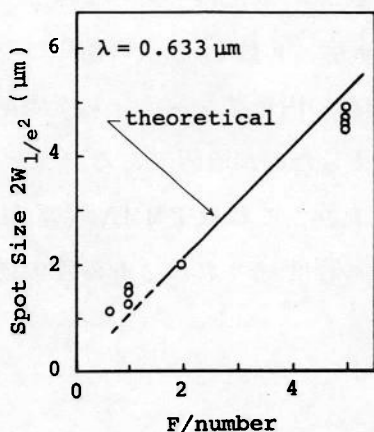
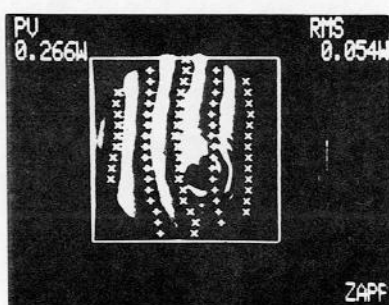


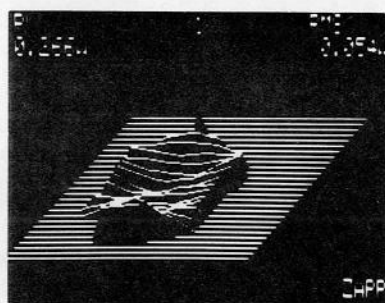
図 4.12 作製レンズの F 数とスポット径の関係

らも収差に関しては問題がないといえる。又、この結果は、作製したゾンプレート・レンズが入射平面波を回折限界まで集光できるという特性に対応している。

最後に、効率測定結果について述べる。効率は図 4.10 に示したスポット径測定系において、イメージセンサの代わりにピンホールと Si フォトダイオードを置くことで測定した。効率はレンズに入射する光パワーと焦点においたピンホールを通過した光パワーの比として求め、各レンズについて測定した結果を表 4.1 の右側に示す。ここで測定に用いたピンホールの実効的な直径は、F 数が 5 のレンズの場合 $50 \mu m$ 、F 数が 2 以下のレンズの場合 $6.6 \mu m$ であり、スポット径の数倍とした。



(a)



(b)

図 4.13 マイクロ・ゾンプレート・レンズの波面収差，
(a)；参照波面との干渉縞，(b)；波面収差の等高線表示

表 4.1 をみると、波長 $0.6328 \mu m$ 用で F 数が 1 以上のレンズでは 30 % の効率がえられた。レンズ D (波長 $0.6328 \mu m$ 用, F 数 0.65) の効率は 20 % と F 数が 1 以上のものより低い。これは周辺部の円形グレーティング周期が $1 \mu m$ と小さいため、周辺の効率が下がってしまったのが原因である。又、波長 $1.06 \mu m$ 用レンズ (E) の効率が 19 % であったが、これは PMMA 膜厚が波長に対して適当でなかったためで、膜厚を $1 \mu m$ 程度にすれば 30 % 程の効率がえられると思われる。

4.5 応 用

4.5.1 マイクロ・レンズアレイ

マイクロ・レンズアレイの用途としては、複写機、ファクシミリの等倍率結像系¹²⁾があり、現在、主として屈折率分布型ロッドレンズアレイが使われつつある。電子ビーム描画法によれば、このようなレンズアレイの作製が容易に行える。図 4.14 はその一例で、波長 $0.6328 \mu m$ 用・焦点距離 $5 mm$ のレンズを 3 個重ねたものである。これに He - Ne レーザ光を照射し集光状態を観測したが、モアレの影響はなく図のような 3 つのスポットを得ることができた。

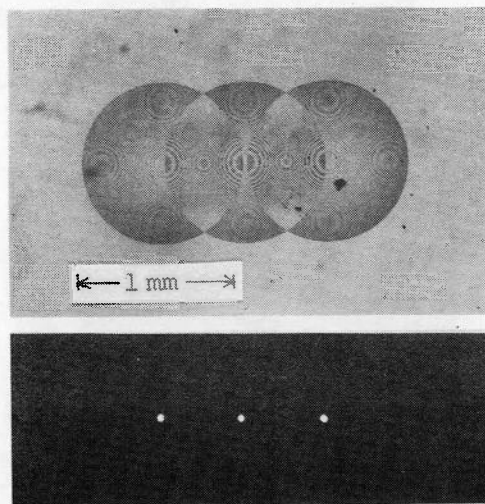


図 4.14 ゾーンプレート・レンズによるマイクロ・レンズアレイとそのスポット
($f = 5 mm$; $\lambda = 0.6328 \mu m$)

4.5.2 円筒型マイクロレンズ

1次元の円筒型ゾーンプレート・レンズの作製にも電子ビーム描画法は有効である。波長 λ で焦点距離 f をもつ円筒型ゾーンプレート・レンズの作製においては、4.4で述べたゾーンプレート・レンズの境界円半径 r_m (式(2.15))を x_m とし、

$$x_m = \sqrt{m\lambda f} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.6)$$

x_{2m-1} と x_{2m} の間を露光すればよい。レンズは x 方向に周期の変化する直線状レリーフグレーティングから構成されることになる。

図4.15に作製レンズ($f = 5\text{ mm}$, $\lambda = 0.6328\text{ }\mu\text{m}$)の顕微鏡写真を示す。このレンズにHe-Neレーザ光を垂直入射させ、焦点面上の光強度分布を測定した。測定には像拡大用顕微鏡対物レンズ(60倍)とTVカメラ(撮像管E5001)を用いた。入射光は x 方向のみの回折作用をうけるために、図4.15(a)のように線状に集光される。図4.16(b)は、TVカメラの映像信号を取り出し、図4.16(a)の横方向の強度分布をCRT上に表示したものである。円筒型のゾーンプレート・レンズの場合、理論上のスポット幅 $2w_{1/2}$ (半値全幅)は、式(4.7)で与えられる。⁴⁴⁾

$$2w_{1/2} = 0.88 \lambda F \quad (4.7)$$

$$F \equiv f / 2d$$

但し、 $F = f / 2d$ $2d$: レンズの幅

このレンズの場合 $2w_{1/2}$ の実測値は $3.8\text{ }\mu\text{m}$ であり、式(4.7)で与えられる回折限界のスポット幅 $2.8\text{ }\mu\text{m}$ に近い値がえられた。又、効率率は35%であった。

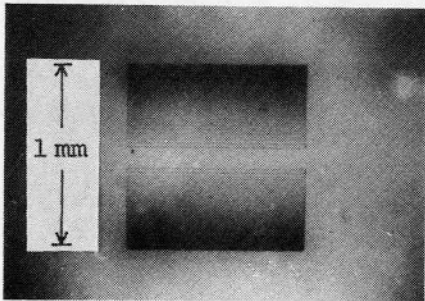


図 4.15 円筒型ゾーンプレート・レンズの顕微鏡写真
($f = 5\text{ mm}$; $\lambda = 0.6328\text{ }\mu\text{m}$)

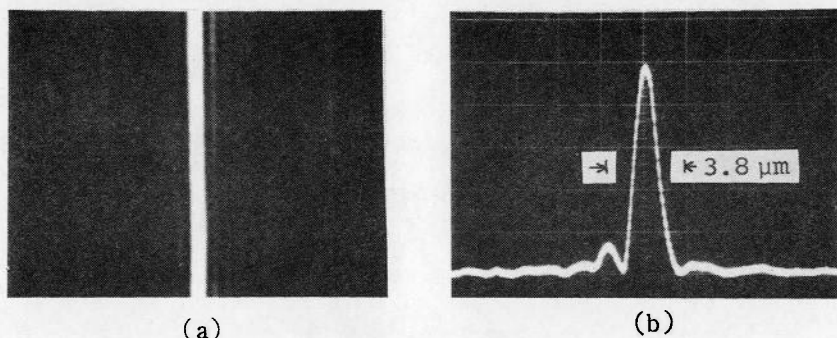


図 4.16 円筒型ゾーンプレート・レンズの焦点面光強度分布，
(a)；TV モニタ 像，(b)；映像信号のトレース

4.6 結 言

電子ビーム描画法を用いてマイクロ・ゾーンプレート・レンズを作製し，試作レンズのすぐれた集光特性を確認することができた。

まず，予備実験として電子ビームレジスト PMMA を用いた矩形断面形状をもつ一様周期グレーティングの作製を行い，周期 $4\ \mu\text{m}$ 以上で 34～38% の 1 次回折効率が実現できた。これは理論的最大回折効率 40.5% に極めて近い値である。又，作製可能な最小グレーティング周期が $1\ \mu\text{m}$ 程度であることを実験的に示した。

次に，ゾーンプレート・レンズの作製を行い，1 以上の F 数で約 30% の効率（理論値は 40%）とほぼ回折限界まで絞れるすぐれた集光特性を確認した。さらに，スポット径の極小化を試み，波長 $0.633\ \mu\text{m}$ 用で F 数が 0.65，スポット径（半値全幅）が約 $0.7\ \mu\text{m}$ のレンズの作製が可能であることを示した。

最後に，電子ビーム描画法のレンズアレイ・円筒型レンズ作製への応用について言及した。

電子ビーム描画作製によるマイクロ・ゾーンプレート・レンズは，他のマイクロレンズと比較すると，

- 1) レンズ作製の自由度が大きく，レンズ径・使用波長・焦点距離などの仕様変更が容易である。

2) 微小なレンズが作製でき，所望の素子径・焦点距離が精確に実現できる。

3) 使用波長における収差が非常に小さい。

4) レリーフ型なので複製が容易にできる。

などの特長を有する。

第5章 マイクロ・フレネルレンズ^{30,31,55,56,57)}

5.1 諸 言

第4章で説明したマイクロ・ゾーンプレート・レンズは入射平面波をほぼ回折限界まで絞れるすぐれた集光特性を示したが、一方、図5.1(a)に示すような矩形断面の円形位相グレーティングによって構成されることから、理論上効率を40%以上にはできないという問題点があった。効率改善の一方法として、レンズを構成するグレーティングの断面形状を図5.1(b)に示すように鋸歯状にする(ブレードする)ことが考えられ、この方法を用いれば^{2,3}で述べたように100%の効率が理論的には可能となる。このような断面形状をもつレンズをJordanらはキノフォーム・レンズ^{27, 42)}と名付け、フォトリソグラフィ技術を用いて作製した。その後キノフォーム作製法に関していくつかの報告があるが、^{58, 59)}いずれもゾーンプレート状パターン^{58, 59)}の光学的記録法を用いている。又、分光器用のブレードドグレーティング作製法^{60, 61)}に関して種々研究されており、ルーリングエンジンによる方法、ホログラフィックな干渉縞記録法^{60, 61)}などがある。更に、イオンビームエッチングでブレードドグレーティングを作製する方法も報告されている。⁶²⁾

著者は電子ビーム描画法を用いて鋸歯状の断面形状をもつブレードドグレー

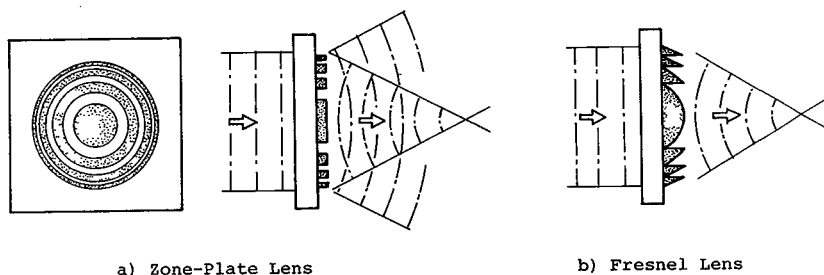


図5.1 ゾーンプレート・レンズ、フレネルレンズの構造

ティングおよびフレネルレンズを作製した。レンズ作製法は、1) レンズのレリーフ形状を計算し、レジストのエッチング特性測定結果に基づいて半径に対する電子線露光量分布を決定する、2) 計算機制御された電子ビームでレンズパターンを描画する、3) レジストの現像を行う。この方法では電子線露光量の多少がレジストのエッチング速度を決めるため、適当な露光量分布を与えれば図 5.1 (b) のような構造が実現できる。

本章では、まず、5.2 で電子ビーム描画を用いた透過型ブレードグレーティング作製法について説明する。次に、5.3 では、同様な方法で作製したフレネルレンズの特性測定結果について述べる。

5.2 ブレード化一様周期直線状グレーティング

ゾーンプレート・レンズは矩形断面をもつ円形レリーフグレーティングから構成されている。このレンズの断面形状を鋸歯状に変えて入射波に 2π の位相遅れを与えられる溝深さを実現できれば、理論的には 100% の効率が実現可能となる。このような形状のフレネルレンズを作製する前に、ブレード化に必要な電子線露光量とレジストのエッチ深さの関係を実験的に求め、一様周期ブレードグレーティングを作製した。作製グレーティングの Q (式 (2.1)) は 1 より小さく、その回折効率に関しては 2.3 の理論が適用できる (Q が 1 より大きくなる場合には、形状を考慮した厳密な回折理論の適用が必要である。^{63, 64)})。

5.2.1 作製手順

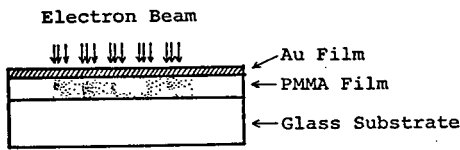
電子ビーム描画によるブレードグレーティング作製法について以下に説明する。

i) ガラス基板の洗浄

： 4.2.2 で述べた方法によりパイレックスガラス基板の表面洗浄を行う。

ii) 電子ビームレジスト PMMA のスピナーによる塗布

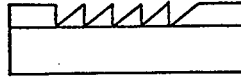
： レジスト膜厚がレリーの深さに等しく、レリーの深さが入射波面に与える位相差が 2π に等しくなるようにレジスト膜厚 d_f を



a) E. B. Exposure



b) Au Etching



c) Development

図 5.2 ブレーズドグレーティング作製手順

$$d_f = \lambda / \Delta n \quad (5.1)$$

但し、 λ ; 入射波の波長

Δn ; レジストと空気の屈折率差

とする。波長 $0.6328 \mu m$ で PMMA ($n_0 = 1.49$) を用いるとき、 d_f は $1.29 \mu m$ となる。10% PMMA 溶液を用いた場合、 $d_f = 1.29 \mu m$ をえるためのスピナ回転数は 4500 回転/分であった。

Ⅲ) 電子ビーム露光中の帯電防止のための金薄膜の真空蒸着

Ⅳ) 電子ビームによるグレーティングパターンの抽画 (図 5.2 (a))

