# ハーフミクロンi線リソグラフィー装置 "LD-5015iCW"

# i Line Lithography Equipment for Halfmicron Fabrication

半導体素子の高集積化技術は、確実にしかも予測どおりに進歩してきており、 これを支えてきたのは素子の微細加工技術である。なかでも、素子の回路パタ ーンをウェーハ上に露光焼付けする縮小投影露光装置は, 微細加工技術の基幹 であり、超LSI量産設備として欠くことのできない主要製造装置である。日立製 作所で16 M DRAM (Dynamic RAM) 量産用装置として開発した縮小投影露光 装置LD-5015iCWは, 0.5 μm L·S(Line and Space)の高解像度, 17.5 mm角 の広フィールド露光を実現し、高速・高精度なウェーハステージ、パターン検 出器を搭載している。また、焦点深度を浅くする焦点エラーを低減し、フォー カス裕度を高める機能を備え、16 M DRAMプロセスに十分対応できる性能を持 った装置である。

林 聰一郎\* Sôichirô Hayashi 保\*\* Tamotsu Kume 押田良忠\*\*\* Yoshitada Oshida 仙石正行\*\*\*\* Masayuki Sengoku

# 1 はじめに

現在、LSIデバイスはサブミクロン時代にある。 4 M DRAM (Dynamic RAM) は本格化し、0.8 µmのデザインルールのデ バイスはすでに成熟期に入っている。また、1990年来、次世 代の16 M DRAM技術として、0.5 μmのデザインルールの量 産試作が開始されている。さらに、R&D(Research and Development)レベルでは、次々世代の64 M DRAMとして、 0.35 μmのデザインルールの可能性の追究が各技術課題にわた ってなされ、研究・開発結果が発表されている。

この中で、縮小投影露光装置は、1MDRAMまでのg線露 光から4MDRAMのg, i線露光, そして, i線用レジストの 進歩も伴い16 M DRAMのi線露光と、確実に露光波長は短波 長へと推移し、i線装置は今や主流となり超LSI微細化推進の 主役を担ってきている。

日立製作所で4MDRAM量産用として開発した縮小投影露 光装置LD-5010i<sup>1)</sup>は、初のi線装置として実量産ラインで稼動 し、性能の高さを実証した。LD-5015iCWはその実績技術を基 盤に、今回16 M DRAM量産用とした装置である。

本装置は, i線縮小レンズの高開口数化によって低下した焦 点深度を,レンズ設計・製造の技術改善によって誤差成分を 極力小さく抑えた。また、焦点エラーを低減する機能を備え

ことができた。以下,本稿ではその特長と内容について述べ る。

# 装置開発の課題と装置仕様

本装置の開発コンセプトは、16 M DRAM量産用縮小投影露 光装置として要求される精度・性能を達成することを基本に, ユーザーへ使いやすい装置を提供することにある。基本的な 課題は, 高解像度・広フィールド縮小レンズ, 高輝度照明光 源,ウェーハステージの高速・高精度,高精度重ね合わせ, 8 インチウェーハ対応と重金属汚染対策を含む異物対策など がある。しかし、ユーザーでの生産性向上、歩留り向上など にこたえるには、信頼性の向上、自動化、さらに、その精度 を遺憾なく発揮するためのシステム作りが必要である。本装 置では、特に自動補正システムの導入を図り、従来オペレー ターが手動操作で感覚的に行っていたフォーカス設定などを 自動化し、はるかに短時間で正確な操作ができるようにした。 また, 前述の課題の中で最重要技術課題は, デバイスのデザ インルールである0.5 μm L·S(Line and Space)の微細パタ ーンを解像し、スループット面から、1回で2チップの露光 ができる露光フィールドを持ち、さらに、16 M DRAMの各ユ ているので実効焦点深度を拡大し、フォーカス余裕を高める ーザー、各プロセスに対し十分余裕のある実効焦点深度を持

<sup>\*</sup> 日立製作所 計測器事業部 \*\* ミノルタカメラ株式会社 高槻研究所 \*\*\* 日立製作所 生産技術研究所 \*\*\*\* 日立製作所 電子デバイス製造システム推進本部

