

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	シンクロトロン放射光を利用した露光装置における超精密駆動・位置決めに関する研究
Title(English)	
著者(和文)	福田真
Author(English)	Makoto Fukuda
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第3277号, 授与年月日:1996年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第3277号, Conferred date:1996/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

平成7年度 学位論文

シンクロトロン放射光を利用した露光装置に
おける超精密駆動・位置決めに関する研究

指導教官： 下河辺 明 教授

東京工業大学大学院総合理工学研究科
精密機械システム専攻

学籍番号 94D27047

福田 真

目次

第1章 序論	1
1. 1 研究の背景	1
1. 1. 1 リソグラフィの動向と課題	1
(a) 縮小投影露光	2
(b) 電子線露光	3
(c) X線露光	4
1. 1. 2 シンクロトロン放射光を利用したリソグラフィ	5
(a) 等倍露光	5
(b) SRリソグラフィシステムの構成	6
1. 1. 3 SR露光装置に要求される性能	8
(a) 解像力	8
(b) 重ね合せ精度	8
(c) スループット	9
1. 1. 4 従来のSR露光装置	9
1. 2 研究の目的	13
1. 3 本論文の構成	13
参考文献	16
第2章 試作したSR露光装置	24
2. 1 緒言	24
2. 2 試作SR露光装置の構成	24
2. 3 駆動・位置決め機構	26
2. 3. 1 たて形XYステージ	26
2. 3. 2 マスクステージ	28
2. 4 光ヘテロダイン干渉位置検出法	28
2. 4. 1 原理	28
2. 4. 2 アライメント精度	29
2. 5 重ね合せ精度	30
2. 6 結言	31
参考文献	32
第3章 空気静圧送りねじによる位置決め	47
3. 1 緒言	47
3. 2 空気静圧送りねじを用いた位置決め機構	48
3. 2. 1 セラミック空気静圧送りねじの構造	48

3. 2. 2	空気静圧送りねじを用いた位置決め機構	49
3. 3	レーザ干渉計による位置決め制御	49
3. 3. 1	実験装置	49
3. 3. 2	位置決め特性	51
3. 4	フィードフォワードによる位置決め制御	52
3. 5	ロータリエンコーダによる位置決め制御	53
3. 5. 1	装置構成	53
3. 5. 2	回転軸制御の特徴	54
3. 5. 3	位置決め実験	54
3. 6	結言	55
	参考文献	56

第4章	改良型SR露光装置の試作	77
4. 1	緒言	77
4. 2	露光装置の全体構成と全体寸法	77
4. 3	アライメント位置検出系の改良	80
4. 3. 1	アライメント検出誤差の要因	80
4. 3. 2	クロストークの低減	81
4. 4	駆動・位置決め機構の改良	83
4. 4. 1	たて形XYステージ	83
4. 4. 2	マスクステージ	84
4. 5	結言	85
	参考文献	86

第5章	改良形SR露光装置の評価	98
5. 1	緒言	98
5. 2	XYステージの位置決め特性	98
5. 3	マスクステージの位置決め特性	98
5. 4	マスク・ウエハ間のアライメント特性	99
5. 5	重ね合せ精度	99
5. 6	転写特性	101
5. 7	結言	101
	参考文献	103

第6章	結論	113
6. 1	結論	113
6. 2	今後の課題	117

第1章 序論

1. 1 研究の背景

1. 1. 1 リソグラフィの動向と課題

近年の情報化社会の進展には目覚ましいものがある。日本語と英語の会話が可能な自動通訳装置、臨場感にあふれる高精細ハイビジョンディスプレイ、目的地を運転席で案内してくれるカーナビゲーションシステム。近年のこうした情報処理装置は、より知的で、よりリアルで、そして、より身近なものとなってきた。こうした高度な情報化社会を実現する上での共通な技術的課題は、情報処理の高速化と大容量化であり、これらは半導体技術の発展なしには実現しない。

半導体技術の進展は、トランジスタの発明以来、IC、LSI、超LSIと微細化、高集積化の歴史である。この理由として、トランジスタの処理速度、消費電力がその寸法を小さくすればするほど向上すること^[1]、高集積化により量産性が向上し^[2]経済性が良くなることがあげられる。

半導体の代表であるDRAM (Dynamic Random Access Memory) における高集積化の指標である記憶容量は3年で4倍、微細化の指標である最小線幅は0.7倍の速度で進み^{[3][4]}、この傾向がこのまま続くとすれば、2001年には、最小線幅0.18 μm の1 G b i tメモリが世の中に出てくることになる(図1-1)。また、このDRAMを形成する微細パターン間の重ね合せ精度*には、最小線幅の3分の1から5分の1が要求され、最小線幅0.18 μm のメモリに対しては60 nm程度が求められる。実際研究レベルでは、1 G b i t DRAM級メモリの動作実現の可能性を示した発表がなされている^{[5][6]}。さらに最近では、ソースドレイン間の電流を制御するゲートの最小線幅0.04 μm でのトランジスタ動作の確認も行われており^[7]、今後もこうした微細化、高集積化の方向は続くと考えられる。

この微細化、高集積化の先導的な技術として、半導体基板(ウェハ)上に微細パターンを露光形成するリソグラフィ技術がある。リソグラフィの半導体プロセスへの適用は1959年のFairchild社によって提案されたバイポーラ集積回路に端を発し、以来、転写光源に光を用いたリソグラフィ技術が微細パターンの解像力と転写速度の点から有力なパターン形成技術となっている。

しかし、要求される最小線幅は、露光波長と投影レンズの開口数(NA: Numerical Aperture)で決まるレーリの解像限界^[4]に近づきつつあり、露光光源の短波長化とレンズの大口径化が進められている。すなわち、縮小投影露光では、転写可能な最小線幅を規定する解像限界は、波長が短いほどまたレンズ開口数が大き

*) これらの用語の本論文での定義は、p 15に示す。

いほど高くなるため、高い解像力を得るには、短い波長の光源で、開口数の大きなレンズを用いることが進められている。投影露光の短波長化は、可視光、紫外線 {水銀ランプの g 線 (436 nm), 同 i 線 (365 nm)} , 遠紫外線 {KrF レーザ (248 nm), ArF レーザ (193 nm)} の順で進行している。

また、露光波長の解像限界を乗り越えるべく、光の位相を利用した、位相シフトマスク、瞳フィルタ、変形照明などの超解像技術^[8]の研究も近年では盛んに進められている。しかし、複数の微細線パターンが一定ピッチで並んだラインアンドスペースパターン (Line and space pattern) には有効であっても、一本の微細な線パターンのみが孤立して存在する孤立パターン (Isolated pattern) では解像力が上がらないなどのパターン依存性が強く、また、マスク欠陥を修正するのが困難であるなどの問題があり、1 G b i t 以上の大規模集積回路への適用には解決すべき課題も多く予想される。

1 G b i t 以降の超 L S I 用リソグラフィ技術として、現在のところ、(a) 光による縮小投影露光、(b) 電子線露光、(c) X線露光の3種類の可能性がある。表1-1に、各露光技術を比較した。

(a) 縮小投影露光

光露光技術は、光により、原版 (マスク) に書かれたパターン全面を一回で照射し、投影レンズにより、ウエハ上に縮小転写する一括縮小投影露光技術である。パターンを転写するには、パターン原版となるマスクが必要となる。波長193 nmのArFエキシマレーザを露光光源とする縮小投影露光によれば、最小線幅0.18 μ mの転写が可能といわれているが、0.18 μ mを露光するには、変形照明や位相シフトなどの超解像技術を利用することになり、露光波長による解像限界が問題となる。スループットは、露光装置の処理能力を表す評価指標で、通常は1時間当たりの処理枚数で表す。このスループットは、光露光技術が最も優れており、近年では、50～60枚/時間のものが出てきている。

構造的には、ウエハとマスク間に投影レンズが介在するため、マスクウエハ間距離が大きくなる。このため、匡体の振動が重ね合せ精度を悪化させる要因となるので、頑強なフレームを有した構造が必要となっている。光露光における、マスクウエハの位置検出方法として、投影レンズを介してウエハの位置を検出するTTL

(Through The Lens) 方式が、現在、最も多く用いられている^{[9] - [11]}。この方式では、レンズ倍率歪みをウエハ位置検出に含めて測定できること、ウエハ位置検出機構をレンズ上部に配置可能で、マスクとウエハの位置検出機構を互いに接近させた測定が可能のため、ウエハとマスク位置検出機構の相対的な位置ずれが少なく、また、レンズの大口径化にも対応可能などの利点がある。しかし、マスク位置決め機構とウエハ位置決め機構の間には投影レンズがあり、この投影レンズによる像の

ゆがみ（レンズディストーション）が生じること、また、マスクとウエハ間の距離が離れているため、匡体の振動などにより、両者間で位置ずれが生じること、また、ウエハ位置検出用の波長と、露光用の波長とが異なるため、レンズ収差の影響で結像位置が異なり、それを補正する必要があることなど、この方法でも今後の高い要求精度を得るのは難しいと考えられる。

（b）電子線露光

電子線露光技術は、1本の細く絞ったポイントビームを走査することにより、微細パターンを形成することから始まっている。ビーム径は数10オングストロームまで絞ることが可能で解像限界は10nm前後といわれている。その高い解像力を利用して、微細パターンが要求されるLSIマスク、光学部品などの形成に用いられてきた。転写技術と違い、LSIの設計データからパターンを創成する機能を有する露光技術である。しかし、ポイントビームの走査方式でパターンを逐一描画しては、高いスループットを得ることが困難となるため、描画の高速化が要求されるLSIパターンの形成には、可変方形ビームによる描画などが工夫されてきた^[12]。最近では、転写すべきパターンの一部をマスクにし、その繰り返しにより高速に描画する部分一括露光法が工夫されている^[13]。

一方、電子線露光の解像力における課題として、電子線照射位置近傍での基板やパターン側壁から生じる反射電子が、パターン形状を悪化させる近接効果（Proximity effect）がある。このため、電子線照射位置近傍のパターンサイズ、隣接パターン形状、下地の形状、材質などにより、描画形成されたパターン形状が大きく変化する。これを、電子線の露光量やビーム位置により補正する近接効果補正法が盛んに研究されているが、膨大な処理時間を要したり、特定のパターンにのみ有効であるなど、まだ不十分で、多岐にわたる実プロセスで使用して行くための課題の一つである。電子線露光におけるスループットは、先に述べたようにいろいろ工夫されているが、微細なパターンを描画する場合には時間を要し、大量生産に使用可能な高スループットを得るまでには到っていない。

構造的には、電子の取り出し部（電子銃）から、集束レンズ、結像レンズが必要となるため、電子銃あるいは部分一括用のマスクとウエハ間距離は長くなり、重ね合せ精度を得にくい構造といえる。電子線露光では、パターン間を重ね合わせるための位置検出は、ウエハ上の合わせマークを電子線で走査し、その反射電子を検出して、描画すべき位置を検出する。マーク検出と描画のビームが同一のため検出精度は高い。しかしながら、材料によっては、試料に電荷が蓄積され（チャージアップ）、これが、ビームの位置ドリフトを起し、重ね合せ精度悪化の原因となる。また、電子線源からウエハ上までの距離が長いと、匡体の振動によるビームの揺らぎが、

ウエハ上の予め形成されたパターンと新たに描画したパターンとの重ね合せ精度を悪化させる。

(c) X線露光

X線露光技術は、光縮小投影技術と同様に、原版であるマスクのパターンを波長1 nm前後の軟X線でウエハ上に一括で転写する技術であり、マスクが必要である。波長1 nm前後のX線では、縮小投影に用いるような実用可能な結像光学系はまだ存在しないため、マスク上のパターンを一對一でウエハ上に転写する等倍露光とならざるを得ない。X線による転写パターンの解像限界は、理論的にはマスク吸収体でのウェーブガイド効果（極微細パターンの溝を通過するX線は溝側面の吸収体に染み込み露光面まで到達しなくなるという効果）により決まり、マスクを基板上に接触させた場合でも、解像限界は10 nm程度といわれている^[14]。実用上の解像限界は、フレネル回折とレジストにおける2次電子の飛程で決まり、50～60 nm程度といわれている。スループットは、一括転写であるため、本質的には高いスループットを得る可能性を有しているが、光露光のスループットには到っていない。

構造的に見ると、近接露光となるため、マスクウエハ間の距離は短く、マスクウエハ間に、レンズ、あるいは、大気変動などの外乱要因が介在しないので、アライメント精度*を最も上げられる可能性がある。

X線露光技術における、アライメント*のための位置検出は、マスクとウエハ上の距離（近接ギャップ）が数十 μ mと狭いため、ウエハの位置もマスクを介したTTM（Through The Mask）検出法となる。これは、マスクとウエハをほぼ同一の位置検出光学系で測定することが可能で、このため、大気の揺らぎ等の影響が少なく正確な位置検出が可能である。

X線露光におけるパターン間の重ね合せ精度を悪化させる要因として、マスクのパターン位置誤差がある。等倍露光であるため、マスク上でのパターン位置精度がそのまま、ウエハ上のパターンの重ね合せ精度に影響する。これまで、マスク上でのパターン位置誤差を小さくすべく多くの努力が払われてきており^[15]、現在では、マスク上のパターン位置誤差として、40 nm以下の精度も得られるようになってきている^[16]。また、位置検出手法によっては、検出光の多重反射などのマスクウエハ間での相互干渉が位置検出精度を悪化させるが、本質的には、最も重ね合せ精度を上げられる露光技術である。

以上、リソグラフィの動向と今後の3種類の露光技術を概観した。この3種類の露光技術に共通の課題をまとめれば、以下のようである。

- (1) 微細パターンが形成可能なこと。1 G b i t DRAMでは、0.18 μ m以下のパターン形成技術が求められる。

- (2) 高い重ね合せ精度が得られること． $0.18\text{ }\mu\text{m}$ 以下のデバイス形成には 60 nm 以下の重ね合せ精度が求められる．
- (3) 高いスループットが実現できること．現在の光露光装置では， $50\sim60$ 枚／時間が実現されているので，最終的にはそれと同程度が求められる．

1. 1. 2 シンクロトロン放射光を利用したリソグラフィ

(a) 等倍露光

露光に用いる波長を，極端に短くしたX線を用いてパターンを転写することが提案され，実証されたのは1972年MITのD. I. SpearとH. I. Smithによる^[17]．彼らの実験は，電子銃をMo, Al, Cu合金ターゲットに打ちつけて取り出す特性X線を用いて，線幅 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ のパターンを転写することに成功し，超微細パターン形成の指針を与えた．以来，X線をリソグラフィに用いるための研究が盛んに行われている^[18~21]．

X線を用いたリソグラフィとして，反射形縮小光学系，フレネルゾーンプレートを利用したパターン転写法の研究^[22~23]も進められているが，重ね合せの問題が未解決なため，LSI製造のための露光技術としては将来の技術となる．現在のところ，波長 1 nm 前後の軟X線を用い，マスクとウエハを数十 μm のギャップ（近接ギャップ）で露光する近接露光法が主である．X線を用いると波長が短いため，光の回折・干渉による解像力低下が小さく， $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 以下の高い解像力が期待できる．これを実用的なリソグラフィ技術として実現すべく，光源，マスク，レジスト，そして，アライメントのための露光装置の研究開発が盛んに行われてきた．

X線リソグラフィの実用上の解像限界は，フレネル回折とレジストにおける2次電子の飛程で決まる．フレネル回折は露光波長と，マスクとウエハ間の距離（近接ギャップ）の関数として表され，波長が短くなればなるほど，また，ギャップが狭くなればなるほど細かいパターンが転写可能である．一方，レジストの2次電子散乱量は，レジストの光電子エネルギーで表すことが可能で，露光波長が短くなればなるほど多くなり，解像力が低くなる．すなわち，露光波長が短い場合にはレジストの2次電子で解像力が低下し，露光波長が長い場合には，フレネル回折の影響により解像力が低下する．かくて，マスクとウエハ間の距離（近接ギャップ）を $10\sim20\text{ }\mu\text{m}$ とすると，波長 $7\text{ }\text{\AA}\sim10\text{ }\text{\AA}$ で，最も高い解像力が得られ，この解像限界は $50\sim60\text{ nm}$ 程度といわれている．

X線リソグラフィで最も大きな技術革新の一つは，露光光としてシンクロトロン放射（Synchrotron Radiation）光（SR光）を用いるようになったことである．これまで検討されてきた電子線励起形特性X線源，あるいは，レーザ励起形プラズマ軟X線源では，ウエハ上のX線強度は， $1\sim4\text{ mW}/\text{cm}^2$ 程度であったものが，

SR光を利用したリソグラフィ（SRリソグラフィ）では、 $5 \sim 20 \text{ mW/cm}^2$ と5倍以上のX線強度が得られるようになった。これにより、露光に要する時間が短くなり、スループット向上が期待できるようになった。また、これまでの光源は、点光源、発散光束であった。このため、中心から離れた位置にあるパターンでは、中心付近のパターンと比較して、光源の発散角度だけずれた位置に露光される。このずれ量をランアウトと呼ぶ。発散光源では、このランアウトが大きく、さらに、マスクとウエハ間の平面度誤差、設定誤差によるギャップ変動が、転写時にパターン位置ずれを引き起こすため、高い重ね合せ精度を得ることは困難であった。これが、SR光を用いると平行光束となるため、ギャップ方向の位置決め精度に余裕（ギャップマージン）が出ることになった。

以上に述べたSRリソグラフィの主な特徴を次にまとめる。

- [1] 波長が1 nm程度と短く、高い解像力が得られる。
- [2] SR光源により、高い強度のX線が得られ、高スループットが得られる。
- [3] 平行性に優れた光源であるため、ギャップマージンが大きく、高い重ね合せ精度が得られる。

(b) SRリソグラフィシステムの構成

SRリソグラフィシステムは、光源である電子蓄積リング、X線を導き、所望の波長を取り出すビームライン、LSIパタンの原画となるX線マスク、マスクパターンをウエハに繰り返し転写する露光装置（SR露光装置）の4部分から構成される。

図1-2にこのシステムの一般的な構成図を示す。

SRリソグラフィ用光源として、最も高い解像力の得られる $7 \sim 10 \text{ \AA}$ 程度の波長において最も高いSR光強度を得るには、臨界波長（その波長より短波長側と長波長側のSR光強度の積分が等しくなる波長）を1 nm前後とすればよく、これを実現するには蓄積エネルギーとして500 MeVから1 GeV程度が必要である。また、光源には、小型化と経済性が要求され、超電導偏向磁石を用いた小型電子蓄積リングの開発が日本を中心に、英国、ドイツ、フランスで盛んに研究されてきた^[24]。小型超電導電子蓄積リングからの放射光の取り出しに、最初に成功したNTTのSuper-ALIS^[24] (Super-Advanced Lithography Imaging System) を始めとして、世界各国で超電導偏向磁石を用いた小型電子蓄積リングの稼働が実現している。

ビームライン^[25]は、リングの超高真空と大気を隔てる圧力隔壁、SR光を集光するX線ミラー、安全・調整用の真空バルブから構成されている。圧力隔壁には、X線透過性が良く、大気と超高真空（ $10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ Torr}$ ）の圧力差に耐える機械的強度が要求され。また、SR光照射時の高熱にも耐える耐熱性が要求され

る。これらを満足する材料として、軽金属であるベリリウム (Be) , ダイヤモンド薄膜 (C) , 炭化珪素膜 (SiC) などが使われている。

X線ミラーには、耐熱性があること、形状の加工性が良いこと、小さな表面粗さ可以实现することなどの性質が求められ、材質として、炭化珪素膜 (SiC) と石英が多く使われている。X線の減衰を避けるため、10 Å以下の表面粗さが必要で、ミラー表面に白金をコーティングするなどの工夫がなされている^[26]。また、波長1 nm前後のX線では、ミラーへの斜入射角度が大きくなると反射率が急激に低下するため、斜入射角3°以下の全反射を使う。斜入射角2°で、反射率は40から50%となる。

ビームラインには、SR光を効率よくSR露光装置に導くことが重要で、このため、集光用のミラーと、平行光束を得るためのミラーの2枚ミラーを用いることが多い。ビームラインには、SR光を効率よくSR露光装置に導くことのほかに、所望の波長を選択する波長フィルタリング機能が必要である。また、場合によっては、露光領域を拡大する露光領域拡大機能が要求される。

取り出されるX線の波長は、ミラーおよび圧力隔壁によって選択される。X線ミラーでは、波長が長いと反射率が高く (分光反射特性) , 圧力隔壁では、波長が短いと透過率が高い性質 (分光透過特性) を持つため、所望の波長を選択することが可能である。すなわち、ミラーにより、短波長側がカットされ、圧力隔壁により長波長側がカットされる。

SR光は、リングから水平に放射され、垂直方向の幅を持たないため、方形の領域 (露光フィールド) を露光するには、露光領域を垂直方向に拡大する必要がある。この方法として、(1) 露光装置のステージによりマスクウエハをSR光に対して移動させることにより拡大する、(2) ビームラインのミラーの走査による、(3) 機械的な走査は行わず拡大ミラー光学系による、などがある。

X線マスク^[27]は、X線を透過するメンブレン部とパターンとなる吸収体部とから構成されている。メンブレン材料としては、X線透過性がよく、機械的強度が高い、放射線劣化がないなどの性質が要求され、現在では、Si, SiC, SiN, Cなどが用いられている。一方、吸収体には、X線吸収性がよい、内部応力が小さい、微細パターンが形成できる、放射線劣化が少ないなどの性質が要求され、吸収体材料としては、タングステン (W) , タンタル (Ta) , レニウム (Re) , 金 (Au) などがある。微細パターン形成の容易さ、低応力薄膜の形成が可能などの点から、現在では、タンタル、タングステン、金を用いたマスクが利用されている。

SR露光装置では、微細パタンの原版であるマスクとウエハを空間的に位置決めし、両者を相対的にアライメントして、何層もの微細パターンを露光形成する。露光装置においては、何層もの微細パターンを正確に重ねて行く、マスクとウエハのアラ

イメント機能が重要である。また、SR光は水平方向に照射されるため、マスクとウエハをほぼ垂直に設定して露光するたて形の露光装置となる。

1. 1. 3 SR露光装置に要求される性能

1 G b i t 用のSR露光装置に要求される性能として、 $0.18\text{ }\mu\text{m}$ 以下の微細パターンが形成可能なこと、重ね合せ精度 60 nm が得られること、が必要である。この要求を満足するためのSR露光装置の要求性能を表1-2に明確にする。リソグラフィでは、複数の微細パターンを転写し、解像できる性能（解像力）と、露光された複数のパターン間の相対位置精度（重ね合せ精度）と、単位時間当たりのウエハの処理枚数（スループット）は重要な評価指標である。

（a）解像力

先に述べたように、SR露光装置の解像限界は、主に、フレネル回折とレジストからの2次電子により決定される。フレネル回折の影響を軽減し、高い解像力を得るには、近接ギャップを可能な限り狭くすることが好ましいが、あまり狭くすると、マスクやウエハの反り、マスクウエハ間の塵などによりマスクを破損したり、ウエハに損傷を与えたりする。また、近接ギャップを狭くするとステップ移動時のウエハマスク間の圧力変動によりマスクメンブレンがギャップ方向に振動し、振動の安定時間が長くなるなどの問題が出てくる。これらを避け、かつ、 $0.18\text{ }\mu\text{m}$ 以下の最小線幅を得るため、マスクとウエハのギャップは $20\sim 30\text{ }\mu\text{m}$ が必要となる。

（b）重ね合せ精度

露光技術における重ね合せ精度は、ウエハ上に何層ものパターンを露光形成して行く際に、その複数のパターン間の相対位置を重ね合わせる正確さのことをいい、非常に重要な性能である。

転写されたパターン間での重ね合せ精度には、主に、(i) マスクのパターン位置誤差、(ii) ウエハ上のパターン位置誤差、そして、(iii) 露光装置でのアライメント誤差が含まれる。したがって、露光装置のみによる重ね合せ精度としては、マスクのパターン位置誤差、ウエハのパターン位置誤差を除いて評価する必要がある。また、露光装置には、マスクとウエハのパターン位置誤差の平均値を補正できる性能（オフセット設定性能）が必要となる。

総合の重ね合せ精度 60 nm を得るための誤差配分をこれら3種類の要因で振り分けるとすると以下のように考えられる。マスクのパターン位置誤差の主な要因には、吸収体パターンに微細パターンを形成するための電子線描画時の位置誤差、メンブレン化のためのシリコンエッチング時の位置誤差、マスクフレームへの接着時の位置誤

差があげられる。このうち大きいのは電子線描画時のパタン位置誤差とメンブレンのためのエッチングによる位置誤差である。現在、マスクのパタン位置精度として、50～60 nmが得られるようになってきており、将来は、30～40 nmも可能であるといわれている。

ウエハのパタン位置誤差は、様々なプロセスを経て来たウエハの反り、あるいは、チャック時のウエハ裏面の塵などによる局部的歪みが考えられる。反りは、平面度を1～2 μm として、これを矯正する場合には、 2×10^{-6} オーダのパタン位置ずれになり、25 mm角の露光領域では30～50 nm程度である。

以上から、重ね合せ精度60 nmを得るには、マスクのパタン位置誤差：30～40 nm、ウエハのパタン位置誤差：30～50 nm、露光装置に求められるマスクウエハ間のアライメント誤差：30～40 nmの配分が考えられる。

(c) スループット

スループットは、1時間あたりに露光可能なウエハ枚数である。これは、スループットの逆数の露光処理に要する時間から決まる。露光処理に要する時間は、実際のパタン転写に要する露光時間（狭義の露光時間）と、露光装置側で要する時間に分けられる。露光装置側で要する時間は、ステップ移動、アライメントなどの1ショットごとに要するステップ&アライメント時間と、マスクウエハを設定するのに要する段取り時間がある。1枚あたりの露光時間は、ウエハサイズ、SR光のX線強度、レジスト感度によって決まる。ステップ&アライメント時間は、1枚あたりのショット数で決まり、露光フィールドが小さくなると、ショット数が増え、露光装置での所要時間が増加する。

ここでは必ずしも量産機を目指すものではなく、重ね合せ精度に重点を置くことから、スループットとして、12枚程度/時間を目指す。この根拠は、6インチウエハで、25 mm×25 mmの露光フィールドサイズとすると、ウエハあたり、20ショットである。100 mJ/sから80 mJ/s程度の高感度のレジストで、1ショット3秒、ステップ&アライメント時間2.5秒以内、1枚あたりのウエハロード、ウエハレベリング時間の合計で、150秒としている。

以上の最小線幅、重ね合せ精度、スループットに関する要求値を表1-3にまとめる。

1. 1. 4 従来のSR露光装置

これまでに、研究開発されてきた主なSR露光装置の比較を表1-4に示す^[28～32]。Aは、唯一、市販されているSR露光装置である。他は、研究用として試作開発されたものである。

露光雰囲気は、X線減衰を押さえるためにヘリウム中とするか大気中とするかがある。デバイス試作用か、量産機を意識した構成とするか否かで露光雰囲気は決まり、量産性を重視したものはヘリウム中である。

SR光は水平に照射され、垂直方向の広がりを持たないため、垂直方向に、何らかの手段で露光領域を拡大する必要がある。この露光領域拡大の方法として、前述したように次の3種類が提案されている。

- (1) 露光装置のステージを走査することにより拡大する。
- (2) ビームラインのミラーを走査することにより拡大する。
- (3) ビームラインのミラーでSR光を拡大し、一括で露光する。

露光装置のステージ走査による方法では、SR光のマスクウエハへの照射角度が走査によらず常に一定であるため走査方向のランアウトは抑えられる。しかし、露光装置には、マスクウエハ間の高精度なアライメント以外に、露光のためのステージ走査機能が必要となる。

ミラーの走査による方法では、ミラー走査により反射角度が変化し、マスクウエハへの照射角度が変化する。このため、ランアウトが露光フィールドの上部と下部で変化する。そこで、2枚のミラーにより、露光フィールドに照射されるSR光の角度を変化させず、ほぼ平行になるように設計する必要がある。また、ミラーを超高真空中で走査するための機構がビームラインに必要となる。この方法により、ランアウト、露光強度の不均一性を実用上問題ない程度に押さえることが可能である。

ミラーによる一括拡大方式は、SR光を凸形のミラーにより上下方向に拡大する方法である。この場合も斜入射となるため、SR光のミラーへの斜入射角が上下方向で異なるため、反射光強度が上下方向で大きく変化する。Cは、このため露光強度の不均一性を調節する手段として上下方向で露光時間を変化させるシャッタを用いている。この方法では、均一性は得られるもののSR光の平行性を得るのが難しく、ランアウトが大きくなる。

アライメント保持方式は、露光の際のマスクとウエハの相対位置・姿勢の保持方式であり、重ね合せ精度に大きく影響する。マスクウエハのステージを真空吸着により機械的に一体化して走査露光するマスクウエハ一体型のものとマスクウエハをサーボにより制御的に保持する露光中サーボのものがある。マスクウエハ一体型のものでは、マスクとウエハをアライメントした後、真空チャックでマスクステージとウエハステージを吸着固定し、一体化したステージをSR光に対して走査して露光する。一方、露光中サーボのものは、マスクとウエハの相対位置信号をフィードバックし、常時アライメントサーボしながら露光する。露光中サーボ方式では、ステップ移動などにより生じるマスクメンブレンの振動に対してもマスクウエハの相対位置を動的に保持できるため、高い重ね合せ精度を実現できる可能性がある。

SR露光では、たて形露光装置であるため、重心が高く、ステップ移動時には露光装置の搭載されている定盤の振動が生じ、これが、マスクウエハの位置決め外乱となり、マスクウエハの相対位置変動を生じたり、また、ステップ移動によるマスクウエハ間の空気の圧力変化によりメンブレンの振動が生じたり^[33]、SR照射時に熱によるマスク歪みが生じるなどのSR露光独特の問題がある。これらに対して、常時アライメントサーボすることにより、制御的にマスク・ウエハ方式の相対位置を動的に保持することにより高い重ね合せ精度が期待できる。

位置検出方式は、アライメントのためのマスクウエハの位置検出方法である。これには、CCDカメラを用いた画像処理によるもの、光ヘテロダイン干渉による位相検出によるもの、マスク上に構成した回折光レンズを用いた強度検出によるもの、色収差を利用した2重焦点レンズを用いた強度検出のものがある。

画像処理によるものは、処理時間を要するため、露光中サーボに用いるには困難である。強度を検出して、マスクとウエハの位置を検出する方法は、ウエハの下地がアルミなどの高反射率のものと酸化膜などの低反射率のものでは信号強度が大きく異なり、検出精度を上げにくいという問題がある。光ヘテロダイン干渉による位相検出のものが、処理速度、分解能、ウエハ表面状態の影響を抑えられることから、露光中サーボを実現する上で、最も適していると考えられる。

機構・構造的に見てみると、マスク側はいずれも微動機構を搭載している。一方、ウエハ側には、粗動機構のみで構成したものと、粗動機構の上に微動機構を設けて構成したものとがある。前者では、露光のための高精度アライメントをマスク側の位置決め機構により実現している。後者では、アライメントをウエハ側で行うものとマスク側で行うものとがある。また、粗動機構と微動機構を組み合わせるため、可動部のベースとなる案内面とウエハまでの距離が大きくなり、片持ち構造となるため、精密な位置決めには向かない。Aは、マスクとウエハを一体化する必要性から、マスク側とウエハ側の案内間の距離が他と比べて短い。

アライメント動作を行う駆動方法としては、弾性板ばねによる案内とピエゾアクチュエータを用いた応答性を重視した駆動方法と、斜面とすべりねじを用いた安定性を重視したものが提案されている。露光中サーボでマスクとウエハをアライメントするには応答性を重視したものが適している。

SR光は水平方向に照射されるため、露光装置はたて形となる。このため、高いアライメント精度を得るには、可動機構に働く重力に対して重力補償を行う必要がある。この方法には、次の4種が提案されている。

- (1) エアーシリンダによるもの。
- (2) モータにバイアス電流を加えるもの。
- (3) 定張力ばねによるもの。

(4) カウンタバランスによるもの.

エアシリンダを用いたものは、空気圧により重力に見あう力を加えるもので、応答性に欠ける。モータにバイアス電流を加えるものは、発熱の原因となること、モータが大型となり可動質量が増えることなどの問題がある。定張力ばねは、ドラムに巻いたコイルばねの弾性力により、一定の張力を得るものである。ステージ重量を軽量化することにより、小型・軽量の定張力ばねを用いることが可能である。コイルばねの巻き径変化により張力が変化するため、重力補償精度は上がらないものの、最も応答性に優れている。カウンタバランスによるものは、可動機構に加わる重力を正確に相殺することが可能であるが、質量が倍になるため、高速な移動には不向きである。

これまでのSR露光装置の不十分な点を上げれば、次のとおりである。

位置検出方式から見ると、Aは、アライメント位置検出処理時間が遅い。CおよびEは、光強度を用いた位置検出法であるためウエハ下地の影響を受けやすい。機構・構造的に見ると、B、C、および、Dは、案内面とウエハの距離が離れており精密位置決めには向かない。Dはアライメントの駆動にすべりねじと斜面を用いる構造のため、常時サーボするには向いていないと考えられる。

ここで、これまで発表されている各露光装置による重ね合せ精度を表1-1の2項目に示す。表中、同一パターンでの重ね合せ精度は、第1層目と第2層目とで、同一のマスクにより露光したパターン間の相対位置を測定して得られる重ね合せ精度で、露光装置のみの機械的なアライメント精度を評価したものであるのに対し、デバイスウエハによる重ね合せ精度は、実際のプロセスウエハ、あるいは、それを想定したウエハによる総合の重ね合せ精度である。前者では、目標値30～40nmを満足しているものもあるが、後者の実際のデバイスウエハでの重ね合せ精度では、目標である60nmを、いずれも満足できていない。

以上、これまでに開発されてきたSR露光装置を概観したが、これまでのSR露光装置では、1Gbit級の半導体開発に要求される高い重ね合せ精度を実現するには不十分で、その問題点は、ウエハの位置決め機構とマスクとウエハのアライメント位置検出方法の両者が、高い重ね合せ精度を得るのに満足する設計となっていないことにある。すなわち、これまでのSR露光装置は、マスク側とウエハ側のベース間距離を短くして、剛性を上げた機構構造であるにもかかわらず、位置検出方法は処理時間を要するものであったり、逆に、位置検出系で光ヘテロダイン干渉などの十分高速な方法を採用しているにもかかわらず、機構構造的には、検出された位置に十分追従できる応答性がなく、バックラッシュやスティックスリップなどの非線形性を持つ機構を使用しているという機構的な問題点に起因しているといえる。

1. 2 研究の目的

以上述べたように、今後の半導体製造のためのリソグラフィにおいては、 $0.18\mu\text{m}$ 以下の最小線幅が必要で、重ね合せ精度としても 60nm 以上とこれまでにない高い重ね合せ精度が要求されている。

最小線幅、スループットそして重ね合せ精度の観点から考えると、SR光を用いたX線露光技術が有望であると考えられ、実用技術とするためには高い重ね合せ精度を得る必要がある。しかし、これまでのSR露光装置を見てみると、マスクウエハ間のアライメントには制御応答性に優れた位置決め機構が必要であるにもかかわらず、アライメント位置検出方式に応答性のない検出方法を用いたり、逆に、応答性の得られない位置決め機構で構成しているなど、いずれも不十分なSR露光装置であった。

そこで、本研究では、SR露光装置におけるウエハの位置決め、ウエハとマスクのアライメントなどの機構的な問題点の検討と解決を通じて、マスクとウエハのアライメント精度、ウエハ上のパタンの重ね合せ精度の向上を実現することを目的とする。

この目的を達成するために、以下に示す研究開発を行う。

- (1) 露光中サーボを実現するために、空気静圧送りねじと空気静圧案内を基本要素としたウエハ位置決め機構と光ヘテロダイン干渉による相対的な位置検出法を特徴としたSR露光装置を開発し、その性能を評価し、重ね合せ精度を向上するための問題点を明確にする。
- (2) 空気静圧送りねじを用いた機構の位置決め制御法を明確にする。
- (3) アライメント位置検出系における精度悪化の原因を検討し、その原因を解消するためのアライメントマーク構成について検討する。
- (4) 上述の(2)の制御法とアライメント位置検出系の検討結果を導入して、改良型SR露光装置を開発し、その性能を評価する。

1. 3 本論文の構成

本論文の構成は、第1章「序論」を含め、6章より構成されている。

第1章「序論」では、超LSI用リソグラフィツールであるSR露光装置には高精度の重ね合せが求められていることを述べ、従来のSR露光装置を概観し、高い重ね合せ精度を得るための装置構成上の問題点を明らかにし、本研究の目的が、SR露光装置におけるウエハの位置決め、ウエハとマスクのアライメントなどの機構的な問題点の検討と解決を通じて、マスクとウエハのアライメント精度、ウエハ上のパタンの重ね合せ精度の向上を実現することであるとしている。

第2章「試作したSR露光装置」ではまず、第一次試作機として開発したSR露

光装置について述べている。空気静圧送りねじと空気静圧案内とを基本とし、非線形性を排除したウエハステージ位置決め機構、光ヘテロダイン干渉による高分解能な相対位置検出法と圧電アクチュエータを組み合わせたウエハとマスクのアライメント機構、を特長とするものである。次いでその性能を評価し、問題点として、装置寸法がSR露光装置としては大型過ぎること、空気静圧送りねじを用いたウエハ用たて形XYステージの位置決めの動的減衰が不十分であったこと、光ヘテロダイン干渉位置検出の検出精度が不十分であったこと、および、マスクとウエハの重ね合せ精度が不十分であったこと、などを課題として指摘している。

第3章「空気静圧送りねじによる位置決め」では、空気静圧送りねじを用いた位置決め機構について検討している。まず、第2章で問題となったウエハ用たて形XYステージの位置決めにおける動的減衰不足を解消するため、レーザ干渉計をフィードバックセンサとする位置決め制御系においてPIDコントローラを採用することにより減衰性が向上できること、また位置決め分解能が20nm以上であること、さらにフィードフォワードを併用することにより外乱抑制と目標値応答性を向上できること、を示している。ついで、将来に備えたさらなる高分解能な位置決めのため、高分解能ロータリエンコーダをフィードバックセンサとする制御法について検討し、位置決め分解能が1nmまで向上できることを示している。

第4章「改良型SR露光装置の試作」ではまず、第一次試作機においてアライメント位置検出系の精度が不十分であった原因を検討し、誤差要因として、マスクとウエハ間での光の多重反射と、マスク位置検出光とウエハ位置検出光のクロストークがあることを明らかにし、これらを解消するためのマスクとウエハ上のアライメントマークの配置について述べている。ついで、第3章の成果を導入した位置決め機構と、新たに設計したウエハ用たて形XYステージとマスクステージを含めた改良型のSR露光装置について説明している。なお、この改良型の装置では、第一次試作機での大型化の問題を解消すべく、ウエハの背面供給方式を採用している。

第5章「改良型SR露光装置の評価」では、第4章で試作した改良型SR露光装置を、ステージ単体の位置決め特性、マスクウエハ間のアライメント特性、および、重ね合せ精度の観点から評価した結果について述べている。ステージ単体の動作では、1GbitDRAMを製造するための設計仕様を満足し、同一パターンでの重ね合せ精度は23nmと大幅に改良できたことを述べ、また、デバイスウエハでの総合的な重ね合せ精度として60nm(3 σ)以下が得られたことを述べている。

第6章「結論」では、各章で得られた結果を総括するとともに、今後の課題を述べている。

以下に、アライメント、重ね合せに関する本論文での用語を整理する。

アライメント (Alignment) : マスクとウエハを露光装置上で相対的に調節すること。

アライメント誤差 (Alignment error) : アライメント (Alignment) により生じるマスクとウエハの相対位置誤差。この誤差には、マスクとウエハの位置検出誤差、マスクおよびウエハの位置決め誤差が含まれる。

アライメント精度 (Alignment accuracy) : アライメント誤差を測定評価した結果得られる精度。

重ね合せ (Overlay) : 複数回の露光により、複数層のパタンの相対位置を調節すること。

重ね合せ誤差 (Overlay error) : 複数回の露光により形成される複数パタンの相対位置誤差。マスク上のパタン位置誤差 (Pattern placement error) , ランアウトや半影ぼけなどの転写誤差, ウエハ上のパタン位置誤差, アライメント誤差, レジストプロセス誤差, そして, 測定誤差が含まれる。

重ね合せ精度 (Overlay accuracy) : 重ね合せ誤差を評価して得られた複数パタンの相対位置精度。

露光装置の性能評価のために同一パターンを用いて複数回露光 (Double exposure) したパターン間の相対位置を測定して重ね合せ精度を評価する場合がある。それは、マスク、ウエハ上のパタン位置誤差を除去した露光装置のアライメント精度

(Alignment accuracy) を評価していることになるが、露光による評価であるので、重ね合せ精度 (Overlay accuracy) に含める。

実際のプロセスウエハにおける重ね合せ精度は、総合的な精度であるが故に総合重ね合せ精度 (Total overlay accuracy) とも呼ぶ。リソグラフィで要求されるのはこの総合重ね合せ精度である。

重ね合せ再現性 (Overlay repeatability) : 重ね合せ精度のばらつきのみを表す。重ね合せ精度には、平均のずれ ($\bar{X}$) とばらつき (3σ) が含まれる。平均のずれには、マスクのパタン位置誤差や、ウエハの伸縮などによるウエハパタン位置誤差、転写時のランアウトなどが含まれ、補正可能な場合が多い。例えば、ランアウトなどは、マスクパタン描画時に予め補正して描画することが可能である。また、異なる露光装置間では、環境温度の差などにより、こうした平均値のずれが生じる。重ね合せ精度を評価する場合、実際、これら全てを押さえ込むことは大変な労力が必要である。そこで、平均値は補正可能だと考えて、重ね合せのばらつき (重ね合せ再現性) を一つの評価指標とする。

第1章 参考文献

- [1] 垂井康夫編：超LSI技術：オーム社(1989)
- [2] 国吉敏彦：生産量からみたLSIの世界，電子通信学会誌，Vol. 68, No. 6, pp. 655-659, (6/1985)
- [3] 篠崎 慧：メモリ集積度の今後の動向，電子情報通信学会誌，Vol. 75, No. 7, pp. 778-780, (1992)
- [4] 鳥海正樹：半導体製造装置における位置決め技術，精密工学会誌，Vol. 57, No. 10, pp. 1726-1730, (1991)
- [5] M. Horiguchi, et al: An Experimental 220MHz 1Gb DRAM, ISSCC95, SESSION 14, FA 14.5, pp. 252-253, (1995)
- [6] T. Sugibayashi, et al: A 1Gb DRAM for File Applications, ISSCC95, SESSION 14, FA 14.6, pp. 254-255, (1995)
- [7] M. Ono, M. Saito, T. Yoshitomi, C. Fiegna, T. Ohguro and H. Iwai: Proc. of IEEE International Electron Devices Meeting, p. 119, (1993).
- [8] H. Fukuda, T. Terasawa and S. Okazaki: J. Vac. Sci. Technol. B 9, pp. 3113 (1991)
- [9] S. Murakami, T. Matuura, M. Ogawa, and M. Uehara: Laser step alignment for a wafer stepper, SPIE, Vol. 58 Optical Microlithography IV, pp. 9-16, (1985)
- [10] A. Suzuki: Double Telecentric Wafer Stepper Using Laser Scanning Method, SPIE Vol. 538 Optical Microlithography IV pp. 2-8, (1985)
- [11] 東木達彦，東条徹，田畑光雄，西坂武士，芳野寿和，斉藤晋：エキシマレーザ露光用TTLアライメント法，精密工学会誌，Vol. 59, No. 8, (1993)
- [12] M. Kawano, K. Mizuno, H. Yoda, and Y. Sakitani, K. Andou, N. Saitou: Continuous writing method for high speed electron-beam direct writing, J. Vac. Sci. Technol. B 11 (6), pp. 2323-2326 (1993)
- [13] K. Sakamoto, S. Fueki, S. Yamazaki, T. Abe, K. Kobayasi, H. Nishino, T. Saito, A. Takemoto. A. Ookura, M. Oono, S. Sago, Y. Yamada, and, H. Yasuda: Electron-beam block exposure system for a 256 M dynamic random access memory, J. Vac. Sci. Technol. B 11(6), pp. 2357 (1993)[8] H. Fukuda, T. Terasawa and S. Okazaki: J. Vac. Sci. Technol. B 9, pp. 3113 (1991)
- [14] M. Takakuwa, K. Furuya: The analysis of waveguiding effects on the minimum transferable linewidth of an ultrafine X-ray mask, IEICE Trans. Electron., Vol. E76-C, No. 4. pp. 594-599 (April 1993)
- [15] S. Ohki, M. Oda, M. Kakuchi, H. Yoshihara: High-Accuracy X-ray Masks with Sub-Harf-Micron 1M-DRAM Chips, Microelectronics Engineering, Vol. 13, No. 1-4, pp.

