レーザビーム描画装置の開発と応用*

恩 田 一** 浅 原 章 伸*** 藤 井 章 二***

Development of Laser Beam Writer

Hajime Onda, Akinobu Asahara and Shoji Fujii

A laser beam writer is developed for high precision and easy operation. The design concept is as follows. The range of precision is about $1\mu\text{m}$, which covers the area between the electron beam writer and the photo plotter or photo reduction. A larger writing area and smaller body is realized for easy operation and maintenance. The construction of the writer is reported in detail. The system has two key units: an air slide table with built-in linear motor and a laser focusing optical device assisted by a focusing servomechanism. For easy operation, two types of command language and P.C. CAD are incorporated in the software system. A line and space pattern is written for evaluation and some experiments for line width control are reported. Finally, several applications are suggested, such as computer-generated holograms, an optical wave guide, an optical integrated circuit, and so on.

Key words: laser beam writer, patterning, electron beam writer, photo plotter, air slide table, laser focusing, computer-generated hologram, optical wave guide

1. は じ め に

感光材（フォトリソグ）に微細パターンを描画して用いる用途が沢山ある。特に近年、半導体製造分野における高度なフォトリソグラフィの技術が他の用途にも広く転用されるようになり、レジスト原板やマスク原板が多面で用いられるようになってきた。このような微細パターン描画用として、レーザビーム描画装置を開発したので報告する。

2. 微細パターン描画方法

従来、微細パターン描画方法として下記のものがあった。

(a) 電子ビームによる方法

(b) 光による方法

(c) 写真縮小による方法

これらの方法を比較対照すると表1のごとくなる。

電子ビームによる方法は電子（半導体）集積回路のパターニング用としてAT&T Bell研究所で開発されたものである。電子集積回路用のフォトマスク

Table 1 Comparison of patterning methods

Method (device)	Application	Minimum line width	Feature
Electron beam (E.B.)	Electronic integrated circuit	Sub-micron	High precision, Large total system
Light beam (photo plotter)	Printed circuit board	Several 10's of microns	Precision, For P.C.B. only
Photo reduction (camera)	Optical device or hybrid I.C.	Several 10's of microns	Precision, Easy to use

* 原稿受付 平成4年3月30日

** 正 会 員 N T N ㈱ (磐田市東貝塚1578)

*** N T N ㈱

はほとんどこの電子ビーム描画装置を用いて描画されている。スポット径として最小 $0.1\mu\text{m}$ 程度が可能であるので、サブミクロンの最小線幅が描画できる高精度描画装置である。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で、保守に手間がかかるなどの欠点がある。

光による方法では、プリント配線基板(PCB)用のパターンを描画するフォトリソグラフィーがある。ランプ光源を用いて太いビームで描画していくものが主流であるが、最近ではレーザービームにより高速に描画できるものも出てきている。

写真縮小による方法は、作図用プロッターで描画したものを写真撮影により縮小するもので、前記2つの方法など特別な手段を有しない場合も手軽に行い得る簡易的方法として幅広く利用されている。例えばコンピュータホログラムの描画や表面弾性波(SAW)デバイスの電極パターンなどがそれである。又、この方法で作った写真乾板を露光機でハードマスクに転写してフォトリソグラフィの工程で利用するなど、苦肉の策を実行している場合も少なくない。

ところで、表1ではカバーできていない、線幅が数 μm から数十 μm 程度の微細パターンを必要とする用途が近年増加して来ている。例えば、前記したコンピュータホログラムの高精度なもの、光導波路パターンなどの光回路、光集積回路パターンなどである。これらの用途では、従来は写真縮小法で簡易的に行っていたり、精度的要求から、やむを得ず電子ビーム描画法を利用したりしていた。前者では、十分な精度が得られないことから、又、後者ではコスト、ターンアラウンドタイムの点から、簡便に利用でき、低コストで、高精度(最小線幅数 μm)の描画装置が必要となって来ている。このような要求に対応して、電子ビーム描画装置より1ランク低い精度(最小線幅数 μm)で、簡便に利用できる微細パターン描画装置を開発した。

