ステッパー用高安定出力狭帯域エキシマレーザー

溝口 計, 榎波 龍雄, 西坂 敏博, 田中 宏和, 若林 理

(株)小松製作所 研究本部中央研究所レーザ研究部 (〒254-8567 神奈川県平塚市万田1200)

Highly Energy-Stabilized and Narrow Band Excimer Laser for Steppers

Hakaru MIZOGUCHI, Tatsuo ENAMI, Toshihiro NISHISAKA

Hirokazu TANAKA, and Osamu WAKABAYASHI

Laser Research Department, Research Center, Research Division, Komatsu Ltd.

1200 Manda, Hiratsuka, Kanagawa 254-8567

(Received April 30, 1999)

The latest technologies of highly energy-stabilized and narrow band excimer lasers for lithography are introduced. New RF preionization scheme, solid state pulsed power technology realize high stability of pulse energy. The wavelength is stabilized by high precision measurement technology of deep-UV light. Other spectral properties are stabilized by improvement of optical components and stabilization of optical system. The performance and durability extension test which aimed reduction of CoO (Cost of Operation) of KrF excimer laser KLES-G10K up to 7 billion pulses are reported. Further performance of next generation KrF excimer laser; KLES-G20K is introduced. Furthermore, durability test data of latest ArF excimer laser for less than 0.15 μm lithography; KLES-G10A is reported. It proved experimentally the ability of ArF excimer lasers for semiconductor mass production. Also recent trend of F_2 laser is reported. Future direction and issues of light source development in DUV-VUV are also discussed.

Key Words: Semiconductor, Deep-UV microlithography, Stepper, Excimer laser, F_2 laser

1. はじめに

マイクロリソグラフィ技術は水銀ランプのg線, i線の時代を経てKrFエキシマレーザーを使ったエキシマレーザーリソグラフィの時代に突入した。現在64MbitDRAM以降の0.3 μm より微細なデザインルールを必要とする半導体量産工場へKrFエキシマレーザーステッパーが大量に導入され, 世界の累積台数で千台を超える規模での稼働が現実のものとなりつつある。また, 次世代リソグラフィ技術の最有力候補として, ArFエキシマリソグラフィのプロセス技術開発が半導体メーカー, 装置メーカーの努力により進められ, その成果が結実しつつある¹⁾。さらに最近, 0.1 μm 以下の領域についての新しい動きとして, F_2 レーザーを使った光リソグラフィの可能性について議論が活発になされている。本稿では, リソグラフィ用光源として期待されている狭帯域エキシマレーザーの技術動向を紹介する。

2. 半導体露光装置(ステッパー)

2.1 微細化と短波長化のトレンド

投影光学系の解像力 R と焦点深度 D は以下の式,

$$R = k_1 \times \lambda / NA \quad D = k_2 \times \lambda / NA^2$$

λ : 光源波長, NA : 開口数, k_1, k_2 : プロセスファクタで表される。解像力を向上させるために光源の短波長化, 高 NA 化そして k_1, k_2 を小さくする努力がなされてきた。一方で高 NA 化は2乗で焦点深度の悪化を招くため, 投影光学系の高 NA 化だけでは解像性能の向上には限界がある。従って, 短波長化するなか高圧水銀ランプのg線(436nm), i線(365nm)そしてKrFエキシマレーザー(248nm), ArFエキシマレーザー(193nm)さらには F_2 レーザー(157nm), EUV(13.6nm)への光源の変更とプロセスの改善が並行して進められてきた(Fig.1)。DUV波長領域ではスペクトル幅全域での色消し設計が困難であり結像の色収差の問題は避けて通ることはできない。投影光学系はレンズ系とミラーとレンズを組み合わせたカタディオプトリック系に大別される。現在KrFエキシマリソグラフィでは1 μm 以下に狭帯域化されたKrFエキシマレーザーと単色投影レンズを組み合わせた方式が主流となり, 一括露光方式のエキシマステッパーや露光領域寸法を大型化できるレンズスキャン方式のステッパーも商品化され本格的実用期を迎えている²⁻⁴⁾。

一方でArFステッパーは露光領域寸法が大きく, 重ね合

Fig.1 Road map of light source for microlithography.

