特集 半導体製造技術

U.D.C. 621. 3. 049. 774' 14. 002. 5: (774:778. 34)

リソグラフィー装置

Lithography Equipment

0.5 µm加工LSIの開発に当たり, 製造装置およびプロセス検討が始まっている。 この中でも、リソグラフィーの選択は大いに注目を集めるところである。今日、 エキシマレーザ方式の課題, g線レジストの改良, i 線露光方式の実力などをも とに、デバイスメーカーでその選択検討がなされつつある。今日の状況では、 解像データ、プロセスの立上げ力, 周辺技術力, 量産性などを勘案し, i 線露 光方式に多くの期待が寄せられてきた。

林聰一郎*	Sôichirô Hayashi
土肥寿秀**	Toshihide Dohi
中村一光***	Kazumitsu Nakamura
肥田宏之****	Hiroyuki Hida
岡崎信次*****	Shinji Okazaki
押田良忠******	Yoshitada Oshida

本稿では、今日選択できるリソグラフィーと、さらに現在鋭意開発研究中の 方式について報告する。

1 緒 言

今後の0.5µmプロセスに対する製造技術が多くの場で論じられ、種々のデータが集められてきた。本稿のリソグラフィ

に際し,その量産期の対応も勘案し, i 線への期待がますま す大きくなってきている。

ー装置は、微細加工の重要ポイントを占めるため注目を集めるところである。その主要課題は、

(1) 高解像度化,かつ量産に耐えられる焦点深度を確保すること。

(2) 必要なアライメント精度を達成すること。

(3) 0.5µm製品に見合った広露光フィールドを持ち,量産性が確保できること。

(4) 0.5 µm製品開発時期にプロセス材料など周辺技術を含め 実用域にあること。

である。

1987年には、次世代対応機としてエキシマレーザ露光方式 に大きな期待が寄せられたが、今後、実プロセス装置にまで 仕上げるためには残る課題が多いことが見えてきている。こ れに代わり、1988年には現状のg線露光方式のレジスト材料に 多くの改良努力がされて長足の進歩が得られ、g線方式の限界 を先送りする可能性もでてきた。日立製作所で同時期に、こ れと並行してg線から短波長域の i 線露光方式の本格量産機 を完成した。そのレジスト材料もg線改良技術を応用して、一 挙に開発段階から実用化へと進み、すでにその次の改良版も 完成する状況である。この結果、高解像パターン作成に予想 以上に効果的であることの実証データも得られ、すでに実プ ロセスで順調に稼動中である。 次に、このような当面の状況と、今後のリソグラフィーに ついて述べる。

2 <u>-</u>縮小 i 線リソグラフィー

2.1 i線リソグラフィーの特長

(1) λを短くする。

(2) NAを大きくする。

(3) 定数K₁を小さくする。

などがある。しかし、(2)式との相関で焦点深度を考慮すると、 NAを大きくするより波長を短くするほうが有利であることは 明白である。g線NA0.48レンズとi線NA0.40レンズの解像力 および焦点深度のシミュレーション結果を図1に示す。これ は同等の解像力を持ちながら、しかも深い焦点深度がi線レ ンズで得られることを示している。この有利なi線リソグラ フィーを実現するためには、

(1) i線用縮小レンズの開発と量産化

このように,現在着手されつつある0.5µmデバイスの開発 (2) i線リソグラフィーに適したホトレジストの開発

* 日立製作所那珂工場 ** ミノルタカメラ株式会社 工学博士 *** 日立製作所那珂工場 工学博士 **** 日立製作所デバイス開発センタ ***** 日立製作所中央研究所 ****** 日立製作所生産技術研究所 380 日立評論 VOL. 71 No. 5 (1989-5)



図 | ラインおよびスペース幅と焦点裕度 Si基板上で, ライン イコール スペースとなるような露光エネルギーを設定し, マスク寸法の ±10%を保てる焦点位置を裕度とした。

表1 i線レンズの主要仕様 i線ステッパとして使用するレンズの 主要仕様である。

項目	i線
波 長	365 ± 4 nm
縮小率	1:5
開口数(NA)	0.4
射出瞳(ひとみ)	テレセントリック
像ひずみ	$\pm 0.1 \mu m$
像面湾曲	0.5 µm
像円径	ø21.2 mm
共役長(OID)	600 mm