: 現像後のレリーフ断面が鋸歯状になるように露光量を制御しながらグレーティングを抽画した。露光量の制御は同じ座標位置での電子ビーム走査回数を変化させることで行い、グレーティング 1 周期中での露光量分布は前もって測定された各周期毎 (周期 5, 10, 20, 50 μm) の化学エッチング特性に基づいた。PMMA の化学エッチング特性については 5.2.3 で説明する。露光の際の電子ビーム加速電圧は 30 KV, ビーム電流は 0.5 nA, ビーム径は $0.2 \mu m$, 走査線間隔は $0.1 \mu m$, である。

V) 金薄膜のエッチング (図 5.2 (b))

vi) 現像 (図 5.3 (c))

：メチルイソブチルケトンとイソプロピルアルコールの1：1（体積比）
混合液（10℃）で60秒の攪拌現像を行った。露光量の多少に応じて
レジストのエッチング速度が異なり、露光・現像条件が適当であれば
図 5.2 (c) に示すような鋸歯状レリーフ断面がえられる。現像終了後、
イソプロピルアルコールでリンスを行う。

5.2.2 PMMA 薄膜の化学エッチング特性

グレーティングを抽画する際、グレーティング周期が数 μm と小さくなると
電子ビームのパターン間近接効果⁵¹⁾（抽画図形間隔が狭い場合、両側の図形内
からの電子線散乱が重なり合う現象）が顕著になり、同じ露光量であっても周
期によってレジストのエネルギー吸収分布が異なってくる。又、エネルギー吸
収分布の形状が相似であったとしても、周期によってレジスト凹部（被露光部）
から現像液中への溶解速度は異なってくると予想される。そこで、いくつかの
周期でグレーティングを抽画し、現像後の断面形状を走査型電子顕微鏡（SEM）
で観測することによって電子ビーム露光量とエッチング深さの関係を実験
的に求めた。作製グレーティングの仕様および露光・現像条件は以下に示す通
りである。

周 期： $T = 5, 10, 20, 50 \mu m$

膜 厚： $d_f = 1.3 \mu m$ （10% PMMA 溶液，4500 回転/分）

大きさ： $0.1 \times 1.5 mm^2$ （ $T = 5, 10, 20 \mu m$ ）

$0.25 \times 1.5 mm^2$ （ $T = 50 \mu m$ ）

※
露光量： $0.32 \times 10^{-4} \sim 2.0 \times 10^{-4} C/cm^2$ （ $T = 5 \mu m$ ）

$0.5 \times 10^{-4} \sim 1.7 \times 10^{-4} C/cm^2$ （ $T = 10, 20, 50 \mu m$ ）

現 像：MIBK + IPA（1：1）現像液

※露光量は座標に対して直線的に変化させた。

図 5.3 は作製した特性測定用直線グレーティングの断面 SEM 写真である。
これらの図から各周期での電子ビーム露光量とエッチ深さの関係を求めた。そ

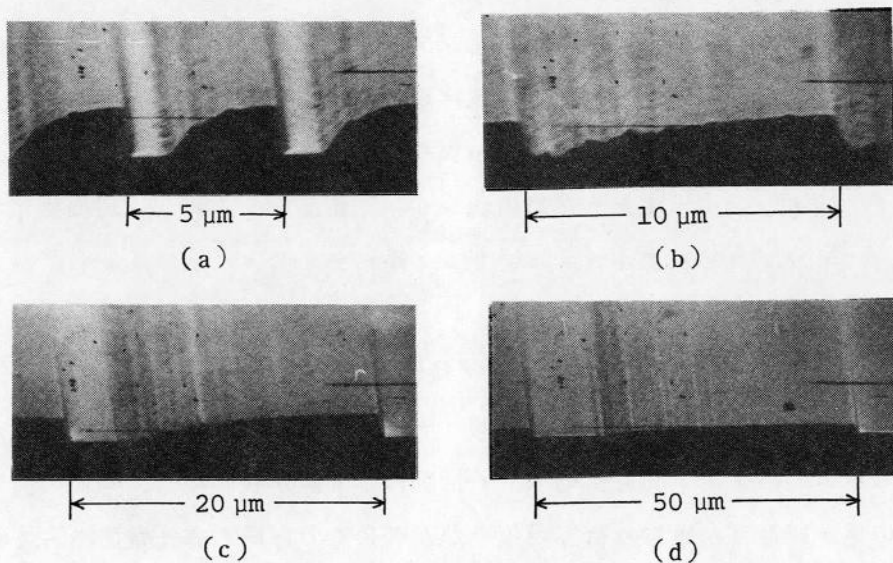


図 5.3 PMMA 化学エッチング特性測定用グレーティングの断面 SEM 写真,
(a) 周期 $5\ \mu\text{m}$, (b) $10\ \mu\text{m}$, (c) $20\ \mu\text{m}$, (d) $50\ \mu\text{m}$

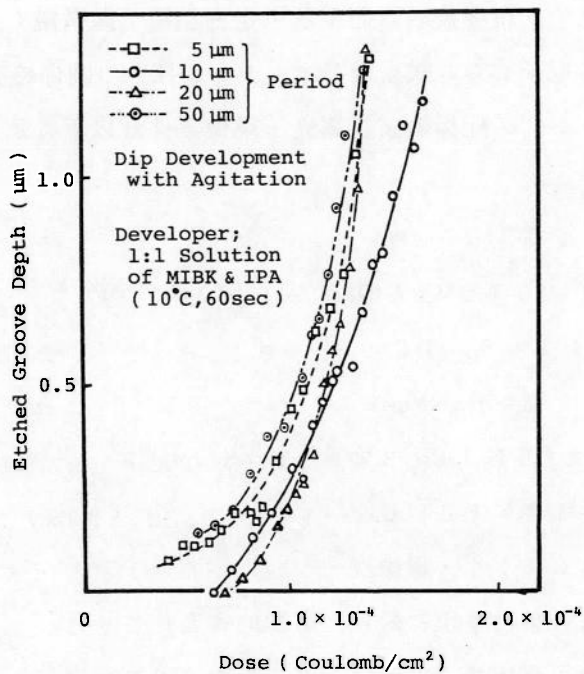


図 5.4 PMMA の化学
エッチング特性

の結果を図 5.4 に示す。例えば、周期 $10\ \mu m$ のブレードグレーティング作製の場合には、このグラフに従い露光量を $0.61 \times 10^{-4}\ C/cm^2$ から $1.7 \times 10^{-4}\ C/cm^2$ の間で変化させれば良い。

5.2.3 直線状グレーティング作製

5.2.2 で実験的に求めた PMMA の化学エッチング特性に基づいて露光・現像後のレジスト断面形状が鋸歯状になるように露光量分布を決定し、ブレードグレーティングを作製した。PMMA 膜厚は $1.3\ \mu m$ で、周期 $5, 10, 20, 50\ \mu m$ について作製したグレーティングの断面 SEM 写真を図 5.5 (a) ~ (d) に示す。図からわかるように、各周期とも完全にエッチングされておらず、最深部の深さは周期 $5, 10, 20, 50\ \mu m$ でそれぞれ $0.35, 0.98, 0.56, 0.45\ \mu m$ であった。この現象は、特に溝の浅い周期 $5, 20, 50\ \mu m$ のグレーティングにおける 1 次回折効率低下の最大の原因となる。周期 $10\ \mu m$ のグレーティングの溝深さが特に深いのは、図 5.4 のグラフからわかるように、こ

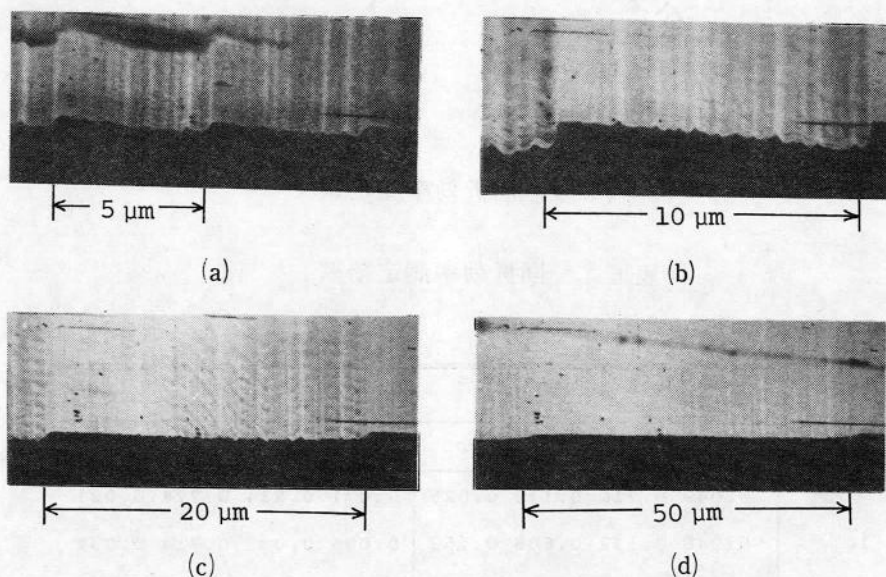


図 5.5 作製したブレードグレーティングの断面 SEM 写真,
(a) 周期 $5\ \mu m$, (b) $10\ \mu m$, (c) $20\ \mu m$, (d) $50\ \mu m$

の周期のドーズが他の周期に比べて多いことが原因となったようだ。又、各周期のグレーティングとも斜面に周期 $0.5\ \mu m$ 前後の直線上の凸凹がみられる。この電子ビーム走査方向に生じた溝は入射・回折光の散乱の原因となり、回折効率に悪影響を与えられと考えられるが、生じる機構については現在検討中である。

5.2.4 回折効率測定

5.2.3で作製したブレードグレーティングの回折効率測定を行った。図 5.6

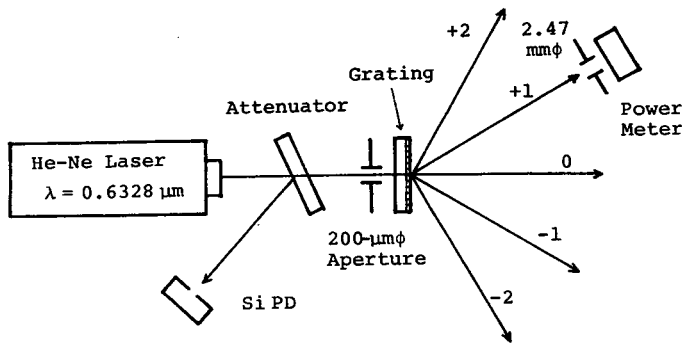


図 5.6 回折効率測定系

表 5.1 回折効率測定結果

T (μm)	$\tau_p = 60\ sec$				$\tau_p = 80\ sec$			
	η_{-1}	η_0	η_1	η_2	η_{-1}	η_0	η_1	η_2
5	0.049	0.710	0.112	0.026	0.071	0.534	0.224	0.021
10	0.046	0.132	0.606	0.158	0.006	0.032	0.714	0.032
20	0.072	0.595	0.187	0.013	0.104	0.329	0.368	0.014
50	0.076	0.457	0.274	0.019	0.078	0.237	0.480	0.012

τ_p ; developing time

に測定に用いた光学系を示す。図において、Si フォトダイオードは He - Ne レーザ光パワーの時間的変動を検出するのに用いた。回折効率⁵¹⁾は回折光パワーと $200\ \mu\text{m}$ の入射開口を通る光パワーの比をとった。測定結果を表 5.1 に示す。又、効率測定後、更に 20 秒の追加現像を行った場合の測定結果も合わせて表 5.1 に示す。

He - Ne レーザ垂直入射に対する 1 次回折効率としては、周期 $10\ \mu\text{m}$ で 61 % (追加現像によって 71 %) の値が実現できた。4.3 で述べた矩形断面をもつレリーフグレーティングの場合、実験で最大回折効率が 36 ~ 38 % (理論最大回折効率は 40.5 %) であったのと比較して、ブレース化により、十分な効率改善が可能であることが実証できた。他の周期 ($T = 5, 20, 50\ \mu\text{m}$) における効率改善は不十分であった (しかし、追加現像により更に効率は増加すると予想される)。これは、既に 5.2.3 で述べたように、グレーティングの深さが最適深さ ($1.3\ \mu\text{m}$) に致らなかったのが第 1 の原因である。実際、図 5.5 の断面図から求められる深さを持ち、断面が完全な鋸歯状であるグレーティングの 1 次回折効率を計算すれば、それらは 11 % (周期 $5\ \mu\text{m}$) , 82 % ($10\ \mu\text{m}$) , 19 % ($20\ \mu\text{m}$) , 43 % ($50\ \mu\text{m}$) となる。周期 $5, 20\ \mu\text{m}$ に関して上記の計算結果は表 5.1 の測定結果とほとんど一致し、この事は、エッチング不足が 1 次回折効率低下の原因であることを示している。

エッチング不足の主たる原因は露光量分布の不適当さにあると思われる。図 5.4 に示した PMMA の化学エッチング特性を得るために用いた試料においては、図 5.5 の断面 SEM 写真で基板表面が露出していることからわかるように、完全エッチングに必要な量以上の最大露光量が与えられている。余分な露光量を与えられた部分は露光量の少ない部分の実効的な露光量を増加させるパターン内近接効果⁵¹⁾を生じさせるので、あるエッチング深さをえるために必要な露光量は少なくみつもられる。このため、上述のエッチング不足を招いたものと考えられる。

上記測定実験終了後、露光量分布を若干修正してグレーティングを作製したが、再現性に問題があった。現在までに得られた 1 次回折効率の最大値は、60 % (周期 $5\ \mu\text{m}$) , 71 % ($10\ \mu\text{m}$) , 60 % ($20\ \mu\text{m}$) , 62 % ($50\ \mu\text{m}$)

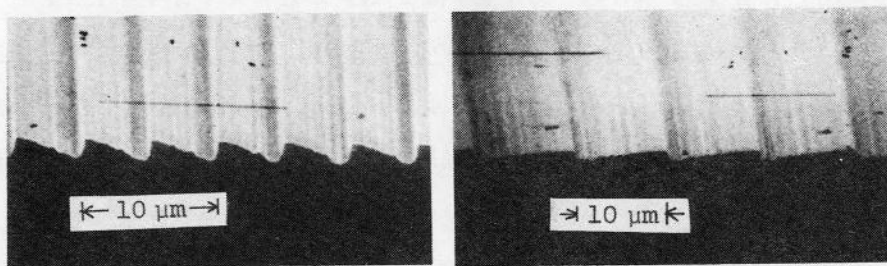


図 5.7 ブレーズドグレーティングの断面 S E M 写真,

(a) 周期 $5\ \mu\text{m}$, (b) $10\ \mu\text{m}$

である。図 5.7 にこの場合の周期 5 および $10\ \mu\text{m}$ のブレーズドグレーティングの断面 S E M 写真を示す。このようにかなり正確な鋸歯形状が得られていることがわかる。今後、より再現性の高い高効率ブレーズドグレーティング作製のためには、露光量に対するエッチング深さの変化がゆるやかな (r 値の小さい) レジストの採用や、より安定な現像方法 (例えば、バブル法⁶⁵⁾) の利用が必要と考えられる。

