

理工学研究科恩田

60

0

94

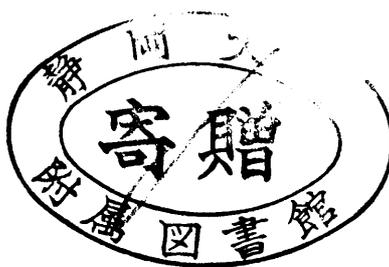
静岡大学附属図書館

0002515864 R

静岡大学 博士論文

レーザービーム描画装置による 回折型光学素子作製に関する研究

静岡
大学
図書



1999年11月

恩田 一

目 次

第1章 緒言	4
1.1 本研究の目的	4
1.2 本研究の背景	4
1.3 微細パターン描画方法	5
1.4 本論文の構成	7
第2章 超精密位置決めテーブル(エアスライドテーブル)の開発	8
2.1 はじめに	8
2.2 開発のコンセプト	9
2.3 空気浮上/磁気吸引形エアスライドの原理	10
2.3.1 従来型空気軸受	10
2.3.2 空気浮上/磁気吸引複合型ガイド	11
2.4 エアスライドテーブルの構成	13
2.5 装置の特性	16
2.5.1 静特性	16
2.5.2 動特性	18
2.5.3 装置仕様と性能	22
2.6 2章のまとめ	22

第3章 レーザビーム描画装置の開発	23
3.1 はじめに	23
3.2 独立テーブルタイプ描画装置	24
3.2.1 装置構成とコンセプト	24
3.2.2 光学系の構成	26
3.2.3 描画ソフトウェア体系	33
3.2.4 装置仕様	34
3.3 XYテーブルタイプ描画装置	35
3.3.1 装置構成とコンセプト	35
3.3.2 光学系の構成	37
3.3.3 制御系の構成	38
3.3.4 装置仕様	40
3.4 性能評価	41
3.5 応用例	43
3.6 3章のまとめ	45
第4章 描画線幅の制御	46
4.1 はじめに	46
4.2 描画線幅制御方法	46
4.3 レンズ交換法	48
4.3.1 理論的検討	48
4.3.2 実験と考察	52
4.3.3 4.3節のまとめ	57
4.4 デフォーカス法	58
4.4.1 理論的検討	58
4.4.2 実験と考察	61
4.4.3 パワー密度一定制御	65
4.4.4 4.4節のまとめ	66
4.5 4章のまとめ	67

第5章 解説型光学素子描画とブレードFZPの特性	68
5.1 はじめに	68
5.2 回折型光学素子とフレネルゾーンプレート(FZP)	68
5.2.1 回折型光学素子	68
5.2.2 フレネルゾーンプレート(FZP)	70
5.3 FZPの直接描画とブレード化	72
5.3.1 FZP の直接描画	72
5.3.2 直接描画によるブレード化	73
5.4 回折効率の理論的検討	75
5.5 実験と検討	83
5.5.1 実験方法	83
5.5.2 実験結果と考察	85
5.6 5章のまとめ	89
第6章 結言	90
[付録] M レベル FZP の回折効率の算出	93
参考文献	95
謝辞	99
筆者の本研究に関する論文	100

第1章 緒言

1.1 本研究の目的

本研究は微小光学素子パターン描画のために、安価で使用が簡便なパーソナルユースに適したレーザ描画装置を開発し、この装置を用いて回折型光学素子(主としてゾーンプレート)の描画に応用することを目的とする。高精度描画を達成するために、装置構成要素として、精密エアスライドテーブルと専用光学ヘッドを開発し、その特性と制御方法を明確にする。また、本装置の効率的利用(特に、描画時間短縮)のために、種々の描画線幅制御法を提案し、各々について理論的および実験的に検討する。さらに、本装置を用いて、直接描画法により階段状ブレース化した回折型光学素子を作製し、その特性を理論的に解明し、実験値と比較検討する。

1.2 本研究の背景

半導体集積回路の製造工程で使用されていたフォトリソグラフィの技術が、工業製品の軽薄短小化の過程で他の分野においても広範に利用されるようになってきた。特に、光インターコネクションをはじめとする光学的な情報処理システムにおいて、電子回路が歩んできた「電子集積回路」と同様な「光集積回路」への道程を進みつつあるが、光集積回路のパターン作製のためにも、フォトリソグラフィ技術は非常に有効である。

電子集積回路のパターン(フォトマスク)作製においては、もっぱら電子ビーム描画装置が利用されるが、この装置は電子ビームを用いるため、真空中で描画する必要があり、装置が大型・高価で保守が大変である。そのため、大手のメーカーやセンター方式での使用に限定され、一般的に使用するには適していない。特に、研究開発で頻繁にパターンの修正・変更をしながら開発工程を進めていくには、ターンアラウンドタイムが短く、パーソナルユース的に利用が出来る、すなわち、安価で使用が簡便な装置が望まれている。また、光集積回路のパターン描画に際して、パターン幅は光の波長との関係で、電子集積回路で使用されているほどの狭いものは必要としない。本研究は、この様な要望に対して最適な手段であるレーザ描画装置を開発し、さらに、これを応用して光情報処理の中でも重要な部品であるフレネルゾーンプレートを作製しようとするものである。

1.3 微細パターン描画方法

フォトマスクレベルの微細パターン描画方法として、大別すると表1.1 のようなものがある。

Table 1.1 Writing methods of fine pattern and its special features

Method	Application	Minimum line width μm	Special features
Electron beam	Semiconductor I.C.s	under 0.1	Ultra-high precision Large-sized equipment Bad maintainability
Laser beam	Optical I.C.s Optical elements	1.0	High precision Small-sized equipment Easy-to-use
Optical beam (Photo-plotter)	Printed circuit boards	100	For P.C.B use only
Photo-reduction	Optical elements Hybrid I.C.s	10	Precision Simple Complex procedure
Precision machining	Zone plates Gratings	10	Precision Difficult-to-use

電子ビームによる加工方法は、半導体(電子)集積回路のパターニング用に AT&T Bell 研究所で開発されたもので、電子集積回路用のフォトマスクはほとんどこの装置を応用して描画される。最小線幅として $0.1 \mu\text{m}$ 以下のパターニングが可能で、パターン描画装置の中では最も高精度のものである。学会レベルでは光学素子描画にも多数応用されている^{1-11)~1-9)}。電子ビームを用いるために、真空中で描画が行われることから装置が大型になり、高価で保守の手間がかかるなどの難点がある。このため、大手の企業やセンター方式での利用が中心となる。

レーザービームによる方法は、大気中での描画のため、装置は小型で簡便のものが可能である。最小線幅は光の回折限界の関係から $1 \mu\text{m}$ 程度であるが、光集積回路のパターニングについては、この程度で十分である。ただし、この方法を利用した装置は実験室レベルのものが開発されてはいるものの、ほとんど市販はされておらず^{1-10)~1-14)}、最小線幅 $1 \mu\text{m}$ レベルの描画装置は空白域になっている。なお、レーザービームプリンタのようにレーザービームを光スキャナで走査して、パターン描画する方法があるが、この方法では集光レンズのワーキングディスタンスの関係で開口数を大きくとれないため、集光ビーム径を微小にはできない。この方法は最小線幅の観点からは、

分類としては光ビーム法に近い。

光ビーム法は、水銀ランプなどの光源を太い丸型または角型のビーム状にして、パターンを描画するもので、プリント配線基板用のホトプロッタとしてよく知られている。最小線幅はサブミリオオーダーが主体であるが、最近では上記レーザービーム式のものも商品化されて来ており、ハイブリッド IC 基板のパターニングなどの高精細用として利用されている。

写真縮小による方法は、作図用プロッタなどで描画したものを写真縮小により微細パターン化するもので、特別な描画装置を有しない場合でも手軽に微細パターンが得られる簡易的方法として重宝されている。例えば、大学などでコンピュータプログラムや表面弾性波用の電極パターンなどが作製されている。また、この方法で作製した写真乾板を露光機でハードマスクに転写して利用するなど、苦肉の策を実行している場合も少なくない。装置としては特殊なものを必要としないが、プロッタ描画と写真縮小という二度手間が必要となる。

精密機械加工法は特殊な場合で、超精密旋盤にダイヤモンドバイトを付けてゾーンプレートを加工することや、いわゆるルーリングエンジンと呼ばれる専用機械によってリニアエンコーダや分光用回折格子を作製するなどに応用される^{1-15)~1-16)}。うまく作ればかなりの高精度のものが作製できるが、機械装置の管理や試運転等の熟練が必要である。

このような描画装置の中で、本研究が目的とする光学素子の描画に適するものとしては、電子ビーム法とレーザービーム法があるが、前者は前述のごとく高価で手軽には利用できない。レーザービーム描画装置は現状では適当な市販装置はなく、簡単には入手できない。そこで、安価で保守が容易であり、実験室のすぐ脇に置き、個人的に使用できる微細パターン描画装置を開発する。

1.4 本論文の構成

本論文において、上記背景のもとに、光導波路やフレネルゾーンプレートなどの光学素子のパターンニングを目的として、安価で個人的に利用できる簡便なレーザービーム描画装置を開発した。この装置を応用して、階段状にブレード化したフレネルゾーンプレートを作製し、その特性を評価した結果について述べる。

まず、第2章において、本描画装置のかなめとなる精密位置決めテーブルとして開発した、エアスライドテーブルについて、その開発のコンセプト、構成、性能、特徴を述べる。

第3章では、開発したレーザー描画装置の構成と特徴、特性、描画性能について述べる。描画装置は位置決めテーブルを2段重ねにしたXYテーブルタイプと一軸ずつ独立にしたタイプの2機種を開発したため、各々について説明する。

第4章では、本装置において、描画時間を短縮するために、描画線幅を制御する方法について検討する。主としてビームウエスト(合焦点)で描画する方法とデフォーカス(焦点からずらして)描画する方法について検討し、実験によりその特性を確認した結果を述べる。

第5章においては、本装置を用いて、最終目的である回折型光学素子の典型であるフレネルゾーンプレートを階段状にブレード化して描画する方法とその結果および作製したゾーンプレートの特性と理論的検討結果について述べる。

第6章で最後のまとめを行う。

本論分において、第2章及び第3章に関わる精密位置決めテーブルとレーザー描画装置開発に関しては構想及びコンセプトは筆者の意向を強く反映したものであるが、多数の共同開発者の協力を得て完成したものである。第4章と第5章に関わる研究は筆者独自の構想に基づくもので、オリジナリティの高いものであると考えている。

第2章 超精密位置決めテーブル(エアスライドテーブル)の開発

2.1 はじめに

前章において、光回路素子のパターン描画装置としてレーザー描画装置が最適である旨を述べた。レーザー描画装置にも複数本のレーザービームで描画する方法などがあるが、ここでは最もシンプルなシングルポイントの集光レーザービームにより描画する装置を対象にする。この様な装置では、描画されるパターンの精度は使用する位置決めテーブルの精度により決定される。光回路素子パターン描画用としては、使用する波長の $1/10$ 程度の精度が必要であり、この精度を達成するためには通常の位置決めテーブルでは不十分で、特別な考慮が必要である。さらに、この装置は小型・簡便に構成できると言う長所がある一方、描画時間が長いという短所がある。時間的な問題は個人的な使用方法であれば、夜間無人連続運転のようなことで解決も可能である。しかし、この長い描画時間の間、装置自体として安定に稼動する必要がある。特に、連続稼動による発熱や環境・室温の外乱に影響されない構成が必要である。M. B. Fleming らは種々の回折型光学素子作製方法について検討した結果、「レーザービーム描画法は最もシンプルな方法であるが、描画速度が遅いことから、メカニズムの極度な安定性(extreme mechanical stability)が必要である」と述べている²⁻¹⁾。本研究においても、この点は最も深く考慮すべき点であり、特に位置決めテーブルと光学系の構成に関しては特別な考慮をした。

本章では、その内の特に重要である位置決め系に関して、サブミクロンの精度と長期安定性を保証し得る精密位置決めテーブルとして、ガイド部を空気軸受とし、駆動用リニアモータをコンパクトに組み込んで直接駆動方式とした「エアスライドテーブル」を開発したことについて述べる。本エアスライドテーブルはレーザー描画装置の他にも広く超精密位置決め装置に応用されており、その性能と安定性の証と言えよう。

2.2 開発のコンセプト

レーザ描画装置用位置決めテーブルを開発するに際し、開発のコンセプトとして下記の点を重視した。

- a) 超精密;サブミクロンの位置決め精度を確保すること。
- b) 高安定性;長時間の稼動に対して精度が保証されること(昼夜連続運転可能)。
- c) コンパクト;特に薄型を指向し、使い易さの点からコントローラ直結型とする。

a)は光学素子描画を考えたとき、描画パターンは最小サイズが波長オーダーとなり、その精度としては最小サイズの $1/10$ が必要と考えられる。従って、波長を大略 $1\ \mu\text{m}$ と考えると、精度として $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ が必要である。この精度を保証し得るテーブルの構成として、ガイド部は非接触方式が必要であり、駆動部はリニアモータによる直接駆動とレーザ干渉測長器又はリニアエンコーダの位置検出器を出来るだけ描画位置に近い点に取付けた、フルクローズドループの制御系が必要である。通常良く使われる回転型モータと送りネジによる、いわゆるセミクローズドループ制御機構では、ネジの精度不良やバックラッシュなどの影響で精度保証が困難である。

b)においては、レーザ描画装置はクリーンルームのような場所で使われることが多く、他の工作機械などに比べれば使用される環境は良好と言える。従って長時間安定な稼動をするためには、装置自体からの発熱を抑制または排出して、温度上昇および温度変動を防ぐことが重要である。これを実現するには、ガイド部を非接触にするのが理想的である。非接触のガイドとして、空気軸受方式や磁気軸受方式があるが、真直度(移動と直角方向の精度)の点でも高精度が要求される用途に対しては、空気軸受方式が適している。

c)に関して、特に動的精度を保証するために高さ方向の寸法を小さくすること、また、描画装置全体を小型化するために駆動用モータとガイドなどをそれぞれ組み付けた構成ではなく、一体構造化した構成が望ましい。さらに専用制御用コントローラと簡単なケーブル接続のみで即サブミクロンの超精密位置決め用のテーブルが得られるユニット構成が望ましい。

このようなコンセプトのもとに、空気軸受方式のガイド部に直接駆動方式のブラシレスリニアモータ

タをコンパクトに組み込んだ「エアスライドテーブル」を開発した。ガイド部は、特に薄型化を指向して、圧縮空気の反発力と永久磁石の吸引力を平衡させた空気／磁気複合軸受方式とした。

2.3 空気浮上／磁気吸引複合型エアスライドの原理

本節においては、新たに開発した空気浮上／磁気吸引複合型エアスライドの原理を述べる。

2.3.1 従来型空気軸受ガイド

空気軸受ガイドは非接触のために高精度(特に真直度が良い)で位置制御性能が良いと言う特徴があるが、その反面、寸法・形状が大きくなるという短所を有している。

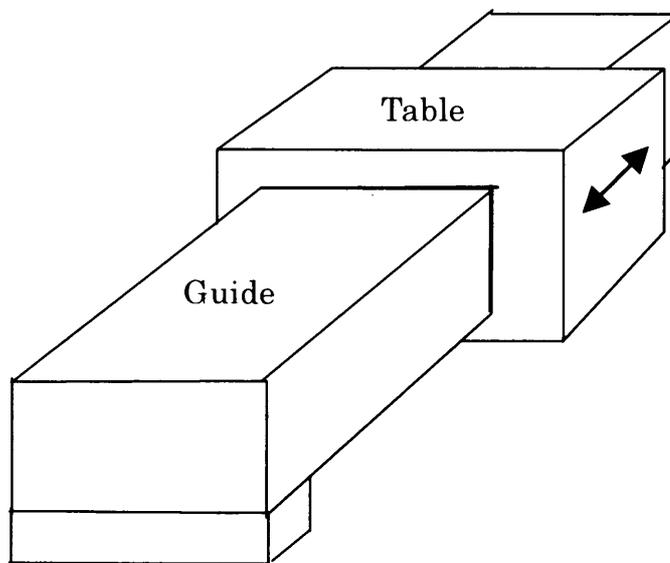


Fig. 2.1 Conventional air slide

図2.1は通常良く用いられる空気軸受ガイドである。ガイド部の周り4面を空気軸受を有するテーブルで取り囲んだ、4面拘束型の構造をしており、移動と直交方向の拘束をすべて空気軸受で構成したものである。テーブル部は高圧(通常 5 kgf/cm^2 程度)の空気圧に耐えて、数 μm のオーダの空気軸受隙間を確保するために、かなりの部材厚さが必要である。そのため、この構造にするとテーブル部の寸法はかなり大きくなり、応用範囲が制約されることがしばしばあった。特に、テーブル上に対象物を載せて動作させる際に、可動部重心を出来るだけ低くすることが、動

的な精度向上に役立つことから、高さ寸法を低くする要求が大であった。

また、この方式で、拘束された4面全てにおいて、 μm 精度の正確な空気軸受間を確保する必要があり、加工・組立てに厳しい精度が要求される。このため、加工・調整の手間がかなり掛かり、コストアップの要因になっていた為、調整の容易な方式が望まれていた。

2.3.2 空気浮上/磁気吸引複合型ガイド

上記要求に対して新しく開発した空気浮上/磁気吸引複合型ガイドの原理図を図2.2に示す。これは、図2.1の4面拘束型エアスライドを水平方向に切断した形のもので、空気の浮上力に対して、永久磁石による吸引力を平衡させて、上下方向の拘束を行うものである。

すなわち、テーブルとガイドの間には圧縮空気が送られて空気軸受を形成している。 G_a はその隙間である。その浮上力に対向して、テーブル端面両端に設けられた永久磁石のため、テーブルはガイド部下端のベースに吸引される。 G_m は磁石とベースの間の距離である。なお、横方向は両端とも空気軸受でガイドされている。また、破線部は内蔵したリニアモータである。

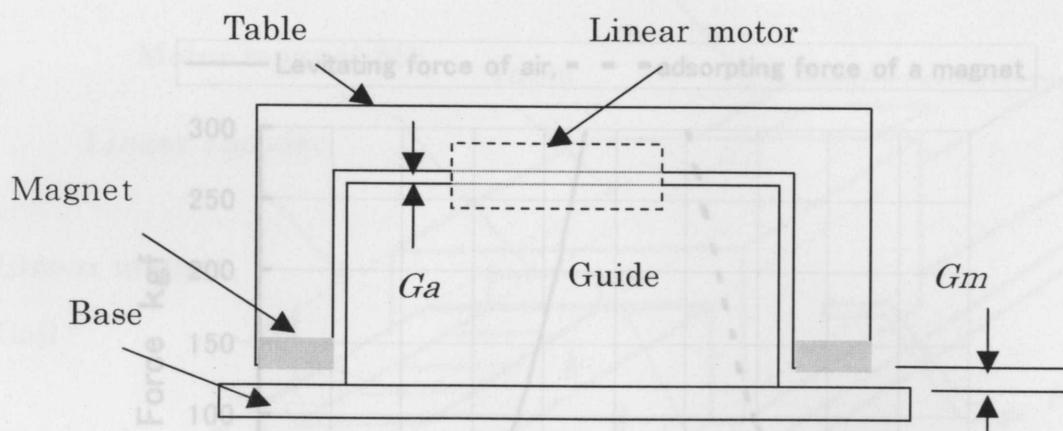


Fig.2. 2 Hybrid air guide

Fig.2. 3 Levitating force and adsorption force

永久磁石の吸引力について検討する。磁石とベース間のエアギャップにおける磁束密度を B_g , ギャップの距離を G_m , 磁気ギャップの面積を A_g とすると, ベースとテーブル間に働く吸引力 F_g は式(2.1)で示される。

$$F_g = K \left(\frac{B_g}{G_m} \right)^2 A_g \quad (2.1)$$

ここで, K は定数である。

この方式は, アギャップが独立に設定されており, 設計および調整が容易な構造である。空気軸受面は μm 台の精度が必要であるが, 従来方式のようにガイドの4面全一方, 空気浮上力とその隙間距離の関係は, 空気軸受の絞り形式に依存して複雑な非線形形式で示されるが, 大まかに言って, $10 \mu\text{m}$ 程度の隙間を有する反比例の特性を示す(そのような設計をしている)。

2 図2.3は実際の設計に沿った諸元から, 磁気吸引力と空気浮上力を計算してグラフに示したものである。前者は横軸正方向にギャップ G_m を mm 単位で, 後者は横軸負方向にギャップ G_a を $10 \mu\text{m}$ 単位で示してある。この特性から, 磁気吸引力は G_m のサブ mm 単位程度の設定で吸引力が確定されるが, 空気浮上力は μm 単位で決まってくるのが解かる。

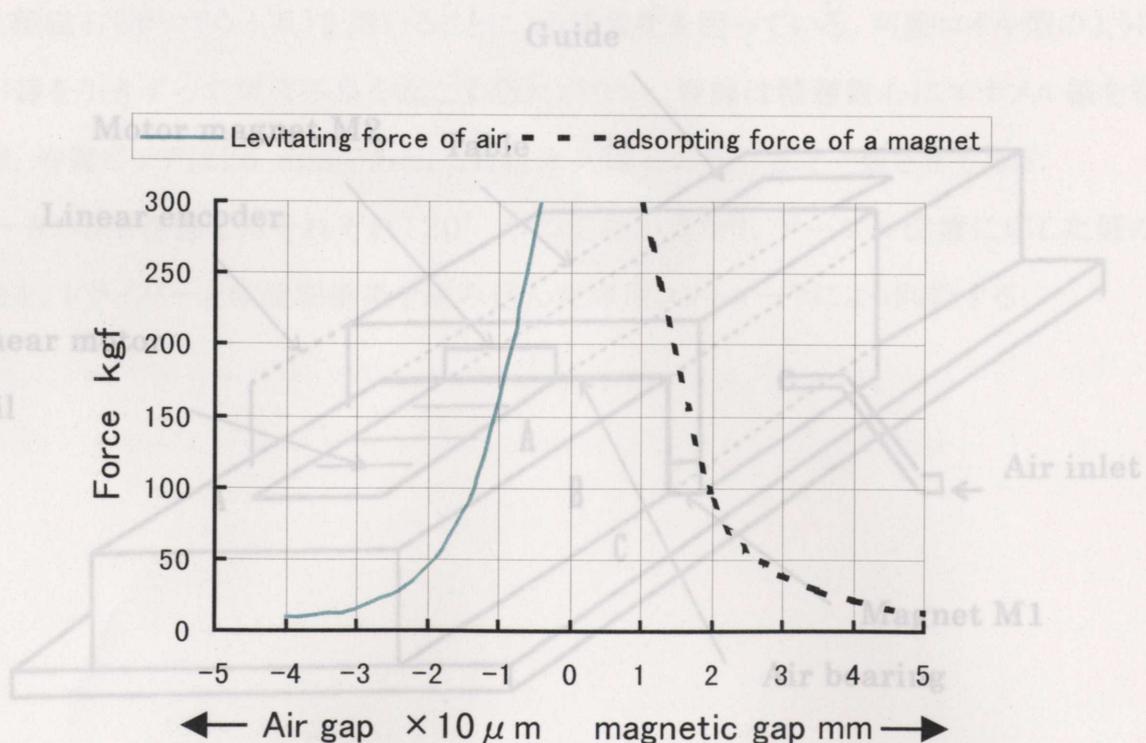


Fig.2.3 Levitating force and adsorption force

例えば、図2.3において空気浮上量(空気軸受隙間)が $10\ \mu\text{m}$ の場合、その浮上力は約 $170\ \text{kgf}$ であり、これに対応する磁気吸引のギャップは $1.5\ \text{mm}$ である。従って磁気エアギャップ G_m を $1.5\ \text{mm}$ になるように設計すれば、空気軸受ガイド部は隙間 $10\ \mu\text{m}$ の空気軸受が形成されることになる。なお、磁気的な吸引力は、リニアモータの永久磁石による力も加算されることを考慮しておく必要がある。

この方式は、空気軸受隙間と磁気エアギャップが独立に設定されており、設計および調整が容易な構造である。空気軸受面は μm 台の精度が必要であるが、従来方式のようにガイドの4面全てに対して高精度が要求される訳ではない。特に、上下方向に関しては上面の平坦度さえ確保できれば良く、平行度は問題にならない。従って、加工・組立ては大変容易になる。

本方式の採用により、高さ寸法が小さくコンパクトな構造のエアスライドテーブルが構築できる。

2.4 エアスライドテーブルの構成

開発したエアスライドテーブルの構成を図2.4に示す。まず、ガイド部について述べる。

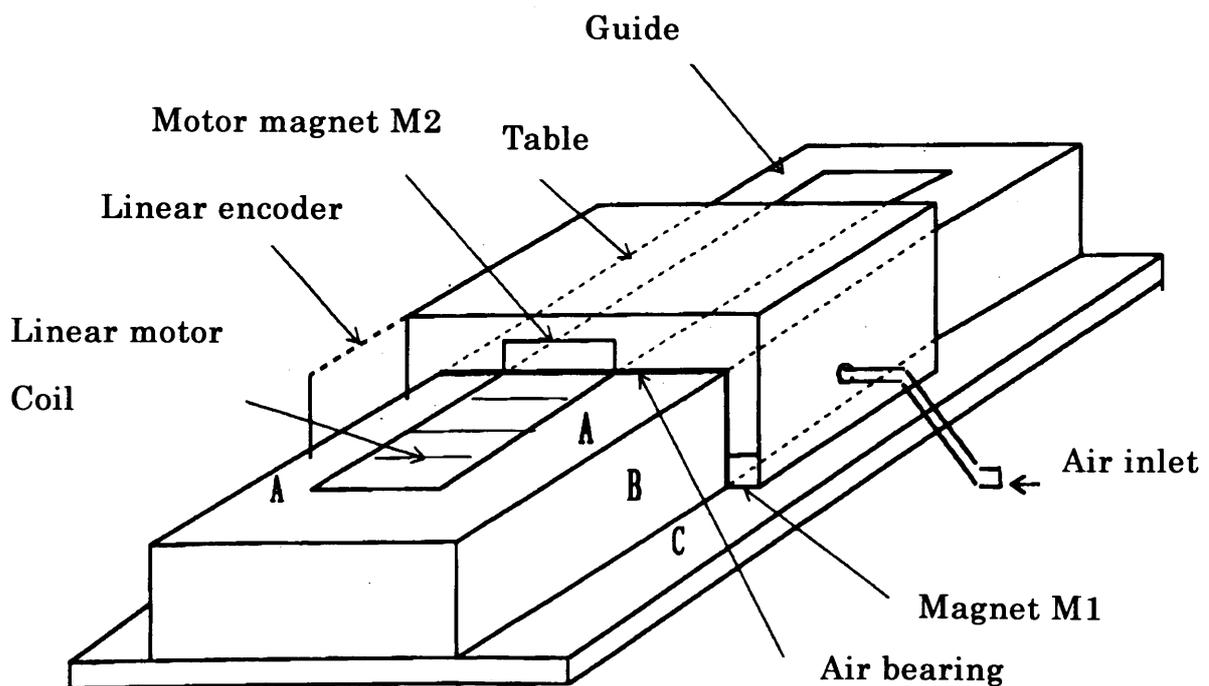


Fig.2.4 Construction of the air slide table

ガイド部材のA面およびB面(両面)にかぶせた逆凹型の空気軸受パッドを有するテーブルに圧縮空気を送り,その反発力でテーブルを浮上させる.これにより,水平方向はB面により空気軸受ガイドされる.垂直方向はテーブルの両端に設けた永久磁石とベースCの間の吸引力と,A面に働く前記空気の反発力とを釣り合わせ,空気軸受の隙間として最適な数 μm 程度の隙間になるよう設計する.永久磁石による吸引力はテーブル両端の磁石の他にリニアモータ部の永久磁石による吸引力も加算されることを考慮する必要がある.この構造により,通常よく用いられる4面拘束型エアスライドの半分程度の厚さ(高さ寸法)でエアスライドテーブルが構成できる.

上(引っ張り)方向の剛性は永久磁石の吸引力に依存することになるが,テーブルの真直度が数 μm と大変良いため,C部の隙間は1 mm以下にすることができ,従って永久磁石の吸引力はかなり強く,通常の用途ではほとんど問題ない.しかし,逆さにして使用する場合には取付けられる物の重量の制限がある.

リニアモータはガイド部の真中に3相巻線を埋め込みモールドし,対向するするテーブルに希土類永久磁石を取付けた可動磁石型ブラシレスモータである.可動磁石型は可動コイル型に比べると,可動部が磁石のために重くなることから,即応性の点で難があるが,磁石材料に高エネルギー密度の希土類磁石(サマリウム系)を用いることにより軽量化を図っている.可動コイル型のようにコイルのリード線を引きずって精度不良を起こす恐れがない.巻線は積層鉄心にエナメル線を巻いたものであり,巻線ピッチは25 mmである.これは永久磁石の幅寸法と一致させてある.

リニアモータの3相巻線にはそれぞれ 120° づつ位相が異なり,テーブル位置に応じた値の正弦波状電流を,ドライバーと位置制御系を組み込んだ専用コントローラにより供給する.