251-254, (1991)

- [16] 矢部秀毅, 綾淳, 吉瀬幸司, 佐々木圭, 丸本健二, 宮地剛司: 1995年秋季
第56回応用物理学会学術講演会講演予稿集, No.2, p576, (1995)
- [17] D. L. Spear, H. I. Smith: Solid State Technol., Vol.15, 21 (1972)
- [18] J. Warlaumont: X-ray lithography: On the path to manufacturing. J. Vac. Scie. Technol.
B7(6) Nov/Dec, pp. 1634-1641, (1989)
- [19] 鳳 紘一郎: シンクロトロン放射光リソグラフィ, 応用物理, Vol.53, No. 1, pp.
17-20, (1984)
- [20] H. Aritome, T. Nishimura, H. Kotani, S. Matui, O. Nakagawa, and S. Namba: X-ray
lithography by synchrotron radiation of INS-ES, J. Vac. Scie. Technol. 15(3), May/June,
pp. 992-994, (1987)
- [21] T. Kitayama, T. Hayasaka, H. Yoshihara, and S. Ishihara: Synchrotron X-ray
Lithography System Using A Compact Source, SPIE Vol. 1089, pp. 159-, (1989)
- [22] T. Haga, H. Kinoshita: Illumination system for extreme ultraviolet lithography, J. Vac.
Scie. Technol. B13(6), Nov/Dec, pp. 2914-2918, (1995)
- [23] N. Koyama, H. Tsuyuzaki, K. Kuroda, A. Shibayama: X-ray projection lithography
using a Fresnel zone plate. Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34, pp. 6748-6753, Part 1, No. 12B,
December 1995
- [24] T. Hosokawa, T. Kitayama, T. Hayasaka, S. Ido, Y. Uno, A. Shibayama, J. Nakata, K.
Nishimura, M. Nakajima; Rev. Sci. Instruments, 60(7), 1783, (1989)
- [25] T. Kaneko, Y. Saitoh, S. Itabashi and H. Yoshihara: High Efficiency Beamline for
Synchrotron Radiation Lithography, J. Vac. Sci. Technol., B9, No. 6, p.3214, (1991)
- [26] S. Itabashi, I. Okada, T. Kaneko, S. Matsuo and H. Yoshihara: Highly reflective x-ray
mirror, J. Vac. Sci. Technol., A 10, No. 5, pp. 33312-3317, (1992)
- [27] S. Ohki, T. Matsuda and H. Yoshihara: X-ray Mask Pattern Accuracy Improvement by
Superimposing Multiple Exposure Using Different Field Size. Jpn. J. Appl. Phys., 32.
No. 12B, p. 5933, (1993)
- [28] 内田憲男, 高橋良彦, 山田昇, 広川利夫: 自動補償機構を備えた縦形の超精密
XYステージ, 一摩擦の影響を考慮した位置決め, 精密工学会誌, 54, 5884,
(1988A)
- [29] J.P. Silverman, V. DMilia, D. Katcoff, K. Jwietniak, D. Seeger, L.K. Wang, J. M.
Warlaumont, and A. D. Wilson, D. Crockatt, R. Devenuto, B. Hill, L. C. Hsia, and R.
Rippstein: J. Vac. Scie. Technol. B6(6). Nov/Dec, pp. 2147-2152, (1988)
- [30] E. Cullmann, K. Cooper: Experimental results with a scanning stepper for synchrotron-

- based x-ray lithography, J. Vac. Scie. Technol. B 6(6). Nov/Dec, pp. 2132-2134, (1988)
- [31] K.Koga, N. Nomura, J. Yasui, and Y. Terui, H. Nagano, K. Fujita, S. Kusumoto, K. Nakano, S. Nakatani, S. Mizuguchi, S. Aoki, M. Yamamot, K. Yamaguchi, T. Sato, K. Matsuo, K. Yanagida: High-performance synchrotron orbital radiation x-ray stepper, J. Vac. Scie. Technol. B 8(6). Nov/Dec, pp. 1633-1637, (1990)
- [32] F. Satoh, K. Ito, T. Miyatake, K. Yamazaki, S. Hamada, and Y. Tomita: Synchrotron radiation stepper with new alignment system, J. Vac. Sci. Technol., B 10(6), pp. 3235 - 3238, (1992)
- [33] S. Mitsui, A. Tanaka, R. Takaki, T. Itoh, N. Atoda: Study on deflection of x-ray mask membrane in stepper motion. Microelectronics Engineering, Vol. 31, (to be published), (1996)

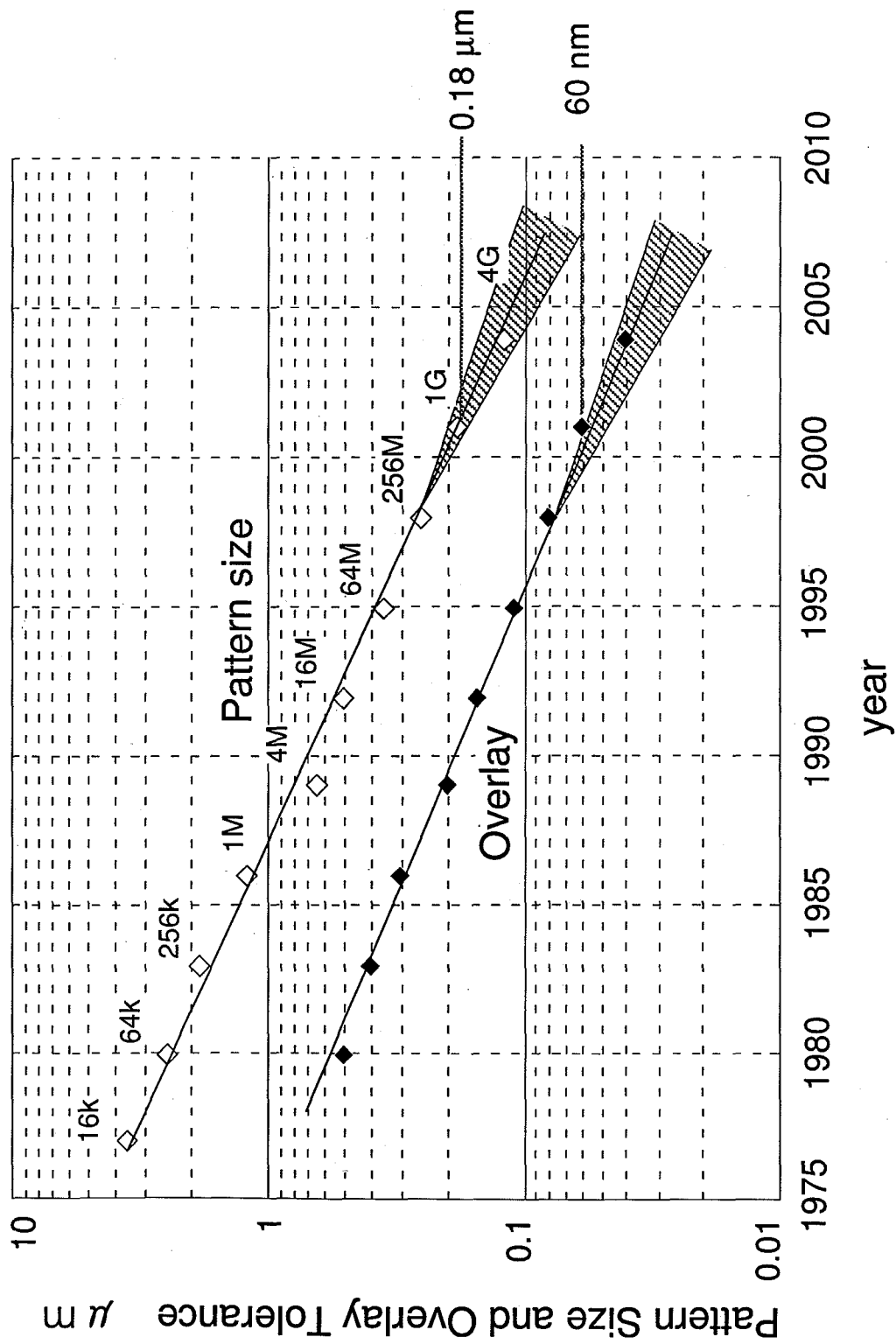
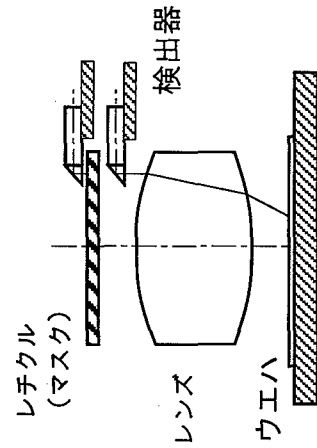
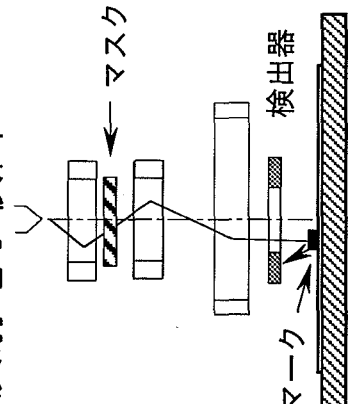
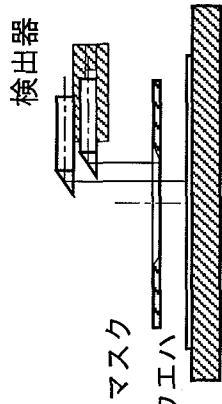


Fig. 1-1 Minimum Pattern Size and Overlay Tolerance

表 1-1 各露光技術の比較

	光縮小投影露光	電子線露光	S R 露光
特徴	マスク一括縮小露光 マスクが必要	部分一括露光 パターン創成機能あり	マスク一括等倍転写 マスクが必要
転写パタンの解像限界	0.18 μm 光の波長	10 nm 反射電子	50 - 60 nm フレネル回折
スループット	高	低	高
マスクウエハ間距離	大	大	小 (近接)
アライメント要素の構造	TTL 	反射電子検出 	TTM 
重ね合せ精度悪化要因	レンズディストーション 筐体振動によるアライメント検出誤差	チャージアップによるビームドリフト 筐体振動によるビーム揺らぎ	マスク上のパタン位置誤差 マスクウエハ間の検出光の相互干渉

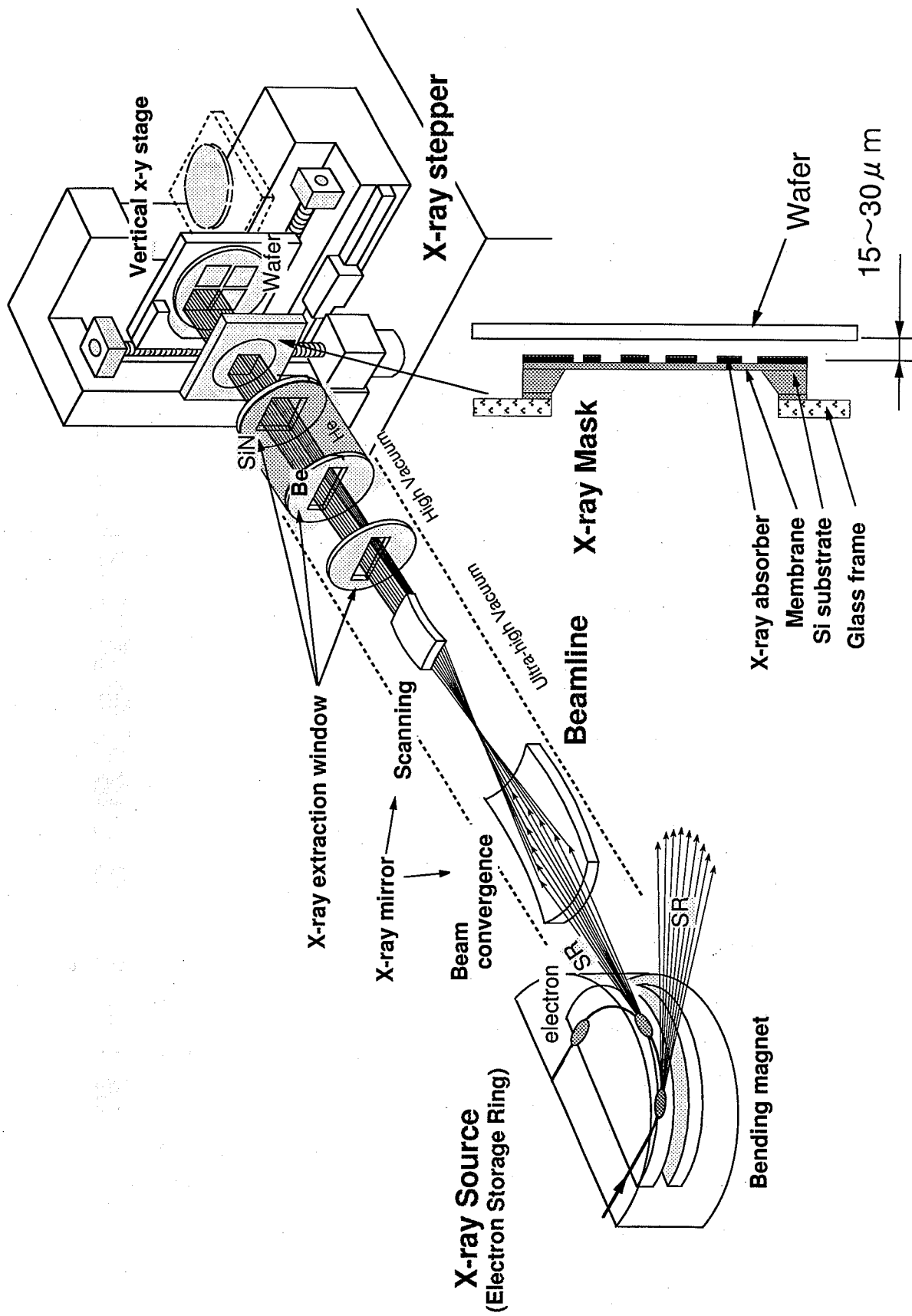


Fig. 1-2 SR X-ray Lithography System

表1-2 SR露光装置における要求条件

最小線幅	0.18 μm 以下
露光波長 露光ギャップ	7~10 $\text{\AA}$ 20~30 μm
重ね合せ精度	60 nm以下
アライメント精度	30~40 nm以下
スループット	12枚/時間以上
ステップ&アライメント時間 露光フィールドサイズ	2.5秒以下 25mm×25mm以下

表1-3 従来の露光装置の比較

露光装置	A	B	C	D	E
露光雰囲気	大気	1 気圧He	減圧He	大気	大気
露光領域 拡大方式	ステージ スキャン	ミラー スキャン	ミラー拡大 一括	ミラー スキャン	ミラー スキャン
アライメント 保持方式	位置検出後 一体化	露光中サーボ	露光中サーボ	露光中サーボ	露光中サーボ
位置検出方法	画像処理	光ヘテロダイン	回折格子レンズ	光ヘテロダイン	色収差 2 重焦点
機構構造 (ウエハ側)	粗動機構のみ	粗動 + 微動機構	粗動 + 微動機構	粗動 + 微動機構	粗動 + 微動機構
アライメント 駆動方法	板ばね / ピエゾ	板ばね / ピエゾ	板ばね / ピエゾ	斜面 / すべりねじ	板ばね / ピエゾ
重力補償	エアージリンダ	モータ	定張力ばね	カウンタバランス	定張力ばね
同一パターンでの 重ね合せ精度 (3 σ)	70~80 nm	26~60 nm	38~47 nm	16~21 nm	40~50 nm
デバイスウエハでの 重ね合せ精度 (3 σ)	100~120 nm	80~150 nm	70~80 nm	25~245 nm	70~160 nm
デバイス適用	あり	なし	あり	なし	あり

は本論文での選択

第2章 試作したSR露光装置

2. 1 緒言

前章では、1Gb i t級のリソグラフィに使用されるSR露光装置においては、要求される重ね合せ精度が60nmとこれまでになく高精度であることを述べた。

このような高精度の重ね合せを実現するために、マスクウエハのベースからの距離を抑えた機構と、マスクウエハのアライメント方法として、露光中もマスクとウエハの相対位置をフィードバックし制御する露光中サーボ方式が有効と考えられる。これを実現する手段として、制御応答性に優れ、バックラッシュやスティックスリップなどの非線形性を排除した位置決め機構と高速高精度なマスクウエハの相対位置検出法を基本としたSR露光装置を試作開発した。

ここでは、空気静圧送りねじと空気静圧案内を用いたたて形XYステージ^[1]と、回折格子を用いた光ヘテロダイン干渉によるマスクウエハの相対位置検出法^[2]を基本構成要素としたSR露光装置を試作した。本章では、その全体構成、各要素の特性、および、本装置を用いた露光によって得られた重ね合せ精度について述べ、本装置での問題点を明らかにする。

2. 2 試作SR露光装置の構成

SR露光装置に必要とされる基本機能は、露光すべき位置にウエハをステップ移動するステップ移動機能、およびマスクウエハ間の近接ギャップおよび姿勢を設定するマスクとウエハの位置決め機能、マスクとウエハの相対位置を検出し調節するアライメント機能である。ウエハ上には、一回の転写で形成される複数の露光フィールドが配置され、その露光フィールドごとにウエハをステップ移動、マスクウエハのアライメントを繰り返す。

装置構成上の基本要素として、マスクとウエハの高精度の位置決め機構、マスクウエハ相対位置の高精度検出機構が必要で、これらを具備するSR露光装置を設計、試作した^[2]。

装置の構成を図2-1に示す。写真を図2-2に示す。

座標系は、SR光進行方向をZ軸の正とする図に示す座標系で、水平方向をX、垂直方向をYとし、回転はZ軸回りを θ 、X、Y軸回りを、それぞれ α 、 β とする。

大別して、ウエハの位置決めを行うウエハユニット、マスクの位置決めやマスクウエハの相対位置検出を行うマスクユニット、および、ウエハをウエハユニットに

供給するウエハローダから構成される。

ウエハユニットはウエハをXY方向に移動するたて形XYステージとその上に搭載されたウエハ微動機構（ウエハステージ）（写真2-2）から成る。たて形XYステージはウエハのステップ移動，ウエハのXY面内の位置決めを行う。また，マスクとウエハの近接ギャップおよびマスク姿勢の設定にも用いる。すなわち，XYステージの走り面を基準にマスクのZ方向高さを測定し，マスク高さを設定する。これにより，ウエハとマスクのギャップおよびマスクの姿勢を設定する。このため，ステージ上に静電容量型変位計を搭載している。ウエハ微動機構は，ウエハを真空中で保持するウエハチャックとウエハチャックを空気圧でZ方向に上下する上下機構からなる。このウエハチャック面は予めXYステージの走りに平行に設定しておく。ウエハユニットは，ウエハの自動供給時およびマスク装着時には，マスクユニット前面からX方向に移動する。このため，ウエハユニットは，移動ストローク380mmのX軸移動テーブル上に搭載されている。

マスクユニットは，マスク微動機構（マスクステージ）とアライメント検出光学系から構成されている。マスク微動機構は，マスクとウエハの近接ギャップ設定とマスクウエハの回転のアライメントを行い，マスクのZ α β 軸駆動機構（あおり機構）と θ 軸駆動機構（回転機構）から構成されている。マスクとウエハの相対位置を高精度に検出するアライメント検出光学系は，露光領域の周辺に配置された4組のアライメント用回折格子マークに対応する後述の光ヘテロダイン干渉式光学系4チャンネルで構成している。SR光の減衰を小さくするため，アライメント検出光学系はヘリウム雰囲気中にSR光を遮らないように配置し，露光中アライメントサーボを可能にしている。

ウエハローダは，ウエハを収納ケースから取り出し，ウエハユニットに搭載する前に予め粗く位置決めするオリエンテーション機構，たて形ウエハチャックにウエハを供給するための縦横変換機構などから構成されている。ウエハの供給は，前述のX軸移動テーブルにより，ウエハユニット全体がウエハローダ前面に移動し，ウエハユニット前面より自動供給するウエハ前面供給方式である。このため，ウエハのX方向移動に0.8mの長ストローク移動が必要となり，横幅が2mと大型の露光装置となっている。これは，光源であるSRリングの周りに何台もの露光装置を設置して使用するSRリソグラフィでは大きな問題となる。これが，第1の課題である。

装置の動作シーケンス，各軸駆動手段と検出器，およびそれらの仕様を表2-1に示す。表中で最左列は動作シーケンスを表し，その右に各シーケンスで使用する駆動手段と検出器を示している。各数字は，各軸駆動手段での移動分解能と可動範

囲を、検出器での検出分解能と検出範囲を表している。

露光シーケンスは、マスク装着後のたて形XYステージによるマスクレベリング、ウエハ供給後、ウエハの θ 回転方向の粗い位置決めを行い、ウエハステップ移動、アライメント、そして、露光の順で行われる。マスクレベリングはウエハとマスクのギャップとマスクの姿勢を設定するためのもので、マスクステージのあおり機構とたて形XYステージを用いている。ウエハ供給後、3チャンネルのレーザ走査型回折光強度検出系により、ウエハの粗い位置を検出し、ウエハ θ 回転の粗い位置決めを行う。アライメントでは、 θ 方向をマスクステージ回転機構でXY方向をたて形XYステージで、光ヘテロダイン干渉位置検出計の出力をフィードバックしながら常時アライメントサーボを行いマスクとウエハの高精度なアライメントを行う。

本装置では、ウエハ側にZ $\alpha\beta$ 軸のあおり機構を持たず、また、マスクステージにXY軸の移動機構を持たない。ウエハ側にXYおよび θ の3つの駆動軸、マスク側にZ $\alpha\beta$ および θ の4つの駆動軸のマスクウエハのアライメントに必要最小限の駆動軸で構成した装置である。

ウエハとXYステージZ方向案内面との距離は110mm、マスクとマスクステージベースとの距離は40mmと狭い設計として、重力方向のモーメントが小さくなる構造としている。このようにマスク側とウエハ側のベース間距離を狭く構成できるのは、これまでの露光装置と違い、粗動機構と微動機構の2段構造を用いることなく長ストロークの位置決めから微動までの位置決めを空気静圧送りねじを用いたXYステージのみで実現しているためである。

2. 3 駆動・位置決め機構

2. 3. 1 たて形XYステージ

(a) 構造

たて形XYステージは、直進／回転の案内、支持部、駆動部の全ての部分にセラミック多孔質絞りをを用いた空気軸受を採用し、運動精度を高めるとともに、主要部品にアルミナセラミックスを用いて軽量化を図っている。図2-1に示すように、逆T字形をしたXYステージを構成している。垂直方向に移動するウエハ微動機構を搭載したY軸エアースライダ（約10kg）は、水平方向に移動するX軸エアースライダ中央に垂直に固定された、セラミック製たて軸により案内される。YスライダはZ方向に磁石の吸引と空気静圧の浮上力をバランスさせて、純鉄性たて形定盤で一面案内される。ステージの送りにはセラミック空気静圧送りねじを用い、200mmの長ストロークから数10nmオーダの微動までのステージ駆動・位置

決めを非接触で行っている。また、重力補償には、応答性を重視して、定張力ばねを用いている。

制御には、アナログ回路で構成したP Iコントローラを用いている。図2-3に制御ブロック図を示す。目標位置に接近した時点で、速度フィードバックモードから位置フィードバックモードに切り換える。さらに、露光のための最終的なアライメントは、光ヘテロダイン干渉位置検出による位置フィードバックモードに切り換えている。速度は、タコメータジェネレータにより測定し、ステージ位置はレーザ干渉計により測定した。分解能は $\lambda/128$ である。ここに λ はHeNeレーザの波長で約632.8nmである。また、アライメントのためのマスクとウエハの相対位置は、光ヘテロダイン干渉式位置検出によって測定している。

(b) 性能

静電容量型変位計を用いて測定した50nmの微小ステップ送りの特性と、静電容量型変位計で測定したXYステージの位置決め繰り返し精度を図2-4に示す。XY方向とも、50nmステップの位置決めが確実に行われている。ステップ間では、 ± 7 から8nm程度の位置変動が観察された。また、Y軸ではステップ幅が50nmから15nm程度変動している。この変動は、主に、位置決めフィードバックのセンサであるレーザ干渉計出力の大気揺らぎによる変動に起因していると考えられる。重力補償のアンバランスおよびステージ傾斜が原因と思われるステップ移動ごとの、常に一定方向に出るスパイク状不規則挙動が観察される。最終的なマスクウエハのアライメントは後述の光ヘテロダイン干渉式位置検出計の信号を用いるので、位置決め途中の不規則挙動よりも、位置決め完了時の位置決め繰り返し精度が重要となる。静電容量型変位計で測定したXYステージの位置決め繰り返し精度は 3σ で約15nmである。ほぼ、レーザ干渉計出力の揺らぎと同程度の位置決め繰り返し精度が得られ、XYステージの位置決め繰り返し精度は良好であった。

図2-5に、20mm位置決めと1mm位置決め時の速度波形と、位置偏差を示す。これから、20mm移動に要する時間は、0.5~0.6秒、また、整定時間に0.1秒を要し、20mm位置決めのための全所要時間として0.6~0.7秒を要している。位置整定時に残留振動が残り、P Iコントローラによる制御では、動的減衰が不足していることが明らかである。このため、比例ゲインも上げられず所要時間も長くなっている。これは、空気静圧送りねじを用いた位置決めにおける本質的な問題であり、解決する必要がある。これが、第2の課題である。

2. 3. 2 マスクステージ

マスク微動機構（マスクステージ）を図2-6に示す。X線マスクの平面度を損なうことのないよう、マスクステージ上3点に配置した永久磁石でマスクを吸着する。マスクステージは、3組のZ方向駆動軸とXY面内微小回転軸を有し、搭載されたマスクにZ方向並進とあおりを与える。駆動は、いずれも歪みゲージによるヒステリシス補正付き圧電素子とレバー式変位拡大機構（倍率5）を用いている。

図2-7に電気マイクロメータによるマスクステージの各軸のステップ位置決め特性を示す。位置決め分解能は $0.1\mu\text{m}$ 、回転で $0.5\mu\text{rad}$ と表2-1の仕様値を満足している。

マスクとウエハを対向させた時の、マスク微動機構およびウエハ微動機構の構成を図2-8に示す。マスクとウエハの距離（近接ギャップ）は $30\mu\text{m}$ としている。

ウエハチャックは、ウエハ裏面の塵等の付着によるウエハ変形を軽減する接触面積を減らしたピン支持の真空チャックであり、真空吸着力を上げるため、周辺に設けた薄膜によりウエハ保持時に真空シールを行う構成としている。ウエハはこの膜シール付きピン支持形チャックで真空吸着し、ウエハの反りを矯正して、平面度を確保している。ウエハステージには、十字ばねによる回転案内とインチワーム駆動による面内回転機構と、XYの長ストロークの移動時にウエハをZ方向に逃がすためのエアチューブによるZ方向上下機構を組み込んでいる。

2. 4 光ヘテロダイン干渉位置検出法

2. 4. 1 原理

マスクとウエハの相対位置検出は、位置検出精度が極めて高いことのみならず、検出精度が、露光層ごとに変化するウエハ表面状態、マスクウエハ間のギャップ変動などに影響されないことが重要である。そこで、高い検出分解能を期待できる光の回折・干渉を利用し、かつ、マスクとウエハの相対位置を位相情報として得ることのできる光ヘテロダイン干渉式位置検出法を採用した。図2-9に原理図を示す。

光ヘテロダイン干渉式位置検出法は、周波数のわずかに異なる2本のレーザ光（Laser-1, Laser-2）をマスクとウエハ上に設けた回折格子に ± 1 次の回折角度から入射し、回折格子面の法線方向への回折光が相互に干渉して生成するビート信号の位相を光検出器で検出する。この位相信号は、回折格子の横方向変位に比例して変化するため、マスクとウエハからのビート信号の位相差 $\Delta\phi$ を求めると、マスクとウエハの相対的な位置を測定できる。位相差 $\Delta\phi$ は、回折格子のピッチを p 、マスクとウエハの相対位置を Δx としたとき、

$$\Delta \phi = 4 \pi \cdot \Delta x / p \quad (2-1)$$

で表され、周期的でマスクウエハの相対位置に比例する検出信号が得られる。

図2-10に光ヘテロダイン干渉位置検出系の構成と回折格子の配置、および、検出される光ヘテロダイン干渉ビート信号を示す。マスク回折格子は窒化シリコン (SiN) 薄膜 (マスクメンブレン) 上に形成したタンタル (Ta) (吸収体) のパタン、ウエハ回折格子はシリコンに刻んだ段差である。ピッチ $6 \mu\text{m}$ の回折格子を用い、図のような正弦波信号の位相差を分解能 1° で検出する。上式より位置検出分解能は 8.3 nm となる。本方式の最大の特徴は、位相を検出するので、検出分解能を高くできることである。ほかに、対称光学系なのでギャップ変動に影響されない、同一の光路を進む2つのビームの位相差を検出するので、大気の揺らぎの影響を受けない、位相検出なのでウエハ表面反射率変化の影響が小さい等の特徴がある。

2. 4. 2 アライメント精度

光ヘテロダインによるマスクウエハの位置検出は、位相差を用いているため、ウエハ表面状態の変化に強いはずである。これを確かめるために、一つのマスクと様々なウエハに対しての位相差のばらつき (検出精度) と信号強度を測定した。その結果を図2-11に示す。マスクとウエハの光ヘテロダイン干渉位置検出信号の位相差のばらつきはHP社製の周波数時間間隔解析測定器 (5371A) によって測定した。これは、2つの正弦波の位相差のばらつきを 1 ms ごとに 1000 回測定し、その検出のばらつきをヒストグラムで表示する測定装置である。ここでは、(i) ベアシリコン、(ii) 酸化膜にレジストを塗布したもの、(iii) 酸化膜上にアルミ層を堆積させたもの、の3種類の例を示す。各試料は、それぞれ、検出信号強度の標準的なもの、信号強度の低いもの、信号強度が高いものである。また、位相検出はマスクとウエハをアライメントした状態で測定した。

図から、ヘテロダインの信号強度は、各試料で 0.3 V から 1.4 V と大きく変化しているにもかかわらず、検出された位相差ばらつきはいずれも 6.3° (54 nm) から 8.1° (66 nm) と安定している。本光ヘテロダイン干渉位置検出法では、 1° が 8.3 nm に相当するので、このばらつきは 3σ で $6.0 \sim 7.0 \text{ nm}$ のマスクウエハの位置検出ばらつきに相当する。これを用いてアライメントしても、1.1.3節で述べた所望のアライメント精度 $30 \sim 40 \text{ nm}$ は期待しにくい。すなわち、アライメント位置検出精度が目標値に到っていないという、第3の問題点が明らかとなった。

2. 5 重ね合せ精度

本装置のアライメント精度を評価するため、同一パターン同一ウエハでの2重露光による露光を行い、重ね合せ精度評価を行った。すなわち、マスク、ウエハの持つパターン位置誤差等の露光装置以外の要因を除去するため、同一のマスクを用い、第1回目の露光位置から一定距離(X_r)ずらし、第2回目を重ねて露光して、転写されたパタンの相対位置を測定することにより求めた。これは純粋にSR露光装置自身の機械精度を表している。露光フィールドサイズは8mm角、測定点はフィールド内で9点、19フィールドである。アライメント用の回折格子マークをフォトステッパで形成した。また、露光されたパターン位置の測定には光波干渉式座標測定機(Nikon製, 2i)を用いた。

この結果を図2-12に示す。図のように露光によるアライメント精度は、 3σ 値で70~80nm程度であった。これは、SR露光装置に求められる60nmには到らず、向上が必要である。また、光ヘテロダイン干渉位置検出の検出精度が60~70nmであったことから、この影響が、露光によるアライメント精度を支配していると考えられる。

つぎに、総合の重ね合せ精度を評価した。予めフォトステッパにより下層パターンを焼き付けたウエハに、本露光装置で、上層パターンをアライメントした後、露光し、下層パターンに対する、上層パタンの重ね合せ精度を求めた。露光フィールドサイズは、8mm角、測定点はフィールド内で9点、全18フィールドである。

結果を図2-13に示す。この場合、検出された重ね合せ誤差には、マスクのパターン位置誤差、フォトステッパの投影レンズ歪みなどの下層パタンの位置誤差など全ての誤差要因が含まれる。マップ上の楕円は、各測定点でのばらつき(3σ)を表し、楕円の中心は、測定されたパターン位置誤差の平均値を表している。この平均値を見てみると、対角部の4点では、他の5点よりも大きめに突出している。これは、下層に用いたフォトステッパの投影レンズによる像歪みのためと考えられる。総合重ね合せ精度として、平均値 $\pm 3\sigma$ で、X方向： -30 ± 234 nm、Y方向： 60 ± 258 nmと非常に大きい。これは、マスクやウエハ上のパターン位置誤差を含んでいるためである。本露光装置での重ね合せ精度を表す量として、9点の各測定点での平均値に対する位置誤差の分散を求め、 3σ 値で表す重ね合せ精度を求めた。この結果をヒストグラムで表す。重ね合せ精度は、97nm(X)、81nm(Y)であった。これは、目標である、重ね合せ精度60nmに到達していない。

2. 6 結言

今後のリソグラフィの課題である高い重ね合せ精度を得るために、SR露光装置では、露光中もマスクとウエハの相対位置をフィードバックしアライメント制御を行う露光中サーボ方式が重要であり、これを実現する構成として、

- (1) 空気静圧送りねじと空気静圧案内による非線形性を排除した位置決め機構と
- (2) 回折格子を用いた光ヘテロダイン干渉式位置検出法による高分解能な検出法を基本にしたSR露光装置を開発した。

その性能を評価した結果、

- (1) XYステージにおいては、位置決め分解能50nm以上、位置決め繰り返し精度15nm (3σ)、20mmのステップ移動の位置決め時間0.65秒を得た。
- (2) マスクとウエハの光ヘテロダイン干渉位置検出法においては、分解能8.3nm、検出精度60~70nm (3σ) が得られ、様々なウエハ表面状態に対しても安定に検出可能であることが明らかとなった。
- (3) 露光により評価した重ね合せ精度として、同一パターンでの重ね合せ精度70~80nm (3σ) を得た。光露光装置とSR露光装置の総合重ね合せ精度として、X方向 -30 ± 234 nm、Y方向で 60 ± 258 nmを得た。また、マスクとウエハのパターン位置誤差を除いた重ね合せ精度として、X方向：97nm (3σ)、Y方向：81nm (3σ) を得た。これは、目標である、60nmにおよばない。

また、明らかとなった主要課題は、

- (1) ウエハを前面から供給する方式では装置の大型化につながり、SR露光装置で重要な横幅が大きくなってしまう。
- (2) 空気静圧送りねじによる位置決め制御において、PI制御では動的減衰が不足し、このため残留振動が長く、位置決め時間を要する的原因となっている。
- (3) 光ヘテロダイン干渉位置検出における検出精度は、ここで得られた60~70nmでは不十分で、30~40nmとする必要がある。
- (4) 露光によるアライメント精度は、60nm以下とする必要があり、得られた精度80~100nmでは不十分である。

第2章 参考文献

- [1] 石原直、鈴木雅則、宇根篤暢、福田真、金井宗統、小俣富士夫：SOR用たて形X線ステッパの開発、精密工学会誌、Vol.57, No. 3, pp. 459-466, (1991)
- [2] 鈴木雅則、宇根篤暢：光ヘテロダイン干渉式位置検出法、精密工学会誌、Vol. 57, No. 2, pp. 267-272, (1991)