従来, i線に使用できるガラス素材はg線用素材に比べて性能的な制限が多く,高性能i線レンズを製作することが困難な状況にあった。このため, i線レンズの開発に当たり,まず従来にない特性を持ったガラス素材の開発に着手する必要があった。その着目点は,

(1) ガラス自身の透過率の固有吸収端が、より短波長側にある組成を作り上げること。



図 2 LD-5010i形日立縮小投影露光装置 LD-5010i形日立縮小 投影露光装置の外観写真を示す。

(3) 高解像力にマッチした高いアライメント精度の達成 が必要である。図2に示す日立i線縮小投影露光装置LD-5010iは,これらの技術課題を解決し製品化したハーフミク ロンデバイス生産用装置である。

2.2 i 線用縮小レンズの開発¹⁾

26

前述のように,解像力を向上させるには波長を短くし,ま た焦点深度の面から許容される程度の高NA化を図ることが重 要である。このことから,今回開発したレンズの主要仕様は **表1**に示す内容とした。波長は365 nmの i 線, NAは0.40とし, 射出瞳(ひとみ),共役長(OID)などは,従来装置の基本設計を 踏襲する方式および寸法とした。

(2) 紫外線透過性を妨げる不純物,特に鉄のような遷移金属 イオンの混入を極力抑えること。

を基本項目として,原材料の選択,精製法の改良を行った。 この結果,目標とする新ガラス素材を製造することができた。 その特性を図3に示す。i線領域での透過率向上と,より短 波長側に固有吸収端のある優れたガラス素材を開発できた。

さらに、i線レンズの透過率を上げるには、ガラス素材の 吸収ロスを極力抑えることはもちろんであるが、レンズ面の 反射によるロスも無視できない。すなわち、反射防止膜の性 能向上も開発の大きな要素である。今回のレンズに対しては i線領域で0.1%以下、アライメント波長領域でも0.3%以下 の性能を達成し、装置性能を大幅に向上させた。

また,TTL(Through The Lens)アライメント方式につい てもっとも注意すべきレンズ性能は,アライメント波長での レンズ特性を安定に保つことである。本レンズは図4のよう に軸上色収差を持っているが,露光光中心軸に対して大きな 入射角度を持つパターン検出軸に対し,アライメント波長で の結像特性と屈折率特性についても十分考慮した設計を行い, また製造での品質管理を徹底することによって,高性能レン ズを量産開発することができた。

2.3 i線用ホトレジストの現状と展望

レジストの解像力は、(1)式からλ、NAのほか、ホトレジス

ト材料に依存する定数 K_1 を最小化することも必要である。この露光に対するレジストの最適化は、過去、段階を経て開発されてきた。従来、1 MDRAM生産に広く使用されているg線用レジストは、i線露光時にレジスト内樹脂による吸収が比較的大きく、解像力が低下する。

リソグラフィー装置 381



図3 新SK14と従来のSK14の紫外透過性の比較 従来の紫外透 過硝材から,短波長側に固有吸収端を持つ新i線レンズ用ガラス素材の開 発に成功した。本素材は,量産性も優れている。

注:h 0.062, g 0.164, F 0.369, 515 0.487, e 0.610, d 0.766

一般にレジスト特性は、F.H.Dillのモデル²⁾でのA、B、C の値で表される。Aは感光剤に起因する露光前後の吸収変化、 Bは主に樹脂に起因する露光後の吸収、Cは感度に相当するパ ラメータである。このBパラメータを小さく抑えることによっ て解像力の向上が図れる。このため新しいノボラック樹脂を 日立化成工業株式会社で開発し、図5に示すようなg線、i線 双方に十分な透過率を持つRI-7000Pシリーズを開発した。評 価結果を表2に示す。i線露光時でもg線露光時のBパラメー タ値に近いまで改良されている³⁾。同様な特性を持つレジスト としては、TSMR-V3、TSMR-365iB(以上、東京応化工業株 式会社)、PFR-7900(日本合成ゴム株式会社)などがある。こ れらは、g線、i線共用レジストとして既存のg線用現像液や 現像ラインが使用でき、4 MDRAM生産に適用可能なレジス トとして実証されてきている。