つ装置を実現することにある。以下,本装置に取り込んだ焦 点深度の拡大技術について述べる。

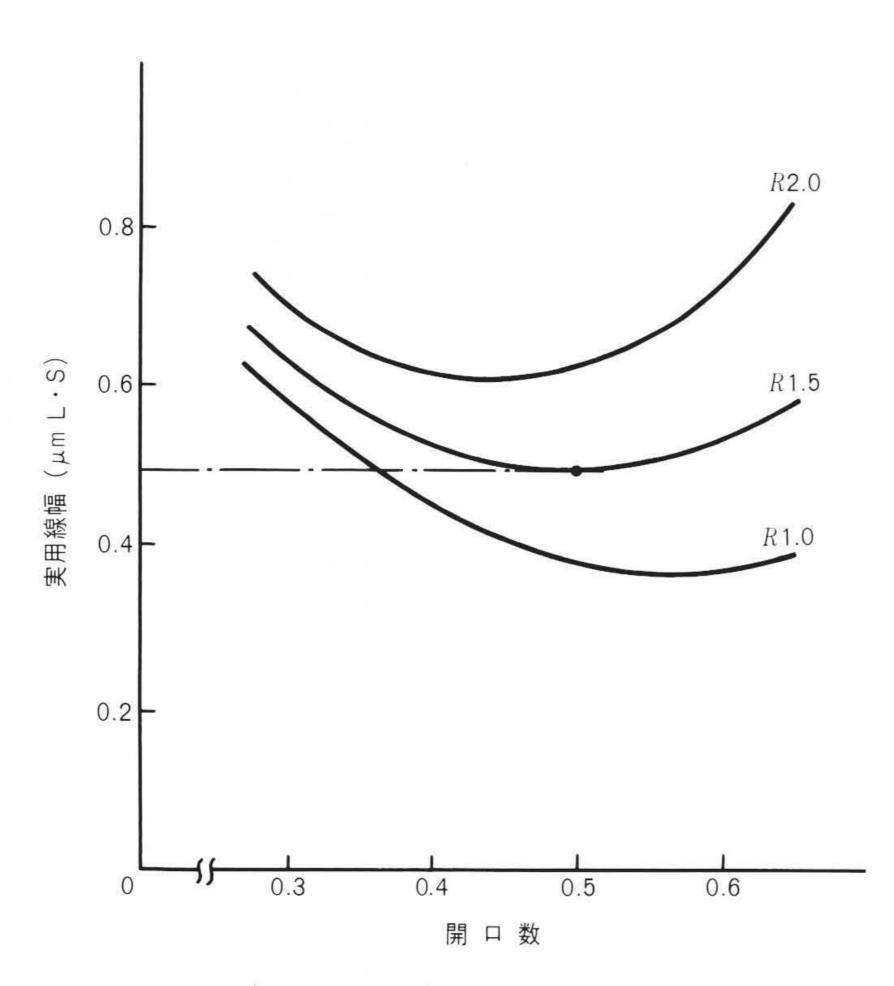
#### 2.1 縮小レンズの開口数の最適化

開口数と焦点深度が相反的な関係にあることはすでによく知られている。16 M DRAMに必要な実用線幅は0.5 μm L·Sであり、また、できるだけ大きい焦点深度を実現するため、最適な開口数を選択することが重要である。過去の実績データをもとに、シミュレーションで縮小レンズの実用線幅と、開口数および焦点深度の相関を求めた結果を図1に示す。実用線幅0.5 μm L·Sの解像度を持ち、焦点深度の最も大きい縮小レンズの開口数は0.50であり、焦点深度は1.5 μm幅であることがわかる。

#### 2.2 LD-5015iCWの仕様

本装置LD-5015iCWと 4 M DRAM用のLD-5010iの仕様を表1に示す。精度・性能的にみると、ユーザーの要求レベルにあるが、焦点深度については、前述した解像度と焦点深度の相反的な関係から、4 M機(4 M DRAM量産機)に比べ半減してしまっている。このため本装置では、実効焦点深度を小さくする装置的要因(焦点エラーの各種要因)の対策を行い、縮小レンズの焦度深度はそのままに、実効焦点深度の拡大を図った。

また、本装置は4~8インチのウェーハサイズを標準とし



注:略語説明 L·S(Line and Space)
R 1.0~R 2.0 (焦点深度幅1.0~2.0 μm)

図 I i線縮小レンズの最適開口数シミュレーション 実用線幅, 開口数,焦点深度の相互関係を,過去の実績データをベースにシミュレ ーションした結果を示す。

ており、従来の5インチレティクルのほか、6インチレティクルも装置寸法を変えずに使用可能とした。本装置LD-5015 iCWの外観を図2に示す。

### 2.3 必要焦点深度と補正システムの効果

装置に必要な焦点深度と各焦点エラーの要因について表2 に示す。縮小レンズにかかわる焦点エラーの要因としては, 大気圧変動、露光エネルギーによる変動、および像面湾曲が ある。また、装置全体にかかわる焦点エラーの要因は、ウェ ーハのフラットネス,フォーカス機構の安定性, およびベス トフォーカスの設定誤差がある。さらに、露光するウェーハ は各種プロセス工程でエッチング, 膜付けなど加工処理され, 表面にミクロな段差が作られる。このプロセス段差は各ユー ザーごと、また工程ごとに異なるが0.5 μmとし、その他各要 因については長期間安定性を含め同表の値に推定した。各種 要因のうち、ある点を中心として変動する成分 $(a \sim e)$ は、通 常誤差計算に使用する二乗和平方根で求め、変動しない成分 (f, g)は単純加算した。その結果,装置として必要な焦点深 度は1.89 μmとなる。この値は、開口数0.50の縮小レンズの焦 点深度1.5 μmを超えてしまい, 0.5 μm L・Sの露光が安定に できないことを示している。このため本装置では、エラー要 因の中で特に大きいウェーハフラットネスとフォーカス設定 誤差に対し、補正システムを導入し、必要焦点深度の低減を 図った。その推定結果を同表に示す。必要焦点深度を1.31 µm と縮小レンズの焦点深度1.5 µm以内に抑えることができる。 このことから、本装置は補正システムの導入で、16 M DRAM 量産用縮小投影露光装置として使用できる。

# 3 i線縮小レンズの製品化

高解像度と広フィールドを同時に達成し、しかも解像度と相反的な焦点深度を可能な限り大きくするためには、i線に対し高透過率、高屈折率を持つ良好な硝材が必要である。また、縮小レンズの設計、製造でいかに理論的無収差レンズに近づ

表 I LD-5015iCWの仕様とLD-5010iの仕様比較 焦点深度は、表 2 との関係で像面湾曲込みの値とした。保証焦点深度は、像面湾曲分を引き、おのおの $1.0 \, \mu m$ ,  $2.0 \, \mu m$ である。

|           | 項        | 目   |    | LD-5015iCW(16 M機)                         | LD-5010i(4M機)    |
|-----------|----------|-----|----|---|------------------|
| 縮小レンズ     | 露光波長(nm) |     |    | 365(i線)                                   | 365(i線)          |
|           | 縮        | /]\ | 比  | <u>1</u><br>5                             | <u>1</u><br>5    |
|           | 解像度(開口数) |     |    | 0.5 μm L•S(0.50)                          | 0.7 μm L·S(0.40) |
|           | 露光フィルード  |     |    | I7.5 mm角(φ24.3)                           | I5 mm角(φ21.2)    |
|           | 焦        | 点 深 | 度  | 1.4 μm                                    | 2.5 μm           |
| フォーカス再現精度 |          |     | 精度 | 0.15 μm                                   | 0.2 μm           |
| ステージ配列精度  |          |     | 清度 | 0.06 μm/3 σ                               | 0.1 μm/3 σ       |
| 重ね合わせ精度   |          |     | 青度 | $0.1  \mu m /  \overline{x}  + 3  \sigma$ | 0.12 μm/3 σ      |
| 最大ウェーハサイズ |          |     | イズ | φ8インチ                                     | φ6インチ            |

注:略語説明 16 M機(16 M DRAM量産機), 4 M機(4 M DRAM量産機)

けるかが, さらに重要な技術である。今回これらの技術課題 を解決し, 良好な縮小レンズの製品化を完了した。

# 3.1 焦点深度の拡大

デバイスのデザインルールから必要な解像度を得るには, 前述のように最適な開口数があり、その決められた開口数で できる限りの焦点深度拡大を図る縮小レンズは, 設計, 製造 両面で最大限の努力が不可欠である。

(1) 設計面では、光学設計的に諸収差を理論的無収差と呼べ る範囲までに良好に補正しなければいけない。諸収差の残存 が露光フィールド内各点での像のコントラストを低下させ,

また像の非対称性を発生させることにより、結果として焦点 深度を狭くしてしまう。このため、収差を極力小さく設計す ることが重要である。

温度、大気圧など諸環境変化に対し、また露光エネルギー によるレンズ単体の温度変化に対しても, 十分安定した設計 を行う必要がある。これらの環境変化、温度変化によってレ ンズ主値, 特にベストフォーカス位置が変動することはよく 知られている。しかし、この問題の解決技術と前述の収差補 正技術は相反する技術である。これには、新硝材の開発、硝 材の特性(透過率、屈折率)に合わせた選択的配置、レンズ形

