

$\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置

Reduction Projection Aligner System

半導体素子の高集積化技術は、年ごとに急速な進歩を遂げつつあるが、これを支えてきたのが素子の微細化技術である。

なかでも、素子の回路パターンを写真の技術でウェーハ上に転写する露光技術は、常に重要な役割りを果たしてきたが、最近では、特に $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置が、超LSI時代の量産設備として注目されている。

本稿では、日立製作所で開発した $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置(RA-101HL形)によるウェーハ上への微細パターンの形成技術について紹介する。超LSIの製造に要求される $1\sim 1.2\mu\text{m}$ 線幅のパターンを形成するための技術、パターンの高精度合せ技術、ステップアンドリピートを高精度で実現するためのウェーハのステップ送り機構などを中心に報告する。

1 緒言

半導体素子の生産工程で、ウェーハ上に回路パターンを転写する露光に種々の方式が活用されている(図1)。現在、LSIの生産に関して、最も実績のあるのは $\frac{1}{1}$ 等倍露光装置である。この方式は、パターンの線幅が $2\sim 3\mu\text{m}$ 程度、重ね合せ精度として $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 程度までカバーでき、現在のLSI生産設備の主流をなしている。一方、 $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置は、当初、高解像度と高い位置合せ精度という特長から、主に素子の研究、開発用として使用され、スループット(ウェーハ処理能力)についてはあまり重点が置かれていなかった。しかし、最近では実用レベルの最先端は、図2に示したように $2\mu\text{m}$ デザインルール(線幅では $1\mu\text{m}$ の領域)のデバイスに到達し、本格的な超LSI時代を迎えた。ここに至って、 $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置を使用することが高い歩どまりとデバイス性能の向上のため

に有効な手段として認められ、スループットの向上ともあいまって量産設備として導入されるようになってきた。こうしたニーズにこたえるため日立製作所では、高精度位置合せ機構を採用した $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置を完成した。

2 日立RA-101HL形 $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置の構成及び動作原理

図3に日立RA-101HL形 $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置(以下、RA-101HL形と略記する。)の外観を、図4に構成を示す。高輝度の水銀ランプからのg線(436nm)を光源として、レチクル(原画)は一律な照度(均一度 $\pm 3\%$ 以内)で照明される。 $\frac{1}{10}$ 縮小レンズがレチクルのパターンの $\frac{1}{10}$ の縮小像をウェーハ上に投影する。ウェーハはハンドリング系によって位置の粗合せ(プリ

