



リソグラフィに用いられる紫外光源

三村 義昭・道券 正延

日本電信電話公社厚木電気通信研究所 〒243-01 厚木市小野 1839

(1983年10月25日受理)

UV Light Sources for Lithography

Yoshiaki MIMURA and Masanobu DÖKEN

Atsugi Electrical Communication Laboratory, N. T. T.,
1839, Ono, Atsugi 243-01

1. ま え が き

集積回路は、出現以来、集積規模の拡大と素子寸法の微細化の道を歩み続けてきた。いまや 256 k ビット MOSRAM の本格生産の開始が目前に迫るとともに、1 M ビットメモリの開発が盛んに行なわれるなど、本格的な VLSI 時代を迎えている。

このような目ざましい発展の最大の担い手が、リソグラフィを中心とする微細加工技術にあることはいうまでもない。VLSI の開発が始まった 1975 年ごろのリソグラフィ技術に対する一般的な見解は、従来のフォトリソグラフィ技術で VLSI を実現するのは困難であり、これに代わる新しいリソグラフィ技術の開発が VLSI 実現の鍵を握ると考えられた。そこでフォトリソグラフィ技術の限界を超える新技術として、電子ビーム露光や軟 X 線を用いたリソグラフィ技術の研究が盛んに行なわれるようになった。

それまでのフォトリソグラフィ技術は、ネガ型フォトレジストを用いたコンタクト露光が主流であった。この方式では、微細化の限界が $3\mu\text{m}$ 程度であり、欠陥レベルも高いため、VLSI 製造のツールとしては不十分であった。とはいえ、フォトリソグラフィ技術はほぼ完成された技術であるうえ、他の代替技術に比べて生産性とコストパフォーマンスが格段に優れていることから、それまでの光露光技術の限界を打破する新技術の出現が強く望まれた。このような強いニーズによってフォトリソグラフィに関連する新技術が次々に開発された。具体的には、クレゾールノボラック系ポジ型フォトレジストの

LSI プロセスへの導入に始まり、deep-UV 露光技術、反射型プロジェクションアライナやウェーハステップの開発等があげられよう。これら新技術の出現によって、フォトリソグラフィ技術の微細化の限界は $1\mu\text{m}$ はもちろん、サブミクロン領域も不可能ではないと考えられるようになった。

また、次世代の微細リソグラフィ技術のエースとして期待されている電子ビーム露光技術は、フォトマスクの製造分野では光に取って代わりつつあるが、ウェーハプロセスの分野では、カスタム LSI の配線等のごく一部の用途を除いて、量産技術としてはいまだ実用段階までには至っていない。このため、これまで量産されている LSI~VLSI はすべて光露光技術が使用されており、今後も引き続き、この技術が VLSI の量産技術の中心的役割を果たしていくものと予想される。

これらフォトリソグラフィ技術において、照明光学系を含む露光源の果たす役割は当然大きい。i 線 (365 nm)~g 線 (436 nm) を露光源とする UV 露光では、主として水銀ショートアークランプが、波長 200~320 nm の deep-UV 露光では、Xe-Hg ショートアークランプ等が使用されているが、最近ではマイクロウェーブ励起放電管等の新しい deep-UV 光源も使用されている。また、エキシマレーザを始めとする紫外線レーザ光源を用いた新しいサブミクロンリソグラフィ技術の研究も行なわれている。

本稿では、主として LSI~VLSI 製造に用いられている各種リソグラフィ用 UV 光源の現状と技術的問題点を中心に概説する。

2. 各種露光方式とその露光光源

現在、集積回路の製造に使用されている露光方式は、表1のように3種に大別される。

コンタクト/プロキシミティ露光方式は、64kビット MOSRAM の量産にも使用されており、生産性とコストパフォーマンスに優れていることから、現在も汎用の LSI 生産の中心的技術として広く用いられている。

露光波長帯で分類すると、UV 露光と deep-UV 露光がある。前者には 200~500 W の水銀ショートアークランプが、後者には Xe-Hg ショートアークランプ (500~1,000 W) が主として用いられている。

これら露光源に必要な性能を列記すると、有効照射径 15 cm 以上 (5" 径ウェーハ用)、露光時間 10 秒以内、露光面の照度むら $\pm 2 \sim \pm 5\%$ 以内、コリメーション角 (発散角 θ) の精密制御 ($\theta \approx 3 \pm 1^\circ$)^{1,2)}、熱線の効果的排