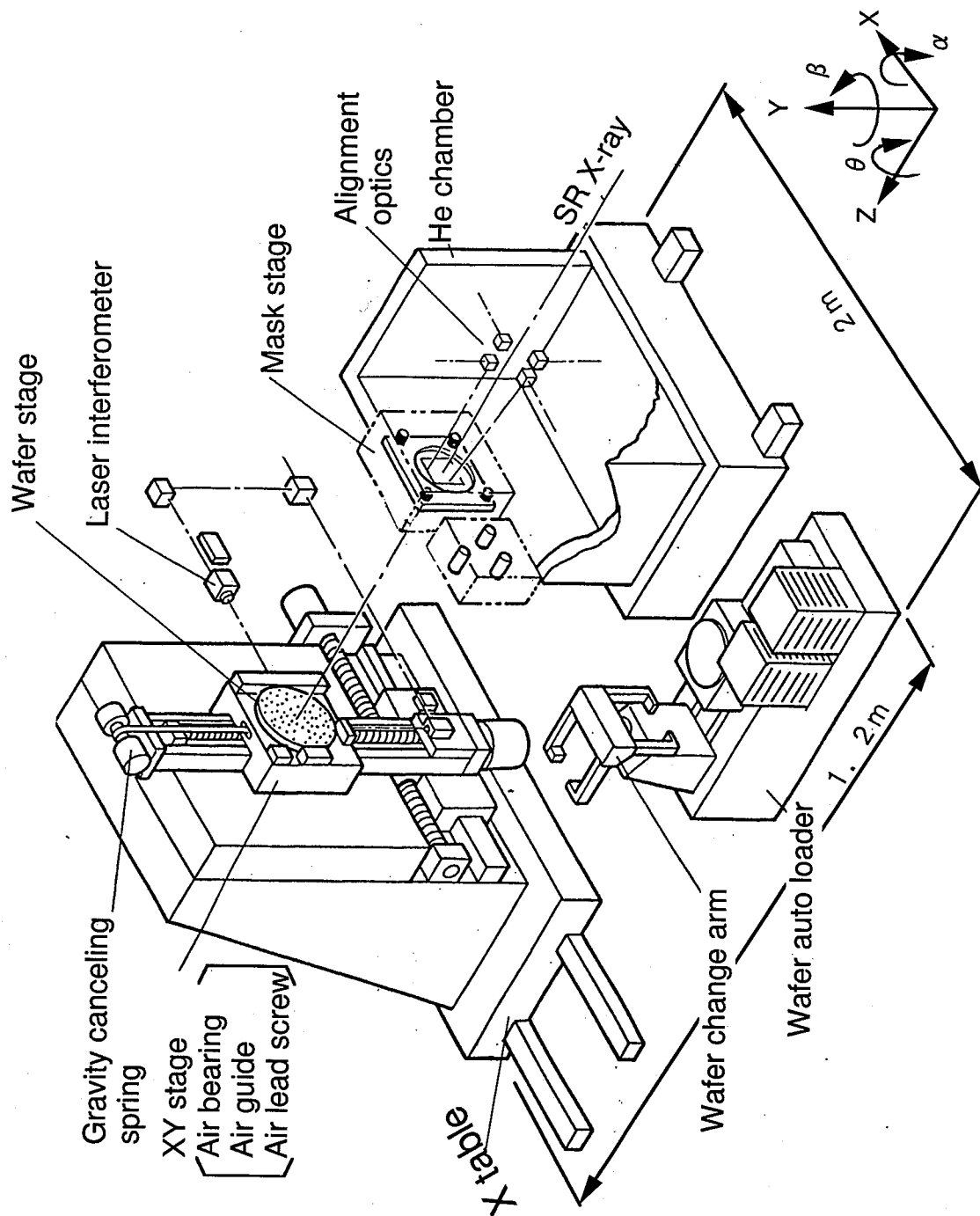
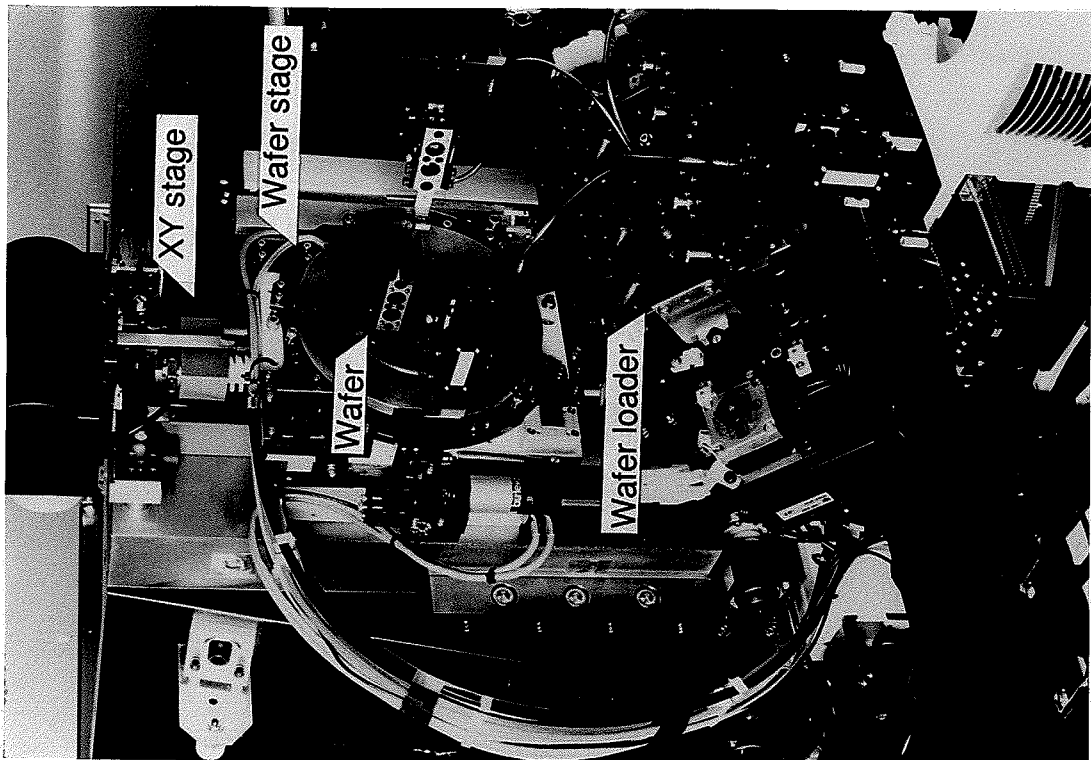
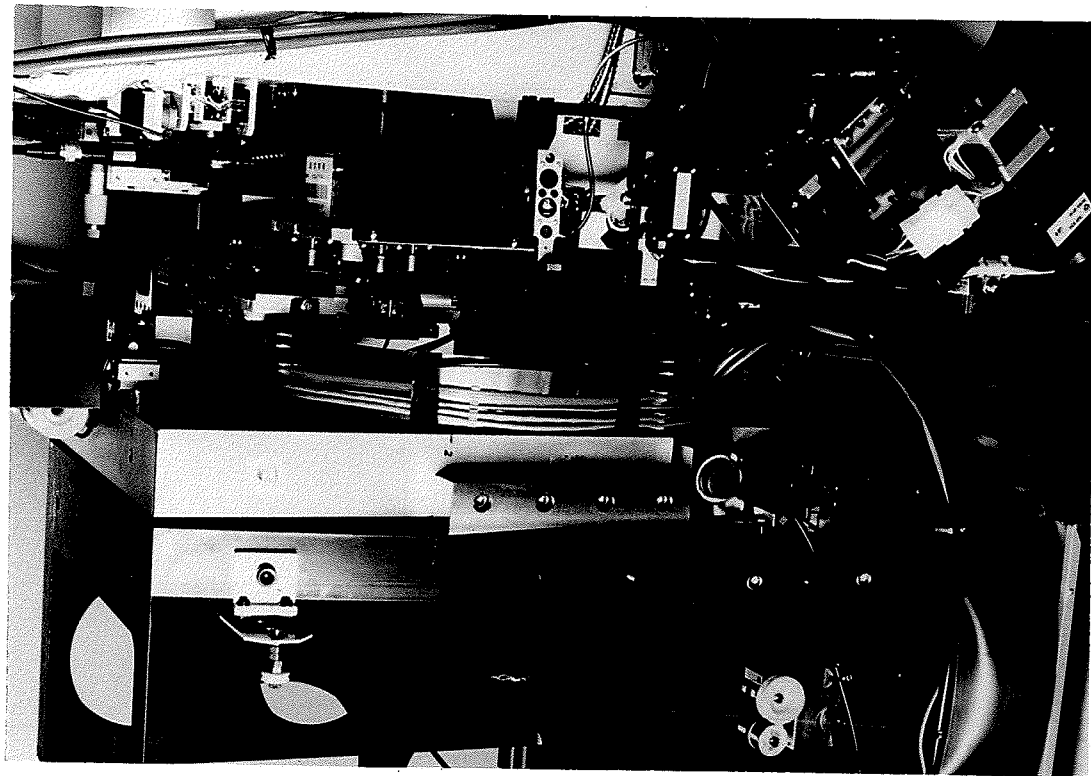


Fig. 2-1 SR stepper prototype



(a) Wafer unit and wafer loader



(b) Side view of SR stepper

Fig. 2-2 SR stepper prototype

表 2-1 操作シーケンスと各軸駆動および検出手段の仕様

シーケンス	マスク 微動機構	ウエハ 微動機構	XY ステージ	位置検出センサ
マスク レベリング	マスクあり 機構 0.1 $\mu\text{m}/\pm 150 \mu\text{m}$	-	XY ステージ 50 nm/200 mm	静電容量形センサ 0.1 $\mu\text{m}/\pm 50 \mu\text{m}$
ウエハ回転 位置決め	-	ウエハ回転機構 20 $\mu\text{rad}/50 \text{ mrad}$	-	レーザ走査型 位置検出計 0.1 $\mu\text{m}/\pm 50 \mu\text{m}$
ウエハ ステージ移動	-	-	XY ステージ 50 nm/200 mm	レーザ干渉測長計 5 nm/200 mm
アライメント	マスク回転機構 1 $\mu\text{rad}/\pm 1 \text{ mrad}$	-	XY ステージ 50 nm/200 mm	光ヘテロダイン干渉 位置検出計 8.3 nm/ $\pm 1.5 \mu\text{m}$

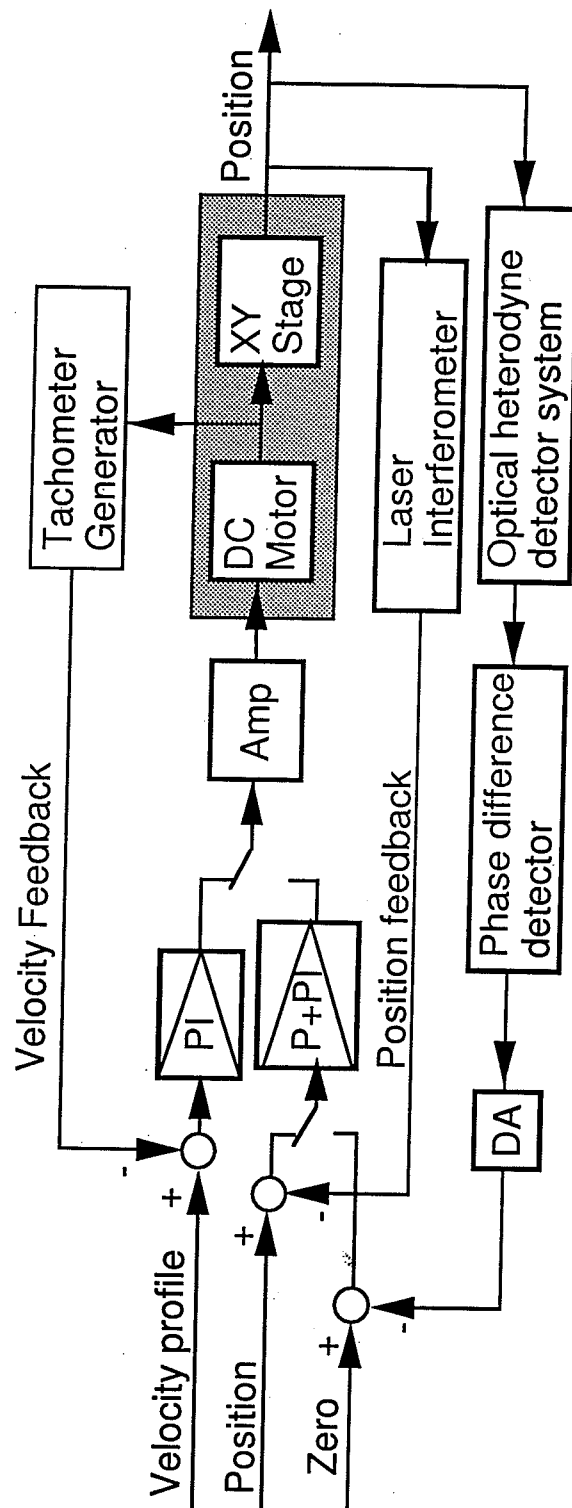
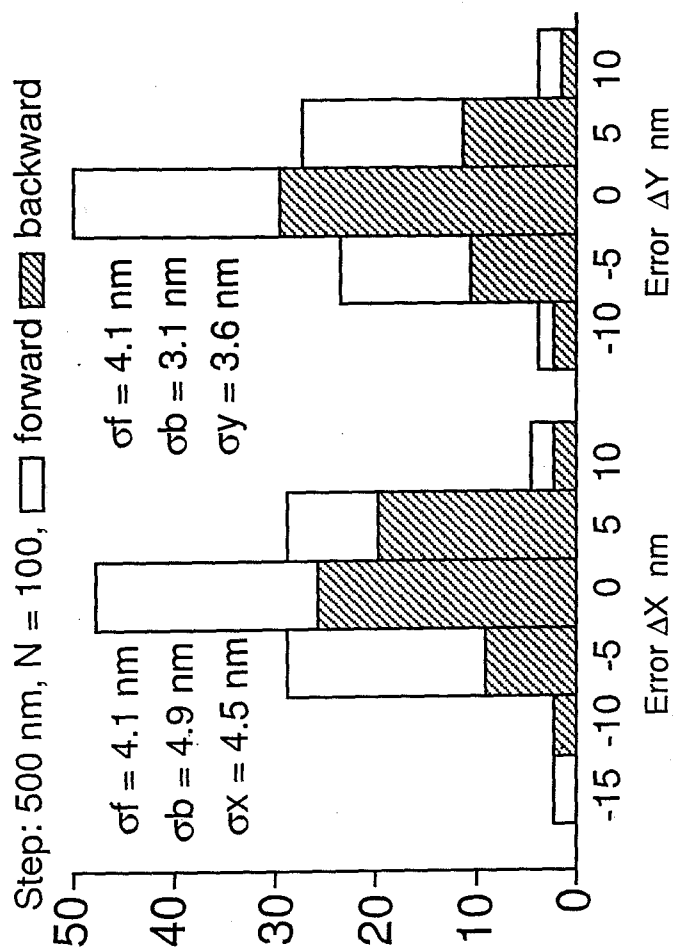
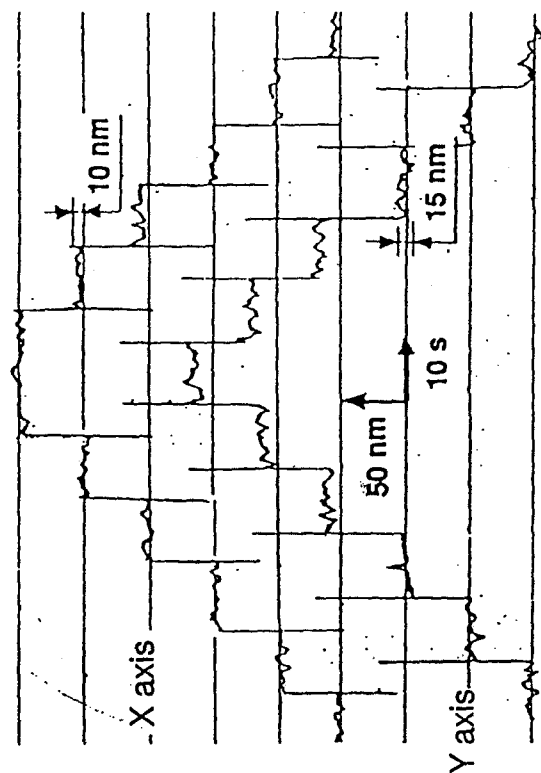


Fig. 2-3 XY stage control block diagram



静電容量型センサにより測定。
ペンレコーダによる記録（カットオフ周波数：45 Hz）。

Fig. 2-4 Positioning characteristics of XY stage

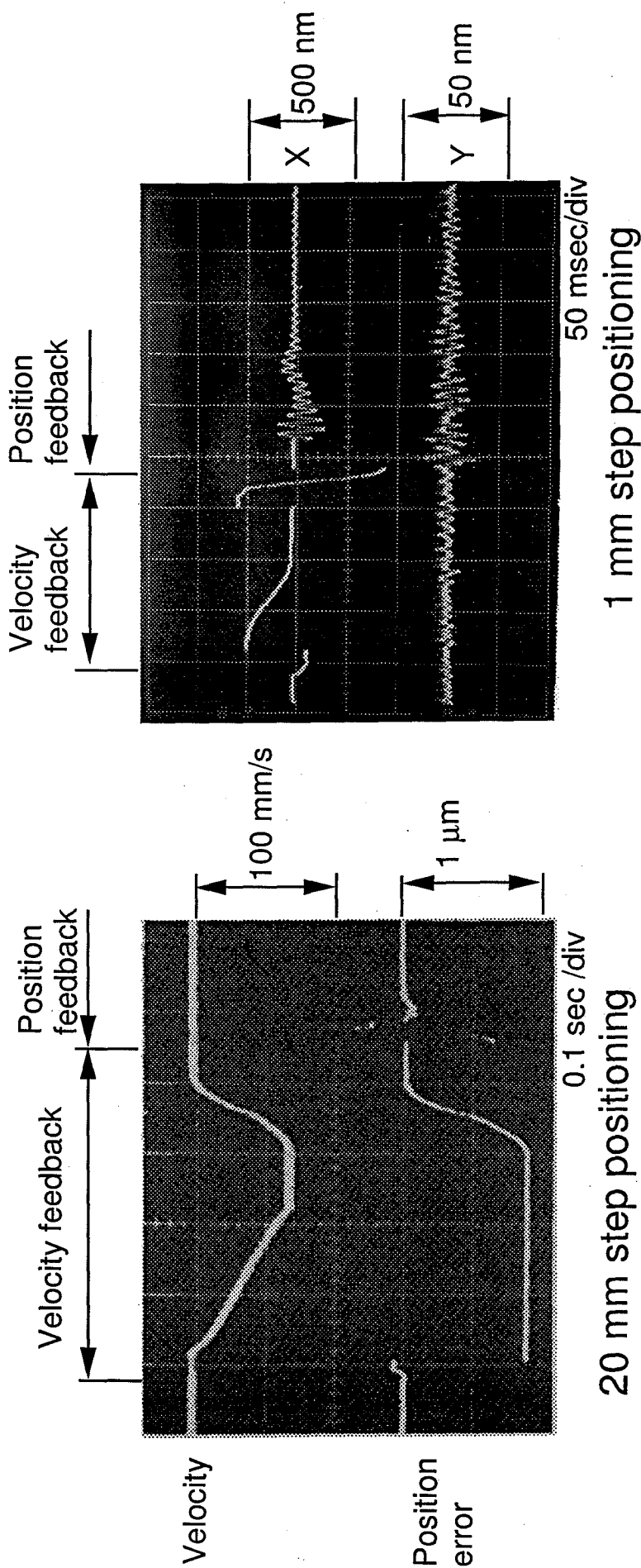


Fig. 2-5 Positioning characteristics of XY stage

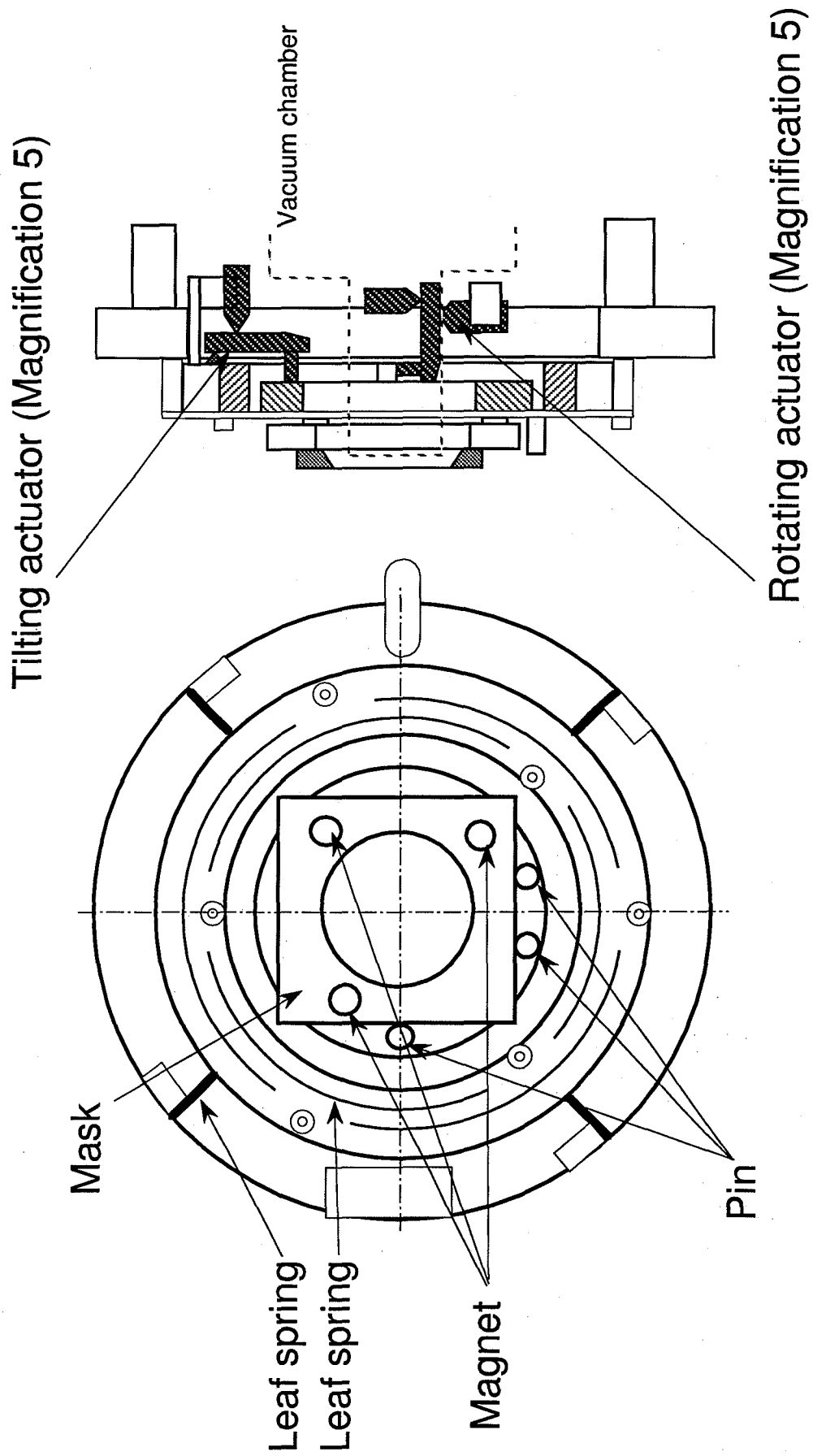
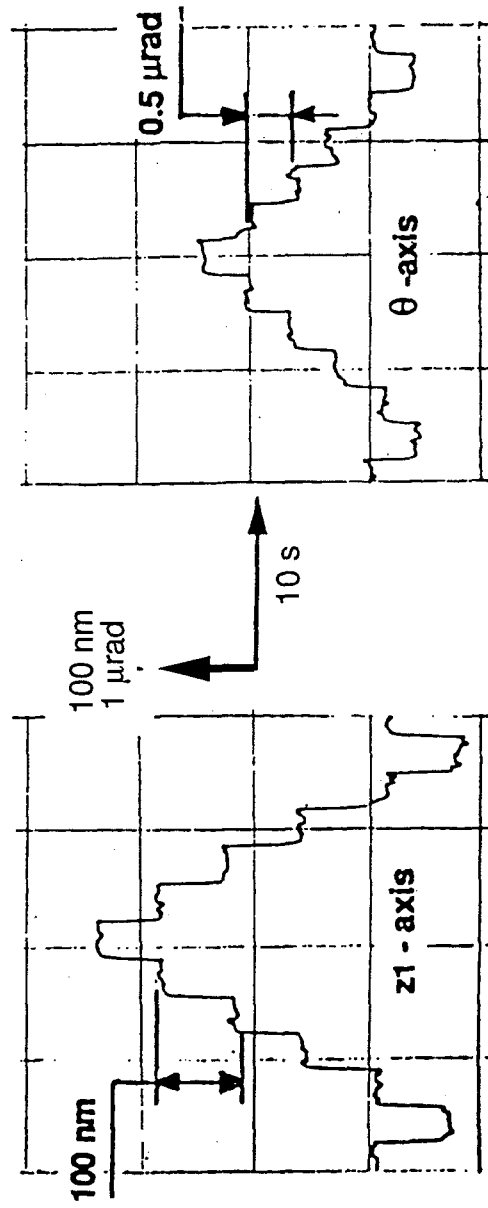


Fig. 2-6 Mask stage



電気マイクロにより測定.
ペンレコーダによる記録.

Fig. 2-7 Positioning characteristics of mask stage

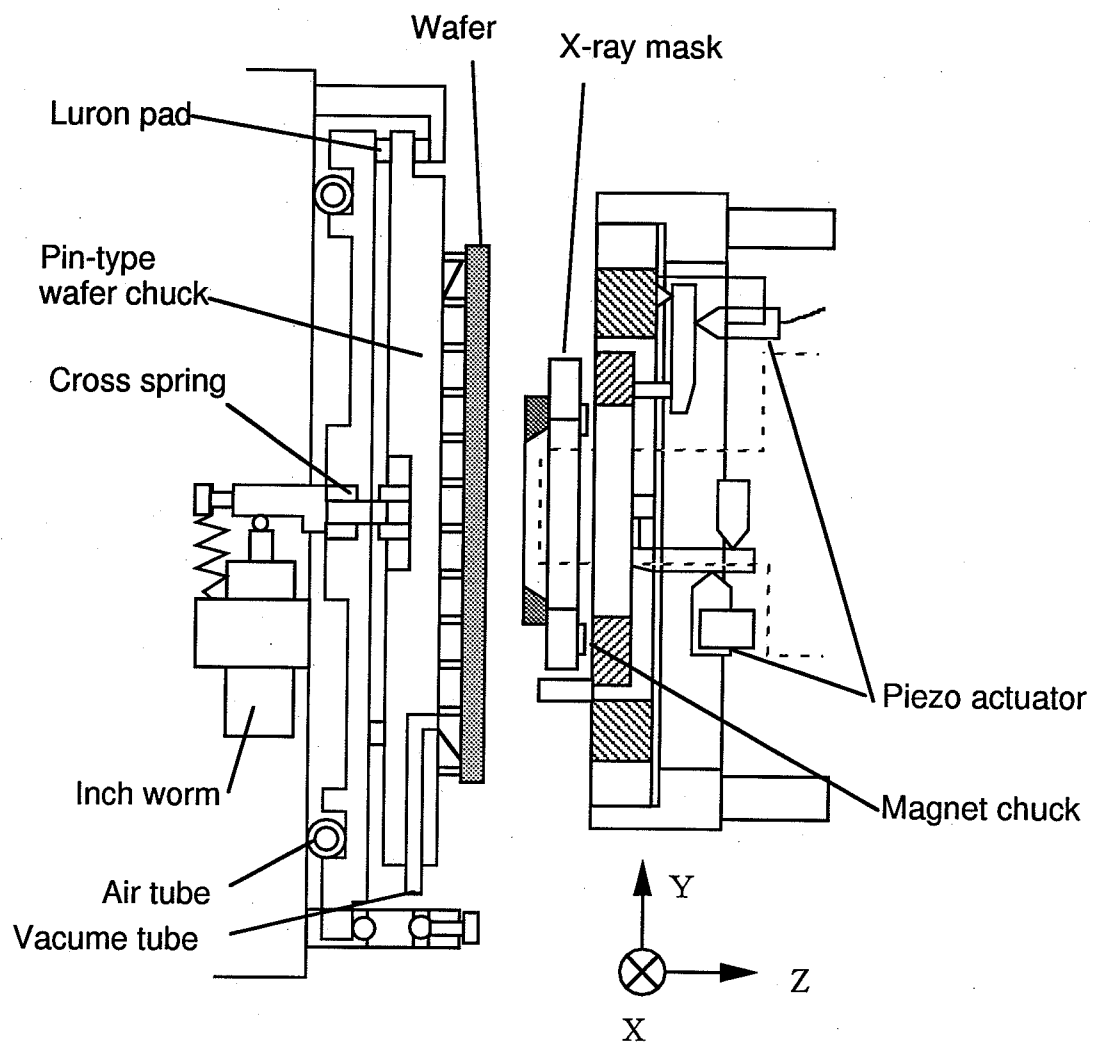


Fig. 2-8 Mask and wafer stage

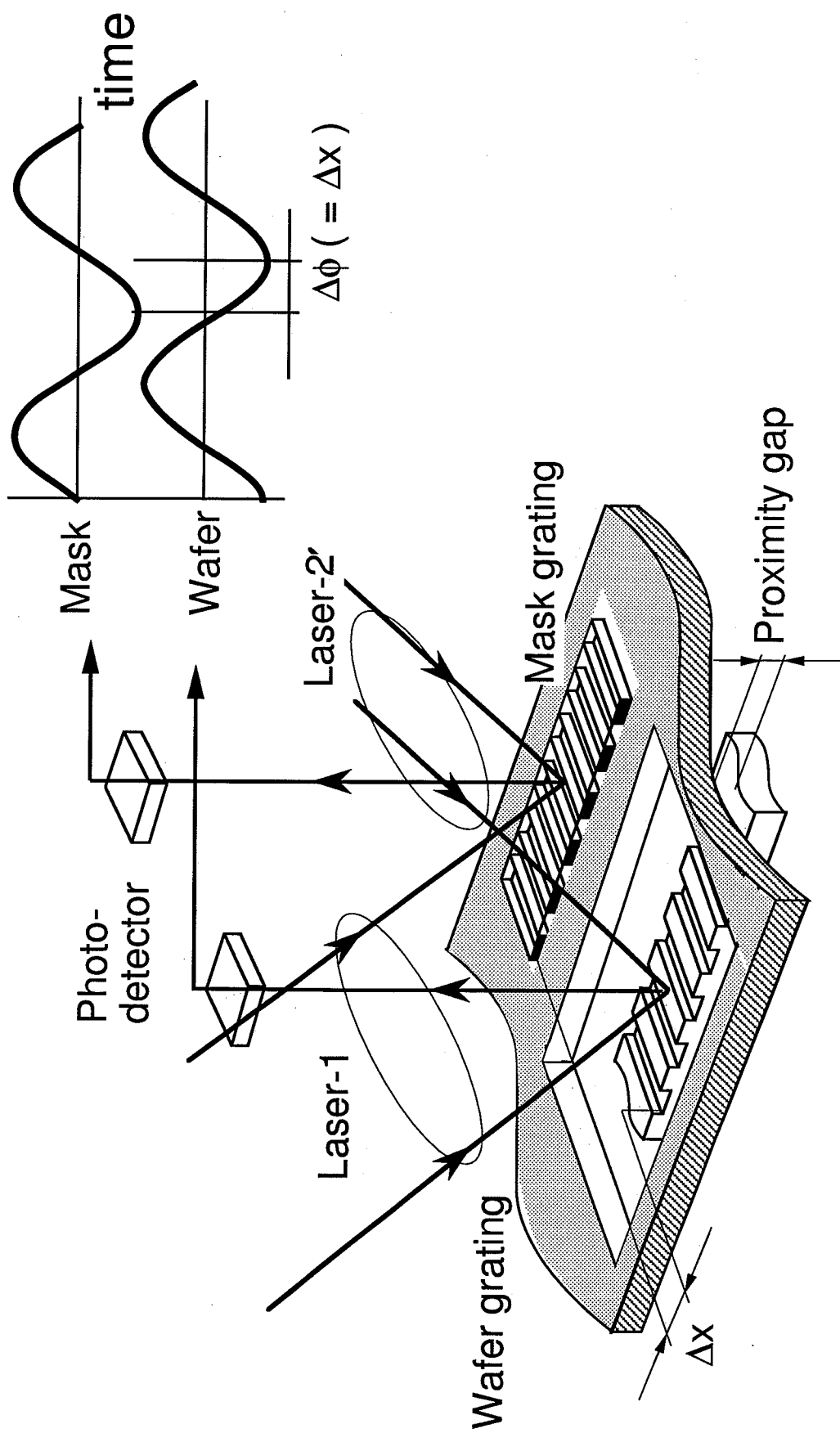


Fig. 2-9 Optical heterodyne detection system

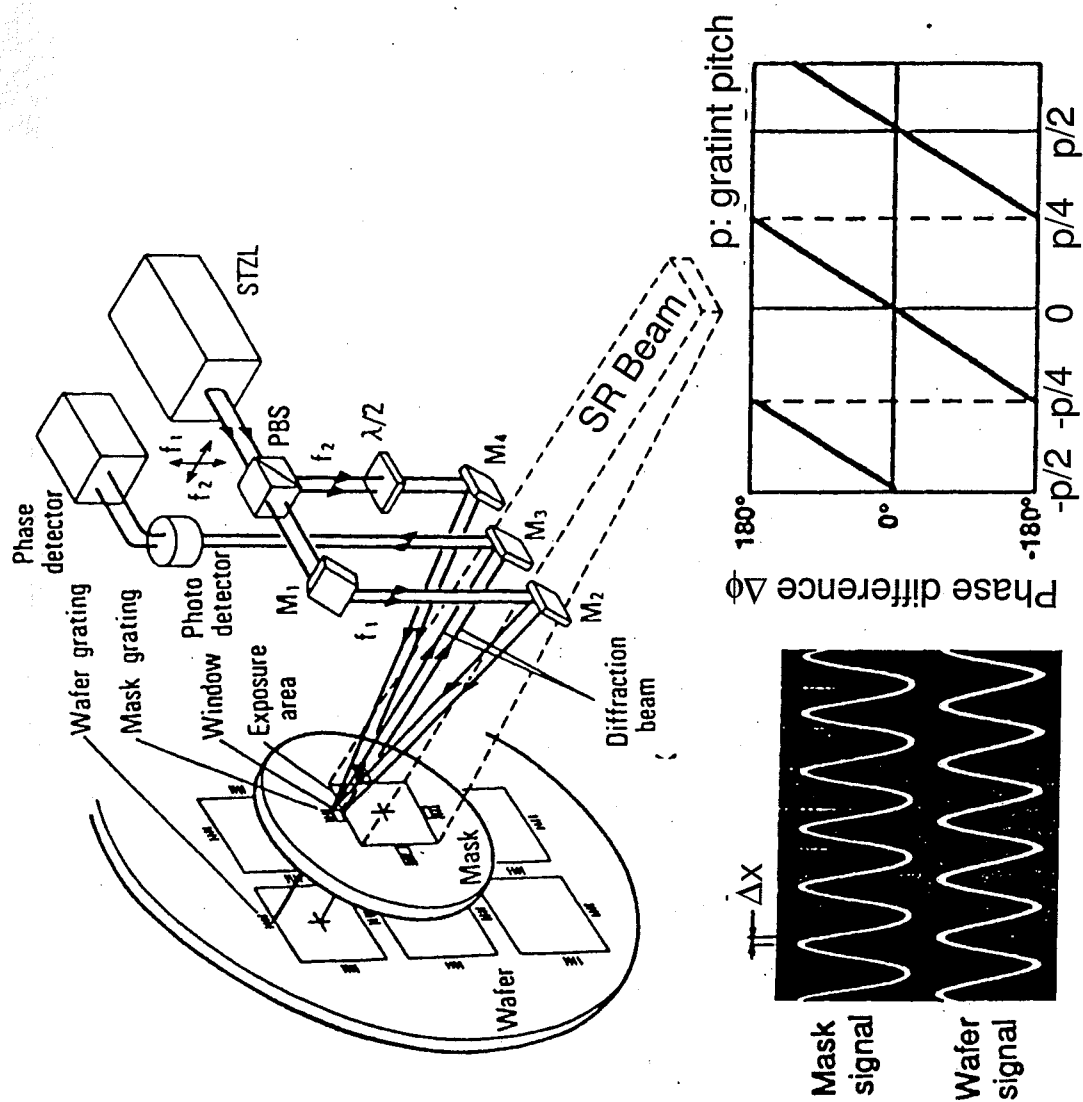


Fig. 2-10 Optical heterodyne detection system

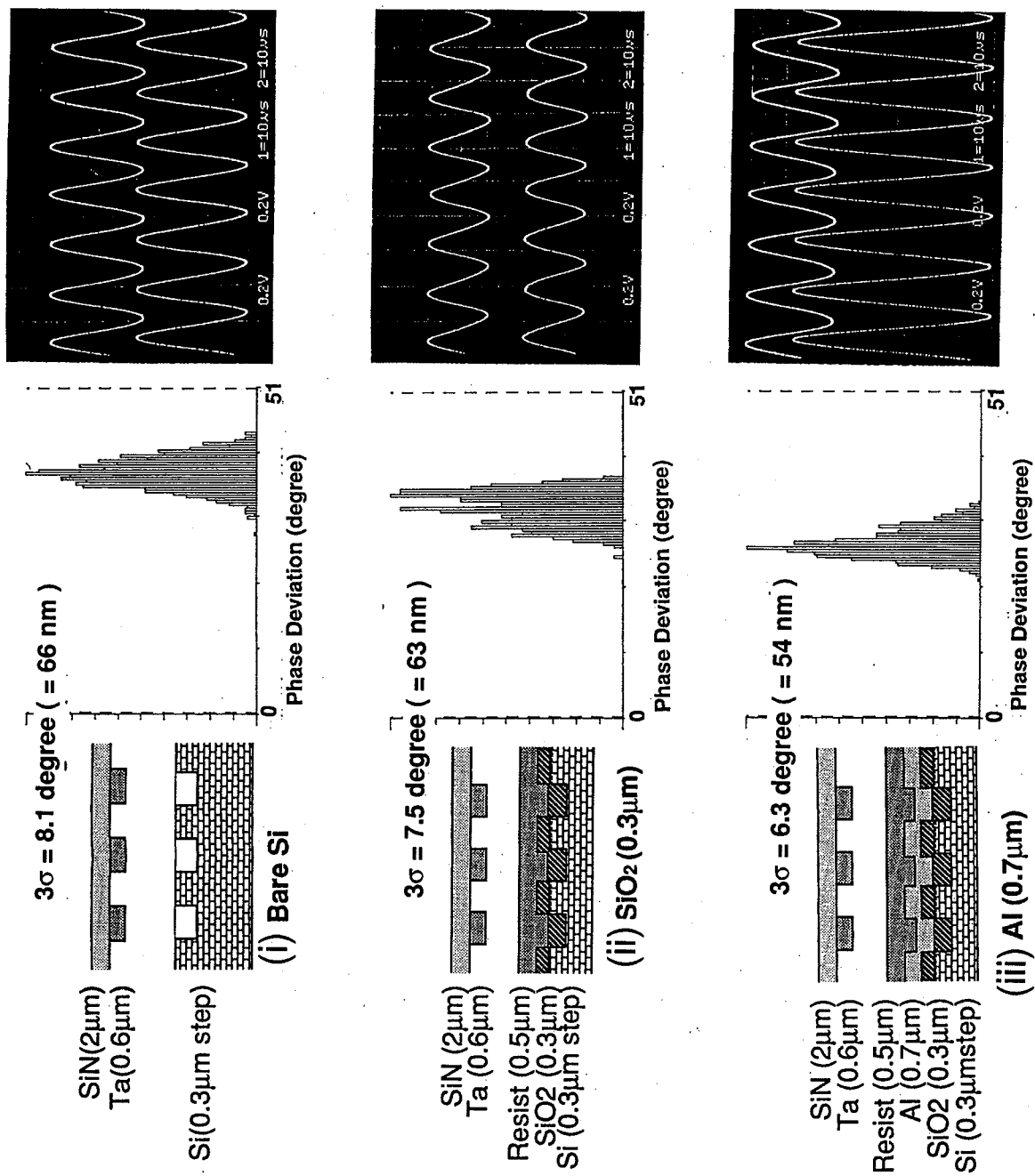


Fig. 2-11 Alignment repeatability in optical heterodyn detection system

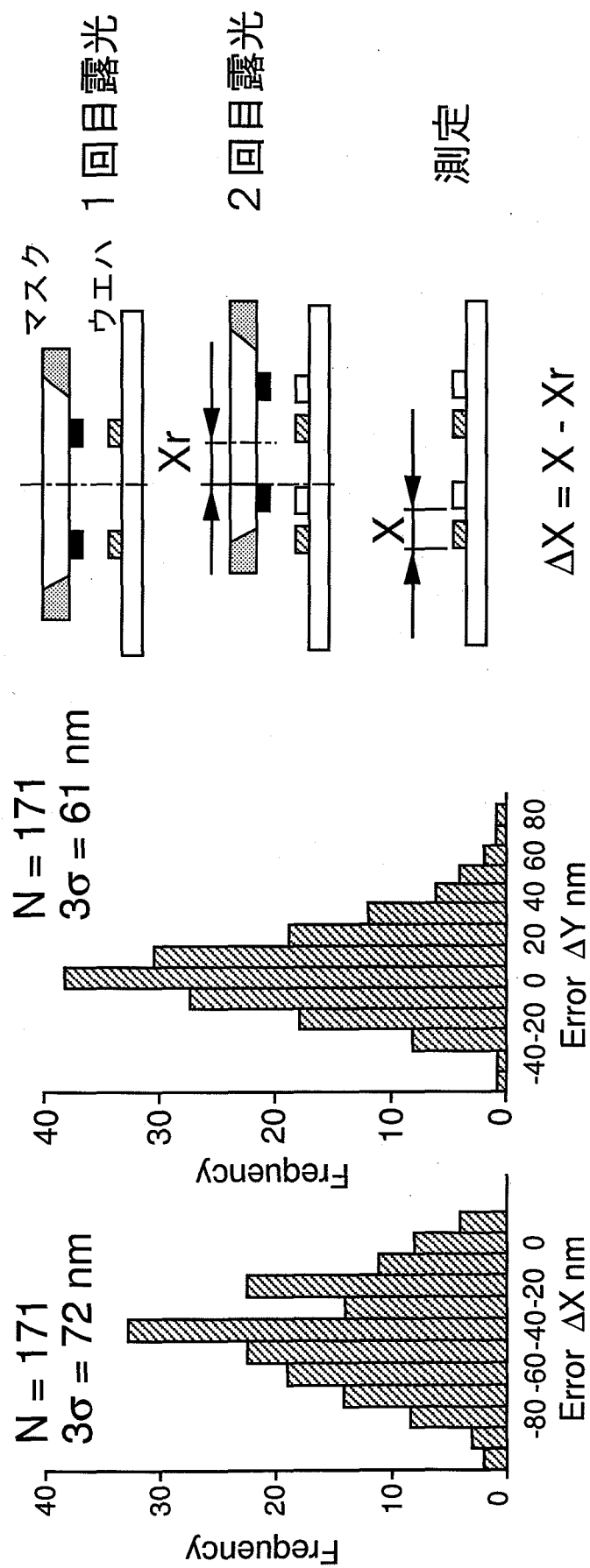
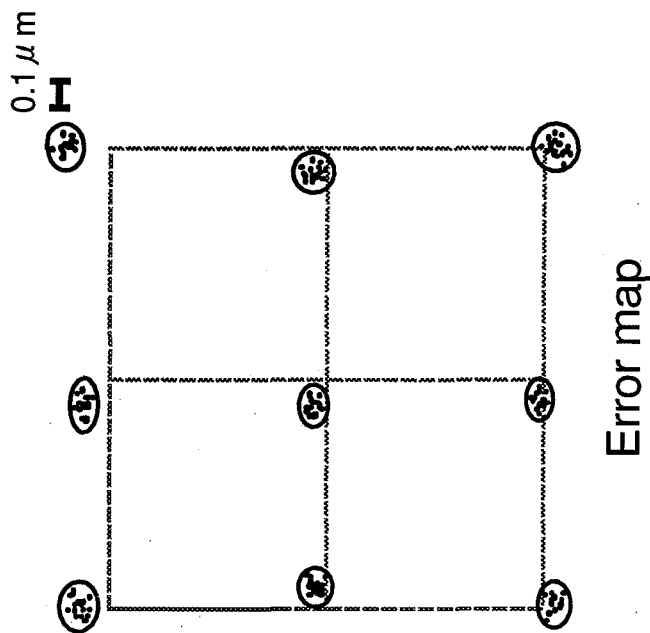
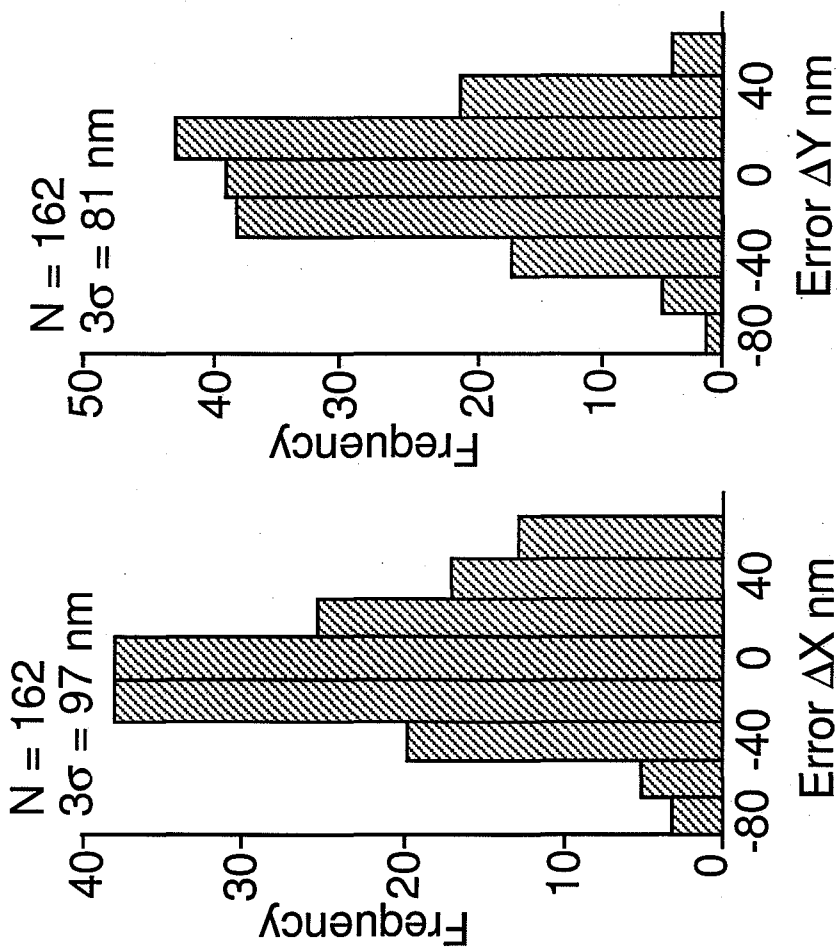


