

解説

精密位置決め用変位センサーの現状と問題点

赤津 利雄

(株)日立製作所機械研究所 〒300 土浦市神立町 502

(1993年4月28日受理)

Present Technologies and Problems of Displacement Sensors for Precise Positioning

Toshio AKATSU

Mechanical Engineering Research Laboratory, Hitachi Ltd.,
502, Kandatsu, Tsuchiura 300

1. はじめに

半導体製造装置や、磁気ディスク、光ディスク等の情報関連機器、超精密切削加工装置等は近年著しく進歩している。この分野では超精密位置決め技術が装置全体の性能を決めるキーテクノロジーとなっている。上記製品分野の中でも半導体製造工程で使用されるリソグラフィ装置では特にきびしい位置決め精度が要求される。現在、量産ラインでは縮小投影露光装置（ステッパー）が使用されているが、量産出荷が始まろうとしている 16 MDRAM 生産用のステッパーではウエハステージの位置決め精度は $\pm 0.04 \mu\text{m}$ が要求されている。今後、高集積化がさらに進むと位置決め精度はますますきびしくなる。

ウエハステージの位置決めはレーザー測長器をフィードバックセンサーとして閉ループ制御しているので、位置決め精度はレーザー測長器の性能によって決る。本稿ではリソグラフィ装置に使用されているレーザー測長器の現状とその問題点について述べる。

2. リソグラフィ装置

リソグラフィ装置として現在、主流となっているステッパーの構成を図 1 に示す。回路パターンを描いてあるレティクルを露光光源で照明し、レティクル像を 1/5 に縮小して XY ステージ上のウエハに露光する。このとき、2 回目以降の露光では、転写した回路パターンのチップ全面にわたって正確に重ね合わせて露光しなくては

ならない。重ね合せ精度は最小線幅の $1/4 \sim 1/3$ 以下が要求されるので、半導体素子の高集積化に伴ってますますきびしくなる。

重ね合せ精度に影響をおよぼす要因は次の項目が考えられる。

- (1) 縮小投影光学系の誤差
- (2) アライメント系の誤差
- (3) ウエハステージ系の誤差
- (4) レティクル系の誤差
- (5) ウエハ系の誤差

次にウエハステージ系の誤差要因について述べる。ウエハステージの構成と構造の一例を図 2 に示す¹⁾。

本ステージは粗動ステージと微動ステージおよびトップテーブルから構成されている。ウエハはウエハチャックに吸着し、トップテーブル上に固定されている。粗動ステージによってウエハは X, Y, Z 方向に粗位置決めし、さらに微動ステージで $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ 方向および各軸まわりの回転成分, $\Delta\theta_x, \Delta\theta_y, \Delta\theta_z$ を精位置決めして、XY 平面内の精位置決めとウエハ表面を縮小レンズの像面に正しく位置決めする。

