

# 解説

## エキシマレーザーリソグラフィ

中瀬 真

(株)東芝 ULSI 研究所 〒210 川崎市幸区小向東芝町 1

(1991年4月19日受理)

### Excimer Laser Lithography

Makoto NAKASE

ULSI Research Center, Toshiba Corp., 1, Komukaitoshiba-cho, Saiwai-ku, Kawasaki 210

#### 1. ま え が き

近年の半導体集積回路の大規模化, 高密度化は目覚ましく, ダイナミック型ランダムアクセスメモリ(DRAM)の記憶容量は3年ごとに4倍の割合で増大し, パターン寸法はおおよそ70%ずつ縮小されてきた. 最先端の64MビットDRAMを例にとると, 0.3~0.4 $\mu\text{m}$ のパターンを用いて, 20 $\times$ 7mm前後のSiの薄片におよそ1億5,000万個のトランジスタやキャパシタが集積されるに至っている. さらに, 256M, 1GDRAMにおいては, 0.15~0.25 $\mu\text{m}$ のパターン寸法が必要とされている.

このようなパターンの微細化に対処するために, 電子線やX線, イオンビーム等のリソグラフィ技術の研究開発が行われている. しかしながら, 量産時の生産性やコストを考慮すると, 従来より用いられている光リソグラフィの露光光を短波長化することによって, 可能な限り微細化を押し進めていくことが望ましい. そこで, 1980年に波長248nmのKrFエキシマレーザーを露光光源に用いることが提案された<sup>1)</sup>. そして, 1986年に本格的なエキシマレーザー露光装置が開発され<sup>2)</sup>, 以来, 超高压水銀灯のg線(波長436nm)もしくはi線(波長365nm)を用いた露光に代わる次世代の光露光技術として位置づけられ, 今日に至っている.

本報告は, KrF, ArFエキシマレーザーを光源として用いたリソグラフィ技術の現状と課題, 今後の動向を概説するものである.

#### 2. 短波長露光と解像力

露光工程で得られる解像力とその時の焦点深度は, 光

学系のNA(開口数), 露光波長 $\lambda$ , およびレジスト材料の解像力やプロセスの制御性で決まる. これらの関係を明確にするために, ディフォーカス量を与えたときのNAと解像力, 波長の関係<sup>3)</sup>を計算によって求めた. すなわち, パーシャルコヒーレント照明下の結像理論<sup>4)</sup>を用いてラインアンドスペース(格子)パターンの像強度分布のコントラストを導き, レジストパターンを得るために必要とされる限界のコントラストを80%と仮定して, その時のラインアンドスペースの寸法を解像力として求めた.

図1に計算結果を示す. 実際の露光においては基板の段差や焦点合わせの誤差, レジストの膜厚等によりディフォーカス量を考慮せねばならないが, この場合にはNAを高めても解像力はむしろ低下し, 最適なNAが存在することがわかる. そして, これから生じる解像力の限界を打破するためには, まえがきにおいても述べたとおり, 露光光の短波長化が必須なことが明らかである. そこで, 光リソグラフィにおいてはg線からi線そしてエキシマレーザー光と短波長化への努力が続けられてきた.

#### 3. KrF エキシマレーザーリソグラフィ

##### 3.1 露光装置

15~20mm角の小画面にレティクル(マスク)パターンを投影レンズにより縮小結像し, ウェーハの全面に逐次露光を行っていく露光装置をステップと呼ぶ. 小画面での逐次露光ゆえ, 投影レンズの高NA化とアライメントの高精度化が可能となり, 光リソグラフィの性能を大きく進歩させた. 図2にエキシマレーザーステップの

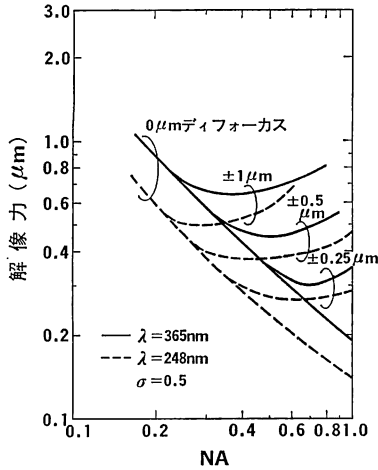


図1 ディフォーカス量を与えたときの NA と解像力、波長の関係

構成を示す。エキシマレーザー光は、整形レンズ、はえの目レンズ、コンデンサレンズを経てレティクルを照明する。X-Y ステージ上に載せたウェーハはレーザー干渉計によって高精度に位置決めされ、光学的あるいはエアマイクロセンサによりウェーハ表面を検出して焦点が合わされる。

