# サブミクロン対応縮小投影露光装置 Reduction Steppers Suited for Submicron Process

半導体素子の高集積化技術は直線的に着実に進んでいるが,これを支えてきたのは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ウェーハ上に転写する露光技術は、常に重要な 役割を果たしてきた。この中で縮小投影露光装置が、現在の微細加工リソグラフィ ーの主役をなすもので、超LSI量産設備として欠くことができない装置となっている。 本稿では、日立製作所で開発した<sup>1</sup>/<sub>5</sub>縮小投影露光装置(LD-5010形)の概要と、装 置の基盤技術を紹介する。更に、現在のg線露光と次期のi線露光による微細パターン の形成技術、及び今後の光縮小投影露光装置の可能性について述べる。

| 吉﨑敦浩*     | Atsuhiro Yoshizaki |
|-----------|--------------------|
| 仙石正行**    | Masayuki Sengoku   |
| 山西 勉***   | Tsutomu Yamanishi  |
| 押田良忠****  | Yoshitada Oshida   |
| 黒崎利栄****  | Toshiei Kurosaki   |
| 平田東助***** | Tôsuke Hirata      |

### 1 緒 言

現在, LSIの設計はサブミクロン時代を迎えつつあり, 1.3 ~1.2µmルールが最先端の量産LSIの主体をなしてきた。更に, R&D(Research and Development)レベルでは、次世代の0.8 μmや0.5μmルールの可能性追求が各項目にわたって行なわれ てきている。これらは、プロセスを開発けん引してきたメモ リ素子でみると、3年で4倍の高密度化路線を着実に進んで いる。つまり, MOS (Metal Oxide Semiconductor) トランジ スタの比例縮小則に従い、世代ごとにチップ面積で1.4倍、回 路の縮小化で1.4倍,更に線幅→2の微細化により2倍化し,合 わせてチップ当たりのビット容量4倍化を達成してきている。 この傾向は今後も継続されるものと思われ、プロセス関係者 での共通指標ともなってきている。 これを製造装置でみると、最近のリソグラフィー工程につ いて言えば、光リソグラフィーが主流をなし、当初は1対1 方式が多用されてきた。更に2µmルール時代ごろから縮小露 光方式の利点に注目し、その高解像性能と重ね合わせ精度の 確保のため本格導入されてきた。これらは当初10縮小方式か ら出発した。更に、より生産性を高めるため高スループット 化と露光フィールドの拡大要求から、レンズなどの開発や結 像光学系の改良により - 縮小方式となり,現在に至っている。 このように、光縮小投影露光装置が現在のLSI微細化推進の 一端を担っている。日立縮小露光装置は、10機、1機による高 解像度技術や高精度重ね合わせ技術の開発,更に次世代のi線 機の開発などプロセス要求事項を見通した装置開発に取り組 んでいる。以下,これらについて述べる。



### 2 縮小投影露光装置

### 2.1 縮小投影露光装置の構成

装置の原理構成を図1に示す。構成ユニットで見ると、上 部から露光光源、レティクル(原画)及び縮小レンズを設け、 被投影側にウェーハとこれを運搬するXYステージを配置し、 心臓部に当たる結像光学系を構成している。この基本構成を 自動化装置とするため、その周辺に自動化機構を設け、これ らを一体システムとして制御し、基本性能である高解像性能、 高精度の重ね合わせ性能を確保している。 反面、スループット性能も量産機として重要な性能である。

図 | 縮小投影露光装置の構成 レティクルの原画は、 + 縮小レンズ により縮小された像としてウェーハ上に投影される。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。

装置を高速駆動すると,結果的に機械振動を発生し,精度確保に逆行する要因となる。このため,機械振動の抑制は機構設計及び制御設計上重要な課題で,この工夫により両者のバランスをとることで生産機械としての性能確保を図っている。 図2に,日立縮小投影露光装置LD-5010形の外観を示す。本体機構部は,全体を恒温クリーンチャンバで囲い,かつ前後

17

\* 日立製作所那珂工場 \*\* 日立製作所計測器事業部 \*\*\* 日立製作所中条工場 \*\*\*\* 日立製作所生産技術研究所 \*\*\*\*\* 日立製作所中央研究所 \*\*\*\*\*\* 日立製作所機械研究所