このようにしてウエハを位置決めする場合、重ね合せ精度に影響する要因は次の項目が考えられる。

- (1) レーザー測長系の誤差
- (2) チップと位置決め用棒ミラー間の距離変動
- (3) 棒ミラーの表面形状誤差
- (4) 制御系の偏差

以上の誤差要因を解析して各項目ごとに許容誤差量を

配分し、ウエハステージの位置決め精度をメモリ容量との関係で示すと表1ようになる。表には位置決め用センサーに要求される精度も併記した。

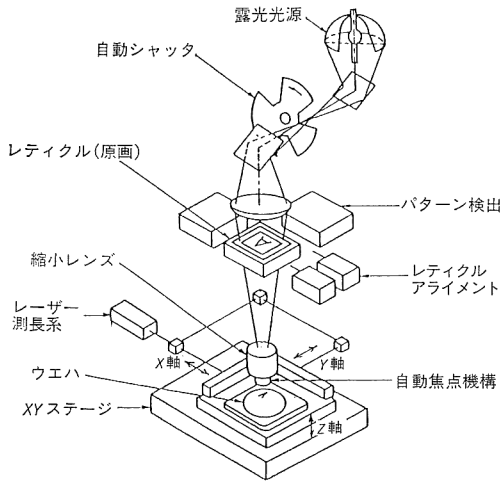


図1 ステッパーの構成

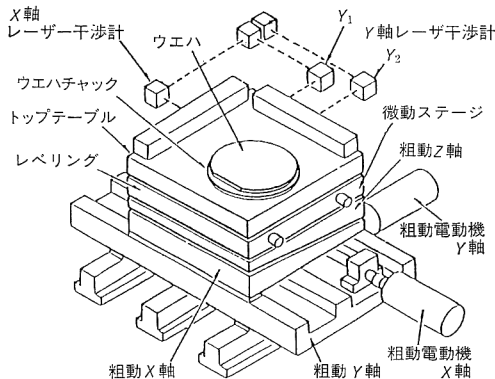


図2 ウエハステージの構成と構造

表1 デザインルールとステージ系の要求精度

メモリ容量	4M	16M	64M	256M	1G
デザインルール (μm)	0.8	0.5	0.35	0.3	0.15
最小寸法 (μm)	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1
重ね合せ精度 (μm)	±0.2	±0.13	±0.08	±0.05	±0.04
ステージ位置決め精度 (μm)	±0.06	±0.04	±0.03	±0.02	±0.01
変位センサー精度 (nm)	±12	±8	±6	±4	±2

3. レーザー測長器の現状

前章に述べたようにリソグラフィ装置の位置決め用変位センサーは測定範囲が広く (≥250 mm) かつ高精度が要求される。この要求に対応できるのはレーザー測長器のみである。

現在、発表されている代表的なレーザー測長器の仕様を表2に示す。これらの測長器を動作原理から分類するとヘテロダイン干渉式と光学位相検出式に大別できる。

3.1 ヘテロダイン干渉式レーザー測長器^{2,3)}

測定対象物にレーザー光を照射すると、反射光の周波数はドップラ効果によって移動速度に比例して変化する。ヘテロダイン干渉式測長器はこの周波数変化を光の干渉技術を応用して検出し、これを積分して変位を測定する。本方式は干渉光強度の平均値やコントラストの変化には無関係に変位を安定して測定できるのが最大の長特である。

本方式の基本的な測定分解能は $\lambda/2$ であるが、つぎの方法によって、さらに分解能の向上を図っている。

- (1) ドップラ周波数を電氣的に通信する。
- (2) 干渉計と対象物間をレーザー光を複数回往復させる。

これによって、測定分解能: 0.3 nm, 応答速度: 175 mm/s を達成している製品がある。

3.2 光学位相検出式レーザー測長器⁴⁾

対象物にレーザー光を照射すると、その反射光の位相は変位に比例して変化する。この位相変化を検出すれば変位を測定することができる。レーザー光を2分割し、参照面と対象物にそれぞれ照射し、反射光同士を干渉させて干渉光強度が最大になる回数を計数すれば $\lambda/2$ の分解能で対象物の変位を測定できる。ただし、干渉光強度は対象物の変位だけでなく、反射光の強度が変化しても変化するため、高精度な変位測定は難しい。

この解決策として、実際の製品では種々の工夫をしているが、その内容の説明は省略する。本方式のレーザー測長器の分解能は表2に示すとおりである。

この分解能ではウエハステージの位置決め用としては性能不足である。

3.3 位相変調式レーザー測長器⁵⁾

位置決め用変位センサーは常時、高分解能測定を必要としない。対象物が高速で移動しているときは粗い分解能で測定し、低速になったときのみ高い分解能で測定すればよい。この点に着目して、筆者らが開発したレーザー測長器について述べる。