Fig. 2-12 Alignment accuracy by double exposure

Overlay repeatability

$3\sigma_x = 97 \text{ nm}$, $3\sigma_y = 81 \text{ nm}$



Total overlay accuracy
X: -0.03 ± 0.234
Y: 0.06 ± 0.258

Fig. 2-13 Overlay accuracy

第3章 空気静圧送りねじによる位置決め

3. 1 緒言

空気静圧案内と空気静圧送りねじを用いた送り機構は、単一の位置決め機構で長ストロークの精密送り機構を実現する手段として有力である。高精度の位置決め機構を実現するには、ねじのふれ回りなどの送り機構による案内支持力の変動が物体の直線運動精度を悪化させないように案内と送り運動との干渉を抑えること、位置決め機構の固有振動数を高くして位置決め精度を上げるために送り方向の剛性を高くすることが重要である。

超精密案内機構として、非接触の空気静圧案内が多く開発されている^{[1][2]}。空気静圧案内は、摩擦が無くスティックスリップなどの非線形運動が生じない、また、案内の幾何学的形状誤差を空気膜で平滑化する効果（平均化効果）があり、案内精度が高いなどの特徴がある。反面、他の案内と比較して、負荷容量が低く、ステージ送り動作による荷重変動が案内の運動特性に影響し易い。このため、ワイヤ駆動などの本質的に案内精度を損なわない駆動方法や^[3]、また、空気静圧案内とボールねじとの組み合わせでは、ねじのふれ回りの影響をなくすべく板ばねを用いる等の工夫^[4]がなされている。この場合、ナット部の形状が複雑となり、重量が増すことになる。

一方、ナットが静圧空気により浮上している空気静圧送りねじは、非接触で回転を並進運動に変換する運動機構である。このため、固体摩擦に起因するスティックスリップやバックラッシュが皆無で、高い分解能が実現でき、磨耗がないため経時変化のない送りが可能である。

これまで、空気静圧送りねじの研究は古くから行われてきたものの実用に耐えるまでの性能に到っていなかった^[5-6]。1987年に、セラミックを用いた空気静圧送りねじが開発され^[7]実用に耐える剛性が得られるまでになった。

セラミック空気静圧送りねじは、ナット部に多孔質セラミックを用いたことにより、スパイラル状の複雑な形状に高剛性の得られる多孔質絞りを形成でき、方形ねじとすることにより、軸直角方向の力を加えずに加工できるため、加工精度を飛躍的に高めることが可能となった。

これまで、空気静圧送りねじ自体の研究開発は多く行われていたが、摩擦のない空気静圧送りねじを用いた位置決め制御についての研究はほとんどなかった。最近になって、機械加工により絞りを形成した空気静圧送りねじにより高分解能の位置決め制御を行いマイクロマシンなどの加工装置へ応用したとの報告がなされている

^[8]が、周波数伝達特性、ステップ応答などの基本的な制御特性については明らかではない。

本章では、第2章で明らかとなった空気静圧送りねじを用いた位置決めの動的減衰不足という問題を解決すべく、空気静圧案内と空気静圧送りねじを用いた一軸の位置決め機構を構成し、レーザ干渉計をフィードバックセンサとした位置決め制御を行う。この目的は、PIDコントローラにより制御的に減衰特性を加えたスライダの駆動および停止の制御性を確認することである。

また、定盤の振動などによる外乱に対する抑制効果を得るための2自由度制御系の検討を行う。ここでは、制御手法として、フィードフォワードによる制御を検討する。

つぎに、ロータリエンコーダによる回転位置検出を基準に位置決め制御を行う^[9]。これは、レーザ干渉計で問題となる大気揺らぎの影響無しに位置決めが可能で、高い安定性が得られること、高分解能のロータリエンコーダを用いることにより、高い分解能の位置決めを実現できることが期待できるためである。

3. 2 空気静圧送りねじを用いた位置決め機構

3. 2. 1 セラミック空気静圧送りねじの構造

図3-1に多孔質セラミックを用いた空気静圧送りねじの構造を示す。ねじ山形状は方形であり、ナットのねじ山中間部にセラミック多孔質部が形成されている。高压空気は、給気孔から入り、ナット上の多孔質を介して、フランク面に吹き付けられ、めねじ、おねじフランク面間で空気静圧浮上機構を形成し、ナット谷部に設けられた排気口から大気へ開放される。多孔質には、無電解メッキにより絞りを形成している。おねじとめねじ間のクリアランスを間座で調整可能なように、ナット多孔質の片面を封止し、2つのナットを対向して組み合わせるダブルナット方式としている。

多孔質絞りは、多数のオリフィス絞りとして考えることができ、自成絞りや面絞りと比較すると3～5倍の無次元剛性が得られる。

また、方形とすることにより、ねじ駆動力のねじ軸直角方向成分を無くし、軸方向のみの推力をナットに加える構造となっている。これにより、ねじ軸のふれ回りによる直線運動精度を損なうことなく高精度な送りが可能となる。さらに、方形とすることにより、ねじ山高さを長くできるため、受圧面積を大きくできる。ナット長さ50mm、直径 ϕ 25mm、ねじ山高さ5mmのセラミック静圧送りねじの場合

合で、受圧面積は 24 cm^2 になる。

3. 2. 2 空気静圧送りねじを用いた位置決め機構

(a) 機構構成

空気静圧送りねじを用いた位置決め実験装置の模式図を図3-2に示す。案内は、最も案内精度の上げられる口形の4面加圧案内を用い、空気静圧送りねじは、その案内の上部に設置した構造としている。方形ねじであるため、ナットはアキシャル方向のみの推力を受け、ラジアル方向負荷は全て直進スライダで受ける構成としている。ナットは空気静圧で案内面から浮上したスライダに2本のボルトで固定している。

ねじ軸は、ねじ軸両端に設けたラジアル・スラストの軸受、および、ラジアル軸受で支える構造とし、アキシャル方向の負荷は全て片側のスラスト軸受で支持している。静圧案内、各軸受全て多孔質セラミックにより構成している。ねじ軸、軸受の材料を全てセラミックとすることにより、塑性変形しないため、空気無給時などの接触時も、ばりや変形が生じず、また、耐久性、錆食がないなどの利点がある。反面、おれるという欠点がある。送りねじは長さ 400 mm 。リード 6 mm 、外径 25 mm である。モータは、DCのプリントモータを用いている。

3. 3 レーザ干渉計による位置決め制御

3. 3. 1 実験装置

(a) 構成

静圧案内と空気静圧送りねじを用いた一軸の位置決め実験装置を構成した。これを図3-2、3-3に示す。図で、レーザ干渉計(HP製5527B)は、光源に波長 632.8 nm のHe-Neレーザを用い、スライダ上に軽量のプレーンミラーを取り付け位置検出を行っている。干渉光学系は、プレーンミラー・干渉計間を一往復して干渉させる1パス系で、分解能 $\lambda/128$ で1パルス約 5 nm である。

駆動は、トルク変動の比較的少ないプリント形DCモータ(安川電機製PMS-09X)を用いた。モータロータは直径 $\phi 100\text{ mm}$ 、厚さ 3 mm の円盤で、円盤に直角方向に2つのブラシが設置され、給電している。ステータは、24個のマグネットをスラスト方向に対向させて磁束が回転軸方向に通る構造となっている。このような構造のため、ラジアル方向の力変動、すなわち、トルク変動が小さく、また、ブラシの圧力がスラスト方向に働くので、一種のブレーキとなって働く。

モータの特性を表3-1に示す。定格出力100W，定格トルク $23.8 \times 10^{-2} \text{ Nm}$ で，モータロータのイナーシャは $0.46 \times 10^{-4} \text{ kg m}^2$ ，トルク定数 $4.96 \times 10^{-2} \text{ Nm/A}$ である。駆動は，搬送信号3kHzのPWMで無負荷時の時定数は10ms，空気静圧ステージを接続した状態での負荷が加わった状態では400msとなる。

制御系はデジタルサーボを用い，制御要素は全てソフトウェアで構成している。サーボサンプリング時間は $250 \mu \text{ sec}$ である。ここでは，減衰特性を得るために，PIDコントローラを構成している。S-Z変換には， $s = (1 - Z^{-1}) / T$ を用いている。制御出力は，12ビットのDA変換器によりフルスケール $\pm 10 \text{ V}$ のアナログ信号として出力している。

(b) 動特性

空気静圧送りねじを用いた位置決め機構の運動モデルを検討する。最も重要な部分は，おねじナット間のモデルであり，これを図3-4のように考える。おねじ，めねじ間は静圧空気支えられており，固体接触はないと仮定する，また，ねじ軸は空気静圧のスラスト軸受で支持されており，軸方向の力が加わるとこのスラスト軸受においても弾性変形すると仮定する。ここで，ねじのフランク面を代表するねじ半径を R ，リード角を γ で表す。最初，おねじおよびめねじのフランク面はそれぞれ A ， A' にあるとする。いま，ねじ軸が θ だけ回転したとすると，おねじのフランク面は B となり， $R \theta \tan \gamma$ だけ前進するはずである。ところが，この回転により，ねじ軸・ナット間に生ずる空気バネ力により，おねじ，めねじはそれぞれ X_2 ， X_1 だけ後退および前進する。結果的に，ねじ軸が回転することにより，おねじ，めねじのフランク間距離は Z_0 から Z_1 に変化したことになる。これを式で書けば以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \Delta &= Z_1 - Z_0 \\ &= R \theta \tan \gamma - X_2 + X_1 \end{aligned} \quad (3-1)$$

ここで， Δ は，おねじめねじ間のクリアランス変化である。

軸方向のおねじめねじ間のバネ係数を K_b で表せば，ねじ軸が θ だけ回転した場合の空気静圧送りねじで生ずる力 f_b は，

$$\begin{aligned} f_b &= K_b \Delta \\ &= K_b (R \theta \tan \gamma - X_2 + X_1) \end{aligned} \quad (3-2)$$

つぎに、空気静圧送りねじを用いた一軸の送り機構の運動モデルを検討する。モデルの対象としたステージは、図3-3に示す一軸ステージで、スラスト軸受をサポートしている台が肉厚20mmでこれも弾性変形すると考える。また、ねじ軸とモータは剛体カップリングで直づけしているがモータ軸径が細く、このねじり振動を考慮することとする。このときの運動モデルを図3-5に示す。本実験に用いたねじの軸方向剛性は $30\text{ N}/\mu\text{ m}$ である。

図3-6にモータに正弦波入力を加え、ナットの軸方向運動を加速度ピックアップで測定したときの、周波数伝達関を示す。25Hz, 210Hz, 700Hzにピークがある。それぞれ、モータの電氣的な特性、ナットねじ軸間の固有振動、モータとねじ軸間のねじり振動と考えられる。空気静圧送りねじを用いているにもかかわらず、210Hzと高い固有振動数が得られている。

3. 3. 2 位置決め特性

(a) 高分解能送り

20nmのステップ送り特性を示したのが図3-7である。図は、スライダ側面アキシャル方向に静電容量型変位計を設置し、その出力を示したものである。出力信号は、1kHzにカットオフ周波数を持つローパスフィルタを介して測定している。階段状、および、往復運動を正確に示していることから、本位置決め制御装置は20nm以上の位置決め分解能がある。

図3-8に、ステップ幅を50nm, 100nm, 500nmと変えた場合の位置決め特性を示す。本測定も、静電容量形の変位計での測定結果である。図から、500nmのステップ移動でも、残留振動なく位置決めできている。空気静圧送りねじを用いた位置決め機構の制御において、PIコントローラでは残留振動が持続するという第2章での課題に対して、PIDコントローラを用いることにより、残留振動を抑えた位置決めが実現できた。

また、ステップ幅を変化させることにより応答波形が異なる非線形特性が観察された。500nm, 100nmの位置決め波形では、最初に急激に立ち上がり、目標位置手前40nmを過ぎたところで、緩やかに目標位置に整定している。この原因を明らかにするため、ブラシ圧を変えた時の位置決め特性を明らかにする。

(b) ブラシ圧変化

DCモータにはブラシが存在する。ブラシ圧を変化させたときの位置決め波形の変化を測定した。ブラシ圧は、ブラシを押さえるバネの長さを調節して、接触面で

の押しつけ力を測定して求めた．ブラシ圧を $8.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ ， $6.9 \times 10^4 \text{ Pa}$ ， $3.9 \times 10^4 \text{ Pa}$ と変化させた．この結果を図3-9に示す．ブラシ圧を変化させることにより減衰性が悪くなり振動的になる．このことから，ステップ幅変化時の位置決め応答変化は，ブラシによるものであることがわかる．

3. 4 フィードフォワードによる位置決め制御

SR露光装置では，重心が高く，定盤の振動がステージの外乱として働く．そこで，外乱による振動を抑え，かつ，目標値に追従するための2自由度の位置決め制御が必要となる．ここでは，フィードフォワード制御を検討した．ブロック線図を図3-10に示す．PIDにより，制御系の安定性を確保し，フィードフォワードにより，応答性を高める．

このときの目標値Rから，制御量Yまでの伝達関数 G_a と，外乱Dから制御量Yまでの伝達関 G_d を求めるとつぎのようになる．

$$G_a = (F_1 + F_2) G_c / (1 + F_1 G_c) \quad (3-3)$$

$$G_d = G_c / (1 + F_1 G_c) \quad (3-4)$$

ここで， G_c は制御対象で，モータ，送りねじ軸機構，スライダを含めている． F_1 は制御ループ内のコントローラであり， F_2 はフィードフォワード用のコントローラを示す．外乱に対する応答 G_d は， F_1 のみで調節することができ， F_2 には依存しない．目標値応答 G_a は， F_1 と F_2 とに依存する．

したがって，このときのパラメータは以下のように調節する．まず，外乱に対する安定性を確保するために， F_1 を調節し，次に， F_2 を調節して，目標値応答性を得る．具体的には，ステップ外乱を加えたときの位置決め応答波形から F_1 のPIDパラメータを決める．つぎに，フィードフォワード要素 F_2 により，制御性を高めるよう目標値応答性を決定する．すなわち，目標値にステップ入力を加えたときの位置決め応答波形から整定時間が短くなるようにパラメータを決定する．

制御対象を 30 Hz および 200 Hz に共振周波数を持つ4次のモデルで近似し，その制御対象に対して，フィードフォワード制御を行うシミュレーションを行った．すなわち，この制御対象に，PIDコントローラ，および，2階微分のフィードフォワードを加える制御装置を想定し，目標値にステップ入力を加えたときの制御量変化と，外乱にステップ応答を加えたときの制御量変化を調べた．この結果を，図3-11に示す．図では，ゲインを1とした場合の位置決め波形を示している． K_d が

大きくなると、外乱応答の残留振動は減少するが、あまり大きくすると、目標値応答が振動的になってしまうことがわかる。

軸方向に10 Nの負荷力を予め加えておき、これを急に除去することでステップ外乱とし、このときの外乱特性からPIDの係数を決定した。図3-12は、各パラメータを変化させたときの外乱応答特性である。

(a) は減衰が足りない場合、

(b) は適切な場合、

(c) は過減衰な場合である。

シミュレーションと、実験結果を比較すると、PIDの制御係数、振動周期には多少差違があるが、傾向はほぼ一致している。これらの差違の主な原因は、モデルに4次系を用いたこと、ブラシの摩擦が考慮されていないことが考えられる。

図3-13に上図の(b)の場合の1 μm 、50 nmのステップ位置決め波形を示す。50 nmの位置決め波形を図3-8と比較すると応答性が良くなっている。また、1 μm ステップではオーバーシュートが大きいものの整定時間が短くなっている。図3-14にフィードフォワードの有無による違いを20 nmステップ波形を静電容量センサで測定した結果を示す。往路復路においてフィードフォワードのある方が応答性が良くなっている。

3. 5 ロータリエンコーダによる位置決め制御

3. 5. 1 装置構成

空気静圧送りねじを用いた非接触位置決め機構により、高分解能の位置決めの可能性を見るために、新たに位置決め実験装置を試作した。図3-15に試作した位置決め機構を示す。ねじ軸を支持している軸受部とスラスト軸受の軸方向剛性(サポート剛性)は、ナット・ねじ軸の剛性とねじ軸を介して直列接続となるため、サポート剛性の低さは、スライダの固有振動数を下げていた。このため、ナット・ねじ軸間の剛性と軸受部の剛性を高くすることをねらい、案内をねじ軸の横に設置し、サポート高さを低くして、軸受部の強度を上げる構成としている。

図3-16に軸受部の模式図を示す。エンコーダ、モータのロータは、ねじ軸と直結にし、カップリングによる固有振動をなくす構成とした。ねじ軸はラジアル軸受とスラスト軸受で支える構成となっている。スラスト軸受のフランジを両側から挟み込む構成となっており、圧力変化がスラスト盤の両側で相殺しあい、給気圧変化に強い構成としている。ナットおよび、ラジアル軸受には多孔質の絞りをを用い、スラスト軸受には面絞りをを用いている。それぞれ30 N/ μm 、80 N/ μm の剛

性を得ている。

軸受部高さは170mm、軸芯高さ80mm、と前述の実験装置の2/3以下である。ねじ軸は外径25mm、長さ400mm、リード6mmである。ロータリエンコダ（キャノン製：X-1）は、1回転1/1800万分割で、1パルス0.35 μ rad、スライダ移動量に換算して0.33nmに相当する。

3.5.2 回転軸制御の特徴

図3-17にモータに正弦波入力を加え、ステージ変位（送り方向）までの周波数伝達特性を測定した結果を示す。図から、12.5Hz、230Hz、および700Hzのピークが観察される。インダクタンスまでを考慮すると、モータの伝達関数は2次系となり、最初のピークはこのモータ諸定数およびねじ軸の慣性モーメントから求めたモータの共振周波数とよく一致している。230Hzはナットねじ軸間で生じる共振で、また、700Hzはモータ軸とねじ軸間で生じる共振点である。

図3-18に同様にモータ加振でタコメータジェネレータにより回転方向の伝達関数を調べた結果を示す。12.5Hz、700Hzおよび、1.4kHzに共振点が存在する。1.4kHzの共振点はタコメータジェネレータの軸のねじり剛性とそのロータによる共振点である。

図3-17と図3-18を比較すると、回転の伝達関数は、ナット・ねじ軸間で生ずる230Hzの共振が消え、700Hzの軸の共振が顕著になっている。これは、ねじによる位置決めではナットからのねじ軸への反力がステージ反力が軸回転方向に影響しにくいことを示している。すなわち、ナットねじ軸間での軸回転力への反力は、Lを送りねじのリード、Rをねじ軸の谷径と山径の平均径とすれば、 $L/2\pi R$ となり、本ねじでは1/10と小さくなるためである。

3.5.3 位置決め実験

図3-19、図3-20にPIDコントローラによる位置決め制御した実験結果を示す。10nmステップおよび1nmステップの位置決め波形を示す。図3-19はステージの移動を静電容量型の変位計で測定した結果で、図3-20はロータリエンコダの出力波形である。図3-20（a）は計算機上に記憶した値であり、図3-20（b）はロータリエンコダ出力をDA変換後のアナログ出力である。DA変換のノイズが大きい、1nmのステップは区別できている。実際は、セミクローズドループによる位置決めであるため、ステージはナット・ねじ軸間の固有振動周波数で振動している。図3-21に、制御中のステージ変位を外部から静電

容量型変位センサで測定した波形を示す。この場合、10 nm程度で振動している。

3. 6 結言

空気静圧送りねじを用いた制御に関し、第2章で明らかとなった動的減衰不足の問題点を解決する制御法を検討するため、空気静圧案内と空気静圧送りねじを組み合わせた位置決め制御実験装置を構成し、以下の結果を得た。

1. 空気静圧送りねじを用いた位置決め制御装置で、レーザ測長干渉計による位置決め制御系を構成し、PIDコントローラで制御したところ、長ストロークの位置決めと、微小ステップの位置決めを実現した。これにより、分解能20 nmステップの位置決めも実現した。
2. PIDコントローラでの制御により、500 nmの位置決めにおいても、第2章で見られた残留振動は認められなかった。
3. ステップ幅により位置決め応答性が異なる非線形性が観察された。この非線形性はDCモータのブラシによることを明かにし、ブラシ圧が減少すると、振動的な位置決め波形となる。
4. フィードフォワードによる位置決め制御を実現し、外乱応答を抑えつつ目標値応答性を上げられることを明らかにした。
5. ロータリエンコーダによるセミクローズドループ制御を検討した。この結果、回転を3/1800万回転すなわち回転角度で $1.05 \mu\text{rad}$ の分解能で制御することができた。これは、リード6 mmの送りねじの場合、ステージ位置の1 nmに相当するが、実際には、10 nm程度の微小振動がある。10 nmを切るステージの位置決めには、この微小振動を解消することが必要である。

第3章 参考文献

- [1] 水兼正宏, 古川勇, ファインセラミックスによる精密運動要素の開発, 精密工学会誌, Vol. 54, No. 7, pp. 1245-1250, (1988)
- [2] 水本 洋, 松原十三生, 薄木雅雄: 静圧ねじの試作 (第4報) - 空気を作動流体とした場合 -, 昭和60年度精機学会春季大会学術講演会論文集, No.328, p421, (1985)
- [3] 下河辺明, 青山尚之, 片桐創一, 梅澤清彦: 静圧直進案内のベルト駆動 (第1報) 直進運動精度, 精密工学会誌, Vol. 53, No. 6, pp. 915-920, (1987)
- [4] 鈴木洋司: 静圧空気案内の構造と応用, 設計製図, Vol. 25, No. 11, pp. 433-436, (1990)
- [5] 荒井隆, 稲崎一郎, 青山籐詞郎, 米津栄, 伊庭剛二: 静圧空気送りねじの開発, 日本機械学会講演論文集, No. 820-16, pp.51-58, ('82-16, 第60期全国大会, 生産システム, 金属加工, 工作機械, 機械要素潤滑) (1982)
- [6] 里見忠篤, 山本晃: 空気式静圧送りねじに関する基礎的研究 (第6報) - 軸直角方向の静剛性 -, 昭和61年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, No. 440, p787, (1986)
- [7] 金井宗統, 石原直: セラミック空気静圧ねじの開発 (I) 昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, No. 595, (1987)
- [8] 澤田 潔, 長岡 浩, 尾高俊一, 河合知彦: マイクロマシンのマイクロパーツのマイクロ加工 (第1報), FUNAC Technical Review Vol. 7, No. 1, pp. 1-10, (1994)
- [9] 福田 真, 石原 直, 柴山昭則, 金井宗統: セラミック空気静圧送りねじによる超精密位置決め, 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会論文集, No. 348, (1994)

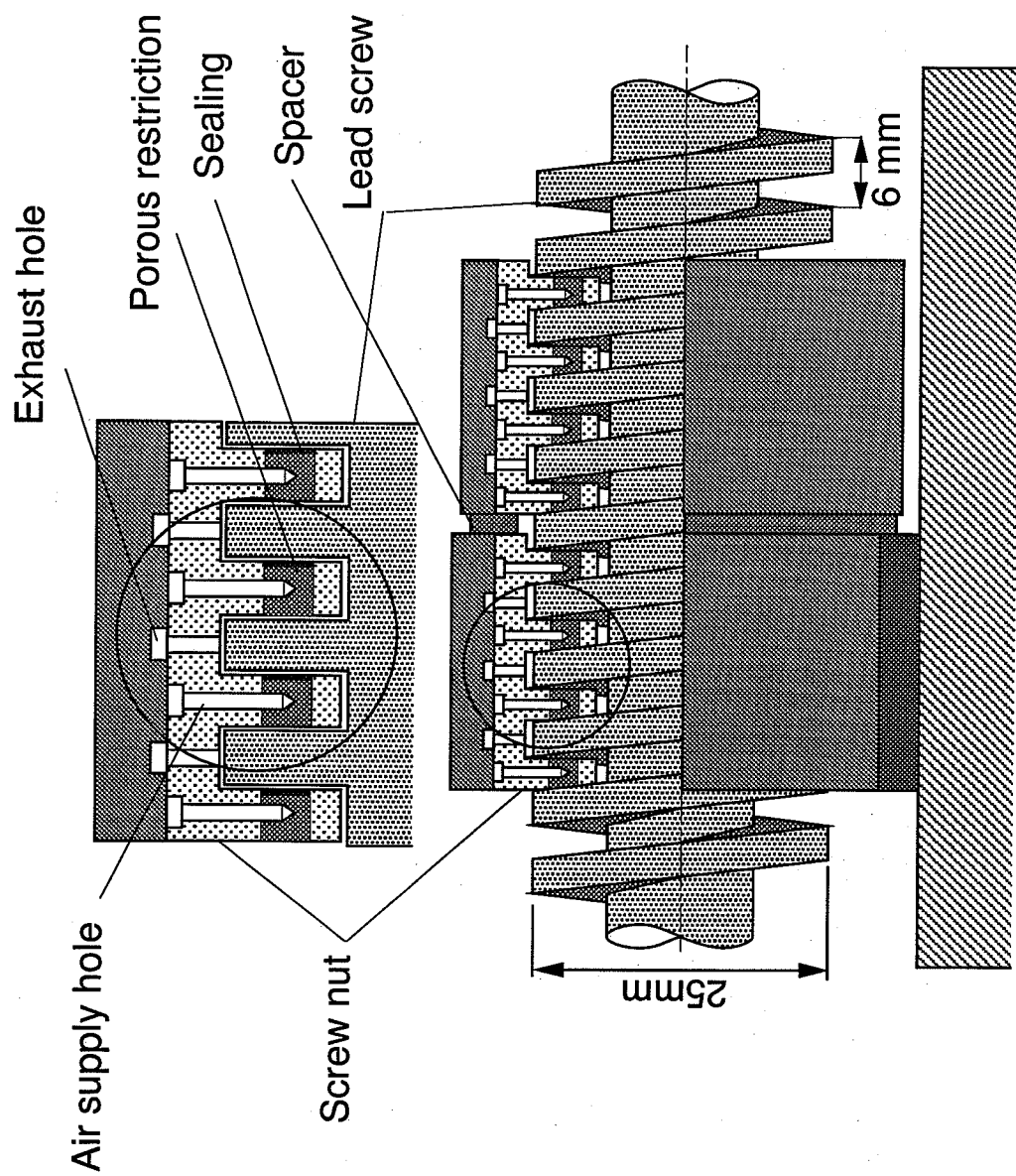


Fig.3-1 Airbearing lead screw structure

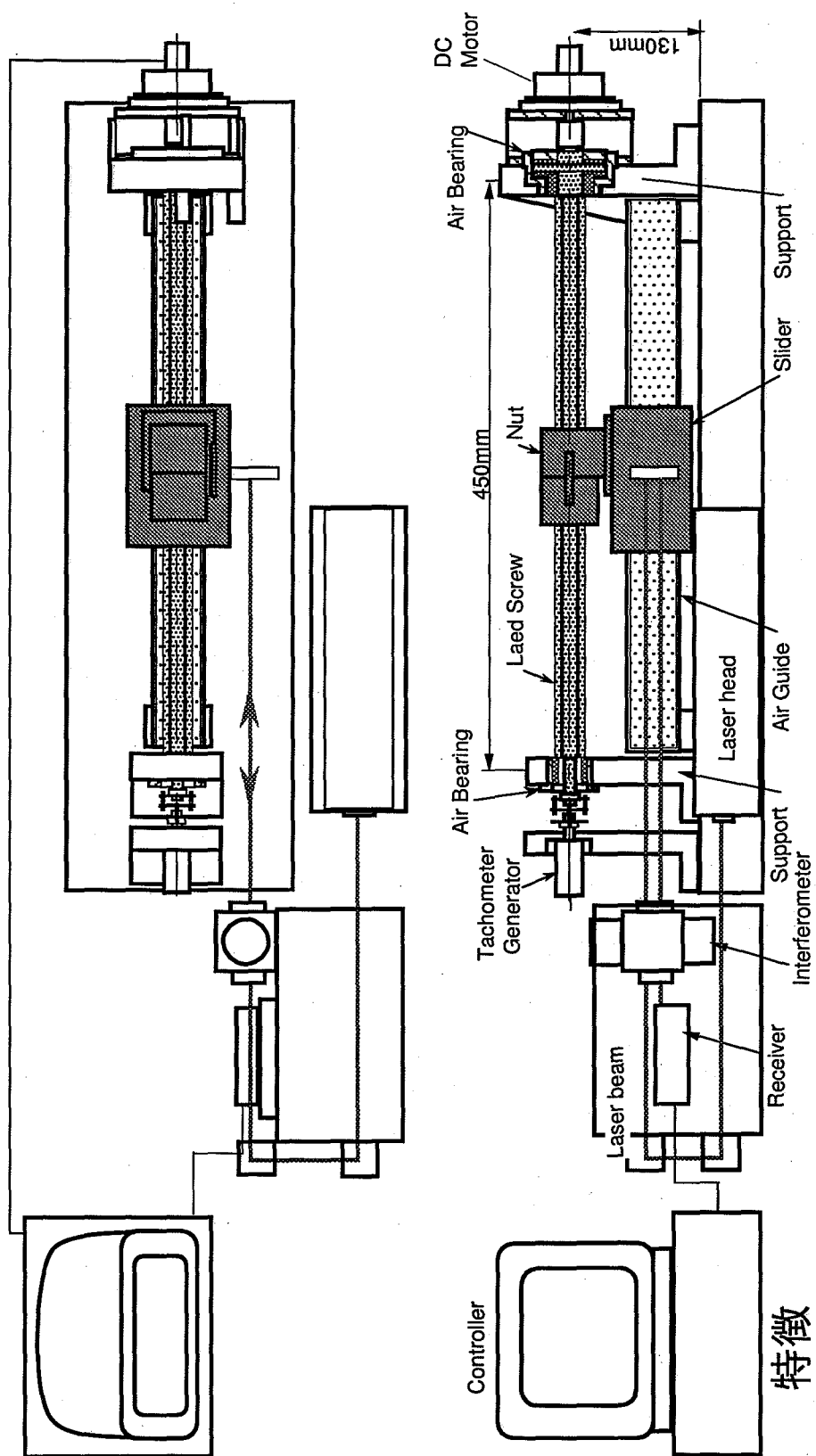


Fig. 3-2 Air bearing positioning system using air bearing lead screw

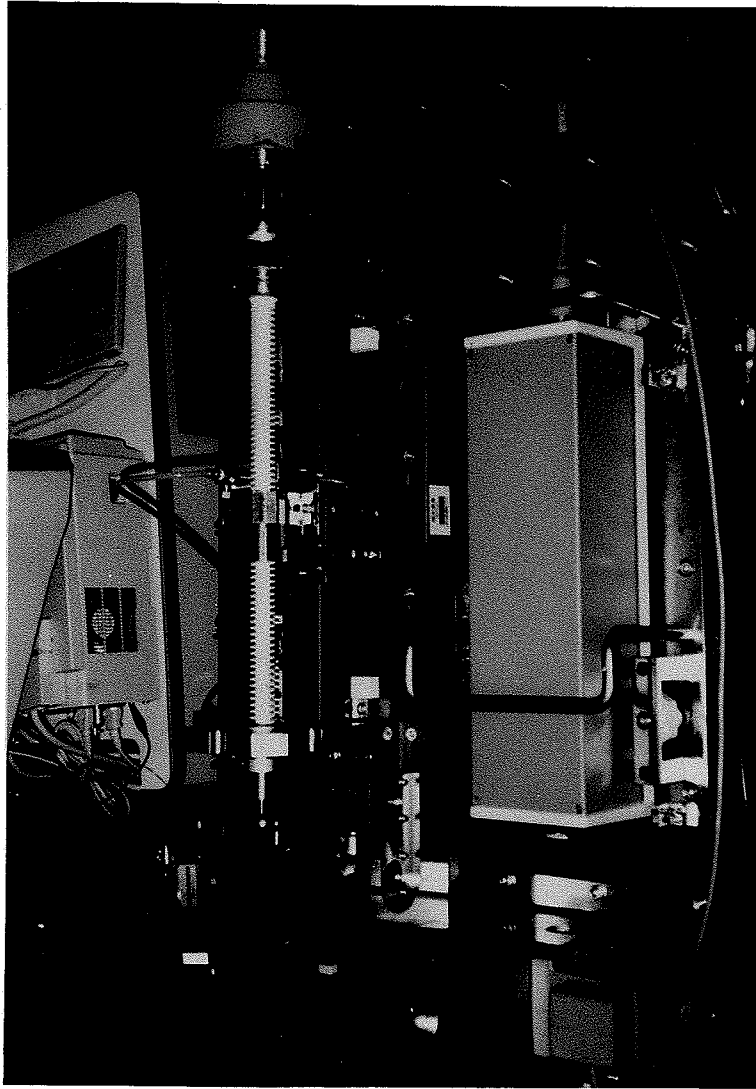


Fig. 3-3 Air bearing positioning system
using laser interferometer

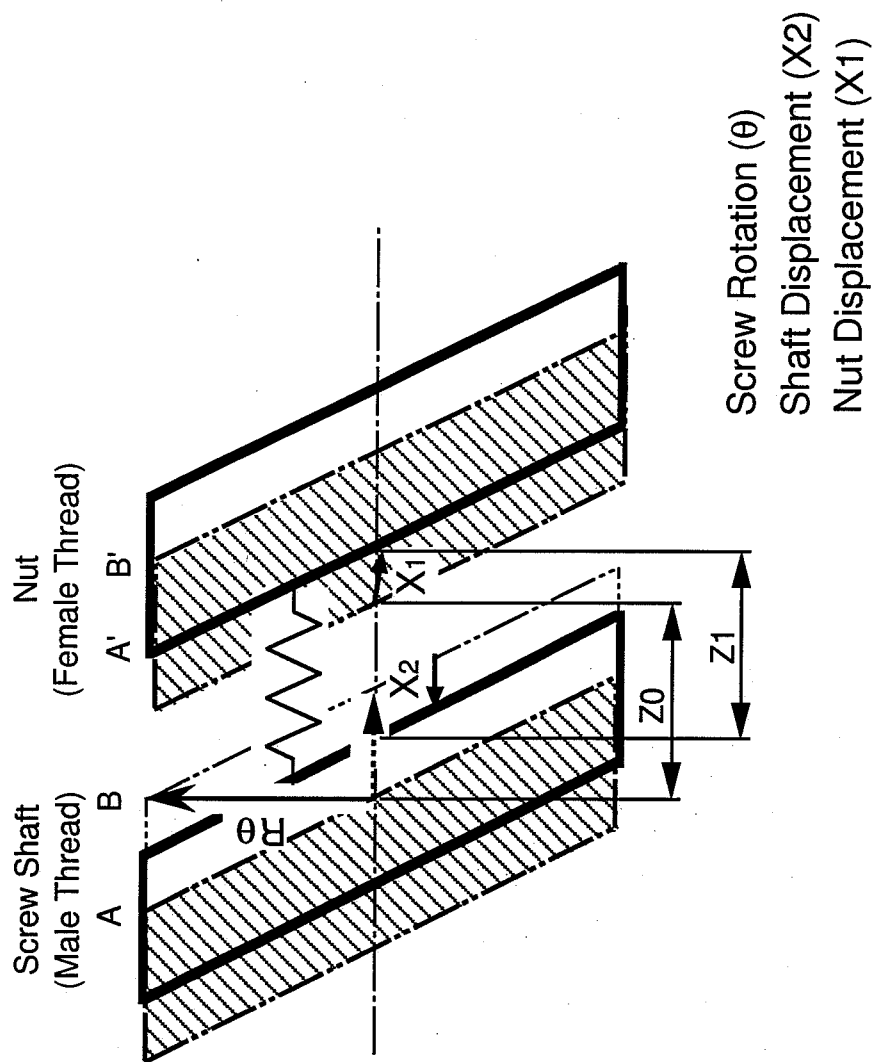
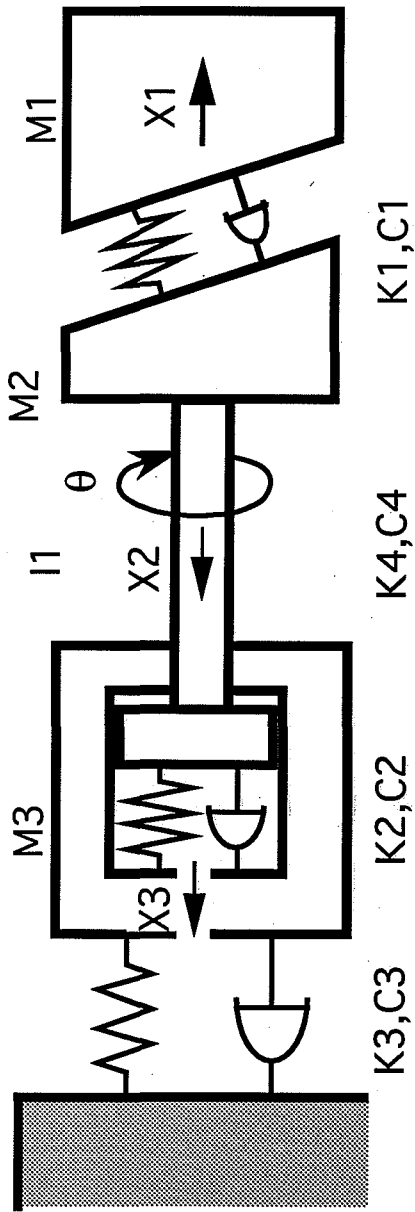