図 2 日立縮小投影露光装置LD-5010形外観 チャンバ内温度は23<sup>°</sup> ±0.1℃,清浄度クラス | を保っている。

the Lens) 方式による露光装置アライメント方式を開発し、レ ティクルとウェーハの完全相対合わせによる全チップアライ メントを実現した。また、露光位置アライメントによりXYス テージの移動は、1チップ処理当たり1回の駆動で済み、高 スループット性能達成の一つの理由ともなっている。これに 加え1kW高輝度照明の採用や、ウェーハンドリング系にプ リアライメント機構を設け、ウェーハ処理の時間短縮を図る など、全体システムで高いスループットを実現している。 次に、これらの要素技術について述べる。

### 3 解像性能

### 3.1 露光光学系の概説

レティクル(原画)パターンは、縮小レンズを経てウェーハ 面上で $\frac{1}{10}$ 又は $\frac{1}{5}$ に縮小されて結像する。この結像光学系で、 解像度Rはレーリーの理論に基づき露光光の波長 $\lambda$ と、縮小レ ンズのNAにより次式で示される。

 $R = 0.6 \times \lambda / NA$  .....(1)

したがって、縮小レンズのNAを大きくすると解像度を向上 させることができる。最近の縮小レンズでは、直径20mm以上 の大口径で、かつNAが0.35~0.43の高解像レンズが製作可能 となっている。しかし、一方的にNAを大きくすると、次式で 示すように、NAの二乗に反比例して限界解像度での焦点深度 DOF (Depth of Focus)が小さくなるという問題がある。図3

面と装置左右から保守できるスペースをもった構成としてい る。

### 2.2 LD-5010形装置

**表1**にLD-5010形機の装置仕様を示す。LD-5010形は現在 の1.3~1.2μmルールの設計デバイスの量産に対応するもの で,高圧水銀ランプの発光スペクトル中g線(波長436nm)の可 視紫色光を露光光としている。この波長で,NA(Numerical Aperture:レンズ開口数)が0.38の高解像レンズを採用し, LSIの量産プロセスでの最小加工線幅は0.9μmであり,更に 次世代0.8μmルール開発にも使用されようとしている。

また、本装置は重ね合わせ方式でも特長をもっている。日 立縮小投影露光装置が一貫して採用してきたTTL(Through

表 I LD-5010形の装置仕様 小縮小g線露光装置でNA0.38のレンズにより,高解像度かつ高精度重ね合わせ性能の装置である。

|        | 項                     | 目                       |        | 内容                              |
|--------|-----------------------|-------------------------|--------|---------------------------------|
| 露      | 光                     | 波                       | 長      | 436nm(g線)                       |
| V      | ン                     | ズN                      | А      | 0.38                            |
| 縮      |                       | 7]X                     | 率      | 5:1                             |
| 解      | 像力,                   | 最 小 線                   | 幅      | 0.9µm(0.7µm R&D)                |
| 露路     | 光                     | 領                       | 域      | ø21mm(保証ø20mm)                  |
| 雷雷     | 光                     | 強                       | 度      | 500mW/cm²以上                     |
| 西      | 列                     | 精                       | 度      | $\pm 0.1 \mu m(3\sigma)$        |
| パ      | ター:                   | レ 検 出 波                 | 長      | 514.5nm                         |
| 重      | ね合                    | わせ精                     | 度      | $\pm$ 0.18 $\mu$ m(3 $\sigma$ ) |
| ス<br>全 | ル -<br>チップ<br>(5 in ' | - プ ッ<br>アライメン<br>ウェーハ) | ۲<br>۲ | 50枚/時                           |

に、この関係を示す。

 $DOF = \lambda/2(NA)^2$  .....(2) したがって、1.3~0.8µmプロセスデバイスの量産に当たっ ては、安定な歩留まりを確保する上で、縮小レンズのNAは必 要な値にとどめ、焦点裕度をできるだけ大きく確保する必要 がある。

