

解説

エキシマレーザーステッパー

牛田 一雄

(株)ニコン第二光学部第二光学課 〒140 東京都品川区西大井 1-6-3

(1994年6月27日受理)

Excimer Laser Stepper

Kazuo USHIDA

Industrial Optics Dept., Nikon Corporation, 1-6-3, Nishi-Ohi, Shinagawa-ku, Tokyo 140

1. はじめに

次世代の VLSI 生産を担う製造装置の有力候補として、エキシマレーザーステッパー、X線、EB 等が考えられている。中でもエキシマレーザーステッパーは現在主力露光機として VLSI 量産現場で活躍している g 線および i 線ステッパーとの共通点が多いため、スムーズな世代交代が期待できることもあり、最も有力視されている。本稿では、半導体の微細化のトレンドにどこまでエキシマレーザーステッパーが追従できるのかについての予測を、位相シフト、斜光照明等の高解像結像技術の成果をふまえた上で述べてみたい。

2. 光源としてのエキシマレーザー

光源としてのエキシマレーザーに求められる性能は露光光学系の色消しの度合により決定される。KrF エキシマレーザーステッパーにおいては、光源の狭帯域化により色収差の影響を除去する方法と、カタディオプトリック光学系(反射屈折)を採用することで色収差を補正する方法との両者が現実解として存在する。光源の狭帯域化は、投影光学系の高 NA 化(≥ 0.6)を考えると最終的に 1.5 pm 以下を達成する必要がある。通常の KrF エキシマレーザーは波長幅が半値幅で 0.4 nm ある。狭帯域化をする場合は共振器中にプリズム、回折格子、エタロン等の分散素子とアパーチャー、スリットなどの光束の拡散を制限する素子などを挿入する。図 1 にその典型例を示す。

もともとエキシマレーザーは利得が非常に高く無数の種火が増幅され放射されるので非常に多く(3000~

10000) のモード数を持ち不要な干渉縞や不規則なスペckルパターンはほとんど生じない。単純に考えてもスペckル等のコントラストは $1/\sqrt{\text{モード数}}=1\sim 2\%$ であり、加えて半値全幅 0.4 nm であるからコヒーレンス長は $\lambda^2/\Delta\lambda=154 \mu\text{m}$ と非常に短く、この値以上に光路差の付いた光は干渉しないのでさらにコントラストは低くなる。したがって通常のエキシマレーザーを用いた場合は格別なことをしなくてもスペckル等不要な干渉縞は無視できる。しかし上述のように波長幅を狭くすることによってモード数が数百に減少する。

図 2 にレーザーの狭帯域化にともなう空間的コヒーレンスが上昇する様子を示す¹⁾。さらに狭帯域化することによりレーザー光のコヒーレンス長が 100 倍以上長くなる。モード数の減少による空間的コヒーレンスの上昇と狭帯域化による時間的コヒーレンス(コヒーレンス長)の上昇によりスペckル等の不要な干渉縞が発生する。したがってこれらの干渉縞を低減することが必要になってくる。

図 3 にエキシマレーザーステッパーの照明系の一例の概略を示す。レチクル上で均一な照度分布を得るためにフライアイレンズを用いている。その結果図 4 に示すように各フライアイレンズ素子の同一な場所を通過した光線がレチクル上の 1 点に集まり、レーザーの空間的コヒーレンスが高い場合には互いに干渉する。この干渉縞を消すために図中の振動ミラーを振動させる²⁾。

エキシマレーザーはパルス発振をしているので等価的に図 5 (a) のように角度 θ_0 で広がった離散的な光源が得られる。この光源による空間的コヒーレンスは、Van Cittert Zernike の定理により光源のフーリエ変換に

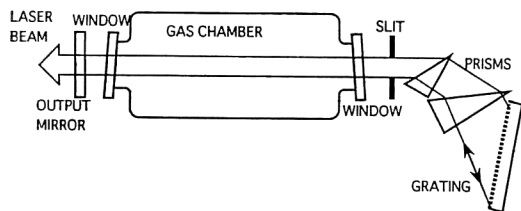


図1 狭帯化エキシマレーザー

よって与えられ、図5(b)のようになる。この図で実線は離散点光源による空間的コヒーレンスを表し、破線は1個の光源すなわちミラーを振らないときのエキシマレーザーによる空間的コヒーレンスを表している。