投影レンズには狭帯域非色消し方式が採用されている。これは、波長 248 nm において十分な透過率を有し研磨の容易な硝材は現状では石英に限られることから、エキシマレーザーの波長帯域幅を数 pm 以下に狭くすることで色収差を無視できる範囲内に押さえようとする方式である<sup>2)</sup>。図3はこの様子を示す計算例である。NA 0.37 の単色光源用レンズの場合、波長帯域幅  $\Delta\lambda$  を 5 pm 以下にすれば MTF の色収差に伴う低下は極めて小さいことがわかる。

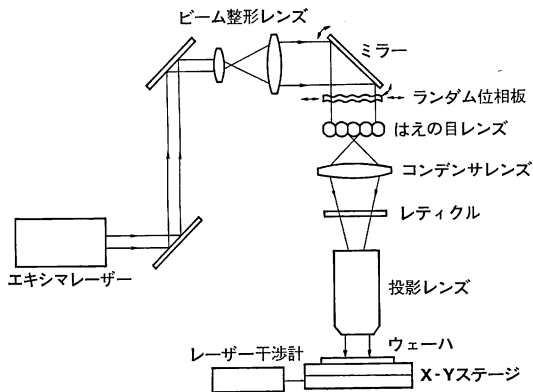


図2 エキシマレーザーステップの構成

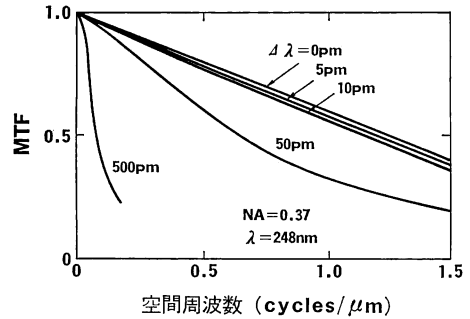


図3 非色消しレンズの MTF の波長帯域幅依存性

一方、このようにレーザー光を狭帯域化した場合にはスペックルや干渉縞が発生する。すなわち、レーザー光のコヒーレンスが高まり、図2に示した個々のはえの目レンズから発した光線は像面で干渉し、その結果、マスクパターンの光学像に重畳して干渉縞が生じる<sup>5)</sup>。そこで、露光中にミラーを振ったり、ランダム位相板を走査させることによって、個々の光線の光学的光路長を変化させることにより相殺し、干渉縞を除去する対策が採られている<sup>2)</sup>。

高解像力化と共にアライメントの高精度化も極めて重要な課題である。図4に各種のアライメント方式を示す。Off-axis 方式は、レティクルとウェーハのそれぞれにアライメントマーク検出用の光学系を持ち、位置決めした後ウェーハを距離  $L$  移動させて露光を行うものである。距離  $L$  は、アライメント光学系の光軸と投影レンズの光軸間の距離に相当し、光軸の長期安定性が誤差要因となる。準 TTL (through the lens) 方式は、ウェーハマークは投影レンズを通して観測するが、レティクルマークは別の光学系によって観測する。位置決め後は所定の位置に移動させるが、移動距離は  $L$  に比べて短いことからより高精度なアライメントが可能となる。TTL 方式は、ウェーハマークとレティクルマークを投影レンズを通して同時に観測し、両者を直接合わせるものである。機械的な誤差要因が乗り難く、最も高精度なアライメントが可能となる。

ここで、狭帯域非色消し方式においては、アライメントマークの検出に He-Ne レーザーのような露光光と大きく異なる波長の光線を用いると、色消しを施していないためウェーハのアライメントマークの結像位置がレティクル面から大きく離れてしまい、ウェーハマークとレティクルマークを同時に観測することが極めて困難となる。このため、結像位置を補正する光学系を付加したり<sup>6)</sup>、アライメント光に露光光の波長に近い遠紫外光を