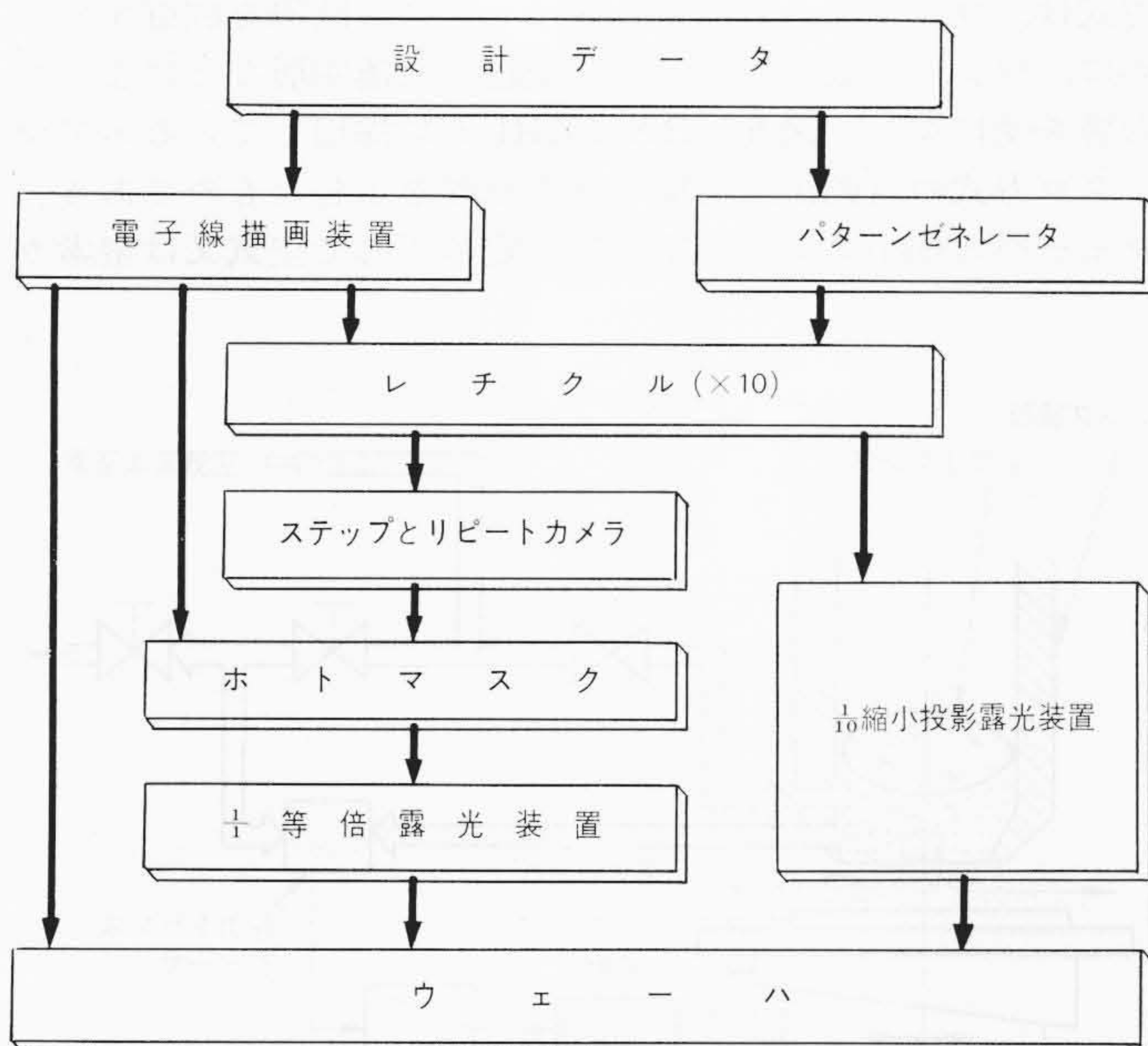


図1 各種露光方式 半導体素子の回路パターンが、ウェーハ上に転写されるまでの過程を示したものである。電子線描画装置については、本特集の中で取り上げているので参照されたい。