わせ露光が可能で、実際のデバイスの試作が可能な本格的露光装置の開発が各露光装置メーカーで進められている。色収差の問題を解決するためにレーザーを0.5~1pm程度のスペクトル幅に弱い狭帯域化をし結像光学系にも色消しを考慮する方式、レーザーを0.1~0.3pmに狭帯域化し色消しを考慮しない単色結像光学系と組み合わせる方式、屈折系と反射光学系を組み合わせ、レーザーのスペクトル幅も数pm~数十pm程度で結像するカタディオプトリック系などが試作されてきた。現時点では弱い狭帯域レーザーと色消しレンズを組み合わせた方式が主流になりつつある⁵⁻⁷⁾。

一方で、カタディオプトリック系は米国SVGリソグラフィ社で商品化され、KrF, ArFエキシマを用いた露光装置も既に発表されている⁸⁾。最近では、F₂レーザー(157nm)リソグラフィの可能性に注目が集まり、活発な研究が米国を中心に進められている。カタディオプトリック系による投影光学系と2本ある発振線を単一化したF₂レーザーを組み合わせる方式でそのまま利用できるため、カタディオプトリック光学系が最有力候補と見られている。すでにカタディオプトリック系で実績を有するSVGL社では本格的なF₂レーザー露光装置の開発が開始されている⁹⁾。

2.2 走査方式の露光量安定性

256MDRAM以降の大容量デバイスではチップサイズが15×25mm²以上になると予想されている。一括露光方式ではチップ全体のパターンを有効露光円に内接する矩形の領域内で露光するため、最大露光領域はレンズの大きさで制限されていた。最新のレンズスキャン方式では、ほぼ有効露光円の直径の幅を有するスリット上の領域を走査するため、スリット方向では約1.4倍に拡大され、走査方向では原理的な制限は無くなる。従って投影レンズを大口

径化せずに露光領域を大幅に拡大できる。ニコンによって1996年にレンズスキャン型KrFステッパーが世界で初めて製品化され¹⁰⁾、現在はステッパーメーカー各社でも製品化されている²⁻⁴⁾。すでに一部の半導体工場では量産ラインへの導入も本格的に進められている。

今後の主流と考えられる走査方式はレンズ系の場合でもミラー系の場合でも、矩形または円弧状の露光スリットが動的に走査される。一括露光方式では露光機側で積算露光量を測定しフィードバック制御することができたが、走査露光方式の場合には露光面全面でのフィードバック制御は事実上困難で、光源の出力エネルギー不安定性は直接的に露光むらの原因となる。つまり走査方式の場合の光源に対するエネルギー安定性への要求は一層厳しくなる。また露光エリアの実質的な拡大に伴い露光機のスループットを向上させるために、レーザーの高平均出力化も重要となる。特に露光量精度を落とさないために、高繰り返し運転による高出力化が重要となる。

3. エキシマレーザー技術の最新動向

現在主流の屈折レンズ投影光学系に狭帯域エキシマレーザーを組み合わせる場合には以下の光パラメータの安定化が重要になり、それぞれのパラメータは露光におけるTable 1のパラメータに影響を及ぼす。半導体工場での安定な露光光源として、これらの安定性を短期・長期にわたって安定に維持することがリソグラフィエキシマレーザーにとって必要な条件となる。

さらにエキシマレーザーの構成をFig.2に示す。エキシマレーザーは、レーザーの発振に必要な放電を生成させるチャンバー、高速パルスを発生させ放電を生成するパルスパワーモジュール、そしてレーザーを共振させ、かつ狭帯域化するための狭帯域モジュールと発振した光をモニタするモニタモジュールから構成されている。エキシマレーザーを構成するこれらのモジュールの技術的ポイントについて述べる。