5.3 ブレーズ化マイクロ・フレネルレンズ

2.5 ではフレネルレンズの位相構造および集光特性の基礎理論を示したが、本節では電子ビーム描画法で作製したマイクロ・フレネルレンズの特性測定結果について述べる。作製フレネルレンズは鋸歯状断面をもつ円形レリーフグレーティングから構成されており、レリーフ構造により集光に必要な位相シフトを実現している。

5.3.1 作製

式 (2.5) で与えられるフレネルレンズの位相シフト関数 $\Delta\phi$ を実現するレリーフの深さ $d(r)$ は、 d_f (式 (5.1)) を用いて

$$d(r) = (d_f / 2\pi) \Delta\phi \quad (5.2)$$

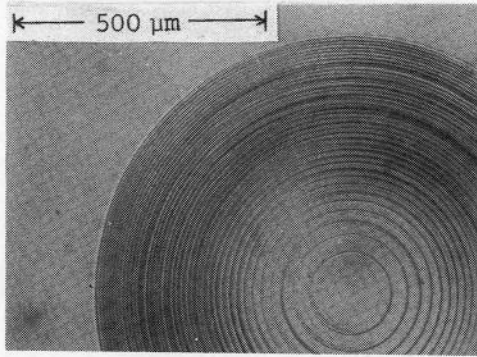


図 5.8 作製したマイクロ・フレネルレンズ
($f=5\text{mm}$, $\lambda=0.6328\text{ }\mu\text{m}$)

と書ける。5.2.3 でえられた電子ビーム露光量とレジストエッチング深さの関係を基に $d(r)$ に対応する露光量分布を計算し、使用波長 $0.6328\text{ }\mu\text{m}$ 用で焦点距離 5mm 、直径 1mm のフレネルレンズを作製した。作製方法は電子ビームを円状に走査した以外は 5.2 のブレードグレーティング作製法と全く同じであり、露光・現像条件も同じである。図 5.8 に作製レンズの顕微鏡写真を示す。このレンズの輪帯の数は 39、最外周でのグレーティング周期は $6.4\text{ }\mu\text{m}$ 、電子ビーム電流 0.5 nA で露光時間は約 30 分であった。

5.3.2 特性測定

〔効率・スポット径〕 ビーム径を拡大した He-Ne レーザ光の一部(直径 1mm) を作製レンズに入射させ効率を測定した。えられた効率は最大 50% で、ゾーンプレートレンズの理論的最大効率 40.5% を上回る値であった。効率が理論値 100% の半分程度であったのは、顕微鏡で観測した限りにおいて現像が一樣でなく一部が完全にはエッチングされていないのが原因と考えられる。

次に、焦点面上の光強度分布を 60 倍に拡大して TV カメラ(撮像管 E5001) で観測した。図 5.9 に焦点面上の光強度分布を示す。図 5.9 (a) からは入射平面波がほぼ円形に集光されているのがわかる。作製レンズのスポット径 $2W_{1/2}$ (強度の半値全幅) の実測値は $4.2\text{ }\mu\text{m}$ であり、レンズ仕様を式 (2.38) に代入してえられる理論値(回折限界) $3.3\text{ }\mu\text{m}$ に近い値を示した。

〔焦点深度〕 レンズによって集束される平面波は、レンズと同じ直径の円形開口によって制限された集束球面波と同じである。この集束球面波の光軸(

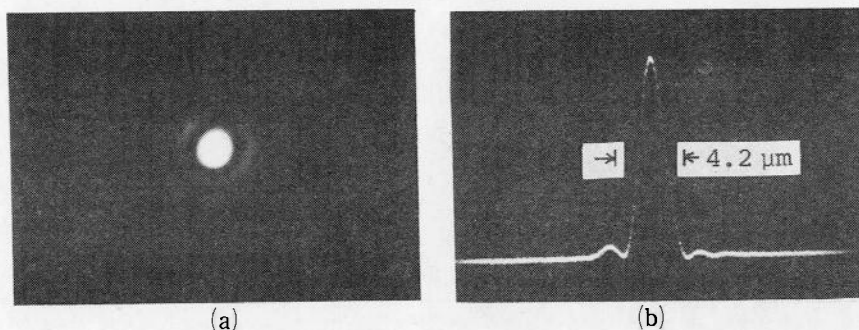


図 5.9 作製フレネルレンズの焦点面での光強度分布,
(a)TV モニタ像, (b)TV カメラ映像信号のトレース

z 軸)上の強度分布 $I(u)$ は,

$$I(u) = \{ \text{sinc}(u/4) \}^2 I_0 \quad (5.3)$$

$$u/4 = \pi d^2 z / 2\lambda f \quad (5.4)$$

但し, I_0 : 定数, $2d$: 開口直径, z : 開口からの距離

で与えられる。従って, 中心強度が焦点の 80%となる点と焦点の間隔 Δz は,

$$\Delta z \cong \pm 2\lambda (f/2d)^2 \quad (5.5)$$

となる。⁶⁶⁾ 作製レンズの仕様を上式に代入すれば, $\Delta z \cong \pm 32 \mu m$ となり, 測定値も $\pm 30 \sim 40 \mu m$ とほぼ一致した。

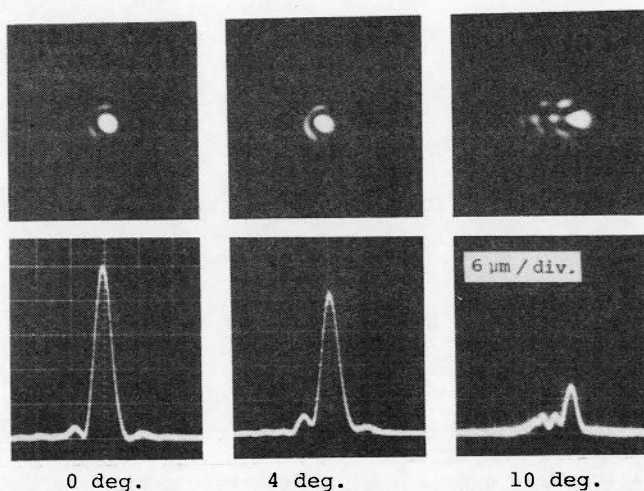


図 5.10
スポット形状の入射角依存性,
(a)入射角 0 度,
(b) 4 度, (c) 10 度

〔斜め入射特性〕 平面波を作製レンズに斜め入射させたときの焦点面上でのスポット形状観測を行った。図 5.10 に入射角がそれぞれ 0 度, 4 度, 10 度のときのスポット形状を示す。測定から入射角がほぼ 5 度以内であれば, スポット径・スポット形状ともほとんど変化しないことがわかった。レンズの F 数が変わればスポット形状の入射角依存性も変化すると考えられるが, それは今後の検討課題である。

〔色収差〕 モノクロメータで分光したハロゲンランプ光を作製レンズに垂直入射させて, 焦点距離・スポット形状の波長依存性を測定した。式 (2.41) からわかるように, フレネルレンズは, 入射波長 λ と焦点距離 f の積が一定ならゾーンの境界円半径 r_m は変化しない。従って λ とは異なる波長 λ' での焦点距離を f' とすれば,

$$\lambda' f' = \lambda f \quad (5.6)$$

が成立する(もちろん, 波長が変われば効率は変化する。)。図 5.11 に示すように, 実際測定した焦点距離も波長に対して式 (5.7) とほとんど同じ変化を示した。図中の一点鎖線は同一仕様のガラス単レンズ(アッベ数⁶⁷⁾ = 50) の特性を示しており, このレンズの焦点距離の波長依存性は普通のガラス単レンズと比較して 10 倍以上大きいといえる。

次に, スポット径の波長依存性であるが, 式 (2.42), (2.43) からわかる

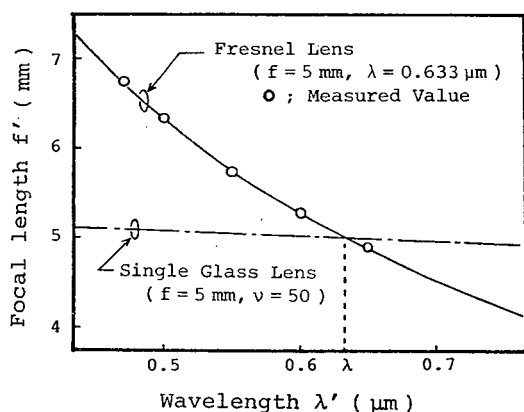


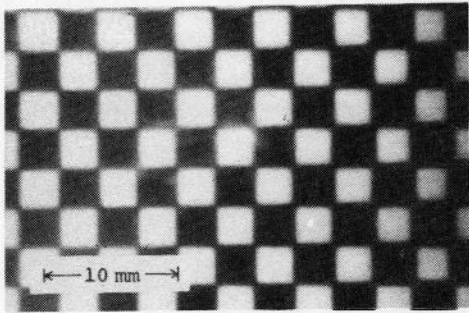
図 5.11 作製フレネルレンズの焦点距離の波長依存性

ように、通常レンズのスポット径は λf に比例する。フレネルレンズでは λf が一定であるから、設計波長近辺ではそのスポット径は入射波長に依存しないと考えられる。測定の結果、スポット径の波長依存性はほとんど認められなかった。

〔歪曲〕 図 5.12 (b) に示す光学系を用いてフレネルレンズの結像特性を調べた。測定は、干渉フィルタ、拡散板を通して単色化した水銀ランプ光でメッシュパターン (100 μm 間隔) を照明することで行い、メッシュの実像を作製レンズで写真フィルム上に結像させた。図 5.12 (a) にフィルム上に結像された像のほぼ全視野を示す。測定では像の歪曲はほとんど認められず、単一波長での結像にこのフレネルレンズを使用することに問題はないことが確認できた。

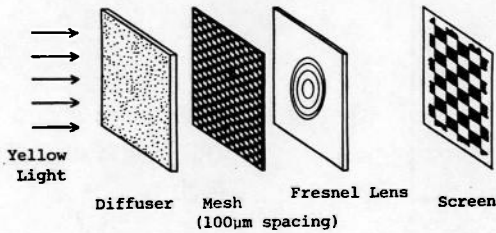
5.3.3 円筒型フレネルレンズ

4.5.2 では円筒型ゾーンプレート・レンズの作製およびその特性について述



(Magnification Power ; x 27)

(a)



(b)

図 5.12

作製フレネルレンズによるメッシュパターンの結像，
(a)スクリーン上の像，
(b)光学系

べたが、電子ビームによるブレイズ化法を用いると円筒型フレネルレンズの作製が可能となる。円筒型フレネルレンズのレリーフ形状は一方向（ x 方向）のみの関数であり、 x に関して式（5.2）で与えられるよう変化させればよい。

図 5.13 に作製した円筒型フレネルレンズ（波長 $0.6328\ \mu\text{m}$ 用，焦点距離 5mm ）の顕微鏡写真を示す。更に、このレンズのレリーフ形状を触針式表面粗さ計で測定した結果を図 5.14 に示す。図からある程度の鋸歯状断面がえられているのがわかるが、周期に対する鋸歯形状の不均一性が認められ、これは効率低下の原因の一つになっている。実際、効率の測定値は 60.5% であった。又、円筒フレネルレンズのスポット幅 $2w_{1/2}$ は、円筒型ゾーンプレート・レンズと同様に、式（4.7）で与えられる⁴⁴⁾。図 5.15 に示すように、このレンズのスポット幅 $2w_{1/2}$ の実測値は $3.8\ \mu\text{m}$ であり、理論値 $2.8\ \mu\text{m}$ に近い値がえられた。なお、測定には像拡大用顕微鏡対物レンズ（ 60 倍）と TV カメラを用いた。

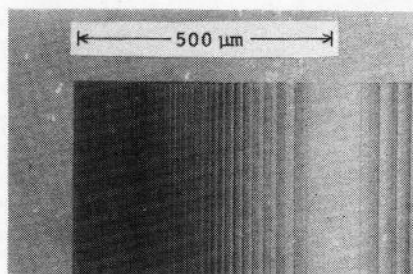


図 5.13 円筒型フレネルレンズ
（ $f=5\text{mm}$ ； $2d=1\text{mm}$ ）

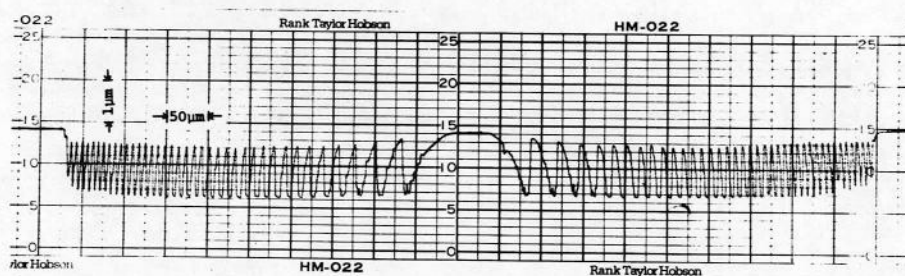


図 5.14 作製した円筒型フレネルレンズのレリーフ形状

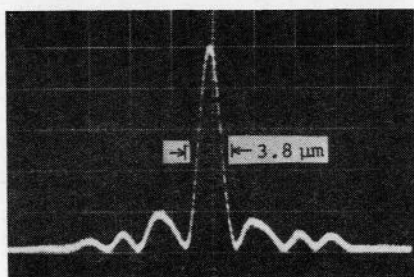


図 5.15 円筒型フレネルレンズ
($f = 5\text{mm}$; $2d = 1\text{mm}$)

5.4 結 言

電子ビーム描画法により電子ビームレジストにブレードグレーティングが作製できることを確認し、この技術を用いて鋸歯状のレリーフ断面をもつマイクロ・フレネルレンズを作製した。

まず、測定したPMMA薄膜の化学エッチング特性を基に一様周期ブレードグレーティング(周期5, 10, 20, 50 μm)を作製した。作製グレーティングは波長0.6328 μm で60%以上の1次回折効率を示したが、鋸歯状レリーフ形状の再現性に依然問題を残している。

次に、マイクロ・フレネルレンズ(焦点距離5 mm, 直径1 mm)の作製を行い、ほぼ回折限界まで絞れるすぐれた集光特性と50%の効率が実現できた。効率50%はゾーンプレート・レンズの最大効率を上回る値であり、これにより、電子ビームによるブレード化法のマイクロレンズ高効率化における有用性が実証された。又、フレネルレンズの理論的最大効率は100%であるが、今後、現像・露光条件のより精密な制御、再現性のある現像法の採用、 γ 値の小さなレジストの採用などによって効率の改善が可能であると考えられる。