また、日立化成工業株式会社では、さらに感光剤のナフト キノンジアジド類の感光基の種類および量の最適化を図り、 図6に示すような、0.5 μm L/Sで±0.9 μmの深い焦点深度を 持つレジストRI-7179Pを開発した。これは、16 MDRAMのデ ザインルール0.6~0.5 μmを満たす性能である。

さらに,各レジストメーカーではいっそうの改良を進めてお

図4 軸上色収差 LD-5010i形日立縮小投影露光装置用に開発した i線レンズの波長に対する軸上色収差特性を示す。



図5 i線,g線レジストの分光透過率曲線 日立化成工業株式会 社で開発したi線用レジストRI-7000Pシリーズとg線レジストの透過率特 性を示す。

表 2 レジスト, 波長を変えたときのA, B, C定数 g線用, i線

り,高反射基板上でもパターンが劣化しない新しいコンセプト の吸光剤レジストや, i線に適した使いやすい水溶性CEL⁴ などが開発されつつある。一例としてCELを用いた場合の0.45 μ mと0.4 μ m L/Sの解像力を図7に示す。これらは、今後のi線 レンズの高解像度により、0.35 μ mレベルのデザインルールの

用レジストのDILLモデルでのA, B, C定数の評価結果である。

	露光波長	A (μm^{-1})	Β (μm ⁻¹)	C (cm ² /mJ)
g線用従来 g レジスト i	g線	0.685	0.105	0.013
	i線	1.10	0.324	0.019
RI-7000P	i線	1.292	0.124	0.018

382 日立評論 VOL. 71 No. 5 (1989-5)





図7 CELを用いた場合の解像度例 レジストの膜減りなしに 0.4 µmまで解像できる。

64 MDRAMに対しても対応可能であることを示唆している。 これらの状況を総合すると,現状のi線リソグラフィーは 容易に従来のg線ラインに導入でき,その焦点深度が深いこと から,4M,16M各DRAM生産に最適な状況にあるとともに, 将来64 MDRAMの微細加工への道を開くものと言える。

2.4 アライメント精度の向上

i線レンズでは,前述のように焦点深度に余裕を持って高 解像力を達成できるが,縮小投影露光装置としては,その解 像力にふさわしい高いアライメント精度が必要である。

本装置では、従来からe線(波長547 nm), d線(波長577 nm) によるパターン検出⁵⁾,および両波長を混合したe+d線検出を 採用している。この検出法の特長は、多様化する製造プロセ スの中で、レジスト膜厚などの変化に対してパターン検出が 安定に高精度を維持できる点にある。これは図8⁶⁰に示すよう に、e線、d線の単波長ではレジスト膜厚の変化に対し干渉強 度が変化し、パターン検出信号に若干悪影響を与える。とこ ろが、e線+d線のように三つの波長を混合することによって、 レジスト膜厚変化に対し干渉強度の変化が鈍感となり安定し

注:基 板 Siベア PEB あり 露 光 LD-5010i(*NA*:0.40)現象 NMD-3(2.38%)1分 レジスト膜厚 1.22 µm

28

図 6 0.5 µm L/SでのRI-7179Pの焦点深度 0.5 µm L/Sで, ±1 µm の焦点深度がある。

たパターン検出信号となって,高いアライメント精度が達成 できる。 また,本装置では,e線,d線検出のほかにHe-Ne(波長544 nm)を使用する高次回折光検出も備えている。これは,プロセ ス膜厚変化に対する安定性をさらに向上させる目的で開発し

383 リソグラフィー装置



2波長検出法の原理 e線, d線などの単色光による検出で × 8 は、レジストの塗布むらによって検出信号が非対称となることが多いが、 このようなときでもe線+d線の2波長検出では非対称を軽減できる。

2.5 広フィールド, 高NA化

レンズの広フィールド化と高NA化はレンズ開発の面からみ るとあい矛盾する技術であるが、バランスの良い設計が必要 となる。

レンズ開発に必要な技術として、鍵(かぎ)となるものはい ずれにしてもガラス素材の開発にあるといっても過言ではな い。これについては、高屈折率化の方向と露光スペクトル幅 に対する色収差補正が完全に行える素材の開発である。