3.1 レーザーチャンバー

レーザー励起のためのグロー状放電を生成するために、従来は電極両側に数十本のスパークピン電極を並べ、そこに主放電の開始前にアーク放電を生成してアーク放電から発生する強力な紫外光によって放電空間にあるガスを光電離して初期電子を散布していた(スパーク予備電離)。この初期電子の存在によりフッ素ガスを含む高気圧負性ガス中での放電を均一化させ、励起に有効なグロー放電が生成される。従来のスパーク予備電離では集中したアー

Table 1 Influence of laser performance on exposure parameters.

	Optical parameter	Exposure	Issue of laser
1	Wavelength	Focus position	Optics, accuracy of sensor
2	Spectral bandwidth	Chromatic aberration	Optics, accuracy of sensor
3	Energy stability	Dose uniformity	Discharge stability
4	Repetition rate	Throughput	Pulsed power module, discharge
5	Long-term stability	CoO, uptime	Discharge, mechanical parts optics, pulsed power module

Fig.2 Schematic diagram of excimer laser for stepper.

ク放電を用いているため、主放電空間の初期電子にはムラが生じ放電自身の安定性も低く、特に周波数を上げた場合には不安定性が顕著となり高繰り返し化の障害になっていた。一方で誘電体を介した高周波放電では、誘電体が分布定数回路的な放電の安定化インピーダンスとして機能するため、均一かつ拡散した予備電離光源としては理想的な均一な初期電子が発生できる(RF予備電離)。Fig.3にその構造を模式的に示す。またスパーク予備電離では予備電離用ピン電極からの金属のスパッタリングが大きく、レーザーチャンバー内部のダスト発生源となりチャンバー寿命を制約していた。RF放電では非常に拡散した放電のため、スパッタリングは非常に小さくダストの発生も小さい。RF予備電離採用の結果、レーザーチャンバーの寿命も従来の2倍以上に延ばすことに成功した¹¹⁾。さらにArFエキシマレーザの出力安定性はKrFエキシマレーザに比較して非常に低く、露光量制御の障害になっていた。1997年より九州大学と予備電離メカニズムの基礎的研究を進める中で、エキシマレーザガス中に微量のXeガスを添加することで予備電離電子量が大きく改善できることが明らかとなった²⁸⁾。このXe添加をArFエキシマレーザに応用すると効果が顕著でレーザー出力の安定性が約2倍程度改善され²⁷⁾、ArF実用化のブレイクスルーとなった。

3.2 固体スイッチ化パルスパワーモジュール

エキシマレーザの励起には高速かつ高電圧の放電が必要のため高速(数百ns)、大電流(数kA)、高電圧(数十kV)で低インピーダンス(数十nH)で動作可能なスイッチング

Spark pre-ionizer

RF pre-ionizer

Fig.3 Comparison of pre-ionization scheme.

素子であるサイラトロンが使用されてきた。サイラトロンは水素ガスを使用した放電スイッチであるため電極摩耗により寿命が制限される(数億パルス)、また初期故障が多く性能の個体差が大きい、宇宙線等の雑音による制御不能な誤動作が一定の確率で発生する、などの問題点があった。コマツと(株)明電舎は1995年に国産製品として初めてGTOと過飽和リアクトルを組み合わせた全固体パルス電源をリソグラフィ用エキシマレーザに搭載した。これにより現在ではスイッチング自体が安定化されkHzを超える高繰り返し動作時にもスイッチの誤動作の問題は解消された¹²⁾。現在ではさらに改良が進み2kHzでの安定動作が可能となっている。放電を用いないスイッチング素子であるため摩耗故障がなく、素子毎のばらつきも少なく寿命は百億パルスオーダーへと2桁以上も飛躍的に向上した。また放電スイッチ固有のスイッチングの不安定性も改善され、エネルギー安定性も2倍以上に改善された。