第6章 強度分布変換用ゾーンプレート・レンズ^{68,69,70)}

6.1 緒 言

アレイ光検出器を用いたレーザ・レーダ⁷¹⁾などの光信号処理システム、レーザ・プリンタ⁷²⁾に代表されるレーザ記録系、レーザ加工機⁷³⁾などにおいては、図6.1に示すように、レーザの基本モードであるガウス強度分布を中心部の強度が一樣で急峻なロールオフ特性をもつ強度分布に変換する光学素子が必要とされる場合がある。

このような素子を実現する方法としてはいくつかあるが、非球面による反射や屈折を利用する方法^{74, 75)}、ビーム積分器による方法⁷⁶⁾、回折を利用する方法^{17, 77, 40, 78)}が代表的なものである。ところで、1番目の方法では非球面の実現が困難かつ高価であるという問題点があり、2番目の方法では、ビーム径が小さいと回折による損失、干渉による強度分布の乱れが生じるという問題点がある。これらに対し、グレーティングの回折を利用する方法は素子自体が簡単で、作製が容易である。筆者は、電子ビーム描画によるゾーンプレート・レンズ作製技術を用い、回折を強度分布変換機能に利用するゾーンプレート型素子の検討を行った。作製に用いた電子ビーム描画法は所望の縞パターンを描けるため、光学的干渉縞記録法では困難な任意の複素振幅透過率分布を素子上に実現できる特徴をもっている。

本章では、図6.1に示すような強度分布変換機能を有する特殊なゾーンプレート・レンズの設計およびその特性について述べる。まず、6.2では、ガウス

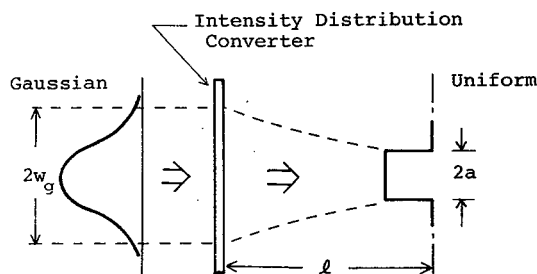


図 6.1 強度分布変換用レンズの機能

強度分布を一様な強度分布に変換するために素子に要求される複素振幅透過率について検討する。次に、6.3では、計算された透過率分布をゾーンプレートで実現する方法について述べる。6.3では、He - Neレーザ光用の強度分布変換用レンズを試作し、変換特性を測定した。その結果、焦点面上にほぼ設計通りの一様な強度分布を得ることができた。最後に、6.5では、この素子の変換効率改善法について言及する。

6.2 理論的検討

本節では、強度分布変換用ゾーンプレート・レンズの動作原理、強度分布変換に必要な複素振幅透過率分布、および、素子径・ビーム径が出力強度分布形状に与える影響について考察する。

6.2.1 動作原理

図6.2に示すように、素子に照明光Cが照射された時、素子からℓ離れた面上で u_1 なる振幅分布を得ようとする場合を考える。この場合、まず、光の伝搬方向を逆にして u_1 からの回折を考え、 u_1 の複素共役である u_1^* のフレネル回折を U_2^* とする。次に、光の伝搬方向を元に戻し、 u_2^* の複素共役 $u_2 = F(u_1)^*$ ($F(u)$ は u のフレネル回折を示す)のフレネル回折(距離ℓ)を考えると、式

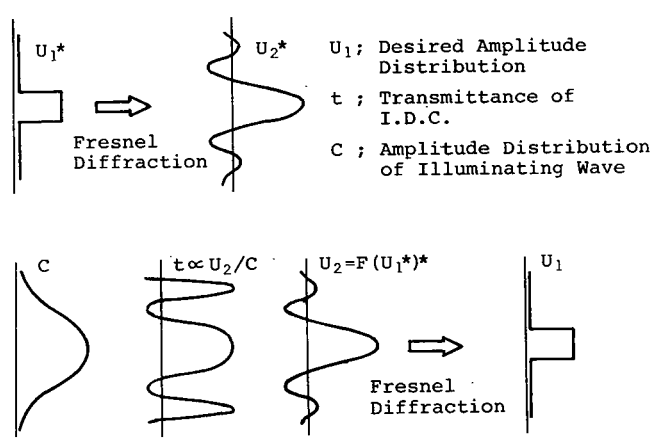


図 6.2 強度分布変換の原理

(2.19) で与えられるフレネル回折積分の性質から $u_2 = F(u_1^*)$ のフレネル回折が u_1 となることが容易に導かれる。従って、素子から距離 l 離れた面上に u_1 なる振幅分布を得たい場合、素子直後の振幅分布は $F(u_1^*)^*$ であればよい。素子に入射する照明光の素子上での振幅分布を C とすれば、素子に必要な複素振幅透過率 t は、

$$t = \text{const.} \times F(u_1^*)^* / C \quad (6.1)$$

で与えられる。

6.2.2 複素振幅透過率の決定

図 6.1 に示したように、ガウシアンビームを素子から距離 l 離れた面上で一樣な強度分布をもつスポットに集束する素子の複素振幅透過率を計算する。

得ようとするスポットの直径を $2a$ とすれば、焦点面上の振幅分布 $U_1(r)$ の絶対値は

$$|u_1(r_1)| = \begin{cases} A_0 & ; 0 \leq r_1 \leq a \\ 0 & ; a < r_1 \end{cases} \quad (6.2)$$

但し、 A_0 ; 定数

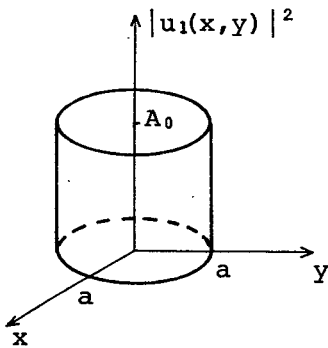


図 6.3 焦点面強度分布の理論形状

で与えられる。今問題としているのは強度分布であるから、位相は任意に与えられる。そこで、フレネル積分が実行しやすいように $u_1(r_1)$ を次式のように決めた。

$$u_1(r_1) = \begin{cases} A_0 \exp(-jkr_1^2/2L) & ; 0 \leq r_1 \leq a \\ 0 & ; a < r_1 \end{cases} \quad (6.3)$$

但し、 $k (=2/\lambda)$; 波数

次に、 $u_1(r_1)^*$ に対するフレネル回折 $F(u_1^*)$ を計算する。 $F(u_1^*)$ は上式を式(2.19)に代入すれば求められ、

$$F(u_1^*) = 2\pi K_1 \exp(-jkr_1^2/2L) \cdot \int_0^\infty u_1(r_1)^* \exp(-jkr_1^2/2L) J_0\left(\frac{2\pi r_1 r_2}{\lambda L}\right) r_1 dr_1 \quad (6.4)$$

$$= 2\pi a^2 A_0 K_1 \exp(-j \frac{kr_1^2}{\lambda L}) \text{Airy}\left(\frac{2\pi a r_2}{\lambda L}\right) \quad (6.5)$$

$$\text{但し、Airy}(x) \equiv J_1(x)/x \quad (6.6)$$

($J_1(x)$: 1 次のベッセル関数)

$$K_1 \equiv j \exp(-jkL)/\lambda L \quad (6.7)$$

となる。⁷⁹⁾ 照明光はガウスビームであるから、振幅 $1/e$ でのビーム直径を $2W_G$ とすれば、照明光の振幅分布 C は

$$C = C_0 \exp(-r_1^2/w_G^2) \quad (6.8)$$

但し、 C_0 ; 定数

で表わされる。従って、式(6.1), (6.5), (6.8)から一様な強度分布をもつスポットを得るために素子に必要な複素振幅透過率 $t(r_2)$ は

$$t(r_2) = K_2 \cdot \frac{\exp(jkr_2^2/2l) \text{Airy}(2\pi ar_2/\lambda l)}{\exp(-r_2^2/w_G^2)} \quad (6.9)$$

但し, K_2 ; 定数

と表わされる。

6.2.3 素子径・ビーム径が出力強度分布に与える影響

素子径が無限大であれば、素子の焦点面上には半径方向にステップ状に変化する強度分布が得られるはずであるが、実際の素子では径が有限であるために出力強度分布に歪みが生じる。この節では、素子径が有限であることの出力強度分布形状への影響、および、入射ビーム径に対する出力強度分布形状のゆらぎについて検討を行う。

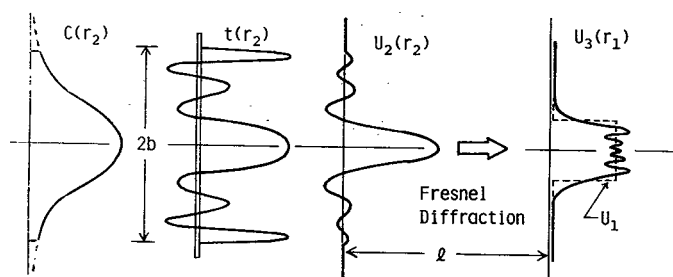


図 6.4 素子径が有限の場合の出力強度分布

図 6.4 に示すように、素子半径を b とすれば式 (6.9) で与えられる $t(r_2)$ は b によって制限される。従って、照明光 C を入射させたときの素子直後の振幅分布 $u_2(r_2)$ は

$$u_2(r_2) = C \cdot t(r_2)$$

$$= \begin{cases} K \exp(j \frac{kr_2^2}{\lambda l}) \text{Airy}(\frac{2\pi ar_2}{\lambda l}); 0 \leq r_2 \leq b \\ 0 & ; b < r_2 \end{cases} \quad (6.10)$$

但し, K_3 ; 定数

で与えられる。焦点面上の振幅分布 $u_3(r_1)$ は $u_2(r_2)$ を式(6.4)のようにフ
レネル積分すればよいから, $u_3(r_1)$ は

$$u_3(r_1) = 2\pi K_1 \exp(-j \frac{kr_1^2}{2l}) \int_0^\infty u_2(r_2) \exp(-j \frac{kr_2^2}{2l}) \\ \cdot J_0(2\pi r_1 r_2 / \lambda l) r_2 dr_2 \quad (6.11)$$

$$= \frac{\lambda l K_1 K_3}{a} \exp(-j \frac{kr_1^2}{2l}) \\ \cdot \int_0^b J_1(\frac{2\pi ar_2}{\lambda l}) J_0(\frac{2\pi r_1 r_2}{\lambda l}) dr_2 \quad (6.12)$$

と表わされる。ここで座標の正規化のため

$$p = 2\pi a / \lambda l, \quad q = 2\pi r_1 / \lambda l \quad (6.13)$$

とおくと,

$$u_3(r_1) = \text{const.} \times p \int_0^b J_1(pr_2) J_0(qr_2) dr_2 \quad (6.14)$$

となり, $pr_2 = x$ とおけば, u_3 は

$$u_3(r_1) = \text{const.} \times \int_0^{pb} J_1(x) J_0(\frac{r_1}{a} x) dx \quad (6.15)$$

と簡単な形で表わされる。ところで、式(6.9)からわかるように素子の透過率は $J_1(pr_2)$ のゼロ点 b_m ($m=1, 2, 3, \dots$) 毎に π 位相シフトを経験する ($b_m = Z_m/p$, Z_m ; $J_1(Z)$ の m 個目のゼロ点。 b_{m-1} と b_m に囲まれる円環状の領域を m 番目のゾーンとすれば、素子が m 個のゾーンからできている場合、式(6.15)は

$$u_3(r_1) = \text{const.} \times \int_0^{pb_m=Z_m} J_1(x) J_0\left(\frac{r_1}{a}x\right) dx \quad (6.16)$$

と変形できる。この式から、焦点面上の強度分布の (r_1/a) に関する形状はゾーン数 m だけで決定されることがわかる。

式(6.16)を用いて $m=3, 5, 10$ について焦点面上の強度分布 $|u_3(r_1)|^2$ を計算した。その結果を図6.5に示す。又、図6.6にゾーン数 m と強度分布の立上りとの関係、および、ゾーン数 m とリップルの関係を示す。ここで、立上りは $r_1=a$ 付近で強度が10%から90%に増加するのに要する半径の変化分とスポット半径の比で定義した。又、リップルはスポット内での強度のゆらぎの最大振幅とスポット内の最大強度の比で定義した。図5.6からわかるように、ゾーン数 m が大きくなれば立上り・リップルとも改善され、 $m=5$ では立上り

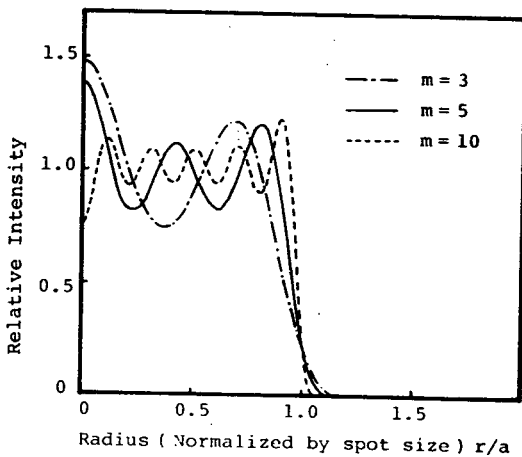


図 6.5 ゾーン数と出力強度分布形状の関係

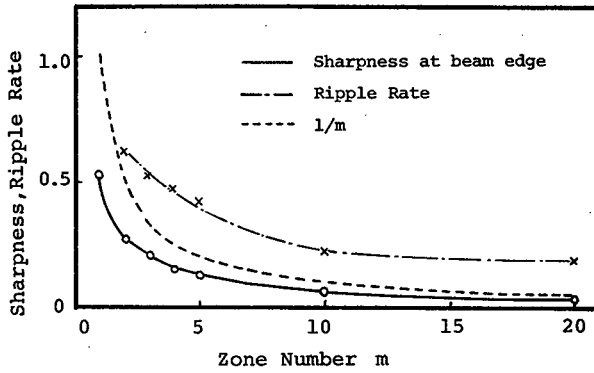


図 6.6 立上りリップルのゾーン数依存性

が 0.13, リップルが 0.4 程度 of 出力強度分布形状がえられることがわかった。

次に、実際の入射ビーム径が設計時の入射ビーム径 $2w_G$ と異なる場合の出力強度分布形状について検討する。今、入射ビーム径が設計値より ϵ 大きく、 $2(1+\epsilon)w_G$ であるとすれば、式 (6.8), (6.9) を参照して素子直後の振幅分布 $u_2(r_2)$ は

$$u_2(r_2) = \begin{cases} K_3 \exp(jkr_2^2/2l) \text{Airy}(2\pi ar_2/\lambda l) \\ \quad \cdot \exp\left[-\frac{r_2^2}{(1+\epsilon)^2 w_G^2}\right] / \exp\left(-\frac{r^2}{w_G^2}\right) & ; 0 \leq r_2 \leq b \\ 0 & ; b < r_2 \end{cases} \quad (6.17)$$