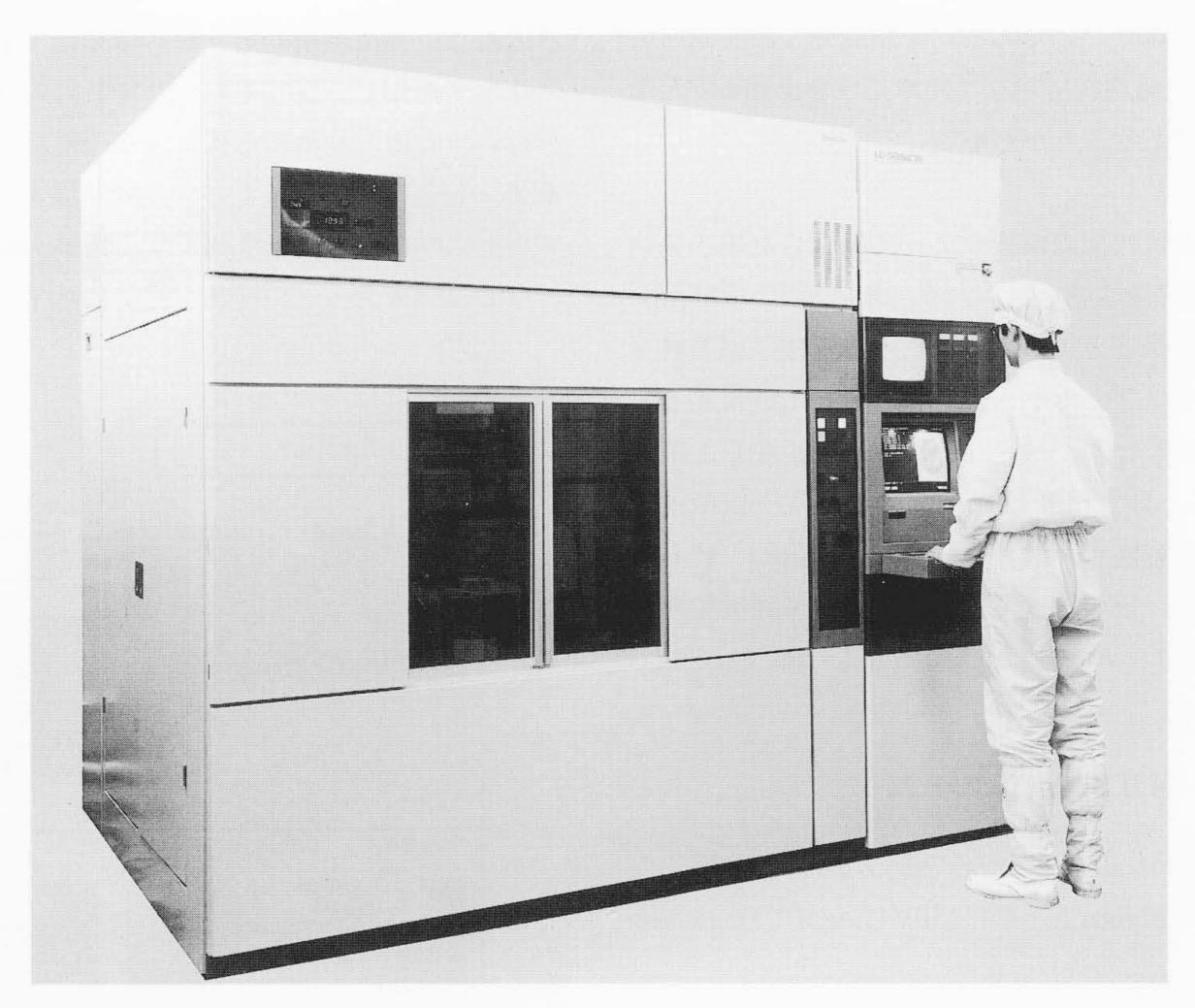


図 2 縮小投影露光装置LD-5015iCWの外観 クリーンルーム内の照明を考慮したカラーで全体 をシンプルに構成した。

表 2 必要焦点深度と各種要因 ベストフォーカス位置の変動要因とその推定値を示す。各項の 値は,長期間安定性を含めて,実仕様よりもエラー値を大きくした。

| <b># F</b>         | #T\ a = 1 24 白 14                  | エラー(誤差)値 (μm) |      |
|--------------------|------------------------------------|---------------|------|
| 要                  | 補正システム・改良法                         | 補正なし          | 補正あり |
| a(大気圧変動起因)         | 縮小レンズの硝材開発                         | 0.1           | 0.1  |
| b (露光エネルギー起因)      | と設計・製作技術改善                         | 0.2           | 0.2  |
| c〔ウェーハフラットネス(LTV)〕 | ショットレベリング補正                        | 0.8           | 0.2  |
| d (フォーカス安定性)       | エアマイクロ+光センサ方式                      | 0.2           | 0.2  |
| e〔フォーカス設定誤差(操作)〕   | 補正システムによる自動設定                      | 0.5           | 0.2  |
| f(縮小レンズ像面湾曲)       | 縮小レンズの技術改善                         | 0.4           | 0.4  |
| <i>g</i> (プロセス段差)  |                                    | 0.5           | 0.5  |
| h (必要焦点深度)         | $(f+g)+\sqrt{a^2+b^2+c^2+d^2+e^2}$ | 1.89          | 1.31 |

注:略語説明など ウェーハフラットネス(ウェーハ面の平たん性), LTV(Local Thickness Variation), エアマイクロ(エアマイクロメータ)

状の選択と構成法, そして構造材および縮小レンズの全体構造などで安定化を図った。

(2) 製造面では、基本的に設計値どおりの性能(諸収差)を持つ縮小レンズに仕上げることと、性能ばらつきをほとんど許さずに造り込み、製造誤差を極力小さく抑えることが重要である。

以上の設計,製造技術を含め、本装置の縮小レンズ製品化に際し、4 M機LD-5010iの経験が大いに役立った。それは、硝材の選択が設計上の困難さを解決する一手段であるが、その経験が新しい硝材の開発を促進し、既開発の硝材の活用に加え、特性の良い新硝材によって新しい設計技法を生み出し、各収差の極小化が図れたことである。今回開発した新硝材の一つを図3に示す。i 線波長に対し、従来特性を上回る安定な特性を持った硝材であることがわかる。