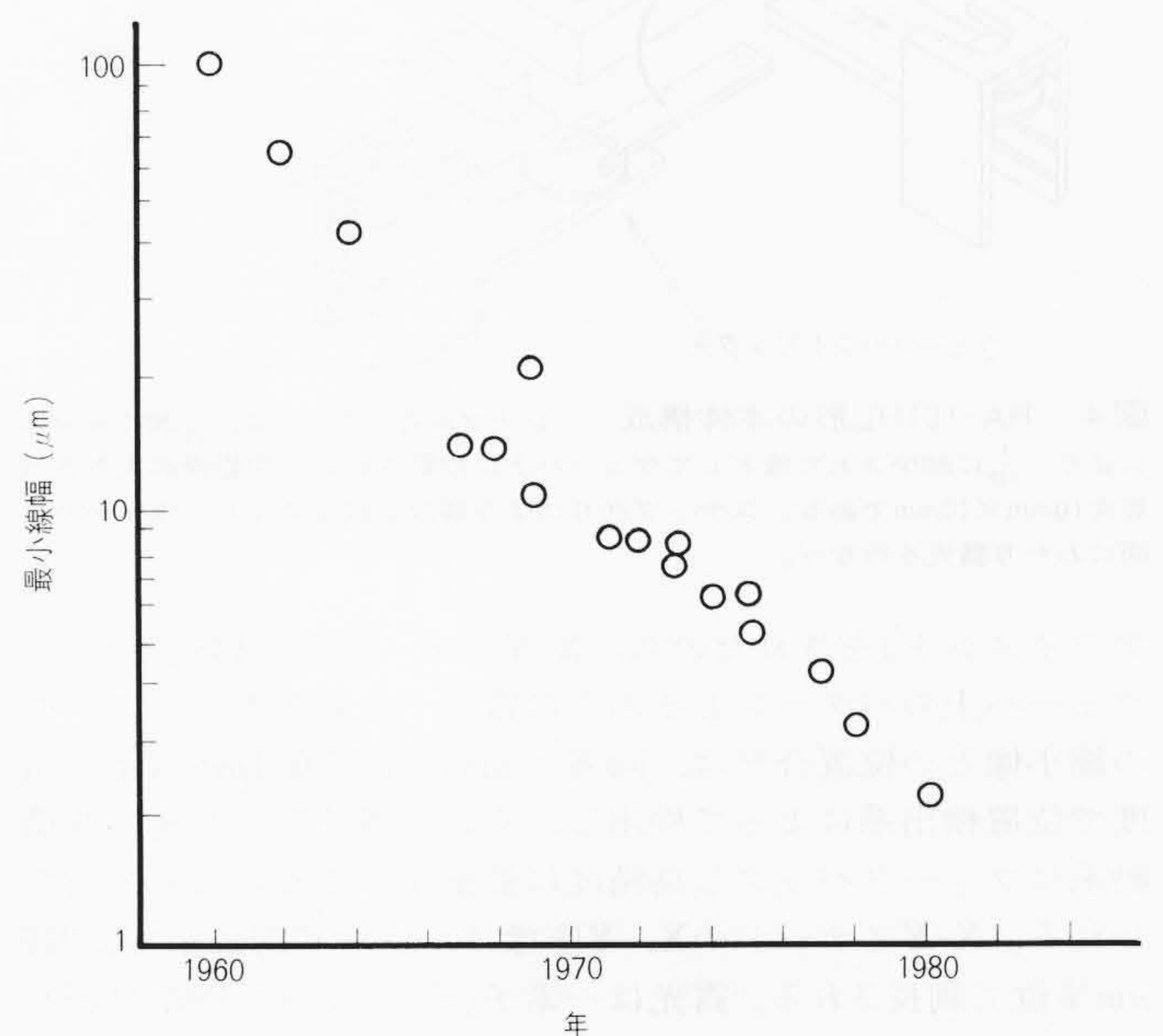


図2 最小線幅の推移 本結果は、IEEE(Dec.1977)の資料に報告者などの調査結果を補足したものである。



図3 RA-101HL形 本体機構部(右)は、恒温クリーンチャンバ内に設置されている。

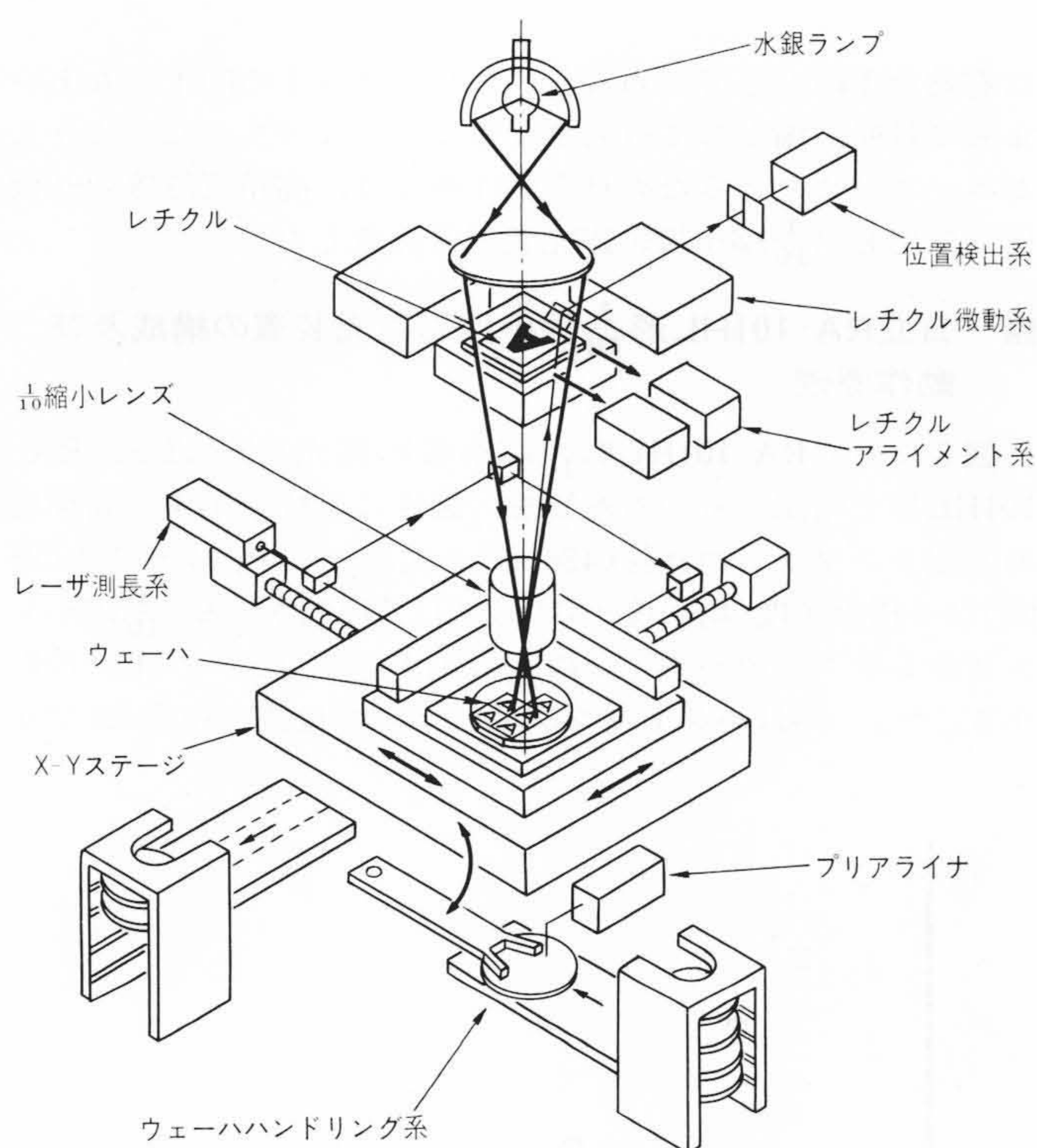


図4 RA-101HL形の本体構成 レチクルのパターンは、 $\frac{1}{10}$ 縮小レンズにより、 $\frac{1}{10}$ に縮小された像としてウェーハ上に投影される。投影像の大きさは最大10mm×10mmである。ステップ送りによる繰返し露光により、ウェーハ全面にわたり露光を行なう。

アライメント)をされたのち、X-Yステージ上に移送される。ウェーハ上のパターンとその上に露光するレチクルパターンの縮小像との位置合せは、両者の相対位置を $0.1\mu\text{m}$ 以下の精度で位置検出系によって検出し、その位置誤差をレチクル微動系にフィードバックし高精度に補正することによって行なわれる。X-YステージのX、Y座標は、レーザ測長系で $0.016\mu\text{m}$ 単位で測長される。露光は一素子(チップ)ずつ順次に繰り返してX-Yステージをステップ送りして行なう。

3 RA-101HL形に採用した要素技術

3.1 露光光学系

ウェーハに転写される像の質は、照明光源の照度の均一度や、焦点合せ機構、X-Yステージ、光学系各部の精度などに

$\frac{1}{10}$ 縮小レンズの特性が加わった総合的な性能の結果として決まる。レンズの解像力と諸量の間には次の関係がある。

理論解像力 $R(\text{line/mm}) \propto NA/\lambda$

ここに λ : 露光する光の波長

NA : レンズの開口数

ウェーハに転写される像の最小線幅は、 R に逆比例する。

RA-101HL形では、 NA が 0.28 と 0.35 のレンズを搭載することができる。各レンズの保証最小線幅はそれぞれ $1.2\mu\text{m}$ と $1.0\mu\text{m}$ である。複数台の装置を量産ラインへ導入した場合の互換性(装置間マッチング)を考慮に入れると、像のひずみ量に対する許容値にも厳しい規制が必要となり、RA-101HL形の場合には、一辺が 10mm の正方形画像のすべての点に対して、ひずみ量を $\pm 0.2\mu\text{m}$ 以内に収めている。解像力から要求されるレンズの焦点深度は $\pm 2\mu\text{m}$ であるが、ウェーハ面とレンズの焦点面との不一致は解像力以外に像の転写倍率の変化や、線幅のばらつきの増大をもたらす。このために焦点深度の許容値以上の精度で、ウェーハ面とレンズの焦点面との合せを制御する必要がある、自動焦点機構は重要な性能決定要因である。