と書ける。従って、焦点面上の振幅分布 $u_3(r_1)$ は、式 (6.16) と同様に

$$u_3(r_1) = \text{const.} \times \int_0^{z_m} J_1(x) J_0(r_1 x/a) dx$$

$$\cdot \exp\left[-\frac{x^2}{p^2 w_G^2} \left\{ \frac{1}{(1+\epsilon)^2} - 1 \right\}\right] dx \quad (6.18)$$

と表わされる。図 6.7 は $m = 5$ に関して出力強度分布の入射ビーム径依存性を計算したものである。図から、設計値 $2w_G$ よりも少し小さな ($80 \sim 90\%$) ビーム径が良好なリップル特性を与えることがわかる。即ち、制限された Airy 分布が最適ではなく、素子直後の振幅分布を Airy 分布から修正することによって出力強度分布の形状改善が更に可能であることを示している。又、 $m = 5$ において入射ビーム径を $0.9 w_G$ に設定した場合、入射ビーム径の $\pm 10\%$ の変動は主に出力リップルに影響を与え、変動の大きさは $\pm 15\%$ 以内である。

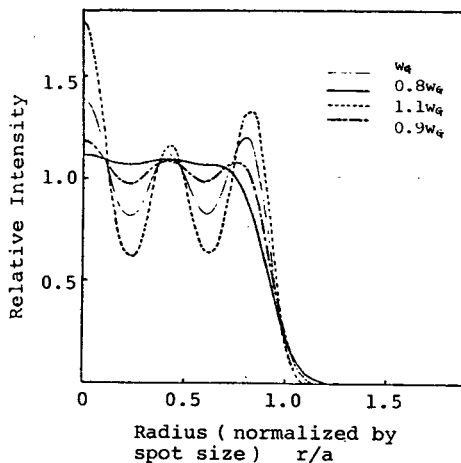


図 6.7 出力強度分布の入射ビーム径依存性

6.3 設 計

6.3.1 設計手順

素子の効率 (透過率の 2 乗) は式 (6.11) からわかるように半径に対して激しく変化する。そこで、素子全体の効率を最大にするように設計手順を考えた。設計手順を以下に述べる。

- 1) 出力強度分布に必要な立上り・リップルから、ゾーン数 m を決定する。
- 2) 素子中心での振幅透過率の大きさと最も外側 (ゾーン番号 m) のゾーン

での振幅透過率の大きさが等しくなるように、与えられた m について正規化入射ビーム半径 pw_G ，正規化素子半径 $pb_m (=Z_m)$ を定める。この段階で正規化半径 pr についての複素透過率 $t(pr)$ ($0 \leq pr \leq Z_m$) が決まる。

- 3) 素子の仕様であるスポット径 $2a$ ，入射ビームのビーム径 $2W_G$ ，波長 λ と 2) で求めた pw_G ， pb_m から，素子直径 $2a$ と焦点距離 l を決定する。

$$b = (pb_m / pw_G) w_G \quad (6.19)$$

$$l = (2\pi a / \lambda) (b / z_m) \quad (6.20)$$

この段階で p の値が定まるので，実際の半径 r についての複素振幅透過率分布 $t(r)$ が決まる。

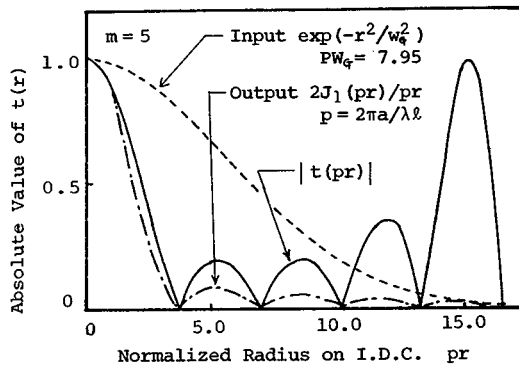


図 6.8 素子の振幅透過率分布
($m = 5$)

$m = 5$ の素子についての $t(pr)$ の計算結果、および、入射ガウシアンビームの振幅分布、素子直後の振幅分布を図 6.8 に示す。 $m = 5$ の場合、正規ビーム半径、正規化素子半径はそれぞれ

$$pw_G = 7.94761 \quad (6.21)$$

$$pb = 16.4703 \quad (6.22)$$

である。

6.3.2 複素振幅透過率の実現法

計算された $t(r)$ を実現するのに、矩形位相グレーティングの 1 次回折波を制御する方法をとった。式 (6.11) で与えられる $t(r)$ を $|t(r)|$ と位相項 $\varphi(r)$ とに分け (式 (6.23))、 $|t(r)|$ はグレーティングのデューティを変化させることで、 $\varphi(r)$ はグレーティング周期を変化させることで実現した。

$$t(r) = |t(r)| \exp[j\varphi(r)] \quad (6.23)$$

$$\text{但し、} |t(r)| = \frac{2}{\pi} \left| \frac{2 \operatorname{Airy}(2\pi ar/\lambda l)}{\exp(-r^2/w_G^2)} \right| \quad (6.24)$$

$$\varphi(r) = kr^2/2l + \Delta(r) \quad (6.25)$$

$$\Delta(r) = n\pi \quad (b_{n-1} < r < b_n) \quad (6.26)$$

式 (6.24) で係数が $2/\pi$ となっているのは、矩形位相グレーティングの 1 次回折効率の最大値が $4/\pi^2$ であるからである。(2.2 参照)。

具体的には次のような手順でフリンジ半径を決定した。図 6.9 にこの素子の断面構造および $t(r)$ とグレーティング周期、デューティとの対応を示す。

1) 2.4.1 で述べたゾーンプレート・レンズ同じく

$$r_i = \sqrt{i\lambda l} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (6.27)$$

で定まる r_i を各フリンジの最初の半径とする。

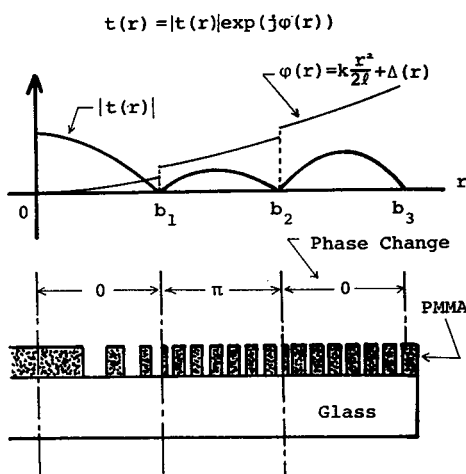


図 6.9 素子の構造
($t(r)$ とグレーティング周期，デューティとの対応)

- 2) $r = b_n$ では位相が π 不連続に変化するので， $r = b_n$ を境にレリーフの凹凸を半周期ずらせる。
- 3) グレーティングの 1 周期毎にデューティ α を調節して 1 次回折効率を $|t(r)|^2$ に合わせる。矩形位相グレーティングの 1 次回折効率 η_1 は膜厚が最適の場合 (6.28) で表わされる (2.2 参照) ので， α は式 (6.29) で与えられる。

$$\eta_1 = |t|^2 = (4/\pi^2) \sin^2(\pi\alpha) \quad (6.28)$$

$$\alpha = \sin^{-1}(\pi|t|/2) / \pi \quad (6.29)$$

以上，6.3.1，6.3.2 で述べた複素振幅透過率の決定手順および透過率をゾーンプレートで実現する方法についてまとめたものを図 6.10 に示す。

6.3.3 変換効率

本方式では，強度分布変換機能の実現にゾーンプレートを構成する円形グレーティングの 1 次回折波を利用し，このグレーティングのデューティを制御することによって素子直後の 1 次回折波に Airy 形の振幅分布を与えている。従って，変換効率は理論上 40.5 % 以上にはできず，更に，入射波の振幅分布であ

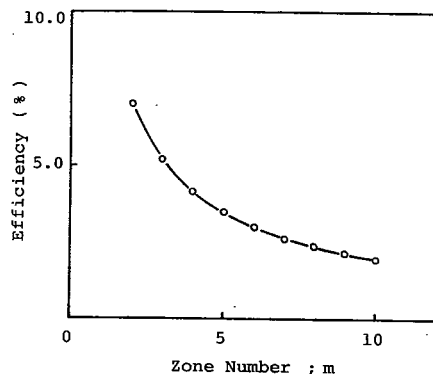
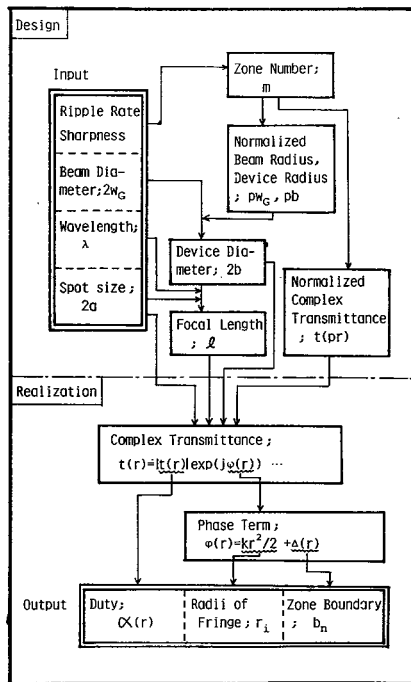


図 6.11 変換効率のゾーン数依存性

図 6.10 設計手順，透過率実現法

るガウス分布の r の増加に対する減少速度が Airy 分布より速いことが効率をいっそう低下させる。ここでは，ゾーン数 m に対する変換効率 $\eta(m)$ を次式で計算した。ここで， pw_G は，各 m に対して 6.3.1 の手順で決定される値を用いた。である。

$$\eta(m) = \frac{4}{\pi^2} \cdot \frac{\int_0^m |2 \text{Airy}(x)|^2 2\pi x \, dx}{\int_0^m \exp(-2x^2/p^2 w_G^2) 2\pi x \, dx} \quad (6.30)$$

図 6.11 はその計算結果を示したもので， m の増加に対して $\eta(m)$ が減少するのがわかる。 $m = 5$ に対する $\eta(m)$ は約 3% と，ゾーンプレート・レンズの約 $1/10$ である。

6.4 作製 , 特性測定

6.4.1 作製

$2w_G = 1.0\text{ mm}$, $\lambda = 0.633\text{ }\mu\text{m}$ のガウシアンビームを $2a = 36\text{ }\mu\text{m}$ のスポットに集光する素子の作製を行った。エッジでの強度分布の立上り, 素子全体の効率を考えると $m = 5$ とした。 $m = 5$ に対しては図 6.8 に示した透過率分布を与えればよく, 素子直径, 焦点距離は 6.3.1 で示した手順で計算される。これらをまとめて表 6.1 に示す。

Beam Diameter ; $2w_0$	1.0 mm
Spot size ; $2a$	36 μm
Wavelength ; λ	0.633 μm
Zone Number ; m	5
Device Radius ; $2b$	2.07 mm
Focal Length ; ℓ	11.2 mm

表 6.1 試作素子の仕様

仕様に基づいて計算されたフリッジパターンを電子ビームで描くことにより, 図 6.8 に示した断面構造をもつ素子を作製した。素子を構成するグレーティングは, 4 章で述べたゾーンプレート・レンズと同様, PMMA からできており, その膜厚は波長 $0.633\text{ }\mu\text{m}$ での最適膜厚 $0.65\text{ }\mu\text{m}$ に設定した。なお, 矩形断面をもつレリーフグレーティングにおける 1 次回折効率のデューティ依存性については前もって実験を行い, 溝幅 $2\text{ }\mu\text{m}$ 以上では効率の実験値は理論値とほぼ一

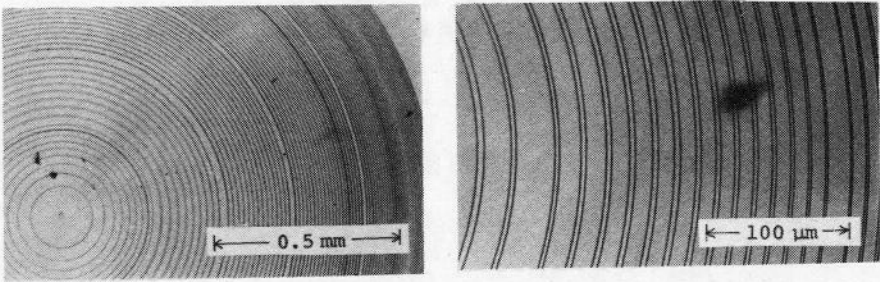


図 6.12 作製した強度分布変換用ゾーンプレート・レンズ

致した。図 6.12 は作製した素子の顕微鏡写真である。半径に対してグレーティング周期が変化しているのが、右の図からよくわかる。素子描画において電子ビーム露光量は $2.0 \times 10^{-4} \text{ C/cm}^2$ ，ビーム電流は $0.7 - 0.8 \text{ nA}$ ，露光時間は約 30 分であった。

6.4.2 特性測定

作製した素子に He - Ne レーザ光 ($\lambda = 0.633 \text{ }\mu\text{m}$ ， $2\text{WG} = 1.0 \text{ mm}$) を照射して焦点面前後の光強度分布を測定した。測定には拡大用に 20 倍の顕微鏡対物レンズと TV カメラを用いた。図 6.13 は焦点面上の光強度分布の測定結果であり、設計通りのスポット ($2a = 36 \text{ }\mu\text{m}$) 内にリップルの比較的小さな強度分布をえることができた。スポット半径に対する立上り部分の長さは $0.2 \sim 0.25$ ，スポット内でのリップルは 0.33 とほぼ設計通り (それぞれ 0.13 ， 0.4) の大きさであった。図 6.14 は焦点面前後の光強度分布を測定したものである。焦点面前後 $\pm 0.1 \text{ mm}$ の範囲ではエッジ ($r = a$) 付近の立上り特性はほとんど変化せず、スポット内 ($r < a$) でのリップルの形状が激しく変化することがわかった。観測面が焦点面よりさらにずれると、スポット内での強度分布のリップルはかなり大きくなる。ところで、図 6.13 ではスポットのすぐ外側にサイドローブが現われているが、図 6.4 に示した理論曲線ではほとんど現われていない。これは素子からの高次回折波の影響と考えられるが、この影響を評価す