図2.5は開発したエアスライドテーブルと専用コントローラの写真である。白色のテーブルはセラミック製のもので、もう一方はアルミの表面処理をしたものである。上方に見える専用コントローラと組み合わせれば簡単に μm 以下の超精密位置決め系が簡単で手軽に構成できる。

位置検出器はガラススケール式のリニアエンコーダを利用した。最近、リニアエンコーダは高精度化が進み、 nm 台の精度を有するものもある。温度による膨張を極力押さえたガラス材質を用いることにより、レーザ干渉式のように大気の影響を受けない高精度の検出が可能である。本装置では制御分解能 $0.1 \mu\text{m}$ と $0.01 \mu\text{m}$ を切り替えて利用できるようになっている。

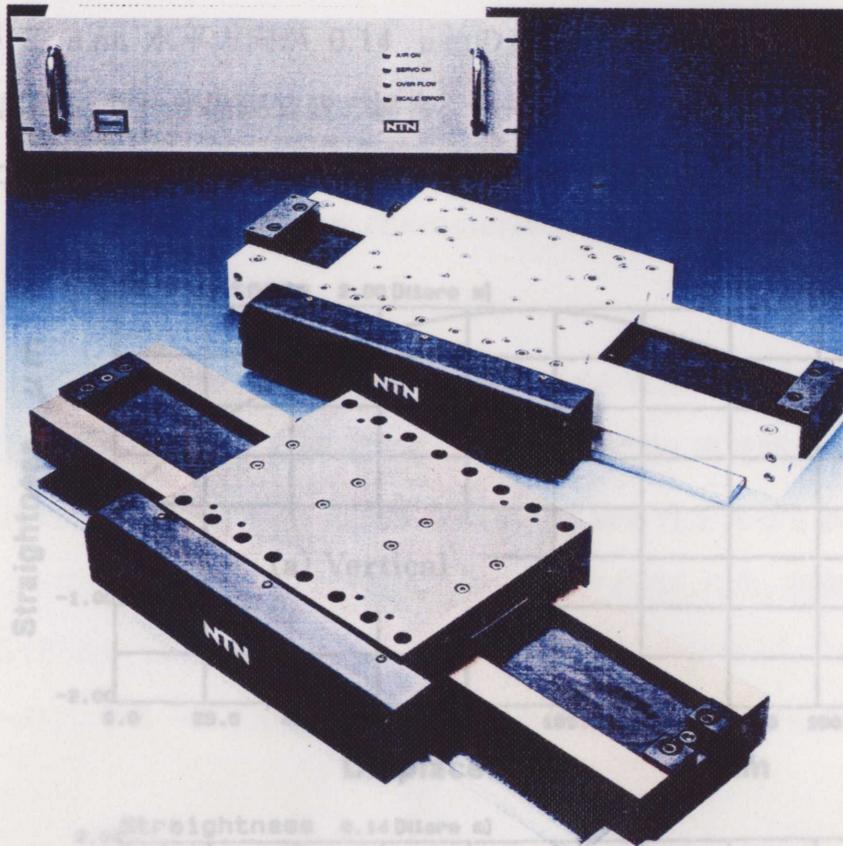


Fig.2. 5 Outlook of the air slide tables with PID controller. The upper (white) is made of ceramics and the lower is made of aluminum

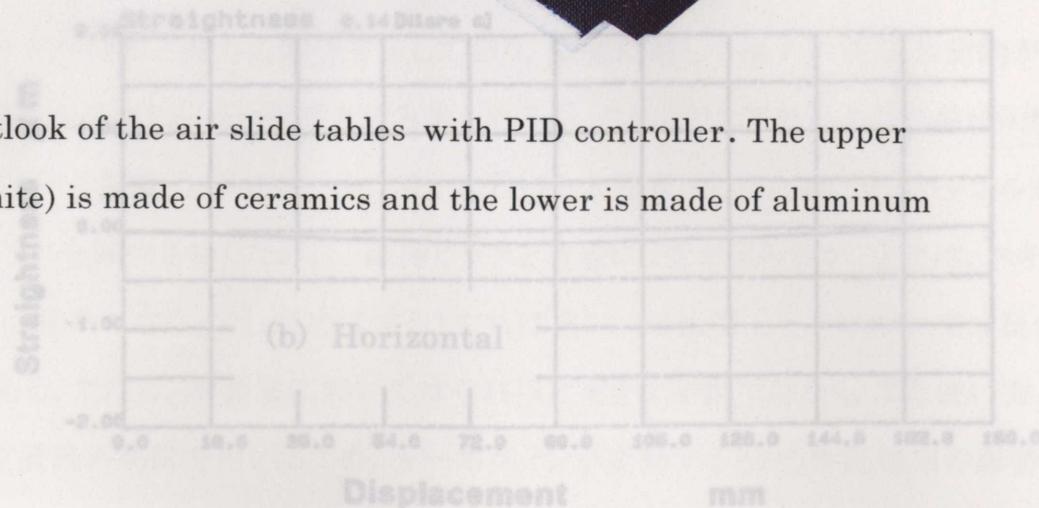


Fig.2. 6 Straightness of the air slide table

2.5 装置の特性

2.5.1 静特性

開発したエアスライドテーブルの静特性として、ガイド部の真直度、リニアモータの推力特性を測定し、検討した。

図2.6 にエアスライドテーブルの真直度を示す。(a)は垂直方向、(b)は水平方向の真直度である。垂直方向真直度はテーブル移動に伴うガイド部のたわみ・変形分を含んでいる。結果として垂直方向が $2 \mu\text{m}$ 、水平方向が $0.14 \mu\text{m}$ の真直度であり、レーザ描画装置への応用として十分な精度と言える。レーザ描画装置の場合、オートフォーカス機能があるため垂直方向真直度はあまり問題にはならず、水平方向真直度がパターン精度に直接関係する。

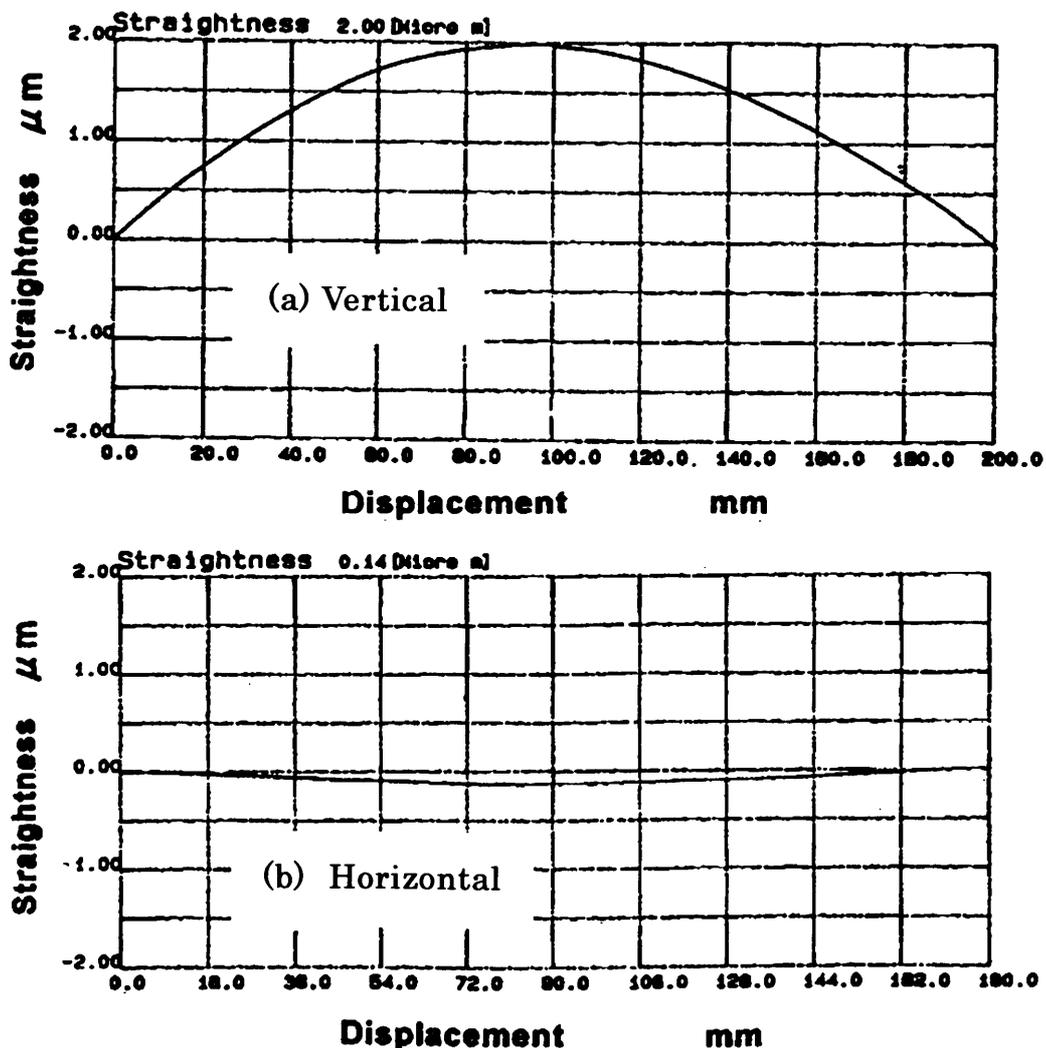


Fig.2.6 Straightness of the air slide table

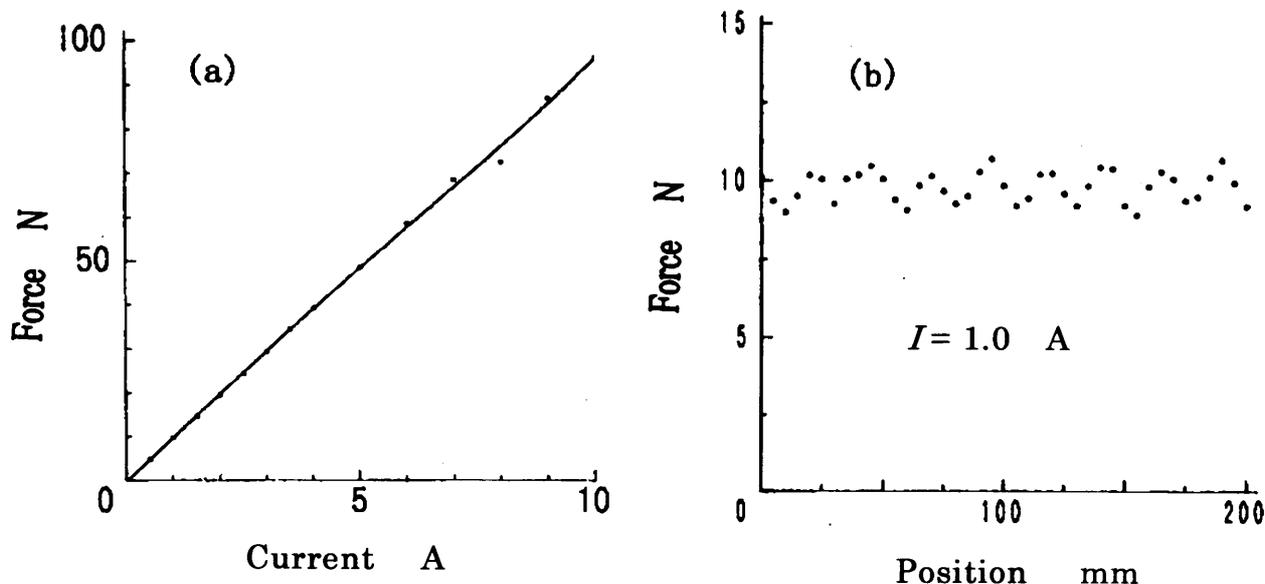


Fig.2. 7 Force characteristics of the linear motor

図2.7 はリニアモータの推力特性である。(a)はコイル電流に対する推力の大きさを示す。電流は磁極位置に対して正弦波状に変化するが、そのピーク値(電流指令値)で示している。推力はほぼ電流値に比例しており、コイル電流を制御すれば線形性を保って駆動力が制御できるため、モーションコントロール系用としては制御性のよいモータが得られた。制御用サーボ系のゲインとなる力定数 K_F (Force Constant)の値は 10 N/A である。力定数としてかなり大きな値が得られ、大きなパワーのリニアモータと言える。これは強力な希土類磁石を利用した効果である。

(b)はテーブル位置と推力の関係を示しており、位置に対して推力の周期的変動が見られる。図からは周期ピッチが25 mm程度と読み取られるが、これはリニアモータの巻線ピッチに相当する。磁石のピッチと巻線ピッチを同一にした、いわゆる全節巻にしたため、推力リップルが発生したものである。これを減少させるために、磁極ピッチと巻線ピッチをずらすか、または、スキュー(磁極を移動方向に直角でなく、少し斜めにする)すれば良い。回転型モータにおいては良く使われている手法である。ただし、本装置においてはそれほど大きな変動ではなく、また使い方として力制御ではなく位置決め制御で用いるため、サーボゲインが変動するという外乱相当の影響はあるが、実用的には、このままでほとんど問題なしと考えられる。

2.5.2 動特性

ここでは、エアスライドテーブルの動特性として、位置決めステップ応答と装置の周波数応答(伝達関数)を検討する。特に、周波数応答に関してはテーブルを2段重ねにしてXYテーブル構成とした場合、可動部の重心位置によって特性が大幅に変化する特徴があり、制御系の安定性に関わる事項のため、これについて詳しく検討する。

図2.8に位置決めステップ応答を示す。位置制御コントローラはアナログPID制御であり、移動ステップ量は $10\ \mu\text{m}$ 、負荷荷重として $1\ \text{kgf}$ の重量を図2.4のテーブル中心に取付けた。図2.8の上部波形は外付けの測定器(ADE社製マイクロセンス)による位置変位測定結果、下部波形は位置偏差信号が $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ (± 1 パルス)以内に入った場合Lレベルとなる整定完了信号である。位置決めは $30\ \text{ms}$ 以内に完了し、位置決め制御完了後は $\pm 0.1\ \mu\text{m}$ の精度を維持していることが解る。オーバーシュートがあるものの、その反動としてのアンダーシュートが見られず、非線形な応答が観察される。空気軸受を用いた系で、その他においても同様の非線形な応答が観測されており、狭い軸受隙間における空気の粘性が速度に依存して変化することにより、ダンピングファクタが変わるものと考えられる。

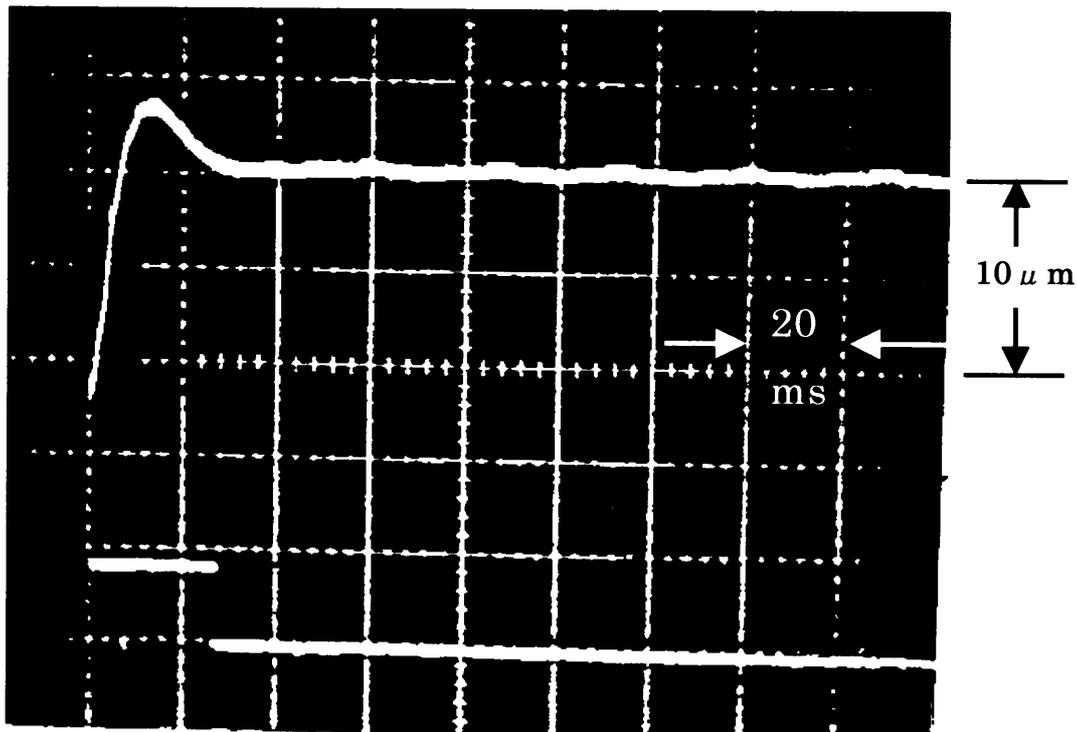


Fig.2.8 Step response of the air slide table

図2.9はエアスライドテーブルの移動方向機械系伝達関数(位置/力)のボード線図(周波数応答)である。位置の測定は制御用に用いているリニアエンコーダ信号を、また、力は電流値により測定している。図2.9(a)はテーブル上に載せた物体が移動方向の中心線に対して図2.4のセンサ(リニアエンコーダ)側にある場合を示し、図2.9(b)はその逆の場合である。空気軸受の場合、理想的には伝達関数($1/Ms^2$)で示される -40 dB/dec の勾配を有する右下がりの直線であるが、構造体の構成から決まってくる複数の固有振動数を有している。特に、サーボ制御に大きく関係する低周波数域から最初の位置にある 150 Hz 付近の固有振動数は図2.9(a)と図2.9(b)とで大きく変化した特性を示している。すなわち、図2.9(a)では位相が遅れているのに対して図2.9(b)では位相が進んでいる。

この理由は下記のようなものである。この固有振動数はエアスライドテーブルのヨーイングに関係するものである。ヨーイングは図2.4において、テーブルの中心に作用するリニアモータの推力と可動部重心位置の間で発生するモーメント力によって励起される。その固有振動数は可動部重心周りの慣性モーメントと空気軸受端面(図2.4のB面)のばね定数(モーメント剛性)により決定される。テーブルの構造上、このばね定数が小さいため、比較的低い周波数領域に固有振動数が現れる。ヨーイングの位相特性はリニアモータの推力中心、可動部重心、位置検出器の位置関係に左右される。重心が推力中心より検出器側にある場合、リニアモータの推力は重心を中心に偶力を発生し、検出器側では推力と反対方向の力を受ける。すなわち位相としては逆(マイナス)方向となり、遅れ位相になる。これが図2.9(a)に相当する。可動部重心が推力中心に対して位置検出器と反対側の場合は、検出器に働く力は推力と同じ方向となり、位相としては同相(プラス)になる。可動部重心が推力中心線上にあるとき、この固有振動数は現われない。

なお、重心位置移動によりヨーイングの慣性モーメントが変動し、その固有振動数も変化する。下側テーブルから見た可動部重量の大半は上側テーブルの固定部であるベース部分であるため、固有振動数の変化は大きな値にはならないが、限界的調整の場合は考慮しておく必要がある。

以上のように、ヨーイングの固有振動数はテーブルを薄型にしたために、比較的低い周波数帯域に発生し、位置制御系の制御帯域(通常 100 Hz程度)に近いことから、コントローラ的设计・調整に関して注意が必要である。特に、このテーブルを重ねて XY テーブルを構成する場合、下側のテーブルから見ると、上側テーブルの位置によって、常時位相特性が変化していることになる。

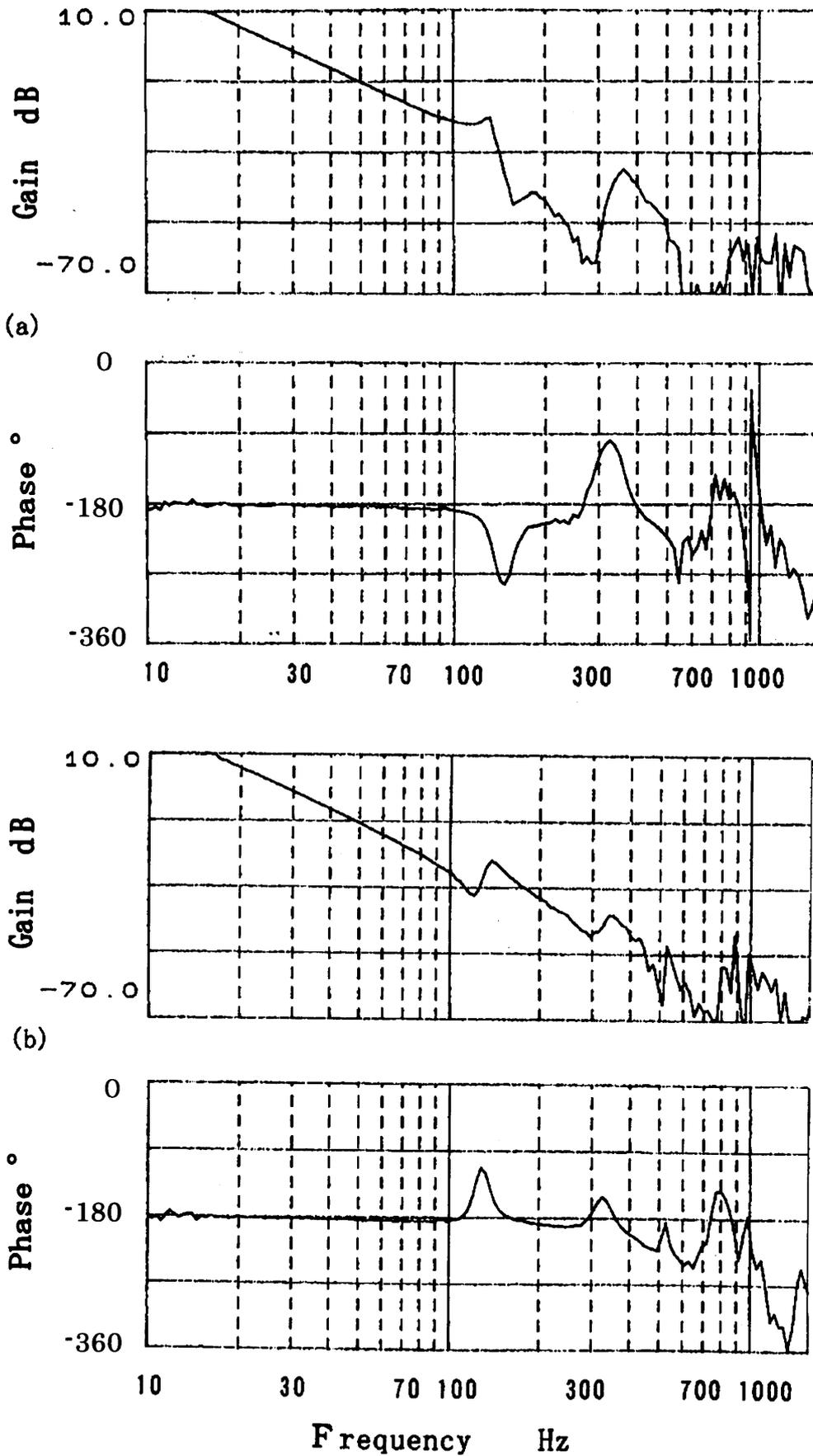


Fig.2.9 Frequency response for a transfer function of the air slide table

その場合も制御の安定性はもとより、動的な位置精度に関係するオーバーシュート量などの制御性能も影響を受けないような、ロバストなコントローラが必要である。

図2.10 はエアスライドテーブルを2段重ねて XY テーブル構成とした場合、下側テーブルにおけるコントローラを含む位置決め制御系の一巡(開ループ)伝達関数を示している。ヨーイングの発生に関して、制御的に注意する必要がある点は、制御の安定性が損なわれ易い遅れ位相の場合であり、制御帯域に関係するクロスオーバー周波数(ゲインのゼロクロス周波数)は60 Hz 程度に抑え、ヨーイングに伴う遅れ位相においても安定性が損なわれないような調整にしてある。制御系の位相余裕は 50° 程度あり、位置決め制御系としては十分な値である。

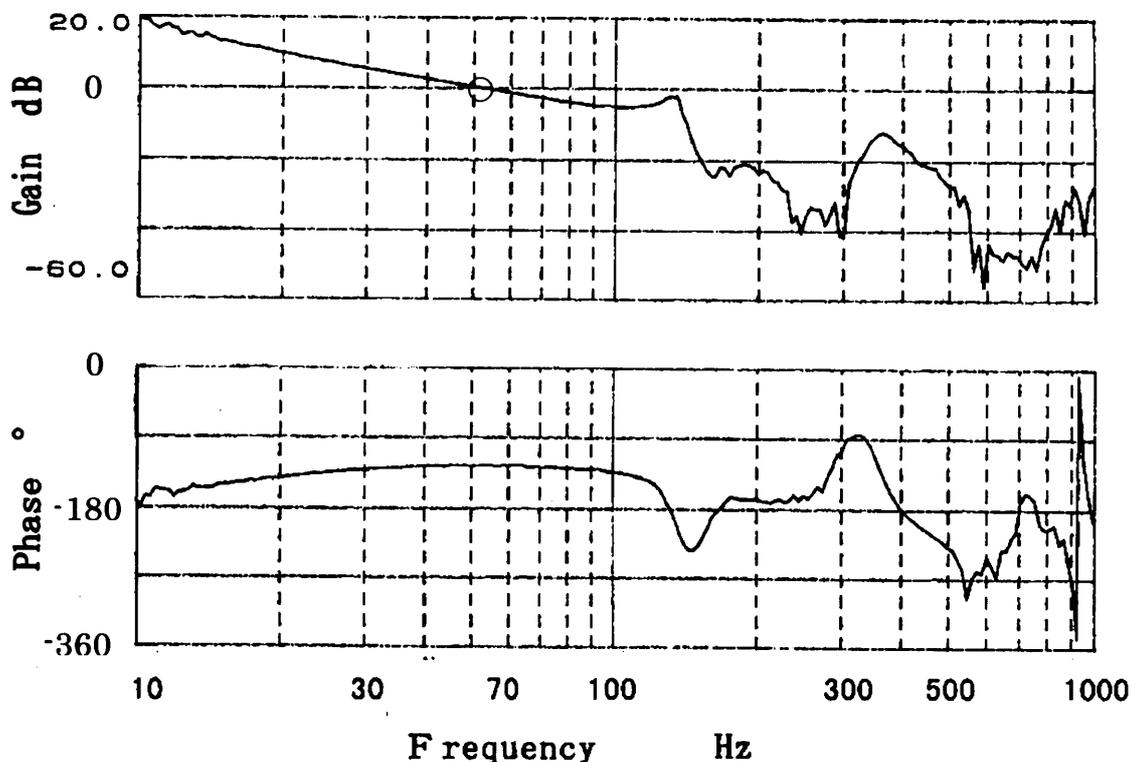


Fig.2.10 Frequency response for a loop transfer function of the positioning system with air slide table

なお、図2.9における350 Hz付近の固有振動数は水平方向の固有振動数であり、600 Hz付近のそれはピッチングの固有振動数である。水平方向はヨーイングと同様にエアスライドテーブルの横端面(B面)に関係するため、ばね定数値が低く、低周波数域に現れたものである。ピッチングに関しては、 XY 構成とした場合、可動部重心が下側テーブルの推力中心より上方に存在するために発生するものである。

2.5.3 装置仕様と性能

開発したエアスライドテーブルの仕様・性能を表2.1に示す.

Table 2.1 Specification of the air slide table developed

		Type A	Type B
Stroke	mm	200	500
Size (W×L×H)	mm ³	200×550×80	240×850×85
Straightness (horizontal)	μm	0.6	6
" (vertical)	μm	3	10
Load capacity	N	100	100
Stiffness	N/μm	140	140
Maximum force	N	60	48
Force constant	N/A	10	8
Maximum current	A	6	6
Positioning accuracy (repeatable)	μm	±0.1(±0.02)	±0.1(±0.02)
Maximum speed	mm/s	120(12)	120(12)
Air dispense	l/min	20	20
Weight of movable portion	kgf	7.0	8.5
Total weight	kgf	38	70

*1;()in the case of 0.01 μm resolution(option)

*2;Type A differs from Type B only in its stroke

2.6 2章のまとめ

サブミクロンの位置決め精度を有し、長時間の稼動においても安定に動作し、小型でコンパクトな位置決めが可能であるテーブルを開発した。上記目的を達成するために、永久磁石の吸引力と圧縮空気の反発力を平衡させたハイブリッド式のガイドと直接駆動方式のブラシレスリニアモータをコンパクトに組み込んだエアスライドテーブルとした。構成の特徴と特性・性能について記述した。特に、2段重ねのXYテーブル構成とした場合に問題となるヨーイングの固有振動数について検討した。

第3章 レーザビーム描画装置の開発

3.1 はじめに

第2章で記述したエアスライドテーブルの開発によって、レーザビーム描画装置にとって最も重要な位置決め精度を保証し得るテーブルが確保できた。このテーブルを応用してレーザビーム描画装置を新たに開発した。描画装置は位置決めテーブルと光学系の構成との関連から、2種類の装置を開発した。それらの構成と特徴は下記のようなものである。

a)独立テーブルタイプ描画装置

テーブルの平面(2次元)走査に際し、高精度・高速性を確保するため、テーブルを2段重ねにしないで独立構成とし、光学系を X 方向走査、被描画物を Y 方向走査する。また、光学系は移動方式にするため軽量化を考慮して単独レンズ方式でコンパクトにする。集光レンズは最も細かいパターンが描画できる(開口数の大きい)レンズに限定されるため、微細で高精度が要求され、描画範囲は広く単純な(パターン幅が多様でない)パターンの描画に適する。光学系移動方式は光学系の調整が難しいとか安定性に欠けるなどの心配がよくされるが、光軸調整系の設計をしっかりとっておけば、それほど問題はない。

b) XY テーブルタイプ描画装置

種々のパターンに対する描画時間の短縮を狙って露光線幅を大幅に変更できるように、集光レンズをレボルバ方式により自動交換できる構造とする。したがって、光学系が重くなるので固定光学系とし、被描画物を XY 走査する。そのため、テーブルは2段重ねの XY テーブル方式とする。本タイプの描画装置は、細かいパターンと大まかなパターンが混在するパターン描画に適するが、テーブルの動作は遅くなるため、描画面積は小さいものに適する。

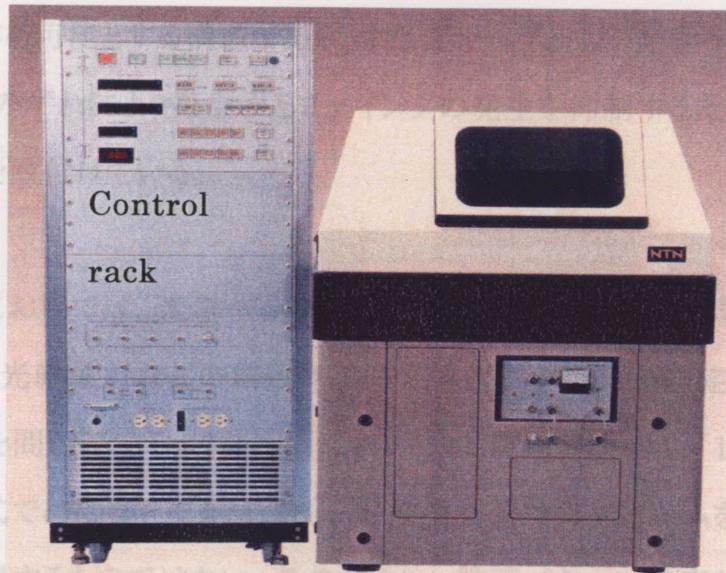
本章では、開発した上記2種類のレーザビーム描画装置について、それらの構成と特徴・特性を述べる。特に、a)のタイプに関して光学系に特別な工夫をしたので、これに付いても詳しく説明する。また、本装置を用いて光導波路やゾーンプレートを描画した結果についても概説する。

3.2 独立テーブルタイプ描画装置

3.2.1 装置構成とコンセプト

開発した独立テーブルタイプ描画装置を図3.1に示す。図3.1(a)は装置全体写真であり、右側が本体、左側は制御装置である。本体は遮光のためカバー付きであるが、恒温・換気のためカバー上部にエアフィルタ付きファンを設けている。基本的にクリーンルーム内使用を前提としており、それ自体の恒温装置は持っていない。

(a) Photograph of the
L.B. writing system
with controller



(b) Mechanism layout

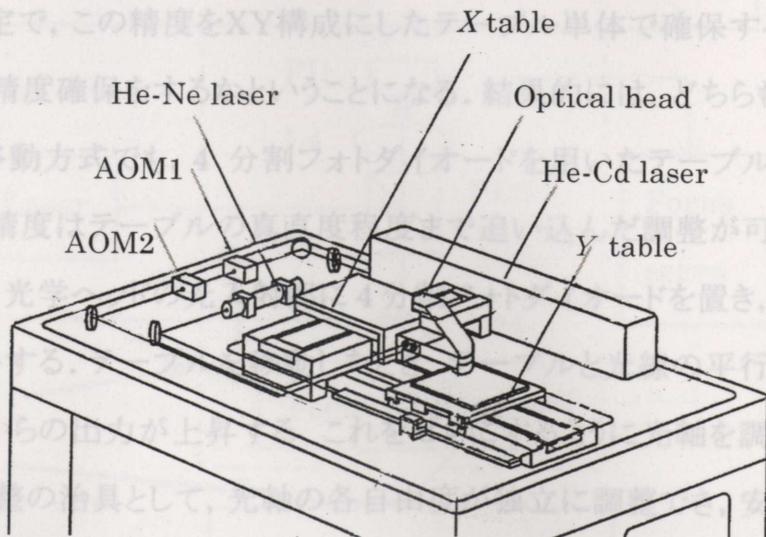


Fig.3.1 Independent-table type laser beam writer

機構部のレイアウトを図3.1(b)に示す。装置構成部品は温度及び応力に対して低膨張で発錆のない石定盤上に設置されており、全体は空気浮上式除振台を使用して除振されている。テーブルの高速動作と高精度を確保するために、使用しているエアスライドテーブルは2段重ねにせず、それぞれ独立にしてある。すなわち、光学ヘッドを搭載して移動する X テーブルは石定盤上に固定している。一方、被描画物である感光材付き基板(通常はガラス)を搭載して移動する Y テーブルは石定盤に掘り込みを行って固定し、X テーブルの下側で動作するように設置する。

これにより、X テーブルは光学ヘッドのみ、また Y テーブルは基板とそのチャックテーブルのみを可動部に取りつけるだけとなり、テーブルを2段重ねする構造より可動部の重量が格段に軽くなって、エアスライドテーブルの高速動作を可能とする構造である。また X テーブルは、光学ヘッドのオーバーハングにより推力中心と重心のずれにより発生するヨーイングの発生を抑制するために、光学ヘッドと反対側にカウンタウエイトを取付けている。

独立テーブルタイプの描画装置においては、光学ヘッドを移動することになり、この光学系移動方式は、光学の専門家から見ると、光軸ずれなどの精度不良を引き起こす懸念が想定される。確かに、光波干渉計等の光の波面を問題にするような応用においては、使用波長の1/100以上の精度が要求され、光学系移動方式では問題となる。しかし、本描画装置は集光ビームを利用するものであり、光の波面精度まで影響するものではない。そのために、描画パターン精度($\pm 0.1 \mu\text{m}$)を確保できれば良い。光学系固定で、この精度をXY構成にしたテーブル単体で確保するか、光学系移動方式で光学系を含めた精度確保をするかということになる。結果的には、どちらも同じ程度の調整が必要である。光学系移動方式でも、4分割フォトダイオードを用いたテーブルの移動方向精度測定により、移動方向の精度はテーブルの真直度程度まで追い込んだ調整が可能である。すなわち、図3.1(b)において、光学ヘッドの光入射部に4分割フォトダイオードを置き、レーザー光線をその中心に来るようにセットする。テーブルを移動したとき、テーブルと光線の平行度が良くないと、4分割フォトダイオードからの出力が上昇する。これをゼロにするように光軸を調整すればよい。ただし、この場合、光軸調整の治具として、光軸の各自由度が独立に調整でき、安定に固定出来るものが必要であり、光軸調整を十分意識した光学系設計が必要である。

3. 2. 2 光学系の構成

装置構成の機能ブロック図を図3. 2に示す. この中で, 光学系に関して詳しく説明する. 描画用レーザーは出射ビーム径 $\phi 1 \text{ mm}$ の He-Cd ガスレーザー(波長 442 nm ; Liconix 社)を使用した. その理由は下記である.

- ・感光材の感度波長が 450 nm 以下である.
- ・小型レーザー装置で空冷のため保守が簡単.
- ・比較的安価である.