表 1 露光方式の分類とその特徴

| 露光方式 | 転写倍率等 | 露光波長 | 光源 | 特徴 |
|-------------------|--------------------------|--|---|---|
| コンタクト/ プロキシミティ | 1:1 全面一括転写 | i線~g線 —UV 露光 200~320 nm —deep-UV 露光 | Hg ショートアークランプ Xe-Hg ショートアークランプ (エキシマレーザ, etc.) | <ul style="list-style-type: none"> 多色光露光 高スループット 装置価格低 欠陥レベル高 |
| ミラープロジェクション | 1:1 スリット走査または 1:1 分割露光 | 同上 | キャピラリ型 Hg ランプ Hg ショートアークランプ Xe-Hg ショートアークランプ (エキシマレーザ, etc.) | <ul style="list-style-type: none"> 多色光露光 高スループット 装置価格中 欠陥レベル小 |
| レンズプロジェクション | 等倍~縮小 (1/10) 全面一括または分割露光 | g線 (h線, i線) (deep-UV 光) | Hg ショートアークランプ (エキシマレーザ, etc.) | <ul style="list-style-type: none"> 単色光露光 微細パターン(縮小露光) 高マスク合せ精度 欠陥レベル小 |

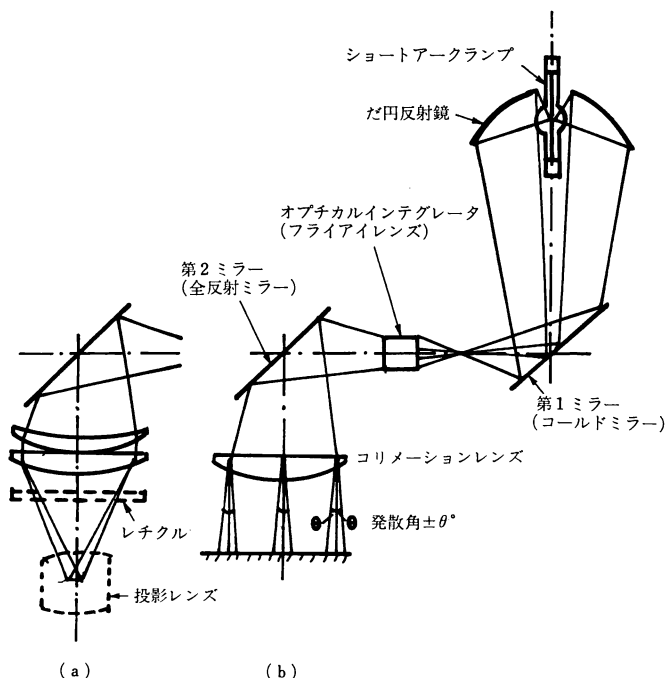


図 1 ショートアークランプ用照明光学系の代表例
(a) 縮小投影露光, (b) コンタクト/プロキシミティ露光

除^{2,3)}, 等があげられる。

これらの条件を満たす露光源として、これまで最もよく用いられている照射光学系を図1に示す^{1,2)}。この光学系は集光効率が高く、かつ均一性が得やすいうえに、照明状態(コンタクト露光では θ 値, 投影露光では σ 値^{*1)}の制御が容易であることから、後述するウェーハステップの照明光学系としても広く採用されている。この照明系における集光効率の例を示すと⁴⁾、最適設計されたもので約25%であり、通常の市販品のそれは10%程度である。

一方、実用されているポジ型フォトリソの感度は50~100 mJ/cm² (ネガ型は10~30 mJ/cm²)程度である。したがって直径15 cm以内のポジ型フォトリソ膜を10秒以内で露光するに必要なショートアークランプのレジストの感光に寄与する波長帯の所要放射量は4~20 W以上となる。

その他、 θ の制御は回折による転写像品質の劣化防止に重要である^{1,2)}。また、アークランプから大量に放出される熱線はウェーハやマスクを加熱し、マスク合せ精度を低下させる。このため熱線吸収フィルタやコールドミラーが用いられている。ところがdeep-UV帯では、吸収の少ない誘電体膜の種類が少ないことから、所望の分光特性を得ることはむずかしい。deep-UV帯で使用可能なコールドミラーとしては、これまでにMgF₂/HfO₂多層膜等が開発されているにすぎない^{2,3)}。

1:1ミラープロジェクトン露光装置はPerkin Elmer社によって開発され、その後キャノン社等からも発売されており、2~3 μ mルールLSI~VLSIの量産装置として多用されている。結像光学系が原理的に色収差のない球面鏡のみで構成されているので、deep-UV~UVの広い波長帯で多色光露光が可能であるという特長を有するが、面収差が大きいという欠点を有している。この解決策として、非点収差がほぼゼロになる凹面鏡上のごく狭い領域にのみスリット状に結像させることによって、収差補正上の難点を克服している。したがって照明領域は円弧状のスリットとなり、マスクとウェーハを同期させてウェーハ面を走査露光する⁵⁾。この装置では円弧状に曲がったキャピラリ型超高压水銀灯(1 kWないし1.7 kW)を用い、このランプのアーク像をマスク上に結像させる照明方式を採用している。Canon MPA-520 FA型では、UV露光には2 kW水銀ショートアーク