# 3.2 解像性能

前述のように、各種技術の結集によって開発した縮小レンズのレンズセンタの解像性能を図4、5、6に示す。0.6 μm, 0.5 μm L·Sの各解像度と焦点深度の断面走査電子顕微鏡写真が図4である。トップとボトムの形状も良好で寸法差も少ない。φ24.8 mmの露光フィールド内3点(中心、中帯、最外周)の0.5 μm L·S、焦点深度1.0 μm幅の走査電子顕微鏡平面を図5に示す。対称性も、像の質も良く、面内均一性も高い。0.6~0.35 μm L·Sの解像度を示す走査電子顕微鏡断面を図6に示す。露光エネルギーは異なるが0.35 μm L·Sまで良好に解像している。

# 4 ショット レベリング システム

16 M DRAMで使われるウェーハのフラットネス仕様は,先の表 2 に示すように20 mm当たりのLTV(Local Thickness

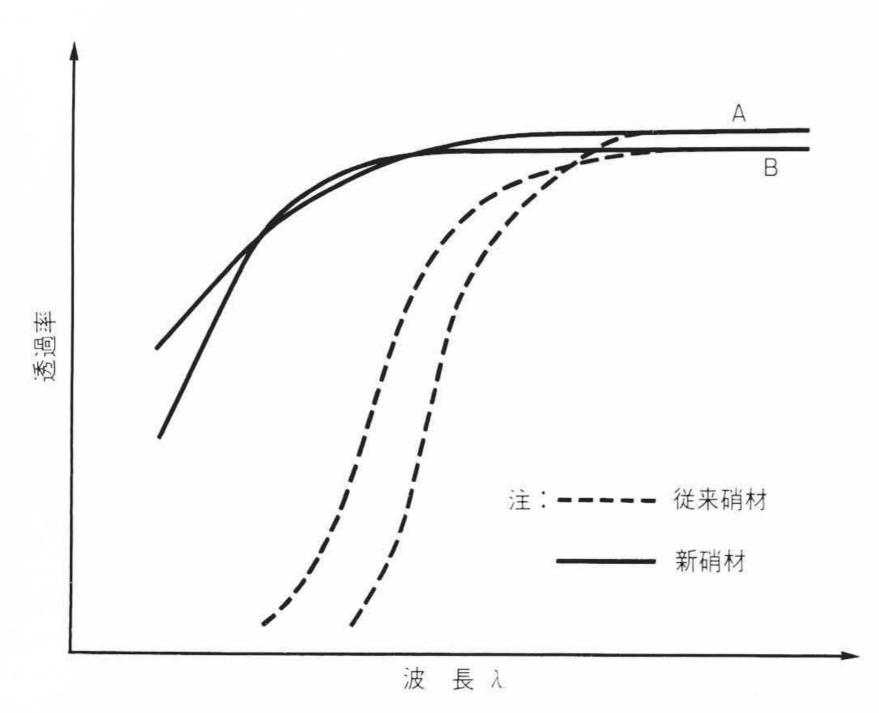
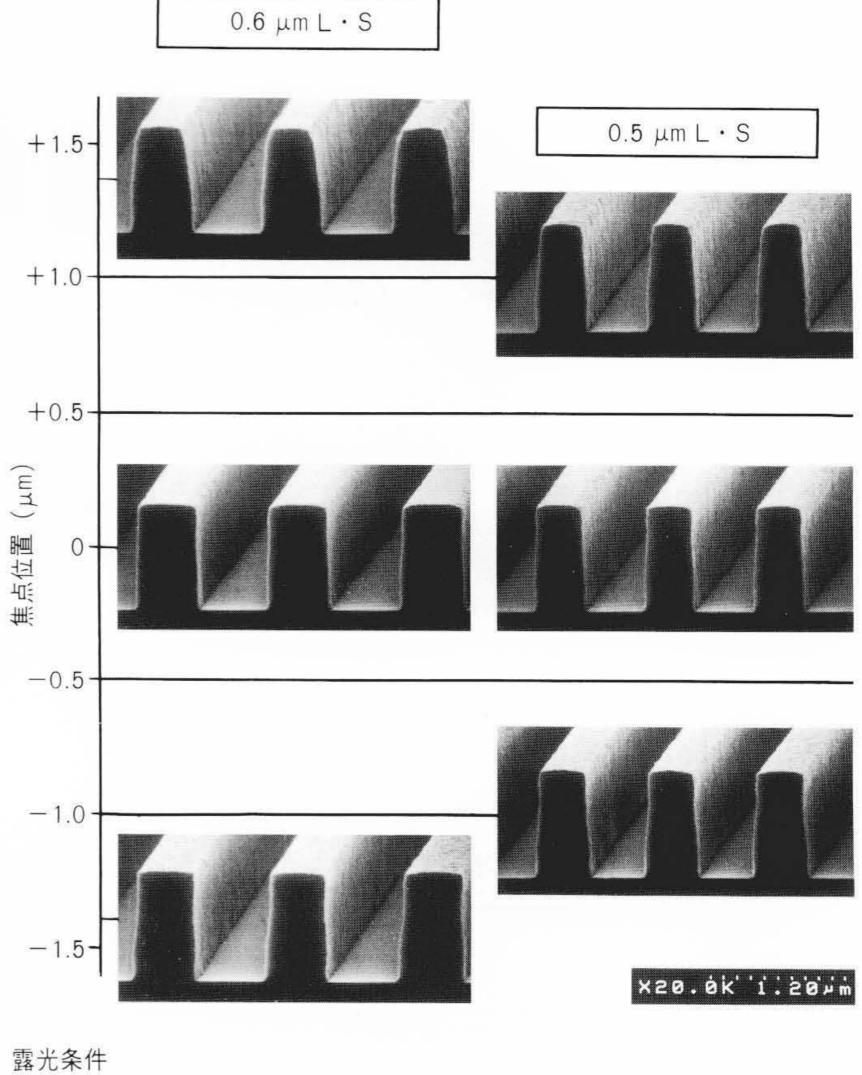


図3 新硝材と従来硝材の透過率比較 新硝材は短波長側で透過率が向上し、レンズ設計に新しい手法を導入できた。

Variation)で約 $0.8 \, \mu \text{m}$ である。これは、ウェーハ露光面で約 $0.8 \, \mu \text{m}/20 \, \text{mm}$ の傾斜成分があり、フォーカスが正しく合わされたとしても露光フィールドの両端で最大 $0.8 \, \mu \text{m}$ の焦点エラーが発生する。したがって、従来のフォーカス機構では、ウェーハの露光フィールド全域を縮小レンズの焦点深度内に入れることは非常に困難であり、露光時にウェーハの露光面を縮小レンズの像面と並行にするためのショットレベリングシステムが装置に不可欠な機能である。