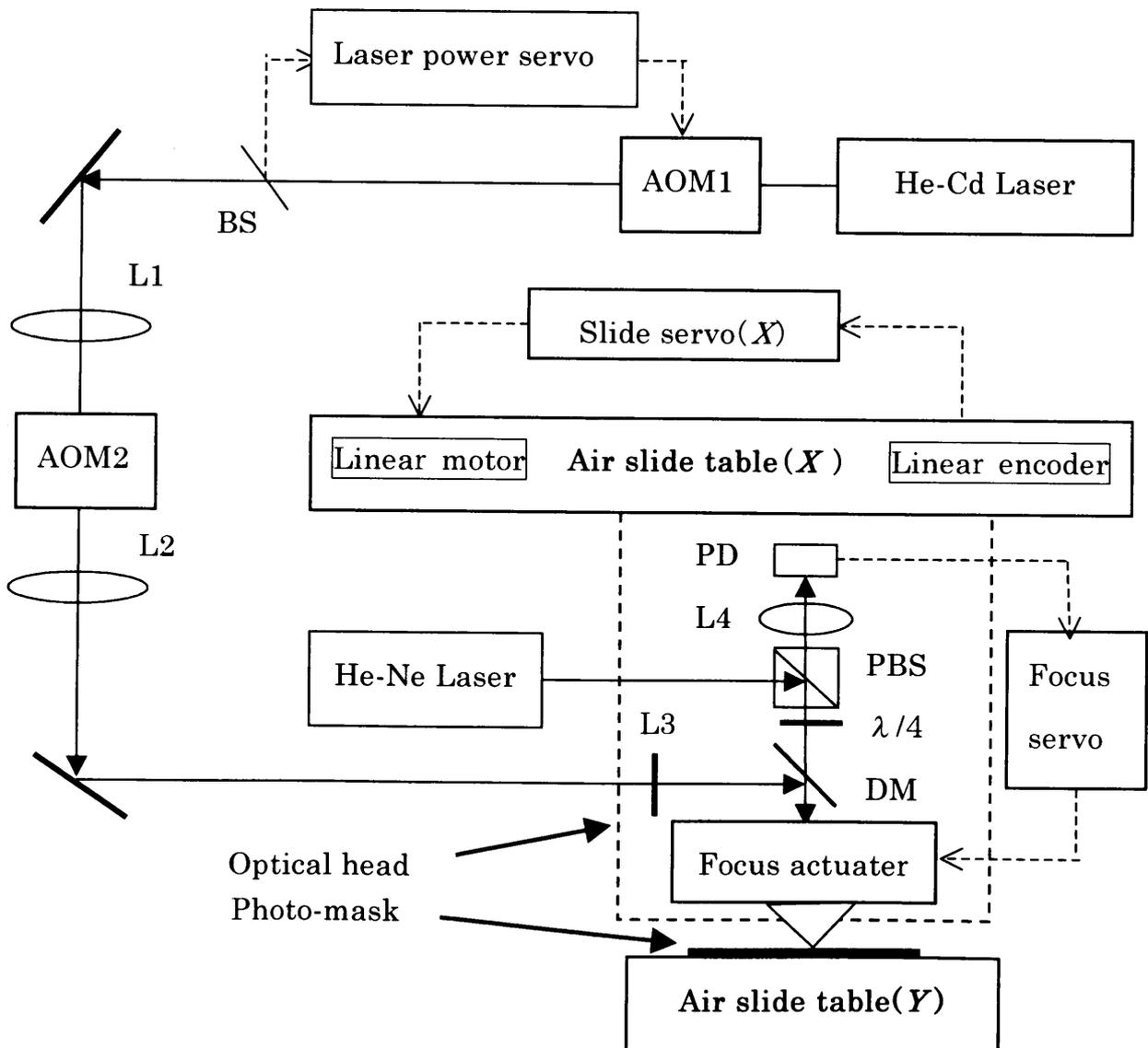


Fig.3. 2 Block diagram of the system

最近では半導体励起 YAG レーザの SHG なども出品されてきており、さらに小型化の可能性もある。また、開発中の段階ではあるが、青色半導体レーザが実用化されれば、光学ヘッド内に半導体レーザを組み込んで非常にコンパクトな装置が構成できる。

He-Ne レーザはオートフォーカス(焦点制御)用の補助光源である。

光源の He-Cd レーザ出力は2つの音響光学式光変調器(AOM1, AOM2)によりパワー制御とレーザ出力の on/off の変調を行い、光学ヘッドに入力される。パワー制御部では AOM1 の1次回折光を利用し、この一部をビームスプリッタ BS で取出し、フィードバックして光量制御のサーボを構成する。コントローラはアナログ PID 制御で、30 kHz 程度の制御帯域を有する。描画時にはテーブル送り系からの描画速度に比例した指令が与えられてレーザパワーが制御される。

AOM2 による on/off の変調は高速変調を目的として、変調帯域を 10 MHz 程度に確保するため、凸レンズ L1 によりレーザ光を $\phi 0.1$ mm 程度に集光し、そのビームウエストの位置に AOM2 を設置している。凸レンズ L2 は集光されたビーム径を元の径に戻すためのものである。

パワー制御・光変調されたレーザビームは X テーブルにより移動する光学ヘッドに導入され、凹レンズ L3 によりビーム拡大され、2色性ミラー DM で反射されてフォーカスアクチュエータ内の集光レンズに入り、微細スポット径に集光される。

使用した集光レンズの仕様は表 3.1 のごとくである。

Table 3.1 Specification of the focusing lens

Focal length	mm	2.7
Working distance	mm	0.14
I-O distance	mm	∞ (infinite system)
Numerical aperture		0.93
Field of vision	mm	$\phi 0.04$
Weight	gf	19
Size	mm	$\phi 17 \times L37$

レンズ自体の開口数は 0.93 であるが、入射ビーム径をレンズの開口より狭めているため、実効開口数は 0.6 である。集光レンズは後述のオートフォーカス機能を持たせるために、次頁で説明する図 3.3, 図 3.4 に示すようなフォーカスアクチュエータに組み込まれている。

フォーカス制御系の構成

フォーカス制御系はフォーカスアクチュエータ、焦点ずれ検出光学系および制御装置から構成される。フォーカスアクチュエータは図3.3, 図3.4に示すごとく、ボイスコイル型スピーカと同じ構成で、永久磁石の磁界中で可動コイルに電流を流すことにより動作するものである。図3.3に示すように、レンズはアクチュエータの両端で平行板バネにより支持されている。可動部重量がレンズのみで軽く板バネの位置分解能が高いため、高速・高精度なレンズの位置決めが可能である。

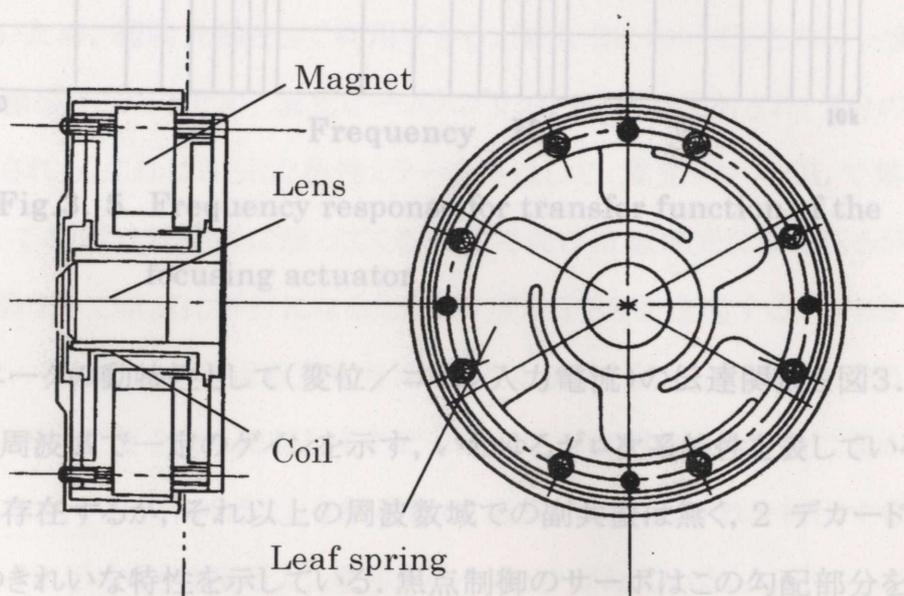


Fig.3. 3 Construction of the focusing actuator

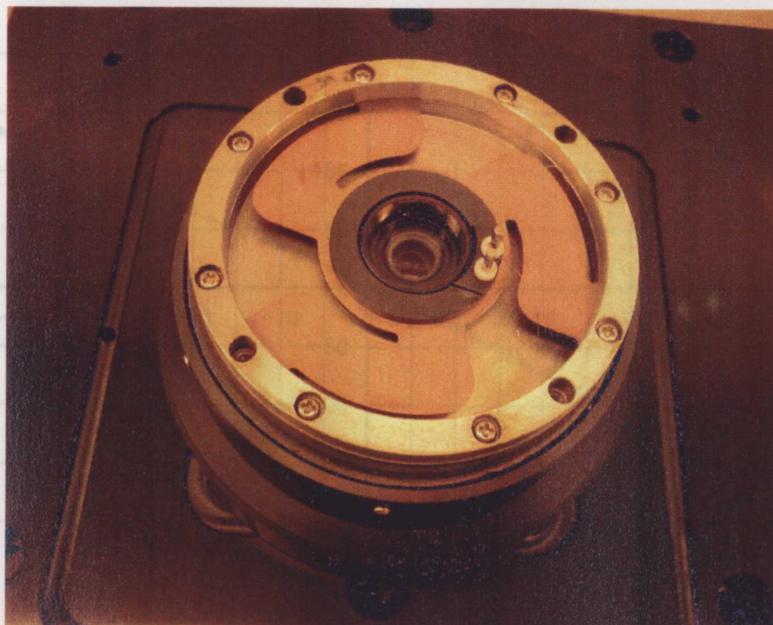


Fig.3. 4 Photograph of the focusing actuator

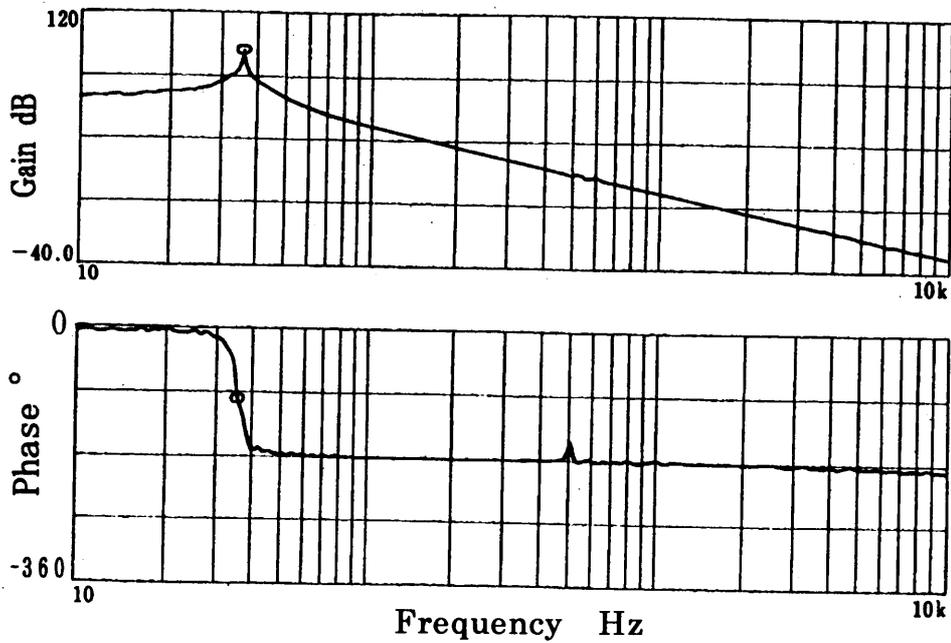


Fig.3. 5 Frequency response for transfer function of the focusing actuator

このアクチュエータの動特性として(変位/コイル入力電流)の伝達関数を図3. 5に示す. バネ支持系のため低周波域で一定のゲインを示す, いわゆるゼロ次系特性を表している. 35 Hz 付近に固有振動数が存在するが, それ以上の周波数域での副共振は無く, 2 デカード以上に渡って -40 dB/dec のきれいな特性を示している. 焦点制御のサーボはこの勾配部分を利用するため, ここに変な共振が無いことが理想である.

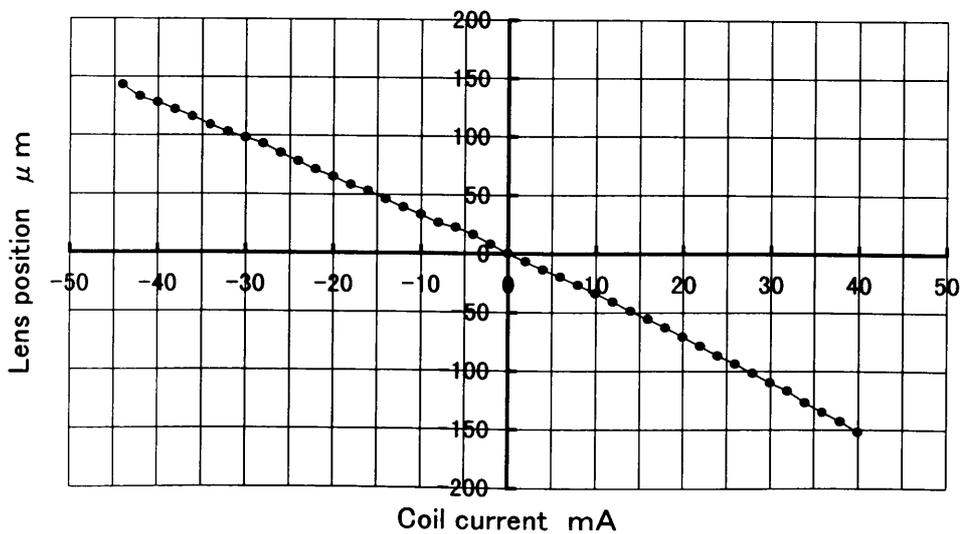


Fig.3. 6 Sensitivity of the focusing actuator

フォーカスアクチュエータのコイル電流に対する変位の感度特性を図3.6に示す。平行板バネ方式であり、変位が小さい領域において(変位/力)の関係は線形であり、ボイスコイル型アクチュエータの(力/電流)の関係も線形のため、板バネの変位が大きい(電流が大きい)領域を除いて、ほぼ直線で示される特性を有している。電流感度は $3.3 \mu\text{m}/\text{mA}$ である。この感度は後述するデフォーカス描画に際して、デフォーカス量の換算に利用する。

オートフォーカス制御系における焦点誤差検出は、図3.2の He-Ne レーザ(NEC 製、型式; GLG5350)を光源とした非点収差方式である。He-Ne レーザの波長(633 nm)はフォトレジストに感度を有しないため、補助光源として利用できる。図3.2において、このレーザ光は偏波面が紙面に垂直な直線偏光であるため、偏光ビームスプリッタ PBS で反射され、4分の1波長板を通して円偏光に変換される。これはさらに2色性ミラーを透過して、集光レンズ OL で集光され、被描画物により反射されて4分の1波長板に戻ってくる。ここで再び直線偏光に戻されるが、この時の偏波面は入射時とは異なって紙面に平行になるため、今度は PBS を透過する。PBS を通過したレーザ光は半円柱レンズ L4 により非点収差を与えられて4分割光検出ダイオード PD に入射される。PD は、集光レンズが丁度合焦した時にそのビーム形状が真円になる位置に置かれており、焦点ずれによりビーム形状が長円になることを利用して、電氣的に焦点ずれを検出する。得られた焦点ずれ信号は図3.7に示すような波形で、通常Sカーブと呼ばれている。

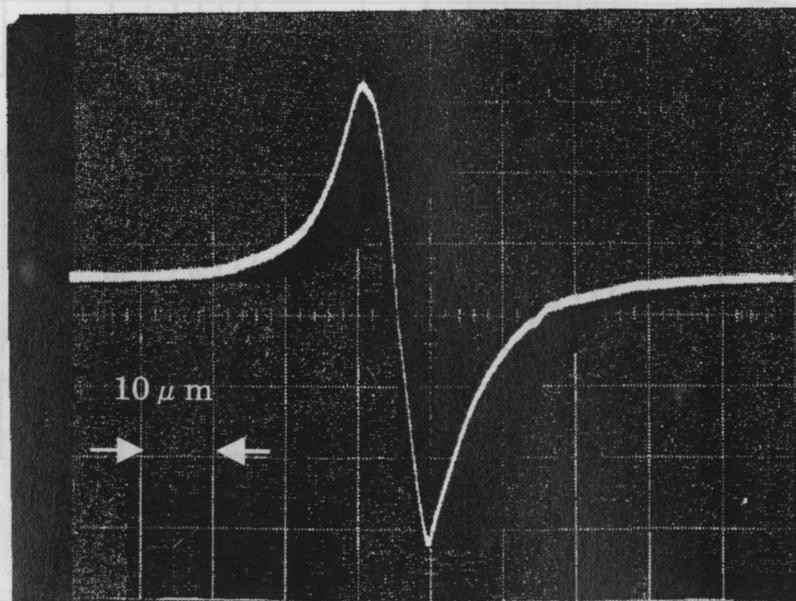


Fig.3. 7 Focus error signal (s-curve)

この波形の真中の直線部分を利用してフィードバック信号として利用する。図3.7から、この直線部分は $10 \mu\text{m}$ 程度あり、サーボにより、このゼロ点部分に焦点を結ぶように集光レンズを位置決めする。サーボ系はこの直線部分の範囲内のみでサーボ引き込みが行われる。従って、最初にフォーカスサーボを動作させるには、この引き込み範囲内に集光レンズを動作させるフォーカスサーボ動作が必要である。この引き込み範囲は焦点検出光学系の設計により決定される。

この焦点ずれ信号をサーボ系に入力して焦点合わせのサーボ系を構成し、前述のフォーカスアクチュエータを動作させる。オートフォーカスサーボ系の応答帯域は 3 kHz 程度と高速のサーボ系で、位置分解能は 10 nm 程度が確保されている。制御系の一巡伝達関数を図3.8に示す。クロスオーバー(ゲインが零デシベルの点)周波数は 3 kHz で、位相余裕が 60° 以上であり、高速で安定なサーボ系である。

ここに使用された集光レンズは、開口数が大きいため焦点深度が非常に浅い(サブミクロン)が、オートフォーカス系は十分これをカバーできる性能を有している。

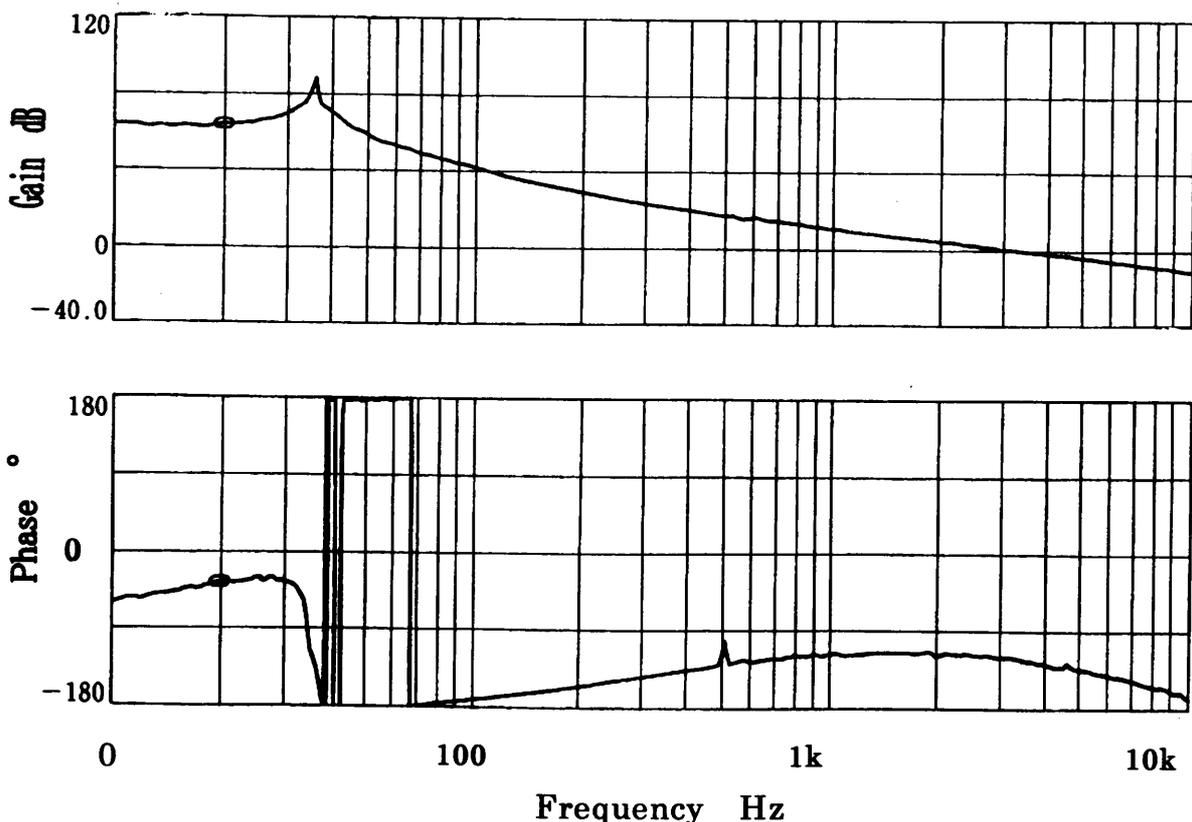


Fig.3. 8 Frequency response for loop transfer function of the focusing servo mechanism

また、このサーボ系は次のようなユニークな特徴を有するサーボ系である。すなわち、通常のサーボ系は、アクチュエータの可動範囲と位置検出器のカバー範囲は同じであり、従って、位置検出器の精度はアクチュエータの全可動範囲に対して決定され、この値はせいぜい(1/1000)程度であるため、ダイナミックレンジとしては 60dB 程度である。一方、本方式においては、図3.9に示すように、位置検出器はアクチュエータの可動範囲内の任意の点でフローティング状態となっており、その検出精度は検出範囲内(10 μ m)の1/1000とすれば、この値は 10 nm であり、ダイナミックレンジとしては 50000 倍(94dB)程度の大きな値となる。

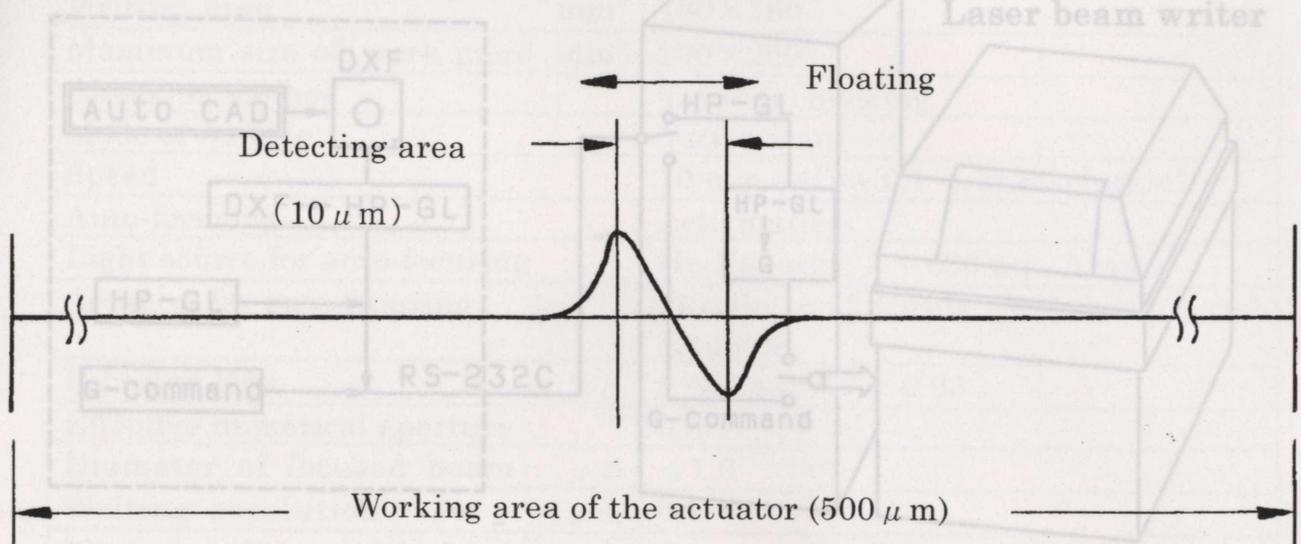


Fig.3.9 Working area of the focusing servo

図3.10(a), (b)に取付けられた光学ヘッドとその周辺の写真を示す。(a)は光学ヘッドのカバーをはずしたもので、内部の光学部品が見られる。一方、NC 用言語に慣れた使用者には G コマ

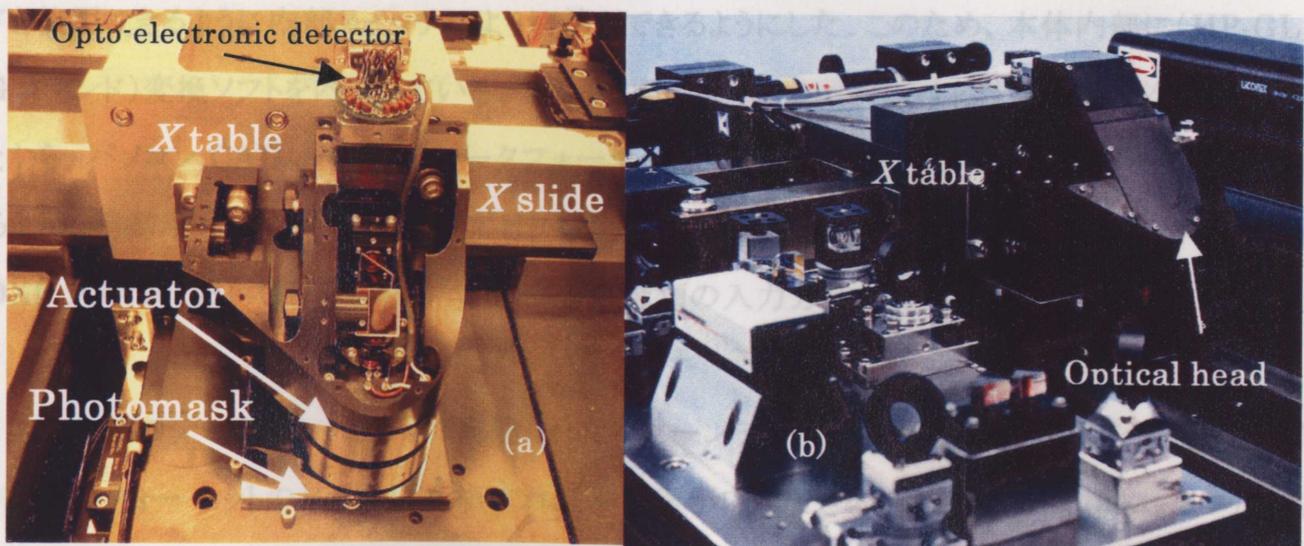


Fig.3.10 Optical head and its periphery

3. 2. 3 描画ソフトウェア体系

本装置の描画用ソフト体系を図3. 11に示す. 本装置は内部にハードウェアとして数値制御 (NC)用パルス分配をするプリント回路基板を有しており, この基板にNC用言語であるGコマンドを入力するようになっている.

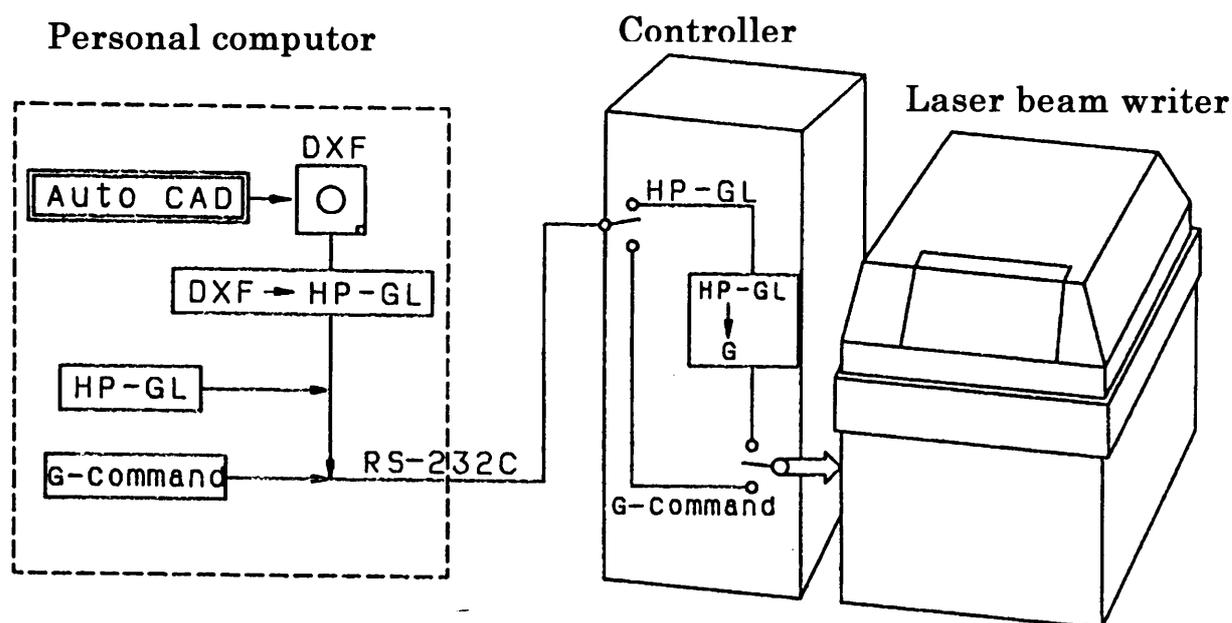


Fig. 3. 11 Software system of the laser beam writer

我々は本装置をパソコンから駆動されるプロッタ的な位置づけとし, プロッタ制御用言語の一種である HP-GL を共通インターフェイスと考える一方, NC 用言語に慣れた使用者には G コマンドを使用できるように内部スイッチにより切替えるようにした. このため, 本体内部に (HP-GL / G コマンド) 変換ソフトを内蔵している. また, 描画パターン設計には必ず CAD が必要とされることから, パソコン CAD の標準的データフォーマットである DXF ファイルタイプのデータも入力できるように制御用パソコン内に (DXF / HP-GL) 変換ソフトを用意している. このように, 本装置では DXF ファイル, HP-GL そして G コマンドの 3 種類の入力方法が可能である.

なお, 他のデータフォーマットで記述されたパターンデータも, データ変換ソフトを利用して上記 3 種類のフォーマットのどれかに変換すれば本装置が応用できる. 実績としては, ポストスクリプト言語で記述された CGH パターンをフォーマット変換して描画したことがある.

3. 2. 4 装置仕様

本装置の主な仕様を表3. 2に示す.

Table 3. 2 Specification of the independent table type laser writer

Positioning tables		Air slide tables with integrated linear brushless motor
Light source for writing		He-Cd laser($\lambda = 442 \text{ nm}$, 10 mw)
Writing area	mm^2	180×180
Maximum size of work piece	mm^2	200×200
Chucking method		Vacuum chucking
Mode of writing		Vector scan
Speed		10 mm/s(for 0.1 μm resolution)
Auto-focusing		Astigmatism
Light source for auto-focusing		He-Ne laser($\lambda = 633 \text{ nm}$, 5 mw)
Actuator for auto-focusing		Parallel leaf spring guided voice coil actuator
Focusing lens		$f = 2.7\text{mm}$, NA=0.93
Effective numerical aperture		0.6
Diameter of focused beam	μm	$\phi 1.0$
Writing resolution	μm	0.1
Minimum line width	μm	1.0
Light modulation		Acoust-optical modulator Band width 10 MHz
Size	mm^3	860(w)×1100(d)×1340(H)
Weight	kgf	About 900

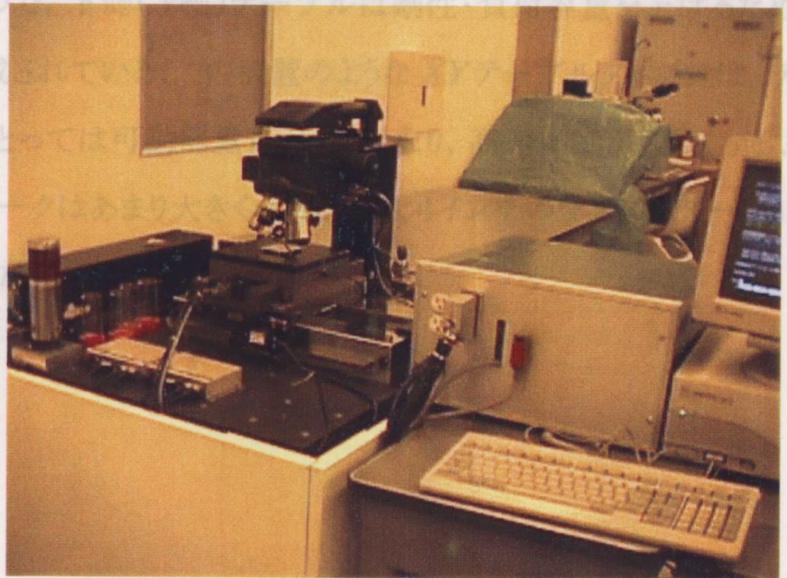
本装置の主な特徴は下記である.