3. 装置構成と動作

開発した装置の平面図を図1に、主要部である光学ヘッド部を図2に、その構成ブロック図を図3に示す。図2は、図1において、光学ヘッド部をYスライド方向から見た写真で、光学ヘッド、Yテーブルとその下のリニアモータ用永久磁石が見える。装置は空気浮上式除振台の石定盤の上に設置されている。これは主として、温度による膨張と、発錆を防ぐためである。本装置の精度を決定しているのは、テーブル部で、当社が独自に開発したリニアモータ内蔵の空気軸受テーブ

Fig.1 Plan of main unit

Fig.2 Optical head

ル(エアスライド)を応用している。このエアスライドは、永久磁石の吸引力と空気軸受の浮上力を釣り合わせた特殊な構造で薄型化を図ると共に、内蔵式ブラシレスリニアモータによるダイレクトドライブと光学式リニアエンコーダの採用により、完全非接触でサブミクロンの位置決めを簡単に実現できる。

X軸、Y軸の各テーブルは直接重ねてXYテーブルとはせず、各々独立に石定盤に取り付けられ、Xテーブルは光学ヘッドを、Yテーブルは被描画物(マスクブランク)をそれぞれ移動させる。

Fig.3 Schematic diagram

テーブルを直接重ねてXYテーブルとしないのは下記の理由による。

- ・下部スライドモータの推力が上部スライドの重量を動かすのに費やされてしまい、応答が遅くなったり、オーバーシュートが発生する。

- ・エアスライドはなめらかで真直度が大変良く、高精度位置決めには適しているが、剛性が弱い欠点があり、上部テーブルの動作により重心位置が変わるとヨーイングなどにより精度劣化が起こる。

図3の破線で示す光学ヘッドは図1、図2に示すごとく極小形にしたが、オーバーハングは免れず、その結果ヨーイングが発生するため、反対側にカウンタウェイトを設け、可動部重心とリニアモータの推力中心を合わせる工夫をしている。

描画用レーザーはHe-Cd レーザである。これを選定した理由は下記である。

- ・感光材（フォトレジスト）の感度波長域（442 nm）の発振がある。
- ・比較的小形である。

なお、フォトレジストは、通常よく用いられるポジ形レジストがそのまま応用できる。

He-Cd レーザを集光するために、高開口数で、収差補正がよくなされたA Vレンズと呼ばれる特殊レンズを採用している。レンズ自体の開口数は0.9であるが、入射ビーム径を入射瞳径より幾分細めているため、実効開口数は0.6で利用している。集光されたビームスポット直径は約 $1\mu\text{m}$ である。

光学ヘッドは、図3に示すごとくこの集光レンズと後述するオートフォーカス系の光学系を含んだ部分で、これがXテーブル上に固定されて位置決め制御される。

これは、いわゆる光学系移動方式で、光軸調整が困難なことや、光軸ずれの懸念から敬遠されがちであるが、マイクロメータヘッドなどの精密ねじとしっかりしたガイドを有し、一軸ずつ独立の光軸調整機構と調整後のロック機構など、光軸調整系の設計を十分考慮しておけば問題はない。He-Cd レーザは、音響光学光変調器（AOM₁）を用いたレーザーパワーサーボにより光量制御され、描画線速度に応じた光量に制御される。さらに、AOM₂により、描画パターンに応じてオン／オフされ、レンズL₃によりビーム拡大され、2色性ミラーDMにより集光レンズに入力され、集光されて被描画物を露光する。

ここで用いている集光レンズは高開口数であるので焦点深度が $1\mu\text{m}$ 以下である。従って、自動焦点合わせ（オートフォーカス）が必要となる。本装置においては、図3に示すごとく、補助用のHe-Ne レーザを用いて焦点ずれを検出し、それに応じて集光レンズを上下方向に微動することにより、精度 $\pm 0.05\mu\text{m}$ のオートフォーカスを実現している。集光レンズのアクチュエータは図4に示すような平行板ばね支持で、ボイスコイル形アクチュエータにより構成されている。そのコイル電流から変位までの伝達関数は数十Hzから10kHzまで、2デカート以上の広い安定な動作域を有している。