ランプを、deep-UV露光には2 kW Xe-Hgショートアークランプを用いている⁶⁾。

また、最近Ultratech社よりユニークな光学系を有するステップ型1:1プロジェクトン露光装置が発売されている(Model 900)。結像光学系に1枚の凹面鏡と1組のアクロマートレンズを用い、面収差と色収差の補正を行なっている。これによりh線~g線の多色光露光が可能になり、露光面積10×10 mmで開口数NA0.315の結像光学系(解像線幅1.25 μ m)を実現している。この装置の照明光学系も図1とほぼ同じであり、光源には普通の200 W水銀ショートアークランプが用いられている。アイドリング時は定格の1/2の100 Wで点灯しておき、露光時のみパルス電流を印加して、500 Wの入力を与えている。この方法により、ランプからの余分な発熱を抑え、h線~g線間の連続スペクトル成分を増大させて定在波効果^{*2)}の低減を図っている⁷⁾。

レンズプロジェクトン型露光装置のうち、等倍~1/4倍のものでは比較的古くから使用されてきた。近年ウェーハステップと呼ばれる高精度マスク合せ機構を有する分割露光型縮小投影露光装置が次々に開発されるに及んで、ウェーハステップはVLSIリソグラフィ量産装置の本命と目されている。現在実用されているステップの投影レンズは、縮小倍率1/5ないし1/10のg線用で、結像面積が15×15 mmないし10×10 mm程度である。

ステップに使用されている照明光学系は図1に示したものと大差ないが、単色光とするための干渉フィルタを有することと、投影レンズの入射ひとみの位置に光源像を結像させた部分的コヒーレント照明法を採用している点で、コンタクト露光用照明系と相違する。照明領域は小さいが、単色光露光であるうえ、露光時間を0.1~0.3秒/ショットと短くする必要から、コンタクト露光の場合よりいっただん大きい350~1,000 Wの水銀ショートアークランプが用いられている。

投影露光における解像性能は、結像光学系のNAのほか、照明光学系の σ 値と波長 λ に依存する。これらの関係を図2に示す。実用に耐えうるレジスト像を得るには、通常0.6以上のMTF^{*3)}が必要である。解像線幅はNAに反比例し、 λ に比例するのに対し、焦点深度 δ は λ に比例し、NAの2乗に反比例する。現在のステップ(NA 0.3~0.35, g線)の δ が2~3 μ mであることか

*1 照明光の空間的コヒーレンシの程度を表わす係数、 σ =投影レンズの入射ひとみ位置における光源像の径/投影レンズの入射ひとみの径。

*2 基板境界面からの反射光によって、レジスト膜内に発生する定在波によってレジストパターンの品質が劣化する。単色光露光ほどこの効果が著しい。

*3 modulation transfer function.

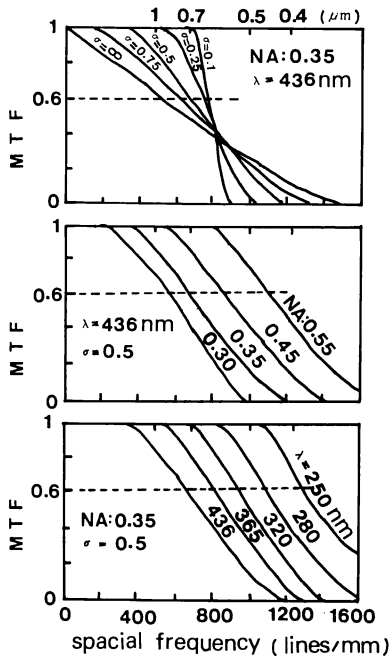


図 2 結像光学系の MTF 特性

ら、 δ がこれ以上浅くなると実用上問題が大きい。 δ を確保しつつ、微細パターンを形成するには、 NA を大きくするよりは、 λ を短くするほうが好ましい。ステップ用投影レンズとしては、 g 線用のほか、 h 線用や i 線用のものが開発されている⁹⁾。これより短波長側では使用

できるレンズ材質が制限されて、無収差レンズの設計がかなりむずかしくなるため、実用に耐えうる性能を有する deep-UV レンズはまだ開発されていない。

また、図 2 の結果から、MTF 特性は σ 値に大きく影響されることがわかる。微細パターンまでコントラストのよい像を得るには、 σ 値の小さい(コヒーレンシの低い)照明条件を選んだほうがよい。ところが、ショートアークランプ等の発散光源を用いた場合、 σ 値を小さくすると一般に集光効率が大幅に低下するので、通常は両者のバランスから 0.5~0.75 程度の σ 値が選ばれる。しかし、後述するレーザー光源を用いれば、 σ 値の小さいコヒーレント照明光学系を容易に実現できよう。