### 3.2 高解像・広フィールドg線レンズ

表2に、現在のLD-5010形縮小投影露光装置に搭載している高解像で、かつ広フィールドのg線レンズの諸元を示す。本縮小レンズは、露光波長436nm(g線)に最適解像力をもつ高解



注:略語説明 R&D(Research and Development)

18

像形の縮小レンズで、NAが0.38のため、従来レジストをベー スとした(1)式に基づく限界解像度は0.7 $\mu$ mであるが、最近の 高感度レジストを用いれば、0.6 $\mu$ mまでのL&S(Line and Space)を解像できることが明らかとなっている。露光可能領 域も直径21mm(解像保証範囲は直径20mm)と広フィールド径 になっているため、1~4 MビットDRAM(Dynamic Random Access Memory)クラスのデバイスチップを、1ショットで 数個同時に露光可能である。また、焦点深度も所定量確保し ており、高精度なオートフォーカス機構との組合わせにより、 安定した量産歩留まりが期待できる。

図4に本レンズを用い、OFPR800とTSMR8800の2種類の レジストにより、1.0~0.6 $\mu$ mまでのL&Sを露光したときのレ ジスト断面SEM(走査形電子顕微鏡)写真を示す。高感度のレ ジストでは、0.6 $\mu$ mのL&Sが十分に解像することが分かる。 また、図5に0.8 $\mu$ mのL&Sを、ベストフォーカス点から1 $\mu$ m ピッチで焦点位置を上下させた場合のレジスト断面SEM写真 を示す。0.8 $\mu$ m L&Sでも十分な焦点裕度が得られていること が分かる。

### 3.3 超高解像i線レンズ

1.3~0.8µmプロセスデバイスの量産では、NA0.38程度の 縮小レンズで十分対応可能と思われるが、16MビットDRAM クラスのハーフサブミクロンデバイスに対しては、0.4~0.5 µm(L&S)程度の解像力が必要となる。したがって、g線の露 光波長ではNAが0.5~0.6以上となり、焦点深度が極端に小さ くなる。これを解決する方法として、プロセス側からは、多 層レジストによる平たん化技術やCEL(Contrast Enhanced Lithography)技術などが提案されているが、工程数が増える ため量産性の面からいま一つの工夫が要求される。



このため、もう一つの解決法として、露光光の短波長化が 検討されている。これは、照明光源として用いられている超 高圧水銀ランプの発光スペクトルの中で、現在用いられてい るg線(436nm)より短波長のh線(403nm)、又はi線(365nm)を 用いる方法である。h線では約10%、i線では約20%の解像力向 上が可能である。NA0.4程度のi線レンズでは、0.5~0.6µm までの解像が可能となる<sup>1)</sup>。

表3に既に製品化しているNA0.42のi線レンズの諸元を示す。

**図6**に本レンズを搭載したRA-101VL形縮小投影露光装置 での解像度SEM写真を示す。CEL技術を用いて0.5μmのL& Sが解像されており、今後のプロセス技術の向上により、0.4 μmの解像も可能と思われる。

表 2 高解像・広フィールドg線レンズ諸元 音縮小露光域ø21, NA 0.38で, R&Dでは0.7μmの解像が得られる。

| 項目         | 仕様              | 備考                              |
|------------|-----------------|---------------------------------|
| 縮小比        | 5 : 1           | A 21 A fortfol Alers            |
| 露光波長       | <b>436</b> nm   | g線                              |
| NA         | 0.38            |                                 |
| A77 /45 EE | 0.7µm           | $0.6 \times \frac{\lambda}{NA}$ |
|            | 0.9µm           | $0.8 \times \frac{\lambda}{NA}$ |
| 露光可能領域     | ø21(ø20*)       | *解像保証範囲                         |
| 像ひずみ       | $\pm 0.2 \mu$ m | 回転, 縮小率含み                       |

注:L&S:1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6µm レジスト:OFPR-800, TSMR8800 焦点:ベストフォーカス, チップ中心

図4 g線装置による解像度[SEM(走査形電子顕微鏡)断面写真] レジストの改良により更に解像性能の向上が期待できる。

#### 0.8µmL & S焦点深度

| レジスト<br>FOCUS<br>(µm) | OFPR-800 | TSMR-8800 |
|-----------------------|----------|-----------|
| + 1                   |          |           |
| 0                     |          | innn      |