1. 独自開発のエアスライドテーブル利用により, 全体の光軸高さを低くおさえ高精度を確保した.
2. 光学系は高開口数のレンズ採用により, 最小線幅 1 μm を確保した.
3. 描画範囲は 180×180 mm^2 と広い.
4. 小型・簡便な使用ができ, 保守の手間が掛からない.
5. パソコン CAD との結合により, パターン設計から描画までスタンドアロンでできる.
6. パーソナルユース的使用ができ, マスク作製などのターンアラウンドタイムが短縮できる.

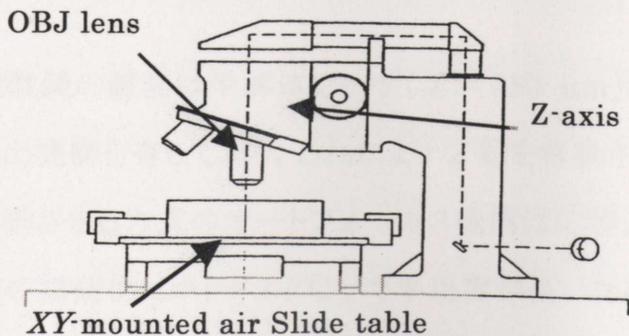
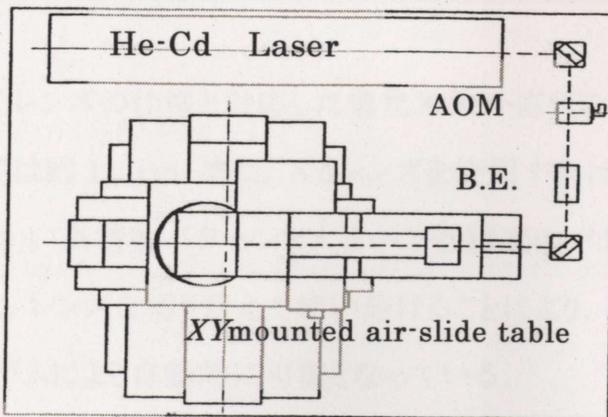
3.3 XYテーブルタイプ描画装置 成図を示す。

3.3.1 装置構成とコンセプト

XY テーブルタイプ描画装置は大幅な描画線幅の変更ができるように、集光レンズ自動交換可能な構成とするために大型化した光学系を固定し、被描画物を XY 走査する方式である。被描画物の XY 走査のために、テーブルは2段重ねの XY テーブル構成となる。



(a) Photograph of a XY table type laser beam writer



(b) Construction of the mechanism

Fig.3. 12 Laser beam writer with XY-table type slide

図3.12に装置外観写真と装置の構成図を示す。

図3.12(a)は装置全体写真であり、サーボのドライバー等を除いて制御の大半をパソコンで実施している。横のBOXはパソコンの拡張インターフェイスBOXを利用したインターフェイス回路である。集光レンズは電動レボルバ方式で自動切替えが可能な顕微鏡々筒を流用した。レボルバは4穴で4本の集光レンズが装着できる。この鏡筒はZ軸により上下方向に移動でき、試料の厚さや後述のオートフォーカス動作のため上下移動を行う。描画物走査用のテーブルは第2章で述べたエアスライドテーブルを2段重ねたもので、下側(Y軸)テーブルは剛性・負荷容量を上げるために少し面積の大きな空気軸受により構成されている。この装置のようなXYテーブルタイプでは、テーブルを重ねるために下側テーブルにとっては可動部重量が大きくなり、高速移動が難しくなる。そのため、この装置ではテーブルストロークはあまり大きくせず、最大4インチのマスクパターンが描画できるように100 mmストロークとした。

3.3.2 光学系の構成

図3.12(b)において、描画用光源の He-Cd レーザは音響光学光変調器 AOM によりパワー制御と出力の on/off 変調制御が行われる。コスト低減のため AOM 一つで兼用した。従って、on/off 変調の帯域は数十 kHz 程度であり、あまり高速ではない。しかし、テーブルの移動速度がそれほど速くないため、この程度の変調帯域でもほぼ問題ない。光変調されたレーザはビームエキスパンダ BE によりビーム径が拡大され、顕微鏡の鏡筒に入って集光レンズにより被描画物に照射される。ビームエキスパンド比率は 3 倍で、顕微鏡の鏡筒には $\phi 3$ mm のビームで入力される。集光レンズは試料の操作が便利なように超長作動用の対物レンズを使用し、通常4本(標準; $\times 5$, $\times 10$, $\times 50$, $\times 100$)が装着される。

Table 3.3 Specification of focusing lenses

Lens	Magnification	Focal length mm	Effective numerical aperture	Focused beam diameter μ m
Lens 1	$\times 5$	40	0.025	22.4
Lens 2	$\times 10$	20	0.05	11.6
Lens 3	$\times 50$	4	0.25	2.2
Lens 4	$\times 100$	2	0.5	1.2

集光レンズの仕様と対応した集光スポット直径を表3.3に示す。 $\times 100$ レンズを使用すれば、最小線幅は約 1μ m, また、 $\times 5$ レンズを使用すれば、最大線幅は 20μ m以上が可能となる。従って、細かい高精度パターンと大まかで低精度のパターンが混在しているようなパターンの描画においては、レンズを切り替えて使い分けることにより、描画時間の短縮が図れる。レンズの切り替えはプログラムにより自動的に可能となっている。

顕微鏡の鏡筒は半導体レーザ($\lambda = 780$ nm)を光源として用いたフーコー法のオートフォーカス検出機構を有しており、これにより Z 軸を移動させてオートフォーカス動作を行う。この鏡筒全体を移動させる方式のオートフォーカス機構は応答速度が遅い(0.5 Hz 程度)のが欠点であるが、通常の描画物はホトマスクなどで平坦度が良いため、それ程高速のオートフォーカスは不要である。しかし、試料ごとに厚さが変わるなどのことがあり、高倍率のレンズでは焦点深度が浅いため、オートフォーカス機能は必須である。

3.3.3 制御系の構成

本装置では、コストダウンを狙って制御系をできる限りパソコンに分担させる方針を採った。
 制御系のブロック図を図3.13に示す。

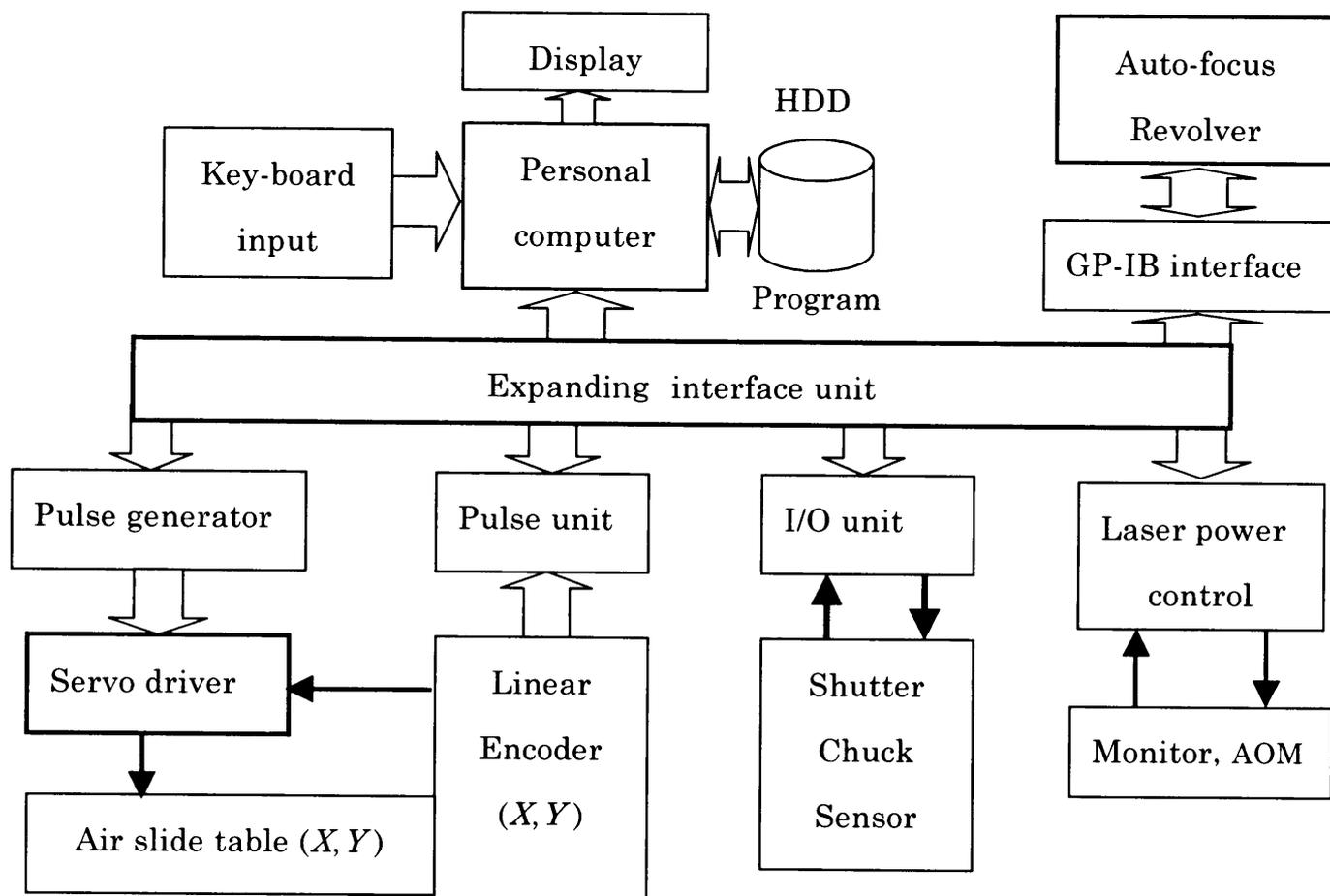


Fig.3. 13 Block diagram for control system of XY-table type laser beam writer

XY エアスライドテーブルのドライバ(Servo driver)と電動レボルバ・オートフォーカスユニット(Auto-focus, Revolver)は、それぞれ専用のコントローラ BOX がある。これらに指令値を発生する部分や他の部分はパソコンの拡張インターフェイスユニット内に、汎用市販品を利用できるものは市販品を、そうでないものは専用プリント基板を作製してパソコンの拡張バスに直接接続する方式とした。拡張インターフェイスバスに接続されているボードの内、パルス発生用プリント基板(Pulse generator)とレーザパワーの制御を行う基板(Laser power control)以外は汎用市販品である。

パルス発生基板は XY 同時2軸制御を行うために、 X 軸と Y 軸にそれぞれ補間されたパルス列を発生する回路であり、数値制御専用の IC を利用してパソコンからのコマンドで動作するように設計されている。

レーザーパワーの制御用基板はレーザー光量を制御する音響光学光変調器(AOM)を駆動する信号と、その出力の一部をビームスプリッタで取出し、光電検出器(モニタ)で検出した結果をフィードバックして制御する回路である。レーザー光量の指令値は、描画プログラムから決定される描画速度に対応して予め計算されて記憶されており、描画時にフィードフォワード的に与えられる。

顕微鏡の鏡筒部を制御する部分(Auto-focus, Revolver)は顕微鏡メーカーの製品であり、電動レボルバによるレンズの切り替えとオートフォーカス動作を、計測装置関係で標準的なインターフェイスである GP-IB インターフェイスを介してパソコンから制御するようになっている。

描画用ソフトは HP-GL 言語をベースとしているが、パソコン CAD のデータなどはパソコン内で変換ソフトを使って HP-GL に変換すれば全てのソフトを応用できる。内部的に、HP-GL 言語を解読してパルス分配するソフトを作成した。

3.3.4 装置仕様

XYテーブルタイプ描画装置の仕様を表3.4に示す。

Table 3.4 Specification of the XY-table type L.B.writer

Positioning table		Air slide tables with integrated linear brushless motor(XY-table type)
Light source for writing		He-Cd laser($\lambda = 442 \text{ nm}$, 10 mw)
Writing area	mm ²	100×100
Maximum size of work piece	mm ²	102×102(4inch square)
Chucking method		Vacuum chucking
Mode of writing		Vector scan
Writing speed		10 mm/s (for 0.1 μm resolution)
Auto-focusing		Foucault's method
Light source for auto-focusing		Laser diode($\lambda = 780 \text{ nm}$, 5 mw))
Actuator for auto-focusing		D.C. motor
Focusing lens (×5, ×10, ×50, ×100)		$f = (40, 20, 4, 2)\text{mm}$ $N.A.=(0.14, 0.28, 0.55, 0.7)$
Effective numerical aperture (×5, ×10, ×50, ×100)		$N.A.=(0.025, 0.05, 0.25, 0.5)$
Diameter of focused beam (×5, ×10, ×50, ×100)	μm	$\phi (20, 10, 2, 1)$
Writing resolution	μm	0.1
Minimum line width	μm	1.0
Light modulation		Acoust-optical modulator Band width 30 kHz
Size	mm ³	1100(w)×800(d)×1200(H)
Weight	kgf	About 500

本装置の主な特徴は下記である。

1. 電動レボルバによる集光レンズ交換方式により、描画線幅を 1~20 μm の間で変更可能。
2. 描画範囲は 100×100 mm²で、4インチマスクの大きさまで描画可能。
3. パソコンを主体とした制御系により、制御装置がさらに小型化・低価格化された。
4. 小型・簡便な使用ができ、保守の手間が掛からない。
5. パソコン CAD との結合により、パターン設計から描画までスタンドアロンで作動できる。
6. パーソナルユース的使用ができ、マスク作製などのターンアラウンドタイムが短縮できる。

3.4 性能評価

ここでは開発した描画装置の性能を評価するために、所定のパターンを描画した結果を述べる。図3.14に独立テーブルタイプ描画装置で描画したレジストレベルのライン&スペースパターンを示す。露光に使用した感光材はAZ1350(ヘキスト社), 膜厚 200 nm, 露光レーザーエネルギーは 50 mJ/cm^2 , 現像時間は 60 sである。(a)の左は $1 \mu\text{m}$, 右は $2 \mu\text{m}$ の Line and Space(L&S)パターンである。同様に(b)は $2 \mu\text{m}$ および $3 \mu\text{m}$ のL&Sパターン。(c)は $4 \mu\text{m}$ および $8 \mu\text{m}$ の L&Sパターンである。

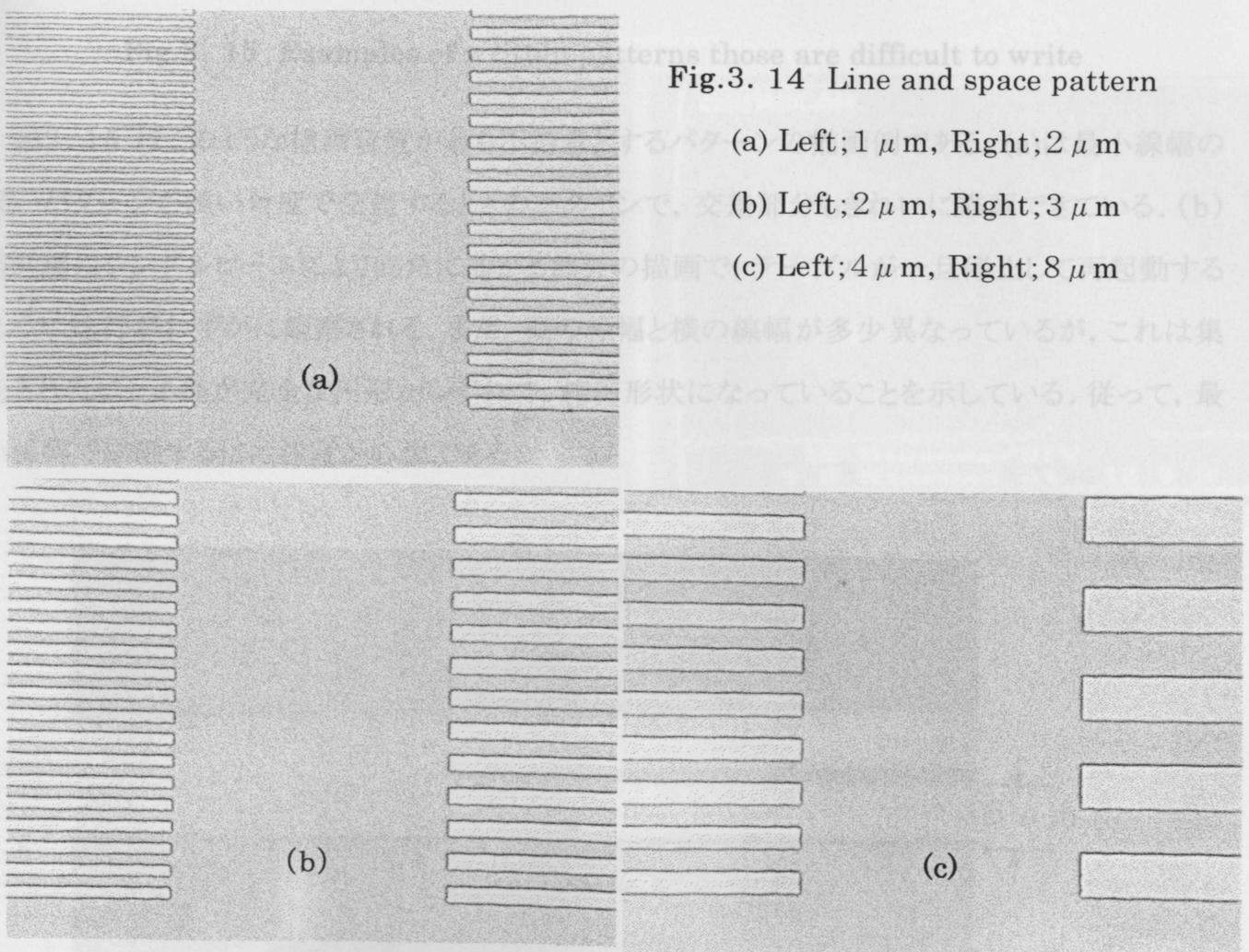


Fig.3. 14 Line and space pattern

(a) Left; $1 \mu\text{m}$, Right; $2 \mu\text{m}$

(b) Left; $2 \mu\text{m}$, Right; $3 \mu\text{m}$

(c) Left; $4 \mu\text{m}$, Right; $8 \mu\text{m}$

(a)において、 $1 \mu\text{m}$ のパターンの線で、描画開始及び終了時(パターンの最初と最後)に蛇行が見られる。このときは、1本のビームで描画しているため、線幅の変動ではなく、蛇行のみである。線幅 $2 \mu\text{m}$ 以上では、数本のビームで塗りつぶしをするため、蛇行の再現性がないと線幅の変動になる。しかし、線幅全体からみた割合としては、 $2 \mu\text{m}$ 以上の線幅では問題にならないと考えられる。通常、描画開始および終了点はビームのつながり目がうまく合わなくて、正確な描画が困難

であるが、(b), (c)においても正確な描画ができています。これらは、描画プログラムの作成と露光条件(レーザ光量)の設定が重要なポイントになる。

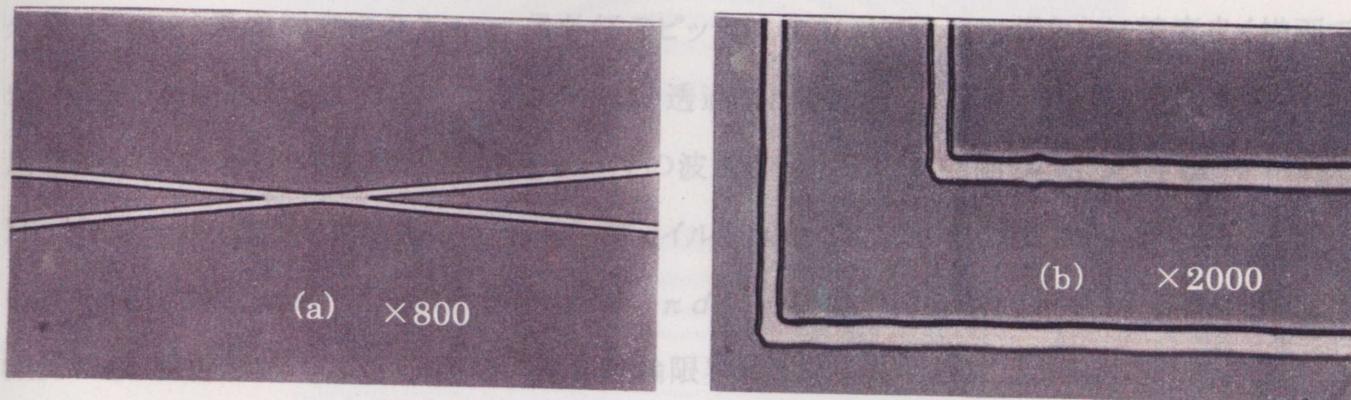


Fig.3. 15 Examples of written patterns those are difficult to write

図3.15 はこのような描画装置が最も不得意とするパターンの描画例である。(a)は最小線幅の細いパターンが浅い角度で交差するときのパターンで、交差部分もきれいに描画できている。(b)は同様にシングルビームにより直角に曲がる部分の描画で、テーブルが一旦停止して再起動するために蛇行がわずかに観察される。また、縦の線幅と横の線幅が多少異なっているが、これは集光されたビーム径が完全な円形からずれて、楕円形状になっていることを示している。従って、最小線幅で描画するには注意が必要である。

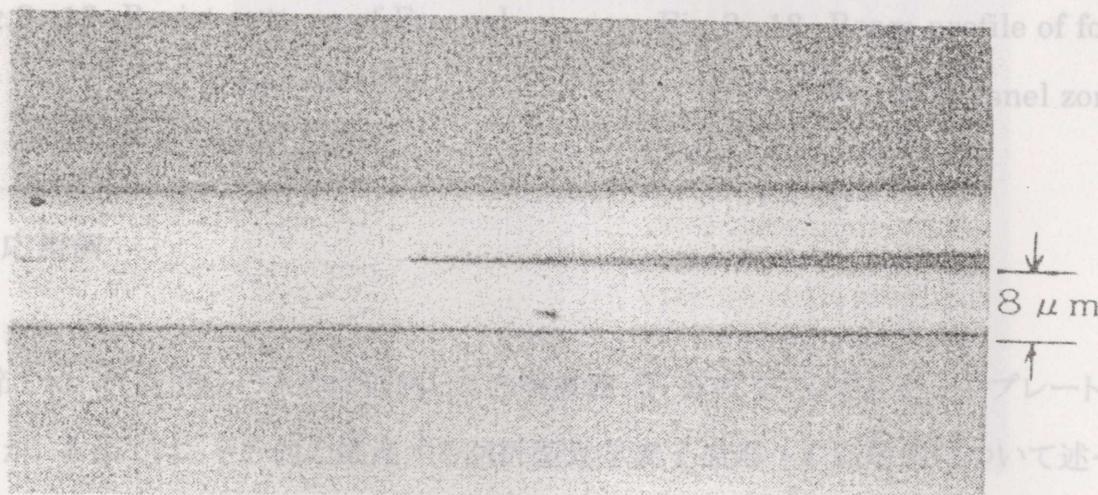


Fig.3. 16 Optical wave guide Y-branch (resist pattern)

図3.16 は光導波路の Y 分岐パターンの描画例(レジストパターン)を示す。このパターン描画では、滑らかに変化して行く線幅と鋭い分岐部分を正解に描画できることが必要であり、これが実現されている。パターン幅は数本のビームにより塗りつぶし描画されている。

図 3.17 はフレネルゾーンプレート(FZP)の描画例であり, 透明ガラス基板上のレジストパターンである. 波長 633 nm の He-Ne レーザ用に設計した CGH パターンで, 焦点距離が 100 mm, 外径 10 mm, 最内周直径 0.7 mm, 最外径のピッチは $6 \mu\text{m}$ である. 滑らかに精度良く描画できているのが観察できる. 本ゾーンプレートは, 透過・位相型ゾーンプレートとしてそのままでも利用できるように, レジスト膜厚を He-Ne レーザの波長の $1/2$ にして描画した. この FZP を用いて He-Ne レーザを集光した結果のビームプロファイルを図 3.18 に示す. これから, 集光ビーム直径 (at $1/e^2$) は $9 \mu\text{m}$ で, 理論限界値 ($4f\lambda / \pi d$) に近い値が得られた. 回折形光学素子による集光でも, 屈折形レンズによるものと同様に理論限界値まで集光できることが確認された.

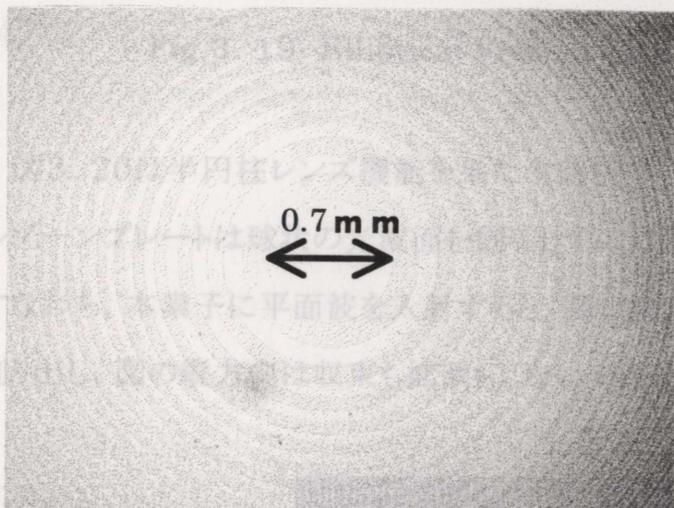


Fig.3. 17 Resist pattern of Fresnel zone plate

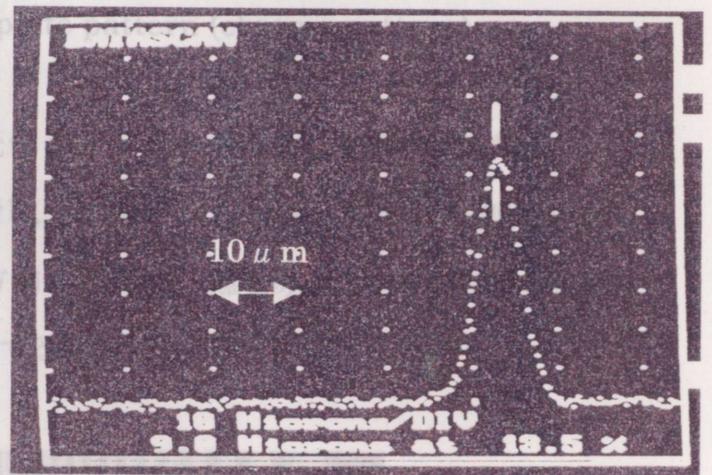


Fig.3. 18 Beam profile of focused laser by the Fresnel zone plate

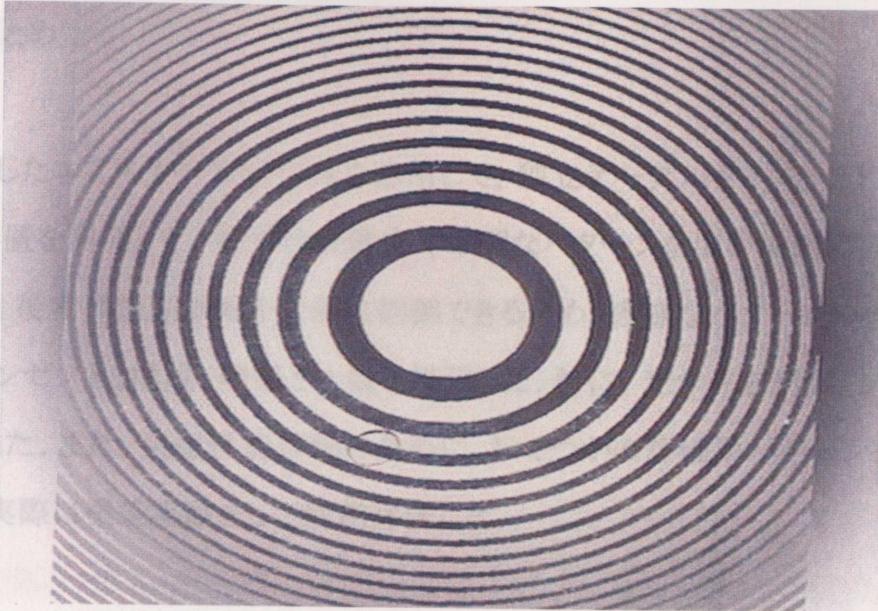
3.5 応用例

前節では, 性能評価のために描画した光導波路 Y 分岐やフレネルゾーンプレートの描画例を示したが, 本節では, その他の関連する回折型光学素子描画への応用例について述べる.

Fig.3.20 Cylindrical lens pattern(chrome pattern)

図 3.19 は楕円形のゾーンプレートを描画した例で, クロムマスクパターンである. 円形ゾーンプレートと同様に問題なく, 正確に描画できている. このゾーンプレートにより, 非球面の波面を創り出すことができ, 長軸・短軸を自由に変えて描画できる. これを応用すれば球面収差の補正などに利用できる. 画装置として応用が可能である.

第2章で開発した
2種類の描画装置を
描画する用途に、
各装置の開発コンテ
では詳しく説明した
ターンの計測や実験



テーブルタイプの
において高速に
画に適する。
フトウェアについ
描画し、描画パ
に定めて印刷

Fig.3.19 Elliptical Fresnel zone plate pattern (chrome pattern)

図3.20は半円柱レンズ機能を果たす回折型光学素子パターンの半分を示す。通常のフレネルゾーンプレートは球状の光波面を創り出すのに対し、この素子は円筒状の光波面を創り出す。すなわち、本素子に平面波を入射すると、図の横方向には焦点距離を原点として収束する波面を創り出し、図の縦方向は収束も拡散もしないで透過する波面になる。

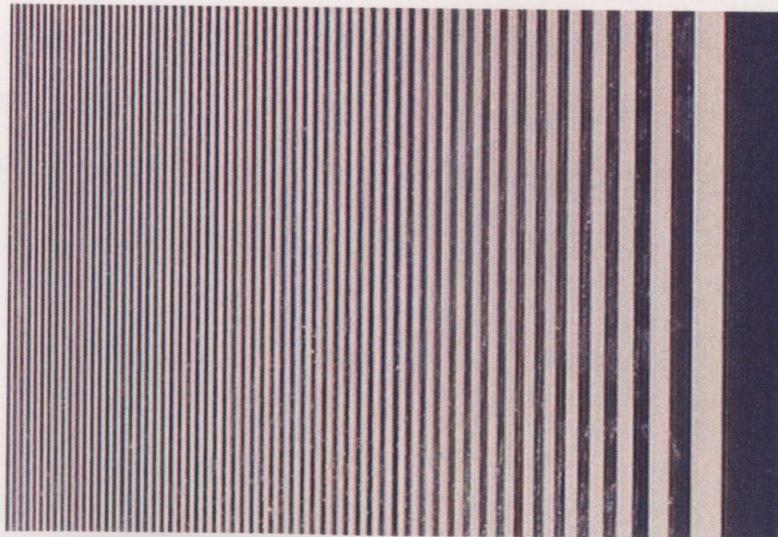


Fig.3.20 Cylindrical lens pattern(chrome pattern)

本描画装置は、その他種々の微細パターン描画に適しており、フォトマスクパターンに限らず、微細パターン描画装置として応用が可能である。

3.6 3章のまとめ

第2章で開発したエアスライドテーブルを応用して、独立テーブルタイプとXYテーブルタイプの2種類の描画装置を開発した。前者は高精度で単調なパターンを広い描画範囲において高速に描画する用途に、後者は描画線幅を大幅に制御できるため、多様なパターンの描画に適する。各装置の開発コンセプトと構成、特徴と仕様を説明した。特に、光学系と制御、ソフトウェアについては詳しく説明した。また、装置性能評価のために、いくつかの評価用パターンを描画し、描画パターンの計測や実際に機能実験をして性能評価した。

これにより、本描画装置は光学素子パターン描画用として適していることが実証された。また、その他の応用例を示し、多様な応用が可能であることを示唆した。

第4章 描画線幅の制御

4.1 はじめに

レーザ描画は、微細パターン描画の中では最も簡便な方法であるが、シングルビームで描画するために描画速度が遅いという短所がある。同じレーザ描画装置の中には、複数ビームで描画する方法もあるが、ここでは、前記第3章で開発したシングルビームでの描画装置について検討する。シングルビームレーザ描画装置で描画速度を改善する場合、描画線幅をパターンに応じて制御するのが効果的である。本章では、種々の描画線幅制御法を挙げ、その特性と効果を検討する。

4.2 描画線幅制御法

図4.1はシングルビームレーザの平行光(平面波)を開口数 NA の大きいレンズで集光した場合のビーム形状である。レーザは集光レンズの前でビームエキスパンダによりレンズ開口いっぱいにビーム径を拡大されてレンズに入射される。図で ω_i は入射半径である。レンズにより集光されたレーザビームはビームウエストで半径 ω_0 の微細スポットに集光される。ここで形成される集光角 θ は開口数 NA と ($NA = \sin \theta$) の関係がある。レーザ描画はこの集光レーザのスポットにより描画する訳であるが、通常、描画するのはビームウエストを利用するが多い。ここでは図4.1に基づいて線幅を制御する方法を検討する。ただし、複数回の操作によって、塗りつぶしで太い線を描画するのは対象外とし、一本の線幅の制御方法について検討する。

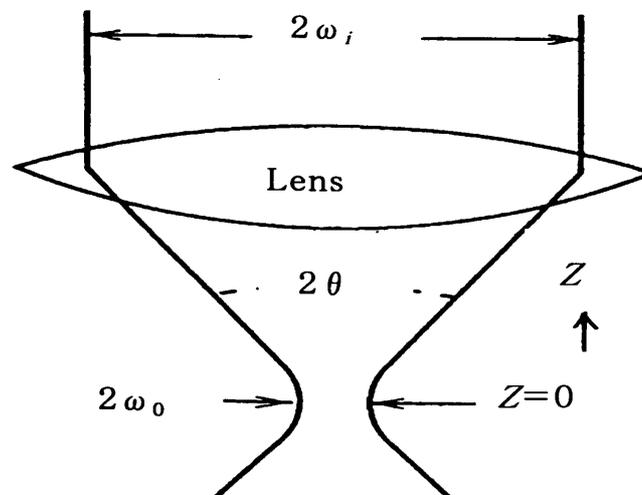


Fig.4.1 Beam shape of focused laser by single lens

描画線幅の制御方法としては下記が考えられる.