3. UV 光源

リソグラフィに使用されている UV 光源を分類し表 2 に示す。ランプの諸特性中、リソグラフィ装置用露光光源を構成する場合に、とくに重要な特性のみに絞って以下に述べる。

UV 露光用ランプには、前述したミラープロジェクションアライナ等の特殊な場合を除けば、ほとんど例外なく水銀ショートアークランプが使用されている。水銀ショートアークランプは超高压水銀灯とも呼ばれ、点灯時の Hg の蒸気圧が 10~30 気圧で、点灯を容易にするため、Ar 等の希ガスが封入されている。アーク長は 1~2 mm 程度で、ほぼ点光源とみなすことができるうえ、

表 2 リソグラフィに使用される UV 光源の分類とその用途

| | | | |
|-----------|---------------------|-----------------------------------|---|
| ・水銀ランプ | — ショートアーク | — 超高压水銀灯 | 汎用 UV 露光光源 |
| | — ロングアーク | — キャピラリ型(超高压水銀灯) | ミラープロジェクションアライナ用 deep-UV~UV 光源 |
| | | — 中圧水銀灯・高压水銀灯 | |
| | | — 低圧水銀灯 | 表面クリーニング用 |
| — 無電極ランプ | — マイクロウェーブ励起 | deep-UV 用光源 | |
| | (Hg ランプ, Hg-Cd ランプ) | (PCM 露光用, レジスト硬化用) | |
| | — 高周波励起 | | |
| ・Xe ランプ | — ロングアーク | — フラッシュランプ | deep-UV 用, エマルジョンマスク露光光源 (PG, ホトレピータ, etc.) |
| | — ショートアーク | — 連続点灯 | |
| ・Xe-金属ランプ | — Xe-Hg ショートアークランプ | 汎用 deep-UV 光源 | |
| | — Xe-Cd ショートアークランプ | deep-UV 光源 | |
| ・重水素ランプ | | deep-UV 光源 | |
| ・レーザー | — エキシマレーザー | KrF (248 nm), XeCl (308 nm), etc. | deep-UV 光源 |
| | — ダイレーザー | (420 nm), He-Cd レーザ (440 nm) | UV 光源 |
| | — Ar レーザ | (458 nm), Kr レーザ (413 nm) | |

UV 領域に強い発光スペクトルを有し、その発光効率も 10% 以上 (i 線~g 線) に達する。おもな輝線は i 線 (365 nm), h 線 (405 nm), g 線 (436 nm), e 線 (546 nm) のほか、260~340 nm にも多数の輝線を有する。一般に Hg の封入圧が高くなるほど可視領域の発光スペクトル成分が増えるとともに、輝線の幅が広がる傾向を示す。水銀ショートアークランプの輝線の半値幅はおおよそ 5 nm 程度である。

ランプ寿命は通常 600 時間が保証されている。これは定格パワーで連続点灯した場合に、出力が初期値の 80% に低下するまでの点灯時間で規定されている。しかしながら実際のランプ寿命は点灯条件によって大きく左右される。たとえば定格パワーの 30% 減程度の低パワーで使用すれば、ランプ寿命を 2 倍以上長くすることも可能である。前述した Ultratech 型のランプ使用法は、ランプ寿命と出力のばらつき等について十分知られていないが、新しいランプ点灯方式として興味深い。

ミラープロジェクトンアライナ Micralign シリーズで使用されているキャピラリー型水銀アークランプも超高圧水銀灯で、その Hg 封入圧は 50~100 気圧であり、アーク長は 1 kW ランプで 2~3 cm である。240~340 nm の短波長側の発光効率が、ショートアークランプに比べていくぶん良好であるため、このランプで deep-UV から通常の UV までの 3 波長帯の露光を行なっている (Micralign 500 型)。この種ランプの欠点としては、アーク内の輝度分布に不均一性が生じやすく、この結果照明むらが大きくなりやすい。したがってこの種ランプの寿命は、ショートアーク型に比べて一般に短い。

水銀灯のもうひとつの利用法として、基板表面の UV/オゾンクリーニング法^{9,10)}があげられる。この方法はレジスト膜の付着性改善¹¹⁾やゲート酸化膜の耐圧改善¹²⁾に大きな効果があることから、レジスト塗布前やはく離後の基板クリーニング法として使用されている。これは低圧水銀灯から放射される 184.9 nm と 253.7 nm の UV 光によって生成されるオゾンと酸素ラジカルの酸化作用を利用して、レジスト残渣層や有機汚染層を除去するものである。

4. Deep-UV 光源

Deep-UV 露光は当初 200~260 nm の UV 光に感度をもつ PMMA レジストを使用するものであった¹³⁻¹⁵⁾。その後レジストの開発が進むにつれて、280 nm 付近に高感度を示す deep-UV レジストが数多く開発された^{16,17)}。そこで最近では、300 nm 程度以下の UV 光