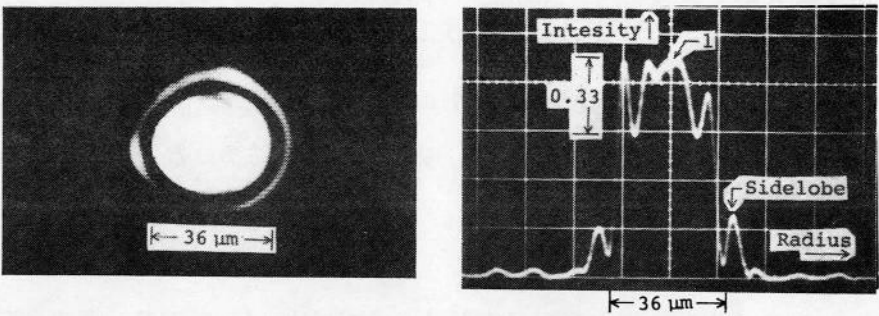


図 6.13 焦点面上の光強度分布，(a) TV モニタ像，
(b) TV カメラからの映像信号のトレース

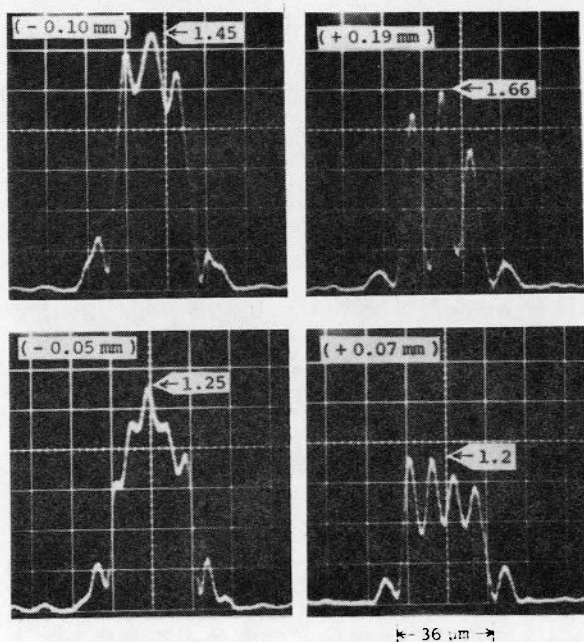


図 6.14 焦点面前後の光強度分布

(左上に焦点面からのずれ、および、相対強度を示す。)

るためにはガウス入射波に対するフレネル回折の数値計算が必要となってくる。

6.5 変換効率改善に関する検討

著者が強度分布変換のために採用した方式は、ゾーンプレート・レンズを構成する円形グレーティングの1次回折波を制御する方法である。従って、この方式では、変換効率を原理的に40%以上にはできず、又、6.3.1の手順はエアリー分布の正確な実現を前提としているため、変換効率は数%程度に落ちる(6.3.3参照)。

変換効率改善の一方法としては、図6.15に示すように、ゾーンプレートで入射波面にエアリー分布の位相分だけを与え、それを単レンズでフーリエ変換(集光)する方法が考えられる。この方法では入射光のほぼ100%をスポットに集光でき、又、ゾーンプレートの周期も6.4で作製したものと比べて極めて大

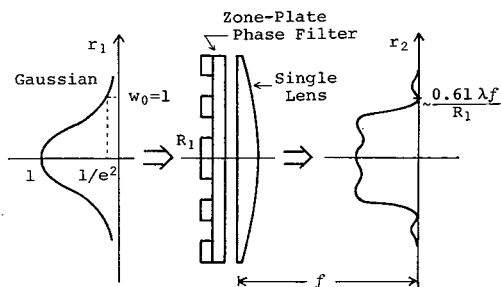


図 6.15 ゾーンプレート・単
レンズ複合型による強度分布変
換法

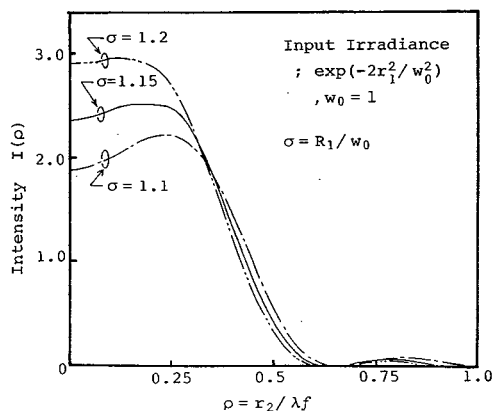


図 6.16 光強度分布変換特性

きくなる。ゾーンプレートの境界円半径を R_m ($m = 1, 2, 3, \dots$) とすると、 R_{2n-1} と R_{2n} ($n = 1, 2, 3, \dots$) の間では π 位相シフトを入射波面に与えられるようにゾーンプレートを作製する。ここで R_m は 1 次のベッセル関数の m 個目のゼロ点 Z_m に比例した量である。スポット径は、図からわかるように、単レンズの焦点距離を変えることによって所望の大きさにできる。

図 6.16 は、図 6.15 の光学系において、入射ビーム径 ($2w_0$) 一定の場合の単レンズ焦点面上での強度分布を計算したものである。ガウス分布の高域成分がエアリー分布の高域成分より小さいため、立上り特性は以前の方法ほど良くないが、 $R_1/w_0 \cong 1.15$ のとき中心強度がほぼ一樣な特性が実現できる。

6.6 結 言

レーザ光の基本モードであるガウス強度分布を中心強度が一樣で、急峻なロールオフ特性をもつ強度分布に変換するゾーンプレート・レンズについて検討

を行った。まず、強度分布変換に必要な複素振幅透過率について理論的検討を行い、素子径・ビーム径が出力強度分布形状に与える影響について考察した。次に、与えられた複素振幅透過率を実現する手段として、ゾーンプレートを構成するグレーティングの1次回折波を制御する方法を提案した。この方法を用いた電子ビーム描画作製強度分布変換用ゾーンプレート・レンズを試作し、試作素子がほぼ設計通りの強度分布を実現できることを確認した。更に、ゾーンプレート型強度分布変換素子の効率を改善する一方法として、ゾーンプレートとフーリエ変換用単レンズを用いる方法を取り上げ、その変換特性について検討した。

電子ビーム描画によるゾーンプレート・レンズ作製法は光学的な干渉縞記録法では作成不可能な縞パターンを描くことができ、単に光を集束するのではなく、種々の波面変換機能を有するマイクロレンズの作製に有力な方法である。

第7章 屈折率分布型ルネブルグレンズ⁸¹⁾

7.1. 緒 言

光導波路レンズは、導波光のコリメート、フーリエ変換、集光などに用いられる光集積回路の重要な構成要素の一つであり、^{81, 82)} これまで、ジオデジック(Geodesic)レンズ、ルネブルグ(Luneburg)レンズ、フレネル(Fresnel)レンズなど各種導波路レンズが研究されてきた。^{81, 83)} 著者の研究室においても導波路材料として As_2S_3 薄膜を用いた屈折率分布型フレネルレンズについて検討を行い、⁴⁴⁾ 良好な集光特性が実現できることを報告した。レンズ作製に用いられたカルコゲナイト系アモルファス半導体 As_2S_3 は電子ビーム照射により屈折率が変化する特徴をもち、高屈折率($n_0 \sim 2.4$)、赤外領域で低損失(数 dB/cm)⁴³⁾など導波路材料としてすぐれた性質を有する。

著者は導波路層として As_2S_3 薄膜を用いた電子ビーム直接書込みによる屈折率分布型ルネブルグレンズについて検討を行った。従来のルネブルグレンズ作製法は導波路層上に中心対称な高屈折率層を装荷するもので、装荷層厚さの微妙な調整が困難であるという問題点があった。⁸³⁾ これに対し、電子ビーム描画法では屈折率分布を電子ビーム照射量で制御できるため、プログラムの変更のみで所望の焦点距離・大きさをもつ導波路レンズが作製可能である。

本章では、まず、7.2 で Southwell の取扱いに基づいたルネブルグレンズの等価屈折率分布の計算法について、7.3 で素子の作製法について述べる。最後に、7.4 ではレンズの集光特性の確認を行った。

7.2 設 計

図 7.1 に示すように、ルネブルグレンズは中心対称な屈折率分布をもち、2つの共心円の一方の円周上の点を他方の円周上の点に収差なしに結像するレンズである。ルネブルグレンズの結像に関しては種々の理論的研究がなされてきたが、Morgan の取扱い⁸⁴⁾ が最も一般的であり、彼はレンズの屈折率に関する積分方程式を導出した。更に、Southwell は $S_0 = \infty$ (平行光入射) におけ

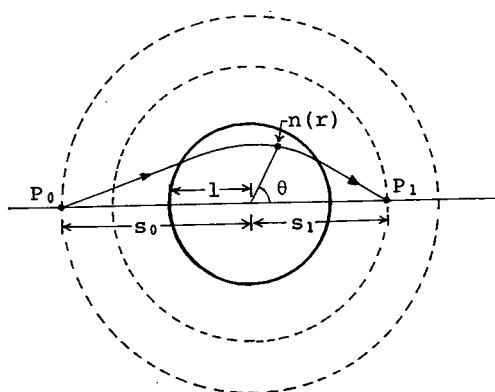


図 7.1 ルネブルグレンズの屈折率分布導出のための座標系

る Morgan の積分方程式の近似解法について研究した。⁸⁵⁾ $S_0 = \infty$ の場合の方程式は次式で記述される。

$$n(r) = \exp[\omega(\rho, s_1)] \quad (7.1)$$

$$\rho(r) = n(r) r \quad (7.2)$$

$$\omega(\rho, s_1) = \frac{1}{\pi} \int_{\rho}^1 [\sin^{-1}(x/s_1) / \sqrt{x^2 - \rho^2}] dx \quad (7.3)$$

ここで、 $n(r)$ はレンズ外の等価屈折率で正規化したレンズの屈折率、 r 、 s_1 はそれぞれレンズ半径で規格化した半径、像点の位置である。この表式の場合レンズの F 数は $s_1/2$ と書ける。

著者は Southwell の方法に従ってルネブルグレンズ ($S_0 = \infty$) の屈折率分布を求めた。以下にその方法の概略と計算結果について述べる。まず、各 ρ (0.01 から 0.05 間隔, $0 \leq \rho \leq 1$) について $\omega(\rho, s_1)$ を数値積分した。次に、 $\omega(\rho, s_1)$ が

$$\omega(\rho, s_1) \cong \sum_{m=1}^5 p_m (1 - \rho)^{m-1/2} \quad (7.4)$$

の形で表わされると仮定し、数値積分の結果から最小自乗法で p_m を決定した。表 7.1 は 7.3 で作製するレンズの s_1 ($= 9, 13$) に関する p_m の計算結果である。最後に、各 r ($0 \leq r \leq 1$) に関して、次式の $F(n)$ を 0 とする $n(r)$ をニュートン法で逐次近似により求めた。

$$F(n) = \exp[\omega(\rho, s_1)] - n(r) \tag{7.5}$$

著者は各 s_1 に対する p_m を大型計算機で計算し、計算された p_m をレンズ作製用プログラムの入力パラメータの 1 つとした。

表 7.1 p_m の計算結果 ($s_1 = 9, 13$)

	$s_1 = 9$	$s_1 = 13$
p_1	0.50121×10^{-1}	0.34662×10^{-1}
p_2	-0.12663×10^{-1}	-0.87064×10^{-2}
p_3	-0.15264×10^{-2}	-0.10980×10^{-2}
p_4	-0.20411×10^{-2}	-0.12890×10^{-3}
p_5	-0.33450×10^{-3}	-0.23458×10^{-3}

7.3 素子作製

7.3.1 $As_2 S_3$ 薄膜の電子ビーム照射効果

レンズ作製においては屈折率変化量の電子ビーム露光量依存性のデータが必要であるが、ここでは著者の研究室で測定された小林氏のデータを利用した(図 7.2 参照⁸⁶⁾)。図において、屈折率変化量 Δn は、 $As_2 S_3$ 薄膜(膜厚 $0.53 \mu m$) に電子ビーム直接書込法で作製された矩形位相グレーティング(周期 $10 \mu m$) の回折効率から求められたものである。電子ビーム露光量 $Q_D \leq 10^{-3} C/cm^2$ の範囲で Δn は両波長とも Q_D の 0.79 乗に比例し、最大屈折率変化量は 0.11 (λ

$= 0.6328 \mu\text{m}$), $0.06 (\lambda = 1.064 \mu\text{m})$ 程度である。

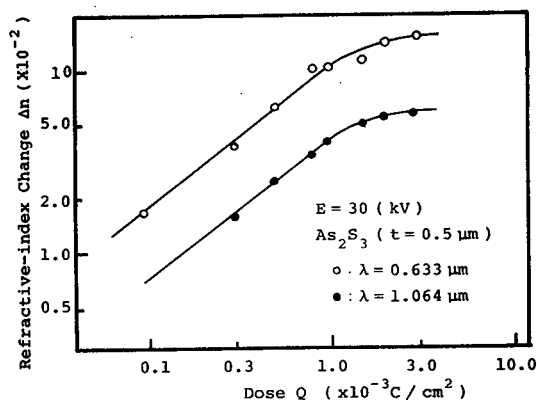


図 7.2 屈折率変化量の電子ビーム照射量依存性

7.3.2 導波路の作製

実験に用いた基板は、ネサガラス（ガラス上に透明電極とし In_2O_3 膜をつけたもの）上に光学的バッファ層として SiO_2 膜（膜厚 $0.4 \mu\text{m}$ ）を高周波スパッタ法で付着させたものである。この上に真空蒸着法により導波路層としての As_2S_3 膜を形成し、光導波路とした。図 7.3 に導波路構造を示す。 As_2S_3 の蒸着速度は $100 \text{ \AA/sec}$ 以下で、蒸着時の基板温度は 60°C に保った。又、GaP プリズムカップラーを用いた入射角測定によって得られた TE_0 モードに対する導波路の実効屈折率 N_{TE_0} はそれぞれ 2.42 （波長 $0.6328 \mu\text{m}$ ， As_2S_3 膜厚 $0.51 \mu\text{m}$ ）， 2.30 （波長 $1.064 \mu\text{m}$ ，膜厚 $0.64 \mu\text{m}$ ）であった。

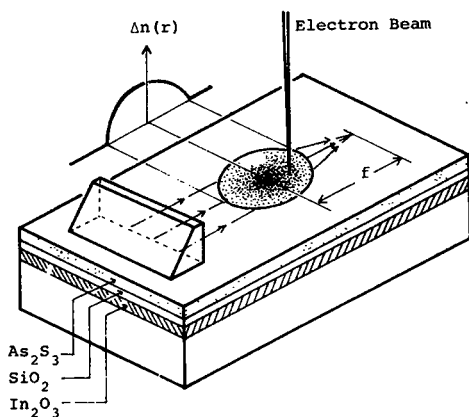
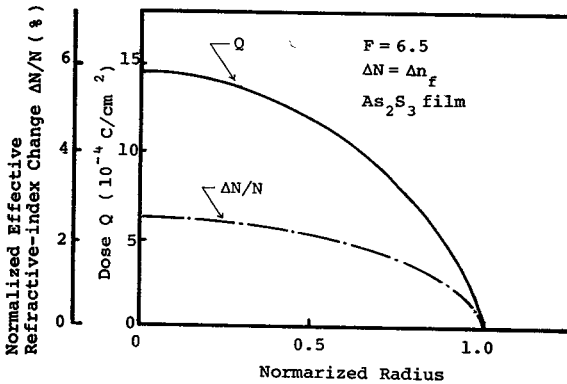