19

図 5 g線装置による0.8μm L&Sの焦点深度 レジストの改良によ り0.8~0.7μmの量産加工が可能となる。 708 日立評論 VOL. 68 No. 9 (1986-9)





図7 露光位置アライメントの原理 レティクルパターンと同時に作成するレティクルマークを反射ミラーとし、ウェーハマークを検出し、またレティクルマークに作り込んだ双曲線グレーティングでレティクル位置を検出する。

るウェーハの合わせマークは検出できなくなり, X方向とY方

## 022659 10KV X15.0K 2.00um

注:L&S:0.5µm,露光エネルギー:165mJ/cm<sup>2</sup>,フォーカス:正焦点,レジスト:OFPR-5000, 1µm厚, CEL:CEM388, 0.4µm厚,現像: NMD-3で60秒Dip現像

図6 i線ステッパによる解像度(SEM断面写真) CEL使用により, 露光エネルギーは約2倍程度必要となるが,解像性能が大幅改善できる。

表3 超高解像 i 線レンズ諸元 縮小率市で,10.4mm角を露光域とする 線露光レンズで,これまでの通常のレジストで解像度線幅0.6µmで,レジスト の工夫で0.5~0.4µmが可能となる。

| 項目    | 仕 様     | 備考        |
|-------|---------|-----------|
| 縮小比   | 10: 1   |           |
| 露光波長  | 365nm   | i線        |
| NA    | 0.42    |           |
| 解 像 度 | 0.6µm   | R&D       |
| 露光領域  | IO.4mm角 | ただし、 Ø13内 |
| 像ひずみ  | ±0.2µm  |           |

### 4 アライメント性能

20

### 4.1 露光位置アライメント

従来のアライメントの方法には,縮小レンズ光軸とは別に 検出用光学系を設けるOFF-AXIS法と,縮小レンズを通して 検出するTTL法とがある。前者では両方のレンズ光軸間距離 が経時変化するため,最近では後者の方法が主流になってい る。TTLアライメントを行なう際,回路パターンに隣接した スクライブ領域(チップとチップの間の領域)に合わせマーク を設けると,図7に示すように,従来の方法ではこれを検出 するための反射鏡Aが露光光を遮るため,反射鏡を露光光域か ら遠ざける必要があった。このようにすると,露光位置にあ 向のマーク検出のたびにウェーハを動かすか,又は反射鏡を 退避させる必要がある。この問題を解決するため,全静止光 学系による露光位置アライメント方式の開発を行なった。

これについて、前述のLD-5010形装置へ適用した構成例で詳細を述べる<sup>2),3)</sup>。図7に示すように、レティクル上の回路パタ ーンに隣接してクロム(又は酸化クロム)のレティクルマーク を設け、これをウェーハマーク検出用のミラーとして用いて いる。このようにすると、このミラーパターンで反射した検 出光は露光光束から遠ざかるため、反射鏡Bは露光光を遮らな くなり、露光位置での検出が可能となった。したがって、検 出後ウェーハはその位置のままレティクルをXY方向同時に短 時間で微動し、相対合わせ動作完了後即座に露光することに より、高精度・高速のアライメントを実現可能にした。

### 4.2 各種プロセス工程への対応

LSIの製造プロセスでは、種々の工程のウェーハに対して安 定した高精度の検出が要求される。パターン線幅の微細化に 伴い、多層レジストを用いてレジスト表面を平たん化するこ と、及び下地パターンからの露光光の反射、散乱による線幅 ばらつきを下層レジストの吸光材で防止することが今後ます ます重要になってくる。この吸光材は露光光を吸収するため、 アライメント用検出光に露光光の波長や、これに近い光を用 いると、レジスト下面のウェーハ表面に形成された合わせマ ークを検出することが困難となり、検出光のほとんどがレジ スト表面の反射光を検出することになりSN比が劣化し、検出 精度が低下する。そこで吸光特性を勘案し、かつ結像レンズ の解像力からみて、g線より長波長域のアルゴンレーザ光(波 長514.5nm)を採用しこの問題に対応している。