# 4.1 ウェーハステージの構成

ウェーハステージは、従来機構の粗動部に微動部を機構的に一体化し、さらに、レベリング機構を含め新しい機能を組み込んだ。また、粗動送りから微動送りまでの位置決めとレベリング動作を一貫してレーザ測長計のフィードバック制御を行い、高速・高精度を得た。その他、ウェーハのプリアライメントをウェーハステージ上で処理するため、トップテーブル上にウェーハ回転を補正する粗動の軸機構を持っている。ウェーハステージの構成を図7に示す。



ウェーハ: Bare-Si レジスト: i線レジスト 膜 厚: 1.0 μm PEB: あり 現 像: NMD-3Dip 60 s

注:略語説明 PEB (Post Exposure Bake:露光後ベーク)

図 4 各L・Sの焦点深度(断面走査電子顕微鏡写真) 縮小レンズのレンズセンタ部の解像性能と焦点深度を示す。露光エネルギーは各L・Sー定である。解像パターンのトップとボトム形状も深い焦点深度内で良好で寸法差も少ない。

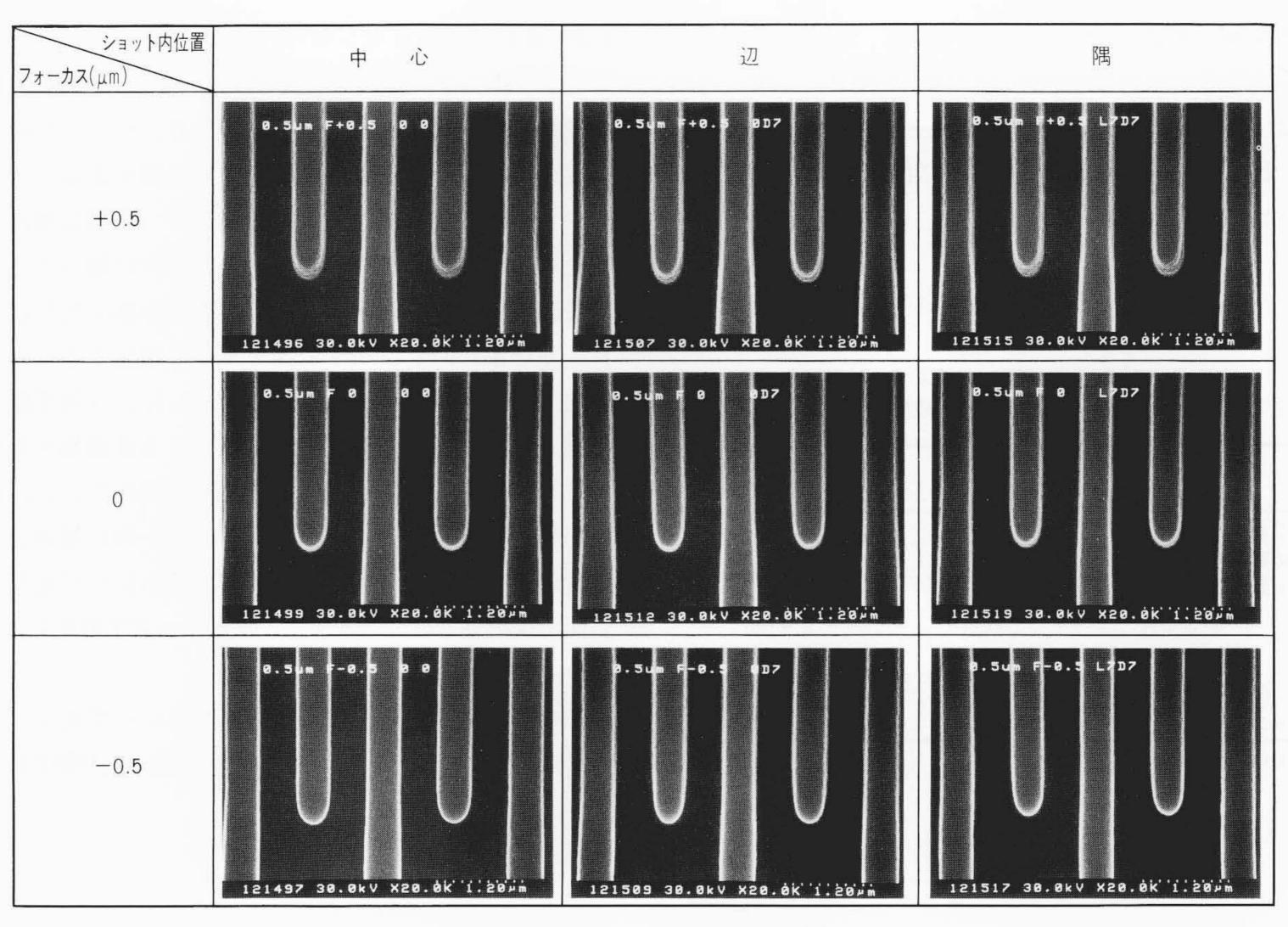


図 5 0.5 µm L·Sショット内解像度と焦点深度(平面走査電子顕微鏡写真) ーンの対称性, また先端部の像質も良く, 面内均一性も高い。

露光条件は図4と同一である。解像パタ

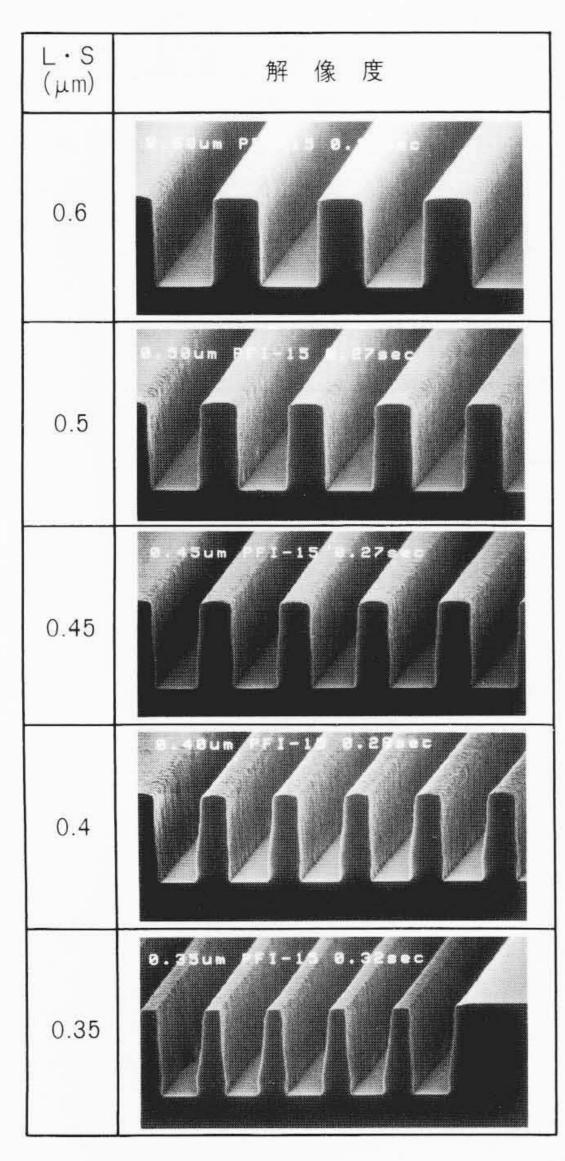


図 6 各L·Sの解像度(断面走査電子顕微鏡写真) 露光条件は図4 と同一である。露光エネルギーは異なるが、0.35 μm L·Sまで良好に解 像している。

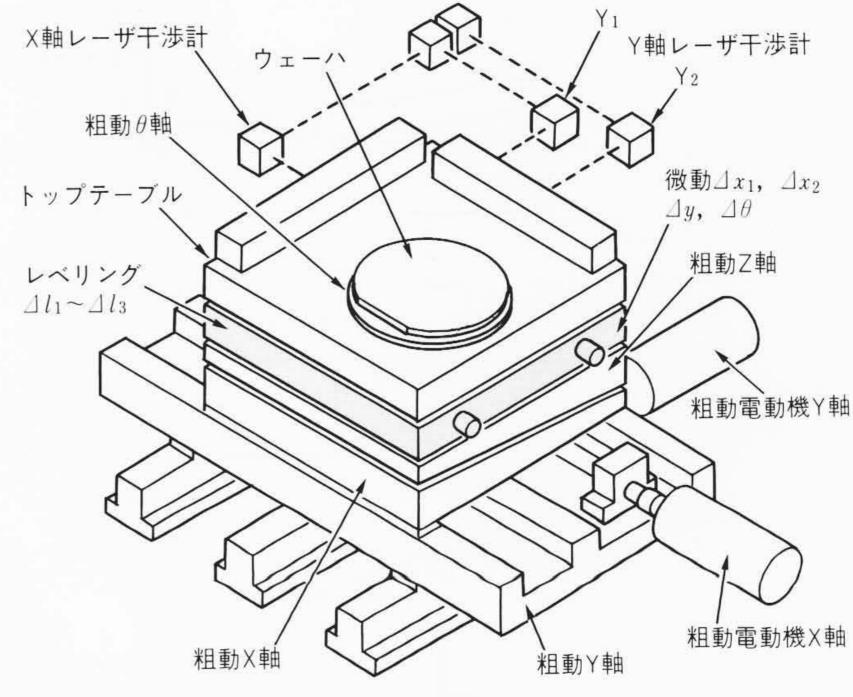


図 7 ウェーハステージの構成と構造 ウェーハステージは粗動部 の上部に微動部が組み込まれ, その内部にレベリング機構を組み込んで いる。駆動は3本の圧電アクチュエータによる。