実際のコヒーレンスはこれらの実線と破線の積で与えられる。ここで N は1次元方向の光源の個数である。したがって振動の振り角を調整し、実線のピークの位置

を破線の値が十分小さくなるようにするにすれば干渉縞のコントラストは小さくなる。また実線のゼロ点の間隔が等間隔であるので、この間隔がフライアイの間隔と一致するようにミラーの振り角を決めてやれば図4の各光線のコヒーレンス度は互いにゼロとなり、干渉縞は発生しない。このように振動ミラーの角度を制御することにより不要な干渉縞を大幅に減らすことができる。

ArF レーザーにおいて KrF と同等以上 (レンズの色収差は KrF より大きくなる) の狭帯域化が可能か否かは今後の技術開発にかかっているが、原理的な壁があるわけではなく、狭帯域化素子のレーザーダメージ耐久性やパルスごとのエネルギーばらつきといったような問題を解決してゆくことで実用解としての狭帯域化レーザーが得られる可能性が高いと考える。

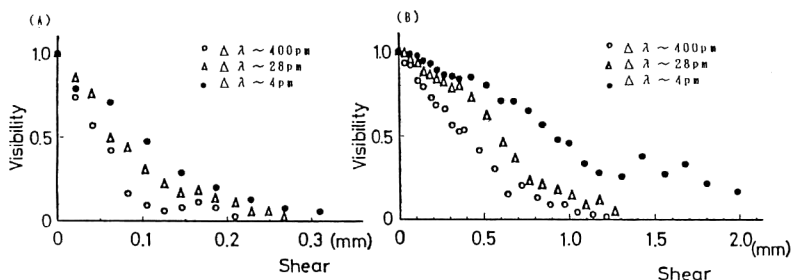


図2 エキシマレーザーの空間的コヒーレンス (A) 光束長軸方向, (B) 光束短軸方向。

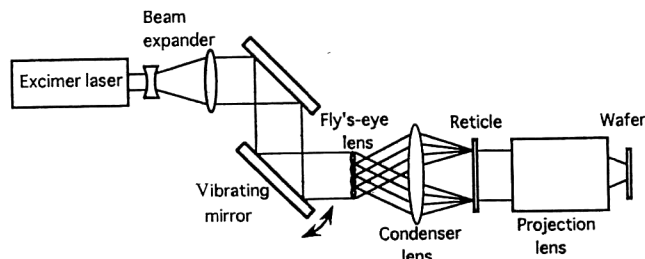


図3 エキシマレーザーステッパー照明系

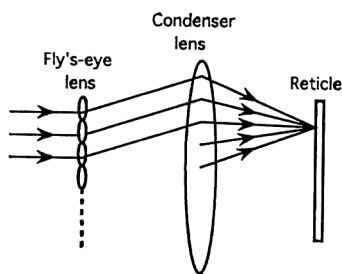


図4 レチクル上で干渉する光線

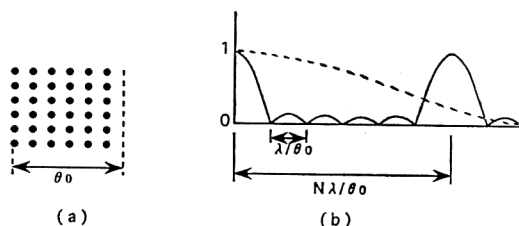


図5 光源と空間的コヒーレンス

3. 投影光学系

3.1 硝 材

KrF エキシマレーザーの波長は 248 nm であるが、この波長に対し、光学硝子では(今後多少の改善があったとしても)高い透過率を確保できない。屈折部材の透過率が低い場合、吸収された光が熱エネルギーに変わり、レンズの熱膨張や屈折率変化による収差変動が問題になる。したがって KrF エキシマステッパーの投影光学系に使用可能な光学材料は、CaF₂ 等の一部の結晶材料と石英ガラスに限定される。これらの材料は KrF レーザーの波長近傍では、十分高い透過率を保持している。エキシマレーザーは、高光強度のパルス光源であるため、従来の光源では問題にならなかった多光子吸収による透過率低下に注意が必要である。石英ガラスでは二光子吸収によるカラーセンターが 215 nm 付近に発生しやすいが、製造法の工夫等で KrF に対しては十分な耐久性が得られている。波長が 193 nm である ArF レーザーでは、透過率と耐久性を確保することが技術的により難しくなる。高繰返しレーザーを開発することでピークパワーを減らす等の検討が必要になるかもしれない。