3.2 自動焦点機構

焦点合せ方式を決定するに当たっては、次の点を考慮しなければならない。

- (1) ウェーハの表面に形成される層の凹凸や、物理的性質によって影響を受けにくいこと。
- (2) スループットを低下させないように、高速の応答ができること。

自動焦点機構としては次のような種々の方式がある。

- (1) ウェーハ上パターンの結像信号を利用する方式
- (2) 赤外光(レーザ光など)の反射を利用する方式
- (3) エアベアリングを利用する方式
- (4) エアマイクロメータを用いる方式

上記(1)、(2)の方式では、ウェーハ表面に形成される層に透明層(例えば SiO_2 、 Si_3N_4 層など)が存在すると検出誤差を生じ、そのつど補正が必要となってくる。これに対し(3)、(4)の方式は、ウェーハの表面と $\frac{1}{10}$ 縮小レンズの間隔を制御するために、ウェーハ表面の凹凸及び上述した透明層などによって影響を受けない。図5はRA-101HL形に採用しているエアマイクロ方式の自動焦点機構の動作原理を示したものである。ウェーハと縮小レンズの空間に一定の圧力で空気又は窒素ガ

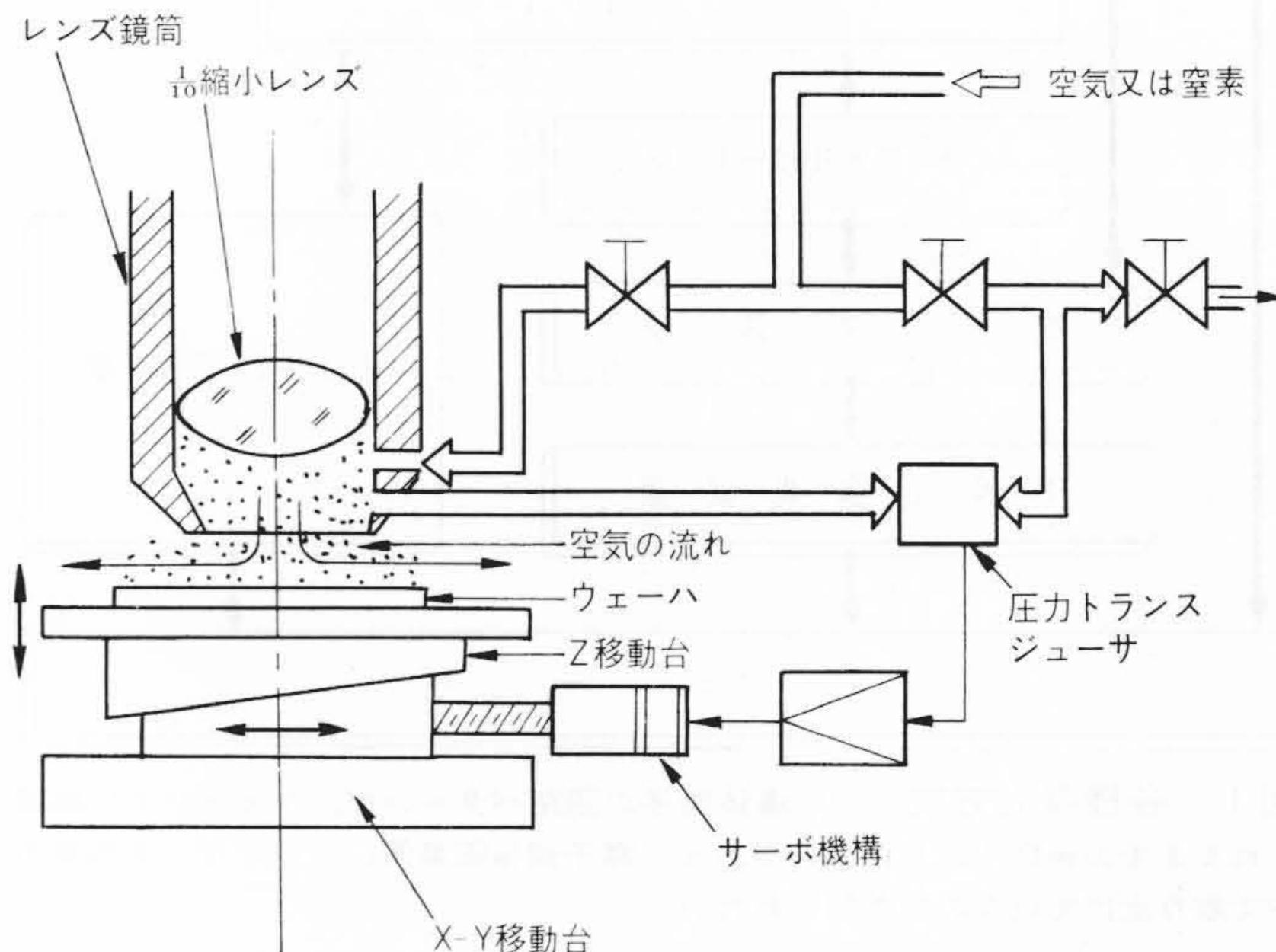


図5 RA-101HL形のエアマイクロ方式自動焦点機構の動作原理図 ウェーハと鏡筒間の間隙の変化は、圧力変化として圧力トランスジューサで検出し、サーボ機構によってZ移動台の位置補正が行なわれる。