3.3 狭帯域化光学系

リソグラフィ用エキシマレーザ開発の黎明期の1980年代には、狭帯域方式に関して様々な方式が提案されてきた¹³⁻¹⁵⁾。実用化にはスペクトルの安定性、光学素子の耐久性の問題から、光学素子の光負荷を抑えて耐久性を伸ばす必要があるため、各社から回折格子とプリズムを組み合わせた方式¹³⁾、それにエタロンを併用した方式¹⁶⁾、偏光を利用して特殊な共振器を構成する方式¹⁷⁾等が提案されてきた(Fig.4)。最近のステッパレンズの解像力を上げるための高NA化の動きによってスペクトル幅を一層狭める必要が高まっている。狭帯域性能は共振器内の波長選択素子の構成および共振器内でのラウンドトリップ回数によって決定され、慶應義塾大学の杉井らの励起回路改良による狭帯域化の提案¹⁴⁾が実用機でも検討されている¹⁸⁾。

3.4 波長計測

また狭帯域化されたスペクトルの幅、中心波長の測定を行う検出器にエタロンを搭載してスペクトルの幅、中心波

(a) Narrowing scheme with prism, etalon, and grating.

(b) Narrowing scheme with prism and grating.

Fig.4 Comparison of line-narrowing scheme.

長の計測を行い実時間でフィードバック制御を行っている。また絶対基準光源を内蔵することで、刻々と変化する波長検出素子のドリフトを実時間で較正している⁴⁾。こうして高精度の検出器較正を行いながらフィードバック制御を行うことで絶対波長の安定性を補償し、高い安定性を実現している。KrFエキシマレーザーの場合には、輝度の高い水銀の単一同位体の特性スペクトル253.7nmを使用している。この低圧ランプは数pmの単一スペクトルを有するため、絶対基準光源として理想的な特性を有している¹⁹⁾。この絶対基準光源をレーザー内部の波長計測モジュールに組み込み、定期的に、波長計測装置の較正を行い測定器の温度、圧力によるドリフトを補償している²⁰⁾。この計測システムにより $\pm 0.1\text{pm}$ の高精度で波長の安定化が可能となっている。さらに、ArFエキシマレーザーでは適当な絶対基準光源が無いため、筆者らは前述の水銀ランプの輝線を193nmの相対的な基準として使用することができることを提案し、KrFエキシマレーザーと同等レベルの $\pm 0.1\text{pm}$ の高精度で波長の安定化が可能となった²¹⁾。

3.5 スペクトル幅の計測用光源の開発

レーザー光のスペクトル幅はステッパの結像性能に直接影響を及ぼす重要なパラメータであるが、深紫外～真空紫外領域で分光器のスペクトル幅の計測は、従来確立されていなかった。KrFエキシマレーザー(248nm)の場合にはアルゴンイオンレーザー(496nm)を狭帯域化して非線型光学結晶を使い2倍波を使えばスペクトル幅0.01pm以下の248nm近傍の基準光として利用できる。一方ArFエキシマレーザーでは、193nm近傍には適当な光源が存在しないため、筆者らは東京大学物性研究所の御指導を受けて193nm近傍のコヒーレント光源の開発に成功した。光源には可視域の広い帯域で発振特性を有するチタンサファイヤレーザーを狭帯域化して3倍波を生成させ、193nm近傍でコヒーレントかつスペクトル幅0.01pm以下での光の安定発振に成功した²²⁾。この光源を用いてエタロン分光器の装置関数を計測した193nm分光器の実装置関数と被計測ArFエキシマ光のスペクトルデータの例をFig.5に示す。装置関数の実計測値を使った逆変換によってスペクトルの測定が高精度で実現できるようになり、ArFレーザーのスペクトル幅の評価が正確できるようになった。この光源は分光器の実装置関数の計測のみならずコヒーレンス性を利用し

Fig.5 Real instrumental function of 193 nm spectrometer and spectral profile of line-narrowed ArF laser.