又、サーボ系としてはクロスオーバー周波数が1.5kHzの応答を有する高速制御系である。

Fig.4 Focussing actuator

Fig.5 Software system

4. ソフトウェア体系

本装置のソフトウェア体系を図5に示す。本装置は内部にハードウェアとして、数値制御（NC）用パルス分配を実行するプリント基板を有しており、この基板はNC言語であるGコマンドを入力するようになっている。筆者らは、本装置をパーソナルコンピュータから駆動されるプロッタ的な位置付けとし、プロッタ用言語HP-GLを共通インタフェース部分と考える一方、NC言語に慣れた人には、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、内部にHP-GL/Gコマンド変換ソフトウェアを内蔵している。又、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ではもっとも普及率の高いAUTOCADを対象として、これから出力される標準化されたデータフォーマットを有するDXFファイルをインタフェース部としてサポートしている。そのため、パソコン内部にDXF/HP-GL変換ソフトウェアを有している。DXFファイルは、AUTOCADのみでなく、多くのパソコンCADでもサポートされており、パソコンCAD間のデータ互換性をとるために定義されたものである。このように、本装置では、DXFファイル、HP-GL、Gコマンドの3種類の入力方法が可能になっている。

なお、このような描画においては、従来からある描画機用CADシステムとのデータ（例えば、ガーベフォーマットなど）互換性が問われることがあるが、本装置においては、安価なパソコンから制御できるスタンドアローンの装置という位置付けをしている。

5. 仕様と特徴

本装置の主な仕様を表2に示す。

本装置の特徴としては下記が挙げられる。

- ・ 独自開発のリニアモータ付きエアスライドの採用により、全体の光軸高さを低くおさえ、サブミクロンの位置精度を有している。
- ・ 光学系は高開口数のレンズを採用することにより、ビームスポット直径を $1\mu\text{m}$ にしている。
- ・ 描画範囲が $180\text{mm} \times 180\text{mm}$ と広い。
- ・ 大気中で描画できるため、電子ビーム描画装置のように真空機器を必要とせず、小形、簡便、保守容易である。
- ・ パーソナルコンピュータ用CADとの結合により、パターン設計から描画まで一連の作業がスタンドアローンで出来る。

Table 2 Specifications of the system

Table	Air slide with built-in linear motor
Light source	He-Cd laser ($\lambda=442\text{nm}$, 10mW)
Writing area	$180\text{mm} \times 180\text{mm}$
Work size	Max $200\text{mm} \times 200\text{mm} \times 5\text{t}$
Chucking	Vacuum chuck
Scan mode	Vector scan
Beam diameter	$\phi 1\mu\text{m}$
Resolution	$0.1\mu\text{m}$
Repeatability	$\pm 0.3\mu\text{m}$
Optical head	N.A.:0.9 (Effective N.A.:0.6)
Light	Light control by AOM 30kHz of B.V.
Modulation	On/off control by AOM 10MHz of B.V.
Focusing	Automatic focusing by V.C.W.
Size	$860(\text{W}) \times 1100(\text{D}) \times 1340(\text{H})\text{mm}$

Fig.6 Line & space pattern

6. 本装置の性能評価結果

本装置の性能評価のためライン・アンド・スペース (L & S) パターンを描画した。4 μm 及び 8 μm の L & S パターン描画結果の光学顕微鏡写真を図6に示す。これらはいずれも 1 μm よりやや太い線幅で、1 μm のピッチで塗りつぶし描画したものである。ピッチむらや蛇行がなく、いずれも精度よく描画できていると評価できる。なお、L & S の限界としては、位置誤差が $\pm 0.2 \mu\text{m}$ あることから 2 μm が限度である。

7. 線幅制御実験

本装置ではビームスポット径は 1 μm であり、1本の光ビームで描画できる線幅は 1 μm であるが、レーザ光はガウス分布のため、レーザ光量を増していくとフォトレジストの感度特性から描画線幅を広げることができる。本装置において、可変線幅制御を目的として、レーザ光の単位面積あたりのエネルギー密度と描画線幅の関係を実験的に検討した。さらに、光学ヘッドに入るレーザ光をビーム径変換して、等価開口数 (NA) を変化させた場合についても同様に実験を行った。実験方法は、ビームウエスト (合焦点) 近傍で、集光レンズを上下させながら描画すると、図7に示すごとく、ビームウエストにおける最小線幅を観察できる。これを光学顕微鏡により寸法を測定して、線幅を評価した。