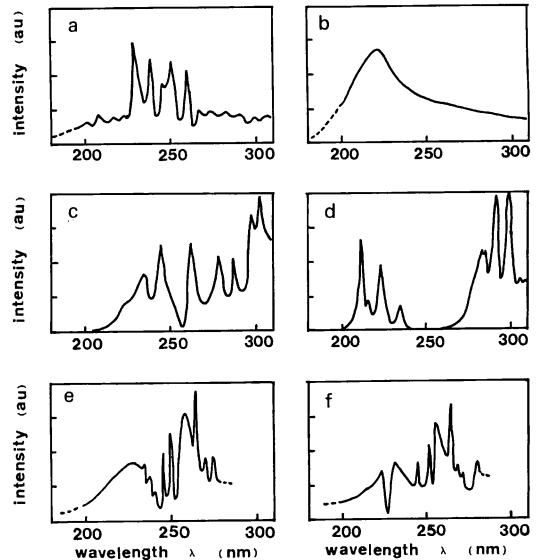


図 3 Deep-UV ランプの発光スペクトル

a: Xe フラッシュランプ (入力 75 J/ショット, 閃光時間約 80 μ s), 260 nm 以下の UV 光の出力 $I_{\text{deep}} \approx 100$ mJ/str/shot, b: 重水素ランプ (200 W 水冷), $I_{\text{deep}} \approx 40$ mW, c: Xe-Hg ショートアークランプ (500 W, USHIO), $I_{\text{deep}} \approx 10$ W, d: Xe-Cd ショートアークランプ (200 W, OSRAM), $I_{\text{deep}} \approx 1$ W, e: マイクロユーブ励起 Hg ランプ (1, 200 W, FUSION), $I_{\text{deep}} \approx 120$ W, f: マイクロユーブ励起 Hg-Cd ランプ (1, 200 W, FUSION), $I_{\text{deep}} \approx 120$ W.

を利用した露光法も deep-UV リソグラフィの範疇に含めており、従来の UV 露光との区別はあいまいである。

図 3 に代表的な deep-UV ランプの発光スペクトルを示す。図 3(a) は閃光時間約 80 μ s で入力パワー 75 J/ショットの Xe フラッシュランプ (アーク長 4.5 cm) の測定例である。230~260 nm を中心に連続スペクトルを放射する。とくに 185 nm 付近に鋭い分光感度を有する PBS や 220 nm に感度ピークを有する PMMA レジストを数十~数百ショットで露光することが可能である^{18,19)}。しかし 260 nm 以下の UV 光の 1 ショット当りの放射量は、アークに垂直方向で 100 mJ/str. 程度にすぎず、deep-UV 露光源として実用するには、1 桁以上パワー不足である。

有効エネルギー不足という点では重水素ランプも同様である。理想的な発光スペクトルを有しているが (図 3(b)), 発光効率はきわめて悪い。市販品中最大パワーの 200 W 水冷ランプ (Original HANAU 社製) でも、260 nm 以下の全放射量は約 40 mW にすぎず、3" 径内の PMMA を露光するのに約 20 分を要している¹⁾。

現在市販されている deep-UV アライナ (Canon

PLA-520 FA 等)の光源として実用されているのが Xe-Hg ショートアークランプである(図 3(c)). 点光源に近いうえ, 260 nm 以下の UV 光の全放射量も約 10 W (定格入力 500 W) とまずまずである. 図 1 に示した構成の 4" 径照明装置を用いて, PMMA を約 30 秒, PMIPK を数秒で露光できる⁴⁾. このランプの寿命に関しては, 出力 30% 減までの連続点灯時間として約 400 時間(波長 230 nm に対して)という結果が得られている²⁰⁾. ランプの出力低下の大きな原因は, 蒸発して管内壁に付着する電極材料による UV 光の吸収である. この場合短波長ほど吸収率が大きいので, アークランプの寿命は短波長ほど短い.

Xe-Cd ショートアークランプを光源とする deep-UV アライナ(KARL SÜSS UV-200 型)も市販されている. Xe-Cd ランプは図 3(d) に示すように, 210~230 nm に強いスペクトルがあるが, Cd 蒸気による自己吸収のため, 230~260 nm にはスペクトルはみられない. 定格入力 200 W (OSRAM 製)の波長 260 nm 以下の全放射量は約 1 W と少なく, したがって直径 8 cm の照明装置での面照度は 2.5 mW/cm^2 で, PMMA の露光に約 10 分を要している²¹⁾.