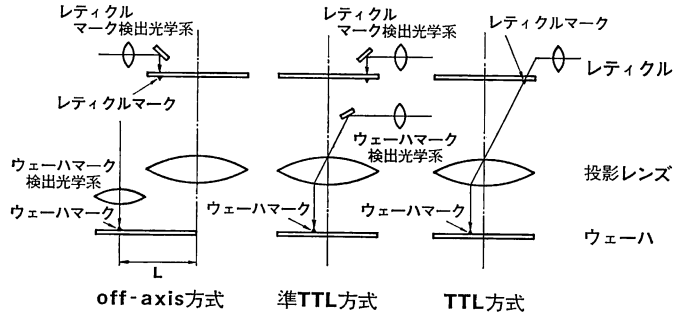


図4 アライメント方式

用いることが必要となる。

3.2 エキシマレーザー

Kr, Ar, Xe 等の希ガスは、励起状態で F, Cl 等のハロゲンと結合して分子 (エキシマ) を形成し、解離して定常状態に戻る時にエネルギーレベルに準じた光を発生する。これを共振器に導いて誘導放出させたのがエキシマレーザーである<sup>7)</sup>。

通常のエキシマレーザーで発振されるレーザー光は数百 pm の波長帯域幅を有しており、狭帯域化を施さなければならない。図5にレーザーの狭帯域化の各種方式を示す<sup>8)</sup>。共振器の中にプリズム、エタロン、回折格子等の分光器を挿入し、所望の波長の光のみを発振させることによって 3 pm 以下の FWHM (半値全幅) を実現している。また、絶対波長の変化は結像面の変動を招くことから、発振されたレーザー光を常にモニターし、分光器の角度を制御して ±0.5 pm 以下に絶対波長を維持する。この時の結像面の変動量は、NA 0.4 前後の投影レンズの場合で 0.1~0.2 μm とされており<sup>9)</sup>、実用上問題ない範囲に押さえることができる。

しかしながら、レーザー照射に伴ってエタロンのフィネス (得られるスペクトルの半値全幅とスペクトル間隔

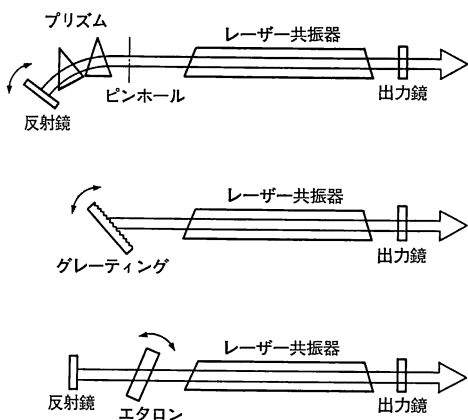


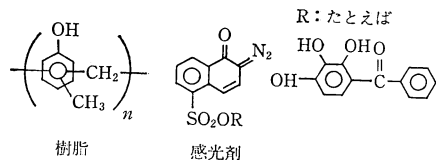
図5 エキシマレーザーの狭帯域化方式

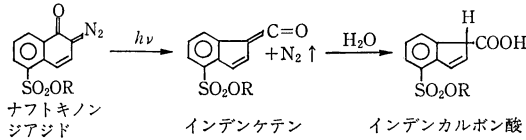
の比) に経時変化が生じ、帯域幅が広がったり、サイドバンドが生ずることがある。また、回折格子においてもレーザーの光束を広げる光学素子の劣化や回折格子の経時変化があることから、放電励起部を狭帯域共振用と増幅器用に分割し、狭帯域化素子へ入射するレーザーパワー密度を軽減し、劣化を防ぐ試みもなされている<sup>10,11)</sup>。しかしながら、これら狭帯域化素子は 10<sup>9</sup> パルス前後の発振で交換しなければならないのが現状となっている。

このほかにエキシマレーザー装置には、放電管へのレーザーガスの交換、循環、濾過、部分注入、およびレーザーガスを励起するための予備電離や放電用電極、これらに電圧を印加するための高電圧発生回路等の複雑な機構が必要となる。したがって、これらの性能を維持するために頻繁なメンテナンスとそのため運転コストの増大を招く。各要素部品のライフ延長への努力と共に、自動化するなどして保守性をよりいっそう向上させていくことが今後の課題となっている。

3.3 レジスト材料

g/i 線露光において用いられているキノンジアジド-ノボラック系ポジ型レジストをエキシマレーザーレジストとして転用することが試みられている。これは、感光剤としてナフトキノンジアジドスルホン酸エステルを、樹脂にノボラックを用いたもので、ノボラック樹脂は本来水溶性であるが、ナフトキノンジアジドが溶解阻止剤として働き、アルカリ現像液に不溶となっている。ここで、紫外線を照射するとナフトキノンジアジドはインデンケテンを経て水分と反応し、インデンカルボン酸に変化して溶解阻止機能を失い、ノボラック樹脂がアルカリ現像液に可溶となってパターンが形成される<sup>12)</sup>。