図 7.3 導波路構造と電子ビームによるルネブルグレンズ書込みの様子

7.3.3 レンズ書込み

まず、7.2で求めた P_m を入力パラメータにして正規化屈折率分布 $n(r)$ を計算した。次に、 $n(r)$ から TE_0 モードの実効屈折率変化分 $\Delta N (= (n(r) - 1) \times N_{TE_0})$ を求め、 ΔN に対応する電子ビーム露光量分布 $Q_D(r)$ を決定した。この際、実験に用いた As_2S_3 層の導波光閉じ込めが十分であるため、導波路層の屈折率変化分 Δn と実効屈折率変化分 ΔN は等しいとした⁸⁷⁾。図 7.4 は、 $\lambda = 1.064 \mu m$ 用、 $s_1 = 13$ 、 $N_{TE_0} = 2.30$ のレンズでの $\Delta N / N_{TE_0}$ の分布と対応する露光量分布を示している。このレンズにおける $\Delta N / N_{TE_0}$ の最大値は 2.4 %、最大露光量は $1.5 \times 10^{-3} C/cm^2$ である。



勝 7.4 試作レンズの等価屈折率分布と露光量分布

次に、計算された露光量分布に従ってレンズ書込みを行った。露光の際、電子ビームは一定周期で円状に走査され、各半径における走査回数を制御することで必要な露光量分布を与えた（図 7.3 参照）。露光条件は、電子ビーム加速電圧 30kV、ビーム電流 1 nA、ビーム径 $0.3 \mu m$ 、走査線間隔 $0.1 \sim 0.2 \mu m$ であった。表 7.2 に作製レンズの設計仕様を示す。レンズ A、B の F 数は As_2S_3 の屈折率変化を最大限利用したときに実現できるほぼ最小の値に設定されている。図 7.5 は作製したルネブルグレンズ (A ; $f = 2.25 mm$) の干渉顕微鏡写真である。レンズ内での屈折率変化が小さいため、上からの観測では屈折率分布に対応する濃淡は観測されなかった。

表 7.2 試作レンズの設計仕様

Lens		A	B
Wave Length	λ (mm)	0.633	1.064
Diameter	2d (mm)	0.5	0.5
Focal Length	f (mm)	4.5	3.25
F/number	F	9	6.5
Film Thickness (As ₂ S ₃)	t (μm)	0.51	0.64
Effective Refractive Index	N _{TEO}	2.42	2.30

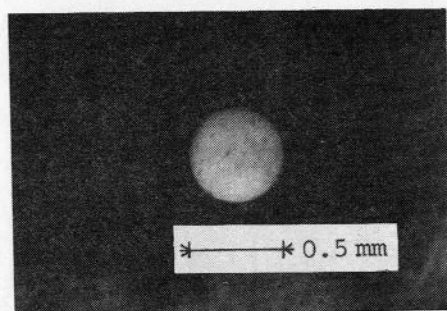
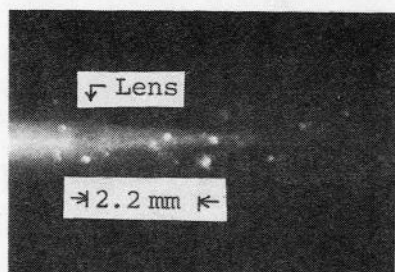


図 7.5 作製ルネブルグレンズの
干渉顕微鏡写真
($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 用,
 $f = 2.25 \text{ mm}$)

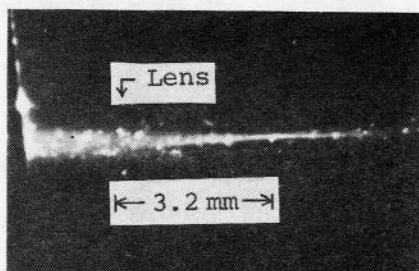
7.4 集光特性の測定

GaPプリズムカップラーを用いて導波光を励起し、作製レンズによる導波光集光の様子を観測した。図 7.6 (a), (b)はレンズによる集束光のストリークを観測したもので、ほぼ設計値通りの焦点距離が実現されているのがわかる。又、レンズ境界面での散乱はほとんど観測されなかった。これは従来の装荷型ルネブルグレンズにない特徴である。

今回、作製レンズのスポット径測定の実験は行えなかったが、焦点距離の実験値が理論値に極めて近いことから、設計通りのスポット径が得られているものと推定される。効率に関する問題を本質上もたないルネブルグレンズにおいて集光特性の測定は重要であり、スポット径の測定は今後の課題としたい。



(a)



(b)

図 7.6 作製ルネブルグレンズによる導波光集光の様子，

設計仕様：(a) $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$, $f = 2.25 \text{ mm}$, (b) $\lambda = 1.064 \mu\text{m}$,
 $f = 3.25 \text{ mm}$

7.5 結 言

電子ビーム直接書込みによる屈折率分布型ルネブルグレンズの作製を行い，その集光機能を確認した。まず Southwell の取扱いに基づいて等価屈折率分布を計算し，次に，電子ビーム照射によって屈折率変化の生じる As_2S_3 導波路層に屈折率分布に対応する露光量分布を与えることによってレンズ書込みを行なった。作製レンズは，波長 $0.6328 \mu\text{m}$ 用，直径 0.5 mm ，焦点距離 2.25 mm ，および，波長 $1.064 \mu\text{m}$ 用，直径 0.5 mm ，焦点距離 3.25 mm のものであり，集光の様子を観測した結果，いずれもほぼ設計値通りの焦点距離が実現できた。

電子ビーム直接書込みによるレンズ作製法の特徴は，屈折率分布を計算機で制御できるため，簡単なプログラム上の変更のみで所望の焦点距離，大きさをもつ導波路レンズの作製ができることであり，この方法によるルネブルグレンズは As_2S_3 薄膜を用いた光集積回路の構成要素として有用な素子になるであろう。

第8章 結 論

本研究において、電子ビーム描画を用いたマイクロレンズの作製法、および、作製レンズの特性について実験的検討を行い、いくつかの重要な結果を得た。以下では、本研究で得られた結果を要約し、今後の課題・問題点を明らかにして本論文の結論とする。

第2章では、マイクロ・ゾーンプレート・レンズおよびマイクロ・フレネルレンズの基礎となる薄い一様周期直線状グレーティングの回折効率について理論的検討を行い、ゾーンプレート・レンズ、フレネルレンズの集光特性について述べた。得られた結果を以下に示す。

- 1) 鋸歯状位相グレーティングについて1次回折効率の位相形状依存性の検討を行い、矩形位相グレーティングの最大回折効率40.5%を越える高効率形状パラメータのかなり広い範囲で実現できることがわかった。
- 2) ゾーンプレート・レンズによるフレネル回折の無限級数展開式を示し、焦点面での光強度分布を計算した。その結果、ゾーンプレート・レンズは、フレネルレンズと同様、無収差レンズのスポット径（回折限界）まで入射平面波を集束できることがわかった。

第3章では、マイクロ・ゾーンプレート・レンズ、マイクロ・フレネルレンズ作製のために開発した電子ビーム描画装置について述べた。本装置は、走査型電子顕微鏡にミニコンピュータで制御される独自の外部偏向電圧発生回路を加えたものであり、レンズ描画に必要な電子ビームの円状走査を可能としている。又、その描画性能はサブミクロンの加工精度を必要とするマイクロレンズ作製に適当なものであることが示された。

第4章では、電子ビーム描画法で作製したマイクロ・ゾーンプレート・レンズについて実験的検討を行った。まず、予備実験として、電子ビームレジストPMMAを用いて矩形断面形状をもつ一様周期直線状グレーティングの作製を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) 周期 $4\mu\text{m}$ 以上のグレーティングでは、波長 $0.633\mu\text{m}$ で34~38%の1

次回折効率が実現できることを示した。これは理論的最大回折効率 40.5% に極めて近い値である。

2) 開発した電子ビーム描画装置を用いて 0.65 μm 厚の PMMA 膜に形成可能な最小グレーティング周期が 1 μm 程度であることがわかった。

次に、マイクロ・ゾーンプレート・レンズの作製・特性測定を行い、以下の結果を得た。

3) F 数が 1 以上のゾーンプレート・レンズでは、約 30% の効率とほぼ回折限界まで絞れるすぐれた集光特性が実現できることを確認した。

4) ゾーンプレート・レンズのスポット径極小化を試み、F 数が 0.65 のレンズで波長 0.633 μm において約 0.7 μm のスポット径（半値全幅）を得ることができた。

5) F 数が 5 のレンズに関して波面収差の測定を行い、その大きさが 1/4 波長以下と極めて小さいことが明らかになった。

第 5 章では、ゾーンプレート・レンズの高効率化を目的とした電子ビーム描画によるブレース化技術について検討を行い、この技術を用いてマイクロ・フレネルレンズの作製を行った。以下に得られた結果を示す。

1) PMMA 薄膜（膜厚 1.3 μm ）について電子ビーム露光量とエッチング深さの関係を測定し、この測定結果を基に波長 0.633 μm 用ブレード・グレーティングの作製を行った。実現できた 1 次回折効率は 60% 以上であったが、鋸歯形状の再現性に問題を残している。

2) 焦点距離 5 mm、直径 1 mm のマイクロ・フレネルレンズの作製を行い、ゾーンプレート・レンズの最大効率を越える 50% の効率を実現できた。これにより、電子ビームによるブレース化法がマイクロレンズ高効率化に有用であることが実証された。

3) 作製フレネルレンズについてスポット径・スポット形状の入射角依存性を測定した。又、色収差、像歪曲の測定から、単一波長では十分な結像・集光特性をもつことがわかった。

第 6 章では、レーザ光の基本モードであるガウス強度分布を中心強度が一様

で急峻なロールオフ特性をもつ強度分布に変換するゾーンプレート・レンズについて検討を行い、次の結果を得た。

- 1) ゾーンプレート・レンズを構成する円形グレーティングの1次回折波を制御することによって強度分布変換機能を実現する方法を提案し、設計手順を明らかにした。
- 2) ビーム径 1 mm の He-Ne レーザ光を直径 $36\text{ }\mu\text{m}$ で中心強度のリップルの小さいスポットに変換する素子の作製を行い、ほぼ設計通りの変換特性を確認できた。
- 3) 強度分布変換用ゾーンプレート・レンズの効率改善のために、ゾーンプレート・単レンズ複合型の提案を行い、強度分布変換特性の理論的検討を行った。

電子ビーム描画法は、光学的な干渉描記録法では作成不可能な縞パターンを描くことができるので、単に入射光を集束するだけではなく種々の波面変換機能を有するマイクロレンズ作製に有力な方法といえる。

第7章では、電子ビーム直接書込みによる屈折率分布型ルネブルグレンズについて検討を行った。Southwell の取扱いに基づいて屈折率分布を計算し、電子ビーム照射によって屈折率変化の生じる As_2S_3 導波路層にレンズ書込みを行った。作製レンズは波長 $0.633\text{ }\mu\text{m}$ 用、直径 0.5 mm 、焦点距離 2.25 mm 、および、波長 $1.064\text{ }\mu\text{m}$ 用、直径 0.5 mm 、焦点距離 3.25 mm のもので、集光特性を観測した結果、両レンズともほぼ設計値通りの焦点距離が実現されたことを確認した。

以上の研究成果によって、電子ビーム描画作製によるマイクロレンズが微小光学系における有用な構成要素となりうることが示唆された。今後、このマイクロレンズが将来のマイクロレンズの主流となるためには、まず、高効率化のために再現性のあるグレーティング形状制御技術の確立が最も重要な課題であり、さらに、F数の低減のためにグレーティング周期の微細化、および、描画装置の性能向上も達成する必要がある。又、強度分布変換用レンズに関しては、高効率な強度分布変換機能実現のための理論的、実験的検討が必要であろう。

電子ビーム描画作製マイクロレンズを、半導体レーザ・光ファイバ結合用レンズ、又、光ディスク・ピックアップレンズなどに具体的に応用するという課題も今後の重要課題である。

謝

辞

本研究を行うに際し、終始懇切な御指導・御鞭撻を賜った大阪大学工学部 小山次郎教授、終始一貫して直接御指導頂いた西原浩助教授に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産業科学研究所松尾幸人教授、大阪大学工学部裏克己教授に深謝の意を表します。

更に、著者が大阪大学に在学中、御指導と御教示を賜った大阪大学工学部 尾崎弘教授、中井順吉教授、塙輝雄教授、児玉慎三教授、寺田浩詔教授、ならびに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。

本研究を行うに当って、有益なる御指導を頂いた小山研究室春名正光博士、栖原敏明博士に心から感謝の意を表します。又、実験の面で数々の御助言を頂いた半田祐一博士（現在、キャノン㈱勤務）、光永一正博士（現在、三菱電機㈱勤務）に感謝の意を表します。本研究の各過程において協力頂いた三木隆博氏、岡上拓己氏、榎本紳二氏、福田尚行氏に感謝します。

参 考 文 献

- 1) F. P. Kapron, D. B. Keck, and R. D. Maurer, "Radiation loss in glass optical waveguide," Appl. Phys. Lett., 17, 15, pp.423-425 (Nov. 1970).
- 2) R. W. Dixon, "Current directions in GaAs laser device development," Bell. Syst. Tech. J., 59, 5, pp.669-722 (May-June 1980).
- 3) T. Miya, Y. Terunuma, T. Hosaka, and T. Miyashita, "Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μ m," Electron. Lett., 15, 4, pp.106-107 (Feb. 1979).
- 4) 三木, 山懸, "光伝送方式, 公衆通信: 中継伝送系, 加入者系," 信学誌, 63, 11, P. 1114-1123 (昭55-11).
- 5) R. McFarlane, G. Blom, A. Chan, S. Chandra, E. Frankfort, G. Kenney, D. Lou, J. Nadan, and J. Hafner, "Digital optical recorders at 5Mbit/s data rate," Opt. Eng., 21, 5, pp.913-922 (Oct. 1982).
- 6) 伏木, "光方式が中心になるデジタル・オーディオ・ディスク," 日経エレクトロニクス, 1981年8月17日号, PP.187-206.
- 7) 柴田, "レーザプリンターにおけるレーザビーム制御技術," オプトロニクス, 1, 11, PP 13-17 (昭57-11).
- 8) H. Nishihara, J. Koyama, N. Hoki, F. Kajiya, M. Hironaga, and M. Kano, "Optical-fiber laser Doppler velocimeter for high-resolution measurement of pulsatile blood flows," Appl. Opt., 21, 10, pp.1785-1790 (May 1982).
- 9) 北野, "微小光学," 応用物理, 51, 5, PP. 561-563 (昭57-05).
- 10) 鹿田, "光ファイバ通信システムにおける光ビーム制御技術," オプトロニクス, 1, 11, PP. 18-24 (昭57-11).