3.2 色収差補正

屈折材として使用できる材料が限定されるため、KrF, ArF の波長域では通常の屈折系で色消解を得にくい。設計上は分散差の大きな屈折材の組合せが望めないため各レンズエレメントのパワーを強くせざるを得なくなり、収差補正が困難である。また偏心誤差許容が厳しい等、製造上の難度も高い。したがって屈折光学系を採用する場合はレーザーを狭帯域化することで色収差の影響を除去するのが一般的である。

KrF エキシマレーザーでは前述したように十分な狭帯域化が実現されており、非色消レンズを問題なく使うことができる。反射屈折系では、屈折パワーの配分を反射ミラーにかけることで色消に有利になるため、フリーランのレーザー光源が使える可能性がある。投影光学系の色消とレーザー狭帯域化についての事情は、ArF 波長領域でも同様である。ただし、ArF エキシマレーザーについてはまだ狭帯域化した場合の寿命、安定性等の確認がされておらず、非色消レンズが使えるか否かの判断にもう少し時間が必要である。

4. DUV リソグラフィ

4.1 レジスト(リソグラフィ用感光剤)

エキシマレーザーステッパーを議論する際に当初より問題視されてきたレジストもポジ形の化学増幅形レジストの出現により KrF 波長に対しては実用解が得られたと考えられている。

化学増幅形レジストは周りの環境(空气中の不純物ガス)などに敏感で注意が必要ではあるが、高解像度・高感度であるという利点を持つ。より短波長の ArF 波長域に適合する実用解としてのレジストは未だ出現していない。シリル化を利用した表面反応タイプが有力候補といわれているが、プロセス工程が多くなること、線幅の寸法コントロールがしにくい等の難問を抱えている。

4.2 定在波効果

フォトリソグラフィでよく問題にされる定在波効果とは、レジストと基板との界面で反射される光とレジスト表面で反射される光の光路差、ひいては全体としての反射率がレジスト厚に依存してサイクリックに変化するため、実効的な露光量がレジスト厚に対してサインカーブ状のスイングカーブになる現象を指す。エキシマステッパーにおいては、このスイングカーブの振幅が大きいかつ周期が短い。振幅が大きい理由は基板(例えばシリコン)での反射率が短波長化に伴って高くなるためであり、周期は当然ながら露光波長に比例するからである。したがってレジスト膜厚ムラに対して非常に敏感になるため、線幅コントロール性が悪化する傾向がある。レジストに垂直入射する単色光に対して、スイングカーブの振幅比 S をファブリペローエタロンのモデルから導出すると、次式が得られる。

$$S = 4\sqrt{R_1 R_2} e^{-\alpha D} \quad (1)$$

(1)式において

S : 振幅比, スイングカーブの極大値, 極小値の差を平均値で割った値と定義する。

R_1 : レジスト表面の反射率

R_2 : レジスト/基板界面の反射率

α : レジストの吸収係数

D : レジスト厚

4.3 定在波効果の低減

(1)式から明らかなように定在波効果を低減するためのプロセス上の手段として

1. レジストの吸収係数を大きくする
2. レジスト表面の反射率を低減する
3. レジスト/基板界面の反射率を低減する

等が考えられる。レジストの吸収係数が極めて大きく定在波効果が無視できる例として、シリル化による表面反応が知られている。この場合はレジスト/基板界面に光が到達しない。