しかしながら、感光剤、ノボラック樹脂共にエキシマレーザー光に対する吸収が極めて高く、 $1\mu\text{m}$ の膜厚でレジスト下部に到達する光量は数%止まりである。このため、露光が不足状態となるレジスト底部において現象は進み難く、所望の寸法とした時にレジスト上部はオーバー現象となって、レジスト膜厚の減少やレジストプロファイル(断面形状)の劣化を招く。吸収はノボラック樹脂のほか、ナフトキノジアジドおよびベンゾフェノンのベンゼン環に由来するもので、このためエステル化率を変えたり、非ベンゾフェノン系にするなどして吸収を下げ、エキシマレーザー露光用として最適化する試みがなされている。

図6に膜厚 $0.7\mu\text{m}$ のノボラック系ポジ型レジストとNA 0.42のエキシマレーザーステップを用いて露光したレジストパターンを示す。最小寸法 $0.35\mu\text{m}$ のレジストパターンが形成されている。しかしながら、光吸収のためレジスト膜厚を $1\mu\text{m}$ 以上とすることができず、ノボラック系ポジ型レジストを単層で使える露光工程は限定される。

ノボラック系ポジ型レジストの改良にも限界があることから、最近、化学増幅型のレジストが注目を集めている。これは、図7に示すように感光剤として酸発生剤を

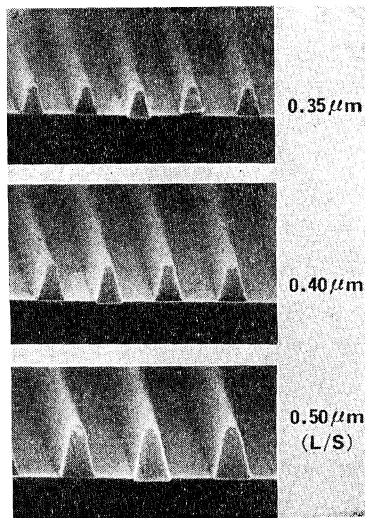


図6 ノボラック系ポジ型レジストとNA 0.42のエキシマレーザーステップを用いて露光したレジストパターン

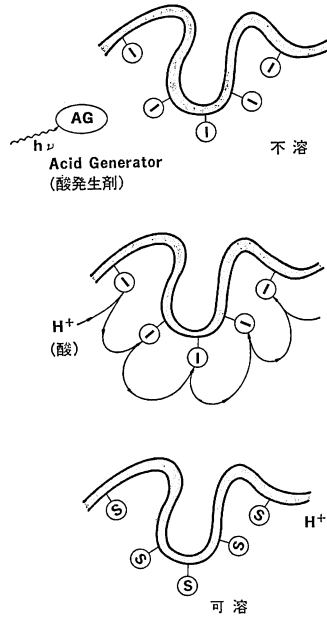
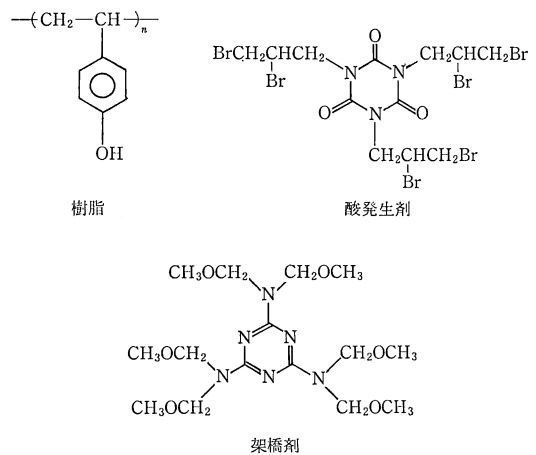


図7 ポジ型の化学増幅形レジストの作用原理

用い、その酸が触媒となって加熱により樹脂の架橋や分解を連鎖反応的に促進し、現像液に対する溶解性が変化してパターンを形成するものである。露光によって発生する酸の量がわずかでも多数回の反応を引き起こすため極めて高い感度を達成することが可能となる。したがって、光吸収を誘起する酸発生剤の添加量も少なくて済み、透過率を高める可能性も開けてくる<sup>13)</sup>。