Fig. 3-4 Air bearing screw model



M1: Slider and nut mass

M2: Screw shaft mass

M3: Support mass

I1: Motor and screw shaft inertia

K1,C1: Stiffness and damping coefficient between screw shaft and nut

K2,C2: Thrust air bearing stiffness and damping coefficient

K3,C3: Support stiffness and damping coefficient

K4,C4: Screw shaft stiffness and damping coefficient

Fig. 3-5 Kinematic model of air bearing lead screw

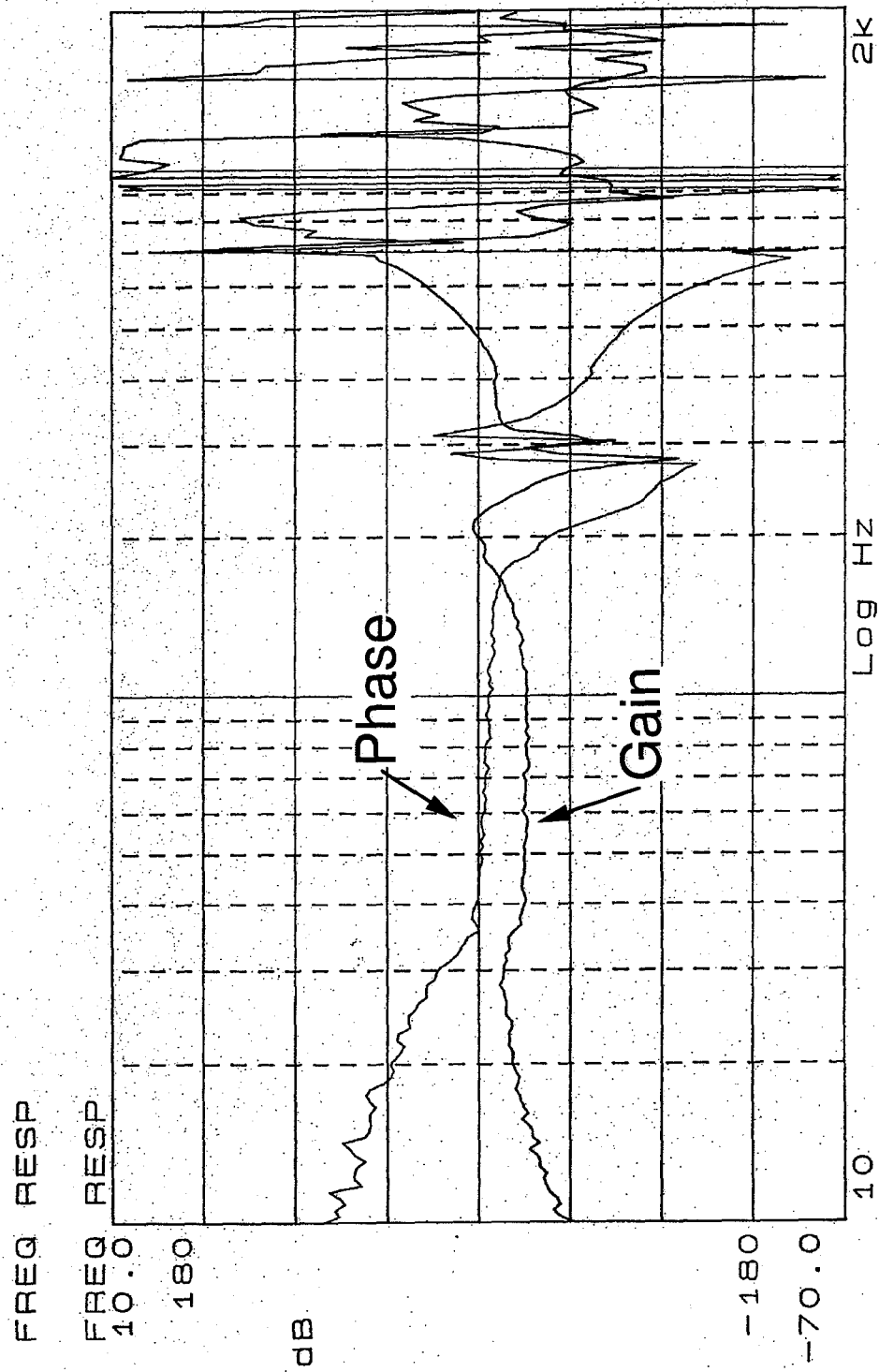
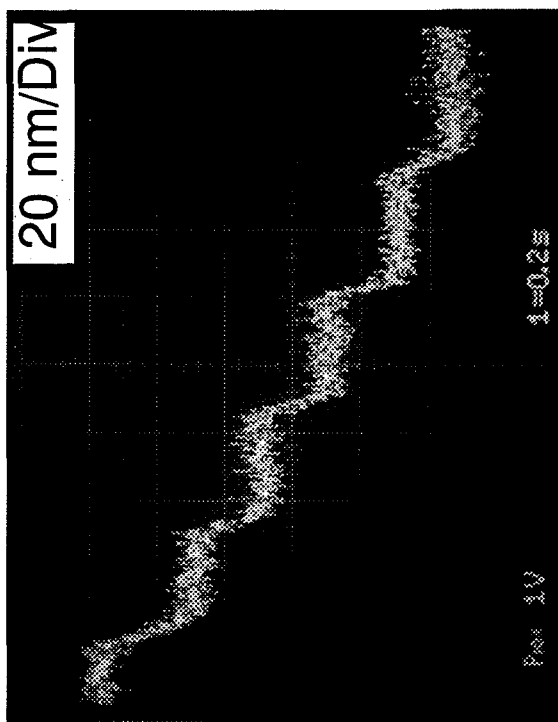
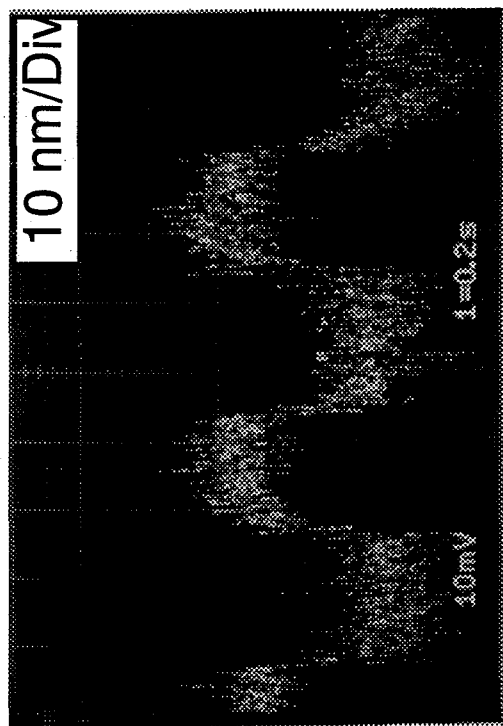


Fig. 3-6 Transfer function between motor and stage motion
(Input: Motor voltage, Output: Accelerate pickup sensor)



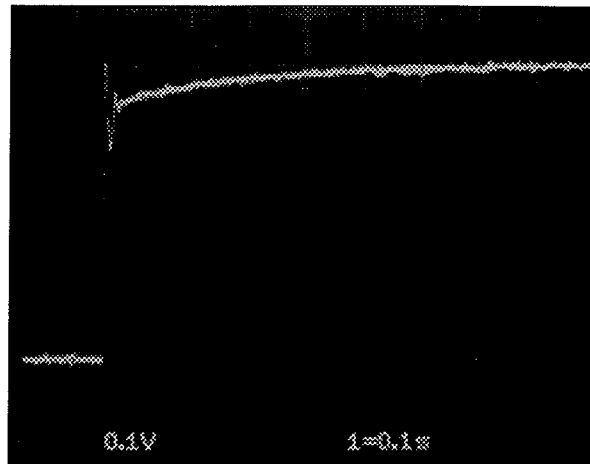
20nm step positioning



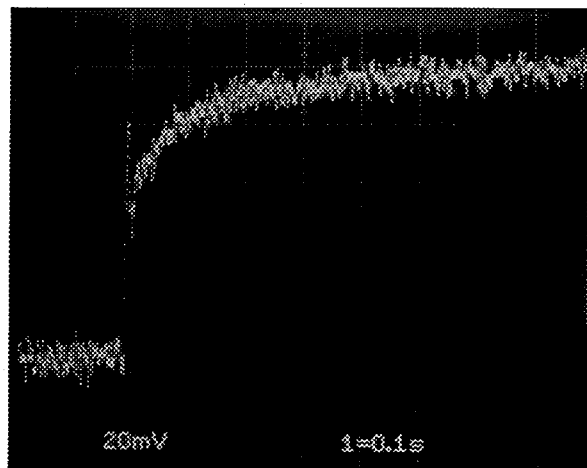
20nm step positioning

(measured by capacitance sensor:
low pass filter with 1 kHz)

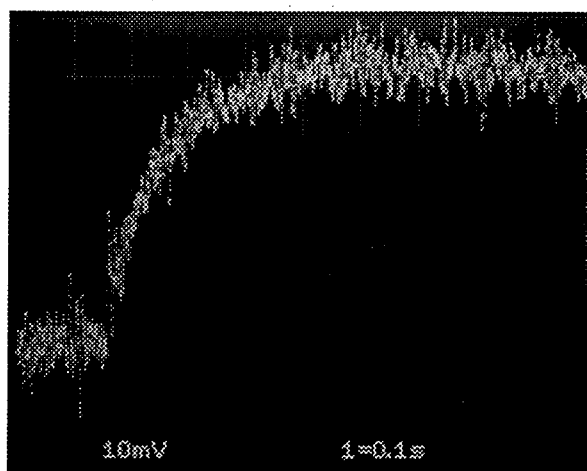
Fig. 3-7 20 nm step positioning



500nm step positioning



100nm step positioning



50nm step positioning
(measured by capacitance sensor:
low pass filter with 1 kHz)

Fig. 3-8 Step positioning
with PID control

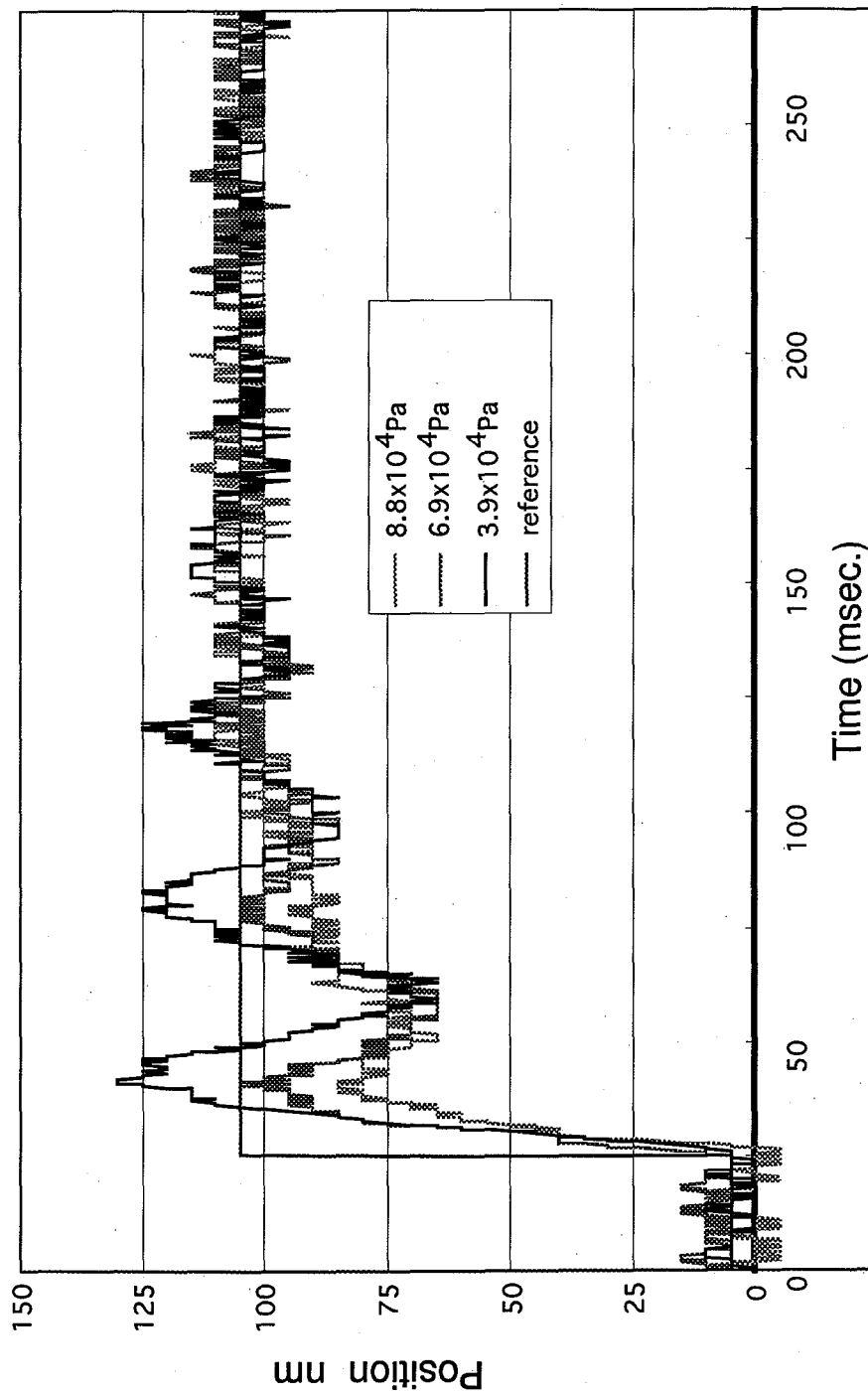


Fig. 3-9 Positioning response change with motor blush pressure

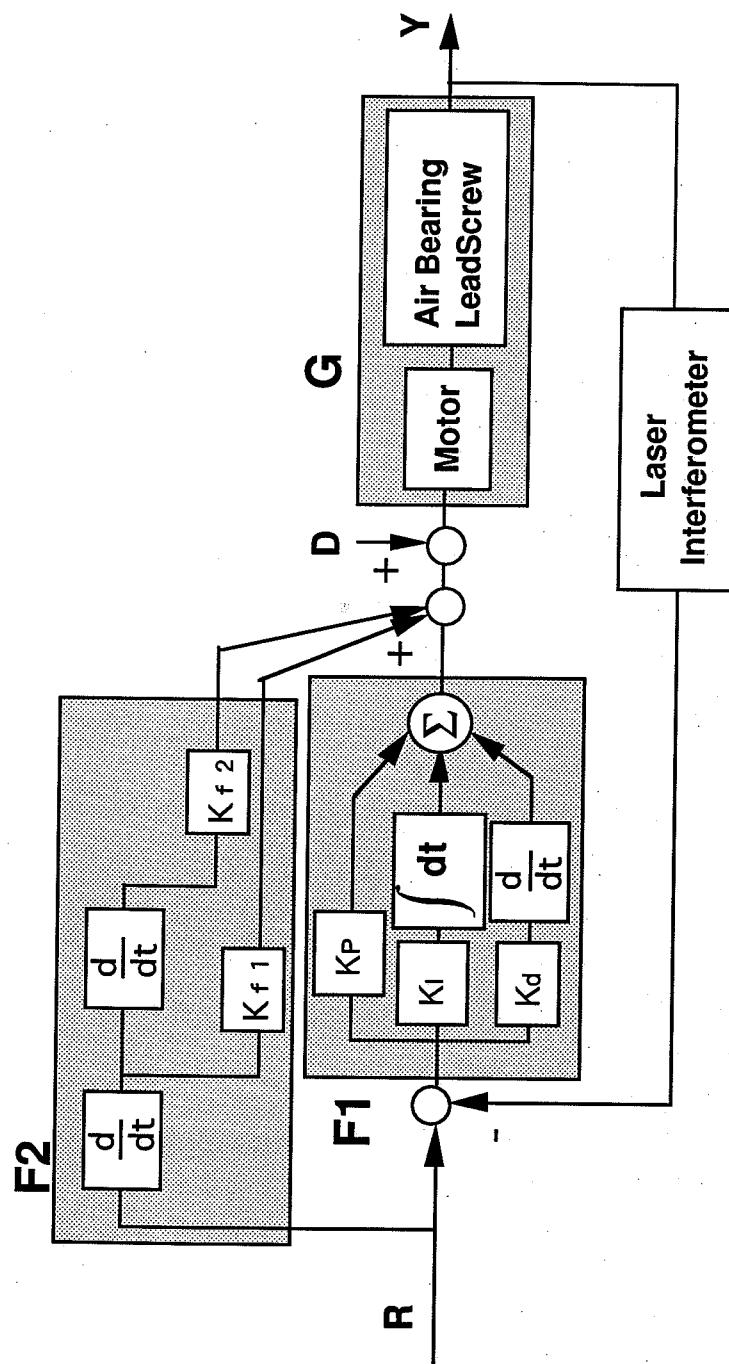


Fig. 3-10 Feed forward control block diagram

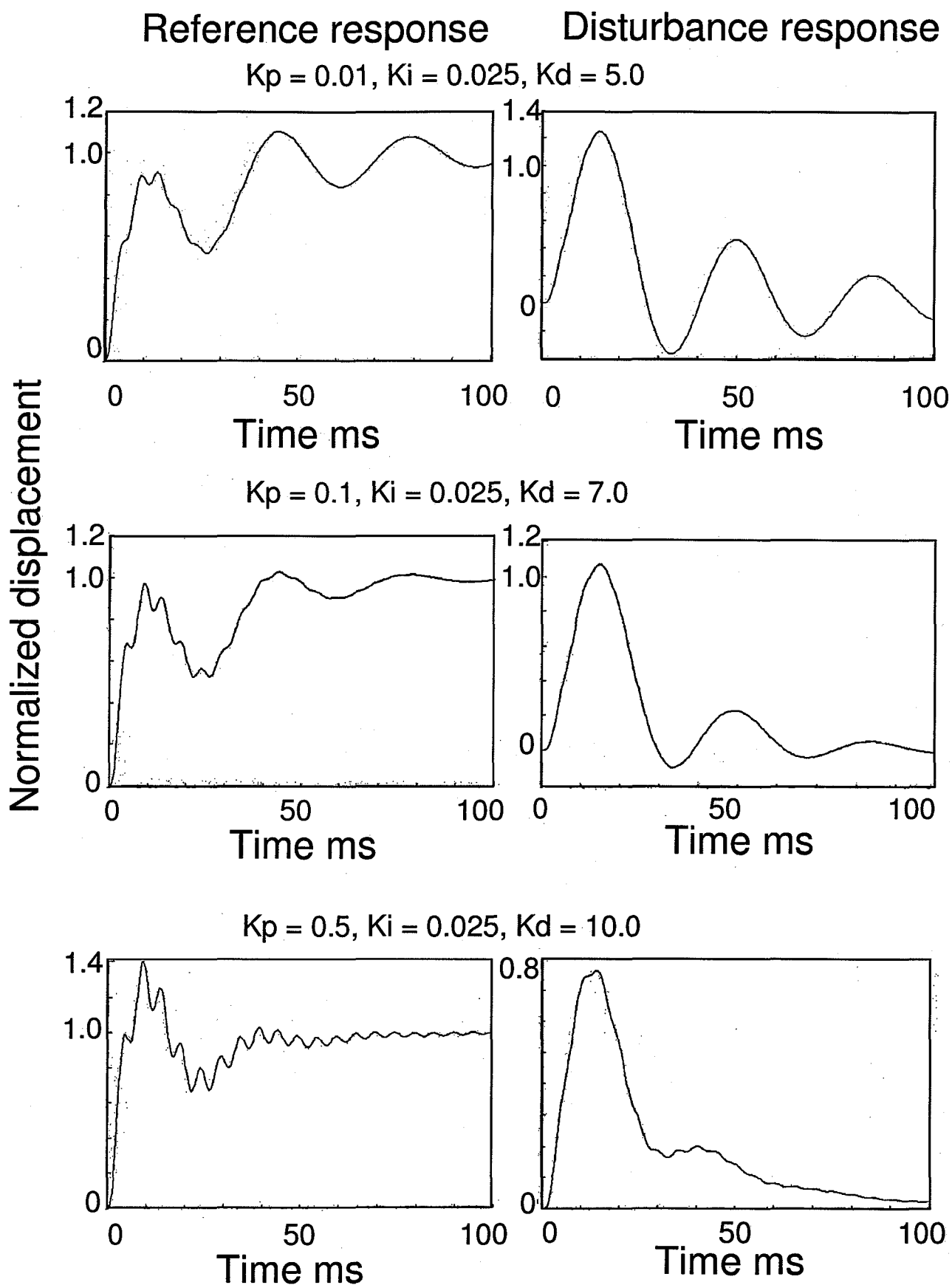


Fig. 3-11 Simulation of feed forward control

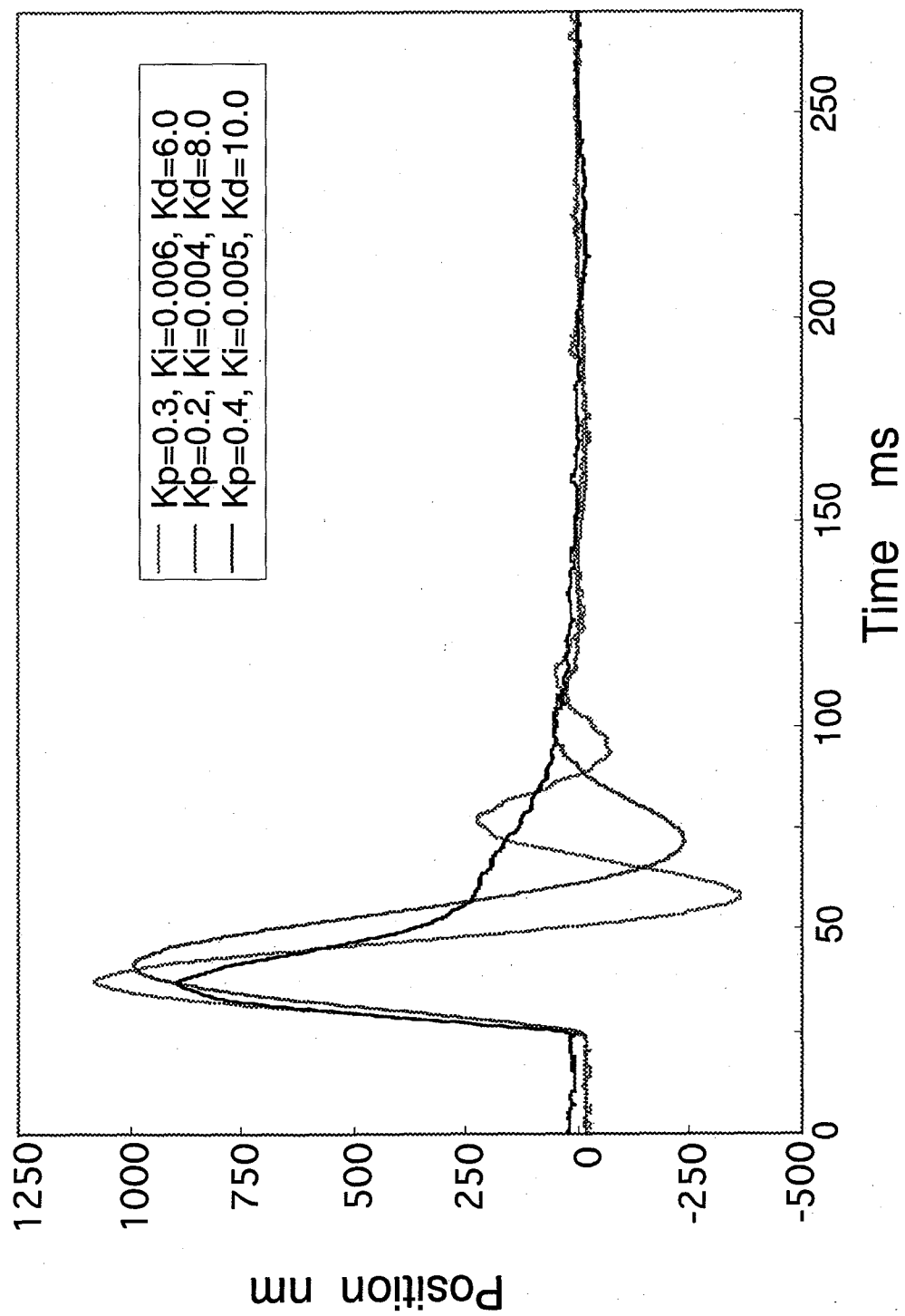
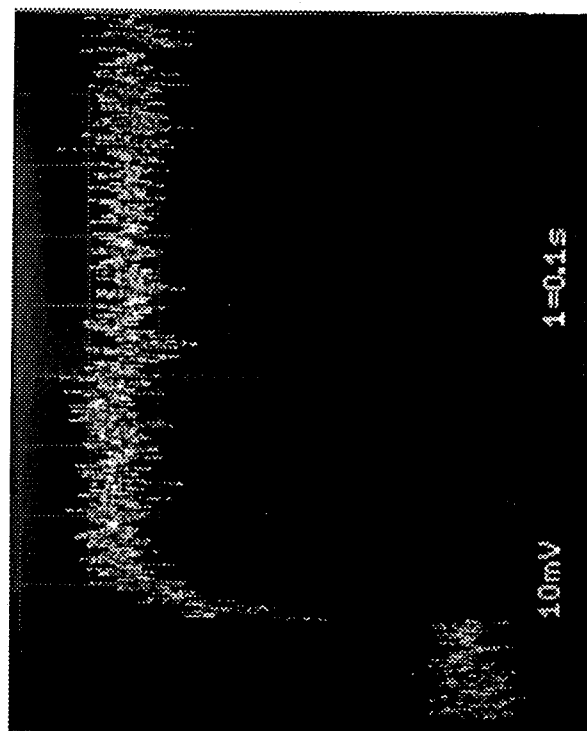


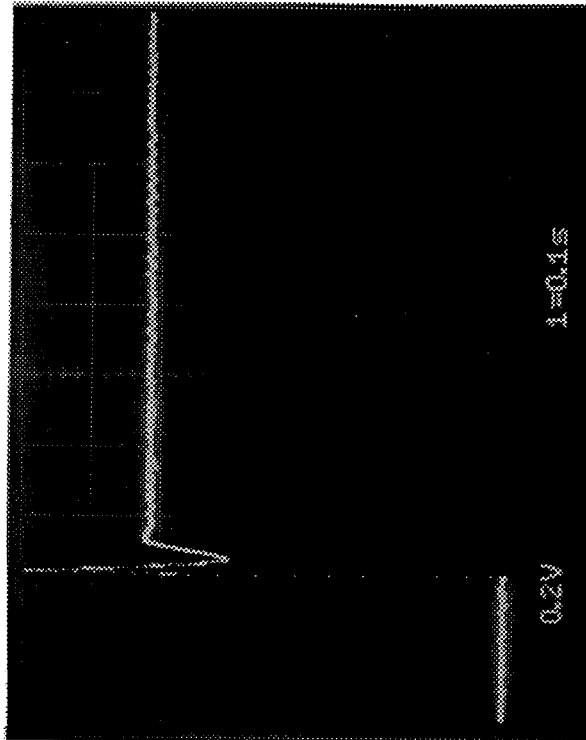
Fig.3-12 Disturbance response to feed forward control



10 nm/Div

(a) 50nm step positioning

(measured by capacitance sensor:
low pass filter with 1 kHz)

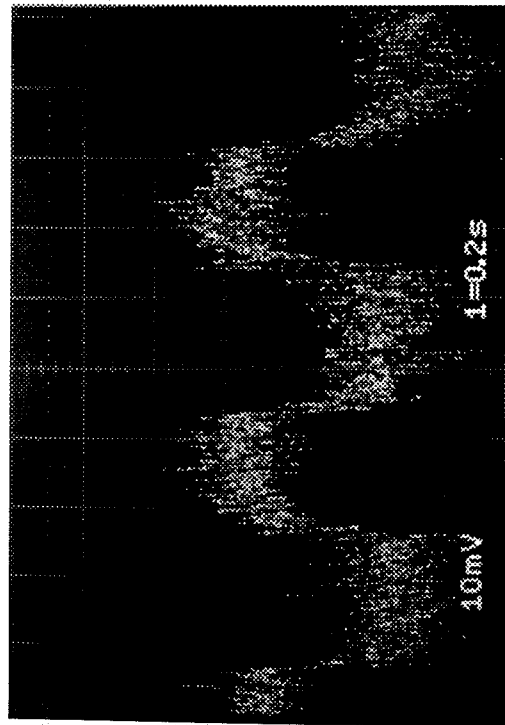


200 nm/Div

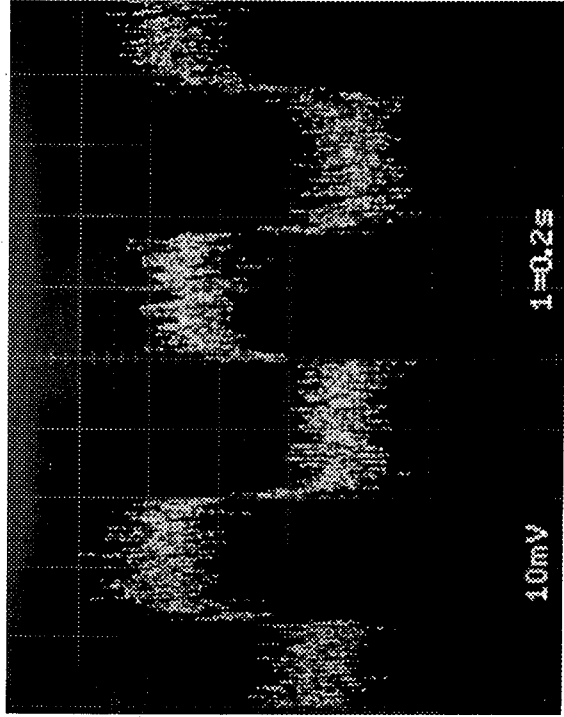
(b) 1 μ m step positioning

Fig. 3-13 Step positioning with FF control

10 nm/Div



(a) PID control (same as fig. 3-7)



(b) Feed forward control

Fig. 3-14 20 nm step positioning with PID and FF control

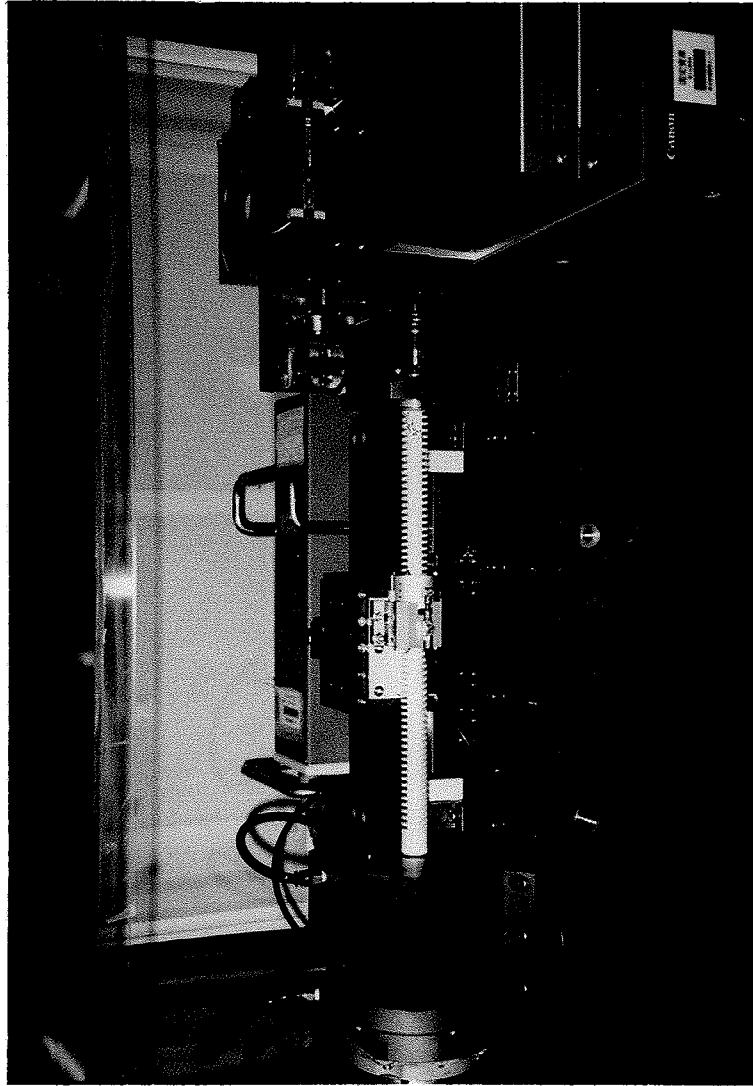


Fig. 3-15 Air bearing positioning system
for rotary encoder control

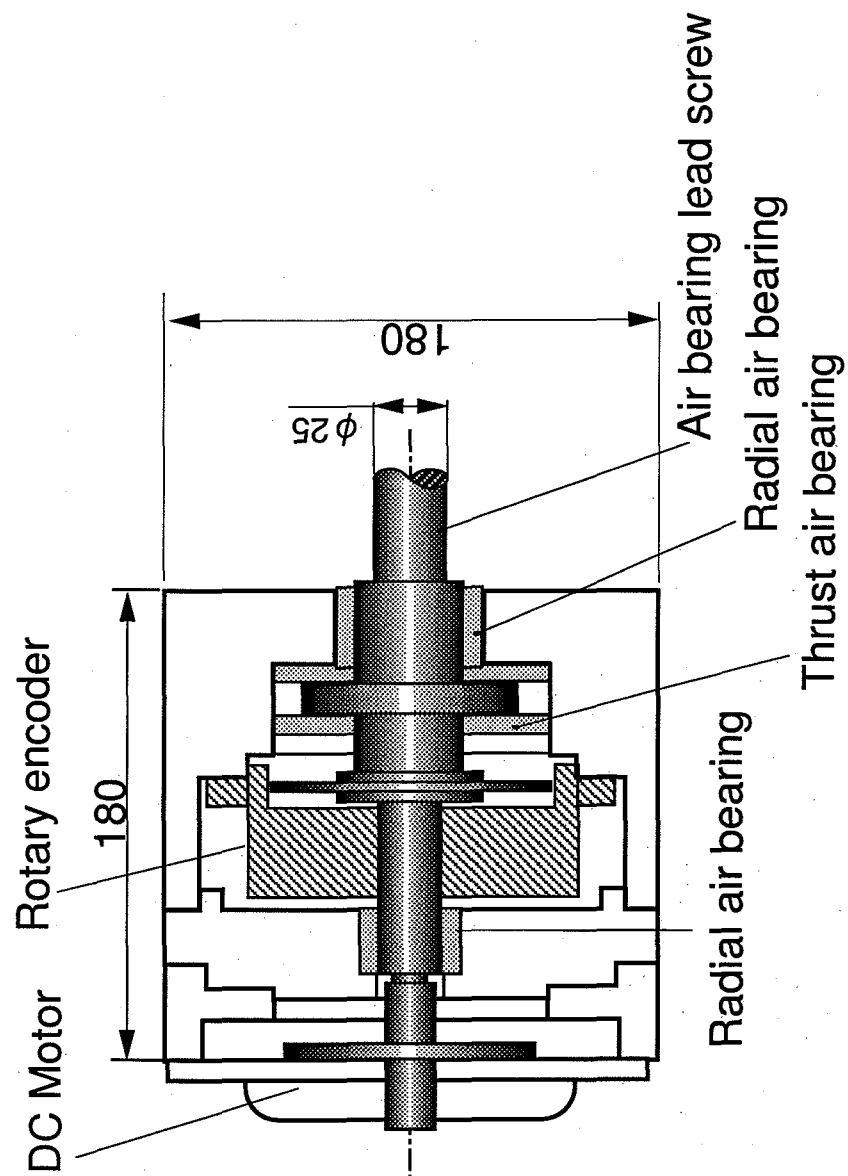


Fig. 3-16 Air bearing support unit

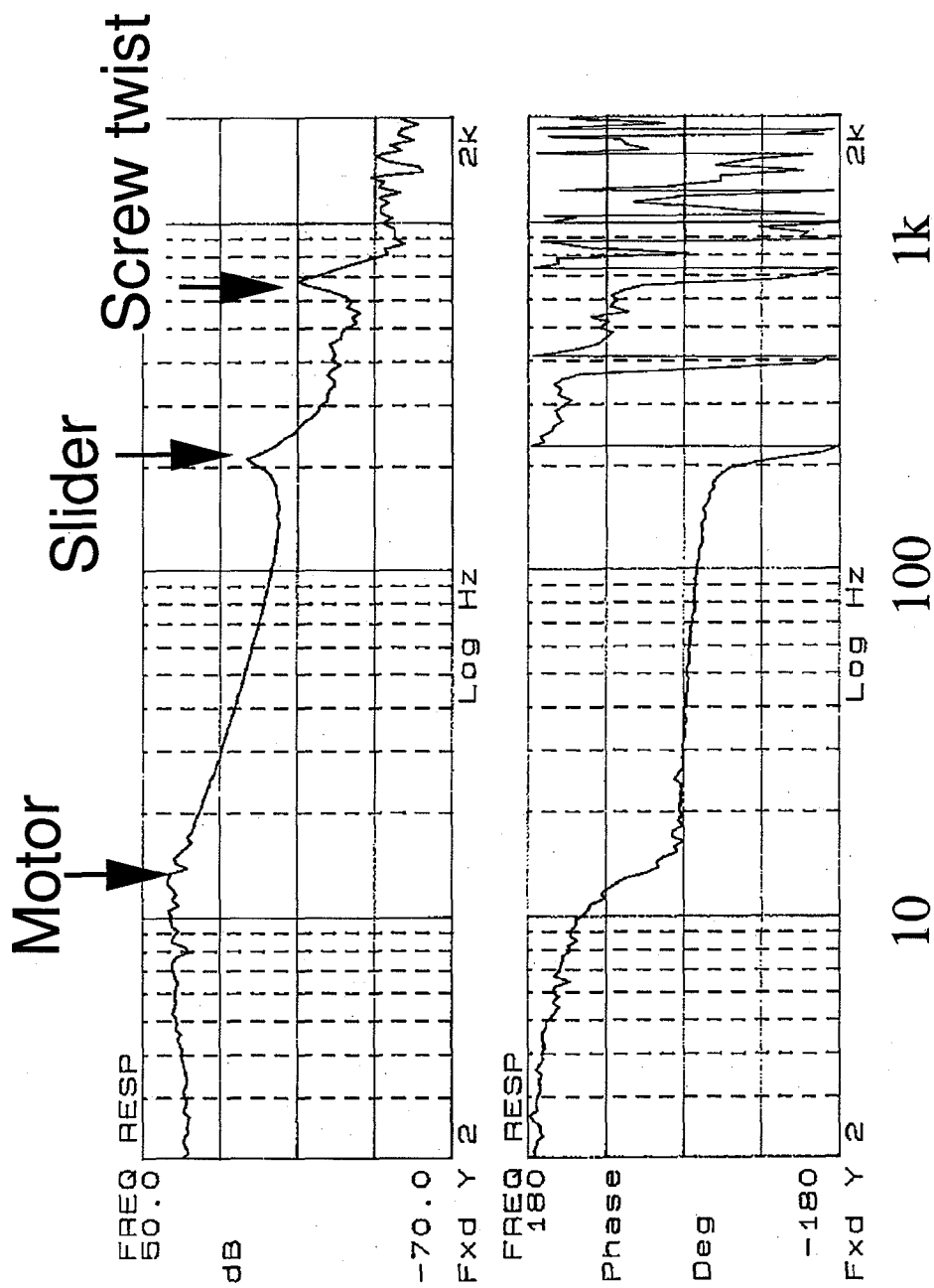


Fig. 3-17 Transfar function between motor and stage motion
(Input: Motor voltage, Output: Capacitance displacement sensor)