て、干渉計測用の光源としても広い応用が期待できる。

4. リソグラフィ用エキシマレーザー装置

4.1 KrFエキシマレーザー

KrFエキシマレーザー¹¹⁾；コマツKLES-G10Kの性能諸元および耐久性能をTable 2に示す。また装置外観をFig.6に示す。筆者らは工場での露光工程を模擬した運転モードでの無人連続試験を約1年間、運転パルス数で70億パルスまで実施した。データからは70億パルスまでの運転で、スペクトル幅の変化は微小であった。現実のレーザーの運転コストを律速する重要な要素は装置のメンテナンスコストであり、その割合はチャンバ、狭帯域モジュール、モニターモジュール、パルスパワーモジュールの順に大きく、ガスコストの割合は非常に小さい。したがって運転コストを低減するには、これらモジュールの寿命を延長することが効果的である。現在、開発中のKrF(2000Hz, 20W)エキシマレーザーの高繰り返し時の性能データをFig.7に示す。2000Hz運転時にエネルギー安定性4%(3 σ)以下の安定した発振性能を実現している²³⁾。2000Hzレーザーを使った高スループットリソグラフィにおいては、年間運転パルス

Fig.6 Outlook of KLES-G10K.

Table 2 Specification of KrF excimer laser KLES-G10K (1000 Hz, 10 W).

Features	KLES-G10K
Wavelength	248 nm
Repetition rate	1000 Hz
Pulse energy	10 mJ
Average output power	10 W
Spectral bandwidth (FWHM)	< 0.6 pm
Integrated energy stability (40 pulse)	< $\pm 0.5\%$
Expected laser chamber life	> 5 billion pulses
Expected line narrowing module life	> 5 billion pulses
Expected pulsed power life	> 10 billion pulses
Gas life	100 million pulses/7 days

Fig.7 Output performance of KLES-G20K (2000 Hz, 20 W).

数が増大するため運転コストに対する要求も一層厳しくなるため一層の技術的ブレークスルーが必要となる。

4.2 ArFエキシマレーザー

0.15 μm 以下の微細なデザインルールを必要とする1GbitDRAM以降のリソグラフィ技術として、ArFエキシマレーザー、電子線、X線を使ったリソグラフィ技術が検討されてきたが、1996年度～1997年度に行われた通産省R&Dプロジェクト技術研究組合超先端電子技術開発機構ASETによるArFエキシマレーザーリソグラフィ技術の開発プロジェクトの成功により、その量産技術としての可能性の高さが実験室レベルで証明された。

コマツは1986年にスタートした通産省超先端加工技術大型プロジェクトに参画し、発振器と増幅器の2台のエキシマレーザーを用いた注入同期型ArFエキシマレーザーシステムを用いてスペクトル幅1pmで200Hz、200Wの世界新記録を1993年に樹立した²⁴⁾。さらに1996年にはこの発振器技術と当時開発されていたリソグラフィ用KrFエキシマレーザーKLES-G6を組み合わせ、10pmで400Hz、1WのKLES-G1Aの試作に成功した²⁵⁾。さらに現在、最新型1000Hz、10WのKrFエキシマレーザーKLES-G10Kを基盤としたArFレーザーKLES-G10Aを開発した。KLES-G10Aの性能をTable 3に示す。波長計測系には先に述べた絶対基準光源を搭載しているため長期間の安定したスペクトル性能を実現している。またスペクトル半値幅0.6pm、95%のエネルギーが分布しているスペクトル幅で3pm以下が実現され実用的露光に十分な性能をすでに実現している。電源には半導体スイッチング素子を搭載した最新の全固体バ

Table 3 Specification of ArF excimer laser KLES-G10A (1000 Hz, 5 W).