- a) レンズ交換法
- b) デフォーカス法
- c) レーザパワー法

a)は図4. 1におけるビームウエスト半径 ω_0 がレンズの開口数NAに反比例するという性質を利用するもので、通常倍率の大きなレンズほど微細なスポット径が得られる. この方法はビームウエストで描画するためにレンズの焦点深度が有効に利用でき、最もよく利用される方法である. 何種類かのレンズを用意しておけば大幅な線幅変更ができる利点がある.

b)は焦点をはずし、ビームウエストを利用しないで、ビームが収束または拡大している部分を利用するものである. 特に、図4. 1で解かるように、開口数NAの大きなレンズでは θ が大きいため、少しのデフォーカス量で大幅な線幅の変化が期待できる. また、レンズ交換法のように装置側への依存性が少ないため、簡単に実現できる長所もある. しかし、その反面、オートフォーカスの精度が不十分であると、一定線幅であるべきところで線幅のゆらぎが出るなど、線幅の精密な制御が難しい点がある.

c)はレーザービームがガウス分布をしていることを利用して、感光材の感度との関係でレーザーパワーの大小によって露光される線幅が制御できる. a)やb)のように大幅な線幅制御はできないが、線幅の微調整など高精度化のための線幅制御には有力な方法である. また、装置側の負担も少ない.

上記した3方法はそれぞれ独立に制御できるため、これらを組み合わせて制御することも可能である. 本研究では、a)とb)の方法についてそれぞれ詳しく検討し、a)とb)の方法をc)の方法と組み合わせた形の線幅制御方法について述べる.

4.3 レンズ交換法

本節では、前記方法のなかで、集光レンズを交換して描画線幅を制御する方法を検討する。描画はビームウエストで行うこととし、デフォーカスは考慮しない。また、前記c)のレーザパワー法を併用するものとする。

4.3.1 理論的検討

図4.1において、ビームウエストでのビーム半径 ω_0 は式(4.1)で示される^{4-3)~4-7)}。

$$\omega_0 = f\lambda / (\pi \omega_i) = \lambda / (\pi NA) \quad (4.1)$$

ここで、 f : レンズの焦点距離

λ : レーザの波長

ω_i : 入射ビーム半径

NA : レンズの有効開口数 ($= \sin \theta = \omega_i / f$)

この式から、集光レンズの焦点距離又は有効開口数(以下単に開口数と呼ぶ)を変えることにより、連続的ではないが、大幅に線幅を変えることができる。開口数を変えるということはレボルバ方式で集光レンズを切り替えれば良く、比較的簡単に実現可能である。通常、レーザ描画装置では顕微鏡の鏡筒を流用することが多いため、顕微鏡筒付属の電動レボルバを利用すれば、簡単に自動的切り替えが可能である。顕微鏡対物レンズの NA は通常 0.01 程度から 0.5 程度までの範囲であるため、50 倍程度の線幅制御可能性がある。

本方法はビームウエストで描画するためレーザスポットの形状が良く、レンズの焦点深度を有効に利用できるため、シャープなパターン描画が可能である。

なお、式(4.1)で、レンズは交換せず、入射ビーム半径 ω_i のみを開口絞りで制御する方法も考えられるが、この方法はレーザ光を一部遮光することになり、レーザ光の利用率が悪い。また、開口絞りの回折作用によってビームウエストにサイドローブのようなノイズが発生する恐れがある。そのため、高精度のパターン描画を指向する本研究では採用しないことにする。

次に、レーザパワーを制御した場合の線幅制御について検討する。感光材が集光レーザビームにより露光されるモデルは図4.2のように示されると考えられる。すなわち、集光レーザビームのエネルギー分布は I_0 をピーク値とするガウス分布をしており、感光材はある露光スレッシュホールド値 I_{th} より大なるエネルギーに対して 100%露光され、それ以下のエネルギーでは露光されないものとする。その結果、線幅 d がレーザ光により露光される。

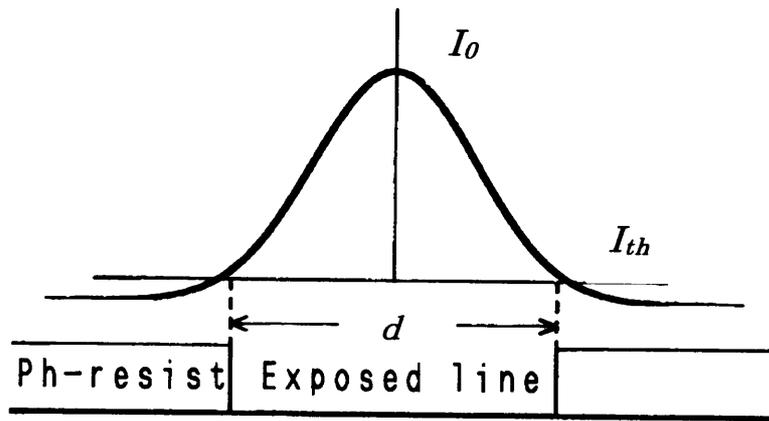


Fig.4. 2 Exposure mechanism of photo resist by Gaussian distribution of laser beam

露光に使われるガウス分布状態レーザの強度分布を式(4.2)で表す。

$$I = I_0 \exp\left(-2r^2 / \omega_0^2\right) \tag{4.2}$$

ここで、 I_0 : ガウス分布のピーク値

ω_0 : ガウス半径($1/e^2$ の点)

r : 中心からの距離

今、露光時間を T_e とし、これに対応する感光材の感光スレッシュホールド値を I_{th} とすると露光条件は、式(4.2)で $i = I_{th}$ とおいて得られる式(4.3)で示される。

$$I_{th} = I_0 \exp\left(-2r^2/\omega_0^2\right) \quad (4.3)$$

両辺の対数を取って整理すると式(4.4)になる.

$$r^2 = \left(\frac{\omega_0^2}{2}\right) \ln\left(\frac{I_0}{I_{th}}\right) \quad (4.4)$$

ここで、図4.2におけるガウス分布を、中心軸を対称として体積積分したものはレーザーパワーであるから、これを P とおいて積分を実行すると式(4.5)が得られる.

$$P = \pi\omega_0^2 I_0 / 2 \quad (4.5)$$

式(4.5)は、ピーク値 I_0 のガウス分布のレーザーパワーはガウス半径 ω_0 の中に $(I_0 / 2)$ の均一エネルギー分布を有する光と等価なことを示している.

式(4.5)を式(4.4)に代入すると式(4.6)が得られる.

$$r^2 = \left(\frac{\omega_0^2}{2}\right) \ln\left(\frac{P}{\left(\frac{\pi\omega_0^2 I_{th}}{2}\right)}\right) \quad (4.6)$$

ここで式(4.6)の対数項に着目して、その分子と分母にそれぞれ露光時間 T_e を掛けると式(4.7)を得る.

$$r^2 = \frac{\omega_0^2}{2} \ln\left(\frac{PT_e}{\pi\omega_0^2 I_{th} T_e / 2}\right) = \frac{\omega_0^2}{2} \ln\left(\frac{PT_e}{\pi\omega_0^2} \frac{1}{I_{th} T_e / 2}\right) \quad (4.7)$$

式(4.7)において、 $(PT_e / \pi \omega_0^2)$ は露光に使われた単位面積当たりのエネルギー量であり、これを露光エネルギー密度 ρ とする。一方、 $(I_{th} T_e / 2)$ は感光スレッシュホールドのガウス分布状態換算の平均エネルギー密度であり、これを ρ_{th} とする。これにより、式(4.7)は式(4.8)で置き換わる。

$$r^2 = \frac{\omega_0^2}{2} \ln\left(\frac{\rho}{\rho_{th}}\right) \quad (4.8)$$

$$\text{ここで、} \rho = PT_e / \pi \omega_0^2 = I_0 T_e / 2$$

$$\rho_{th} = I_{th} T_e / 2$$

これより、露光線幅 d を求めると式(4.9)になる。

$$\begin{aligned} d = 2r &= \sqrt{2} \omega_0 \sqrt{\ln(\rho / \rho_{th})} \\ &= \frac{\sqrt{2} \lambda}{\pi NA} \sqrt{\ln(\rho / \rho_{th})} \end{aligned} \quad (4.9)$$

式(4.9)において、式前半の分数表示部分は集光レンズの特性に依存し、後半の平方根部分は露光するレーザーエネルギーに関係するものであり、その依存関係が明確に表現されていることが判る。すなわち、露光線幅は集光レンズの開口数に反比例し、露光レーザーエネルギー密度の対数の平方根に比例する。従って、開口数の変更による線幅の制御は広範囲のものが期待できるが、レーザーエネルギーの変化による線幅制御は狭範囲である。レンズ交換によって開口数を変えることは、線幅制御に非常に有効であるが、一方、レーザーパワーをあまり大きくしても、露光線幅はそれほど広くはならないことが理論的に証明された。

4.3.2 実験と考察

a) 実験方法 開口数のレンズを用いて、単純な一本線を描画し、露光・現像・ポストベーキングした後の描画パターン顕微鏡写真の撮影結果を図4.4に示す。基板はクロム蒸着したガラス基板である。

色 実験は3.3節で述べたXYテーブルタイプ描画装置(図3.12)を用いて、レボルバ方式により、集光レンズを切り替えて実験した。実験に使用したレンズは表3.3に示した4種類のレンズ(レンズ1, レンズ2, レンズ3, レンズ4)である。実験方法は、XYエアスライドテーブルのX軸のみを一定速度で移動させて感光材に直線を描画し、その際のレーザ光量を変化させて露光描画し、感光材の現像後、そのパターン幅を計測した。また、レンズを交換して開口数を変え、同様の実験を行った。描画は合焦点(ビームウエスト位置)で行った。露光線幅と感光材膜厚との依存性を検討するため、感光材膜厚を0.3, 0.6, 0.8 μm と変えて実験した。感光材はヘキスト社のポジ型レジスト(AZ1350)を使用した。感光材の現像はノズルから順次、純水・現像液・チツソを噴出して、予洗い・現像・洗浄・乾燥を自動的に行う自動現像機を用いて行った。現像時間は60 sである。現像後ポストベーキング(120°C, 20 min)を行った。

使用した自動現像装置の外観写真を図4.3に示す。左側に回転テーブルがあり、この上の感光材に棒状ノズルから現像液や洗浄用純水を吐出する。本装置ではレジストのスピコートも可能である。



Fig.4.3 Automated developing machine

b) 実験結果と考察 厚に対して、レンズ切り替えと露光レーザーパワーを変化させて描画露光した場合の線幅変化のグラフを図4.5に示す。各点は実験値を、実線は露光スレッシュホールド値 ρ_{th} を種々の開口数のレンズを用いて、単純な一本線を描画し、露光・現像・ポストベーキングした後の描画パターン顕微鏡写真の撮影結果を図4.4に示す。基板はクロム蒸着したガラス基板である。色の薄い部分が描画された線幅(下地はクロム膜)であり、色の濃い部分が露光・現像後に残されたレジストである。

開口数の大きいレンズ4によって描画された線幅は $1\mu\text{m}$ 程度の細い線幅が得られた。一方、開口数の小さいレンズ1では $10\mu\text{m}$ 以上の太い線幅が得られ、その中間のレンズでは対応して中間の線幅が得られている。以上の結果、レンズ切り替えにより、10倍程度の、大幅な露光線幅制御が可能であることが実験的に確認された。

Lens 4

Lens 3

Lens 2

Lens 1

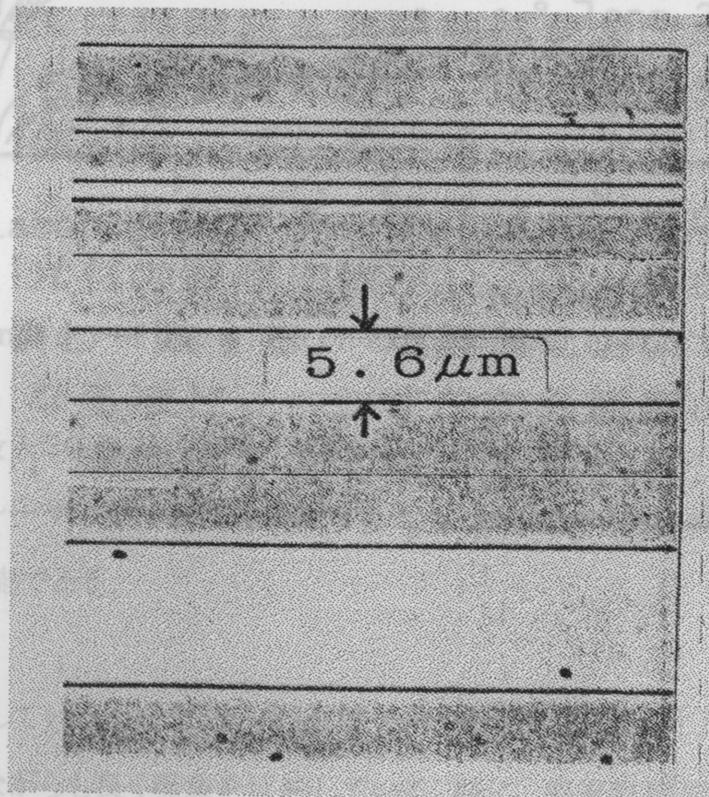


Fig.4.4 Micrograph of the written line width (resist pattern on the chrome mask)

種々の感光材膜厚に対して、レンズ切り替えと露光レーザーパワーを変化させて描画露光した場合の線幅変化のグラフを図4.5に示す。各点は実験値を、実線は露光スレシユホールド値 ρ_{th} をパラメータとした式(4.9)で示した理論値である。

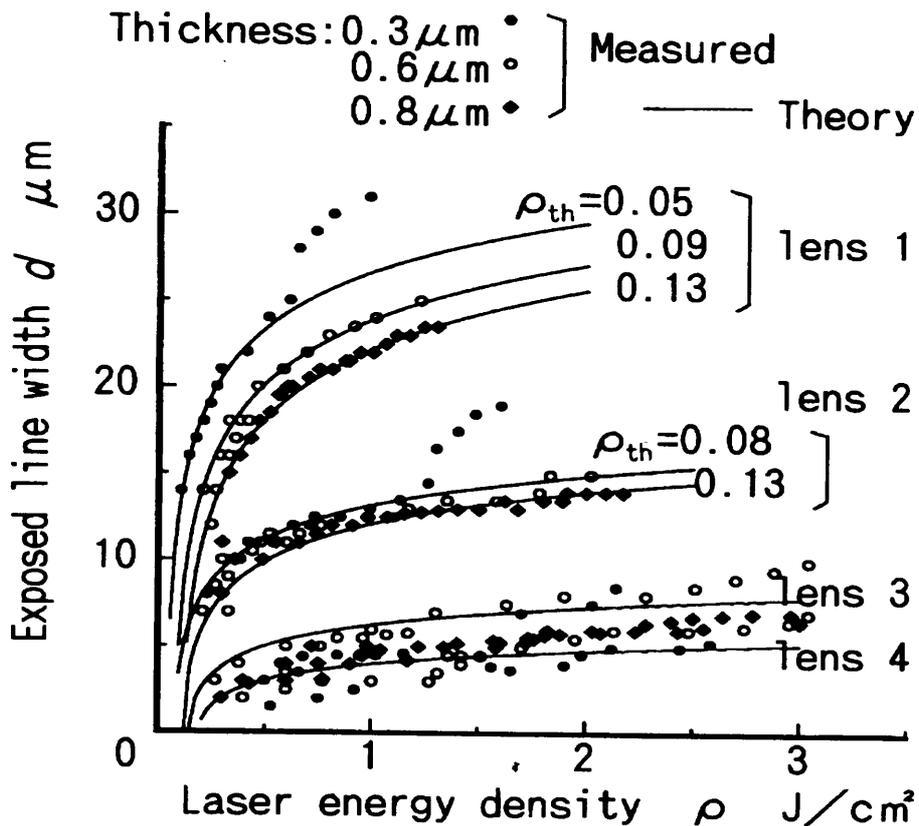


Fig.4. 5 Dependency of line width on exposed laser energy density

低開口数のレンズ1では最大30 μm 、高開口数のレンズ4では最小で1 μm の露光線幅が得られ、レンズ交換と正確なレーザーパワー制御を併用することにより、約30倍の範囲にわたって連続的に露光線幅の制御が可能である。

低開口数のレンズを使用している場合には、理論値と実験値は良く一致しており、式(4.9)は単純なモデルからの理論式ながらも良く現象を反映している。特に、感光材膜厚との関係が露光スレシユホールドエネルギー ρ_{th} として考慮できることが理解できる。感光材メーカーのカタログによれば⁴⁻⁸⁾、この露光スレシユホールドエネルギーの値は感光材の膜厚に依存し、1 μm の膜厚で約0.1 J/cm^2 となっており、実験結果とほぼ一致する。露光線幅はレンズが高開口数になるほど ρ_{th} 、すなわち膜厚の影響を受け難くなる傾向を示し、これも実験値とよく整合している。

感光材膜厚が $0.3 \mu\text{m}$ の薄い材料に関しては高エネルギー密度の光で露光した場合、理論値とかけ離れた特性が見られる。薄い膜厚に対して高エネルギー密度のため、本来の光子モードの感光とは異なった、ヒートモードによる感光材の蒸発などの影響が考えられる。事実、高エネルギー密度で露光すると、現像しなくても露光のみでパターンが形成されてしまうケースがある。

また、開口数の大きなレンズの場合も理論値と実験値に差が見られる。これも大開口数レンズによる集光スポットはレーザーのエネルギー密度が高いため、感光材や下地の基板に対する熱的な影響があるためと考えられる。

c) 溝断面形状について

感光材を露光・現像してパターンニングする場合、露光線幅と共に露光された溝断面の形状も重要なポイントとなる。通常、露光・現像された感光材は、それをマスクとしてエッチングなどの後工程を行うことが多い。このとき、露光・現像された溝の断面形状は垂直でストレートなものが良い。この観点から、前記の実験により露光・現像したパターンの溝断面形状を検討した。溝断面を表面形状測定器で測定した結果を図4.6に示す。

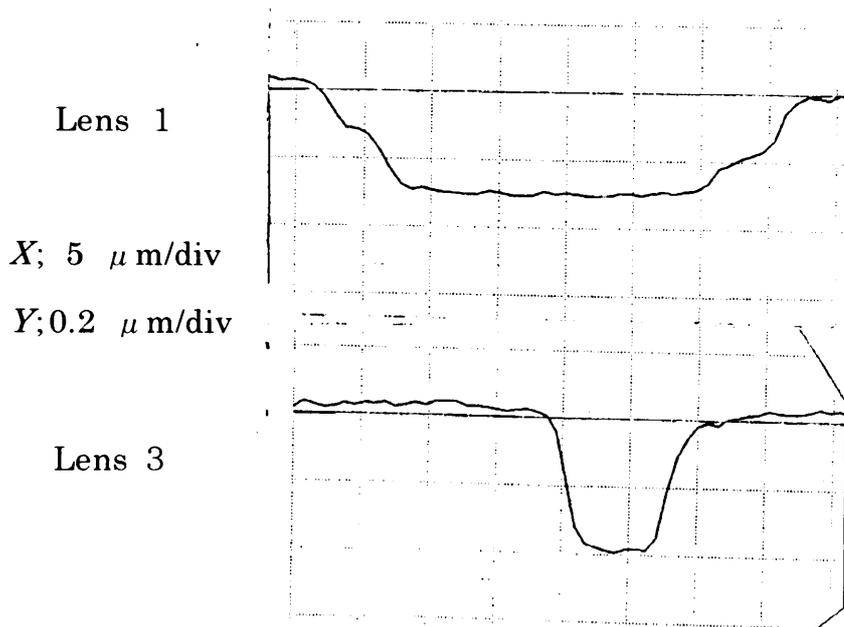


Fig.4. 6 Cross section of the groove of developed photo resist

図の上部は開口数の小さなレンズ1により露光されたもの、下部は開口数の大きなレンズ3で露光されたものである。前者は露光線幅約 $30 \mu\text{m}$ 、後者は $8 \mu\text{m}$ である(断面に傾斜がある場合、線幅は形状の半値部分で評価)。両者の溝断面形状は明らかに差があつて、前者は壁面の傾斜が緩く(約 $25 \mu\text{m}/1 \mu\text{m}$)、後者は急(約 $100 \mu\text{m}/1 \mu\text{m}$)である。

これは次のような理由と考えられる。図4.7は先にも述べたガウス分布レーザによる感光材の露光モデルであるが、感光材の膜厚を考慮したとき、感光材が100%感光されるスレッシュホールド値 Th_1 と、0%露光されるスレッシュホールド値 Th_2 を導入した。これにより、感光材は溝底までの露光幅 $d1$ と感光材表面での露光幅 $d2$ が形成され、 $d1$ と $d2$ の間に傾斜部が形成される。

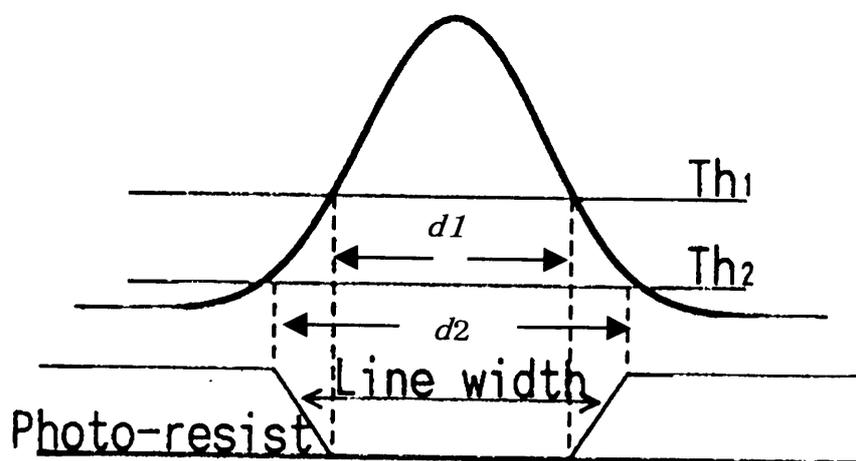


Fig.4.7 Creation of the photo-resist bank

この傾斜はレーザ光のガウス分布が緩やかな場合、すなわち集光レンズの開口数が小さい場合に緩やかになる。従って、シングルビームレーザ描画の場合、開口数の小さいレンズを使って太い線幅で描画しようとするとその溝断面形状はシャープでなくなる。この傾向は、感光材の膜厚が厚くなるほど顕著になる。すなわち、図4.7において、膜厚が厚くなると Th_1 はより大きくなり、 $d1$ と $d2$ の差が大きくなる。従って、シングルビーム描画で線幅が太いほど、また膜厚が厚いほどこの傾斜部分は多くなり、パターンニング品質としては低下することになる。

前述のように、実際のパターンニングにおいて、溝断面形状はストレートであるのが望ましいため、太い線幅を描画するときも、輪郭部分は開口数の大きいレンズで高精度かつ溝断面のストレートな描画をし、その中側を太い線幅で、すなわち開口数の小さいレンズで、描画するようなパターンニング方法が有効である。

4. 3. 3 4. 3節のまとめ

本節ではレンズ交換法とレーザーパワー制御法の併用によって露光線幅を制御する方法を検討した。簡単なモデルによる理論解析を行い、線幅の制御可能性を検討した。また、感光材の膜厚をパラメータとして露光実験をし、理論値と比較検討した。結果を以下に示す。

- (1) 本方法により、露光線幅を $1 \mu\text{m}$ から $30 \mu\text{m}$ にわたって連続的に制御できることが理論的および実験的に確認できた。
- (2) 集光レンズの特性と描画レーザーパワーが露光線幅に及ぼす影響が明らかになった。すなわち、露光線幅は集光レンズの開口数に反比例し、レーザーパワーの対数の平方根に比例する。従って、開口数変化によれば広範囲の線幅制御が出来るが、レーザーパワーの変化による線幅制御範囲は狭いことが理論的および実験的に証明された。
- (3) 簡単なモデルによる理論解析の結果と実験値が良く一致し、集光レンズとレーザーパワーの露光線幅への依存性が実証された。
- (4) 感光材膜厚の影響を露光スレッシュホールドエネルギーとして理論値に組み込むことができることが明らかになった。
- (5) 露光線幅と感光材膜厚およびパターン断面形状の関係が明確にされた。すなわち、低開口数のレンズを利用して太い線幅で描画した場合、露光後のパターン溝断面形状は壁面が垂直でなく、傾斜を有するため理想的でない。そのため、実際のパターンニングに際してはパターン周辺部を細い線幅で精密に、中心部は太い線幅で描画することが速く精密なパターン描画に有効である。

4. 4 デフォーカス法

本節においては集光レンズ交換などの装置依存性の無い、最も簡単で線幅制御範囲が大きいデフォーカス法について、その理論的特性を解明し、実験によりその妥当性を明らかにする。さらに線幅制御範囲拡大のために、デフォーカス量に応じてレーザーパワーを変化させ、レーザーパワー密度を一定にして描画する方法についても検討する。

4. 4. 1 理論的検討

図4. 1に示したように、高開口数レンズで集光したレーザーは大きいビーム開き角(2θ)でビームウエストを形成する。レーザーの波長を λ 、ビームウエスト半径を ω_0 、ビームウエスト位置を $Z=0$ として、図4. 1のように Z 軸を取ると、光軸上の点 Z におけるビーム半径($1/e^2$ の点) ω は式(4. 10)で示される。

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi \omega_0^2} \right)^2} \quad (4. 10)$$

$$\omega_0 = \lambda / (\pi \cdot NA) \quad (4. 11)$$

ビームウエストより十分離れた Z においては、式(4. 10)は式(4. 12)で近似される。

$$\omega = \frac{\lambda Z}{\pi \omega_0} = NA \times Z \quad (4. 12)$$

すなわち、開口数 (NA) の大きいレンズで集光した場合、ビーム径は Z に比例して、大幅に大きくなる。通常LB描画においては、ピントのあったビームウエスト位置で描画するが、これをやめてデフォーカスの位置で描画すれば、ビームウエストでの線幅より大幅に太い線幅で任意に変換することができる。

a) 集光レーザーによる感光材の露光

デフォーカス位置で露光すれば、感光材が露光される線幅が太くなるものの、露光線幅は式(4.10)のまま増大する訳ではない。レーザーのパワーを一定とすれば、デフォーカスによって露光面積が広がることによりレーザーのパワー密度が下がるため、実際に感光される面積は式(4.10)よりは減少する。集光レーザーにより露光された感光材の現像後の線幅は現像時間等に影響されるが、ここでは現像条件は一定とし、露光条件のみを考慮する。

集光されたレーザービームは任意のZ点において式(4.10)で表されるビーム径を有するが、それ自体はガウス分布をしている。感光材は、このガウス分布の光強度に対応して露光される。光軸上任意の点Zにおいて、その直交平面内におけるパワー強度は、光軸中心からの距離を r とすると式(4.13)で示される。

$$I_{\omega} = I_{\omega 0} \exp\left(-2r^2/\omega^2\right) \quad (4.13)$$

ここで、 ω は式(4.10)で求めた光軸上の点Zにおけるビーム径である。

Z=0 においては式(4.14)で示される。

$$I_0 = I_{00} \exp\left(-2r^2/\omega_0^2\right) \quad (4.14)$$

感光材の露光スレッシュホールド値を I_{th} とする。式(4.13)の I_{ω} により露光される線幅は式(4.13)の I_{ω} を I_{th} と等しいとおいて得られる半径 r の2倍（直径分）である。

$$I_{\omega 0} \exp\left(-2r^2/\omega^2\right) = I_{th} \quad (4.15)$$

これを r について解くと式(4.16)が得られる。

$$r^2 = (\omega^2/2) \ln(I_{\omega 0}/I_{th}) \quad (4.16)$$

ここで、レーザパワーが一定の条件から、 $I_{\omega 0}$ は式(4.17)で示される。

$$\begin{aligned} I_{\omega 0} &= I_{00} \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^2 \\ &= \frac{I_{00}}{\left\{ 1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right\}} \end{aligned} \quad (4.17)$$

故に、

$$r^2 = \frac{\omega_0^2}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right\} \ln \left\{ \frac{I_{\omega 0}}{I_{th}} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]} \right\} \quad (4.18)$$

ここで、 (I_{00}/I_{th}) は、ビームウエストにおいて感光材が感光する程度を示す。

$I_{00}/I_{th} = \exp(2)$ の時にガウス半径で感光し、ビームウエストでの露光線幅はビーム半径の2倍と一致する。一般的には、この値は式(4.18)の対数内分子および分母に露光時間 T_e を乗じた形の露光エネルギー密度 ρ で表現され、式(4.19)のように示される。

$$r^2 = \frac{\omega_0^2}{2} \left\{ 1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right\} \ln \left\{ \frac{\rho_{00}}{\rho_{th}} \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi \omega_0^2} \right)^2 \right]} \right\} \quad (4.19)$$

ここで、 ρ_{00} はビームウエストにおける露光のエネルギー密度、 ρ_{th} は感光材の露光スレッシュホールドエネルギー密度である。

以上から露光線幅 d は式(4.20)で示される。

$$d = 2r = \sqrt{2}\omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi\omega_0^2}\right)^2} \sqrt{\ln \left\{ \left(\frac{\rho_{00}}{\rho_{th}}\right) \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi\omega_0^2}\right)^2\right]} \right\}} \quad (4.20)$$

式(4.20)において、式の前半はレーザーのビーム径に関係し、後半は露光エネルギーに関するものであり、その依存関係がよく理解できる式である。

4.4.2 実験と考察

a) 実験方法

デフォーカス状態で露光した場合の露光線幅の変化を確認するために、集光レンズをビームウエスト近傍で、 Z の $-$ 方向から $+$ 方向へ連続的に移動しつつ、さらに被描画物を載せたテーブルを X 方向に走査して描画した。これにより、図4.1のビーム形状に対応した露光線幅形状が得られる。 Y テーブルは固定し、 X テーブルを一定速度送りにし、フォーカスアクチュエータのコイルに三角波状の電流を流すことにより、走査方向 X に対して集光レンズを Z 方向に直線的に移動させたことになる。 Z 方向の変位は図3.6に示したコイル電流の値から換算した。この時、三角波状コイル電流の周波数は0.1 Hz、 X 方向の送り速度は10 mm/s、露光用レーザーのパワーは一定(0.05 mW)とした。

b) 実験結果 スレッシュホールドエネルギー密度

ビームウエスト近傍の連続描画結果の顕微鏡写真を図4.8に示す。これはガラス基板にクロムを蒸着した、いわゆるホトマスク基板にホトレジストをスピコートしたものをレーザ露光の後に現像処理したレジストパターンで、レジストの膜厚は約 $0.1 \mu\text{m}$ 、現像時間は 60 s である。図の暗い部分はレジスト、明るい部分はクロム膜である。図4.1に対応して、ビームウエスト近傍で露光線幅が大きく変わることが良く解かる。