更に,Al膜など表面が粒状で高反射率の配線工程ウェーハ への性能安定化策について述べる。 図8に示すように,従来はレーザ光の入射角を固定しマー

クに照射していた。この照明法ではレーザのコヒーレンス(指向性,可干渉性)が強いため,合わせマークがAl膜のように粒状のものであると,同図に示すように検出信号にランダムなノイズが重畳し,検出精度が低下する。

サブミクロン対応縮小投影露光装置 709



図8 レーザ揺動落射照明の原理 ウェーハマークの照明光軸を振り, この間の検出信号の和を出力信号とすることにより, AI 膜などのランダムノイ ズを平均化し, 高精度な重ね合わせ性能を実現した。

図9 双曲線グレーティング レティクルの清浄な面にグレーティング を描画し、反射回折光により空間像として結像させ、ウェーハ像と同一場所に 像を作り、相対合わせを行なう。

このため、図8に示すようにレーザ照明系の照射面上のス ポット位置を固定し、照射角を高速に変化させる。信号的に は各照射角で得られた信号の和をとり、各照射角検出信号に 乗ったランダムノイズ成分を平均化させ、SN比が高い信号を 得る方式を開発した。このようにして、配線工程のような通 常SN比が低い難工程でも後述の評価結果に示すように、高精 度の重ね合わせ性能を確保し、全工程で平均化した精度が得 られている。

### 4.3 相対アライメント

ウェーハとレティクルの位置合わせ法には絶対法と相対法 がある。絶対法は、ウェーハの検出とは別の手段でレティク ル位置をあらかじめ検出しておき、ウェーハ露光時には、ウ ェーハマークの位置だけを検出し、アライメントを行なう方 法である。この方法では経時的な変化(オフセット変動)が生 じやすい。最も理想的な方法は、共通な固定光学系でウェー ハとレティクルの相対位置を検出するものである。このため には、ウェーハ像とレティクル像を同一像面に結像すること が基本である。前述のように、ウェーハ検出光は露光光と波 長が異なるアルゴンレーザ光を用い、このためウェーハマー クの像は図9(b)に示すように、レティクルマークのミラーパ ターンで反射した後、結像レンズの色収差分、レティクル面 から下方に結像する。

これと同一像面にレティクル像を得るため、図9に示す双

と、反射回折光は露光照明光の外側のウェーハマークの結像 位置に線状のパターンとして結像<sup>4)</sup>する。このように、同一像 面に結像した両パターンの像を一つの固定光学系で検出し、 相対アライメントを行なう基本的なアライメント方式として いる。

### 4.4 評価結果

以上の方式による各種プロセスでのアライメント結果を図10 に示す。多層レジスト工程や配線工程に対しても、 $0.2\mu m(3 \sigma)$ のアライメント精度を達成している。また、オフセットの 経時的安定性も $0.05\mu m$ 以下と安定である。

### 5 装置の恒温クリーン化対策

LSIから超LSIへと集積度が大きくなるに伴い,製品の信頼 性向上,歩留まり向上を図るため,環境条件(空気の清浄度, 温度,湿度)の高度化がクローズアップされている。したがっ て,本縮小投影露光装置も上述の環境が不可欠で,その性能 が本装置に与える影響は大きい。また,これらの装置は製作 工程上昼夜運転されており,装置のランニングコストの低減 を図るため,省エネルギータイプの超精密温度制御付きクリ ーンチャンバの開発が必要である。

そこで,これらのニーズにマッチしたクリーンチャンバの 開発例を以下に述べる。

本チャンバは、冷却ユニットと加熱ユニットから成る温調

21

| 曲線グレーティング回折像をレティクルの合わせマークとし   | 部で恒温化された空気を,超高性能フィルタを通した清浄空     |
|-------------------------------|---------------------------------|
| ている。双曲線グレーティングは、電子線描画装置で回路パ   | 気としてチャンバ内に送り込み、チャンバ室の恒温化、クリ     |
| ターンを描画する際に作り込む。このパターンは、レティク   | ーン化を図るものである。                    |
| ル面上だけに作るためウェーハのようにプロセス影響は全く   | 特長は、フィルタとして0.1µm粒子で集じん(塵)効率     |
| 受けなく常に清浄であり、光学的には極めて安定である。図9  | 99.9995%以上のものを使用し、清浄度クラス1を可能として |
| (b)に示すように、このパターン下方からレーザ光を照射する | いる。更に、装置の省エネルギー化を図るため、図11に示す    |