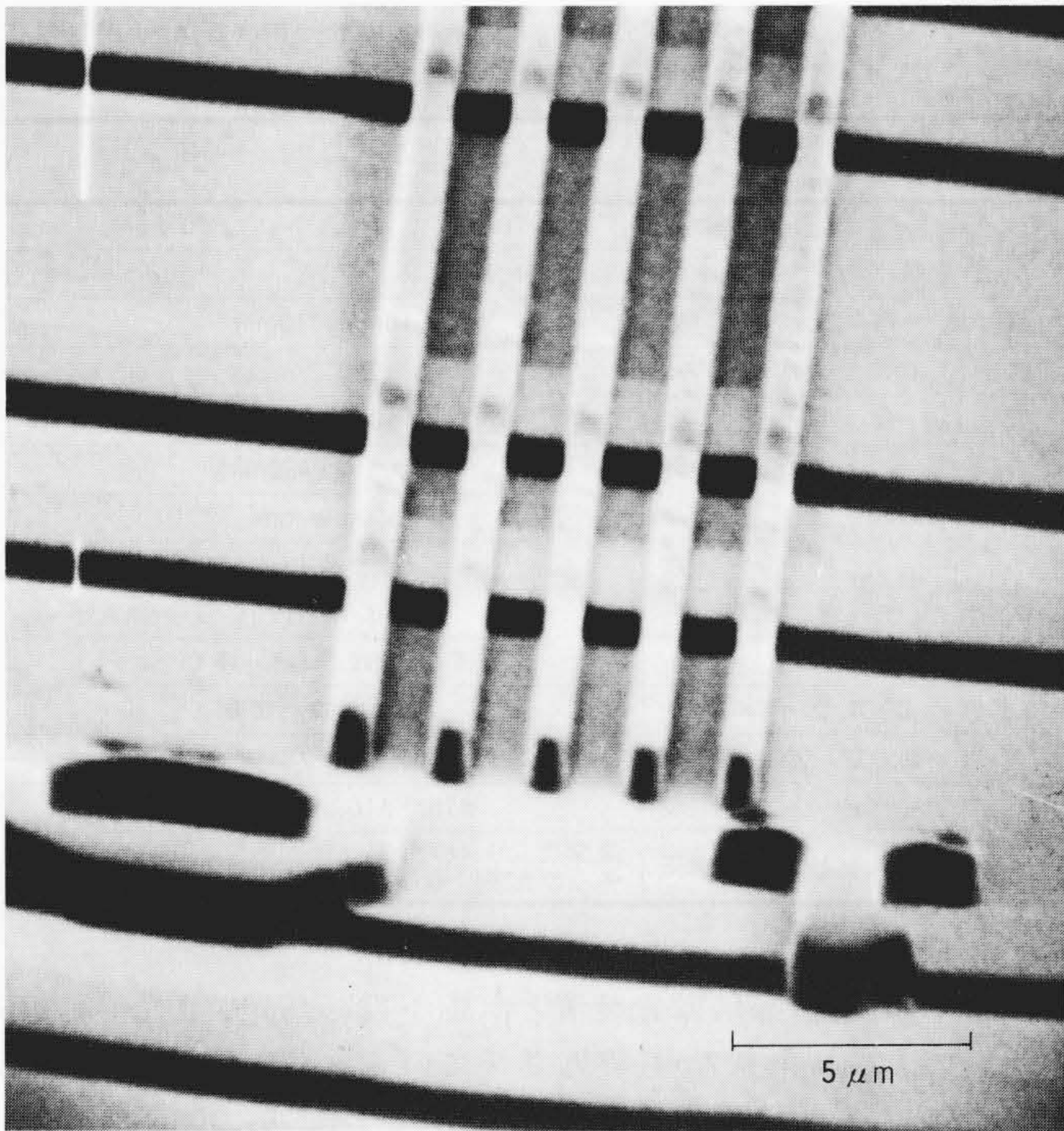


図6 RA-101HL形による露光結果の走査形電子顕微鏡による観察例 段差上の1 μ mライン アンド スペースを示す。

を送り込み、レンズ鏡筒とウェーハ間の間隙(約60 μ m)を通して排出させる。間隙に変化が生じると、レンズ空間の圧力が変化する。

変化量は圧力トランスジューサで検出され、サーボ機構を介してZ移動台にフィードバックされる。この機構によって、0.2 μ m以下の焦点合せ再現性を保つことができる。流体として窒素ガスを使用すれば、ネガレジストの使用も可能となる。

図6は本方式で露光された微細パターン(1 μ mライン アンド スペース)の走査形電子顕微鏡写真である。

3.3 高精度ステップ送り機構

RA-101HL形では、ウェーハのステップ送りを高精度で制御するために、X-Yステージによる送り誤差をレーザ測長系で検出し、これをレチクル微動台にフィードバックして精密位置決めをする方式を採用している(図7)。この方式の特長は、X-Yステージの目標値に対する停止位置誤差 ϵ を、レチクル微動台では10 ϵ で補正するため、精密補正ができることである。この方式で得た位置決め精度は $\pm 0.1\mu\text{m}$ (2 σ)である。X-Yステージの滑り面はオイルフリーの構造とし、メンテナンスの簡素化を図っている。

3.4 高精度位置合せ方式

解像力やステップ送り精度が向上しても、10層以上もの回路パターンを各工程ごとに重ねて転写してゆく過程で、素子の歩どまりを左右する最大の要因は各々のパターンを重ね合わせた場合の精度である。 $\frac{1}{1}$ 等倍露光方式では、ウェーハ全面に一括して露光を行なう方式のために、各工程ごとのパターンを重ね合わせて露光する場合に誤差の吸収能力に限界があり、その量は0.5~1 μ m程度である。