ネガ型の化学増幅型レジストとしては、樹脂にポリビニルフェノール、酸発生剤にハロゲン化物、架橋剤にメラミン誘導体を用いた3成分系があり、現在では最も完成度が高い<sup>14)</sup>。



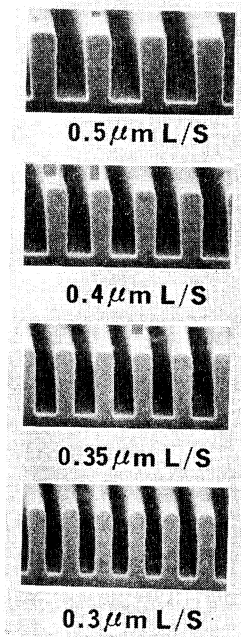


図 8 ネガ型の化学増幅形レジストと NA 0.42 のエキシマレーザーステップを用いて露光したレジストパターン

図 8 に膜厚  $1 \mu\text{m}$  におけるレジストパターンを示す。 $0.3 \mu\text{m}$  のパターンが形状よく得られており、感度も  $30 \text{ mJ/cm}^2$  前後と極めて高い。これにより、64 MDRAM レベルのデバイスには十分に対応できると考えられる。しかしながら、レジストパターン寸法のマスク寸法に対する忠実性が劣る、レジストパターン間にブリッジが生じやすい、下地の基板によってレジスト形状が変わる、環境の変化を受けやすい等、課題は残っている。

### 3.4 レジストプロセス

上述したように現状のレジスト材料には問題が多い。そこで、新たな処理を施したり、多層レジスト構造とすることによってこれらを補い、高解像力を得ようとするレジストプロセスが必要となってくる。

ノボラック系ポジ型レジストの解像力を高めるレジストプロセスの一例として、LASER (lateral and surface modification for enhancing resist contrast) がある<sup>5,15)</sup>。その工程を図 9 に示す。レジスト塗布、バークの後、テトラメチルアンモニウムハイドロキシサイド (TMAH) のアルカリ溶液に浸漬し、レジスト表層に現像液に対する不溶化層を形成する (アルカリ処理)。露光後、第 1 回目の現像を行うが、現像はパターンが抜け切るまで行わず、途中で停止する。さらに、水洗、乾燥の後、第 2 回目の現像を行い、パターンニングを完了する。

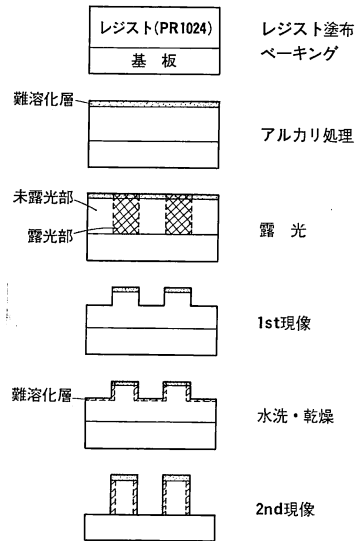


図 9 LASER プロセスの工程

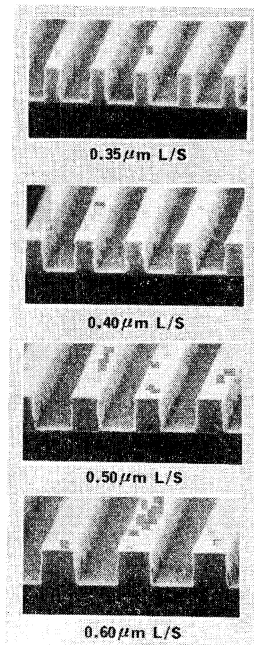


図 10 LASER によって形成したレジストパターン

LASER によって形成したレジストパターンを図 10 に示す。図 6 に示した通常工程の場合に比べてレジストプロファイルの向上が明らかである。アルカリ処理によるレジスト表層の難溶化のほか、第 1 回目の現像を停止した時点で、レジストパターンの側壁にも薄い難溶化層が形成され、この時のレジストプロファイルが第 2 回目の現像の間において保存されることから、より急峻なレジストプロファイルを得ることができるものである。こ

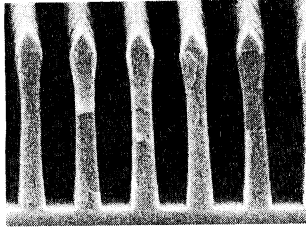


図 11 ノボラック系ポジ型レジストと3層レジストプロセスによって形成したレジストパターン ( $0.3\ \mu\text{m}$  L/S)