表 2 レーザー測長器一覧表

原 理	メーカー名	性 能		データエイジ
		分解能 (nm)	応答速度 (mm/s)	
ヘテロダイン干渉式	A	0.3 (4パス)	175	} 1.24 μs±1 ns 約 3 μs±300 ns
		0.6 (2パス)	350	
		5 (2パス)	350	
	B	0.62 (4パス)	275	500 ns 0~+16 ns
		1.24 (2パス)	550	
光学位相検出式	C	40 (2パス)	600	不 定
位相変調式	D	1.3 (1パス)	1000	

本方式は高速時と低速時とで測定法を自動的に切り換えて測定する。対象物が高速 (>3.5 mm/s) で移動しているときは参照面と対象物の反射光同士の干渉光を光電変換した後、交流増幅して零点との交差回数をカウントするだけである。ステージが目標位置に近づいて低速になると、対象物からの反射光の位相を電気光学結晶(ニオブ酸リチウムまたは、タンタル酸リチウム)で位相変調した参照光の位相を基準にして零位法で測定する。本方式は最後まで光学的に分解能向上を図っているのが特長である。

4. レーザー測長器の問題点

前章に述べたように現在、発表されている各種レーザー測長器のうち最高分解能は 0.3 nm に達しており、単体性能としては 1 GDRAM 対応のリソグラフィ装置の位置決め用変位センサーとして使用可能である。しかし、使い方の上で次のような大きな課題がある。

4.1 大気のゆらぎによる測定誤差

レーザー測長器を大気中で使用する場合、空気の屈折率が変化すると測定誤差が発生する。空気の屈折率は温度、気圧、湿度などによって変化する。このうち比較的大きな要因である温度 $T(^{\circ}\text{C})$ 、気圧 $P(\text{mmHg})$ と空気の屈折率 n の関係は次式で示され

$$(n-1)_{r,P} = (n-1)_s \cdot \frac{0.00138823P}{1+0.003671T} \tag{1}$$

$$(n-1)_s \cdot 10^8 = 8342.13 + \frac{2406030}{130-\sigma^2} + \frac{15997}{38.9-\sigma^2}$$

ここで σ は、真空中における $1 \mu\text{m}$ 当りの波数で

ある。

これは Edlen の式としてよく知られている⁹⁾。

(1)式によると、光路上の空気の温度が 1 K および気圧が 1 mmHg 変化したときの空気の屈折率変化 Δn_T 、 Δn_P はそれぞれ以下の式で示される。

$$\Delta n_T = 1.05 \times 10^{-6} / (\text{K}) \tag{2}$$

$$\Delta n_P = 0.346 \times 10^{-6} / (\text{mmHg}) \tag{3}$$

一方、8 インチ対応のウエハステージの位置決めを使用する場合、光路長は最大約 300 mm となる。このとき(2)、(3)式から測定誤差を、温度と気圧の関数として示したのが図 3 である。このように、測定精度の高いレーザー測長器を使っても、現状ではその使い方や使用環境で測定精度が決まることになる。次に現在提案されているゆらぎの補正方法について紹介する。