Features	KLES-G10A
Wavelength	193 nm
Repetition rate	1000 Hz
Pulse energy	5 mJ
Average output power	5 W
Spectral bandwidth (FWHM)	< 0.6 pm
Integrated energy stability (80 pulse)	< ± 0.5 %
Expected laser chamber life	> 2 billion pulses
Expected line narrowing module life	> 2 billion pulses
Expected pulsed power life	> 10 billion pulses
Gas life	30 million pulses/2 days

Fig.8 Long-term stability of ArF excimer laser (up to 2 billion pulses).

ルス電源およびRF予備電離方式を採用し放電の安定性の向上により電極の消耗とそれによる放電の不安定化の問題が解決され、チャンバーの寿命が大幅に延長できた。また光学部品材料の改良および蛍光測定による評価技術の向上により光学部品の寿命も大幅に改善された²⁶⁾。Fig.8にはKLES-G10Aの耐久性試験の結果を示す。耐久試験では量産工場での過酷な使用条件を模擬した運転条件で、工場での約半年の稼動に相当する20億パルスの耐久試験を行った²⁷⁾。耐久試験中のデータは無人で自動的に収集し、試験中ガス交換以外は部品交換、調整作業無しで稼動させた。これは現在までのところ世界最長の記録である。

4.3 F₂レーザー

F₂レーザーはハロゲン分子レーザーに分類され、発振スペクトル幅もエキシマレーザーが数100pmと広がったのに比べると数pmと細いという特徴を持っている²⁹⁾。光源自体の開発については、1990年代前半に国内では慶應義塾大学³⁰⁾、東芝³¹⁾、電総研³²⁾等でレーザー発振器の研究が行われ、実験室レベルの装置の試作が行われていた。世界を見てもレーザー発振については、初期の学術研究の時期が過ぎ現在ではレーザー自体の研究活動は低調である。さらに技術的困難と特徴を生かせる応用分野が未開拓であるため、理化学用の使用を除けば工業的には皆無に近い状態である。ところが近年、米国ではリソグラフィへの応用が真剣に議論され、MIT Lincoln Lab.では、154nmという短波長に着目してリソグラフィ用への応用を指向した研究をすすめる³³⁾。ドイツLambda Physik社は、500Hz 10WのF₂レーザーをリソグラフィ用光源として1998年より発売している。現在はこのLambda Physik社とアメリカのCymer社から1000Hz F₂レーザーの初期的な研究成果が発表されている^{34,35)}。現在、筆者らはリソグラフィに適した、低パルスエネルギーで、kHz級の高繰り返しでの実用光源を目指したF₂レーザーの研究・開発を進めている。現在、固体スイッチを使った装置ですでに800Hzの繰り返し周波数で10Wの出力を得ることに成功した³⁶⁾。著者らも2000年初めまでには1000Hzでの安定発振を目指した装置の開発を進めている。

5. おわりに

ArFエキシマレーザーリソグラフィは原理実証の段階を

終え、安定性、生産性、経済性などの実用性を検証して行く段階にはいつている。レーザー光源、露光装置に関しては基本的な技術的問題点はこの数年の進歩によりほぼ解消されてきたと言えよう。しかしながらArFエキシマレーザーが安定性、耐久性、経済性などの課題を解決して本格的に普及するレベルに到達するまでには、なお数年の時間が必要である。今後、国内では民間コンソーシアム(株)半導体テクノロジーズSELETEが中心となって普及に向けての技術開発を進展させて行くと予想される。