のような難溶化層の形成は、水洗時の水との反応によってノボラック樹脂の可溶成分が引き抜かれ、相対的に溶解阻止剤としての感光基の濃度が増大するためと推察される。

最も確実な多層レジストプロセスに3層レジストプロセスがある<sup>16)</sup>。詳細は文献を参照されたいが、図 11 にノボラック系ポジ型レジストと3層レジストプロセスによって形成したレジストパターンの例を示す。極めて高いアスペクト比で  $0.3\ \mu\text{m}$  のパターンが得られている。

#### 4. ArF エキシマレーザーリソグラフィ

1985年にシュバルツシルト型の反射光学系を用いた ArF エキシマレーザー露光技術が報告された<sup>17)</sup>。さらに、1989年に KrF エキシマレーザー露光と同様の狭帯域非色消し方式による露光が試みられ、 $0.25\ \mu\text{m}$  のパターンが形成された<sup>18)</sup>。しかしながら、いずれも露光面積は  $1\ \text{mm}$  以下と狭く、レジストは PMMA (polymethylmethacrylate) を用いた実験である。すなわち、ArF エキシマレーザー光の波長域になるとあらゆる物質の吸収が増大することから、次のような技術的課題が生ずる。

投影レンズの硝材に用いる石英の透過率は、99.9% ( $1\ \text{cm}$  厚) 以上が必要であるが、現状ではこれに満たず、レーザー照射に伴う発熱により露光中に収差が生じ、所望の解像性能が得られなくなる。また、カラーセンターの発生等レーザー照射耐性にも不安が残る。レーザー光の波長帯域幅も短波長化に伴ってより狭いものが求められると同時に KrF エキシマレーザーにおいても大きな課題となっている狭帯域化のための各要素部品の劣化がさらに深刻となる。レーザー光の大気による吸収を回避するため光路をすべて不活性ガスにて置換する必要が生ずる。十分な透過率を有し露光可能なレジスト材料は PMMA 程度であり、エッチング耐性と両立するレジストを開発することは難しいと予想される。したがって、

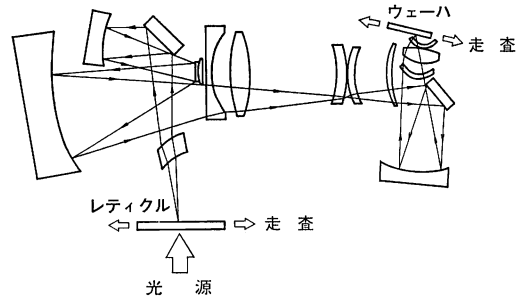


図 12 縮小反射光学系の概念図

感光はレジスト表面の薄い層に限られ、新規プロセスの開発が必須となる。

このように ArF エキシマレーザーリソグラフィには多くの課題があるが、露光装置における上述の問題点を克服するものとして、反射光学系を用いたステップアンドスキャン露光方式が最近大きな注目を集めている。これは、反射光学系では大きな露光画面を確保することが困難なことから、走査露光を行いながら広い面積を露光し、ステップアンドリピートを行っていく方式である<sup>19)</sup>。すなわち、収差の補正された良好な像領域を光軸外の一定の距離にある円弧上のみ限定し、スリット状の露光画面が得られる。そして、レティクルとウェーハを同期走査して広い面積を露光する。現在発表されている露光装置の光学系を図 12 に示す。Xe-Hg ランプからの波長  $240\sim 265\ \text{nm}$  の遠紫外線を露光光に用い屈折光学系も一部採用しているが、凸面鏡と凹面鏡を主体にした縮小反射光学系であり、光源を ArF エキシマレーザーとすれば原理的には ArF 露光が可能である。

#### 5. む す び

KrF エキシマレーザーリソグラフィ技術により、 $0.3\ \mu\text{m}$  前後のパターン形成が可能で、今後の  $0.5\ \mu\text{m}$  以下のデバイスを実現するためには最も有効な手段であることを述べた。しかしながら、一方で解決すべき課題が残っており、そのまま現在の i 線露光に取って替わることが難しいのも事実である。エキシマレーザーリソグラフィ実用化の鍵は、本文の中でも言及したとおり、エキシマレーザー装置とレジスト材料の完成にあるが、アライメント精度を始めとした露光装置回りについても解像力に見合ったよりいっそうの高精度化が今後必要である。ArF エキシマレーザー露光については、研究はまだ緒に就いたところであり、今後の進展を期待したい。本報告がこれらエキシマレーザーリソグラフィ技術の完成の一助となれば幸いである。