4.1.1 数式による補正

レーザー測長器光路近傍の温度、気圧、湿度を測定し

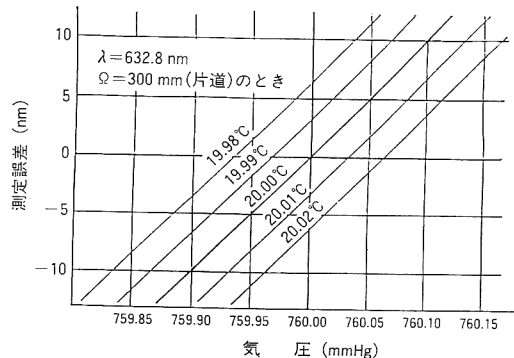


図 3 光路中の気圧、温度変化と測定誤差の関係

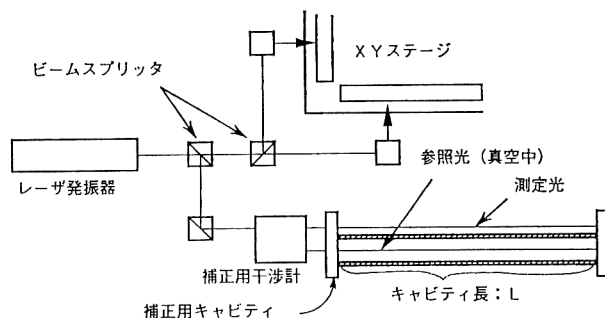


図4 波長コンベンセータの構成

て、(1)式に代入しレーザーの波長を校正する方法がある。ただし、この方法は環境の測定点数が数点しか取れないので、その平均値から補正することになるため、困難である。さらに温度、気圧、湿度以外の要因の変化については考慮されない。補正精度は1~1.5 ppm程度である。

4.1.2 補正用基準真空光路を設けた補正²⁾

この方式は測定用の干渉計とは別に補正用の干渉計を設けて、直接波長変動を検出する。この構成を図4に示す。レーザー光は測定用と補正用に分ける。測定用ビームはXYステージの各軸測定用の干渉計に導く。一方補正用ビームは補正用干渉計に導く。ここで参照光は真空中を通るので、補正用干渉計からは空気ゆらぎによる測定値変化を検出することができる。この結果を波長変動に換算してその環境中での波長の値を補正する。本方式は、4.1.1の数式補正に比べて空気屈折率変化を直接検出しているため、信頼性の高い補正が可能である。測定用光学系近傍の環境と補正用光学系近傍の環境とは異なるので、十分な補正精度を得ることは難しい。

4.1.3 光路に温度制御した空気を吹きつける方法

図5に示すように温度制御した空気をフィルタを介して光路上に吹きつけて光路の温度分布を低減するとレーザー測長器の出力は安定する。筆者らが簡単な実験を行った結果の一例を図6に示す。実験は光路の長さを300 mm一定として行った。図6(a)はチャンバ内の温度制御をしただけの実験結果である。チャンバ内には各種構造物と若干の熱源が存在するため、光路上の温度は約0.32 K変化している。このときレーザー測長器の出力は約47 nm変動している。

一方、図6(b)はチャンバの吹き出し空気の一部をバイパスして図5に示したフィルタを介して光路に吹きつけたときの実験結果である。光路の温度変化は0.06 Kに安定している。これに伴ってレーザー測長器の出力変

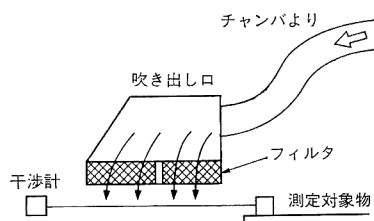
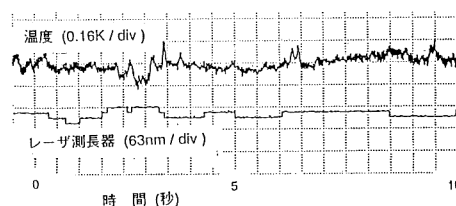
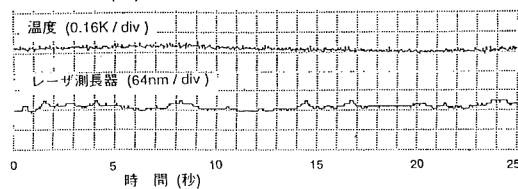