また一方で1998年には米国SIA(the Semiconductor Industry Association)のロードマップが前倒しになり、微細化の動きが今まで以上に早まる見通しとなった。前倒し要求に時期的に間に合う可能性が高いと考えられるF₂レーザーリソグラフィが最近注目されている。米国、ヨーロッパではArF、F₂レーザーを中心とする短波長レーザー開発およびその基盤技術開発に米国の民間コンソーシアムSEMATECH、およびECが中心となり組織的・戦略的な取り組みが始められている。1999年2月にはSEMATECH主催でPhoenix(アメリカ)において157nmワークショップが開催され、それらの欧・米のプロジェクトの概要が報告された。欧米でこのような動きに対応して日本国内でもロードマップとそれに伴うプロジェクトを作る動きが活発化しており、1999年7月には日本で157nmワークショップも開催される予定である。このプロジェクトが成功する可否かは、日本の半導体産業の将来を運命付ける一つの試金石となるに違いない。

参考文献

- 1) 小川 徹：光アライアンス **9** (1998) No. 1, p.27.
- 2) (株)ニコン、インターネットホームページ
(URL: <http://www.nikon.co.jp>) (1999).
- 3) (株)キャノン、インターネットホームページ
(URL: <http://www.cannon.co.jp>) (1999).
- 4) ASML社、インターネットホームページ
(URL: <http://www.ASML.com>) (1999).
- 5) S. Mori: Abstract Digest of Optical Microlithography XII **3679** (1999) p.407.
- 6) A. Suzuki and N. Sano: 4th Int. Symp. on 193nm Lithography Digest of Abstract (1998).
- 7) J. Mulken, J. Stoeldraijer, G. Davies, M. Dierichs, B. Heskamp, M. Moers, R. George, O. Roempp, H. Glatzel, C. Wagner, I. Pollers, and P. Jaenen: Abstract Digest of Optical Microlithography XII **3679** (1999) p.406.
- 8) D. R. Cote, K. W. Andresen, D. J. Cronin, H. Harrold, J. Kane, J. Lyons, L. Markoya, C. Mason, D. C. McCafferty, M. E. McCarthy, G. O'Connor, H. Sewell, and D. Williamson: *Proc. SPIE* **3051** (1997) p.806.
- 9) Jim McClay: 157nm Lithography Workshop Presentations (Phoenix, Feb. 15-17, 1999) p.329.
- 10) 鈴木 一明：電子材料 **34** (1995) No. 3, p.107.
- 11) T. Enami, O. Wakabayashi, T. Nishisaka, N. Suzuki, T. Nire, H. Mizoguchi, H. Nakarai, H. Tanaka, T. Ariga, K. Shio, T. Okamoto, R. Noudomi, H. Tomaru, and K. Nakao: *Proc. SPIE* **3334** (1998) p.1031.
- 12) 榎波 龍雄, 西坂 敏博, 溝口 計, 谷 政幸, 渋谷 忠士, 山田 真一：明電時報 **248** (1996) No. 3, p.16.
- 13) T. J. McKee: *Can. J. Phys.* **63** (1985) 214.
- 14) 杉井 正克：レーザー研究 **16** (1988) 177.
- 15) 板倉 康夫, 納富 良一, 柿本 政雄：レーザー研究 **20** (1992) 75.
- 16) O. Wakabayashi, M. Kowaka, and Y. Kobayashi: *Proc. SPIE* **1463** (1991) p.617.
- 17) N. Furuya, T. Ono, T. Horiuchi, K. Yamanaka, and T. Miyata: *Proc. SPIE* **1264** (1990) p.520.
- 18) A. I. Ershov, T. Hofmann, W. N. Partlo, I. V. Fomenkov, G. Everage, P. P. Das, and D. Mayers: *Proc. SPIE* **3334** (1998) p.1021.
- 19) 若林 理, 小若 雅彦, 小林 諭樹夫, 高橋 知和, 溝口 計：第52回応用物理学会学術講演会 11p-L-4 (1991).
- 20) 特許公報：特開平2-034503.