最後に、本稿を終えるにあたり、資料等の提供でご協力いただいた熊谷明敏、佐藤一夫、南山隆幸の各氏に厚く御礼申し上げます。

### 文 献

- 1) 川村良行, 豊田浩一, 難波 進: “エキシマレーザーによる PMMA のホトエッチング”, レーザー研究, **8** (1980) 69-71.
- 2) V. Pol, J. H. Bennewitz, G. C. Escher, M. Feldman, V. A. Firtion, T. E. Jewell, B. E. Wilcomb and J. T. Clemens: “Excimer laser-based lithography: a deep ultraviolet wafer stepper,” *Proceedings of SPIE's Santa Clara Symposium on Microlithography*, **633** (Santa Clara, 1986) pp. 6-16.
- 3) M. Nakase: “The potential of optical lithography,” *ibid.*, **537** (Santa Clara, 1985) pp. 160-167.
- 4) 例えば, E. C. Kintner: “Method for the calculation of partially coherent imagery,” *Appl. Opt.*, **17** (1978) 2747-2753.
- 5) M. Nakase, T. Sato, T. Shibata, K. Sato, S. Ito, T. Minamiyama and A. Kumagae: “Recent progress in excimer laser lithography,” *Polymers for Microelectronics—Science and Technology—* (Kodansha, Tokyo, 1990) pp. 255-267.
- 6) 東条 徹, 東木達彦, 田畑光雄, 西坂武士: “色収差補正を必要としない2重回折格子法アライメント (第1報) SMARTの光学原理と基本特性”, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1990) pp. 773-774.
- 7) 例えば, 渡部俊太郎: “エキシマレーザー”, *フィジックス*, **4** (1983) 336-343.
- 8) T. J. McKee: “Spectral-narrowing techniques for excimer laser oscillators,” *Can. J. Phys.*, **63** (1985) 214-219.
- 9) 芳野壽和, 鈴木 等: 私信
- 10) N. Furuya, T. Ono, N. Horiuchi, K. Yamanaka and T. Miyata: “High power and narrow band excimer laser with a polarization coupled resonator,” *Proceedings of SPIE's 1990 Symposium on Microlithography*, **1264** (San Jose, 1990) pp. 520-531.
- 11) 榎波龍雄, 西田直人, 川村智子, 柿崎克行: “高出力狭帯域 KrF レーザ”, レーザ学会学術講演会第 11 回年次大会予稿集 (1991) p. 89.
- 12) 例えば, 山岡亜夫, 永松元太郎: *フォトポリマー・テクノロジー* (日刊工業新聞社, 東京, 1988) pp. 51-55.
- 13) 上野 巧: “deep UV リソグラフィ用化学増幅系レジスト材料”, *Semicon NEWS*, **12** (1989) 24-28.
- 14) J. W. Thackeray, G. W. Orsula, D. Canistro and A. K. Berry: “Evaluation of deep UV ANR photoresists for 248.4 nm excimer laser photolithography,” *J. Photopolym. Sci. Technol.*, **2** (1989) 429-443.
- 15) T. Minamiyama, A. Kumagae, K. Sato, S. Ito and M. Nakase: “KrF excimer laser process LASER,” *Digest of Papers 3rd MicroProcess Conf. (Makuhari, 1990)* pp. 14-15.
- 16) J. M. Moran and D. Maydan: “High resolution steep profile resist patterns,” *J. Vac. Sci. Technol.*, **16** (1979) 1620-1624.
- 17) D. J. Ehrlich, J. V. Tsao and C. O. Bozler: “Submicrometer patterning by projected excimer-laser-beam induced chemistry,” *J. Vac. Sci. Technol.*, **B3** (1985) 1-8.
- 18) H. Nakagawa, M. Sasago, Y. Tani, M. Endo and N. Nomura: “ArF excimer laser projection lithography,” *Digest 1989 Symp. VLSI Technology (Kyoto, 1989)* pp. 9-10.
- 19) J. D. Buckley and C. Karatzas: “Step and scan: A systems overview of a new lithography tool,” *Proceedings of SPIE's Santa Clara Symposium on Microlithography*, **1088** (Santa Clara, 1989) pp. 424-433.