今後も、これらの技術課題を一歩一歩確実なものとして、 顧客要求レベルに沿ったレンズを開発していく考えである。

電子線描画装置 3

EB(電子線描画)装置の特徴は、要約すると光転写用マスク 基板からディープサブミクロンの量子化デバイスに至るまで 多様な応用性にある。最近のニーズ動向を分類すると以下の ように大別される。

(1) ステッパ用レティクル描画

- ASIC(Application Specific IC)用直描

たものである。この検出法は、波長がe線とほぼ等しいことを 利用し図9%に示すように同一の光学系を使用している。

このように、従来の2波長から3波長にすることによって 今後ますます多様化する製造プロセスで、さらに高安定化と 高精度化を達成することができる。これらの検出法を用い, 現状0.1µm/3σのアライメント精度を達成している。

(3) ディープサブミクロン描画

これらの用途のうち、ステッパ用レティクル描画に関して は使用実績も多く, すでに半導体製造工程の基幹技術となっ ているので省略する。一般的に、ASIC用直描に適用されるEB 装置は、スループットが高い可変成形方式"が用いられており、 ディープサブミクロンの用途には、ビーム径を絞ることが容 易なスポットビーム方式⁸⁾が採用されているようである。

3.1 ASIC直描^{9),10)}への応用

EB装置を直描に適用する利点はマスク基板が不要という点



ウェーハパターン 検出マーク

e線 e線+d線 d線 He-Neレーザ 明視野検出 暗視野検出

(a) パターン検出光学系

(d) パターン検出信号例

29

本パターン検出器では、e線、d線、e線+d線検出光による明視野検出、He-Neレーザ光による暗視 図9 パターン検出光学系と検出信号例 野検出を可能としている。

384 日立評論 VOL. 71 No. 5 (1989-5)

であるが、マスクが不要であることに伴い、マスク製造にか かわる設備、時間、人的資源など諸経費が節約できるととも に,設計変更が容易になり、また単一ウェーハトに多品種を 搭載するなど融通性が高くなる。さらに近い将来、「設計」か ら「デバイス」まで全自動化一貫製造ラインの実現も期待さ れる。

ASICのように多品種少量のデバイス生産に限った場合、光 転写方式に比較してEB直描のほうが、コストパフォーマンス、 スループットとも有利となる。露光工程でのウェーハコスト は次式で概算される。

ここで CW:該当露光工程でのウェーハコスト

CE:露光装置の償却費

CP:材料·加工費

NT:払い出しウェーハ枚数

CM: 品種当たりマスク費用(EB直描の場合は0)

NW:品種当たりの生涯ウェーハ枚数

24 kゲートCMOSカスタムLSIの走査電子顕微鏡写真¹¹を 図10に示す。24 kゲートCMOSカスタムLSIのEB直描技術の 適用工程は、配線層4工程である。ビアホールの酸化膜穴工 程には単層レジスト,Alの配線加工には3層レジストを使用 している。最小加工寸法はビアホール、およびAlスペースの 1μmである。

3.2 ディープサブミクロンへの適用

EB装置のディープサブミクロン領域への用途は、大別する と(1) X線リソグラフィー用マスク, (2) GaAsデバイスの直描, (3) 量子効果など先端デバイスの直描に分類される。

日立製作所では従来からある可変成形方式のEB装置に加え て、熱電界放出陰極(Ti/W/Oカソード)を搭載したEB装置を 製品化¹²した。本装置は電子銃を含む電子光学系の一部と制 御系の一部以外は、可変成形方式と共通化を図った設計方針 を採用した。

Ti/W/Oカソードの特長は、従来から走査電子顕微鏡に用い られている冷陰極と異なり、電流ドリフトが小さく、かつ大 電流が得られることである。EB装置で一般に用いられている LaB₆に比較すると電流密度が約100倍高い。

光露光方式ではマスク費用が生涯ウェーハで案分されるた め、生涯ウェーハ枚数の減少に伴いコストは上昇する。概算 するとウェーハ枚数が10枚以下ではEB直描方式のほうが低コ ストとなる。

ットごとにマスク交換作業が必要となるため、ロットサイズ が小さくなるに従って処理能力は低下する。概算するとロッ トサイズが3枚以下になるとEB直描技術のほうが高スループ ットとなる。