- 21) 久保 博一, 田中 宏和, 太田 毅, 鈴木 徹, 寺嶋 克知, 須中文香, 住谷 明, 榎波 龍雄, 若林 理, 溝口 計：第46回応用物理学会関係連合講演会 28p-YB-2 (1999).
- 22) 田中 宏和, 岩田 泰明, 若林 理, 溝口 計, 林部 和弥, 鍋川 康夫, 渡部 俊太郎：第46回応用物理学会関係連合講演会 28p-YB-3 (1999).
- 23) T. Enami, M. Nakano, T. Watanabe, A. Ohbu, T. Hori, T. Itoh, T. Nishisaka, H. Mizoguchi, H. Nakarai, T. Matsunaga, H. Tomaru, and K. Nakao: Abstract Digest of Optical Microlithography XII **3679** (1999) p.470.
- 24) H. Komori, H. Ochi, T. Nishisaka, R. Nodomi, Y. Itakura, K. Sajiki, and S. Murai: *Trans. Mat. Res. Soc. Jpn.* **17** (1994) 193.
- 25) H. Komori, H. Ochi, O. Wakabayashi, and H. Mizoguchi: *Proc. SPIE* **2440** (1995) p.106.
- 26) T. Enami, T. Ohta, H. Tanaka, H. Kubo, T. Suzuki, F. Sunaka, K. Terashima, A. Sumitani, Y. Kawasa, O. Wakabayashi, and H. Mizoguchi: Annual Symposium on Optical Materials and High Power Lasers (Boulder, 1998) *Proc. SPIE* **3578** (1995) p.31.
- 27) O. Wakabayashi, T. Enami, T. Ohta, H. Tanaka, H. Kubo, T. Suzuki, K. Terashima, A. Sumitani, and H. Mizoguchi: Abstract Digest of Optical Microlithography XII **3679** (1999) p.468.
- 28) 片岡 直紀, 藪 隆之, 内野 喜一郎, 村岡 克紀, 岡田 龍雄, 前田 三男, 須中 栄治, 榎波 龍雄, 溝口 計：第46回応用物理学会関係連合講演会 30a-E-3 (1999).
- 29) 前田 三男：「エキシマレーザー」学会出版センター (1993).
- 30) 神成 文彦：レーザー研究 **19** (1991) 986.
- 31) 内田 裕, 佐藤 三郎：放電研究 **137** (1992) 61.
- 32) 山田 和勝, 内田 裕, 柴田 肇：電子技術総合研究所彙報 51巻 (1994) No. 11, 12, p.1099.
- 33) V. Liberman, M. Rothschild, J. H. C. Sldlacek, and R. S. Uttaro: Annual symposium on optical materials and high power lasers (Boulder, 1998) *Proc. SPIE* **3578** (1995) p.2.
- 34) U. Stamm: 157nm Lithography Workshop Presentations (Phoenix, Feb. 15-17, 1999) p.227.
- 35) T. Hofmann, J.-M. Hueber, P. Das, and S. Scholler: *Proc. SPIE* **3679** (1999) p.409.
- 36) S. Nagai, T. Enami, T. Nishisaka, O. Wakabayashi, and H. Mizoguchi: 157nm Lithography Workshop Presentations (Phoenix, Feb. 15-17, 1999) p.247.

レーザーワード

狭帯域エキシマレーザー (narrow band excimer laser)

半導体集積回路のパターン形成に利用されている光リソグラフィは、256MbitDRAM等の0.3μm以下のパターン寸法領域ではKrF、ArF狭帯域化されたエキシマレーザーを光源としたステッパー(逐次移動型縮小投影露光装置)が使用されている。エキシマレーザー自身はbound-free遷移による発振のためには数100pmのバンド幅を有するが、300nm以下の波長域では光学材料の制約から、高NA、大画角で全

スペクトル域に渡る色消しをされた縮小投影露光装置のレンズの設計は困難である。従って現在は、レーザー共振器内部に波長分散素子を挿入し1pm以下に狭帯域化したレーザー(narrow band excimer laser)と単色レンズ(または部分色消しレンズ)を組み合わせることで、0.3μm以下のパターン形成用ステッパーが実用化されている。(溝口 計)