図 3(e) はマイクロウェーブ励起水銀ランプ(FUSION SYSTEMS "MICROLITE")の発光スペクトルである. 励起周波数 2.45 GHz で, 発光部の管球内径 19 mm, 入力パワー 1,200 W で, 200~260 nm の UV 光の全放射量が 120 W 以上とずば抜けた発光効率を有している²²⁾. 詳細なデータは発表されていないが, その発光スペクトルから, 高圧水銀灯の発光領域(Hg の封入圧 1 気圧程度)を用いているものと推定される. 通常のロングアーク型の高圧水銀灯は, deep-UV 光の発光効率がきわめて良好であるが, 輝度が低いため, 強力な面照度を有する照射装置を構成するには難があった¹⁾.ところが, このランプでは発光部を直径 19 mm の球形にしたことにより, 高輝度化が図られている. またマイクロウェーブで励起しているので秒単位で点滅できる.

現在このランプは, FCM 2 層レジスト法^{*4,23)} で必要な deep-UV 全面露光用照射装置, ならびにノボラック系ポジ型フォトリソの熱変形温度改善のための UV 硬化処理用全面露光装置の光源として実用されている. 前者の例をあげると, 照射径 5", $\theta=3.5^\circ$ の照射条件での面照度(波長 200~245 nm)は約 27 mW/cm^2

で, PMMA の所要露光時間は 30 秒~1 分程度である²²⁾. 光源径が大きくて集光効率が悪いので, 放射量が大きい割にはさほど強力な面照度は得られてはいないが, これまでに開発された deep-UV 光源では最も強力である.

このランプのもうひとつの特長は, 寿命がきわめて長いことである. これは, このような無電極ランプの場合, 電極材料の蒸発による放射量の低下が原理的に生じないためである. ランプ寿命として, 出力 10% 低下で 500 時間を保証している. また Hg ランプのほか, Hg-Cd ランプ(図 3(f))も発表されている. Hg ランプの場合と同様に 100 W 以上の deep-UV 出力(260 nm 以下)を得ている.

5. レーザ光源

レーザーの特徴を生かしたいくつかの光源がリソグラフィ用として提案されている. これらは使用法において高出力一様照明とビーム走査照明に大別される. これまでに報告された例について以下に紹介する.

IBM の Jain らは露光時間の短縮をねらいとして, XeCl (308 nm), KrF (248 nm), KrCl (222 nm) のエキシマレーザーを deep-UV 光源として用いることを提案し, コンタクト露光法による実験によって評価を行なっている^{24,25)}. これらレーザーの特徴は, 従来の光源より 2 桁程度大きい強度と, 1 辺が 1 cm 程度の矩形形状ビームで, 非常に多くのモードで発振しているため, 空間的コヒーレンシに欠け, 実用上干渉によるスペクルが問題になることがないので, リソグラフィ用光源に適している. 彼らの実験結果によれば, 露光時間 20 ns で厚さ $1 \mu\text{m}$ のレジストに $0.5 \mu\text{m}$ のパターンを, 従来の Hg ランプ光源の場合と同等の品質で得た. エネルギー範囲(ピークパワー密度) $0.27\sim 4.4 \text{ MW/cm}^2$ において相反則が成立する. 光源としての出力が十分にあるためレジスト感度は問題とならず, 耐エッチ性等の観点からレジストを選択できるとしている.

Tomson-CSF の Dubroeuq らはエキシマレーザーを縮小投影露光光源として検討した²⁶⁾. 縮小レンズとレチクルの光透過性や, 単色性および高出力性能等の観点から, KrF (248 nm) を選んだ. 光源の短波長化により微細パターン形成を可能としているため, 縮小レンズの NA を大きくする必要がないので, 焦点深度を劣化させないで済むこと, また波長のバンド幅が狭い (0.3 nm) こともあいまって, レンズを含めた光学系の設計が容易になることを指摘している. 実験に使用した縮小レンズ

*4 AZ-1350/PMMA の 2 層レジスト膜構成とし, 上層の AZ-1350 レジストパターンをマスクとして, 下層の PMMA 膜を deep-UV 光で露光することにより, 微細・高精度のパターンを形成する方法.

は、波長 248 nm に最適化されていないために収差をもっているが、7 μm の焦点深度で 0.7 μm のラインアンドスペースパターンを得ている。今後の課題として露光量の制御をあげているが、技術的には解決できるとしている。

現在エキシマレーザーには、ArCl (175 nm) から F (713 nm) まで多数のガス組成と発振波長のものが開発されている。通常放電励起によるパルス発振方式が採られており、ガス交換により 1 台で多種類のレーザー発振が可能である。これらのうち、XeCl (308 nm) と KrF (248 nm) が大出力で最も安定した発振特性が得られていることから、現在のところ最も実用性が高い。現在出力エネルギーが 200 mJ/pulse、繰返し周波数 50~数百 pps で平均出力 10~30 W の大出力レーザーが市販されている。また従来問題であった混合ガスの寿命も $10^6\sim 10^7$ ショットないし 20~50 時間程度 (出力 10% 低下) と大きく改良されてきている。露光面積を 1~2 cm^2 に制限すれば 1 パルス露光も可能である。今後リソグラフィ用光源として実用化するには、ビーム強度の制御性やビーム内強度分布の改善、ガス交換の自動化や長寿命化等が必要である。