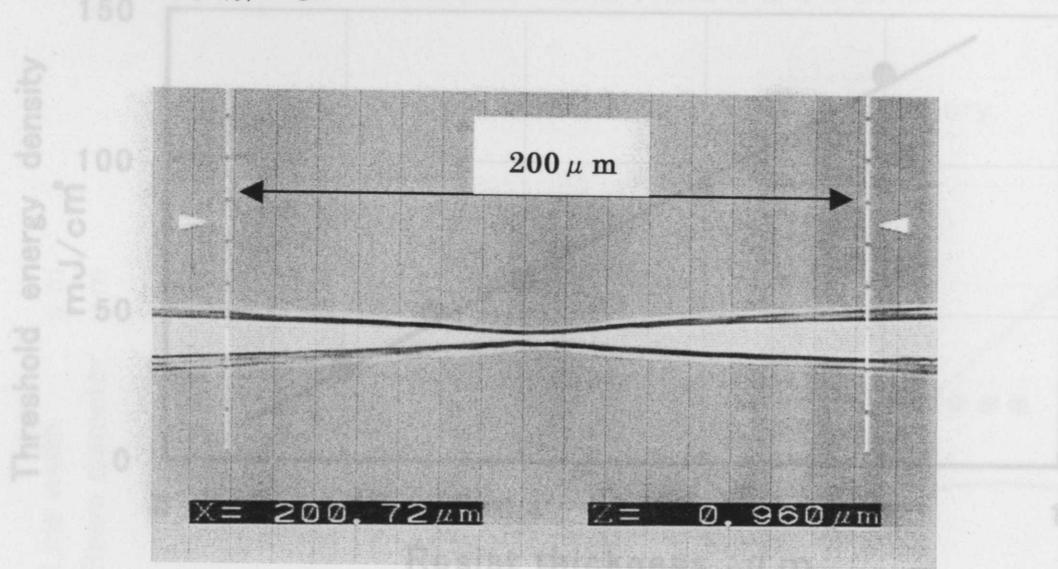


Fig.4.8 Continuously written pattern around beam waist, derived from former on photo resist with $0.1 \mu\text{m}$ thickness

ビームウエスト付近で振動的な様子が観察されるが、図3.5に示したようにフォーカスアクチュエータの特性がかなり明確な共振を有するため、レンズ移動時に外部振動の影響を受け、固有振動数で振動したものである。図4.8で X 方向 $200 \mu\text{m}$ に対応する Z の移動量は $48 \mu\text{m}$ である。

量 Z と線幅の関係を求めた。

図4.10は実験結果から得られた露光線幅と、式(4.20)で示した理論値および式(4.10)で示されるレーザビーム半径から得られるビーム直径を表したものである。式(4.10)において、 w_0 の値は式(4.11)の理論限界値ではなく、実測値として $0.5 \mu\text{m}$ とした。また、露光エネルギー密度 ρ_{00} は実験条件から 5 J/cm^2 とした。 ρ_{th} は厚さ $0.1 \mu\text{m}$ の感光材の値として 0.01 J/cm^2 を用いた。

c) 感光材のスレッシュホールドエネルギー密度

式(4.20)における感光材の露光スレッシュホールドエネルギー密度 ρ_{th} は、露光波長が一定の場合、使用する感光材の膜厚に依存することが知られている。第4.3節の実験と解析結果⁴⁻¹⁾からは図4.9のような特性が得られており、 ρ_{th} は感光材の膜厚に正比例の関係性を有している。本実験では感光材の膜厚が $0.1 \mu\text{m}$ に対し、図4.9から外挿して、 ρ_{th} は 10 mJ/cm^2 とした。

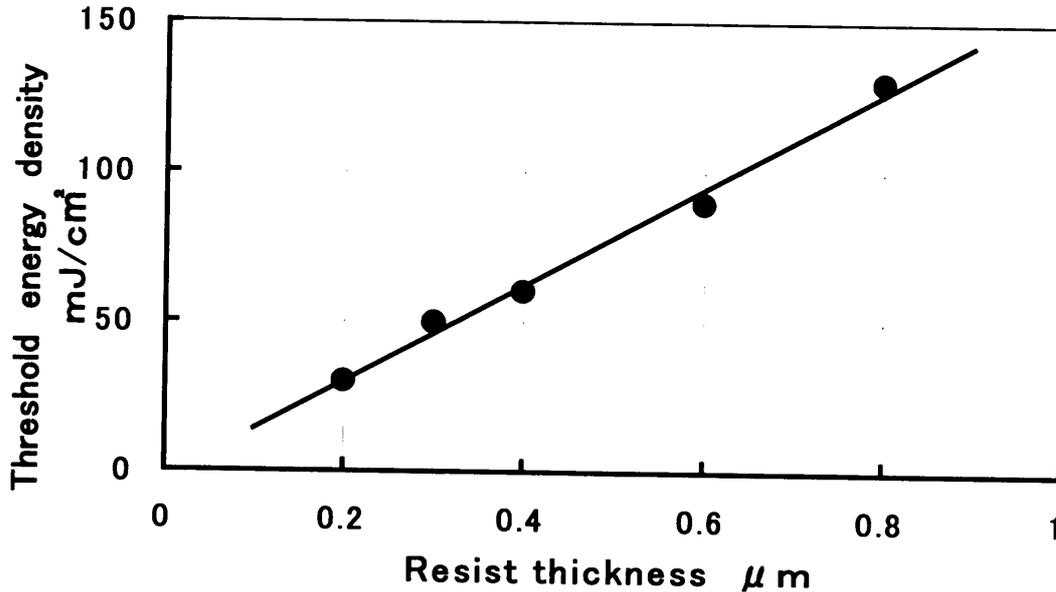


Fig.4. 9 Threshold energy density of photo resist for its thickness, derived from former experiments and analysis

d) 線幅制御実験結果の考察

図4.8の実験結果から、顕微鏡のスケールを利用して、露光された線幅を読み取り、デフォーカス量 Z と線幅の関係性を求めた。

図4.10は実験結果から得られた露光線幅と、式(4.20)で示した理論値および式(4.10)で示されるレーザビーム半径から得られるビーム直径を表したものである。式(4.10)において、 ω_0 の値は式(4.11)の理論限界値ではなく、実測値として $0.5 \mu\text{m}$ とした。また、露光エネルギー密度 ρ_{00} は実験条件から 5 J/cm^2 とした。 ρ_{th} は厚さ $0.1 \mu\text{m}$ の感光材の値として 0.01 J/cm^2 を用いた。

本実験値は全体に理論値に比して3割程度大きめの値を示している。これは光学系の収差のため、レーザビームが理論限界値まで集光されていないためと、ガウス分布も幾分崩れているためと考えられる。しかし、傾向的には良く合っている。すなわち、露光される線幅はビームウエスト付近で、感光材の感度から、ビーム直径($1/e^2$)より大きいのが、ビームウエストから離れるに従ってビーム直径よりは小さくなる。この傾向は実験値でも良く現われており、前記収差を考慮に入れば、実験値と理論値はほぼ一致している。この結果、集光レンズの位置を合焦点から $20 \mu\text{m}$ シフトすれば、合焦点位置での線幅に対して6倍程度太い線幅で描画可能である。

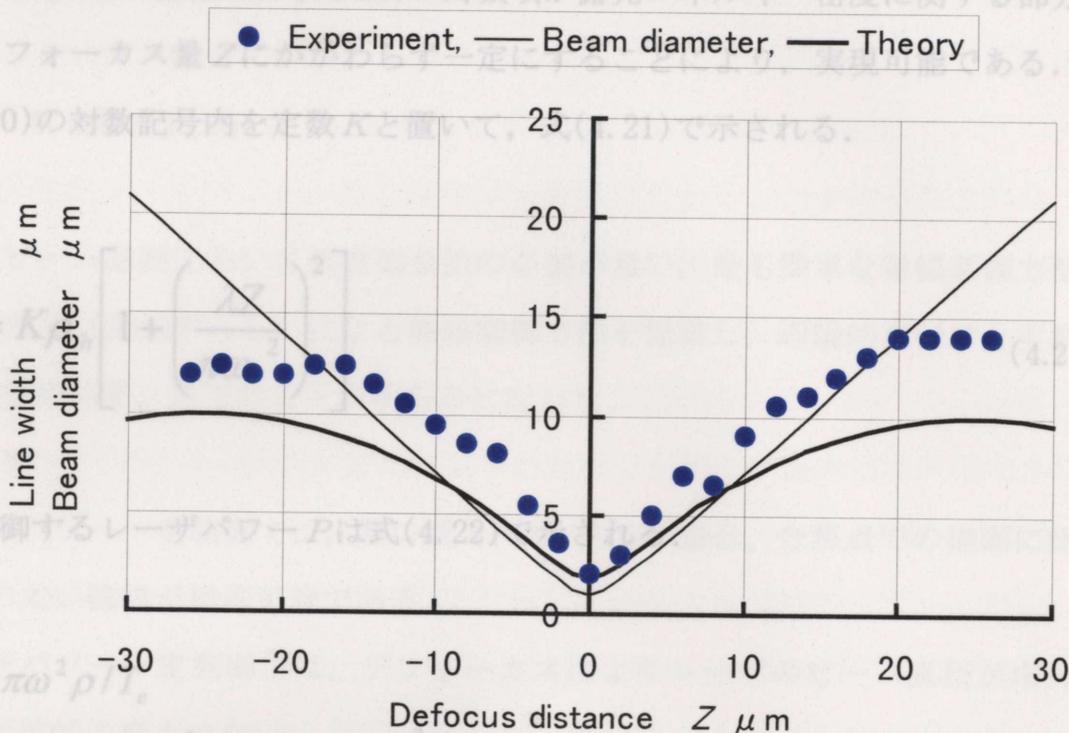


Fig.4.10 Comparison of an experimental result of exposed line width with that of theory and beam diameter

Z デフォーカスする Z の方向に関しては、ほぼ対照であるが、 Z の負方向（遠焦点側）ではレーザ光源から遠くなるため、途中での回折や散乱の影響を受けてレーザパワーが減少し、線幅がやや狭くなる。従って、デフォーカス描画は近焦点側で行うのが良い。本装置での実際のパターン描画においては被描画物の表面平坦度の点から、オートフォーカスをかけながら描画することになる。この場合、デフォーカスのためには焦点合わせサーボの電子回路にオフセットを与えることにより実現できる。ただし、通常の焦点合わせサーボにおいて、合焦精度を良くするために、焦点ずれ検出範囲を $\pm 5 \mu\text{m}$ 程度としているが、

本方法を採用するためには、検出範囲は少なくともデフォーカス量より大きい必要があり、そのため焦点合わせサーボの性能を少し下げて使うことになる。

4.4.3 パワー密度一定制御(線幅制御範囲の拡大方法)

以上の方法により露光線幅の拡大が可能であるが、より広範な拡大方法として、デフォーカス量 Z に応じて露光レーザーパワーを変化させ、露光パワー密度を一定で描画する方法が考えられる。この方法は、式(4.20)の対数項が露光エネルギー密度に関する部分であり、これをデフォーカス量 Z にかかわらず一定にすることにより、実現可能である。その条件は式(4.20)の対数記号内を定数 K と置いて、式(4.21)で示される。

$$\rho = K\rho_{th} \left[1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi\omega^2} \right)^2 \right] \quad (4.21)$$

実際に制御するレーザーパワー P は式(4.22)で示される。

$$\begin{aligned} P &= \pi\omega^2 \rho / T_e \\ &= K\pi\omega_0^2 \frac{\rho_{th}}{T_e} \left\{ 1 + \left(\frac{\lambda Z}{\pi\omega_0^2} \right)^2 \right\}^2 \end{aligned} \quad (4.22)$$

Z が ω_0 に対して十分大きい場合、式(4.22)は式(4.23)で示される。

$$\begin{aligned} P &= K\pi\omega_0^2 \frac{\rho_{th}}{T_e} \left(\frac{\lambda Z}{\pi\omega_0^2} \right)^4 \\ &= K \frac{\rho_{th}}{T_e} \frac{\lambda^4}{(\pi\omega_0^2)^3} Z^4 \end{aligned} \quad (4.23)$$

すなわち、デフォーカスによるレーザーパワーの増分としては、デフォーカス量 Z の 4 乗に比例して、レーザーパワーを制御すれば良い。これにより、式(4.20)の対数項は一定値となり、露光線幅は式(4.10)で示されるビーム半径の 2 倍と同じになる。図 4.10 に照らしてみれば、この方法により露光線幅はビーム直径（細い実線）と同一になり、 $20 \mu\text{m}$ のデフォーカス時にはビームウエスト露光時の約 50 倍のレーザーパワーで露光することにより、10 倍程度の露光線幅が得られる。

4.4.4 4.4節のまとめ

レーザービーム描画において装置側負担の必要が無い、最も簡単な線幅制御方法として、デフォーカス（焦点ずらし）による線幅制御方法を提案し、理論的裏付けと実験的検討を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) レーザーパワー一定制御では、開口数 (NA) 0.6 の場合、合焦点での描画に比べて 6 倍程度の太い線幅が描画可能である。
- (2) レーザーパワー一定制御では、デフォーカスによりレーザーのビーム直径が増大する程には露光線幅の増大はない。
- (3) より広範な線幅制御方法としてレーザーパワー密度一定制御法を提案した。これにより、10 倍程度の線幅制御が可能である。
- (4) レーザーパワー密度一定制御は、レーザーパワーをデフォーカス距離の 4 乗に比例して制御することにより達成できる。
- (5) レーザービームのガウス分布および伝播特性と感光材の感度特性を考慮に入れた解析結果は実験値とほぼ一致した。

4. 5 4章のまとめ

本章では、開発したレーザ描画装置を用いてパターン描画する際に、描画時間を短縮し、かつ高精度な描画を行うための手法として描画線幅を制御する方法を検討し、実験により確認した。方法としてはレンズ交換法とデフォーカス法を中心に、これらとレーザパワー制御法を組み合わせた方法を検討した。結果を以下に示す。

- (1) レンズ交換法は、装置側に交換用のレンズを必要とするが、倍率で 5 倍程度の低倍率レンズと 100 倍程度の勾配率レンズの 2 種類のレンズを用意しておけば、高精細部分の描画と低精度・大面積部分の描画を効率よく分担描画が出来る。
- (2) 露光線幅のレーザパワーへの依存性は対数関係であることが明確化された。これにより、あまり大パワーを掛けて線幅を太くしても描画能率は上がらず、むしろ下地の基板に悪影響を及ぼすため、低レベルパワーでの描画が望ましい。
- (3) デフォーカス法は装置側の負担が無く、簡単な方法ながら、かなりの線幅可変範囲が得られる。そのため、複数の集光レンズが取付けられない場合には有効な方法である。特にデフォーカス量に応じてレーザパワーを変化させ、パワー密度一定制御を行えば、レンズ交換法に劣らない線幅制御範囲が得られることが解かった。しかし、デフォーカス量の正確な制御が難しいことから、微妙な使い方には適さないと思われる。
- (4) いずれの方法においても、広い線幅の時は現像後の溝断面形状が緩やかになり、後工程上望ましくないことから、高精度部分やパターンの境界部分は微細スポットの狭い線幅で描画し、大面積で精度の要らない部分や中心部等は太い線幅で描画する「使い分け」をするのが有効である。
- (5) 理論的検討に関しては、いずれも同じ露光モデルを用いて、簡単なモデルながら実験値と良く対応がとれる結果を得た。実験値との厳密な数値的対応は不十分であったが、原因は実験装置において光学系の調整が完璧ではなく、幾分かの収差を含んでいたためと考えられる。

第5章 回折型光学素子描画とブレードFZPの特性

5.1 はじめに

本章では、開発したレーザ描画装置を応用して、最終目的としていた回折型光学素子の描画を行い、その特性を評価する。回折型光学素子としては、その代表的なものであり、実用化も進んでいるフレネルゾーンプレート(FZP)を対象とし、レーザ描画装置を用いた直接描画とエッチングの繰返しによりブレード化した、ブレードFZPを作製する。ブレード化は階段(ステップ)状マルチレベルとし、レベル数を変えて、その特性変化(主として回折効率)を評価する。

5.2 回折型光学素子とフレネルゾーンプレート(FZP)

5.2.1 回折型光学素子

光線を曲げたり集めたりする光学素子には光の反射作用を利用したミラー、屈折作用を利用したレンズ、回折作用を利用した回折型素子がある。

ミラーは波長分散が無いので使い易い素子であり、半導体露光装置(ミラープロジェクション)などにも使われているが、反射でしか使用できないため使用上での制約が大きい。

レンズは透過型で設計の自由度が大きいため多用されているが、種々の収差が発生し、収差の補正がレンズ設計の大きな仕事となっている。収差補正のために多数の組み合わせレンズ構成となり、大型なものになる。

回折型素子は、これまでは分光用の回折格子に利用される程度であったが、最近その特徴が見直されて活発に応用されるようになってきた。特に波長オーダーの薄膜で構成できることから薄型化、高集積化が可能であることや、コンピュータホログラム(CGH)技術を応用して、非球面レンズなどの無収差光学素子(色収差を除く)が実現出来ることなどから小型、高性能が要求される光ディスク用のピックアップ部品としての応用例が多く見られる^{5-2), 5-13), 5-15)}。

回折効果を利用して光ビームの分割や収束など、個別光学素子を用いた場合は沢山の部品を必要とする個所に応用して、1~2枚程度のCGH素子で対応が可能になっている。特に、光ピック

アップの焦点制御や信号検出に多用されて来ている。最近では、CDとDVDの両方が利用できる光ディスクドライブ装置があるが、CDとDVDでは読取りのビームスポット径や読取り位置(ディスク厚み)が異なるため、それぞれに最適な光ピックアップが必要である。単純な構成としては、2つの光ピックアップを用意して機械的に切り替える方式があり、販売されているものもあるが、光ヘッド部分が大型化しているため使用上好ましくない。そこで、DVD用に設計された高開口数($NA=0.6$)のガラス製屈折形レンズ中心部に回折形凹レンズを作り込み、CD用の開口数($NA=0.43$)に合わせた複合型2焦点単一レンズが開発され、応用されている⁵⁻¹⁴⁾。このような使い方は、回折形光学素子の特徴をうまく利用した用途であると考えられる。

また、波長分散が屈折型レンズと逆の特性になるため、屈折型レンズと組み合わせて使うことにより、色収差を補正するなど、特徴ある使用方法も行われている⁵⁻¹⁷⁾。

さらに最近、高速化する情報処理分野において、信号の相互接続を光結合によって行う光インターコネクションが注目されている⁵⁻²⁴⁾。光の持つ並列処理性が有効に活用されることから、大型計算機などのプリント配線基板を結合したバックボード配線を、この方法で行う試みがなされている。その一要素として、多数の光ビームを分配・スイッチングするアレイ状のマイクロフレネルレンズの開発などが報告されている⁵⁻⁷⁾。

一方、回折型光学素子は波長分散が非常に大きく、特殊な用途を除けば、ほとんどの場合単一波長光源でしか使用できない。しかし、最近では光源としてレーザ光を使用する場合はほとんどであり、この波長分散による制約は少なくなってきた。また、回折型光学素子の短所とされてきた、回折効率が低い点も、半導体作製プロセスを応用したブレーズ化が進められ、バイナリーオプティクスと称されて、簡単なプロセスで屈折型光学素子に劣らない程度の光利用率が得られるようになってきた。回折型光学素子は今後ますます多用されていくものと考えられる。

5. 2. 2 フレネルゾーンプレート(FZP;Fresnel Zone Plate)

フレネルゾーンプレート(以下 FZPと略記)は代表的な回折型光学素子であり, 図5. 1に示すような同心円状の輪帯パターンで, 光の回折作用により光を集光(または拡散)する機能がある.

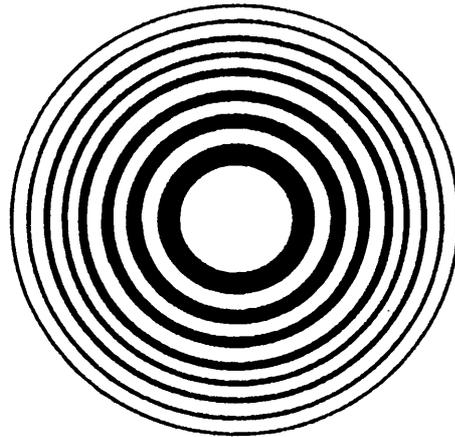


Fig.5. 1 Pattern of a Fresnel zone plate

図5. 1において中心から*i* 番目の輪帯の半径 r_i を式(5.1)のごとく設定すると, これを通過した各輪帯からの回折光は輪帯中心軸上の一点に集光され, 収差の少ない凸レンズ作用をする.

$$r_i = \sqrt{i\lambda f} \quad (5.1)$$

ここで, λ は光の波長(単色光), f は焦点距離である.

FZPは上述のように単なる同心円状の回折パターンであるが, 球面収差のない光学系や特殊機能を有した光学素子の実現可能である. 例えば, 光学素子の評価などに利用する光学干渉計の参照波面原器として用いると, この干渉計で非球面の形状測定も可能になる^{5-6), 5-11), 5-20)}. さらには, 干渉計システムの収差が特定できれば, この補正を盛り込んだ参照波面原器用ゾーンプレートを作製して干渉計全体を無収差化することも可能である. また, ゾーンプレートの透過光と回折光をうまく利用して, 参照波面原器が不要でコンパクトかつコモンパスに近い構成のため空気擾乱の影響を受け難い, ゾーンプレート干渉計にも応用されている^{5-18), 5-21), 5-22), 5-26)}.

FZPの作製方法として, 古くは, 実際に球面波と平面波の2光束を干渉させて, 光露光によりホ

ログラフィック干渉露光法で作製していた(HOE).この方法は現在でも、高精度の分光用回折格子作製に利用されている⁵⁻⁴⁾。しかし、最近では実際の光線を用いず、コンピュータ上で所望の波面を計算し、適当な描画装置を利用してホログラム光学素子を作製するコンピュータホログラム手法(CGH)が主流になり、仮想空間において、自由に任意の波面を作り出す光学素子の設計ができるようになった^{5-2),5-6)}。

真円のゾーンプレートの描画装置として、回転円盤上の感光材に同心円パターンを描画する方法がある^{5-11), 5-29), 5-30)}。この方法は高速に回転する円盤上の物体に描画するため、高速のパターニングができ、FZPの描画装置としては効率の良い装置である。一定回転数での描画においては、半径に応じた線速度に対応して描画用レーザーの光量を制御することにより、描画線幅の制御ができる。ただし、回転中心付近は極端に線速度が遅くなり、レーザー光量の制御が微妙(ダイナミックレンジの極下限)になるため、正確な描画が出来ない場合がある。従って、中心部まで描画が必要な場合には不適當である。また、図3.19の描画例で示したような楕円形状のパターンは描画が困難になる。さらに、同一感光材上に描画できるパターンは中心に一個のみで、複数のゾーンプレートを描画することはできない。従って、FZPアレイのようなパターンは描画が出来ないなどの制約がある。

5.3 FZPの直接描画とブレード化

ここでは、開発したレーザ描画装置を用いて、直接描画によりフォトレジストレベルのFZPを作製すること、さらに、直接描画とエッチングの繰返しによりブレード化する方法について述べる。

5.3.1 FZPの直接描画

FZPの直接描画に際しては、第3.2節で説明した独立テーブルタイプ描画装置を利用した。その理由は下記である。

- a) FZPの輪帯は波長オーダーの精度が必要であり、特に外周部では輪帯の幅自体が波長オーダーになる。
- b) 内周部では比較的広い面積の輪帯であるが、可視光に対するFZPではせいぜい0.1 mm程度で、レンズ切り替えによる線幅制御は行わなくても良い。
- c) 高精度で高速な描画が必要であり、独立テーブルタイプの描画装置が適している。

以下に、感光材の凹凸(2値, レリーフ形)による、透過位相形FZPの描画方法を述べる。

透明のガラス基板にフォトレジストをコーティングする。このフォトレジスト薄膜が回折波面に位相差を与える。その膜厚 d が式(5.2)を満たす時、回折効率が最大値になる。

$$d(n-1) = \lambda / 2 \quad (5.2)$$

ここで、 n はフォトレジストの屈折率で、ここで使用したものは $n=1.64$,

λ は使用する光の波長で He-Ne レーザ用として $0.63 \mu\text{m}$ とする。

この場合、最適な膜厚は約 $0.5 \mu\text{m}$ である。また、式(5.1)で対象とする回折形凸レンズの焦点距離 f は 100mm とする。

描画に際しては、 $(2i+1)$ 番目と $(2i+2)$ 番目の同心円からなる輪帯をレーザで露光する。集光されたレーザビームは直径 $1 \mu\text{m}$ 以下のため、輪帯内を塗りつぶすように露光する。塗りつぶしのピッチは $0.5 \mu\text{m}$ とする。これらの描画動作はパソコンのプログラムにより実行される。レジストはポジ型であるので、現像するとこの露光部分が溶解して、レジスト膜の凹凸による位相型、表面レリーフ型のFZPが作製される。

5.3.2 直接描画によるブレード化

前記感光材の凹凸による2値のFZPは理論的 maximum 回折効率が約 40%で光の利用率が悪い。この改善策として輪帯を2値の凹凸ではなく、鋸歯状にするブレード化がある。特にマルチレベル階段状ブレード化はフォトリソグラフィ技術により比較的簡単に実現でき、バイナリオプティクスと呼ばれてよく利用されている。レーザ直接描画においても同様のブレード化が可能である。ここでは実験装置の手軽さから、硝子のウエットエッチングによるマルチレベルブレード化を行った。

その方法を3レベルの場合について図5.2により説明する。

- (a)クロム膜付きの硝子基板にフォトレジストをコーティングする。
- (b)レーザ露光によりパターン描画する。
- (c)これを現像により、感光部分のレジストを除去する。
- (d)レジストパターンをマスクとして下地のクロム膜をエッチングする。
- (e)レジストを全て除去する。
- (f)クロム膜パターンをマスクとして硝子のエッチングをする。
- (g)再度レジストコーティングしてレーザ露光する。
- (h)レジストを現像し、クロム膜エッチングする。
- (i)レジストを除去して硝子をエッチングする。
- (j)最後にクロム膜をすべて除去する。

以上により、3レベルの硝子ブレード化された表面レリーフ型FZPが完成する。

この方法は N 回の処理で $(N+1)$ レベルのブレード化ができる。良く使われるマスク露光法によるバイナリ処理が、 N 回の処理により 2^N レベルのブレード化が出来るのに対して効率が悪いが、4レベル程度のブレード化に関しては大差はないと思われる。

一般に、 M レベルの階段状ブレード化されたFZPの理論回折効率は、 $\text{sinc}^2(\pi/M)$ である。これについては、次の節で理論的に検討する。

5.4 回折効率の理論的検討

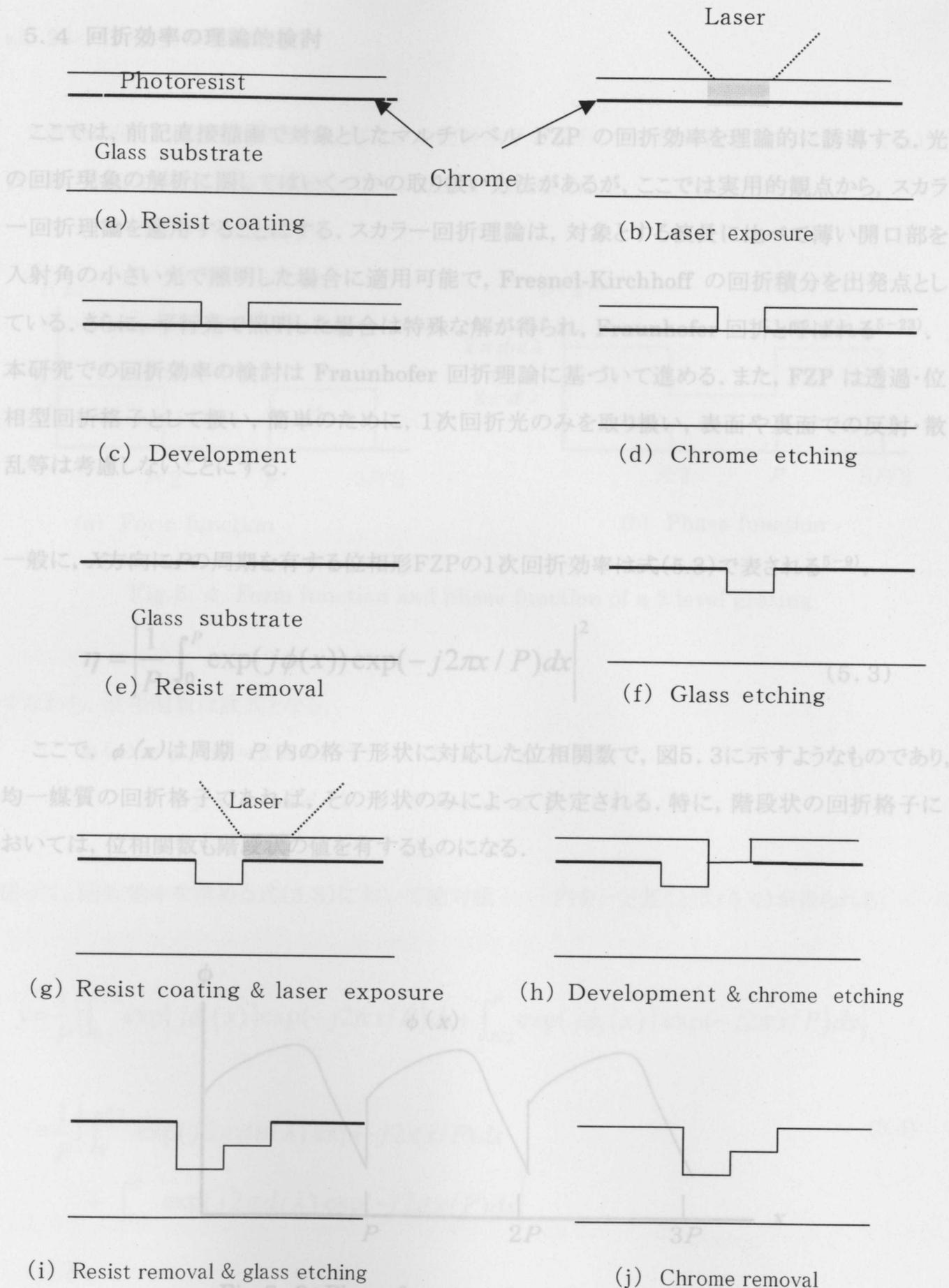


Fig.5. 3 Phase function of a diffractive grating

Fig.5. 2 Multi level blazing procedure by laser direct writing

5.4 回折効率の理論的検討

ここでは、前記直接描画で対象としたマルチレベル FZP の回折効率を理論的に誘導する。光の回折現象の解析に関してはいくつかの取り扱い方法があるが、ここでは実用的観点から、スカラー回折理論を適用することにする。スカラー回折理論は、対象とする波長に比べて薄い開口部を入射角の小さい光で照明した場合に適用可能で、Fresnel-Kirchhoff の回折積分を出発点としている。さらに、平行光で照明した場合は特殊な解が得られ、Fraunhofer 回折と呼ばれる⁵⁻²³⁾。本研究での回折効率の検討は Fraunhofer 回折理論に基づいて進める。また、FZP は透過・位相型回折格子として扱い、簡単のために、1次回折光のみを取り扱い、表面や裏面での反射・散乱等は考慮しないことにする。

一般に、 X 方向に P の周期を有する位相形FZPの1次回折効率は式(5.3)で表される⁵⁻⁹⁾。

$$\eta = \left| \frac{1}{P} \int_0^P \exp(j\phi(x)) \exp(-j2\pi x / P) dx \right|^2 \quad (5.3)$$

ここで、 $\phi(x)$ は周期 P 内の格子形状に対応した位相関数で、図5.3に示すようなものであり、均一媒質の回折格子であれば、その形状のみによって決定される。特に、階段状の回折格子においては、位相関数も階段状の値を有するものになる。

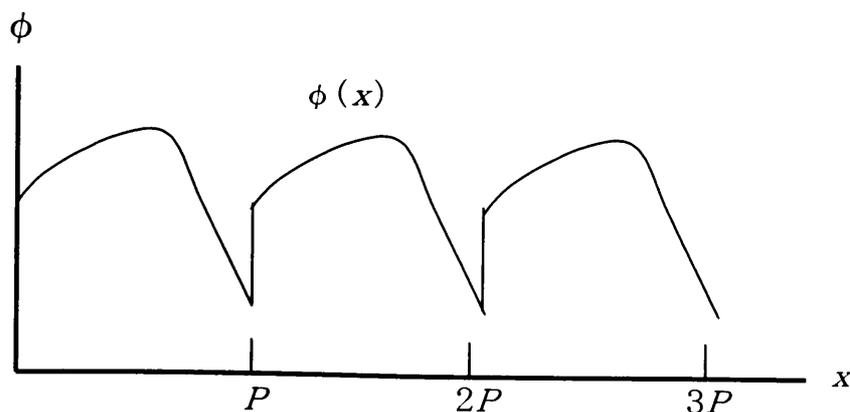


Fig.5.3 Phase function of a diffractive grating

a) 2レベル回折格子の場合

2段階の凹凸を有する屈折率 n , 厚さ d の回折格子の場合, その形状関数 $t(x)$ は図5.4(a)で表され, これに対応する位相関数 $\phi(x)$ は図5.4(b)で表される.