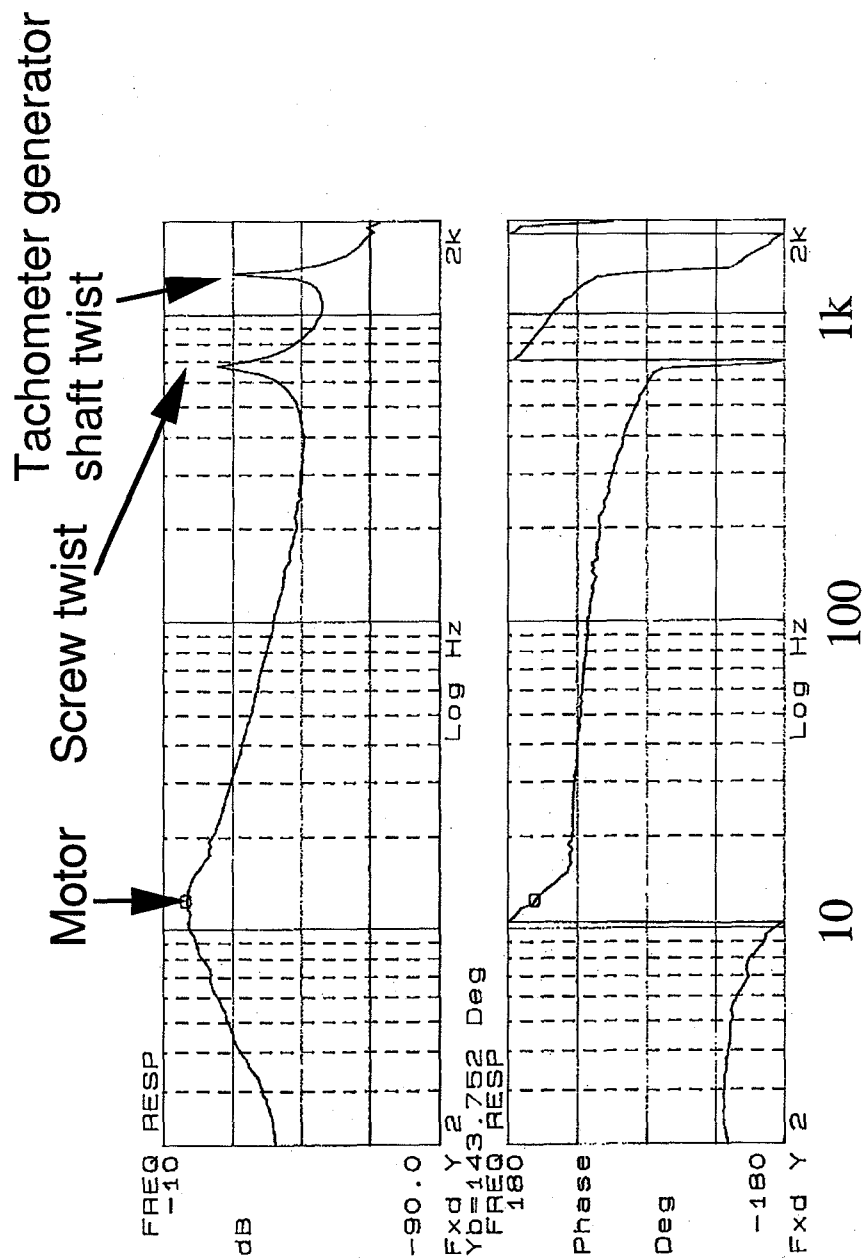
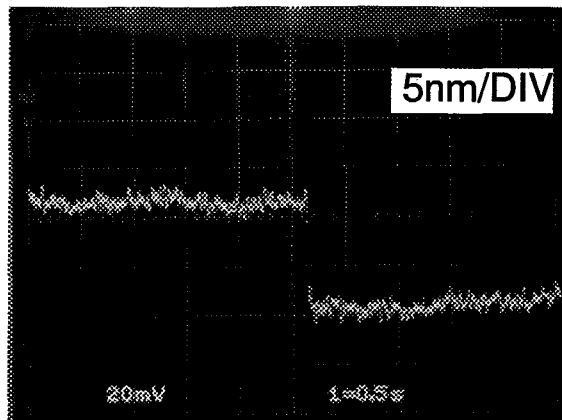
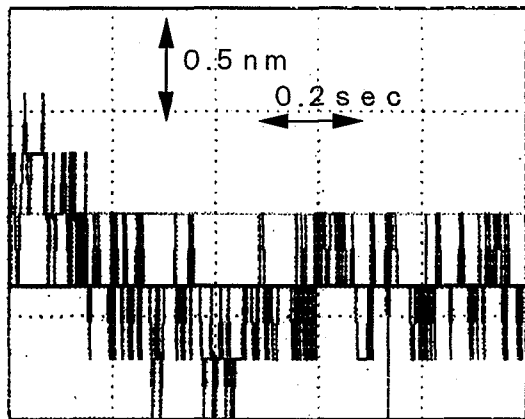


Fig. 3-18 Transfer function between motor and screw rotation
(Input: Motor voltage, Output: Tachometer generator)

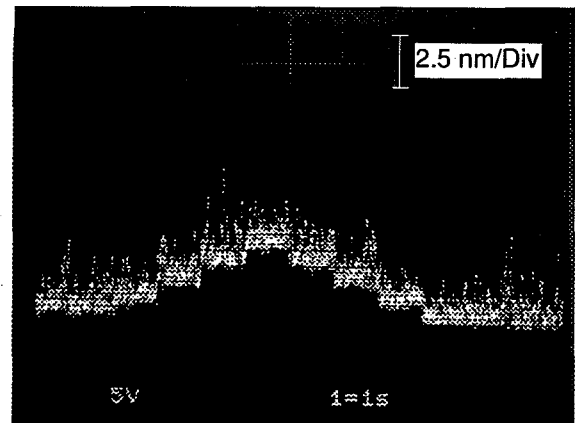


measured by capacitance sensor:
low pass filter with 30Hz

Fig. 3-19 10 nm step positioning

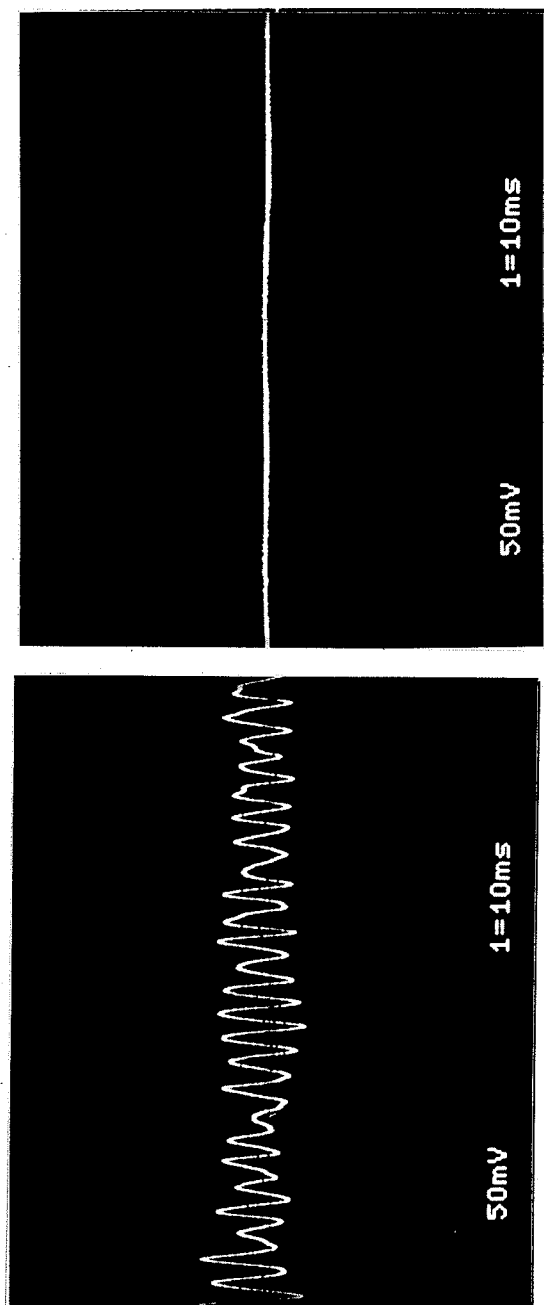


(a) Rotary encoder output
(on computer memory)



(b) Rotary encoder output
(after DA Converter)

Fig. 3-20 1 nm step positioning



(a) measured by capacitance sensor:
low pass filter with 1kHz

(b) measured by capacitance sensor:
low pass filter with 30Hz

Fig. 3-21 Stage vibration

第4章 改良型SR露光装置の試作

4.1 緒言

第2章では、SR露光装置の第一次試作機の構成、精度、性能、問題点などについて述べたが、本章では、以下の4点の課題を解決すべく、新たに改良型露光装置を試作した^[1]。

- (1) 全体寸法
- (2) XYステージの動的減衰
- (3) アライメント精度
- (4) 重ね合せ精度

全体寸法については、SRリングの周辺に多くの露光装置を設置できるよう、横幅をできるだけ狭くする必要がある。第2章で述べた第1次試作機では、ウエハを前面から供給する方式としているため、横幅が2mと大きかった。これを、ウエハの供給を背面からとすることにより小型化を図った。

XYステージの動的減衰については、第3章で明らかにしたように空気静圧送りねじを用いた位置決め機構の制御にPIDコントローラを用いることにより解決する。

アライメント精度については、SR露光装置でのマスクウエハ間のアライメント精度として30～40nmが求められるが、第1次試作機では、60～70nmと大きかった。本章では、この原因を明確にし、これを、改良することによりアライメント精度を向上させる^{[2][3]}。

重ね合せ精度については、1Gbit級LSIに要求される重ね合せ精度として60nmが求められるが、第1次試作機では100nmとこの目標に到ってなかった。これに対し、上記の(2)および(3)の2点を、解決することにより、精度の向上を図った。

4.2 露光装置の全体構成と全体寸法

SR露光装置の機能として、ウエハのステップ移動、マスクとウエハのアライメントに加えて、新たに以下の3点を付加した。

- (1) 露光領域サイズの10mm角から25mm角までの設定機能。
- (2) マスクステージにおけるXYの微動機能。
- (3) ウエハのSR光に対するピッチングヨーイング動作を行うあおり機能。

露光領域サイズ設定機能：LSIの種類により、様々な大きさの露光フィールドがあり、それらに対応して、露光領域サイズを変化させる必要がある。露光領域サイズは、XY方向に移動可能な4枚のX線遮光板（X線ブロック）位置により決定する構造とした。この遮光板には、アライメント位置検出光を遮らずに、X線のみを遮るようガラス板を用いている。

マスクステージのXY微動機能：アライメント用のマーク位置は必ずしも露光フィールド内の同一位置に配置できるわけではない。このため、アライメント位置検出系の検出位置にマスク上のアライメントマークを位置決めする機能が求められる。このため、第1次試作にはなかった機能として、マスクステージにXYの微動機能を付加した。

ウエハ面のあおり機能：ウエハにより、厚さや平面度が変化する。このウエハのZ方向の変動を吸収して、マスクとウエハの平行出しを高精度に行うため、第1次試作にはなかった機能として、ウエハ側にもあおり機構を付加し、ウエハのZ方向高さ、ウエハのピッチングヨーイングの位置決めを可能にしている。

全体構成を図4-1、図4-2に示す。ここで用いる座標系は、第一次試作の場合と同様、SR光進行方向をZ軸正方向とし、水平方向がX、垂直方向がY方向である。回転は、Z軸回りを θ 、X、Y軸回りを α 、 β とする。

露光装置は、主に、マスクウエハのアライメント位置検出を行い、露光領域サイズを決めるアライメント光学系ユニット、マスクの位置・姿勢を決めるマスクステージ、ウエハのZ方向位置姿勢を決めるウエハステージ、ウエハを露光位置に移動し、マスクとのアライメントを行うたて形XYステージ、および、ウエハをマスクステージに搭載するためのウエハオートローダの5つのユニットから成る。

アライメント光学系ユニットの構成を図4-3に示す。アライメント光学系ユニットは、マスクとウエハの最終的なアライメントのために両者の相対位置を検出するアライメント位置検出光学系、露光領域のサイズを決定するX線ブロック、マスクおよびウエハをアライメント可能な範囲まで位置決めするための位置検出を行うレーザ走査型位置検出光学系、マスクウエハのアライメントマーク確認に用いる目視顕微鏡から構成している。各機構は、XY方向に移動可能な移動プレート上に設置され、SR光の露光領域中心を通るZ軸回りに軸対称に配置している。SR光の減衰を防ぐために各機構はヘリウム中に設置している。

アライメント位置検出には、一次試作同様、回折格子を用いた光ヘテロダイン干渉位置検出法を用いているが、一次試作では4チャンネルであったアライメント位置検出系のチャンネル数を、マスクとウエハのXY平面内のアライメントを行うのに必要最小限のXY θ 軸用の3チャンネルとしている。一つのアライメント位置検

出系のチャンネルは、2波長レーザ光源、光の光路を決める光学系、フォトダイオードを用いた検出器を、1枚の移動プレート上に配置して構成している。3枚の移動プレートを、露光領域中心を通るZ軸回りに、水平方向2軸、垂直方向1軸を配置し、露光領域サイズの変更に対応して、検出位置を移動可能な構成としている。

レーザ走査型検出光学系は、マスクおよびウエハの回転の位置決めのための位置検出を行う。一次試作同様、レーザの走査により回折格子マークからの回折光強度を検出している。また、アライメント位置検出光学系同様、3チャンネルの光学系を移動プレート上に構成し、3枚の移動プレートを、露光領域中心を通るZ軸回りに配置し、露光領域サイズの変更に対応している。

目視顕微鏡は、マスクとウエハのアライメントマークの形状確認、マスクウエハのギャップ測定に用いる。CCDカメラにより拡大像の観察が可能である。ギャップの測定は、マスクあるいはウエハのアライメントマークに焦点を合致させたときの対物レンズの移動距離により測定する。対物レンズのZ方向位置の検出分解能は $0.1\mu\text{m}$ である。

マスクステージは、マスクウエハ間の近接ギャップ形成のために、マスクのZ方向位置、姿勢の位置決めを行う。さらに、マスク上のアライメントマークをアライメント位置検出光学系の検出位置に移動するため、マスクのXY方向の並進移動を行う。マスクステージは、後述のXY微動機構と $Z\theta\alpha\beta$ 軸の微動機構であるあおり機構とから構成され、全6軸の微動機構を構成している。

ウエハステージは、ウエハを真空吸着するウエハチャックと、それを搭載した $Z\theta\alpha\beta$ の4軸のあおり機構と、一次試作同様、真空チャックをZ方向に空気圧で上下するZ方向上下機構からなる。構成を図4-4に示す。ウエハのZ方向位置、姿勢の位置決めと、マスクウエハの位置決め時に θ 方向の回転角度を設定する。 $Z\alpha\beta$ 軸の駆動は、歪みゲージによるヒステリシス補償付きのピエゾにより駆動し、 θ 軸は、パルスモータとすべりねじにより駆動している。ウエハステージは、空気静圧案内と空気静圧送りねじを用いたたて形XYステージ上に搭載されている。軽量化を図るため、ウエハチャック、XYステージの材料はほとんどがチタンとセラミック材を用いた。

ウエハオートローダは、SR露光装置に重要な横方向幅を狭くするために、ウエハを装置背面から供給する。ウエハを、収納ケースから取り出し、ウエハチャックに搭載する前に、ウエハの位置、面内回転方向を粗く位置決めする、オリエンテーション機構、たて形に変換するための真空吸着アームなどから構成している。

たて形XYステージは、ウエハを露光位置に移動するためのステップ移動、マスクとウエハのアライメントのための高精度位置決めを行う。また、XYステージの

走り面に平行に、マスクZ方向位置・あおりの位置決めを行うために、ウエハステージに搭載された静電容量型センサにより、マスク上の3点でZ方向高さを測定する。Y方向可動部の重量：17kg，XY軸込みのX軸可動部重量は50kgである。

表4-1に動作シーケンスとステージ機構，位置決めセンサの仕様を示す。

シーケンスは、マスクレベリング，マスク位置決め，ウエハレベリング，ウエハ回転位置決め，ウエハステップ送り，アライメントからなっている。まず，マスクのZ方向位置と姿勢を決めるマスクレベリングにより，マスクをたて形XYステージの走り面に静電容量型センサとあおり機構を用いて，平行に位置決めする。つぎに，マスクをレーザ走査型位置検出計の検出位置に基づいて，マスク微動機構によりマスクの位置と回転を位置決めする。そして，ウエハをロード後，静電容量型センサによりたて形XYステージ走り面にウエハZ α β 軸を平行に位置決めしながら近接ギャップを決める。つぎに，レーザ走査型位置検出計により，ウエハの位置および回転をアライメント可能な位置に位置決めする。そして，アライメントで，光ヘテロダイン干渉位置検出計の検出位置に基づいて，マスクとウエハのアライメントサーボを行う。このアライメントサーボは，XY方向はたて形XYステージで， θ 方向はマスクステージで駆動する。X線露光システムでは露光時間が数秒から数十秒と長いため，露光中の連続的なサーボアライメント制御がマスクウエハ間の機械的なドリフトを取り除いている。

全体の寸法は，1m $\times$ 1.5m $\times$ 1mと小型化した。SRリングの周辺に多くの露光装置を設置できるよう，横幅をできるだけ狭くする必要がある。前述した第1次試作機では，ウエハ前面供給方式であるため，横幅が2mと大きかった。

SR露光装置は，温度23.0 $\pm$ 0.1 $^{\circ}$ Cの恒温ブースの中に設置している。この温度変動では，レーザ干渉計の揺らぎは $\pm$ 50nm程度となるが，アライメント時には，マスクとウエハの相対位置を検出してサーボするためアライメント精度にはこの温度変化が大きな影響を与えることはない。

4. 3 アライメント位置検出系の改良

4. 3. 1 アライメント検出誤差の要因

アライメント位置検出精度悪化の要因として，マスクウエハ間の光学的な干渉がある。この主要因として，

- (1) マスクウエハ間でのアライメント光の多重反射光と本来の回折光との干渉。
 - (2) マスクとウエハ間でのアライメント光の回り込みによる干渉（クロストーク）
- が考えられる。これを図4-5を用いて説明する。

多重反射：

マスクとウエハは20～30 μm の近接ギャップで向き合っているため、アライメント用のレーザ光は、マスクウエハ間で多重反射をおこす。多重反射には、マスク側回折格子マークでの多重反射とウエハ側回折格子マークでの多重反射がある。

マスク側回折格子マークでの多重反射は、マスクを通過した光がウエハで反射され、これが、本来の位置信号であるマスク側マークからの回折光と重なりあい、検出信号の強度変化、位相変化を生じ、位置の検出誤差となる。

ウエハ側回折格子マークでの多重反射も同様で、ウエハからの反射光がマスクで再度反射し、さらに、ウエハで反射した光と本来のウエハ回折格子からの回折光が重なり合って、検出信号の強度変化、位相変化を生じ、位置の検出誤差となる。

これらのマスクウエハ間での多重反射による信号強度変化、位相変化は、マスク上にクロム (Cr) の遮光膜と酸化シリコン膜 (SiO₂) の反射防止膜をコーティングすることにより防ぐことが可能である。

クロストーク：

マスクウエハ間での光学的なクロストークは、マスク側の回折光がウエハ側の検出器に、ウエハ側の回折光がマスク側の検出器に回り込む現象である。実際のマスクやウエハでは、マーク形状は必ずしも理想的ではなく、反射回折光は広がるため、マスク側の反射回折光がウエハ側の検出器に、ウエハ側の回折光がマスク側検出器に回り込み、これが本来の検出信号の強度変化と位相変化を生じ、位置誤差を生じる。回り込んだ回折光は、通常は、本来の回折光と異なる位相を持つため、検出される位相には、本来の回折光の位相とずれた位相が検出され、位相に比例する検出位置に誤差が生じる。クロストークは、多重反射のように、マスクに対する工夫ではなく、露光装置側で軽減する対策が必要である。

4. 3. 2 クロストークの低減

クロストークが存在すると、マスクとウエハが正しくアライメントされている場合でも、マスクとウエハの位相検出信号には位相ずれが検出される。このため、マスクウエハの相対位置が正しく合っているにもかかわらず、マスクとウエハからの位相検出信号は、マスクとウエハの相対位置が違っているかのように検出される。逆に、クロストークのある検出信号をフィードバックして、マスクとウエハをアライメントし、制御上はマスクとウエハの位相差を零としたとしても、もともとの検出信号に誤差を含んでいるためマスクウエハの相対位置はずれてしまう。このように、クロストークが存在すると、マスクとウエハのアライメント時には潜在的な位

置誤差が生じるこのになる。

このクロストークをどの程度に抑えたらよいかを計算する。検出器で検出される回折光は、強度と、位相を持ったベクトルで表現可能である。そこで、マスクあるいはウエハのマークから回折される本来の回折光を、 V_{m0} 、 V_{w0} 。ウエハ側マークからマスク側検出器への回り込みによる回折光を V_{mw} 、マスク側マークからウエハ側検出器への回り込みによる回折光を V_{wm} 、マスク側検出器ウエハ側検出器で検出される信号をそれぞれ V_m 、 V_w とする。

クロストークによる回り込み光は、マスクおよびウエハの信号から生じるので、本来の信号に比例した量だけ回り込むと考えれば、マスクからウエハへの回り込み光を V_{wm} 、ウエハからマスクへの回り込み光を V_{mw} として、次のように表される。

$$V_{wm} = \alpha_m V_m \quad (4-1)$$

$$V_{mw} = \alpha_w V_w \quad (4-2)$$

ここで、 α_m 、 α_w はスカラ量で、クロストーク率と呼ぶ。

検出器で検出される信号 V_m 、 V_w は、本来の回折光とクロストークによる回り込み光とのベクトル和として表わせるので次式で得られる。マスク側の検出信号 V_m およびウエハ側の検出信号 V_w は

$$V_m = V_{m0} + V_{mw} \quad (4-3)$$

$$V_w = V_{w0} + V_{wm} \quad (4-4)$$

また、本来の検出回折光と検出された信号間の位相を ϕ_m 、 ϕ_w で表せば、

$$\cos(\phi_m) = (V_m, V_{m0}) / |V_m| |V_{m0}| \quad (4-5)$$

$$\cos(\phi_w) = (V_w, V_{w0}) / |V_w| |V_{w0}| \quad (4-6)$$

マスクとウエハの位相誤差を $\Delta\phi$ とすれば、

$$\Delta\phi = \phi_m - \phi_w \quad (4-7)$$

これが、クロストークによるマスクとウエハ間の位相誤差、すなわち相対位置誤差となる。

いま、マスクからのクロストーク率を一定として、ウエハからのクロストーク率を変化させたときのマスク信号とウエハ信号の比 ($|V_m| / |V_w|$) に対する位相差 $\Delta\phi$ を計算する。クロストークを4.6%と、2%としたときの計算結果を図4-6に示す。また、図には、クロストーク率を4.6%と1.6%の場合の位相差の実測値を示す。

マスクの信号が一定と考えた場合、ウエハからの回折光強度が高く、検出信号強度が高くなると、マスク側への回り込み光も増加するため、検出される位相誤差が大きくなる。逆に、ウエハ信号が小さくなると、ウエハ側信号において、マスクからの回り込み信号の影響が大きくなり、やはり位相誤差が大きくなる。このように、

ウエハ信号強度が高くて、マスク信号強度が高くて、クロストークによる位相誤差は大きくなる。すなわち、マスク信号強度とウエハ信号強度はほぼ等しい場合が最もクロストークによる位相誤差が少ない。

クロストーク率が増加すると、両端での立ち上がりが急峻となり、信号強度変化に敏感となる。すなわち、同じ信号強度変化でも、クロストークが増加すると位相誤差すなわち位置誤差が増加する。

図から、マスクとウエハの信号強度変化が10倍あっても、クロストークによる位置誤差を40 nm（目標とするアライメント精度以内）以内とする条件を求めると、クロストークを2%以下とすればよいことがわかる。

このクロストークを小さくする方法として、マスクとウエハのマーク間距離を離すことが考えられる。しかし、ウエハ当たりのデバイス領域を多く取るためには、マーク間距離を小さくすることが求められる。また、マスクとウエハの両アライメントマークを同一のレーザ光で照射するので、マーク間距離はレーザビーム径で決まることになり、大きく取れない。そこで、必要最低限のアライメント精度を得るための最も離れたマーク間距離を選ぶことになる。

本装置での、アライメント位置検出系の検出器位置でのビームの広がりや回折光の強度分布から求め、クロストークを2%以下とするために、マーク間隔を従来の2倍の100 μm とした（図4-7）。

4. 4 駆動・位置決め機構の改良

4. 4. 1 たて形XYステージ

第一次試作の露光装置では、たて形定盤を基準にした一面案内で、ウエハの供給は前面から行う構成であった。このため、ウエハ供給時には、ウエハユニットをX方向に大きく移動する必要があり、装置の大型化を招いていた。改良型露光装置では、ウエハを背面から供給する方式とすることにより横幅の全長を1 mと小型化した。すなわち、一次試作機では逆T字形であったX軸スライダをL形とし、その縦軸をYスライダの案内として、Yスライダ上に α 軸で回転開閉可能なウエハステージを搭載する構成とした（図4-8）。これにより、ウエハ供給のためにXYステージを退避させる必要がなくなり、横幅をコンパクトにすることが可能となった。

XYステージは、高剛性、軽量、高精度化のためにセラミック材料を使用し、一次試作同様、案内支持、送り全てを空気静圧浮上で非接触な構成としている。XY軸ともに、ストロークは230 mmで数10 mmのステップ移動とナノメートルオーダーの微動を行う。ベースとなる案内面から、ウエハまでの高さは、一次試作同様

110 mmと低く抑えている．全体として，L字形のグラナイト製のカラムをベースとしている．

X軸の可動部質量は50 kgほどあるため，4個のナット2個づつを互いに対向させたタンデム方式のナット部構造として負荷容量を上げている．Y軸は2個のナットを対向させたダブルナット方式である．送りねじは，XY軸ともリード6 mm，ねじ軸外径25 mmである．XYスライダは，凸形案内をコの字形のスライダで挟み込む構造となっており，Z方向はマグネットの吸着力とセラミック多孔質絞りからの空気圧による浮上力をバランスさせている．

ウエハステージは，膜シールピンチャックによりウエハを真空チャックするウエハチャックと，パルスモータとピエゾ素子を用いたZ方向移動，あおりおよびZ軸回りの回転を行う4軸微動機構からなる．ウエハの供給は，Y軸スライダ上のウエハチャックを α 軸方向に回転開口し，水平になったウエハチャック上面に，ウエハオートローダからウエハを搭載して行う．

XYステージの位置決め制御は，第3章で検討したように，位置のみをフィードバック量とするPIDコントローラによる制御である．制御装置として，68020をCPUに持つ，サンプリング周波数2 kHzのデジタル制御装置を開発した．マスクとウエハのアライメントにおいては，定盤の振動による外乱を抑制するため，フィードバックによる2自由度の制御系を構成している．マスクとウエハのアライメントでは，マスクとウエハの相対位置が零となるようにアライメントするため，目標値は常に零となるのでフィードフォワードの2自由度制御は使えない．このため，ここでは，フィードバックによる2自由度制御系を採用した．位置のフィードバックセンサには，ステップ移動時は，第1次試作と同様，分解能 $\lambda/128$ のレーザ干渉計（ λ は632.8 nm）を，アライメント時は，分解能5 nmの光ヘテロダイン干渉位置検出計を用いている．

4. 4. 2 マスクステージ

マスクステージは，X，Y，Z， α ， β ， θ の6軸微動機構から成っている．マスクステージのベース面からの高さをできるだけ低くするよう，XY微動機構（XY plate）に，Z $\alpha\beta\theta$ 軸の微動機構であるあおり機構（ θ -Tilt plate）を埋め込む構造としている．これを，図4-9に示す．XY微動機構は，弾性板ばねによる案内と，パルスモータ回転出力をすべりねじによる並進運動に変換して，さらに，レバーによる縮小機構により1/4に縮小した駆動機構から構成している．この機構により，ストローク ± 1 mmにおいて，分解能20 nmの微小変位を生み出している．

あおり機構は，弾性板ばねによる案内と，3軸のチルト用のピエゾと1軸の回転

用ピエゾにより駆動している。Z方向の高さを低くするため、ピエゾ変位を縦横変換してチルト変位を生み出すチルト駆動ユニットを開発した。θ回転機構は、直径100mmの円盤状に設定した、4枚の弾性板ばねにより案内され、ピエゾで駆動する。

あおり機構のチルト駆動ユニットを図4-10に示す。案内は、L形板ばね機構により、ねじり変位による縦横変換を行っている。これにより、ベースからマスク面までの高さを60mmと低く押さえることが可能となった。

4.5 結言

非線形を除去した機構、高精度分解能の検出法により重ね合せ精度を得る方針を維持しつつ、第2章で課題となった、

- (1) 装置サイズ
- (2) 位置決め特性
- (3) アライメント精度の未到達点
- (4) 重ね合せ精度の未到達点

の問題点を克服すべく、新たな試作を行った。

改良点は以下のとおりである。

- (1) 全体構成としては、たて形XYステージをL形、ウエハを背面供給とすることにより、SR露光装置で特に重要な横幅の短縮を行い、小型化した。また、一次試作にない機能として、以下の機能を付加した。
 - (a) 露光領域を10mm×10mm～25mm×25mmで設定機能。
 - (b) マスクステージにXYの移動機能。
 - (c) ウエハ面のあおり機能。

これらにより、露光領域が可変となり、アライメントマーク位置に許容範囲が増え、ウエハ厚さの許容範囲が広がった。

- (2) 位置決め制御では、第3章で述べたデジタルのPIDコントローラによる位置制御を行い、動的減衰特性を向上させ、位置決め的高速化を図った。
- (3) アライメント位置検出法では、遮光膜、反射防止膜により多重反射を低減した。また、クロストークを軽減するため、クロストークのアライメント誤差への影響を明らかにし、マスクとウエハ信号比が10倍変化しても、アライメント誤差40nm以下を得るためのアライメントマーク間の距離を求めた。アライメントマーク間隔を従来の2倍とした構成のアライメントマーク配置を用いることとした。

第4章 参考文献

- [1] S. Ishihara, M. Suzuki, M. Kanai, M. Fukuda: An advanced X-ray stepper for 1/5- μm SR lithography, Microelectronic Engineering, Vol. 17, pp. 141-144, (March 1992)
- [2] M. Fukuda, M. Suzuki, A. Shibayama: Improvement of alignment accuracy of an SR stepper: Microelectronic Engineering, Vol. 23, pp. 189-192, (March 1994)
- [3] M. Suzuki, M. Fukuda, F. Omata, H. Tsuyuzaki, T. Ohkubo and I. Okada: An X-ray mask for optical heterodyne alignment, SPIE Vol. 2254, Photomask and X-ray Mask Technology, pp. 329-336, (1994)