また、Kr レーザ (413 nm) を縮小投影露光源として用いた例も報告されている²⁷⁾。これは光源の空間的コヒーレンシを高くすることによって、像のコントラストを高めることをねらったものである。コヒーレント雑音を少なくするため走査点光源システムを採用し、かつ照明の均一性をよくするためレーザービームを分割・再生して用いている。NA が 0.3 のレンズを用い、 $\sigma=0.1$ の照明条件において、1 μm の凹凸のあるアルミ膜上で 0.9 μm のラインアンドスペースパターンを 0.1 秒の露光時間で形成している。今後の問題として、高出力レーザーの信頼性向上が必要であるが、実効的な解像度の向上と露光時間短縮に有効であるとしている。

次にビーム走査照明として用いた場合の例について述べる。レーザービームをレンズを用いて数 μm 径のスポットに絞り、計算機制御の高精度 XY ステージにより試料を移動しつつ、レジストを露光してパターンを描画する方法は、パターン創製の機能があるうえ、マスクやレチクルを用いない分だけ欠陥を少なくできる。また試料ステージだけでなく、ビームを移動させる方法も試みられている。

レーザーにはフォトレジストが感光する波長帯でかつ CW 発振が可能なのが選ばれる。具体的には、ダイレーザー (420 nm)²⁸⁾、Ar レーザ (458 nm)²⁹⁾、He-Cd レー

ザ (440 nm)³⁰⁾ である。He-Cd レーザを用いた例では、スポット径を 0.5~1 μm に絞り、0.4 μm のラインを形成している。レーザーの出力およびビームのディフォーカスによって露光線幅の制御を行なうが、レーザー出力が大きいとレジストと基板に損傷が発生する。細かいパターンを露光するほどスループットが低下するので、フォトマスクあるいは薄膜回路パターンの露光に適する。

同様の方法で、レジストの代わりに薄膜を直接加熱蒸発させてパターン加工する方法が検討されている³¹⁻³³⁾。ピークパワー 20~200 W の YAG レーザをビーム径 2~8 μm で用いている。ビーム径 2 μm で 3 μm パターンを $\pm 0.25 \mu\text{m}$ の精度で加工できた。8 μm 径ビームを用い $5\times 5''$ レチクルを 30 分で描画できた。この方法の問題点は、被加工物の性質によって加工残渣や基板損傷が発生することである。基板材料に高融点・低熱伝導性のものを用い、パルス幅の狭いレーザービームで加工することが望ましい。被加工膜としては酸化鉄マスクが残渣が生じにくかった。この方法は高出力の細いビームを用いる点で、レーザーの特徴を生かした使い方といえるが、用途がレチクルあるいは薄膜回路の製作に限定されよう。

その他、He-Cd や Kr レーザの干渉を利用した微細回折格子の製作例等も多数報告されている^{34,35)}。

6. あとがき

アークランプを露光源とする各種フォトリソグラフィ技術は、LSI~VLSI の加工技術の中心として、今後も引き続き使用されるであろう。

一方、最近登場した紫外線レーザー光源は、サブマイクロフォトリソグラフィ技術実現の鍵を握るものとして今後の研究動向が注目される。最小線幅 0.5 μm 程度の VLSI を光技術で実現するには、結像光学系の NA の改善のみで対処することはもはや困難であり、露光源の短波長化は必須であると考えられる。この場合、現在のステップに用いられている縮小レンズ並みの NA と露光面積を保持しつつ、どの波長帯でも無収差結像光学系が実現できるかが最大の課題であろう。XeCl レーザ (308 nm) 程度までは、種類は大幅に限定されるとしても、光学ガラスの使用が可能であるが、248 nm の KrF レーザ光源になると、使用可能なレンズ材質が石英ガラス、ホタル石、サファイヤ等の数種に限定されるうえ、レンズ面の無反射コーティング等も同じ理由からむずかしくなる。その点反射結像系には波長依存性がないことから、原理的困難性は少ない。ただし、現在のところ微細