図5 空気吹き出しフィルタ



(a) 光路に空気を吹きつけない場合



(b) 光路に空気を吹きつけた場合

図6 光路の温度変化と測定器の出力変動

動は約32 nmに低減している。この実験は温度変化による屈折率変化のみに着目したものであり、実際には気圧、湿度変動を測定して別途計算補正を実施する必要がある。

今後さらに位置決め精度の要求がきびしくなったとき、本方式で対応できるか否かは検討を要する課題である。

4.1.4 2波長干渉計方式

空気の屈折率は図7に示すように波長の関数である。石田ら⁷⁾はこの点に着目して2波長干渉計で変位を測定

して、2種類の測定結果から演算によって真の変位量を求める研究を行っている。次に石田らの研究を紹介する。図8に測定原理図を示す。レーザー光は488nm(λ_1)と244nm(λ_2)の2波長を用いている。2波長の光は同一光路を伝播し、それぞれ固定コーナーキューブと移動コーナーキューブで反射して再び合成される。合成された光はプリズムによって λ_1, λ_2 の波長に分離して、それぞれ独立に干渉する。この干渉光から空気ゆらぎの影響を受けた変位を測定し、次の演算を行うことにより真の変位を求めることができる。

$$D = D_2 - A(D_2 - D_1) \quad (4)$$

$$A = (n_2 - 1)/(n_2 - n_1)$$

ここで、 D : 真の変位, D_1, D_2 : 大気ゆらぎの影響を含んだ λ_1 光, λ_2 光による測定値, n_1, n_2 : 波長 λ_1, λ_2 の大気中の屈折率。

この方法でステージをステップ状に250nm移動させたときの測定結果の一例を図9に示す。補正前のデータ(a)に対して補正後のデータ(b)は非常に安定していることがわかる。

この方法は実際の光路の屈折率分布の影響を補正しているのので、前述の4.1.1, 4.1.2, 4.1.3の方法に比べて原理的に優れた方法である。ただし、現状では実用段階には至っていない。

4.2 データエイジの問題

データエイジとは対象物の位置を検出してからデータが得られるまでの遅れ時間である。今後、半導体素子パターンの微細化がさらに進むとステッパーでは対応できなくなる。ポストステッパーとして電子ビーム(EB)描画装置が注目されている。EB描画装置はウエハ上に電子ビームで直接パターンを描画するものである。従来の