- 11) W. J. Tomlinson, "Applications of GRIN-rod lenses in optical fiber communication systems," Appl. Opt., 19, 7, pp.1127-1138 (Apr. 1980).
- 12) M. Kawazu and Y. Ogura, "Application of gradient-index fiber arrays to copying machines," Appl. Opt., 19, 7, pp.1105-1112 (Apr. 1982).
- 13) D. T. Moore, "Gradient-index optics: a review," Appl. Opt., 19, 7, pp.1035-1038 (Apr. 1980).
- 14) W. J. Tomlinson, "Aberrations of GRIN-rod lenses in multi-mode optical fiber devices," Appl. Opt., 19, 7, pp.1117-1126 (Apr. 1980).
- 15) N. Yamamoto, H. Nishi, K. Nishizawa, and I. Kitano, "Selfoc micro lenses with a spherical surface," Appl. Opt., 21, 6, pp.1021-1023 (Mar. 1982).
- 16) 久保田, 浮田, 會田,
"光学技術 ハンドブック,"
朝倉書店, P 580-653 (昭46).
- 17) H. Nishihara, S. Inohara, T. Suhara, and J. Koyama,
"Holocoupler; a novel coupler for optical circuits," IEEE J. Quantum Electron., QE-11, 9, pp.794-796 (Sept. 1975).
- 18) 小林, 西原, 小山, "半導体レーザ・光ファイバ結合用ホロカップラ," 信学技報 OQE76-99 (昭52-02).
- 19) 内海, 西原, 小山, "ホロカップラによる半導体レーザ・光ファイバの高効率結合化," 昭和54年信学会総合全国大会 992 (昭54-03).
- 20) 内海, 西原, 小山, "半導体レーザ・光ファイバ結合用ホロカップラの効率改善," 信学技報 OQE 78-121 (昭54-01).
- 21) K. Miyamoto, "The phase Fresnel lens," J. Opt. Soc. Am., 51, 1, pp.17-20 (Jan. 1961).

- 22) R. J. Collier, C. B. Burckhardt, and L. H. Lin, "*Optical Holography*," Academic Press, pp.44-46 (1971).
- 23) 難波, "微細加工," 文部省科学研究費特定研究「光導波エレクトロニクス」成果報告集, PP. 273-304 (昭56).
- 24) T. Fujita, H. Nishihara, and J. Koyama, "Fabrication of micro lenses using electron-beam lithography," *Opt. Lett.*, 6, 12, pp.613-615 (Dec. 1981).
- 25) 藤田, 西原, 小山, "ホログラフィック波面変換素子の電子ビーム描画による作製," 信学技報 OQE79-120 (昭55-01).
- 26) A. H. Firester, "Properties and fabrication of micro Fresnel zone plates," *Appl. Opt.*, 12, 7, pp.1698-1702 (July 1973).
- 27) J. A. Jordan, Jr., P. M. Hirsch, L. B. Lesem, and D. L. Van Rooy, "Kinoform lenses," *Appl. Opt.*, 9, 8, pp.1883-1887 (Aug. 1970).
- 28) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製マイクロフレネルレンズ," 信学論(C), J 64-C, 10, PP. 652-657 (昭56-10).
- 29) H. Kogelnik, "Coupled wave theory for thick hologram gratings," *Bell Syst. Tech. J.*, 48, 9, pp.2909-2947 (Nov. 1969).
- 30) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製によるブレイズ化マイクロフレネルレンズ," 信学論(C), 昭和58年1月に掲載予定.
- 31) T. Fujita, H. Nishihara, and J. Koyama, "Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography," *Opt. Lett.*, (to be published in Dec. 1982).

- 32) R. Magnusson and T. K. Gaylord, "Diffraction efficiency of thin phase gratings with arbitrary grating shape," J. Opt. Soc. Am., 68, 6, pp.806-809 (June 1978).
- 33) R. Magnusson and T. K. Gaylord, "Diffraction regimes of transmission gratings," J. Opt. Soc. Am., 68, 6, pp.809-814 (June 1978).
- 34) R. Magnusson and T. K. Gaylord, "Analysis of muliwave diffraction of thick gratings," J. Opt. Soc. Am., 67, 9, pp.1165-1170 (Sept. 1977).
- 35) 西原, 小山, " 光波電子工学, " コロナ社, P.77 (昭53).
- 36) A. Boivin, "On the theory of diffraction by concentric arrays of ring-shaped apertures," J. Opt. Soc. Am., 42, 1, pp.60-64 (Jan. 1952).
- 37) Ref. 35) p.59.
- 38) Ref. 35) p.65.
- 39) M. Born and E. Wolf, "*Principles of Optics*," Pergamon Press, pp.435-449 (1970).
- 40) A. Engel and G. Herziger, "Computer-drawn modulated zone plates," Appl. Opt., 12, 3, pp.471-479 (Mar. 1973).
- 41) H. H. M. Chau, "Zone plates produced optically," Appl. Opt., 8, 6, pp.1209-1211 (June 1969).
- 42) L. B. Lesem, P. M. Hirsch, and J. A. Jordan, Jr., "The kinoform: a new wavefront reconstruction device," IBM J. Res. Develop., 13, pp.150-155 (Mar. 1969).
- 43) 半田, " カルコゲナイド非晶質膜を用いた光集積回路用グレーディングに関する研究, " 大阪大学博士学位論文(昭56-03).
- 44) T. Suhara, K. Kobayashi, H. Nishihara, and J. Koyama, "Graded-index Fresnel lenses for integrated optics," Appl. Opt., 21, 11, pp.1966-1971 (June 1982).

- 45) W. C. Chang and P. R. Ashley, "Fresnel lenses in optical waveguides," IEEE J. Quantum Electron., QE-16, 7, pp.744-754 (July 1980).
- 46) Y. Handa, T. Suhara, H. Nishihara, and J. Koyama, "Microgratings for high-efficiency guided-beam deflection fabricated by electron-beam direct-writing technique," Appl. Opt., 19, 16, pp.2842-2847 (Aug. 1980).
- 47) I. Haller, M. Hatzakis, and R. Srinivasan, "High-resolution positive resists for electron-beam exposure," IBM J. Res. Develop., 12, pp.251-256 (1968).
- 47) 藤田, 西原, 小山, "ホログラフィック波面変換素子の電子ビーム描画による作成," 昭和54年電気関係学会関西支部連合大会 G10-9(昭54-11).
- 48) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画によるホログラフィック・マイクロレンズの作製," 昭和55年 春季応物講演会 39-Q-1 (昭55-04).
- 49) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画ホログラフィック・マイクロレンズのスポット径極小化," 昭和55年 信学会光・電波部門全国大会 191 (昭55-09).
- 50) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム直接描画作製ホログラフィック・マイクロレンズ," 昭和56年レーザ学会学術講演会 13a-III-2 (昭56-02).
- 51) 檜岡, "エレクトロニクスの精密微細加工," 総合電子出版社 PP. 134-175 (昭55).
- 52) 檜岡, 二瓶 "フォトリソグラフィと微細加工," 総合電子出版社 P. 195 (昭52).
- 53) 久保田, 浮田, 會田, "光学技術ハンドブック," 朝倉書店 P. 691 (昭46).
- 54) Ref. 39) p.468.
- 55) 藤田, 西原, 小山 "電子ビーム描画作製マイクロフレネルレンズのブレース化," 信学技報 OQE82-25(昭57-06).
- 56) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製マイクログレーティングのブレース化," 昭和57年 春季応物講演会 4a-V-2 (昭57-04).
- 57) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画によるブレースド・マイクロフレネルレンズの作製とその特性測定," 昭和57年信学会光・電波部門全国大会 323 (昭57-08).
- 58) J. J. Clair, "New method to synthesise kinoforms," Opt. Commun., 6, 12, pp.135-137 (Oct. 1972).

- 59) W. J. Dallas, "Kinoform fabrication - a new method,"
Opt. Commun., 8, 4, pp.340-344 (Aug. 1973).
- 60) N. K. Sheridan, "Production of blazed holograms,"
Appl. Phys. Lett., 12, 9, pp.316-318 (May 1968).
- 61) G. Schmahl and D. Rudolph, "Holographic diffraction gratings," in *Progress in Optics*, ed. E. Wolf, 14,
pp.195-244 (1976).
- 62) Y. Aoyagi and S. Numba, "Blazing of holographic grating by
ion etching technique," Jpn. J. Appl. Phys., 15, 4,
pp.721-722 (Apr. 1976).
- 63) P. Vincent, "New improvement of differential formalism for
high-modulated gratings," in *Proceedings of S.P.I.E.*, ed.
C. H. Chi, E. G. Loewen, C. L. O'Bryan II, 240, pp.147-152
(July-Aug. 1980).
- 64) E. G. Loewen, M. Nevriere, D. Maystre, "Grating efficiency
theory as it applies to blazed and holographic gratings,"
Appl. Opt., 16, 10, pp.2711-2721 (Oct. 1977).
- 65) 三好, 小暮, "電子線ネガ形レジストの現像," 信学論(C), J 64-C, 11,
PP. 748-753 (昭56-11).
- 66) Ref. 39) p.441.
- 67) 日置, "光用語事典," オーム社, P. 3 (昭56).
- 68) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製による強度分布変換用マイクロレンズ,"
信学技報 OQE81-90, PP. 57-64 (昭56-10).
- 69) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製による強度分布変換用マイクロレンズ,"
昭和55年 秋季 応物講演会 19a-H-7 (昭55-10).
- 70) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製による強度分布変換用レンズの特性測定,"
昭和56年 秋季 応物講演会 8P-N-12 (昭56-10).
- 71) W. B. Veldkamp and C. J. Kastner, "Beam profile shaping for
laser radars that use detector arrays," Appl. Opt., 21, 2,
pp.345-356 (Jan. 1982).

- 72) M. Lacombat, G. M. Dubroencq, J. Massin and M. Brerignon,
Solid State Technology, p.115 (1980).
- 73) N. S. Platakis, "Mechanism of laser-induced metal-
semiconductor electrical connection in MOS structure,"
J. Appl. Phys., 47, 5, pp.2120-2128 (May 1976).
- 74) J. W. Ogland, "Mirror system for uniform beam transformation
in high-power annular lasers," Appl. Opt., 17, 18,
pp.2917-2923 (Sept. 1978).
- 75) P. W. Rhodes and D. L. Shealy, "Refractive optical systems
for irradiance redistribution of collimated radiation: their
design and analysis," Appl. Opt., 19, 20, pp.3545-3553
(Oct. 1980).
- 76) S. L. Ream, Laser Focus, p.68 (Nov. 1979).
- 77) W. B. Veldkamp, "Laser beam shaping with interlaced binary
diffraction gratings," Appl. Opt., 21, 17, pp.3209-3212
(Sept. 1982).
- 78) W. H. Lee, "Method for converting a Gaussian laser beam into
a uniform beam," Opt. Commun., 36, 6, pp.469-471 (Mar. 1981).
- 79) Ref. 35) p.65.
- 80) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム直接書込みによる屈折率分布型ルネブルグレンズの作製,"
昭和56年 春季応物講演会 29a-k-6 (昭56-03).
- 81) 田中 "光導波路レンズ," 応用物理, 48, 3, PP. 241-248 (昭54-03).
- 82) D. B. Anderson, "Integrated optical spectrum analyzer: an
imminent chip," IEEE Spectrum, pp.22-29 (Dec. 1978).
- 83) D. B. Anderson, R. L. Davis, J. T. Boyd, and R. R. August,
"Comparison of optical-waveguide lens technologies,"
IEEE J. Quantum Electron., QE-13, 4, pp.275-282 (Apr. 1977).
- 84) S. P. Morgan, "General solution of the Luneburg lens
problem," J. Opt. Soc. Am., 29, 9, pp.1358-1368 (Sept. 1958).

- 85) W. H. Southwell, "Index profile for generalized Luneburg lenses and their use in planar optical waveguide," J. Opt. Soc. Am., 67, 8, pp.1010-1014 (Aug. 1977).
- 86) 小林, 栖原, 西原, 小山, " 光 I C用屈折率分布型フレネルレンズ, " 信学技報 OQE81-91 (昭56-10).

関連発表論文

[1] Papers

- (1) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製マイクロフレネルレンズ," 信学会論文誌(C), J 64-C, 10, PP. 652-657 (昭56-10).
- (2) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製によるブレース化マイクロフレネルレンズ," 信学会論文誌(C), 昭和58年1月に掲載予定.

[2] Letters

- (1) T. Fujita, H. Nishihara, and J. Koyama,
"Fabrication of micro lenses using electron-beam lithography," Opt. Lett., 6, 12, pp.613-615 (Dec. 1981).
- (2) T. Fujita, H. Nishihara, and J. Koyama,
"Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography," Opt. Lett.,
(to be published in Dec. 1982).

[3] 研究会

- (1) 藤田, 西原, 小山, "ホログラフィック波面変換素子の電子ビーム描画による作製," 信学技報 OQE79-120, (昭55-01).
- (2) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製による強度分布変換用マイクロレンズ," 信学技報 OQE81-90 (昭56-10).
- (3) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画作製マイクロフレネルレンズのブレース化," 信学技報 OQE82-25 (昭57-06).

[4] 学術講演発表

- (1) 藤田, 西原, 小山, "ホログラフィック波面変換素子の電子ビーム描画による作製," 昭和54年 電気関係学会関西支部連合大会 G10-9 (昭54-11).
- (2) 藤田, 西原, 小山, "電子ビーム描画によるホログラフィック・マイクロレンズの作製," 昭和55年春季応物講演会 3a-Q-1 (昭55-04).

- (3) 藤田, 西原, 小山, " 電子ビーム描画ホログラフィック・マイクロレンズのスポット径極小化 ", 昭和55年信学会光・電波部門全国大会 191 (昭55-09).
- (4) 藤田, 西原, 小山, " 電子ビーム描画作製による強度分布変換用マイクロレンズ, " 昭和55年秋季 応物講演会 19a-H-7 (昭55-10).
- (5) 藤田, 西原, 小山, " 電子ビーム直接描画作製によるホログラフィック・マイクロレンズ, " 昭和56年レーザー学会学術講演会 13a-III-2 (昭和56-02).
- (6) 藤田, 西原, 小山, " 電子ビーム直接書き込みによる屈折率分布型ルネブルグレンズの作製, " 昭和56年春季応物講演会 29a-K-6 (昭和56-03).
- (7) 藤田, 西原, 小山, " 電子ビーム描画作製による強度分布変換用レンズの特性測定, " 昭和56年秋季 応物講演会 8p-N-12 (昭56-10).
- (8) 藤田, 西原, 小山, " 電子ビーム描画作製マイクログレーティングのブレース化, " 昭和57年春季 応物講演会 4a-V-2 (昭57-04).
- (9) 藤田, 西原, 小山, " 電子ビーム描画によるブレースド・マイクロラネネルレンズの作製とその特性測定, " 昭和57年 信学会光・電波部門全国大会 3.2.3 (昭57-08).