パターンの形成に有利な縮小結像系は実現していない。今後は反射ならびに屈折の両光学系の利点を生かした、新しい deep-UV 無収差結像光学系の実現が望まれる。

本稿をまとめるにあたり、ご援助いただいた当所集積マスク研究室北山豊樹室長、超伝導素子研究室石田晶室長、ならびに柳川文彦調査役に感謝いたします。

文 献

- 1) Y. Mimura, T. Ohkubo, T. Takeuchi and K. Sekikawa: Jpn. J. Appl. Phys., **17** (1978) 541.
- 2) 加納一郎, 百瀬克己: 第 16 回 回半導体・集積回路技術シンポジウム (1978) p. 84.
- 3) 三村義昭, 堀内敏行, 今野邦男: 昭 54 電子通信学会半導体・材料部門全国大会, No. 140 (1979).
- 4) 吉田和衛, 堀内敏行, 三村義昭, 篠山伸弥: 電子通信学会半導体・トランジスタ研究会, SSD 79-63 (1979).
- 5) A. Offner: Opt. Eng., **14** (1975) 130.
- 6) 吉成秀樹, 唐沢 保, 下田 勇, 伴 箕吉: 電子材料, **21**, 3 (1982) 45.
- 7) R. Hershel and R. Voison: *SPIE Proc.*, Vol. 334, Optical Microlithography (1982) p. 44.
- 8) H. L. Stover: *ibid.*, (1982) p. 60.
- 9) R. R. Sowell, R. E. Cuthrell, D. M. Mattox and R. D. Bland: J. Vac. Sci. Technol., **11** (1974) 474.
- 10) J. R. Vig: IEEE Trans. Parts, Hybrids, Packag., **PHP-12** (1976) 365.
- 11) 三村義昭, 蓮見裕二, 柳川文彦: 昭 57 応物学会秋季講演会, 28 a-U-3 (1982).
- 12) 平塚八郎, 見方裕一, 吉井新太郎: 昭 58 応物学会秋季講演会, 27 p-F-3 (1983).
- 13) J. B. Lin: J. Vac. Sci. Technol., **12** (1975) 1317.
- 14) 中根靖章, 三船忠良: 第 11 回 回半導体・集積回路技術シンポジウム (1976) p. 54.
- 15) 三村義昭, 大久保高志, 竹内辰男, 関川京三: 第 12 回 回半導体・集積回路技術シンポジウム (1977) p. 54.
- 16) 津田 穰, 笈川節子, 中村洋一, 小原秀克, 永田英男, 横田 晃, 中根 久: 第 14 回 回半導体・集積回路技術シンポジウム (1978) p. 42.
- 17) I. Iwayanagi, T. Kohashi and S. Nonogaki: J. Electrochem. Soc., **127** (1980) 2759.
- 18) F. Feldman, D. L. White, E. A. Chandross, M. J. Bowden and J. Appelbaum: *Kodak Microelectronics Seminar Proc.* (1975) p. 40.
- 19) 伊藤 仁, 森 克己: 昭 52 応物学会秋季講演会, 4 p-N-7 (1977).
- 20) 吉良健裕: 第 17 回 回半導体・集積回路技術シンポジウム (1979) p. 72.
- 21) W. Vach: Karl Süß technical information data about UV-200 (1982).
- 22) M. G. Ury, J. C. Matthews and C. H. Wood: *SPIE Proc.*, Vol. 334, Optical Microlithography (1982) p. 241.
- 23) B. J. Lin, E. Bassous, V. W. Chao and K. E. Petrillo: J. Vac. Sci. Technol., **19** (1981) 1313.
- 24) K. Jain, C. G. Willson and J. B. Lin: IBM J. Res. Dev., **26** (1982) 151.
- 25) K. Jain, C. G. Willson and J. B. Lin: *SPIE Proc.*, Vol. 334, Optical Microlithography (1982) p. 259.
- 26) G. M. Dubroeuq and D. Zahorsky: *Proc. Microcircuit Engineering '82* (1982) p. 73.
- 27) M. Lacombar, G. M. Dubroeuq, J. Massin and M. Brevignon: Solid State Technol., **23** (1980) 55.
- 28) J. R. Moulic and H. E. Liberman: Proc. Bienn. Cornell Electr. Eng. Conf., **7** (1979) 55.
- 29) R. A. Becker, B. L. Sopori and W. S. C. Chang: Appl. Opt., **17** (1978) 1069.
- 30) G. Westerberg: Int. Conf. Microlithography, Paris (1977).
- 31) J. Raamot and V. J. Zaleckas: Appl. Opt., **13** (1974) 1179.
- 32) J. M. Moran and T. E. Saunders: Rev. Sci. Instrum., **46** (1975) 1267.
- 33) M. Feldman, J. M. Moran, R. L. Ruth and R. R. Gorham: Solid State Technol., **20** (1977) 52.
- 34) G. J. Sonek, D. K. Wagner and J. M. Ballantyne: J. Vac. Sci. Technol., **19** (1981) 921.
- 35) A. M. Hawryluck, N. M. Ceglie, R. H. Price, J. Melngailis and H. I. Smith: *ibid.*, **19** (1981) 897.