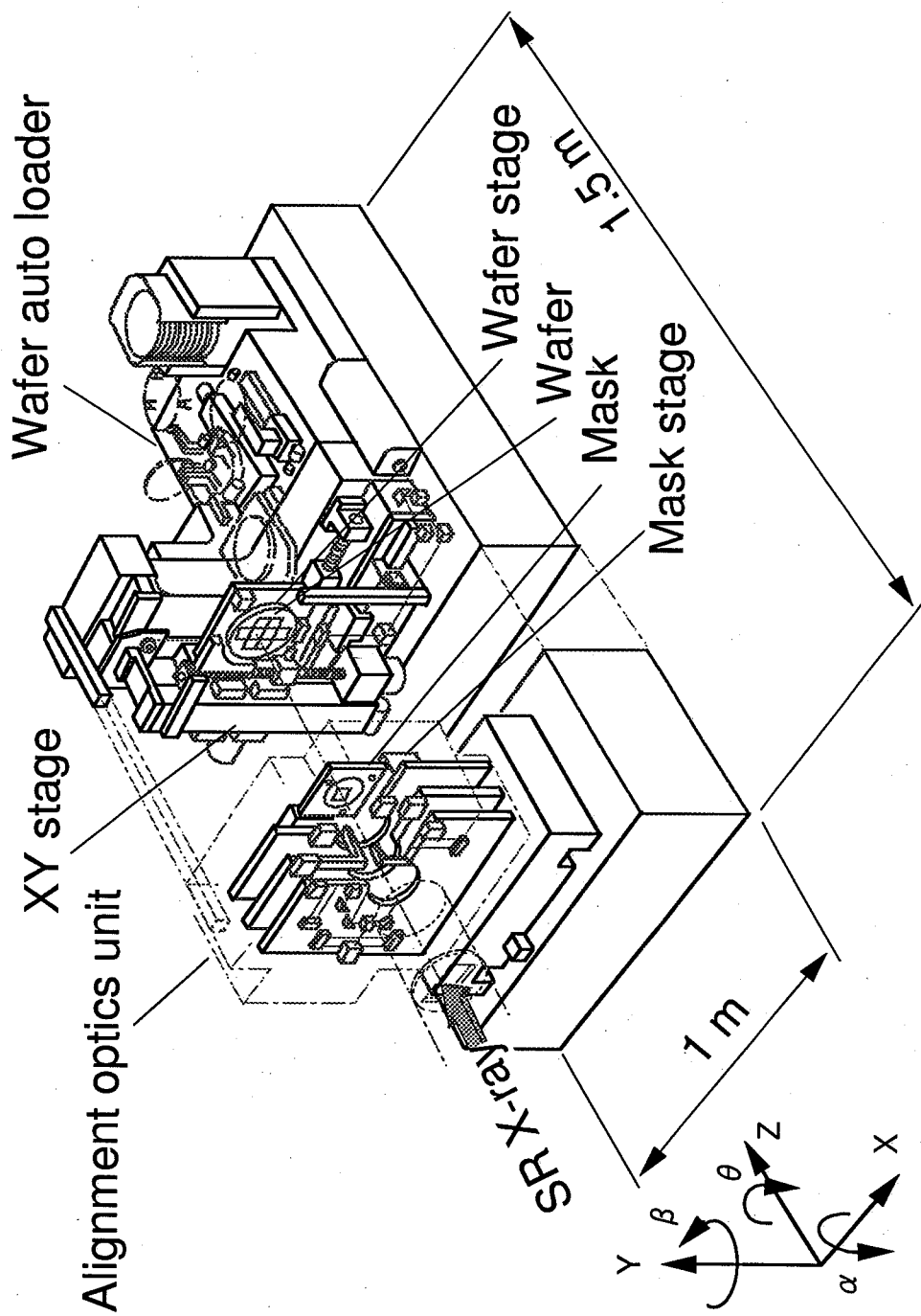


Fig. 4-1 SR X-ray stepper

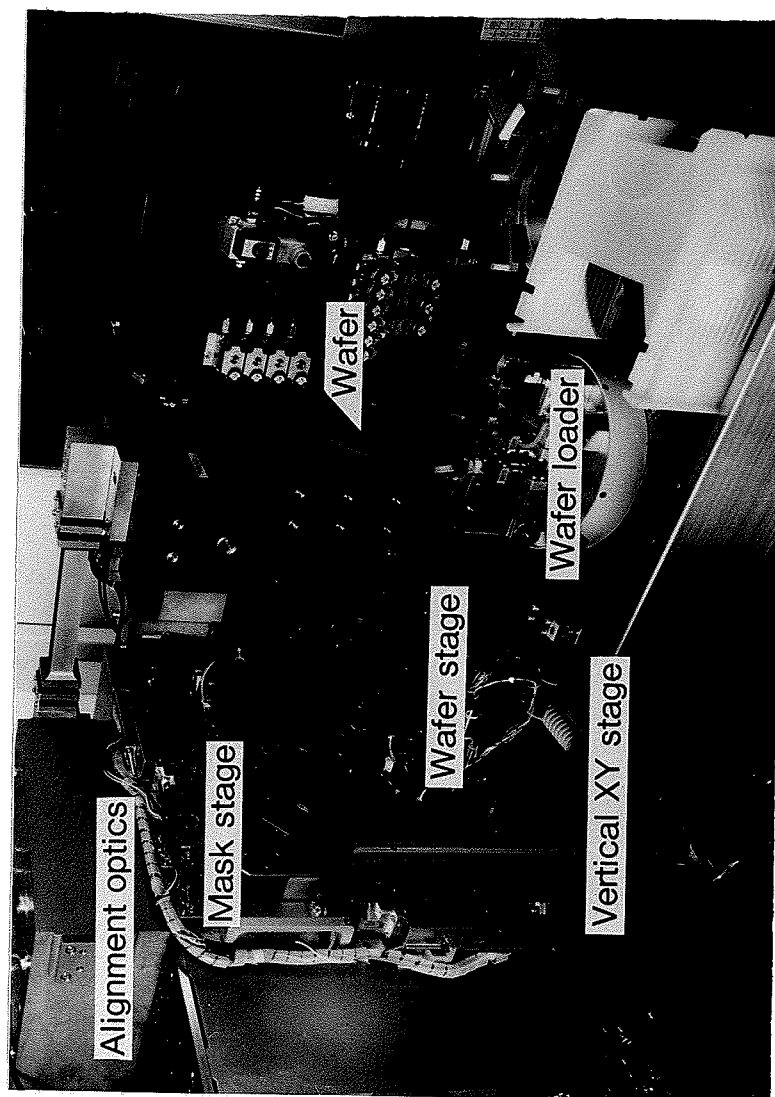


Fig. 4-2 View graph of SR X-ray stepper

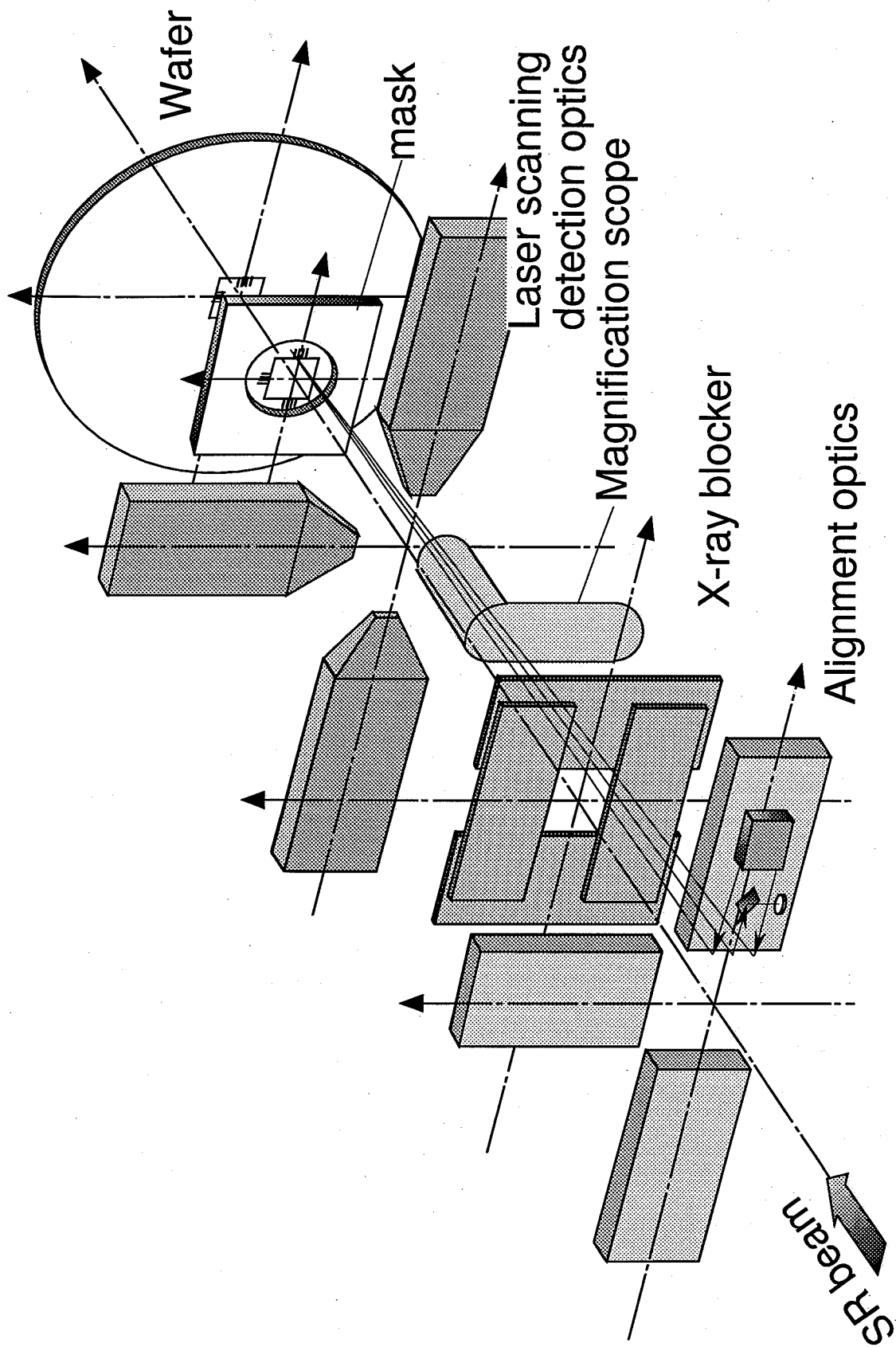


Fig. 4-3 Alignment optics unit

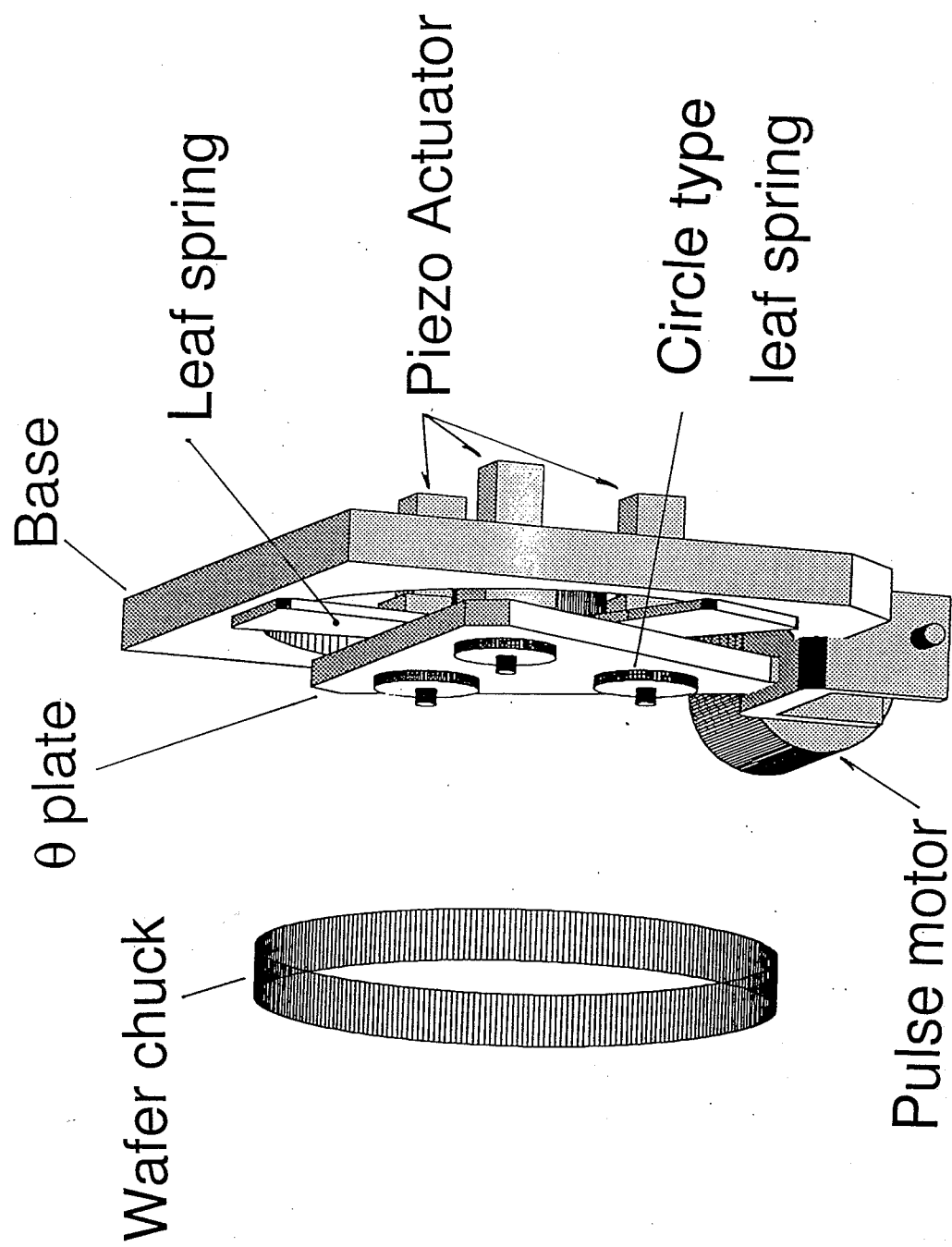


Fig. 4-4 Wafer stage

表 4-1 操作シーケンスと各軸駆動および検出手段の仕様

シーケンス	マスク微動機構	ウエハ微動機構	XYステージ	位置検出センサ
マスクレベリング	マスクあおり機構 0.1 $\mu\text{m}/\pm 150 \mu\text{m}$	-	XYステージ 5 nm/230 mm	静電容量型センサ 0.1 $\mu\text{m}/\pm 50 \mu\text{m}$
マスク位置決め	XY 微動機構 0.1 $\mu\text{m}/\pm 1 \text{ mm}$, 回転機構 $\pm 0.5 \mu\text{rad}/1 \text{ mrad}$	-	-	レーザ走査型位置検出計 0.1 $\mu\text{m}/\pm 50 \mu\text{m}$
ウエハレベリング	-	ウエハあおり機構 0.1 mm/20 mm	XYステージ 5 nm/230 mm	静電容量型センサ 0.1 $\mu\text{m}/\pm 50 \mu\text{m}$
ウエハ回転 位置決め	-	ウエハ回転機構 $\pm 0.5 \mu\text{rad}/\pm 30 \text{ mrad}$		レーザ干渉測 5 nm/230 mm
ウエハステップ送り	-	-		光ヘテロダイン干渉 位置検出計 5 nm/ $\pm 1.7 \mu\text{m}$
アライメント	マスク回転 1 $\mu\text{rad}/\pm 1 \text{ mrad}$	-		

改良点

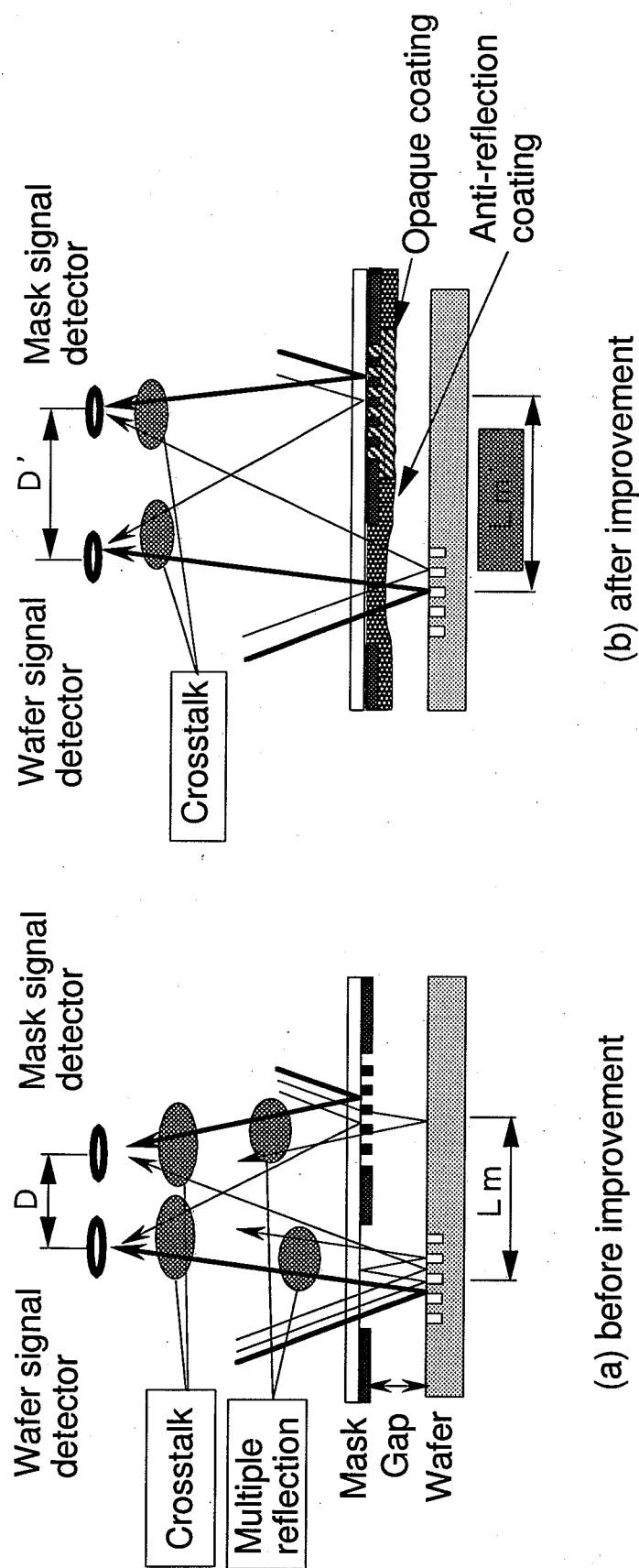


Fig. 4-5 Error factor and accuracy improvement method of optical heterodyne detection

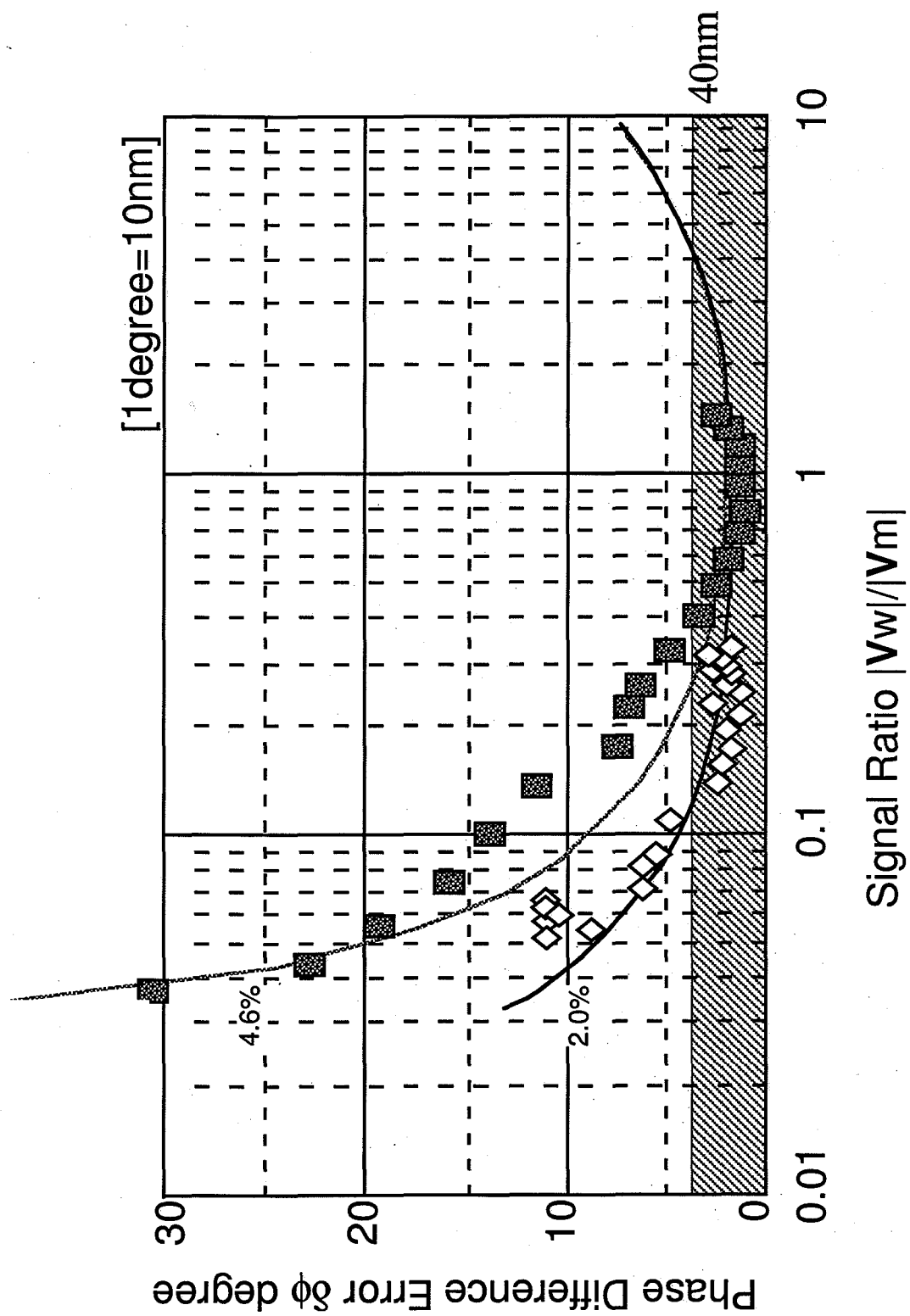


Fig. 4-6 Crosstalk Curves

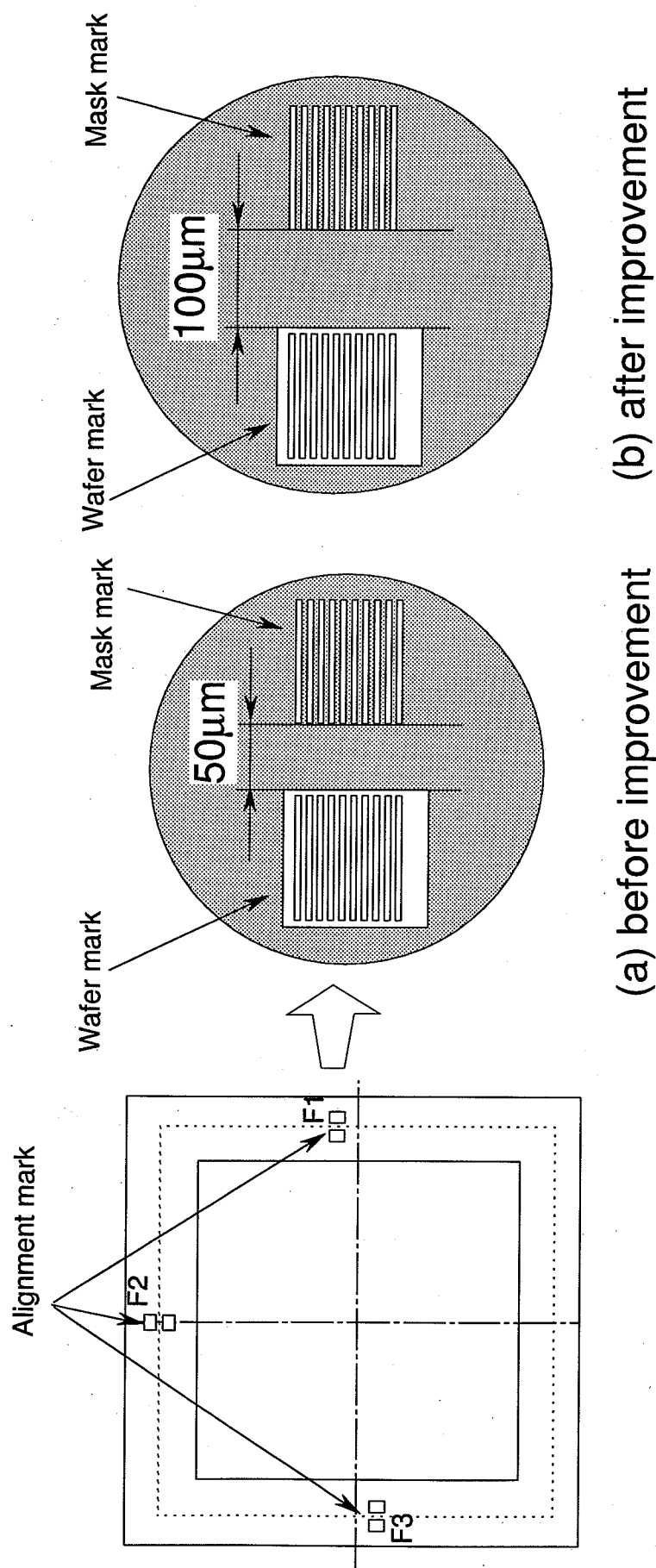


Fig. 4-7 Method for crosstalk reduction

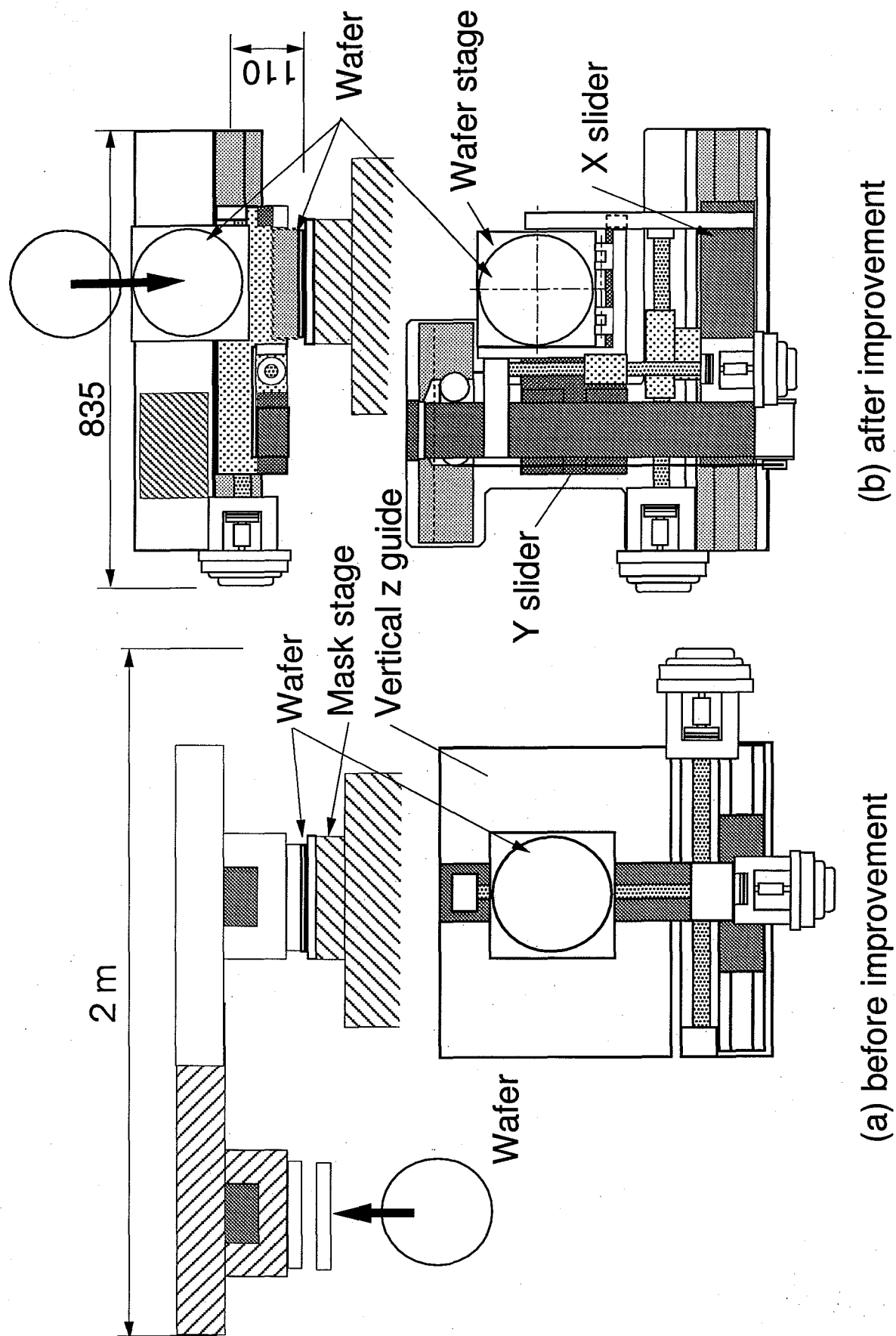


Fig. 4-8 XY stage improvement

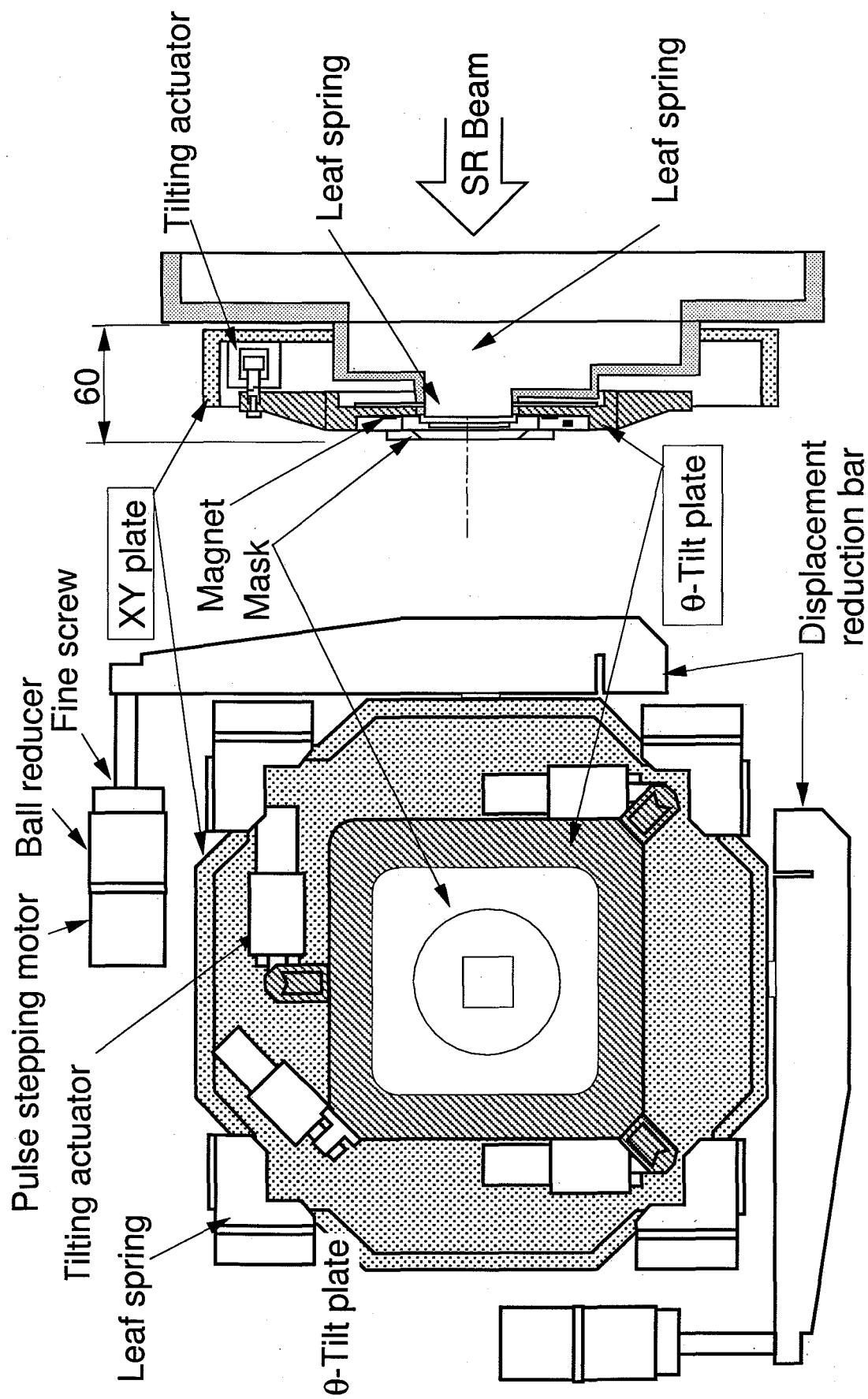


Fig. 4-9 Mask stage structure

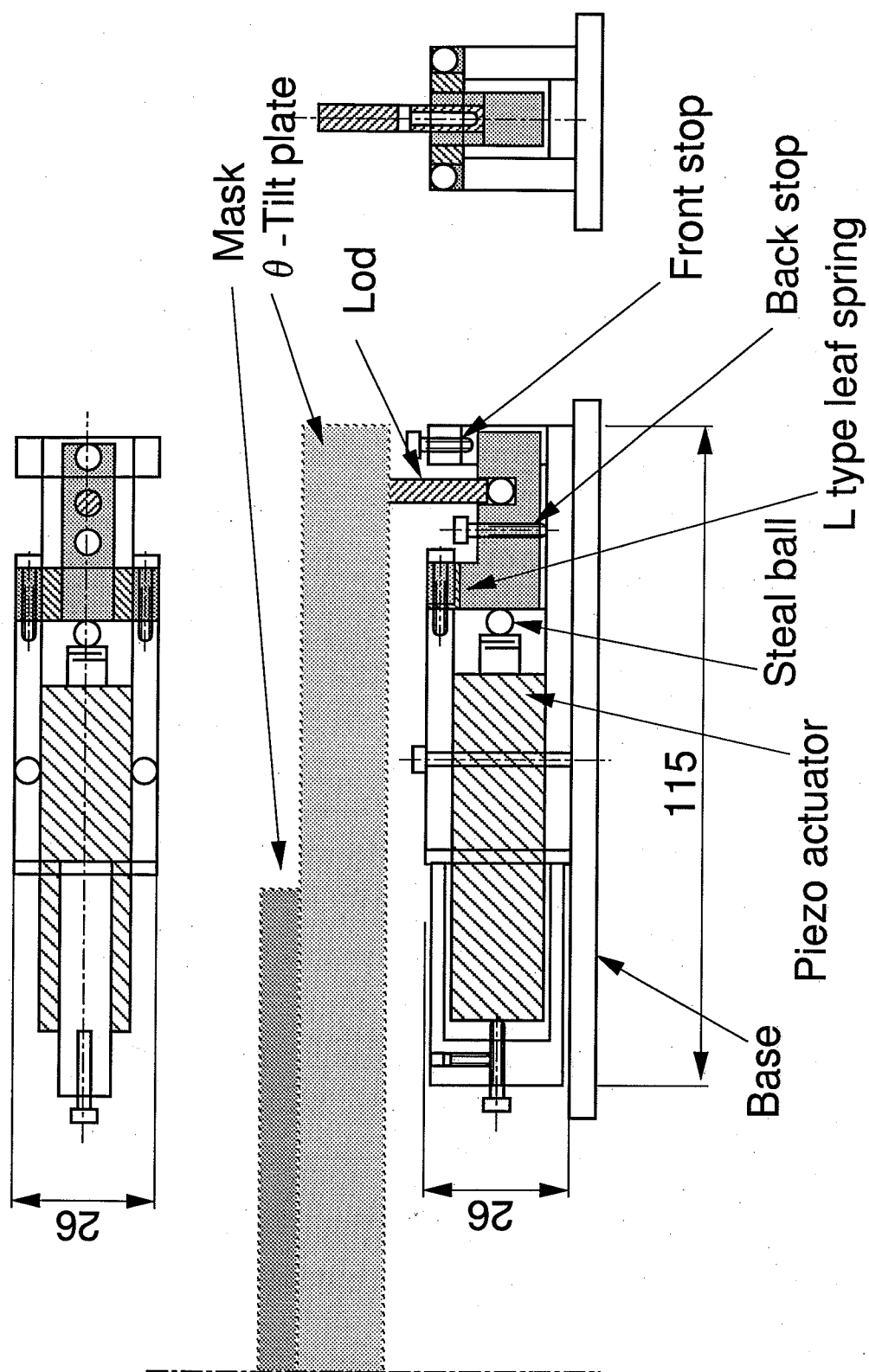


Fig. 4-10 Mask stage tilting actuator

第5章 改良形SR露光装置の評価

5. 1 緒言

第4章で述べた改良型SR露光装置の特性を、XYステージとマスクステージの位置決め特性、アライメント精度、そして重ね合せ精度の点から評価した。ここでの課題である高い重ね合せ精度を得るために、まず、各構成要素について、位置決め分解能、位置決め再現性などの駆動・位置決め性能の観点から評価する。つぎに、マスクとウエハをアライメントした場合のアライメント精度を評価する。最後に、実際の露光により得た重ね合せ精度の評価結果について述べる^{[1][2]}。

5. 2 XYステージの位置決め特性

図5-1にXYステージの位置決め特性を示す。(a)は位置決め分解能を調べたもので、XYの両軸のフィードバック信号に用いているレーザ干渉計の出力をDA変換して出力したものである。XY軸とも20nmのステップを正確に位置決めしている。また、ステージが、X方向移動時のY方向変位、Y方向移動時のX方向変位が、ともに安定していることから、XYの干渉はないと考えられる。

(b)は20mmの移動を質量の大きなX軸について行ったときの速度波形である。測定は、レーザ干渉計の時間微分をDA変換して出力した。最大速度は100mm/s、最大加速度は1.96m/s²(0.02G)である。20mmの移動を0.35秒で位置決めできている。この位置決め時間は、一次試作の装置で要した0.6~0.7秒の半分である。

5. 3 マスクステージの位置決め特性

マスクステージの駆動・位置決め特性を調べた。XYおよびθの位置決め特性についての測定結果を図5-2に示す。測定は、電気マイクロメータによる。図からXYθのいずれも正確な階段状位置決め波形が得られている。XY軸における戻り時のスパイク状の不規則挙動は、パルスモータとすべりねじによるバックラッシュを回避するため、一度ステージを大きく戻し、一方向から位置決めしているためである。マスクステージのXY方向は、マスクセット時のアライメント終了後はできるだけ動かず、その位置を保持することが必要である。一方、回転は、露光中サーボを行うので、速い応答性が必要となる。このため、回転駆動には、ピエゾアクチュエータを用いている。位置決め分解能は、XY軸で、20nm、θ軸で0.5μ

rad が得られた。これは、一次試作機と同じ分解能であり、30～40 nm のアライメント精度を得るには十分な分解能である。

5. 4 マスク・ウエハ間のアライメント精度

図5-3に、一連の露光動作時の、レーザ干渉計と光ヘテロダイン干渉検出信号の出力結果を示す。レーザ干渉計の出力は、たて形XYステージのX方向変位を表し、光ヘテロダイン干渉検出信号の出力は、マスクとウエハの相対位置変位を示している。露光動作は、ステップ移動、アライメント、露光、そして、次のショットへのステップ移動である。アライメントでは、光ヘテロダイン干渉位置検出計により、マスクとウエハの相対位置を測定し、この値をフィードバックして、XYステージを位置決めしている。また、アライメント制御においては、外乱抑制のための2自由度制御系を構成している。図において、このアライメント中のレーザ干渉計の出力には、定盤の固有振動数に相当した1.3 Hz程度の振動が観測される。一方、ヘテロダイン検出の出力にはそれが観測されない。このことは、定盤が揺らいでも、光ヘテロダイン干渉位置検出のフィードバック制御によりマスクとウエハのアライメントに位置ずれが生じていないことを示している。つまり、定盤の揺らぎにより外乱が入った状態でも、マスクとウエハのアライメントを保持し続けるようXYステージがサーボを掛けていることを示している。

マスクウエハ間のアライメント精度を、第2章と同様に、光ヘテロダイン干渉位置検出系で測定した結果を図5-4に示す。測定は、周波数時間間隔解析装置（HP社製）により、1秒間の位相変化を調べたものである。試料は、ベアシリコン上にアライメントマーク用の回折格子マークをエッチングしたウエハと、マスク上の回折格子マーク上に遮光膜、反射防止膜をコーティングしたマスクである。このマスクとウエハをアライメントした時の、マスクビート信号に対するウエハビート信号の位相ばらつきを測定した結果である。測定サンプリング時間は1 msで、1000回の測定である。ばらつきが、 3σ で 2.1° であることから、アライメント検出精度は、20 nm程度であると考えられる。これは、第一次試作で得られた、60～70 nmと比較すると向上し、また、目標である30～40 nmに対しても満足している。

5. 5 重ね合せ精度

露光装置によるアライメント精度を評価するために、1枚のマスクによる2回の露光を行い、その精度評価を行った。すなわち、第1層目として、予め形成しておいた光ヘテロダイン干渉位置検出用回折格子マークを検出して、マスクとウエハを

アライメントし、マスクパターンをウエハ上に転写する。つぎに、第2層目を、一定距離ずらした位置にアライメントし、同一マスクパターンを、同一ウエハ上に露光する。この第1層目と第2層目のパターン距離を測定し、予めずらした距離との差を求め、これから分散を求め評価する。このような方法で評価することにより、露光装置自身の重ね合せ精度に対する精度評価ができる。この場合の測定装置は、N i k o n製光波干渉式測長機(3 i)で、本測定の条件における測定再現性(3σ)は4 nm以下であることを確認している(長スパン測定の場合には20 nm程度)。この方法で測定した結果を図5-5に示す。図で、 3σ 値で23 nmと高精度で重ね合せ精度が得られた。

つぎに、マスクとウエハをアライメントする際に、マスクとウエハのパタンの予め持つ位置ずれを補正するため、マスクとウエハの相対位置に故意にずれ(アライメントオフセット)を加えて露光する場合がある。このアライメントオフセットの設定値に対して実際に移動した量(オフセット移動量)を測定した。これを、図5-5に示す。図5-5(a)は回転のオフセットを加えて露光したときのパタンのオフセット移動量をK L A社のK L A 5 0 1 1で測定した結果である。回転の中心がほぼ一点に一致しており、回転のオフセットに対してマスクステージが正確に移動していることがわかる。また、図5-5(b)は回転およびX Y方向のオフセットに対しての移動量を測定した結果である。X Yは線形性が良く、 ± 10 nmの範囲でオフセット設定可能である。また、回転は、範囲が広くなると線形性は低下するが、 $\pm 20 \mu r a d$ の範囲では $\pm 1 \mu r a d$ でオフセットを設定可能であることを示している。これらのオフセット設定性能は、マスクとウエハの重ね合せ精度において、マスクとウエハのパターン位置誤差の平均値をこの精度で追い込むことが可能であることを示している。

つぎに、(a)マスク上のパターン位置誤差、(b)S Rビームラインのランアウトによる転写位置誤差、(c)ウエハ上のパターン位置誤差、(d)露光装置によるアライメント誤差、(e)測定装置による測定誤差を含んだ重ね合せ精度を測定した結果を図5-7に示す。ウエハは、ゲート層に対して、その前のL O C O S層をK r Fのエキシマ露光装置で形成してたものである。そのウエハに、本S R露光装置で露光した重ね合わせ精度である。チップサイズは18 mm角で、37ショット、11枚のウエハの重ね合せ精度を求めたものである。ここで、測定は、K L A社のK L A 5 0 1 1で測定した。本測定装置の測定再現性は6 nm以下であった。図の誤差マップは、ウエハ上のパターン位置に対する、S R露光による転写パタンの位置ずれを示し、点線の正方形は、ウエハ上のパターン位置を示している。また、ヒストグラムは、4点の中心を一致させたときの重ね合せ精度を示したものである。全てを含んだ総合重ね合せ精度は、平均値+ 3σ で、X方向： $-13+151$ nm、Y方向： $12+87$ nmであった。X方向のばらつきが大きいのはマスクとウエハの

パターン間でパターン位置誤差があるためと考えられる。露光装置としては、ヒストグラムで示した。平均からのばらつきが重要である。この露光による再現性は、 3σ で、X方向：50 nm、Y方向：49 nmと非常に高精度かつ安定に重ね合せ精度が得られた。この結果は、本装置の重ね合せ精度の目標としてあげた60 nm以下である。

本実験結果は、光露光装置とX線露光装置とのMix and Matchの露光である。このような評価をした理由は、実用プロセスでは、クリティカル層のみを高精度な露光装置で露光し、他は高速な露光装置で露光するというMix and Matchによる露光方法が重要になってきているからである。

5. 6 転写特性

転写により得られたパターンにより、重ね合せ精度の向上した例を示す。図5-8は、第一次試作の露光装置を用いて形成したデバイス（リングオシレータ）と改良型露光装置で形成したデバイス（ゲートアレイ）のSEM（走査電子顕微鏡）像である。前者は、コンタクトホールが配線の中央に来るべきデバイスであり、後者は、コンタクトホールがゲート間に来るべきデバイスである。前者では、配線の中央から位置がずれていることから、重ね合せ精度が悪いことが分かる。後者では、コンタクトホールがゲートの中央に位置していることから重ね合せ精度が向上していることが分かる。

図5-9に、改良型SR露光装置により微細パターンを形成したパターン例を示す。ネガ型レジストSAL601を用いて露光した。露光ギャップは30 μm である。

(a)は1.5 μm のレジストに0.2 μm のラインアンドスペースを露光したものの、(b)は1.0 μm のエッチング段差上に1.5 μm のレジストパターンを形成したものである。非常にアスペクト比が高い上に、段差のある配線パターンや、直交したパターン上に重ねて転写してもきれいな解像パターンが得られている。SR露光装置の高解像性を示している。

5. 7 結言

試作したSR露光装置を、ステージ単体の位置決め特性、マスクウエハ間のアライメント特性、および、重ね合せ精度の観点から評価し、以下の結果を得た。

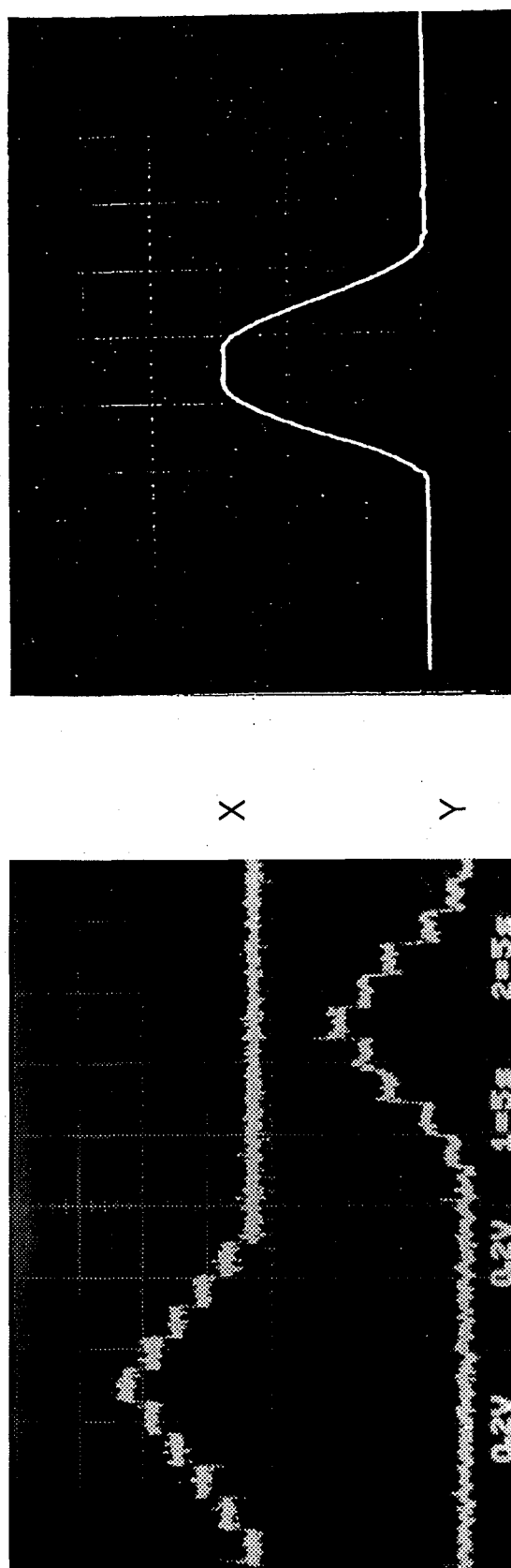
- (1) XYステージにおいては、位置決め分解能20 nm、20 mmの移動時間は移動速度100 mm/s時で0.35秒であった。
- (2) マスクステージにおいて、XY軸では、ストローク $\pm 1\text{ mm}$ に対して位置決め分解能20 nm、回転軸では、位置決め分解能0.5 μrad が得られた。