# 4.2 レベリング機構

レベリング機構は、ウェーハステージの上部に組み込まれ、 縮小レンズの像面にウェーハの露光面を並行に位置決めする 機能である。ウェーハとレーザ測長用(ウェーハのXY方向の 位置決め用)ミラーを搭載したトップテーブル全体を3本の圧 電アクチュエータ $\Delta l_1 \sim \Delta l_3$ によって駆動し、傾斜させる。

ウェーハステージの達成精度(実力値)を**表 3** に示す。 4 M 機LD-5010iとの比較をするため、ステージ単体の精度とした。 4 M機と比べ格段の、また16 M機(16 M DRAM量産機)として十分高レベルな精度が得られた。

表 3 ウェーハステージの達成精度 位置決め時間・精度は、両装置の比較をするため、ステージの単体での達成度を示す。

| 項      | 目        | LD-5015iCW | LD-5010i |
|--------|----------|------------|----------|
| 最高移動速  | 度        | 125 mm/s   | 100 mm/s |
| 位置決め時  | 間(15 mm) | 0.29 s     | 0.4s     |
| 位置決め精  | 度        | 0.02 μm    | 0.05 µm  |
| 配列结束   | 絶対精度     | 0.08 µm    | 0.1 μm   |
| 配列精度   | 再現精度     | 0.05 μm    | 0.07 μm  |
| YAW補正再 | 現精度      | 0.01 µm    |          |
| フォーカス  | 再現精度     | 0.1 μm     | 0.15 μm  |

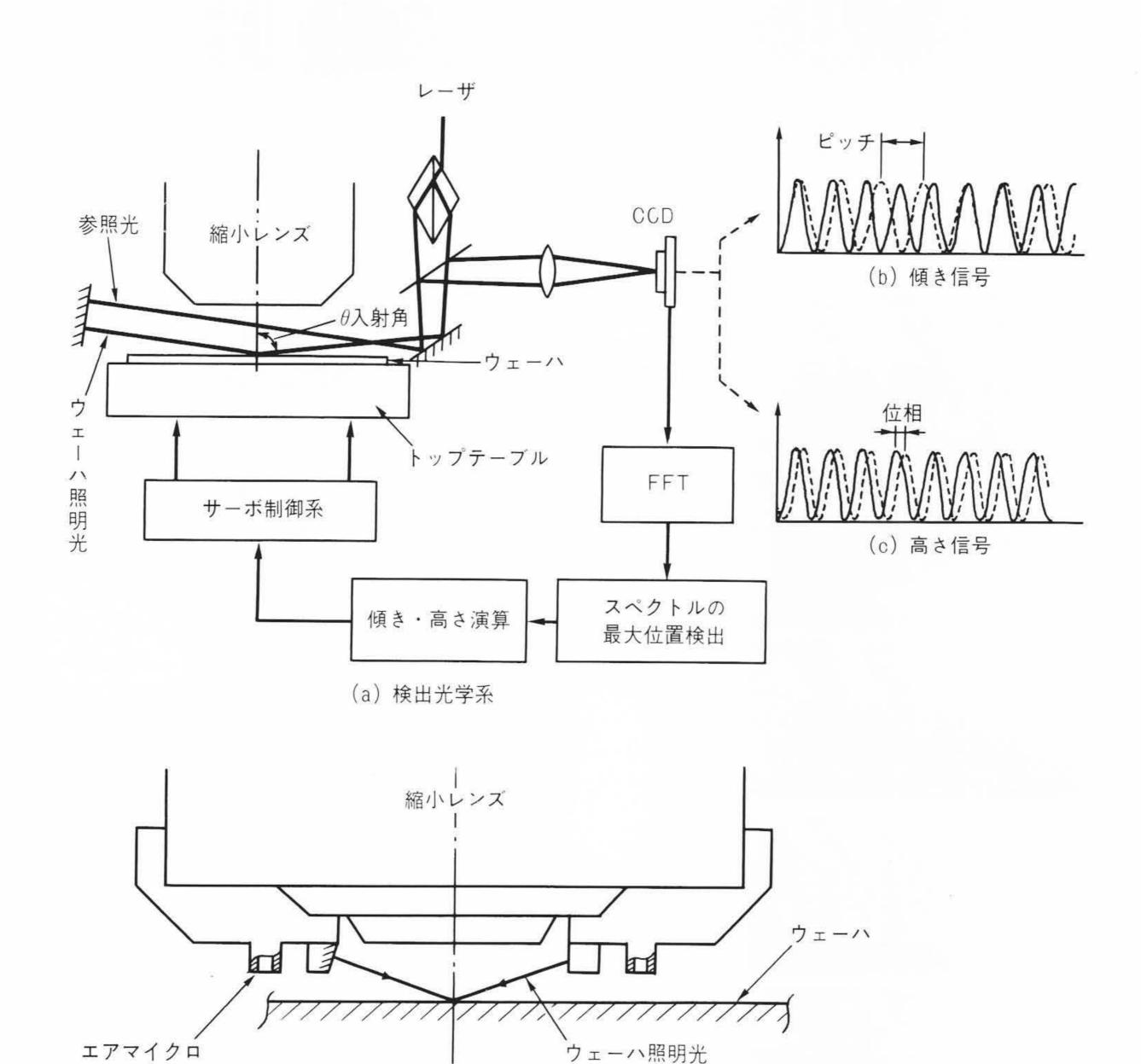
注:略語説明 YAW(水平面内真直度)