$\frac{1}{10}$ 縮小投影露光方式では、ウェーハ内の小さな領域(例えば10mm平方)を露光する方式なので、ウェーハに変形や反りがあってもその影響は少なく、また補正がしやすい。反りは自動焦点機構が常に追従し、変形に対しては各ステップごとに位置合せすることができる。 $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置が優れた位置合せの能力をもち、超LSIの製造に適していると言われる

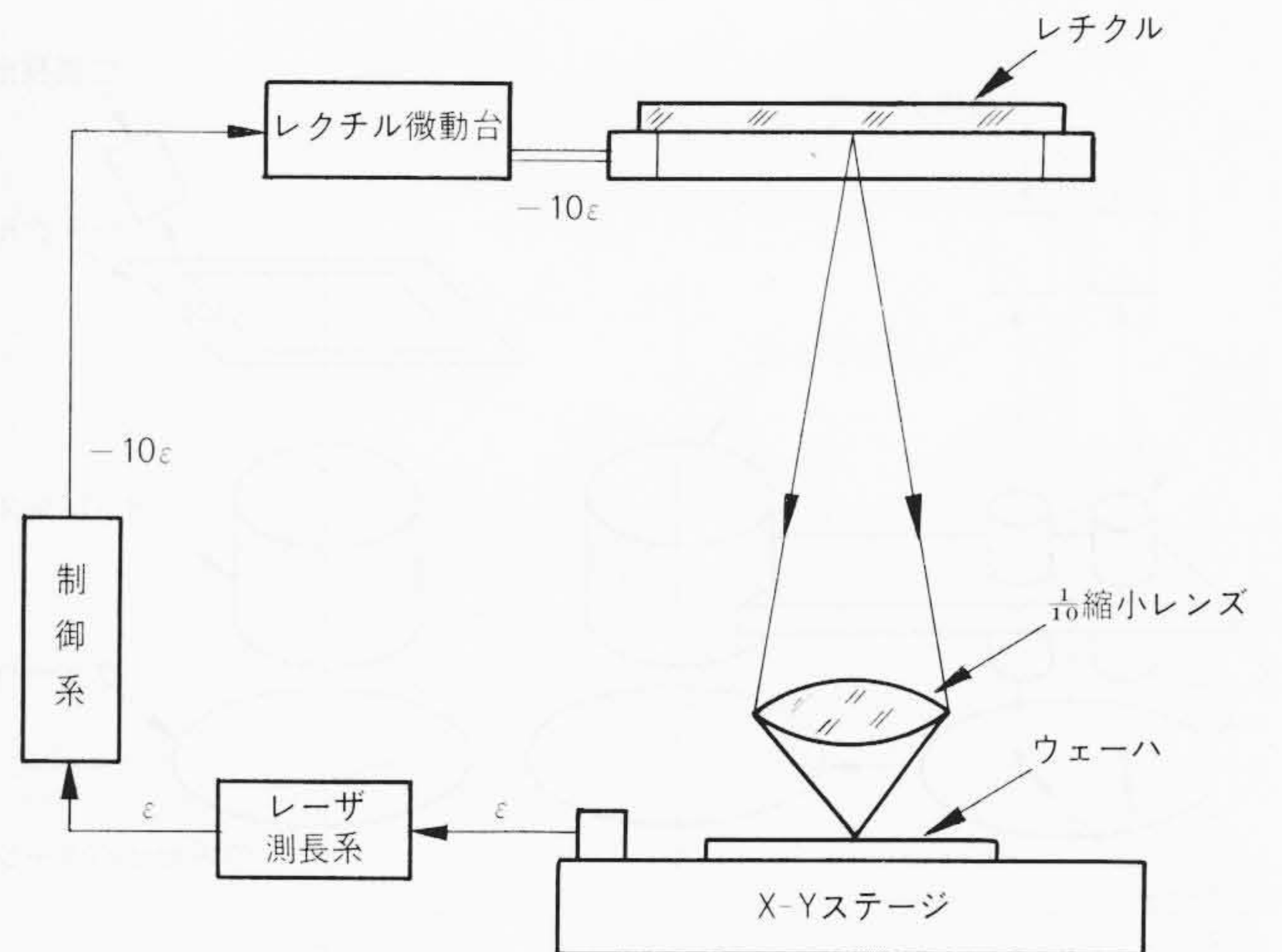


図7 RA-101HL形の高精度ステップ送り機構原理図 X-Yステージの目標値に対する停止位置誤差 ϵ を、レチクル微動台では10 ϵ で補正するため、精密補正ができる。

のはこのような特長をもっているためである。

ウェーハ上に設けられた位置基準となるパターンを検出し、その結果を露光の際の位置補正量にフィードバックをかけるのに、2種類の方法が実用化されている。一つの方法は、1回の位置測定結果に基づきウェーハ内すべてのチップに補正を行なう方法で、ウェーハアライメント方式又はグローバルアライメント方式などと呼ばれている。他の一つは、露光ごとにすべてのチップについてそれぞれ測定と補正を行なう方法で、チップアライメント方式又はダイバイダイアライメント方式などと呼ばれている。チップアライメント方式は、チップ配列の乱れや変形の著しいウェーハに対しても優れた合せ精度が得られるが、チップの数に比例して位置検出の頻度が増すので、スループットを低下させる要因を含んでいる。これについては、検出所要時間を短縮する各種の手法が開発され、改良が加えられつつあるが²⁾、最終的には高精度化に伴う素子の歩どまり向上との兼ね合いで総合評価されるべきものである。

以上は位置合せの手順についての説明を行なったものであるが、位置基準となるウェーハ上の位置合せ用パターンを検出する方法についても、次のような2種の方法がある。

- (1) 専用の光学系により検出するもの(OFF-AXIS方式)
- (2) 縮小レンズを通して位置検出系で検出するもの(TTL: Through The Lens方式)