710 日立評論 VOL. 68 No. 9 (1986-9)



超LSIの加工技術は、サブミクロン時代にさしかかっている。 同時に、ステップ アンド リピート式の光縮小投影露光装置 は、その特長を最大限に活用されてきた。超LSIの量産用アラ イナとしては、今後も当分これに代わるものは見られず、更 に最近では、次々世代の0.5µm加工まで到達の可能性が見え てきている。

冷却器

放熱器

制水弁

冷媒

圧縮機

ような冷却用冷媒と電気ヒータを制御する空調方式を開発し た。すなわち本方式は、冷凍機圧縮による排熱の一部を加熱 器として再使用することにより省エネルギーを図ったもので, 省エネルギー従来比50%(温調部)が可能となった。

また、温度制御特性は、温度精度±0.1℃と高精度な結果を 得ている。

### 6 今後の展開

LSIの微細化は西暦2000年ごろ5)までは直線傾向と予測され ている。デザインルールの $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 化に従えば、 $0.8\mu m$ 、 $0.5\mu m$ 、 0.35µmから0.25µmルール時代に至り、メモリ素子で言えば 256Mビット時代に至ることになる。これらほとんどのLSIが CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)技術 によるものとみられ、これを構成するMOSトランジスタの物 理的限界がこのあたりと考えられている。

一方,これらの製造装置を見ると、今日0.8~0.5µmリソグ ラフィーは光学方式で果敢に試みられている。更に、新しく 電子線描画装置による直接描画や,X線露光装置を量産ライン に部分的適用することも十分考えられる。しかし、このよう な新しいアライナを量産に導入するためには、周辺技術の完 成やコストパフォーマンスの改善など解決すべき課題が多く, この分,光リソグラフィーの延長を望む声が多い。当面の課 題は、0.8µm量産機で量産現場で要求する焦点深度を確保し ながら,大形チップに対応する大口径の結像光学系を確保す ることにある。これに対し、プロセス技術としては露光面の 平たん化や高解像レジストの開発も進められている。一方, 装置では投影レンズなどの設計及び加工,組立調整技術に最 大限の努力が払われているが,これに加えて露光光の短波長 化が必要事項と考えられる。まず,現在の可視域のg線波長(436 nm)から紫外光のi線波長(365nm)に移行し、次々世代では更 に短波長の遠紫外光の採用に進展することが予測される。こ の時代は, 高解像の屈折光学系によるか, 又は反射光学系に よるかは今後の研究開発に期待される。

一方,微細化技術とともに,アライメント技術も相当の高 精度化が不可欠である。また,多様化するプロセスの全工程 に対し,高いアライメント精度の保持が必要である。サブミ クロン対応機のLD-5010形では、基本に忠実な相対合わせ方式 による露光位置アライメントを実現し, 高速量産運転でも高 い精度を実証している。

今後,装置もプロセス技術とともに高度化する。それぞれ の技術者の立場で,これまで以上に十分な意志の疎通と協調 が重要となる。

### 参考文献

- 1) 長谷川,外:i線(365nm)を用いた縮小投影露光法,電子通信 学会論文誌, Vol. J66-C. No. 12, 1983
- 2) Y. Oshida, et al. : Relative Alignment by Direct Wafer Detection Utilizing Rocking Illumination of Ar Ion Laser, Proceedings of SPIE Vol. 633 Optical Microlithography V

(1986)

- 押田,外:ステッパ用露光位置アライメント(I)~Ⅲ,第33回応 3) 用物理学関係連合講習会予稿集, p. 311(1986)
- M. Born, et al. Elements of Theory of Diffraction, 4) Principles of Optics, 370~458 Pergamon Press(1970) 5) 橋本,外:2000年へのLSI技術,日経マイクロデバイス,7月 号, p. 130~145(1985)

22