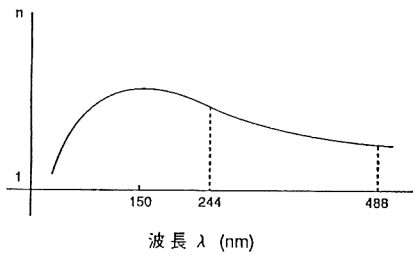


図7 波長と空気屈折率の関係

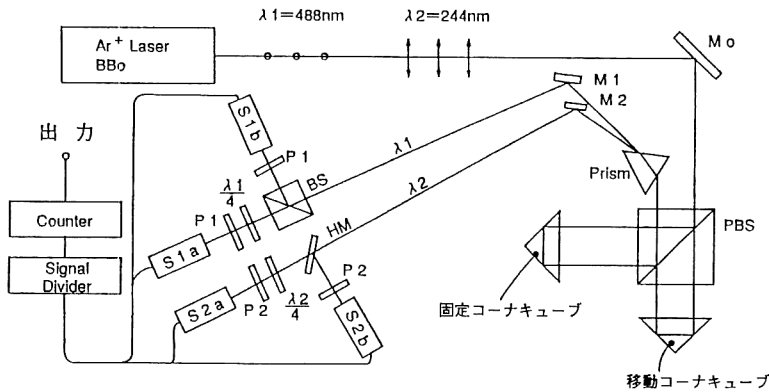


図8 2波長干渉計

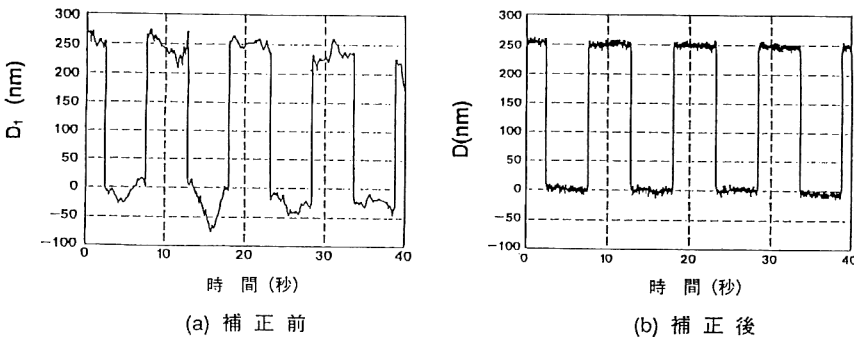


図9 空気ゆらぎの影響除去前後の実験データ

EB 描画装置はスループットが低いという弱点を有していた。その原因の一つはウエハステージをステップ・アンド・リピート方式で起動・移動・停止・整定・描画というサイクルで動作しているため、移動時間と整定待ち時間が無駄となるためである。この解決策として可変速連続移動式ステージを採用した装置がある^{8,9)}。

本方式はステージを連続移動させながらステージ位置をレーザー測長器で測定し、電子ビームの偏向回路にフィードバックしてステージ位置に同期してビーム位置を制御する方式である。また、パターンの粗密によってステージの速度を可変にしている。つぎに本方式に使用するレーザー測長器の問題点について述べる。

EB 描画装置のステージは真空中で使用するため、大気のゆらぎによる測定誤差は発生しない。しかし、連続的に移動するステージ位置を常時測定する必要があるため、データエイジが問題になる。従来のレーザー測長器ではデータエイジが一定していないため、測定値がばらつくことになる。例えばステージが 100 mm/s で移動しているときデータエイジのばらつき、 ± 300 ns はステージ位置に換算すると、 ± 30 nm に相当するので無視できない。現在製品化されているレーザー測長器の中で最近発表されたA社の製品はデータエイジのばらつきが ± 1 ns、B社の製品では 16 ns であり、上記 EB 描画装置に適用できる。

5. あとがき

精密位置決め技術に関して最もきびしい精度が要求されるリソグラフィ装置を例としてウエハステージの変位を検出するレーザー測長器の現状とその問題点について

て紹介した。

測長器単体の性能はヘテロダイン干渉式で測定分解能: 0.3 nm, 応答速度: 175 mm/s, データエイジ: 1.24 μ s \pm 1 ns を達成している。この性能はリソグラフィ装置に適用した場合、ギガビット級のメモリ素子まで対応できる。また、EB 描画装置に適用する場合でもデータエイジの問題もない。ただし、空気の屈折率変化に伴う測定誤差が問題であることを指摘した。紙数の関係で割愛したがシステムとして真にナノメータオーダーの位置決めを達成するためには位置決めセンサーの高性能化のみならず、環境の無振動化、測定基準点の安定化、位置決め対象物の低熱変形等システム全体として検討すべき課題も多い。

文 献

- 1) 林聡一郎, ほか: “ハーフミクロン i 線リソグラフィ装置 “LD-5051 icw””, 日立評論 **73**, 9 (1991) 15-22.
- 2) HP 社カタログ: レーザ・インターフェロメータ・ポジショニング・システム (1992).
- 3) キヤノン販売(株)カタログ: レーザ変位測定干渉システム, ZMI-1000.
- 4) メカトロ商事(株)カタログ: Guide to Interferometry, LIL 3000 レーザ干渉計.
- 5) 赤津利雄, ほか: “高速・高精度位置決め用変位センサ”, 日本機械学会論文集 (C編), **55** (1989) 1666-1671.
- 6) 大石忠尚: “空気の屈折率の測定”, 計量研究所報告 **31**, Suppl. (1982) 37-47.
- 7) 石田 明, ほか: “レーザ干渉測長における大気ゆらぎの除去”, 新技術開発事業団, 吉田ナノ機構プロジェクト研究論文集 (1991) pp. 51-54.
- 8) 鉦谷義雄, ほか: “EB で光リソの置き換え狙う高速セル”, バイス, No. 90 (1992) 121-127.
- 9) 鉦谷義雄, ほか: “電子ビーム描画装置の開発と応用”, 日立評論, **73**, 9 (1991) 7-14.