図8は、両者の相違点を示した構成原理図である。

OFF-AXIS方式の利点は、

- (1) 専用光学系が使用できるので高画質の検出像を得やすい。
- (2) 図8に示したように、2点座標の同時検出(X, Y座標及び回転量の測定)が可能のため、測定が短時間で終了する。

一方欠点としては、

- (1) 測定光学系と露光光学系が異なるので、チップアライメントができない。
- (2) 測定光学系と露光光学系間に存在する物理的な距離(光学系の取り付け機構の関係で100mm前後)だけ測定後に移動させねばならず、この移動量がサブミクロン領域で必ずしも安定しないために、定期的な点検作業が必要であると言われている。

TTL方式の特長は、前述したチップアライメント方式及びウェーハアライメント方式の両方とも可能なことである。デ

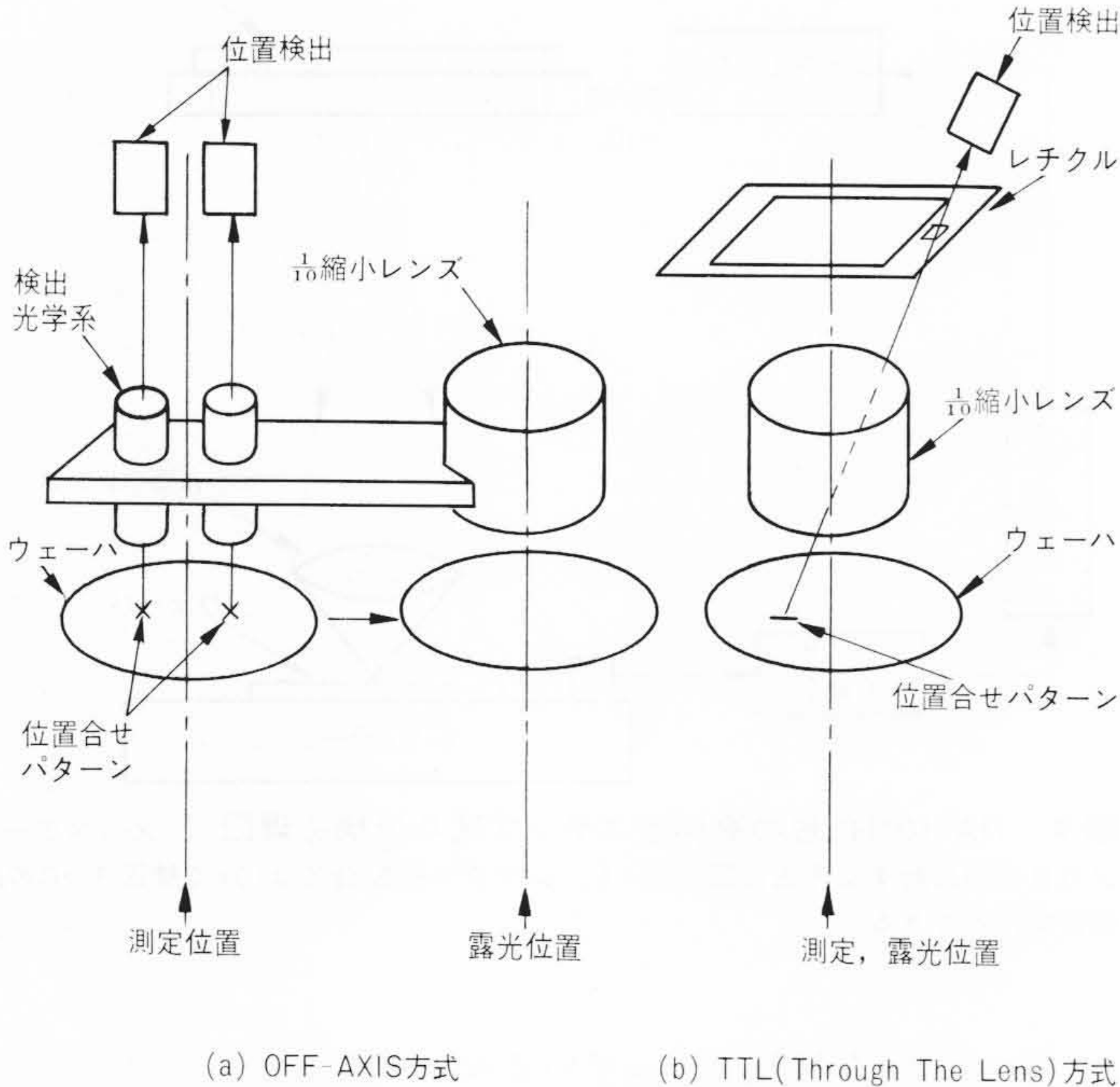


図 8 位置検出機構の比較 OFF-AXIS方式では、位置検出に専用の光学系を使用する。TTL方式では位置検出と露光の光学系を兼用している。

バイス精度の高度化に伴ってチップアライメント方式の要請はますます高まるものと予測される。RA-101HL形では自動TTL方式を採用した。

TTL方式では、露光波長を使って位置測定を行なうために、単波長特有の干渉の影響を受ける場合があるが、これについては検出光学系の改良 (g 線と e 線の選択使用など) や、位置検出用計算アルゴリズムの改良により²⁾解決を図っている。

RA-101HL形の位置補正機構は、3.3のステップ送り機構の項で説明したように、位置検出の結果をレチクル微動系にフィードバックして補正を行なっているために、精度の向上に有利である。

