U.D.C. 621.3.049.774'14.002.5: [771.317.92:778.342]

特集 微細プロセス装置

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
久米 保**	Tamotsu Kume
甲田良忠***	Yoshitada Oshida
山石正行****	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、 $0.8 \mu m o \pi f + \lambda \nu - \nu o \pi$ 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、 $0.5 \mu m o \pi f + \lambda \nu - \nu o m$ 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、 $0.35 \mu m o \pi f + \lambda \nu - \nu o \pi f + \lambda v + \mu c + \lambda m e + \lambda$

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16MDRAM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-5010i¹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16MDRAM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。

2 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

15

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

* 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4MDRAM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、4M機(4MDRAM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。 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0.5µm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~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。

また、本装置は4~8インチのウェーハサイズを標準とし



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 | 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 μm, 2.0 μmである。

項 E		LD-5015iCW(16 M機)	LD-5010i(4M機)
露光波長	(nm)	365(i線)	365(i線)
縮 小	比	<u> </u>	<u> </u> 5
解像度(開	口数)	0.5 µm L•S(0.50)	0.7 µm L•S(0.40)
ズ 露光フィルード		I7.5 mm角(φ24.3)	l5mm角(φ21.2)
焦点深	8 度	Ι.4 μm	2.5 µm
ーカス再現	見精度	0.15 µm	0.2 µm
ージ配列	精度	0.06 μm/3 σ	0.lμm/3σ
コ合わせ	精度	0.1 μ m/ $ \overline{x} $ + 3 σ	0.12 μm/3 σ
ウェーハカ	トイズ	φ 8 インチ	φ6インチ
	弦 上 波 長 露 光 波 長 縮 小 解像度(開 露光フィル 魚 方 ス 再現 一 カ ス 再現 一 う エーハサ	項 百 露光波長(nm) 縮 小 比 解像度(開口数) 露光フィルード 塩、次 度 ーカス再現精度 ーシ配列精度 こつェーハサイズ	項日LD SOTSIEW (10 km)(χ)露光波長(nm)365(i線)縮小 L 第像度(開口数) $0.5 \mu\text{m} L \cdot S(0.50)$ 露光フィルード17.5 mm角(ϕ 24.3)焦点深度 $1.4 \mu\text{m}$ ーカス再現精度 $0.15 \mu\text{m}$ ・ージ配列精度 $0.06 \mu\text{m}/3 \sigma$ こくれたい $\phi 8 4 2 4 3 5 4 5 4 5 5 4 5 5 5$

開口数

注:略語説明 L·S(Line and Space) R1.0~R2.0(焦点深度幅1.0~2.0 μm)

16

図1 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。

ハーフミクロンi線リソグラフィー装置"LD-5015iCW" 841

17

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。

要因	Ŧ	様エン フニノ みらけ	エラー(誤差)値 (µm)	
	즈	補止システム・以良法	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 エアマイクロ(コ		(Local Thickne	ess Variation),

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,4M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。 Variation)で約0.8 µmである。これは、ウェーハ露光面で約 0.8 µm/20 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 µm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。

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。

18

現 像:NMD-3Dip 60 s

E B : あり

Ρ

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 一定である。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。

ハーフミクロンi線リソグラフィー装置"LD-5015iCW" 843



121497 30.0KV X20.0K 1.20 m 121509 30.0kV X20.0K'1.20"m 121517 30.0kV X20.0K'1.20Pm

図5 0.5µm 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) 露光条件は図4と同一である。解像パタ 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。





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。

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。

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

19

電アクチュエータ Δl₁ ~ Δl₃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(15mm)		0.29 s	0.4 s
位置決め精度		0.02 µm	0.05 µm
配列精度	絶対精度	0.08 µm	0.1µm
	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		0.1µm	0.15 µm

注:略語説明 YAW(水平面内真直度)

 $\mathbf{20}$

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。

ハーフミクロンi線リソグラフィー装置"LD-5015iCW" 845

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。



(b) Z(光軸)方向検出信号

(c) XY(面内)方向検出信号

21

注:略語説明 ACS (Automatic Compensation System:自動補正システム),Z₀ (ベストフォーカス位置), X₀(X方向のレティクル・ウェーハステージの相対位置), Y₀(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 X₀, Y₀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 図 9 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Zoを求める。Zm-Zoが設定誤差 を表す。

5.1 ACSの原理⁴⁾

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 µm)でZ方向に移動し,各ステップでの光量を測定する。 結果の一例を図9(b)に示す。このデータから,最大光量の位 置Z_oを計算で求める。このZ_oが真のベストフォーカス位置で あり,Z_m-Z_oが装置誤差である。したがって,実露光時のフ ォーカス値にこの誤差を補正制御することによって,0.1 µm 以下の正確なベストフォーカスに装置を自動設定することが できる。 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)

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X₀,

- 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)