#### 4.3 光レベリングセンサ2),3)

光レベリングセンサは,前述のレベリング機構を動作させる制御信号を得るための検出器であり,ウェーハのレジスト表面の高さと傾きを正確に検出する必要がある。

ウェーハの中央部,周辺部で高速かつ正確に検出するには 光を用い、また、光検出の欠点を技術的に補うことが必要で ある。検出原理を図8(a)に示す。本検出器に光としてHe-Ne レーザを用い、レジスト表面を正確に検出するため大きい入 射角でウェーハに照射している。さらに、入射光線と正反射 光線を含む平面に垂直な方向に振動する直線偏光を用いるこ とによって、レジスト表面での反射を高めている。従来の光 検出技術ではおよそ半分の光がレジスト内に透過し、検出精 度を低下させたが、本方式は90%に近いレーザ光をレジスト 表面で反射させることができ、0.05 μm以下の正しい検出をし た。

このようにレジスト表面で反射したレーザ光は、ミラーで 折り返され、CCD(Charge Coupled Device)検出器に至る。



(d) エアマイクロ+光センサの配置

注:略語説明 CCD (Charge Coupled Device), FFT (Fast Fourier Transformation)

図 8 光レベリングセンサ (a)は原理図を示し、(b)、(c)はCCD上の干渉縞(しま)記号を示す。(d)は本装置の特長であるエアマイクロと光センサの併用構成を示す。

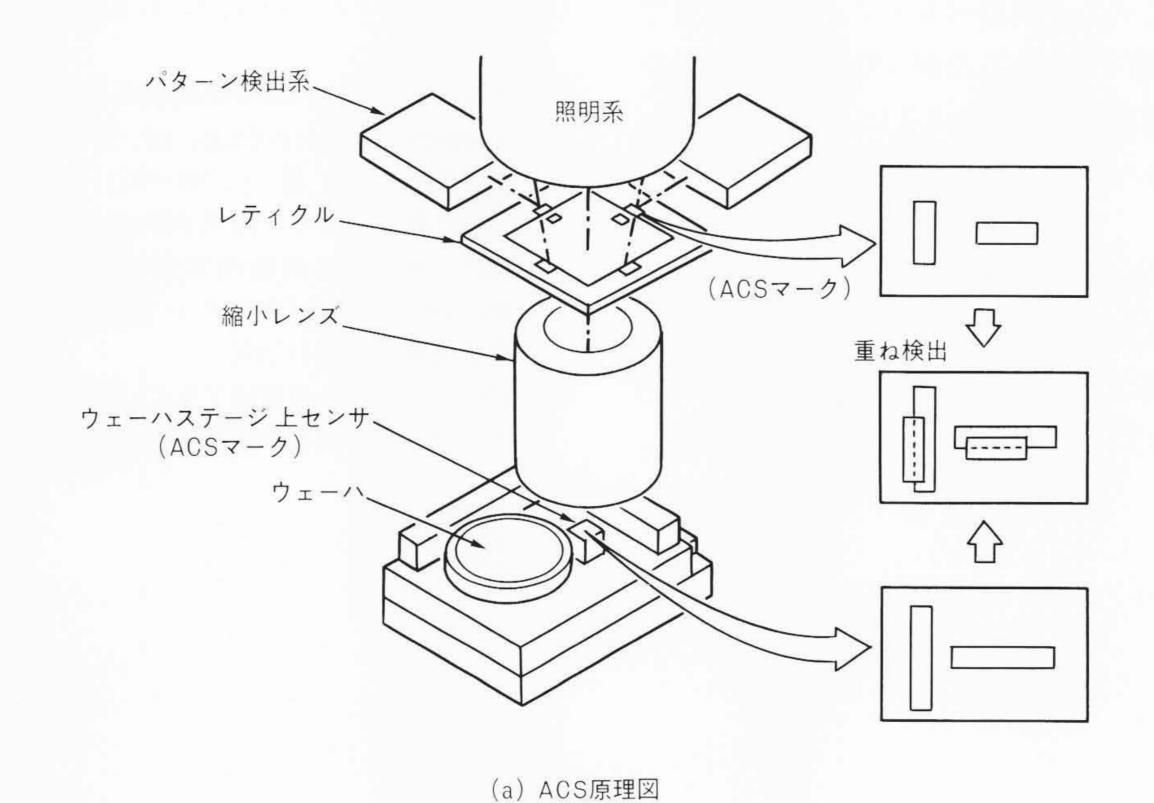
一方,この検出光と並行し、ウェーハを照射しない参照光を 検出器上で重ね、干渉縞(しま)を形成する。この干渉縞のピ ッチはウェーハの傾きを, 縞の位相はウェーハの高さを表す 〔図8(b), (c)〕。検出された縞信号をFFT(Fast Fourier Transformation:高速フーリエ変換)演算することによって傾きと 高さを求め、ウェーハステージのレベリング機構を動作させ る。レジスト表面を照射するレーザ光の入射角が大きいため, 露光フィールドの広い範囲を照明でき, 反射光の全体をCCD で検出できる。また、このレーザ光は露光フィールドの対角 2直交方向に照射するため、チップ内の特殊な段差部分、例 えば、スクライブ領域などの影響度がきわめて小さい特長が ある。