RA-101HL形による実際のプロセスでの重ね合せ結果の一例を表 1 に示す。

3.5 ハイブリッドユース

装置が製造ラインへ導入される場合には、複数台の装置とのマッチング性能が重要視されることは既に述べたとおりで

表 1 RA-101HL形による断面構造ごとの重ね合せ精度の実測例 重ね合せ精度は、X、Y 2 方向の平均値である。

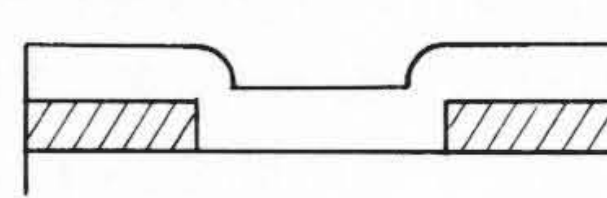
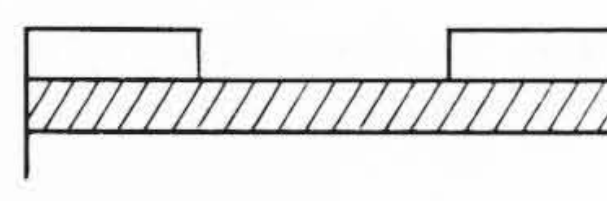
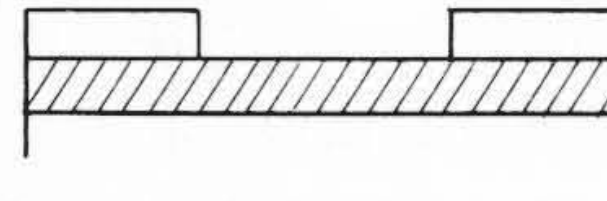
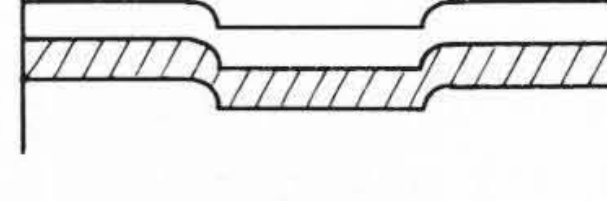
ウェーハ断面構造	重ね合せ精度(σ)
	0.06μm
	0.08μm
	0.06μm
	0.05μm

表 2 RA-101HL形の主な仕様 表中の重ね合せ精度とは、n 層目のパターンの上に n+1 層目のパターンを重ね露光した場合の精度である。

項 目		仕 様	
解像力	$\frac{1}{10}$ 縮小レンズ開口数	0.28	0.35
	最 小 線 幅	1.2μm	1.0μm
最 大 露 光 領 域		10mm×10mm	
像 ひ ず み		±0.2μm	
重 ね 合 せ 精 度		±0.2μm(2σ)	
照 明 光 源	光 源	g ライン(436nm)	
	照 度	500mW/cm ²	
	均 一 度	±3%以内	
ス テ ッ プ 送 り 精 度		±0.1μm(2σ)	
機 能	ウェーハアライメント	TTL方式、自動/手動	
	チップアライメント	TTL方式、自動	
	自 動 焦 点 機 構	エアマイクロ方式	
能	ウェーハハンドラ	φ76, φ100, φ125共用	
	ハイブリッドユース補正	直交度: 0.4秒, チップ回転: 0.05μm/10mm チップ配列: 0.1μm	

あるが、更に $\frac{1}{1}$ 等倍露光装置と $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置との混用 (ハイブリッドユース) も実施されている。 $\frac{1}{1}$ 等倍露光装置固有の像ひずみや使用するホトマスクのもつ配列の位置誤差を、 $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置によってどのような手法で吸収するかが重要な課題である。このような対応は、いわゆる装置のハードウェアだけでなく、補正の内容と手順を豊かにするソフトウェアが重要な役割を演ずる。RA-101HL形では、自動TTL方式のチップアライメント機能を活用したウェーハ上の各チップの位置測定と、その結果に基づくウェーハ回転量、各チップのX、Y座標、チップ配列の直交度などに対する補正のソフトウェアを用意するなど、半導体製造工程での縮小投影露光装置の性能を十分に発揮できるように考慮しており、今後いっそうの増大が予想されるニーズへの対応を図っている。

最後にRA-101HL形的主要性能を表 2 に示す。

4 結 言

以上、RA-101HL形の技術的な特徴について報告した。かつて、限界説まで出された光露光技術は、光学系をはじめシステム構成に新たな構想に基づく改良が加えられ、常に実用領域での主流をなしてきた。最近では、実用レベルで1μmの壁を乗り越え、0.8μm程度まで到達するのは時間の問題とも言われている。その先の技術については、X線ステッパなどの開発が進められているが、本稿で報告した精密ステップ送り技術や位置合せの技術は、新世代のステッパでいっそう重要な技術要素になるものと考えられる。RA-101HL形は、半導体の高密度化の進展に歩調を合わせて広く利用してもらうため、各方面のユーザーの意見を吸収して開発されたものである。

最後に、御意見を寄せられたユーザー各位に対し深謝する次第である。

参考文献

1) 河村, 外: 空気マイクロメータ方式による高精度位置保持機構, 昭和58年度精機学会春季大会
2) 例えば, 寺澤, 外: ウェーハ位置計測のためのモーメント計算による信号処理法, 昭和58年度精機学会春季大会
3) 高梨: $\frac{1}{10}$ 縮小投影露光装置 Semiconductor World, 5月号, p.58(1982)
縮小投影露光法の技術課題につき解説したもので、本稿と併せて参照願いたい。