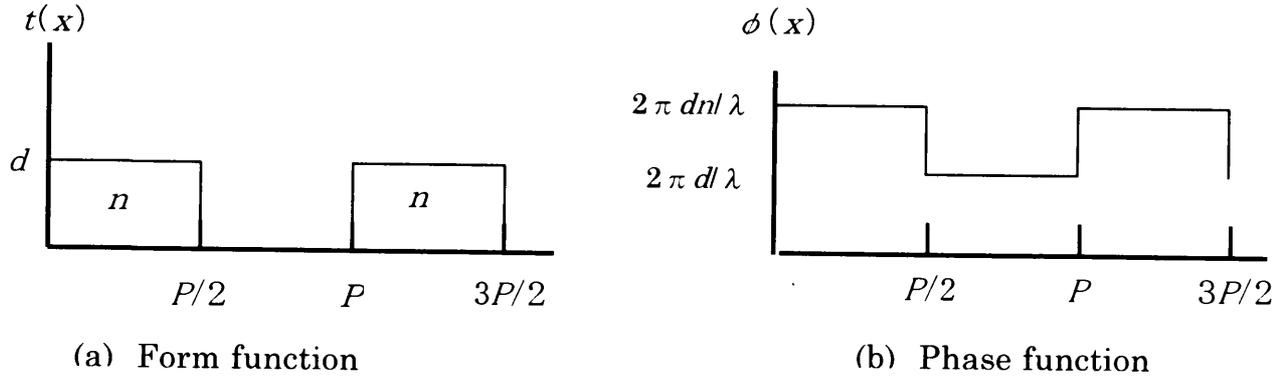


Fig.5.4 Form function and phase function of a 2 level grating

すなわち, 位相関数は次式となる.

$$\begin{aligned} \phi(x) &= \phi_1(x) = 2\pi dn/\lambda & 0 \leq x \leq P/2 \\ &= \phi_2(x) = 2\pi d/\lambda & P/2 < x \leq P \end{aligned}$$

従って, 回折効率を求める式(5.3)において絶対値 | | 内を y と置くと式(5.4)が得られる.

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{P} \left\{ \int_0^{P/2} \exp(j\phi_1(x)) \exp(-j2\pi x/P) dx + \int_{P/2}^P \exp(j\phi_2(x)) \exp(-j2\pi x/P) dx \right\} \\ &= \frac{1}{P} \left\{ \int_0^{P/2} \exp(j2\pi dn/\lambda) \exp(-j2\pi x/P) dx \right. \\ &\quad \left. + \int_{P/2}^P \exp(j2\pi d/\lambda) \exp(-j2\pi x/P) dx \right\} \end{aligned} \quad (5.4)$$

この定積分を実行すると, 式(5.5)が得られる.

$$y = \frac{j}{\pi} \{ \exp(j2\pi d/\lambda) - \exp(j2\pi d n/\lambda) \} \quad (5.5)$$

ここで、次の2式を公式的に利用する。

$$\exp(ja) - \exp(jb) = 2j \sin\{(a-b)/2\} \exp\{j(a+b)/2\}$$

$$\exp(ja) + \exp(jb) = 2 \cos\{(a-b)/2\} \exp\{j(a+b)/2\}$$

これにより、式(5.5)から、式(5.6)が得られる。

$$y = \frac{2}{\pi} \sin\{ \pi d(1-n)/\lambda \} \exp\{j(\pi d(1+n)/\lambda)\} \quad (5.6)$$

従って、回折効率 η は式(5.7)で示される。

$$\eta = |y|^2 = \frac{4}{\pi^2} \sin^2\{ \pi d(n-1)/\lambda \} \quad (5.7)$$

式(5.7)において、回折効率が最大になるのは、 \sin が1になる、 $\pi d(n-1)/\lambda = \pi/2$ の時であり、その条件は式(5.8)で表され、最適格子深さを与える式である。

$$d(n-1) = \lambda/2 \quad (5.8)$$

この時、回折効率は最大値 $\eta_{\max} = 4/\pi^2$ となる。

式(5.8)は、前述したフォトレジストの凹凸薄膜による2値FZPの最適膜厚を与える式(5.2)と同じである。

b) 3レベル回折格子の場合

3レベルの場合の形状関数及び位相関数は図5.5(a), (b)で示される.

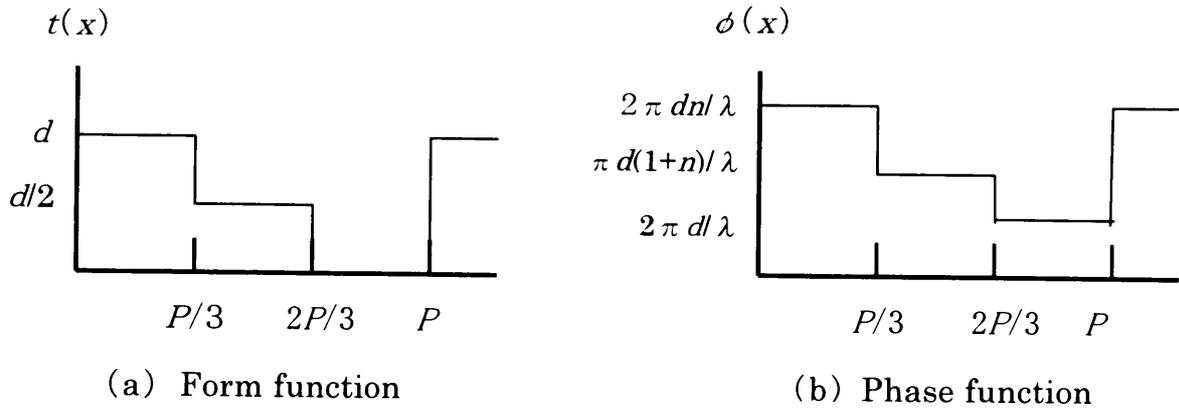


Fig.5.5 Form function and phase function of a 3 level grating

すなわち, 位相関数 $\phi(x)$ は以下の式で表される.

$$\begin{aligned} \phi(x) &= 2\pi dn/\lambda & 0 \leq x \leq P/3 \\ &= \pi d(1+n)/\lambda & P/3 < x \leq 2P/3 \\ &= 2\pi d/\lambda & 2P/3 < x \leq P \end{aligned}$$

従って, 式(5.3)に基づいて2レベルの場合と同様に定積分を実行すると式(5.9)が得られる.

$$\begin{aligned} y &= \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \left[\exp\{j(2\pi d/\lambda - \pi/3)\} + \exp\{j(\pi d(n+1)/\lambda - \pi)\} \right. \\ &\quad \left. + \exp\{j(2\pi dn/\lambda - 5\pi/3)\} \right] \end{aligned} \quad (5.9)$$

ここで, 前述の公式を2度用いて式(5.9)を整理すると, 式(5.10)が得られる.

$$y = \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{3}\right) \{2 \cos(\pi d(1-n)/\lambda + 2\pi/3) + 1\} \times \exp\{j(\pi d(1-n)/\lambda - \pi)\} \quad (5.10)$$

故に、回折効率 η は式(5.11)で示される.

$$\eta = |y|^2 = \frac{1}{\pi^2} \sin^2\left(\frac{\pi}{3}\right) \{2 \cos(\pi d(1-n)/\lambda + 2\pi/3) + 1\}^2 \quad (5.11)$$

式(5.11)において、回折効率最大の点は \cos が 1 の時であり、次式が成立する場合である.

$$\pi d(1-n) / \lambda + 2\pi/3 = 0$$

これより、回折効率が最大となる条件は式(5.12)で与えられる.

$$d(n-1) = 2\lambda/3 \quad (5.12)$$

この時、最大回折効率は $\eta_{\max} = (3/\pi)^2 \sin^2(\pi/3)$ である.

c) 4レベル回折格子の場合

同様の手順により、式(5.13)が得られる.

$$\eta = \left(\frac{4}{\pi}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\pi}{4}\right) \cos^2\{\pi d(n-1)/(3\lambda) - \pi/4\} \cos^2\{2\pi d(n-1)/(3\lambda) + \pi/2\} \quad (5.13)$$

最大効率は2つの \cos が 1 を与える場合であり、 $n > 1$ を考慮して考えると、その条件は式(5.14)で与えられる.

$$\pi d(n-1) / (3\lambda) - \pi/4 = 0$$

$$2\pi d(n-1) / (3\lambda) + \pi/2 = \pi$$

これから、いずれも 式(5.14)が得られる.

$$d(n-1) = 3\lambda/4 \quad (5.14)$$

この時、最大回折効率は $\eta_{\max} = (4/\pi)^2 \sin^2(\pi/4)$ である.

d) M レベルの場合

一般的に M レベルの場合について検討する.

前記と同様の手順により M レベル FZP の位相関数を求め, 式(5.3)に基づく定積分を実行すると, 式(5.15)が得られる(詳細は付録参照).

$$y = \frac{1}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \sum_{i=1}^M \exp\left\{j\left(\frac{2\pi d}{\lambda} \frac{(M-i)n + (i-1)}{M-1} - \frac{(2i-1)\pi}{M}\right)\right\} \quad (5.15)$$

式(5.15)において, Σ の中は M 個の単位ベクトルの和であり, FZP の各レベルから回折される光波面の位相のベクトル和を示している. これらが全て同位相の時, 回折効率は最大になる. その条件を以下のように求める.

Σ 内の第 i 項と $(i+1)$ 項を等しいとおくと, 次式を得る.

$$Md(n-1) = (M-1)\lambda \quad (5.16)$$

この式は項数 i を含んでいないため, すべての項数に対して成立する. この時, 全ての回折光が同位相になり, この時回折効率は最大となる.

式(5.16)から, 最大効率を与える最適な格子深さ d が求まり, 式(5.17)で与えられる.

$$d_{opt} = \frac{M-1}{M} \frac{\lambda}{n-1} \quad (5.17)$$

$M=2, 3, 4$ の場合は先に求めた, 式(5.8)(5.12)(5.14)と同一結果を与える.

式(5.17)で与えられる, ガラス($n=1.54$)に対する最適格子溝深さのグラフを図5.6に示す. 単位は使用光源の波長である. レベル数と共に大きくなるが, 次第に飽和していく特性である.

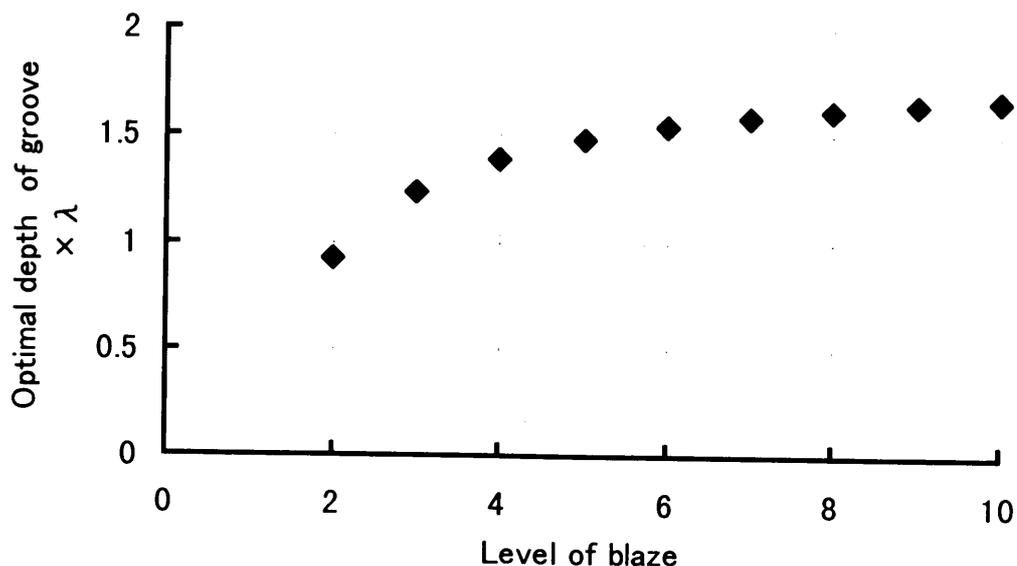


Fig.5. 6 Optimal depth of groove vs level of blaze

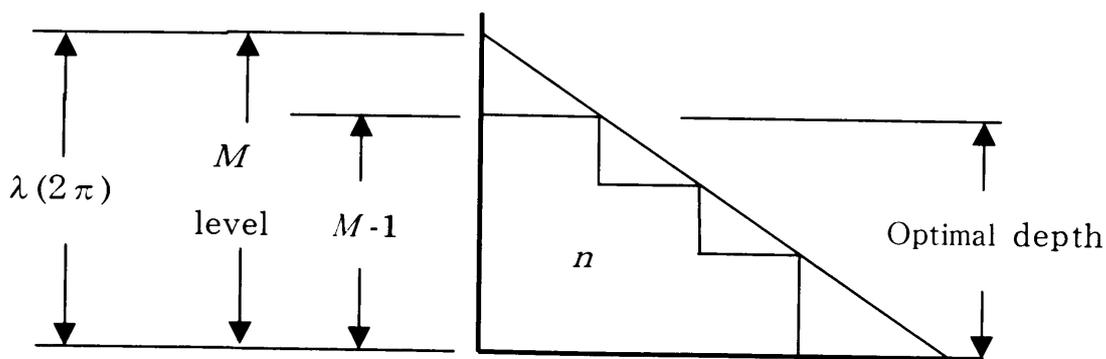


Fig.5.7 Explanation of optimal depth

式(5.17)は図5.7のように考えると理解しやすい式である. すなわち, M レベル(図では4レベル)のブレードをした場合, 等価的に完全ブレード化(∞ レベル化)した形状(図の斜線)の Y 軸との交点が理想的形状の波長(光学的距離で 2π)分に相当し, これが M レベルに対応する. 一方, 実際の格子溝深さは $(M-1)$ 段のところまでであり, これは光学的距離で示された最適格子深さに相当する. 従って, 最適格子深さは光学的距離(λ)の $(M-1)/M$ 倍となる.

式(5.17)が成立するとき、式(5.15)の Σ 内は M 個の同一単位ベクトルとなり、 Σ の絶対値は M となる。従って、最大回折効率 η_{\max} は式(5.18)で与えられる。

$$\eta_{\max} = \left| \frac{M}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{M}\right) \right|^2 = \frac{\sin^2(\pi M)}{(\pi M)^2} = \text{sinc}^2\left(\frac{\pi}{M}\right) \quad (5.18)$$

$M=2, 3, 4$ に対する理論的 η_{\max} は各々41, 66, 81%である。

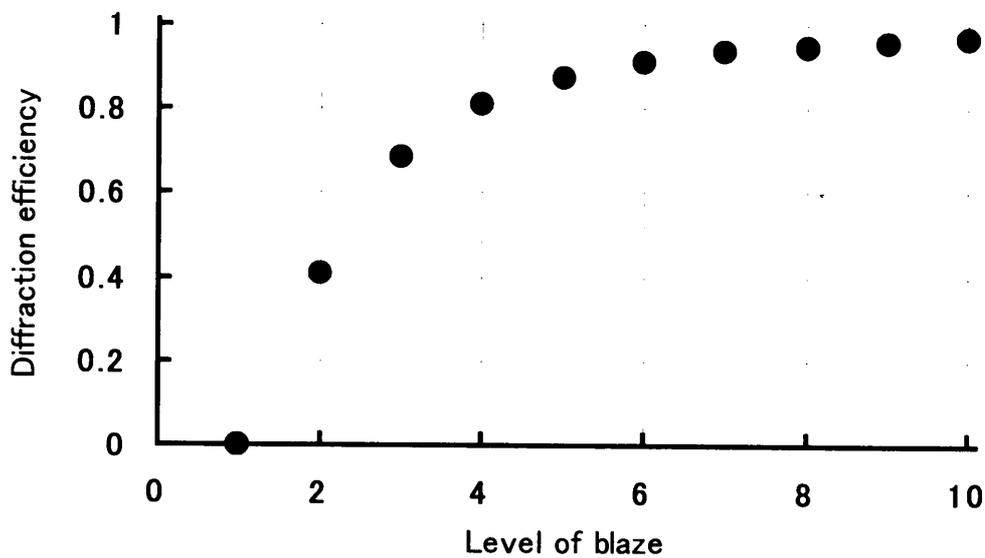


Fig.5.8 Theoretical diffraction efficiency of the multi level blazed FZP

式(5.18)に基づく理論回折効率のグラフを図5.8に示す。このグラフから、8レベル程度の階段状ブレード化を行えば、光の利用率に関して、回折型の光学素子でも屈折型とほぼ同等のものが得られ、4レベル程度でも80%以上の回折効率 η_{\max} が得られることが解かる。10レベル以上にブレード化しても、手間の掛かる割に回折効率の向上は少ない。

5.5 実験と検討

5.5.1 実験方法

a) FZPの作製方法

フォトレジスト膜の凹凸による2レベルFZPの描画は5.3.1項で前述した方法により描画した。実験の条件は下記である。

- ・描画線速度 ; 10 mm/s
- ・感光材 ; AZ1350(ポジ型), 膜厚 0.5 μm , ヘキスト社製
- ・レーザーパワー ; 0.2 mW(基板は透明ガラス)
- ・描画(塗潰し)ピッチ; 0.5 μm
- ・現像時間 ; 60 s (ポストベーク 120 $^{\circ}\text{C}$, 20 min)

ガラスエッチングによるブレードFZPの作製は5.3.2項で詳述した方法により実施した。実験条件は、下記を除いて、上述のフォトレジストによるFZPと同じである。

- ・レーザーパワー ; 0.1 mw(基板はクロム膜付きガラス)
- ・クロムエッチング; 8%(NH_4)₂Ce(NO₃)₅ + 0.03% HClO_4 , エッチング時間 35 s

ブレード化のレベル数は2, 3, 4について実験した。また、格子溝深さと回折効率の関係を検討するために、格子溝深さ(5.4章における d)を変えて実験した。格子溝深さの制御は、ガラスエッチングの時間により行った。エッチングに先立って、その特性を実験により確認した。エッチングはウエットエッチングにより行った。エッチング液は弗酸1%, 弗化アンモニウム40%の水溶液で、常温で行った。

図5.9は実験により確認したガラスエッチングの特性である。エッチング時間とエッチング深さの線形性は非常に良く、エッチング速度は0.07 $\mu\text{m}/\text{min}$ であり、波長オーダーの深さで制御し易い特性に調整されている。

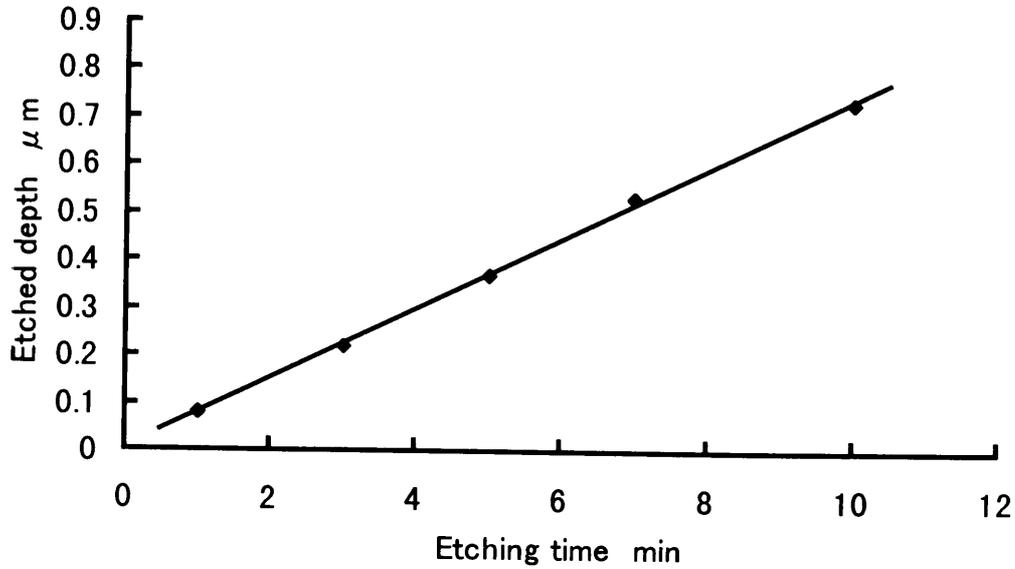


Fig.5. 9 Etching characteristics of glass

b) 回折効率の測定方法

作製した FZP の回折効率測定方法を図5. 10 に示す. 光源は He-Ne レーザで, ビーム直径 $\phi 1$ mm である. これをビームエキスパンダにより拡大して, FZP の口径いっぱい ($\phi 10$ mm) にし, FZP に入射する. FZP により集光された1次回折光のビームのみをピンホール ($\phi 0.1$ mm) で取出し, レーザパワーメータで測定する. ピンホールは正確な位置決めが必要であり, XYZ 3 軸の微動機構を用いて光軸調整を行った. ピンホールにはゼロ次光の一部が入射するが, 割合としてはごくわずか $\{(0.1/10)^2\}$ であり, 誤差範囲であると考えられる.

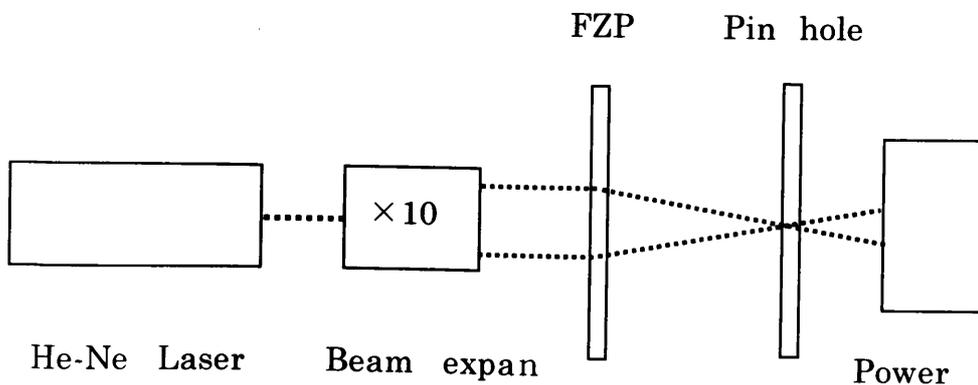


Fig.5. 10 Measuring equipment of diffraction efficiency

5.5.2 実験結果と考察

レーザを集光した結果のビームプロファイルを図 5.12 に示す。光源のガウス分布が再現されており、ビームウエスト直径は $9 \mu\text{m}$ である。開口数が $0.05 (f=100)$ a) レジストレベル FZP $(=d/2f)$ であるので、ほぼ理論限界値 $(=2\lambda/\pi/NA)$ まで集光されている。

直接描画によるレジストレベル FZP の顕微鏡写真を図 5.11 に示す。外径が 10 mm 、最内径が 0.7 mm 、最外径ピッチ約 $3 \mu\text{m}$ である。曲線部も滑らかで、きれいに描画できていることが確認できる。レジスト FZP よりも悪い値である。その理由は現像処理やベークによるレジスト薄膜の膜減りにより、最適膜厚が維持されなかったものと思われる。事実、実測によれば、 $0.1 \mu\text{m}$ の膜減りが観察された。

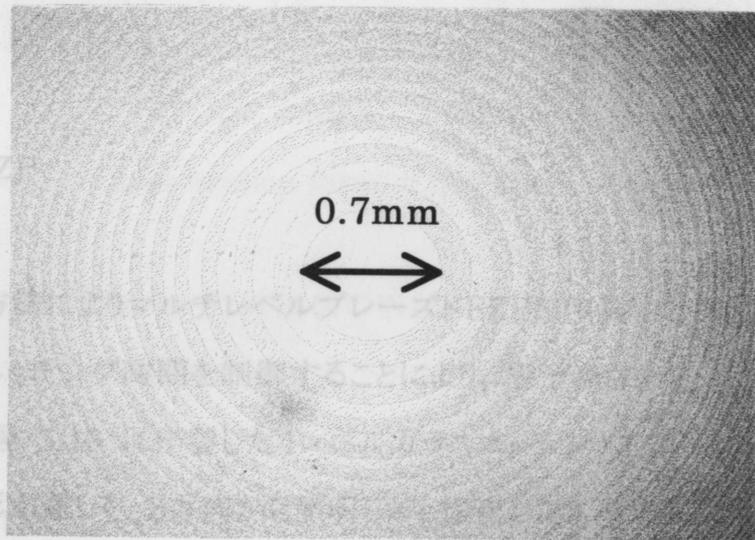


Fig.5.11 Micro-graph of Fresnel zone plate on photo resist

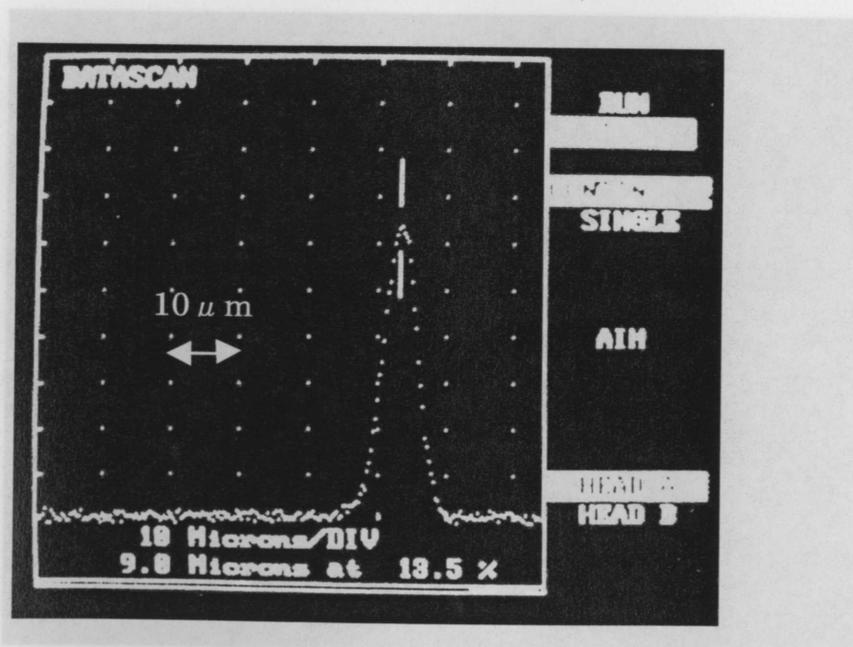


Fig.5.12 Beam profile of the focused laser by the Fresnel zone plate

このFZPを用いて He-Ne レーザを集光した結果のビームプロファイルを図 5.12 に示す. 光源のガウス分布が再現されており, ビームウエスト直径は $9 \mu\text{m}$ である. 開口数が $0.05 (f=100 \text{ mm}, d=10 \text{ mm}, NA=d/2f)$ であるので, ほぼ理論限界値 $(=2\lambda/\pi/NA)$ まで集光されている.

回折効率は 35% で, 理論値 (40.5%) の 88% であった. これは, 後に述べるガラスエッチングによる2レベルFZPよりも悪い値である. その理由は現像処理やベーキングによるレジスト薄膜の膜減りにより, 最適膜厚が維持されなかったものと思われる. 事実, 実測によれば, $0.1 \mu\text{m}$ の膜減りが観察された.

X: 100 $\mu\text{m}/\text{div}$ Y: 0.2 $\mu\text{m}/\text{div}$

b) ガラスエッチングFZP

Fig. 5.14 Cross section form of the 4 level Fresnel zone plate

5.3.2 で詳述した方法によりマルチレベルブレードFZPを作製した. レベル数は2, 3, 4についてFZPを作製し, エッチング時間を制御することにより, 格子深さを変えて何点かのサンプルを作製した. 一例として図 5.13 に作製した4レベルガラスエッチングFZPの全体写真を示す. 透明ガラスのため写真撮影が難しく, 2方向から照明して, 撮影したものである. 本実験では, 1枚のガラスに一個のFZPを作製している.

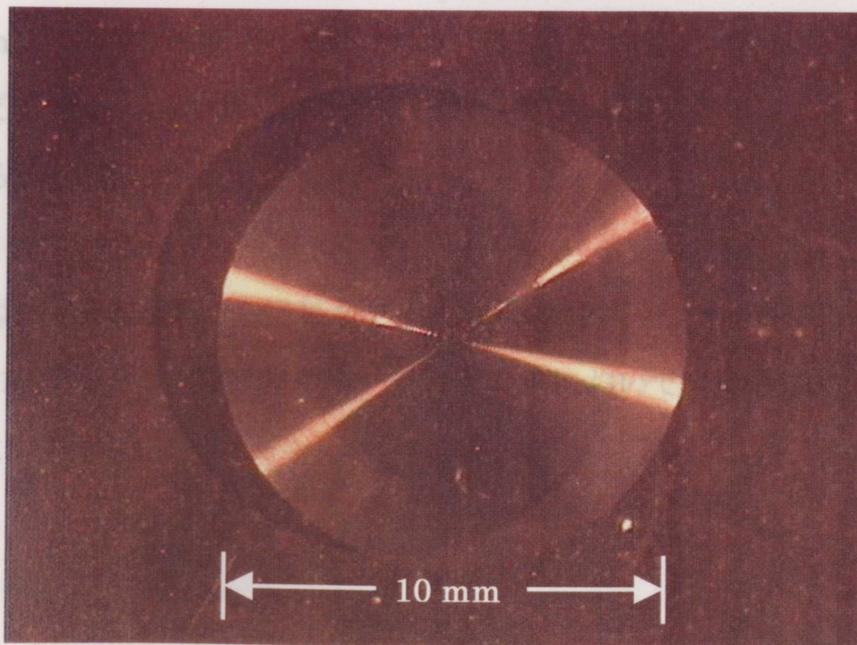


Fig.5. 13 Photograph of the 4 level Fresnel zone plate on etched glass

図5.14 はガラスエッチングした4レベルFZPの断面形状を測定した結果である. 使用した測定器は触針式表面形状測定器(Form Talysurf)で, 触針の先端半径は $2 \mu\text{m}$ である.

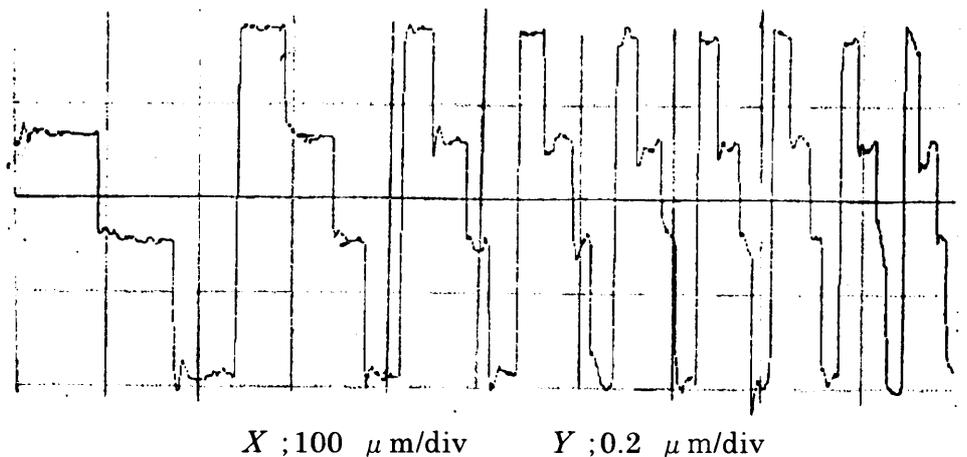


Fig.5.14 Cross section form of the 4 level Fresnel zone plate

ゾーン幅が大きい個所ではきれいな階段状の形状が形成されているが, ゾーン幅が狭くなると階段状の形状が崩れてきている. 特に, 狭いゾーンの一番深部の溝にその傾向が大きい. これはウエットエッチングにおいて, エッチング液が狭いゾーン内には十分に流入・対流されないためと思われる. エッチングの際に, 十分な攪拌等の作業が必要である.

エッチングされた面の形状に細かな凹凸が観測される. エッチングによりガラス面が粗くなっていることを示しており, この面において, 光の散乱によって回折効率が低下することが懸念される. 溝深さは $0.73 \mu\text{m}$ で, 実験前に意図していたものが得られており, エッチング時間としては妥当であると言える. ただし, 各レベルの均一さに関しては必ずしも十分ではなく, これも回折効率の低下原因の一つになると考えられる.

本実験においては, 設備的な面から簡単なディップ方式のウエットエッチングを利用したが, より厳密なエッチングのためには, 時間管理や均一性などの点において自動式のドライエッチング装置を用いた方法がより好ましい.