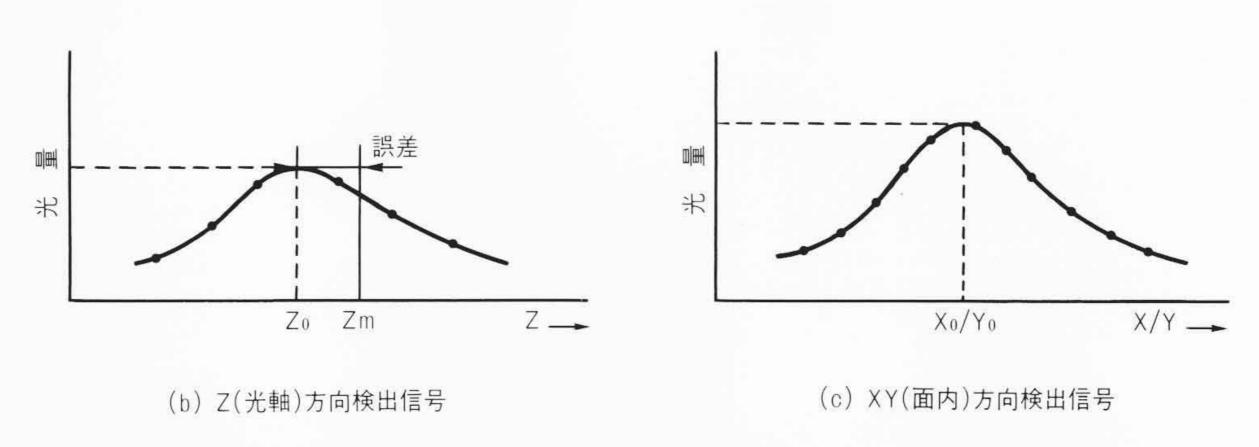
また, 光方式の検出は, レジスト下地の反射率によって特 有の高さオフセットがプロセス工程ごとに発生する欠点があ ることが知られている。本装置には、独自のレーザ光の反射 率を高める技術と従来機での実績あるエアマイクロの併用で,

この欠点を補正しより正確な検出能力を持たせた。構成を図8 (d)に示す。

#### 5 ACS

縮小投影露光装置の精度は,他装置に比べ格段の高精度が 要求され、また、超LSIの量産設備であることから、長期間そ の高精度を維持しなければならない。ところが、装置の各要 素を個々に高精度化したとしても、環境変化、操作条件など その背景には誤差発生の要因が多く、皆無とすることは困難 である。このため本装置では、各要素の高精度化を図るとと もに、誤差を極小化するACS(Automatic Compensation System:自動補正システム)を導入している。このACSは本 装置の重要な特長の一つであり、装置の高精度化、安定化に 大きな役割を果たしている。以下に, 焦点エラーを極小化し, フォーカス裕度を高めるフォーカス自動補正と重ね合わせオ フセットの自動補正の部位について述べる。





注:略語説明 ACS (Automatic Compensation System:自動補正システム), Z<sub>0</sub> (ベストフォーカス位置), Xo(X方向のレティクル・ウェーハステージの相対位置), Yo(Y方向のレティクル・ウェーハ ステージの相対位置)

自動補正システム原理図 X<sub>0</sub>, Y<sub>0</sub>の位置(レティクルパターンとウェーハセンサパターンの合 った位置)でフォーカス設定し、そのZm位置を中心に最大光量の得られるZ。を求める。Zm-Z。が設定誤差 を表す。

#### 5.1 ACSの原理<sup>4)</sup>

ACSの原理は、レティクルのパターンをウェーハステージ上のセンサ部のパターンに結像させ、Z方向、X、Y方向にセンサ部(ウェーハステージ)を微小移動し、その像のシャープさからフォーカスおよびオフセットを求めるシステムである。原理図を図9(a)に示す。レティクルとセンサ部にACSマーク(光を通す通常抜きパターンと称するマークパターン)を配置し、レティクル像が当該センサ部にほぼ結像する位置にウェーハステージを設定し、i線露光光をレティクルACSマークに照射する。同図に示すように、両マークの重なり合った部分を透過する光を、センサ内部に実装した光検出器で光量を測定し、計算処理で補正値を求め制御する機能である。

# 5.2 フォーカス自動補正

ベストフォーカス位置の検出は、装置の持つオートフォーカス機構が設定した位置 $Z_m$ を中心に、単位微小ステップ(例えば $0.2\,\mu m$ )でZ方向に移動し、各ステップでの光量を測定する。結果の一例を $\mathbf{Z}$   $\mathbf{S}$   $\mathbf{Z}$   $\mathbf{Z}$   $\mathbf{S}$   $\mathbf{Z}$   $\mathbf{$ 

# 5.3 重ね合わせオフセットの自動補正

フォーカスの自動補正と同様に, X, Y方向にウェーハステージを微小移動し, 各ステップでの光量を求める。結果の一例を図9(c)に示す。このデータから, 各軸の最大光量位置X<sub>o</sub>,

Y。を求め、当該位置でセンサ部ACSマーク上の重ね合わせターゲットパターン(図示せず)を同図(a)のパターン検出系によって検出し、この検出値を重ね合わせの校正値とする。これは、パターン検出系の検出光がi線でないことや実プロセスウェーハの影響、そして、装置条件の変化などによって発生するオフセットに対し、この校正値をシステム的にフィードバック制御し、高精度化を得るものである。

# 6 おわりに

16 M DRAM量産用の縮小投影露光装置は、浅い焦点深度の装置をいかに使うかがユーザー、メーカーの共通技術課題と言える。縮小投影露光装置LD-5015iCWは、以上述べた各システム手段で実効焦点深度を拡大し、フォーカス余裕がある装置となっている。

# 参考文献

- 1) 林,外:リソグラフィ装置,日立評論,**71**,5,379~386(平1-5)
- 2) 押田, 外:Chip Leveling and Focussing with Laser Interferometry, Proceedings of SPIE Vol.1264 Optical/Microlithography Ⅲ, p.244~251(1990)
- 3) 押田,外:ステッパ用光干渉式チップレベル検出技術(I)-(Ⅲ),第37回応用物理学関係連合講演会予稿集,p.486~487(1990),同上(Ⅳ)(Ⅴ),第38回応用物理学関係連合講演会予稿集,p.491(1990)
- 4) 稲垣,外:露光装置用アライメント検出補正技術,1990年度精 密工学会秋季大会学術講演会講演論文集,p.965~966(1990)