実験結果から線幅のエネルギー密度依存性を図8に示す。図8より、露光エネルギー密度を上げていくと2次曲線近似に近い形で描画線幅は増加していく。標

Upper : NA = 0.2
Lower : = 0.6
Fig.7 Line width at beam waist

Fig.8 Line width dependency on energy density

準状態 (NA = 0.6) においては、露光エネルギー密度を $3 \sim 15 \times 10^3 \text{ J/m}^2$ まで5倍増すことにより、線幅は最小の 1 μm から、3 μm まで、約3倍増やすことができる。但し、あまり露光エネルギー密度を上げていくと、フォトレジストが熱的に劣化してきれいな溝断面形状が得られなくなったり、下地のクロム膜が熱的損傷を受ける可能性があるため、この程度が限度と思われる。

さらに、簡単なビーム径変換光学系を挿入することにより、等価 NA を変更すれば、線幅が比較的簡単に変えられることが分かった。

8. 応 用 例

本装置は最小線幅 $1\ \mu\text{m}$ 程度の微細パターン描画用として、種々の応用が考えられるが、主なものとして、下記のものが挙げられる。

- ・コンピュータホログラムの直接描画^{1) 2)}
- ・光導波路のパターニング
- ・マイクロメカニズムのパターニング^{4) 5)}
- ・リニアエンコーダ、ロータリエンコーダ

これらの描画結果のうち主なものを以下に示す。

a) コンピュータホログラムの直接描画

コンピュータホログラムと言っても色々なものがあるが、特に、コンピュータホログラム技術を用いた光学素子 (HOE) は、単色であるレーザ用の無収差光学素子や干渉計の参照波面原器として有用である。HOE の代表例として凸レンズ機能を果たすマイクロフレネルレンズのパターンを描画したものを図9に示す。これは直径 0.7mm 、焦点距離 20mm のものである。このようなパターンにおいては、最外周においては光波長程度の線幅が要求されるため、本装置が有用となる。

Fig.9 Micro Fresnel lens

b) 光導波路のパターニング

光導波路は光スイッチや光カプラなど光機能素子、光集積回路などを構成する上で最も基本となるもので、多様な応用の可能性を有している。これらはサブミクロンの精度が要求されると共に、長さは数cmに及ぶものがあり、本装置の用途として大変適している。

Fig.10 Optical wave guide Y-branch

図10は光スイッチなどに利用される光導波路のY分岐を描画したものである。細い分岐となめらかな変曲点が高精度に描画できており、ベクトルスキャン方式の本装置の特徴が発揮されている。

9. あ と が き

小形で簡便に利用できるレーザビーム描画装置を開発した。開発のコンセプトを述べ、その構成と特徴を述べた。装置の性能評価と線幅制御実験を行った。装置性能としては最小線幅 $1\ \mu\text{m}$ 、ライン・アンド・スペースとしては $2\ \mu\text{m}$ が限度である。

今後の課題としては、描画線幅をより太い方へも可変できるフレキシブルなレーザビーム描画装置を指向して行きたい。

参 考 文 献

- 1) 高村真, 大場良次: C.G.H. 直接描画装置, 1990年 SICE 北海道支部学術講演会予稿集, (1990) 1.
- 2) 恩田一: 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予稿集, (1989) 697.
- 3) 谷田貝豊彦, 斉藤弘義: 計算機ホログラムとその応用, 精密機械, 47, 12(1981) 1541.
- 4) 「特集マイクロメカニズム」, 精密工学会誌, 54, 9(1988) 1625.
- 5) 「ミニ特集マイクロメカニズム」, 計測と制御, 28, 6(1989) 479.
- 6) 「特集ホログラフィ実用化技術」, 精密工学会誌, 56, 10(1990) 1771.