この分解能は、一次試作と同様に仕様を満足している。

- (3) マスクウエハ間のアライメント検出精度は20～30 nm (3 σ) を得た。一次試作で得た値60～70 nmから向上し、さらに、目標である30～40 nmの検出精度を達成している。
- (4) 露光実験による重ね合せ精度の評価では、同一マスク同一ウエハによる2重露光では23 nmを得た。これは、目標である30～40 nmのアライメント精度を達成している。また、アライメントのオフセット設定性能として、XY方向で、 ± 10 nm、回転方向で $\pm 1 \mu$ radを得た。
- (5) デバイス試作用のウエハに対して、KrFエキシマ露光装置と本SR露光装置とのMix and Matchによる重ね合せ精度として、60 nmを得た。これは、本研究が目標としている値を達成したことになる。

第5章 参考文献

- [1] M. Fukuda, M. Suzuki, M. Kanai, H. Tsuyuzaki, A. Shibayama, S. Ishihara: Overlay accuracy of an SR stepper evaluated by two-mask double exposure, J. Vac. Scie. Technol., Vol. 12, No. 6, Nov/Dec B, pp. 3256-3260, (1994)
- [2] A. Shibayama, M. Fukuda, M. Suzuki, H. Tsuyuzaki, S. Ishihara: Overlay repeatability in mix-and-match exposure using the SR stepper: SS-1, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 33, pp. 6894 - 6898, Part1, No. 12B, (December 1994)



(a) 20 n m step motion
Max velocity : 1 0 0 mm / s

(b) 20 mm movement
Max velocity : 1 0 0 mm / s

Fig. 5-1 positioning characteristics of XY stage

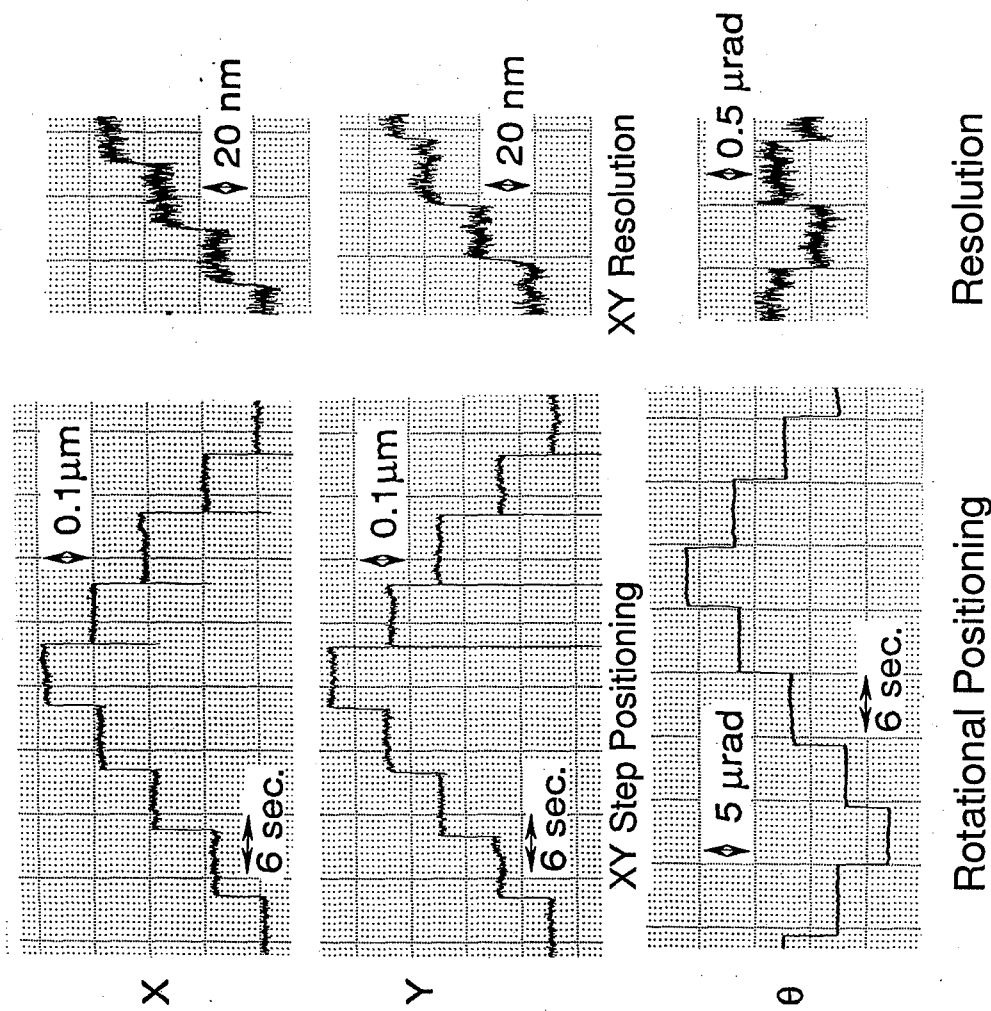


Fig. 5-2 Positioning characteristics of mask stage

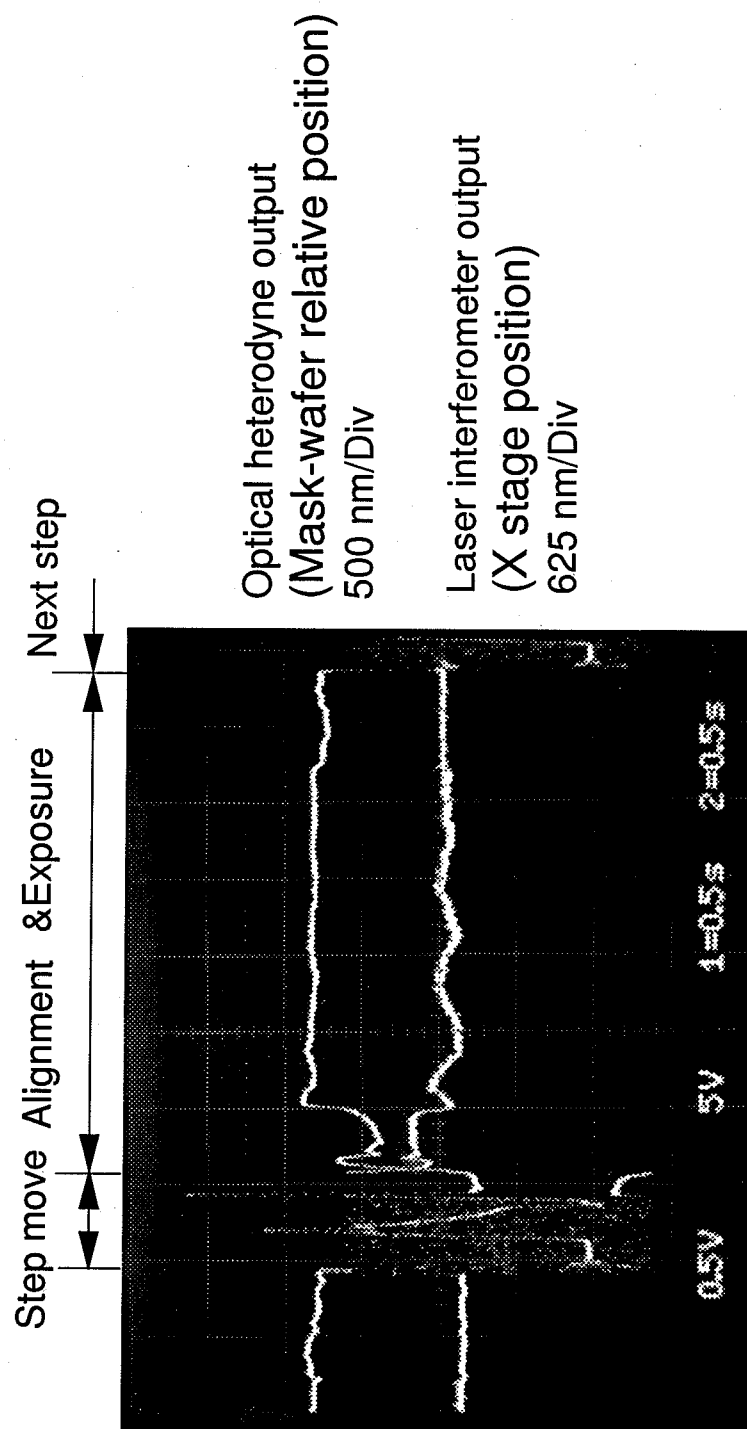


Fig. 5-3 Positioning pattern of one exposure cycle

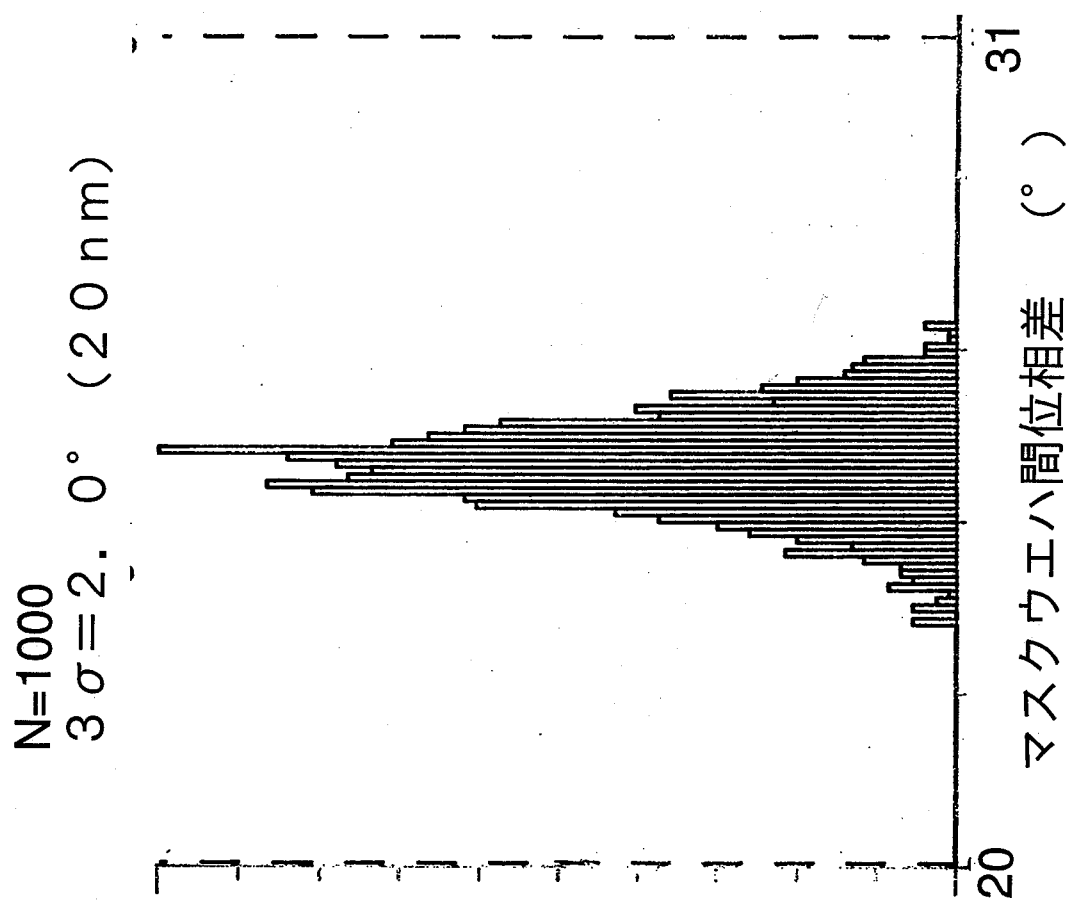
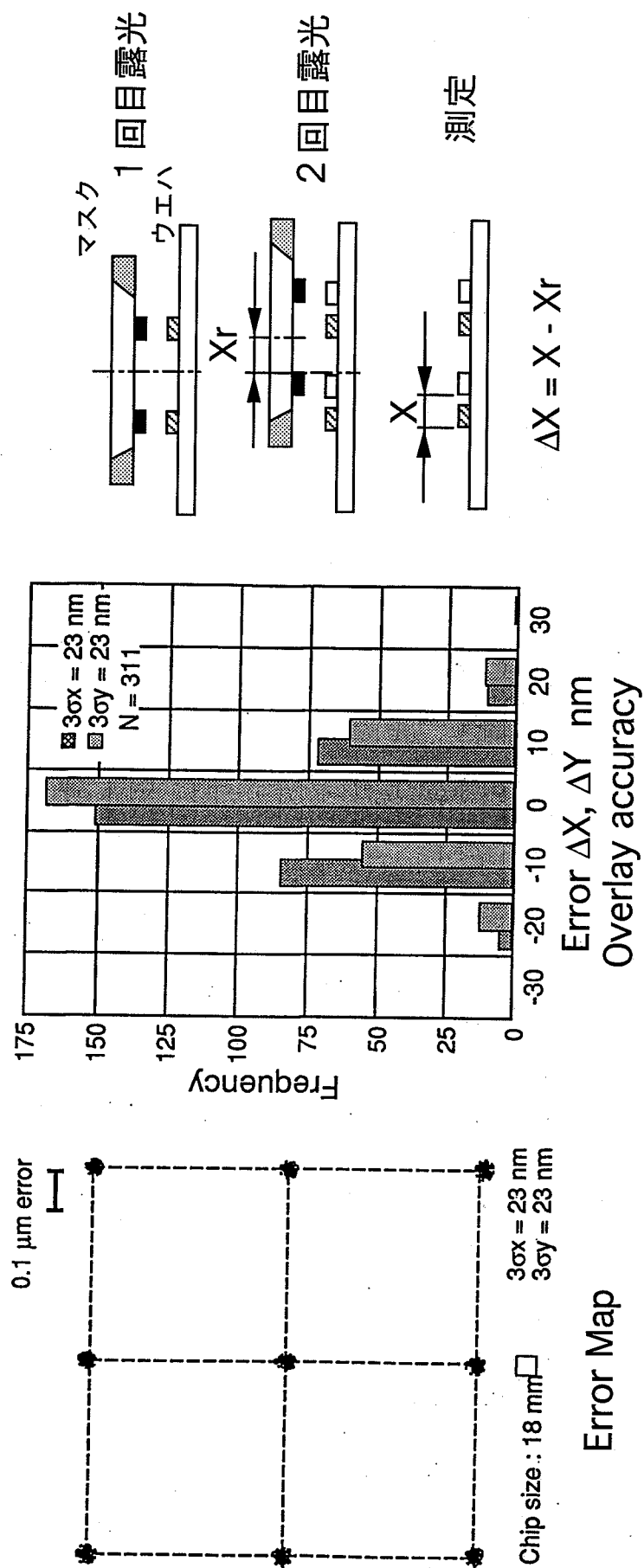
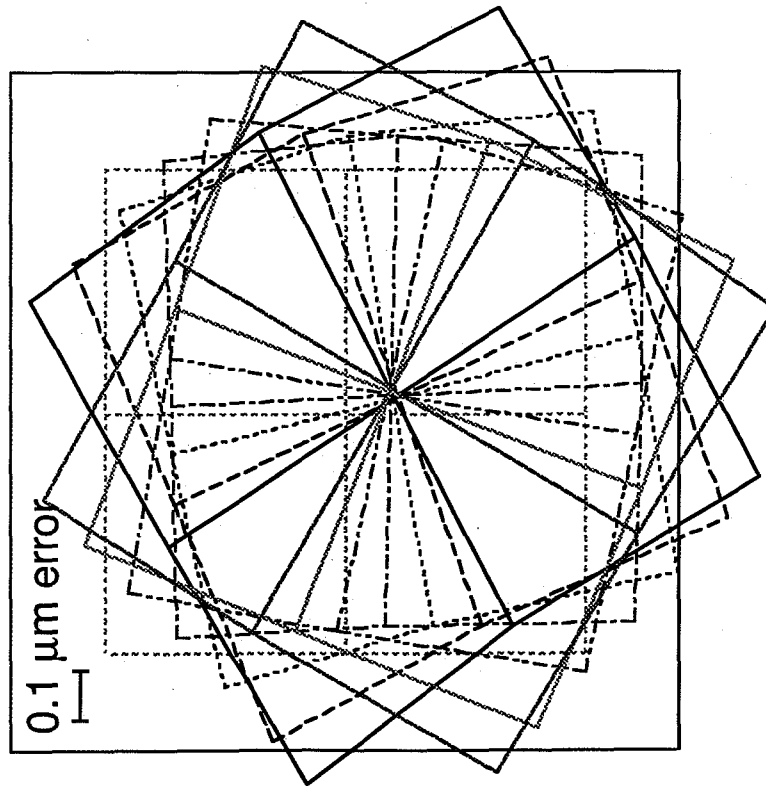


Fig. 5-4 Alignment repeatability of optical heterodyne detection system

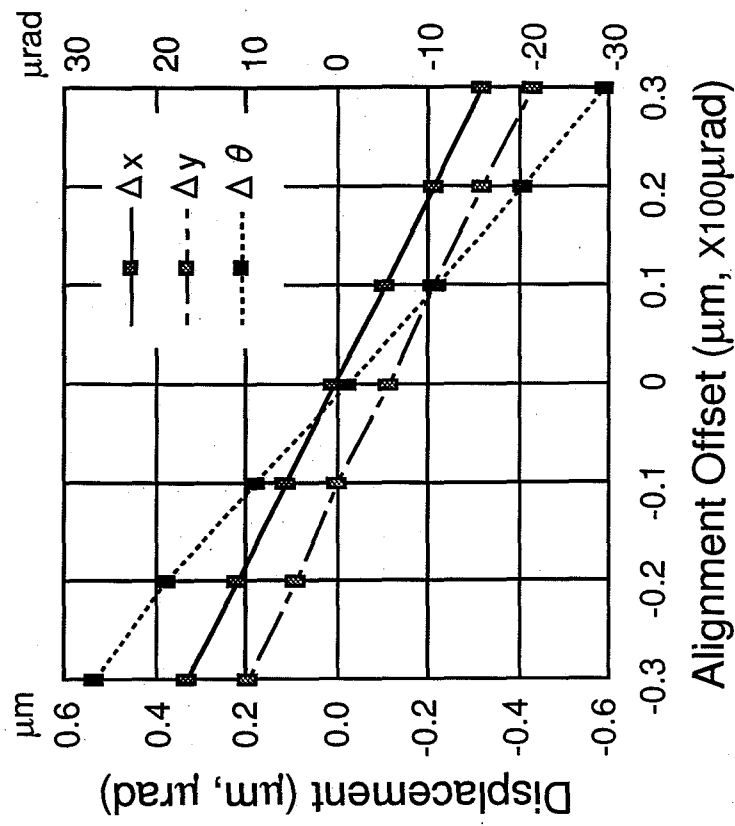


(Si+ resist wafer)

Fig. 5-5 Overlay accuracy by double exposure



(a) Displacement Map for Rotation Offset



(b) Linearity of Alignment Offset

Fig. 5-6 Alignment offset adjustability

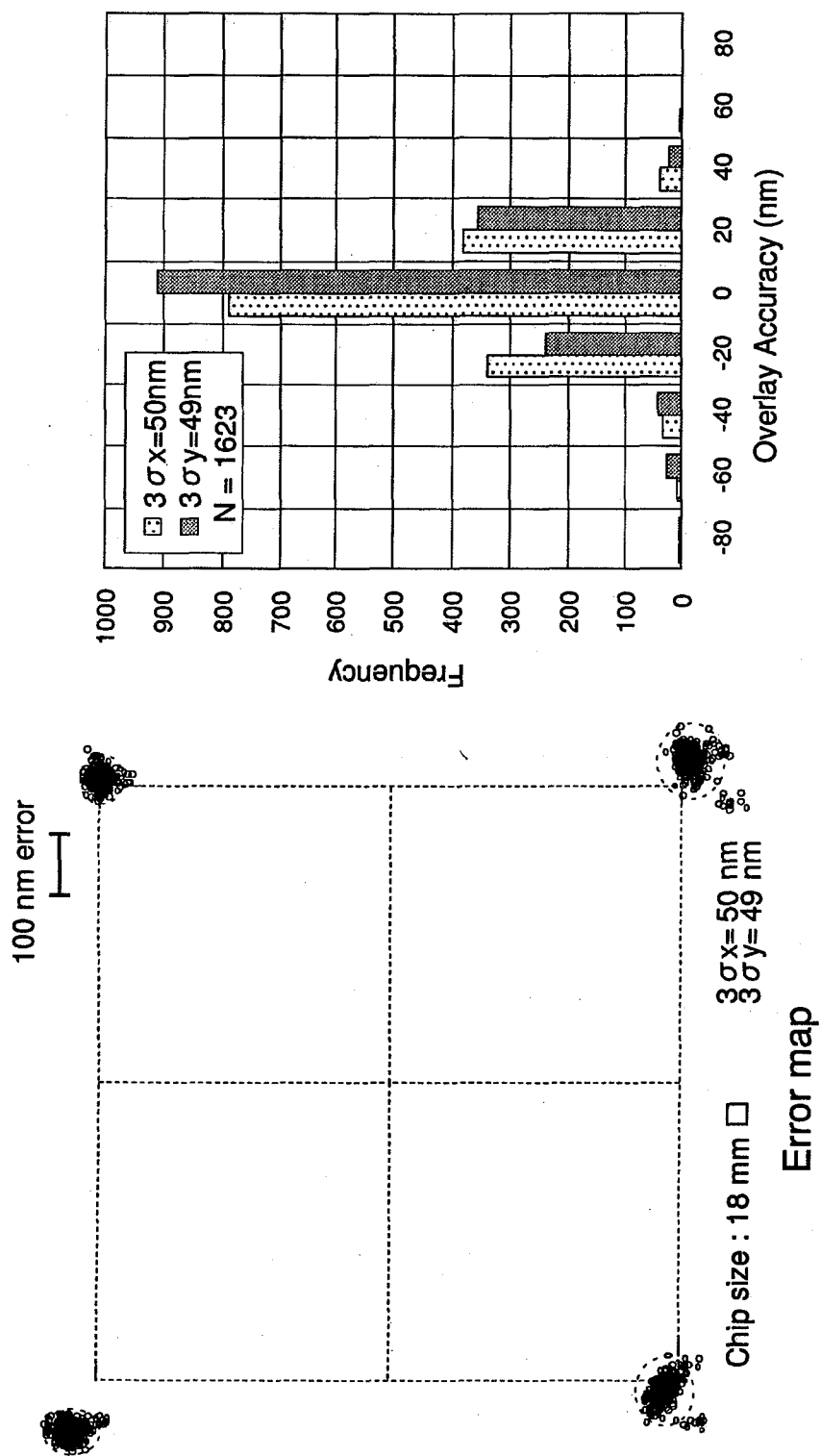
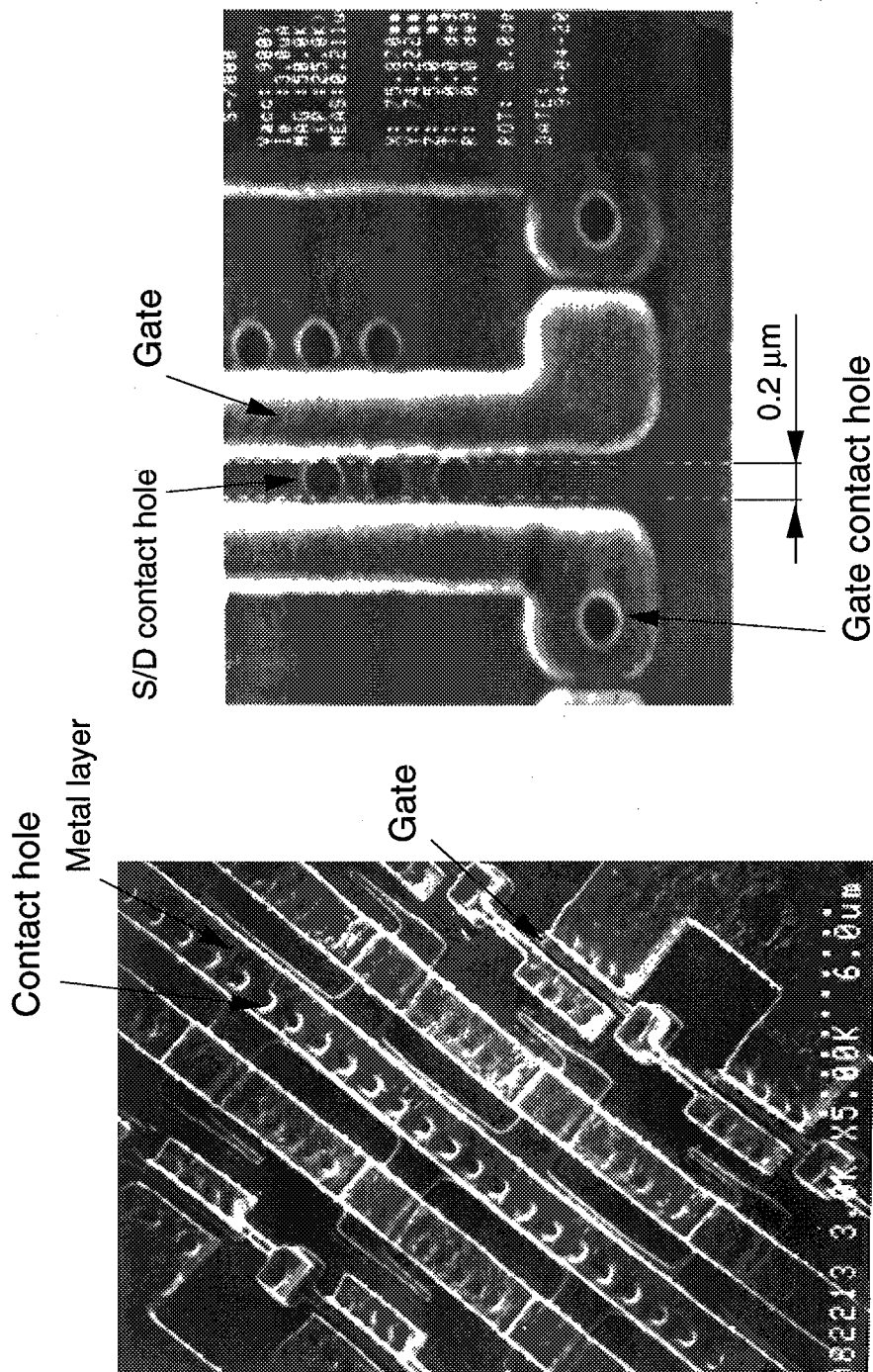
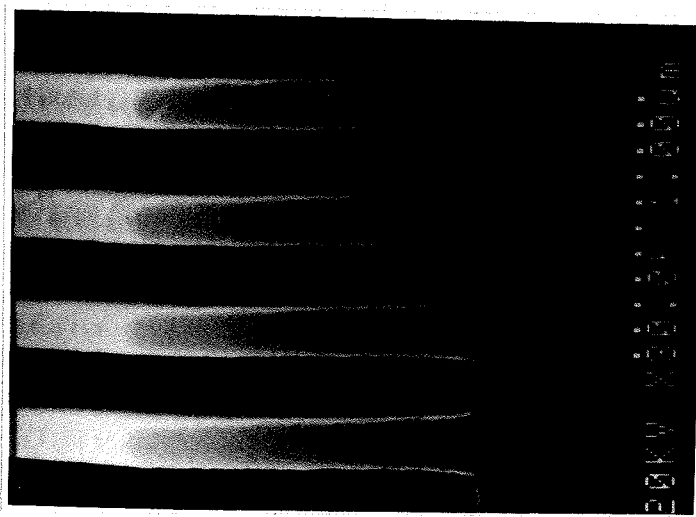


Fig. 5-7 Overlay accuracy by mix and match between Krf and SR steppers

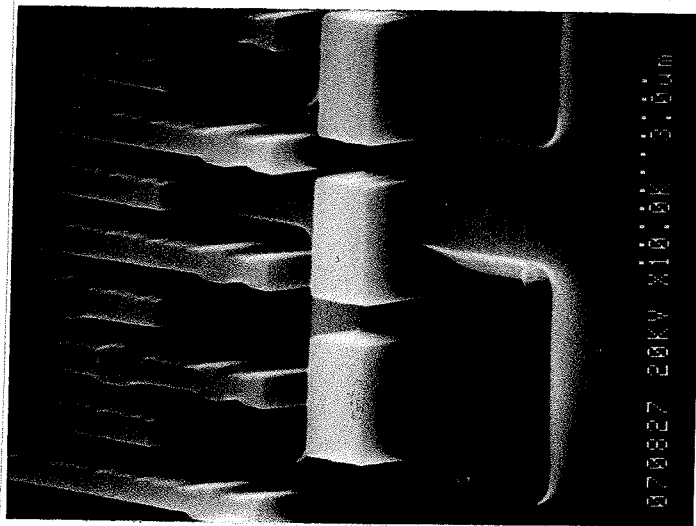


(a) Exposed by prototype SR stepper (b) Exposed by improved SR stepper

Fig. 5-8 Overlay of device patterns



(a) 0.2 μm line and space pattern
(SAL601, $t = 1.5 \mu\text{m}$)



(b) Step coverage
(Groove depth = $1.0 \mu\text{m}$,
 $0.5 \mu\text{m}$ line and space pattern)

Fig. 5-9 Exposed patterns

第6章 結論

6. 1 結論

第2章，第3章，第4章，第5章で得られた結果を総括する．さらに，本SR露光装置での残された問題点とさらに高精度を目指す時の重要課題を概観する．また，空気静圧送りねじの位置決めに関する制御的な課題についても言及する．

第1章 「序論」では，

リソグラフィに要求されている重ね合せ精度について概観し， $0.18\mu\text{m}$ の微細パタンが要求される1Gbit DRAM用のSR露光装置には， 60nm 以下の重ね合せ精度が求められていることを述べ，最小線幅，スループットそして重ね合せ精度の観点から，SR光を用いたX線露光技術が有望であると考えられ，実用技術とするためには高い重ね合せ精度を得る必要があることを述べた．

しかし，これまでのSR露光装置を見てみると，マスクウエハ間のアライメントには制御応答性に優れた位置決め機構が必要であるにもかかわらず，アライメント位置検出方式に応答性のない検出方法を用いたり，応答性の得られない位置決め機構で構成したているなど，いずれも不十分なSR露光装置となっていることを指摘した．

そこで，本研究では，SR露光装置におけるウエハの位置決め，ウエハとマスクのアライメントなどの機構的な問題点の検討と解決を通じて，マスクとウエハのアライメント精度，ウエハ上のパタンの重ね合せ精度の向上を実現することを目的とすることを明確にした．

第2章 「SR露光装置の試作」では，

今後のリソグラフィの課題である高い重ね合せ精度を得るために，SR露光装置では，露光中もマスクとウエハの相対位置をフィードバックしアライメント制御を行う露光中サーボ方式が重要であり，これを実現する手段として，制御応答性に優れた，バックラッシュやスティックスリップなどの非線形性を排除した位置決め機構と高速高精度なマスクウエハの相対位置検出法が重要な要素となる．これらを，組み合わせて構成したSR露光装置を試作し，主に，重ね合せの観点から評価し，その問題点を明らかにした．

1. 重ね合せ精度を得るために，

- (1) 空気静圧送りねじと空気静圧案内による非線形性を排除した位置決め機構
- (2) 回折格子を用いた光ヘテロダイン干渉式位置検出法による高分解能な検出法を基本にしたSR露光装置を開発した。

2. その結果,

XYステージについて、位置決め分解能50nm以上、繰り返し精度15nm(3 σ)、20mm移動の位置決め時間0.65秒を得た。また、アライメント位置検出に関して、検出精度60~70nm(3 σ)を得ることができた、また、様々なウエハ表面状態に対しても同様な値が得られ、安定であることが明らかとなった。さらに、光露光とSR露光での総合的な重ね合せ精度として、80~100nm(3 σ)を得た。しかしながら、以下の主な課題があることが明らかとなった。

3. 課題として,

- (1) SR露光装置の横方向寸法2mを小さくする必要がある。
- (2) 空気静圧送りねじの制御法として動的減衰不足の問題を解消する高速・高精度な制御法が必要である。
- (3) 光ヘテロダイン干渉位置検出法の検出精度60~70nmを30~40nmとする必要がある。
- (4) 総合的な重ね合せ精度80~100nmを60nm以下にする必要がある。

第3章 「空気静圧送りねじによる位置決め制御」では,

空気静圧送りねじを用いた制御に関し、第2章で明らかとなった動的減衰不足の問題点を解決する制御法を検討するため、空気静圧案内と空気静圧送りねじを組み合わせた位置決め実験装置を構成し、レーザ測長干渉計による位置決め制御、フィードフォワードによる位置決め制御とロータリエンコダによる位置決め制御を検討し、以下の結果を得た。

1. 空気静圧送りねじを用いた位置決め機構の制御法を明らかにするため、空気静圧送りねじと空気静圧案内を用いた一軸位置決め機構を構成した。
2. レーザ干渉計をフィードバックセンサとした位置決め制御では,
 - (1) PIDコントローラにより、位置決め分解能20nmを得、500nmのステップ位置決めにおいても、第2章で見られた残留振動なしの位置決めが実現できた。
 - (2) ステップ幅により位置決め応答性特性が異なる非線形性が観察された。こ

の非線形性は、ブラシ圧を減少させると振動的な位置決め波形となることから、DCモータのブラシによることを明らかにした。

3. フィードフォワードによる2自由度の位置決め制御を実現し、外乱特性を抑えつつ応答性を上げられることを明らかにした。
4. ロータリエンコーダによるセミクローズドループ制御を検討した。この結果、回転を3/1800万回転すなわち回転角度で $1.05\mu\text{rad}$ の分解能で制御することができた。これは、リード6mmの送りねじの場合、ステージ位置の1nmに相当するが、実際には、微小振動がありこれを解消することが必要である。

第4章 「改良型SR露光装置の試作」では

非線形を除去した機構、高精度分解能の検出法により重ね合せ精度を得る方針を維持しつつ、第2章で課題となった、

- (1) 装置サイズ
- (2) 位置決め特性
- (3) アライメント精度の未到達点
- (4) 重ね合せ精度の未到達点

の問題点を克服すべく、新たな試作を行った。

改良点は以下のとおりである。

1. 全体構成としては、XYステージをL形、ウエハを背面供給とすることにより、SR露光装置で特に重要な横幅の短縮を行い、小型化を行った。また、一次試作にない機能として、以下の機能を付加した。
 - (a) 露光領域を $10\text{mm}\times 10\text{mm}\sim 25\text{mm}\times 25\text{mm}$ で設定機能。
 - (b) マスクステージにXYの移動機能。
 - (c) ウエハ面のあおり機能。

これにより、露光領域が可変となり、アライメントマーク位置に許容範囲が増え、ウエハ厚さの許容範囲が広がった。

2. 位置決め制御では、第3章で述べたデジタルPIDコントローラによる位置制御を行い、動的減衰特性を向上させ、位置決め的高速化を図った。
3. アライメント位置検出法では、遮光膜、反射防止膜により、多重反射を低減した。クロストークを軽減するため、クロストークのアライメント誤差への影響を明らかにし、アライメント誤差40nm以下を得るためのアライメントマーク間の距離を求めた。

マスクとウェハ信号比が10倍変化しても、アライメント誤差を40nm以下とするためのクロストーク量は2%以下である。これを実現するには、アライメントマーク間隔を従来の倍の100 μ mとする必要があることを明らかにし、この構成のアライメントマーク配置を用いることとした。

第5章 「改良型SR露光装置の評価」では、

試作したSR露光装置をステージ単体、マスクウェハのアライメント精度および重ね合わせ精度の観点から評価し、以下の結果を得た。

1. XYステージにおいては、位置決め分解能20nm、20mmのステップ移動時間は移動速度100mm/s時で0.35秒を得、一次試作で得られた半分程度の時間で位置決め可能となった。
2. マスクステージにおけるXY微動機構では、ストローク ± 1 mmに対して位置決め分解能20nm、回転機構では、位置決め分解能0.5 μ radが得られた。この分解能は、一次試作と同様に仕様を満足している。
3. マスクウェハ間のアライメント位置検出精度は20~30nm(3 σ)と、一次試作で得た値60~70nmの半分以下を得た。さらに、目標である30~40nmのアライメント精度を達成した。
4. 露光実験による重ね合わせ精度の評価では、同一マスクによる2重露光では23nm(3 σ)を得、目標である30~40nmのアライメント精度を達成した。また、アライメントのオフセット設定性能として、XY方向で、 ± 10 nm、回転方向で $\pm 1\mu$ radを得た。
5. デバイス試作用のウェハに対して、KrFエキシマ露光装置と本SR露光装置とのMix and Matchによる重ね合わせ精度として50nmを得た。これは、本研究の目標値60nmを達成したことになる。

以上、述べてきたように、(1) 空気静圧送りねじと空気静圧案内を用いた非線形性を排除した機構と(2) 光ヘテロダイン干渉を用いた高分解能な位置検出法を基本に構成したSR露光装置を開発、改良し、その性能を、主に、重ね合わせ精度の点から評価したところ、1GbitDRAM級に求められる60nm以下の重ね合わせ精度を得、その有効性を実証した。

6. 2 今後の課題

ここで開発したSR露光装置自体の性能追求を志向した場合の課題，つぎの世代を志向したSR露光装置に発展させるための課題，そして，本装置に用いた機構要素である静圧送りねじを用いた位置決め技術を発展させるための課題がある。

1. 開発したSR露光装置による露光実験で得られた同一パタンによる重ね合せ精度23nmとデバイスウエハでの重ね合せ精度50nmとに隔たりがある。この原因の追究が必要である。前者はマスク，ウエハ上のパタン位置誤差を含まず，後者はそれらを含んでいることは明らかであるが，それらが，どの程度の精度かを明らかにし，総合重ね合せ精度を向上することが必要である。
2. 4Gbit DRAMでは，重ね合せ精度として，40nmが求められる。これを実現するために，以下の課題の検討が必要である。
 - (1) アライメントの検出精度を20nm以下とする。
 - (2) アライメントの検出分解能を現在の5nmから2.5nm以上に高める。
 - (3) 空気静圧送りねじによる位置決め分解能を現在の20nmから5nm以上とする。
 - (4) 近接ギャップを現在の30μmから20μm程度としたときのアライメントの安定性を評価し，実現する。
3. 空気静圧送りねじを用いた位置決めにおいては，以下の2点の課題の検討が必要である。
 - (1) 1nmのステージの位置決めの実現手法の検討。
 - (2) さらに高速高精度な位置決めを実現する制御手法の開発。
 - (3) 連続的に一定速度で送るための制御手法の開発。

謝辞

本論文は、東京工業大学大学院総合理工学博士課程、精密機械システム専攻に在学することにより、これまでNTTで行った研究をまとめたものです。

本研究は、指導教官である精密工学研究所 下河辺 明教授の熱心なご指導と激励によりはじめて可能になりました。特に、同教授には、筆者が、同大学学部および大学院修士課程に在学当時より、日本電信電話公社に入社後も暖かいご指導を頂いています。ここに、深甚の感謝の意を表します。また、本論文を査読して、貴重なご教示とご助言を頂いた東京工業大学、丸山一男教授、横山正明教授、北條春夫助教授、初沢毅助教授に深く感謝の意を表します。

本研究の主要部は、NTT LSI研究所におけるSRリソグラフィシステムの研究開発の一環として行われたものであり、研究開発を進めるに当たり、多くの方々のご指導、ご鞭撻、ご叱咤を頂いて実現したものです。

まず初めに、筆者が、SRリソグラフィのプロジェクトに参加する機会を作って頂いたNTT研究開発本部技術企画部 石原 直部長に心から感謝します。同氏には、社会人博士課程に在学することにもご支援ご理解を頂きました。また、同プロジェクト以来、長年に亘って共に議論し、アイデアを出し、露光システムを作り上げてきたNTT-AT担当課長 金井宗統氏、および、NTT LSI研究所加工技術研究部主任研究員 鈴木雅則氏に心から感謝の意を表します。

本研究をまとめるに当たり、NTT LSI研究所 酒井保良所長、岩田穆元自動化システム研究部長（現広島大学）、松尾誠太郎加工技術研究部長、柴山昭則前X線リソグラフィ装置研究グループリーダー（現研究開発本部総務部安全管理室長）、露寄晴夫X線リソグラフィ装置研究グループリーダーには、社会人博士課程に在学することに暖かいご支援とご理解を頂きました。この機会がなければ本論文は実現しませんでした。ここに心から感謝の意を表します。

また、NTT LSI研究所加工技術研究部 金子隆司主任研究員には先のプロジェクトの時代からビームラインを始め光学に関するご指導を頂き、同 出口公吉主幹研究員、三好一功主任研究員にはユーザの立場から、有益なアドバイスを受けました。ここに心から感謝の意を表します。

最後になりましたが、本露光装置を作り上げるに際し、日本精工株式会社、株式会社ニコンの方々に大変お世話になり、心から感謝いたします。

1996年 1月 17日

福田 真