このように多品種かつ少量の素子を作成するASICの生産に は、光転写方式に比べEB直描のほうが優位となる。

30

本EB装置では2段のコンデンサーレンズを切り替えること によって、大電流、小電流2種の電流モードを持つ。0.1µm 以下の微細パターンでは小電流モードを、0.1µm以上の比較 的大きなパターンでは大電流モードを用いることによって,デ ィープサブミクロン領域での高スループットを達成している。 ディープサブミクロンの描画例を図11に示す。0.15 μmのラ イン アンド スペースである。前述のように本EB装置は可能 なかぎり可変成形方式と共通化を図っているが、対物偏向系 も共通である。したがって、ビームスポットの微細性を失う ことなく2mmと大角偏向を達成している。



リソグラフィー装置 385

31



図|| Ti/W熱電界放出EB装置による描画例 0.15 µm ライン アンド スペースのパターン形成例を示す。

4 そのほかのリソグラフィー技術

4.1 エキシマレーザ露光方式

光を用いた縮小露光技術では,露光光の波長をさらに短く することによって解像度を向上することができる。その代表 例として図12に示すエキシマレーザ(波長248 nm)を露光照明 光源としたエキシマレーザ縮小露光方式が挙げられる^{13),14)}。 この露光方式の技術課題は,(1)高い解像度が得られ,かつフ ィールドの大きな縮小レンズ,(2)安定性が良く,小形で保守 性の高いエキシマレーザ,(3)高精度のアライメント技術およ び(4)解像度の高いレジストプロセス技術である。本露光方式 では,0.3 μm程度の解像度が得られるものと予測されており, 上記課題をクリアするため技術開発が進められている。 短いことによって光の回折を低減でき,図13¹⁵に示すように高 い解像度を得ることが可能である。X線発生源で大別すると, 電子ビームをターゲット材料に照射したX線を取り出す回転対 陰極形,放電やレーザ照射によって生じるプラズマを線源と するもの,シンクロトロン放射光を利用するタイプの3種に 分類される。露光方式としては,マスクパターンを1対1で ウェーハ上に転写する近接露光方式と,マスクパターンを縮 小してウェーハ上に転写する縮小露光方式がある。将来の微 細なディープサブミクロンデバイスの量産用リソグラフィー 技術として活躍するものと期待される。

5 今後の展開

以上述べてきたように、さまざまなリソグラフィー技術が 検討され、これに対応した装置が開発されている。これらの 技術とこれに伴う装置の今後の展開について考える。

まず光学式リソグラフィー技術であるが、今までと同様に 高NA化、大フィールド化が進むと思われる。同時に転写波長 の短波長化も急ピッチで進められると思われる。当面は i 線化 が一つの目標であるが、さらにエキシマレーザへと展開が続 くであろう。エキシマレーザもKrF(249 nm)からArF(193 nm) までも研究レベルでは検討されている。こういった解像度の 向上は、必然的に焦点深度の低下を伴う。短波長化による解 像度の向上のほうが高NA化によるものより焦点深度低下は緩 やかであるが、この問題を避けて通ることはできない。この ため、実効的な焦点深度の低下を防ぐための装置上の工夫と、 FLEX法¹⁶⁾のような積極的な焦点深度拡大策が不可欠となる。 一方、重ね合わせ精度の向上は解像度の向上と同様に、LSIの 高集積化に有効である。回折光を利用するなど、これからの ステッパには新しいアライメント技術や超高精度な制御技術

4.2 X線露光方式

露光用紫外線の波長をさらに短くするとX線となる。波長が



図12 エキシマレーザ露光照明光学方式 レーザビーム走査によって、パーシャルコヒーレンシーおよび照度分布の確保を行う。



図13 X線露光によるパターン形成例 PMMAレジストによる0.2 μm ラインおよび0.6 µmスペースの転写パターンを示す(高エネルギ物理学 研究所の放射光実験施設を利用)。

が必要である。

る0.5µm加工は、プロセス機器としての仕上がり度合と信頼 性,従来プロセスとの連続性および装置の量産供給の可能性 などからみて, 上記選択が妥当と考える。

さらに、次世代のリソグラフィー開発も、絶え間なく進歩 発展を遂げている。原理的に満足するものも製造現場機器に 仕上げるための課題の消化が最重要である。その改良検証に 時間が必要であるが,一方では,デバイス開発のタイミング に合致させることが装置開発者として重要であり、今後とも デバイス開発者と同一の問題認識の上に立ち、開発を進めて いく考えである。

参考文献

- 1) 田代,外:紫外線透過ガラス, MINOLTA Techno Report No.5(1988)
- F.H. Dill, et al. Characterization of positive photo-2)resist, IEEE trans. Electron Device Vol. ED-22, p.445, 1975.