階段状ブレード化したガラス製FZPの回折効率測定結果を図5.15に示す。特性をより良く理解できるように格子溝深さを変数として表示した。実験は He-Ne レーザを用いたため、横軸は He-Ne レーザの波長に対する格子溝深さ寸法で表示した。プロットした点が実験値、破線は実験値の最小二乗近似曲線(4次で近似)、実線は式(5.7), (5.11), (5.13)で示される, 2レベル, 3レベル, 4レベルに対する理論値である。ガラスの屈折率は, $n=1.54$ とした。

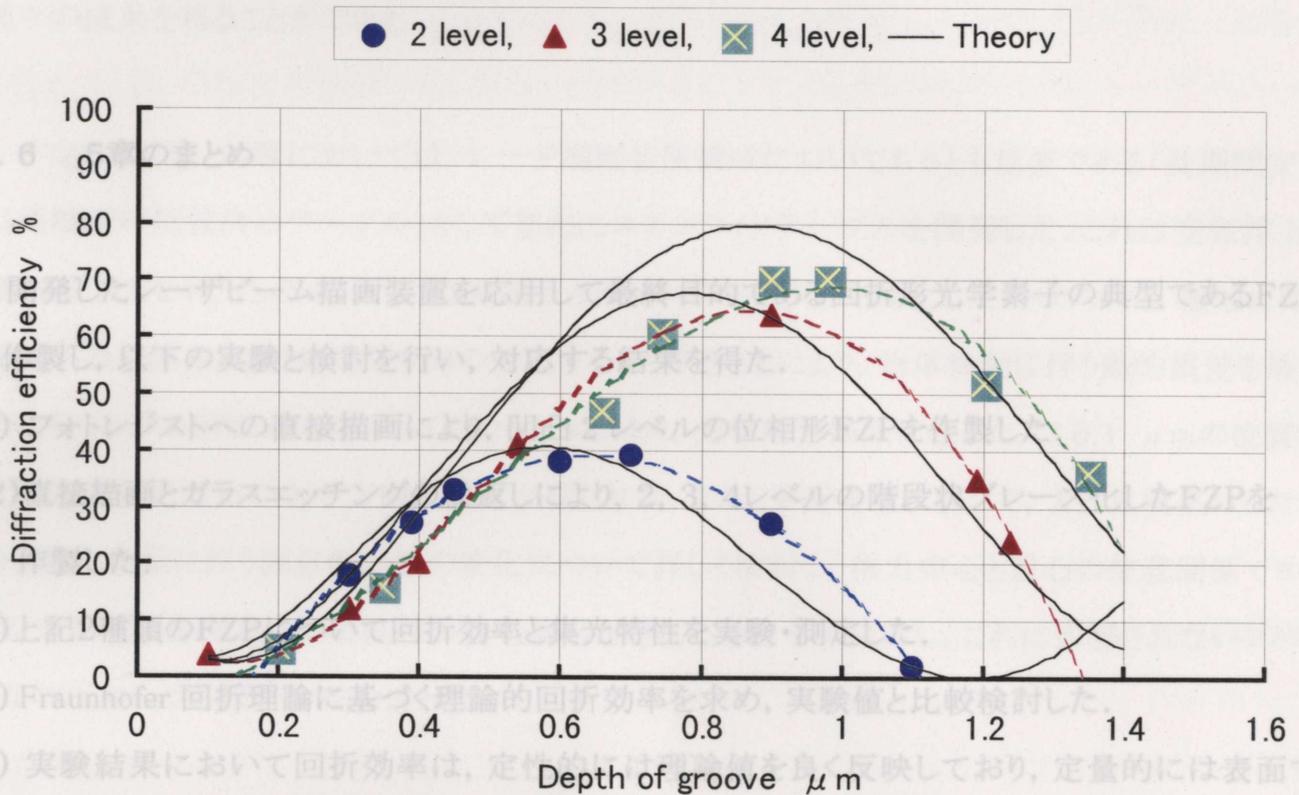


Fig.5.15 Diffraction efficiency of the multi level blazed gratings

理論的に回折効率が最大となる格子溝深さは, 前述の式(5.17)及び図5.6で示され, 2, 3, 4レベルFZPに対しては各々0.59, 0.78, 0.88 μm である。図5.15において, 実線で示される理論値のピーク点と実験値の近似曲線からの値とは 0.1 μm 程度ずれているが, 測定誤差範囲内と考えられ, 全体としては理論値と良く合致していると言える。

回折効率の最大値は2レベルの場合, 実験値は38%で理論値(41%)の94%, 3レベルの場合, 実験値は64%で理論値(66%)の97%, 4レベルの場合, 実験値は70%で理論値(81%)の87%であった。理論値との差がある原因としては, ガラス表面は無反射コーティングしていなかった

め表面からの反射やエッチングによって荒れた表面からの散乱,さらには図 5.14 で示した各レベル寸法の不均一さなどの輪帯の微小寸法誤差などによるものと考えられる。

4レベルのブレードFZPによって He-Ne レーザを集光した結果,ビームウエスト直径は $\phi 8.0 \mu\text{m}$ であった。実効開口数が 0.05 であるから,これも理論限界値まで集光できていることが確認された。

5.6 5章のまとめ

開発したレーザビーム描画装置を応用して最終目的である回折形光学素子の典型であるFZPを作製し,以下の実験と検討を行い,対応する結果を得た。

- (1) フォトリジストへの直接描画により,凹凸 2レベルの位相形FZPを作製した。
- (2) 直接描画とガラスエッチングの繰返しにより,2,3,4レベルの階段状ブレード化したFZPを作製した。
- (3) 上記2種類のFZPについて回折効率と集光特性を実験・測定した。
- (4) Fraunhofer 回折理論に基づく理論的回折効率を求め,実験値と比較検討した。
- (6) 実験結果において回折効率は,定性的には理論値を良く反映しており,定量的には表面での反射・散乱や格子寸法の誤差の影響により,理論値の 87~97%の値が得られた。
- (7) 最大回折効率を与える最適格子溝深さは,理論値と実験値で $0.1 \mu\text{m}$ の差があった。
- (8) 作製したFZPの集光特性はレンズとしての理論限界値付近まで集光できることが,実験により確認された。

第6章 結 言

本研究では微小光学素子，特に，回折形光学素子のパターン描画を最終目的として，使用が簡単で保守の手間がかからないレーザ描画装置を開発し，この装置を応用して直接描画とエッチングの繰返しにより，回折型光学素子の代表格であるフレネルゾーンプレートをマルチレベルブレイズ化して作製した．これらの研究過程の中で以下の開発と検討を行い，それぞれに対応する種々の成果を得ることができた．

すなわち，第 2 章においては，レーザ描画装置構成においてもっとも重要である「長期間安定で高精度の位置決めテーブル」として新たにエアスライドテーブルを開発した．これは空気浮上と磁気吸引力を利用したコンパクトな直動ガイドとリニアモータを一体化したテーブルで，接触に伴う精度不良を除去し，特に高さ方向の寸法を小さくすることにより，物体移動に伴う動的誤差を最小化することができた．本エアスライドテーブルにより，光学素子描画に適した， $\pm 0.1 \mu\text{m}$ の位置精度および $0.2 \mu\text{m}$ の水平方向真直度が得られた．また，平面走査に際して， XY 2 段重ねした場合，重心移動に伴う固有振動数の変化について詳しく検討し，推力中心と重心の位置関係でヨーイング固有振動数における位相が進む場合と遅れる場合を明確にし，これに影響されないロバストなコントローラ的设计方法を述べた．

第 3 章においては，第 2 章で開発したエアスライドテーブルを応用して開発したレーザ描画装置について説明した．装置は高速・高精度描画を主体とした独立テーブルタイプと，集光レンズ交換ができて，描画線幅が大幅に可変できる XY テーブルタイプの 2 種類の描画装置を開発した．それぞれの開発コンセプトと構成，特徴を明らかにし，ライン・アンド・スペースパターンや光導波路パターンの描画テストにより，回折形光学素子描画に適していることを実証した．また，前者において，オートフォーカス制御のためのアクチュエータとその制御系も開発し，その特性を明らかにした．このオートフォーカス系によれば 10 nm 台の焦点位置制御が可能となった．

第 4 章においては，開発した描画装置において描画時間短縮のために，描画線幅を制御する方法を検討した．集光レンズによるパターン描画の基礎的な特性評価から，集光レンズ交換法とデフォーカス法の 2 方法とレーザパワー制御の組み合わせ方法について詳しく検討した．

レンズ交換法においては、開口数が 20 倍までのレンズとレーザーパワー制御を組み合わせることにより、約 30 倍の線幅制御が可能であることを実験的に確認した。また、レーザーのガウス分布と感光材の露光スレッシュホールドエネルギーによる理論モデルを用いた解析は実験値と良く整合した。特に、露光線幅はレーザーパワーの対数の平方根に比例すること、感光材の膜厚の影響を感光材の感光スレッシュホールドエネルギーとして考慮できることを明らかにできた。

デフォーカス法においては、交換レンズ法のように装置側の負担なしで、6倍程度の線幅制御ができること、さらに、デフォーカス量に応じてレーザーパワーを制御し、レーザーパワー密度一定制御を行えば、10 倍程度の線幅が得られることを明らかにした。理論的検討の結果、レーザーパワー密度一定制御はレーザーパワーをデフォーカス量の4乗に比例して制御すれば良いことが解かった。

いずれの場合においても、太い線幅で描画した場合、感光材露光後の溝断面形状が緩やかになり、後工程上望ましくない。従って、太いパターン描画に際しても、パターンの境界は細いレーザービームで描画し、パターンの中心部は太いレーザービームで描画するなどの使い分けが有効であることが実験的に確認された。

第 5 章においては、本研究の最終目的である回折形光学素子としてフレネルゾーンプレート (FZP) を描画し、その特性を評価した。FZP はホトレジストの薄膜によるもの(2レベル)と直接描画とエッチングを繰り返してマルチレベルのブレイズ化 FZP を作製した。マルチレベル FZP は M 回の直接描画とエッチングにより、 $(M + 1)$ レベルのブレイズ化が得られる。ガラスのエッチング時間制御により、何種類かの格子溝深さを有するマルチレベル FZP を作製し、回折効率を測定した。さらに、Fraunhofer 回折理論に基づく回折効率を理論的に求め、実験値と比較検討した。実験結果は、定性的には理論的検討結果と良く整合し、定量的には最適格子溝深さで $0.1 \mu\text{m}$ の誤差、回折効率で理論値の87~97%の値が得られた。

製作した FZP を用いてレーザーを集光した結果、回折限界付近まで集光できることを確認できた。

今後の課題としては、装置価格がまだ高価で、本来目標としているパーソナルユース的に使えるところまで行っていないため、装置の低価格化が第 1 の課題、もう一つは、第 4 章において、感光材膜厚が薄い場合で高レーザーパワーの時に特異な傾向を示す実験結果が得られている点の解明がある。

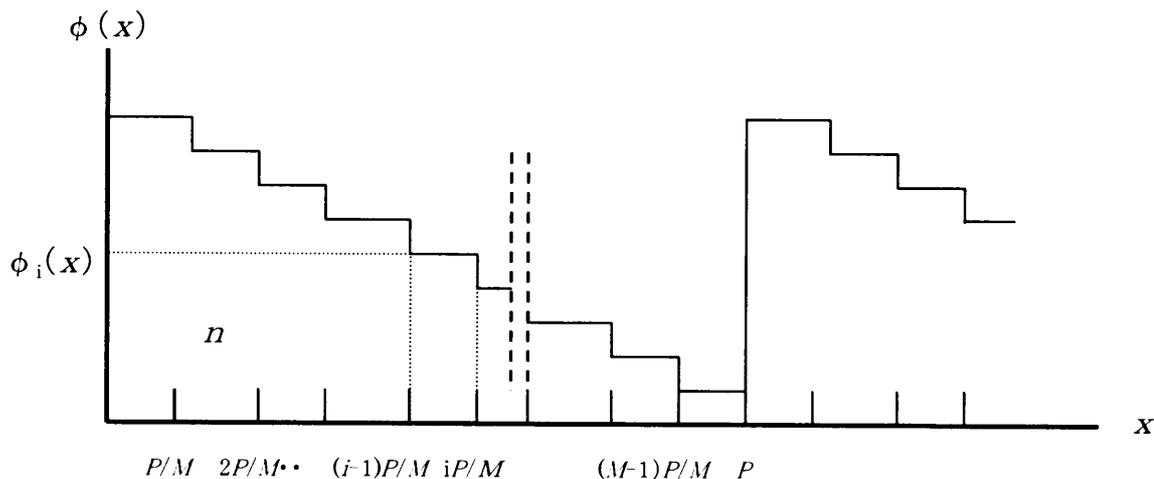
前者については、青色半導体レーザーの商品化に期待するところ大である。露光用レーザーに半導体レーザーが利用できれば、レーザー光源を光学ヘッド内に直接装着可能となり、装置が大幅に小型化できると共に、光量制御や光変調も AOM などの別の変調器なしで、半導体レーザーの電氣的制御のみで可能となり、光学系を大幅に低コスト化できる。半導体レーザーの電氣的な制御は、AOM のような外部変調器ほど高速な制御は期待できないが、本装置で FZP を描画する程度の速度には対応可能と考えられる。さらに、青色半導体レーザーを組み込んだ光学ヘッドが記録もできる DVD 用として市場に出れば、この光学ヘッドを描画装置に応用でき、位置決めテーブルも本論文で開発したような高精度のものである必要がなくなる。

後者については、本文中にも一部触れたが、感光材が本来のフォトンモードの感光でなくヒートモードでパターニングが行われている可能性がある。機会をみて再度実験・検討する予定である。

前述したように、フォトリソグラフィーの技術は今後ますます多用されていくものと思われるが、その中で、微細パターンの描画装置の必要性がより多くなるはずである。そのような時に、パーソナル的に利用ができる簡便な描画装置として、本レーザー描画装置の重要性が期待される。そのような折りに、本研究がいささかのお役に立てれば幸いである。

[付録] M レベルFZPの回折効率の算出

一般的な M レベルの場合について検討する. 屈折率 n の均等な媒質で, M レベルのブレード化された回折格子の位相関数は付図1のように示される. すなわち, 厚さ d , 格子ピッチが P で, $(M-1)$ 段の屈折率 n の媒体と1段の空気層から構成されている.



S.Fig.1 Phase function of a M -level blazed grating

今, i 番目の層について考えてみる. この層は図の X 軸上の位置では $(i-1)P/M$ と iP/M の間の層で, この部分を通る光は $(i-1)$ レベルの空気層と $(M-i)$ レベルの屈折率 n の媒体層を通る. 従って, その位相関数は式(a1)で示される.

$$\phi_i(x) = \frac{2\pi d}{\lambda} \left\{ \frac{(M-i)n + (i-1)}{M-1} \right\} \quad (a1)$$

故に, 式(5.3)の回折効率の式で, 絶対値記号の中を Y とおいた式は式(a2)で示される.

$$Y = \frac{1}{P} \sum_{i=1}^M \int_{\frac{(i-1)P}{M}}^{\frac{iP}{M}} \exp \left\{ j \frac{2\pi d}{\lambda} \frac{(M-i)n + (i-1)}{M-1} \right\} \exp \left(-j \frac{2\pi x}{P} \right) dx \quad (a2)$$

定積分は後半の \exp 部分についてのみであり, これを実行すると以下になる.

$$\begin{aligned}
Y &= \frac{1}{P} \sum_{i=1}^M \exp \left\{ j \frac{2\pi d (M-i)n + (i-1)}{\lambda (M-1)} \right\} \int_{\frac{(i-1)P}{M}}^{\frac{iP}{M}} \exp \left(-j \frac{2\pi x}{P} \right) dx \\
&= \frac{1}{P} \sum_{i=1}^M \exp \left\{ j \frac{2\pi d (M-i)n + (i-1)}{\lambda (M-1)} \right\} \frac{jP}{2\pi} \left\{ \exp \left(-j \frac{2\pi i}{M} \right) - \exp \left(-j \frac{2\pi (i-1)}{M} \right) \right\}.
\end{aligned} \tag{a3}$$

式(a3)に、本文中で用いた公式を適用すると次式を得る.

$$\begin{aligned}
Y &= \frac{1}{P} \sum_{i=1}^M \exp \left\{ j \frac{2\pi d (M-i)n + (i-1)}{\lambda (M-1)} \right\} \frac{-P}{\pi} \sin \frac{1}{2} \left\{ \frac{-2\pi i}{M} - \frac{-2\pi (i-1)}{M} \right\} \exp \left\{ \frac{j}{2} \left(\frac{-2\pi i}{M} + \frac{-2\pi (i-1)}{M} \right) \right\} \\
&= \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^M \exp \left\{ j \frac{2\pi d (M-i)n + (i-1)}{\lambda (M-1)} \right\} \times \sin \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{2\pi i - 2\pi (i-1)}{M} \right) \right\} \exp \left\{ \frac{-j}{2} \frac{2\pi i + 2\pi (i-1)}{M} \right\} \\
&= \frac{1}{\pi} \sum_{i=1}^M \exp \left\{ j \frac{2\pi d (M-i)n + (i-1)}{\lambda (M-1)} \right\} \times \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \exp \left(-j \frac{2i-1}{M} \pi \right) \\
&= \frac{1}{\pi} \sin \left(\frac{\pi}{M} \right) \sum_{i=1}^M \exp \left\{ j \left(\frac{2\pi d (M-i)n + (i-1)}{\lambda (M-1)} - \frac{2i-1}{M} \pi \right) \right\}
\end{aligned} \tag{a4}$$

ここで、 Σ は X 方向 M 列の層からの回折光単位ベクトルでの総和である。これが全て同一ベクトルとなる時に最大回折効率となる。その条件は、 i 番目の一般項が $(i+1)$ 番目の項と等しくなる条件である。これを求めてみる。

$$\frac{2\pi d (M-i)n + i - 1}{\lambda (M-1)} - \frac{2i-1}{M} \pi = \frac{2\pi d (M-i-1)n + i + 1 - 1}{\lambda (M-1)} - \frac{2(i+1)-1}{M} \pi \tag{a5}$$

$$2\pi d M \{ (M-i)n + i - 1 \} - \lambda (M-1) (2i-1) \pi = 2\pi d M \{ (M-i-1)n + i \} - \lambda (M-1) (2i+1) \pi \tag{a6}$$

$$d M (n-1) - \lambda (M-1) = 0 \tag{a7}$$

これは本文中の式(5.16), (5.17)に対応する。

参 考 文 献

第 1 章

- 1-1 F. Xu, J. E. Ford and Y. Fainman : Polarization selective computer-generated holograms, *Appl. Opt.* **34** (1995) 256.
- 1-2 J. Fan, D. Zaleta, K. S. Urquhart and S. H. Lee : Efficient encoding algorithms for computer-aided design of diffractive optical elements by the use of electron-beam fabrication, *Appl. Opt.* **34** (1995) 2522.
- 1-3 J. Bengtsson : Kinoform-only Gaussian-to-rectangle beam shaper for a semiconductor laser, *Appl. Opt.* **35** (1996) 3807.
- 1-4 F. Nikolajeff, S. Hard and B. Curtis : Diffractive micro lenses replicated in fused silica for excimer laser-beam homogenizing, *Appl. Opt.* **36** (1997) 8481.
- 1-5 M. B. Fleming and M.C. Hutley : Blazed diffractive optics , *Appl. Opt.* **36** (1997) 4635.
- 1-6 G. Blough and G.M. Morris : Hybrid lenses offer high performance at low cost , *Laser Focus World* **31** ,No.11 (1995) 67.
- 1-7 W. Daschner, M. Larson and S.H.Lee : Fabrication of monolithic diffractive optical elements by use of e-beam direct write on an analog resist and a single chemically assisted ion-beam-etching step, *Appl.Opt.*,**34**(1995)2534.
- 1-8 T.J.Suleski and D.C.O'Shea:Grey-scale mask for diffractive-optics fabrication: 1. Commercial slide imagers, *Appl.Opt.* , **34**(1995)7507.
- 1-9 野末 寛:電子ビーム露光装置, 電子材料, 12 月別冊(1995)59.
- 1-10 保坂純男, 瀬谷英一, 高梨明宏:高速レーザ描画システム, 光学, **17**, 4(1998)170.
- 1-11 野原正幸, 鳥羽栄治, 児島由尚, 西松豊典:SHG レーザビーム描画装置の開発, 計測自動制御学会論文集, **33**, 12(1997)1190.
- 1-12 吉澤 徹, 藤沢一郎, 徳永 剛:半導体レーザビームの集光とマーキングへの応用, 精密工学会誌, **55**, 12(1989) 2175.
- 1-13 徳永 剛, 田中義弘, 宮崎俊行, 吉澤 徹:半導体レーザによるパターン描画の研究, 精密工学会誌, **59**, 7(1993)1181.

- 1-14 山本英樹, 雑賀憲昭: 反射光の微分による自動焦点検出を備えたレーザ光描画装置の開発, 光学, 23, 5(1994)310.
- 1-15 櫻井好正, 常包辛五: リニアスケール用レーザ干渉刻線機, 精密工学会誌, 55, 12(1989) 2192.
- 1-16 T. Nomura, K. Kamiya, H. Miyashiro, K. Yoshikawa, H. Tashiro, M. Suzuki, S. Ozono, F. Kobayashi, and M. Usuki: An instrument for manufacturing zone-plates by using a lathe, Prec. Eng., 16,4(1994)290.
- 1-17 谷田貝豊彦: パソコンによる計算機ホログラム自動作成ソフトと描画システム; O plus E, No.204 (1996)107.
- 1-18 野中 純: レーザフォトプロッター, O plus E, No. 148(1992)87.

第2章

- 2-1 M. B. Fleming and M. C. Hutley : Blazed diffractive optics , Appl. Opt. 36 (1997) 4635.
- 2-2 恩田 一: リニアモーター一体型エアスライドを用いたレーザ描画装置, 平成9年電気学会産業応用部門全国大会予稿集 230(1997) 445.
- 2-3 H. Onda: Development of a Unique, High Precision Linear Motor Integrated Air Slide Table, and It's application to Laser Beam Writers, Opt. Rev., 6, 1(1999) 88.
- 2-4 NTN(株)製品カタログ「精機メカトロガイド」(エアスライド, リニアモータ付エアスライド).

第3章

- 3-1 恩田 一, 浅原章伸, 藤井章二: レーザビーム描画装置の開発, 精密工学会誌, 58, 11(1992)1837.
- 3-2 H. Onda: Development of a Unique, High Precision Linear Motor Integrated Air Slide Table, and It's application to Laser Beam Writers, Opt. Rev., 6, 1(1999) 88.
- 3-3 恩田 一: リニアモーター一体型エアスライドを用いたレーザ描画装置, 平成9年電気学会産業応用部門全国大会予稿集 230,(1997) 445.
- 3-4 NTN(株)製品カタログ「レーザビーム描画装置」.

第4章

- 4-1 恩田 一:レーザビーム描画における露光線幅の制御, 精密工学会誌, 63, 1(1997)81.
- 4-2 恩田 一:レーザビーム描画における露光線幅の制御 (第2報), 精密工学会誌, 65, 8 (1999) 1158.
- 4-3 L.D.Dickson : Characteristics of a propagating Gaussian beam, Appl.Opt., 9, 8 (1970) 1854.
- 4-4 植原弘之, 斎藤勝政:光造形法におけるレーザ光学系の理論解析, 精密工学会誌, 60, 7(1994)994.
- 4-5 植原弘之, 斎藤勝政:光造形法における光学解析, 精密工学会誌, 60, 8(1994)1117.
- 4-6 早水良定:光機器の光学II, 日本オプトメカトロニクス協会(1989).
- 4-7 「微小光学ハンドブック」第2章波動光学;朝倉書店.
- 4-8 ヘキスト社カタログ“AZ Photo resist products”, 技術資料.

第5章

- 5-1 恩田 一:レーザ直接描画によるFZPの描画とその特性, 精密工学会誌, 63, 9(1997) 1300.
- 5-2 倉田幸夫, 石川俊夫:CD用ホログラムピックアップ, 精密工学会誌, 56, 10(1990)1775.
- 5-3 西田信夫:ホログラムスキャナ, 精密工学会誌, 56, 10(1990)1779.
- 5-4 佐野一雄:ホログラフィックグレーティング, 精密工学会誌, 56, 10(1990)1783.
- 5-5 安田賢司:HOEを用いた斜入射干渉計, 精密工学会誌, 56, 10(1990)1788.
- 5-6 玄間隆志:CGHを用いた非球面形状測定干渉計, 精密工学会誌, 56, 10(1990)1791.
- 5-7 K. Kodate,W. Klaus: Theoretical and experimental evaluation of array illuminators for large aperture phase-only spatial light modulator, Proc. SPIE., 2577,165(1995).
- 5-8 原田善寿, 佐藤 誠, 佐野一雄:ホログラフィック露光法による回折格子の製作,微小光学研究会機関誌, 17, 41(1999)41.
- 5-9 R.Magnusson and T.K.Gaylord : Diffraction efficiency of thin phase gratings with arbitrary grating shape, J.Opt.Soc.Am.,68 (1978)806.
- 5-10 高木康博:バイナリーオプティクス, 光技術コンタクト, 31,6(1993)316.

- 5-11 橋本清文, 佐藤彰: MZPを用いた非球面の絶対形状測定技術の開発, 光技術コンタクト 31,8(1993)476.
- 5-12 小野雄三: 新しい応用展開が注目されるディフラクティブ・オプティクス, OPTRONICS, 8(1996)99.
- 5-13 田中康弘, 春原正明: 光ディスク用回折格子一体型レンズ, OPTRONICS, 8(1996)101.
- 5-14 金馬慶明, 水野定夫: DVD用2焦点ピックアップ, OPTRONICS, 8(1996)106.
- 5-15 丸山晃一: 光ディスク用回折屈折ハイブリッド色補正レンズ, OPTRONICS, 8(1996)117.
- 5-16 塩野照弘, 藤川和彦: 赤外用回折形Siマイクロレンズ, OPTRONICS, 8(1996)122.
- 5-17 COHERENT 社カタログ「Long Life Industrial CO2 Focusing Lenses」.
- 5-18 橋本清文, 佐藤 彰: ゾーンプレート干渉計による非球面の絶対形状測定, 光学, 23, 2(1994)102.
- 5-19 鈴木 等, 高田 聡: 回折光学素子を用いた光学設計, 光学, 25,12(1996)684.
- 5-20 神谷和秀, 野村 俊, 宮代 裕, 吉川和男, 田代発造, 大園成男, 小林富美男: 既製のフゾー干渉計を基礎としたゾーンプレート干渉計, 精密工学会誌, 61, 4(1995)516.
- 5-21 野村 俊, 神谷和秀, 宮代 裕, 吉川和男, 田代発造, 大園成男: オンマシン用改良型ゾーンプレート干渉計, 精密工学会誌, 61, 5(1996)667.
- 5-22 田代発造, 神谷和秀, 野村 俊, 宮代 裕, 葛 晋治, 吉川和男, 昇 健雄 : 位相型ゾーンプレートの回折効率とゾーンプレート干渉計, 精密工学会誌, 62, 3(1996)393.
- 5-23 谷田貝著「応用光学 光計測入門」丸善(1988).
- 5-24 吉川宣一, 伊藤雅英, 谷田貝豊彦: 計算機ホログラムを用いた光インターコネクション, O plus E, No.204, (1996)95.
- 5-25 C.W.Chen, J.B. Breckinridge : Holographic Twyman-Green interferometer, Appl. Opt. 21, 14(1982) 2563.
- 5-26 中島一敏: 非球面検査のためのゾーンプレート干渉計, 光学, 14, 5(1985)365.
- 5-27 和田順雄: 薄膜の屈折率と膜厚の光学的測定法, 応用物理, 65, 11(1996)1125.
- 5-28 和田康一: レジスト処理装置, 電子材料, 12 月別冊(1995)40.
- 5-29 「ゾーンプレートの製造装置及びその製造方法」, 公開特許広報, 特開平 8-15511(1996)
- 5-30 「ゾーンプレート製造方法」, 公開特許広報, 特開平 8-15512(1996)

謝 辞

本論文の作成に関し、終始ご指導いただきました静岡大学工学部の佐々木 彰教授に心から感謝申し上げます。

本論文に関して有益なご討論とご指導を賜りました静岡大学工学部の森田信義教授，松田 孝教授，松井 隆教授，大坪順次教授に厚く御礼申し上げます。

本研究のレーザ描画装置に関して、共同開発者である NTN(株)メカトロニクス研究所の岩本憲市主任研究員，岡田浩一主任研究員，小池孝志主任，浅原章伸主任，藤井章二研究員および精密機器技術部の岡田 学課長，米田忠男主任，小野祐志郎氏のご協力に深く感謝します。また，FZPの製作と検討に関しては，NTN(株)知的所有権部の高木万寿夫氏，メカトロニクス研究所の石田敏治研究員に多大な協力を頂きました。

本研究における理論的検討に関して，筑波大学物理工学系谷田貝豊彦教授にはコンピュータプログラム技術のご指導を頂きました。また，静岡大学工学部の杉原興浩助教授からは光導波路に関する基礎知識のご指導を頂きました。さらに三重大学工学部の駒田 諭助教授にはロバスト制御に関する技術指導を頂きました。厚く御礼申し上げます。

英文論文の作成に関して，NTN(株)テクニカルセンターのRussell Monahan技師には査読と修正をしていただき，大変感謝しております。

最後に，研究者としての機会を与えていただいた故室 博博士をはじめ，NTN(株)の関係各位に厚く御礼申し上げます。

筆者の本研究に関する論文

学会誌論文

- 1) 恩田 一, 浅原章伸, 藤井章二: レーザビーム描画装置の開発, 精密工学会誌, 58, 11 (1992) 1837.
- 2) 恩田 一: レーザビーム描画における露光線幅の制御, 精密工学会誌, 63, 1 (1997) 81.
- 3) 恩田 一: レーザ直接描画によるF Z Pの描画とその特性, 精密工学会誌, 63, 9 (1997) 1300.
- 4) H. Onda: Development of a Unique, High Precision Linear Motor Integrated Air Slide Table, and It's application to Laser Beam Writers, Opt. Rev., 6, 1(1999) 88.
- 5) 恩田 一: レーザビーム描画における露光線幅の制御 (第 2 報), 精密工学会誌, 65, 8 (1999) 1158.

関連論文

- 1) 光ディスクマスタリング装置 工業調査会発行「精密位置決め技術—その設計テクニック—」
井澤實編著 P283~302

その他参考論文

- 1) 恩田 一: リニアモーター一体型エアスライドを用いたレーザ描画装置, 平成9年度電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, 230 (1997) 445.
- 2) H. Onda: High precision positioning system using rectangular thrust air bearing, Proceedings of IECON'85 (1985)321.
- 3) 恩田 一, 高木 万寿夫: レーザ描画によるFZPの描画とその特性, 1997年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, J13(1997) 331.
- 4) 恩田 一, 石田 敏治: レーザビーム描画における線幅制御(第3報), 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, G32(1996) 615.
- 5) 恩田 一, 石田 敏治: レーザビーム描画における線幅制御(第2報), 1996年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, G31(1996) 613.

- 6)恩田 一,藤井 章二:レーザビーム描画における線幅制御,1993 年度精密工学会秋季大会 学術講演会講演論文集, D32(1993) 503.
- 7)恩田 一,猿田正弘:レーザビームによる微細パターンの描画と加工,1991 年度精密工学会 秋季大会先端技術紹介セッション資料,(1991) 29.
- 8)恩田 一,浅原章伸,高木万寿夫,藤井章二:レーザビームによる微細パターンの描画,1991 年 度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, E63(1991) 825.
- 9)恩田 一:レーザビーム描画装置,日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 '91 講演論文集, Vol B, 322(1991) 125.
- 10)恩田 一,岡田浩一,谷田貝豊彦:光ディスクマスタリング装置によるコンピュータホログ ラムの記録,平成元年電気学会産業応用部門全国大会講演論文集, 166(1989) 697.
- 11)恩田 一,山崎 静:エアスライダを用いた精密位置決めシステム,昭和 57 年電気学会全 国大会講演論文集 1334(1982)1759.
- 12)恩田 一,岡田浩一,山崎 静:エアスライド一体型可動磁石式直流リニアモータ,昭 58 年 電気学会全国大会講演論文集, 811(1983)982.
- 13)恩田 一:転がり案内一体化リニア直流モータの開発,電気学会マグネティックス研究会資 料, MAG-84-96(1984)1
- 14)恩田 一,山崎 静,岡田浩一:エアスライドを用いた超精密位置決め装置,第 29 回システ ムと制御研究発表講演会予稿集, L4(1985)149.
- 15)恩田 一,大橋康二,岡田 学,岡田浩一:全自動光ディスク原盤カッティング装置,第 24 回 SICE 学術講演会予稿集, 3108(1985)577.
- 16)恩田 一,大橋康二,山崎静,岡田浩一:エアスライダを用いた精密位置決めシステム, 第 21 回 SICE 学術講演会予稿集, 3804(1982)647.