さらに、微細な加工を実現するためにX線リソグラフィー技 術が検討されている。しかし,光学式リソグラフィー技術の 適用範囲の拡大とX線リソグラフィー技術自体の技術開発の 遅れに伴い、その適用時期が先に延びている。この結果、さ らに高い解像度が要求されるようになり、X線源としてはシン クロトロン放射光が必須(す)という見方が強い。また、重ね 合わせ精度も非常に厳しくなるため,従来の等倍近接露光方 式だけでなく縮小投影露光方式の検討も始まっている。いず れにせよアライナ,マスクなどの課題もまだ多く残されてお り、実用段階はまだ先になりそうである。

マスク描画からASICなどへの応用の展開が期待されている 電子線直接描画技術は、その微細加工性から0.3µm技術以降 のリソグラフィー技術の要(かなめ)に位置づけられる。装置 の課題としてはスループットの向上や描画精度の向上がある。 特にスループットの向上は重要であり、描画方式の再検討や 各種処理時間の短縮が必要である。また, 描画精度の向上には 電子光学系の高度化, ステージなど機械精度の向上, 制御回 路の高精度化やインテリジェント化など総合的な技術開発が 必要である。一方,ナノメートルレベルの最先端加工が必要な 量子効果素子や超高速素子の研究には,熱電界放射形電子銃 を用いた装置が今後ともにその威力を発揮するものと思われる。

- 3) 赤羽,外:1/5 i 線ステッパの解像性能と重ね合せ精度について, 電気通信学会研究会, SDM88-5(1988年)
- T. Ueno, et al. : Contrast Enhancement Materials Using 4) Water Soluble Diazonium Salts : Effect of Optical Properties of Photobleachable Dyo on Resist Contrast Improvement, J. Imaging Sci., Vol.32, p.144 1988
- S. Kuniyoshi, et al. : Contrast improvement of alignment 5) signals from resist coated patterns, J. Vac. Sci. Technol. B5(2), $555 \sim 560(1987)$
- S. Sugiyama, et al. : New 5X i-line projection aligner for 6) VLSI fabrication, Optical/Laser Microlithography, Proc. SPIE 922, $318 \sim 326(1988)$
- 中村,外:電子線描画装置の高度利用技術の開発,日立評論, 7) **68**, 9, 699~704 (昭61-9)
- M.G.R. Thomson, et al. J. Vac. Sci. Technol. B5(1) 8) tan/Feb 1987 53~56
- M. Fujita, et al. : IEEE J. of Solid-State Circuits 9) Vol.23, No.2, 514~519(1988)
- 10) K. Shiozawa, et al. : IEEE '87 CICC (1987) 333
- 11) 水野: ASICに使われ始めたEB直描, Semiconductor World, 3, $75 \sim 83(1988)$
- 12) T. Matsuzaka, et al. : SPIE Vol.773, Electron-Beam, X-Ray and Iron-Beam Lithographies V1 (1987) 234~239
- 13) 押田,外:第49回応用物理学会学術講演会予稿集,498,4a-K-10(1988年 秋)
- 14) V. Pol, et al. : Excimer Laser-Based Lithography : a Deep Ultraviolet Wafer Stepper, Proc. of SPIE, 633, March 1986, p.6

6 結 言

サブミクロンデバイスの開発が本格化し、製造プロセスの 選択時期に入ってきている。リソグラフィー技術も複数の候 補があり、これを中心に述べてきた。将来を見渡し、かつ現 実的方式は i 線露光方式と考えられる。特に当面の課題であ

- 15) T. Kimura, et al. : Exposure Characteristics of Electron Beam Resist for Synchrotron X-ray Lithography, Proc. of SPIE, 393, March 1983, p.2 16) H. Fukuda, et al. : A New Method for Enhancing Focus Latitude in Optical Lithography : FLEX, IEEE Electron
 - Decive Letters, Vol. EDL-8, No.4 April 1987, p.179