通常のレジストプロセスではレジスト/基板界面に光が到達して初めてパターンが形成できるので、吸収係数をむやみに大きくできない事情がある。レジスト表面の反射率低減は、レンズの反射防止コートと同じで屈折率 \sqrt{n} (n はレジスト屈折率) で厚さ $\lambda/4n$ の最適条件になるべく近い薄膜をレジスト表面に形成することで達成される。

レジスト/基板界面の反射率低減にも同様の方法が適用 (最適条件は当然異なる) できるが、より一般的な手法として界面に吸収膜をはさむことで反射を防ぐやり方がある。

4.4 光源スペクトル幅および NA が定在波効果に及ぼす影響

レジストに異なる入射角で入射する光線は、異なるピッチの定在波を形成するため、ある NA をもって入射する単色光束は、定在波効果に関してあるバンド幅を持った光として振舞う。レジスト中で θ の傾きを持つ光線は、実効的に波長が $\lambda/\cos\theta$ で垂直入射した場合に相当する。そのため NA の増加とともにシングカーブが長波長側にシフトし、かつカーブのうねりが減少する。

図6に NA=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 の場合のシングカーブの例を示す。単色光束が NA をもってレジストに入射する場合の有効波長 λ_{eff} と有効バンド幅 BW_{eff} を求めてみよう。有効波長は、レジスト屈折率を n 、方向余弦を s とすると

$$\lambda_{\text{eff}} = \langle \lambda \rangle = \int_0^{\text{NA}} \frac{\lambda}{\cos\theta} \cdot 2\pi s ds / \int_0^{\text{NA}} 2\pi s ds$$

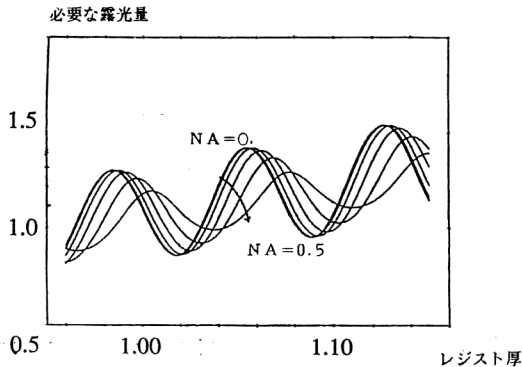


図6 異なる NA に対するシングカーブ

次に

$$= \lambda \cdot \frac{2n}{\text{NA}^2} (n - \sqrt{n^2 - \text{NA}^2}) \quad (2)$$

$$\frac{1}{2} \cdot \text{BW}_{\text{eff}} = \text{RMS} = \sqrt{\langle \lambda^2 \rangle - \langle \lambda \rangle^2}$$

を求める。

$$\begin{aligned} \langle \lambda^2 \rangle &= \int_0^{\text{NA}} \left(\frac{\lambda}{\cos\theta} \right)^2 2\pi s ds / \int_0^{\text{NA}} 2\pi s ds \\ &= \lambda^2 \cdot \frac{n^2}{\text{NA}^2} \ln \left| \frac{n^2}{n^2 - \text{NA}^2} \right| \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{RMS} &= \sqrt{\lambda^2 \ln \left| \frac{n^2}{n^2 - \text{NA}^2} \right|} \\ &= \sqrt{\lambda^2 \ln \left| \frac{n^2}{n^2 - \text{NA}^2} \right| - \left[\lambda \frac{2n}{\text{NA}^2} (n - \sqrt{n^2 - \text{NA}^2}) \right]^2} \end{aligned} \quad (4)$$

実際にパターンが結像する際には、回折光が投影レンズの NA 全体から入射するものの、照明条件 (特に照明系の NA) やパターン形状により NA 光束内での光線の重みが違ってくるため定在波効果も変化する。参考までに、KrF 波長 (248 nm) における NA=0.4, 0.5, 0.6 での λ_{eff} と BW_{eff} の値を表1に示す。ここでは、NA 光束内での重みは考慮されていない。光源スペクトル幅の大小も定在波効果に影響を及ぼす。図7に KrF 波長 (248 nm) において、光源スペクトルが大きくなるに従い定在波効果が緩和していく様子が示されている。図からわかるように、光源スペクトル幅が 6 nm を越えるあたりから効果が現れる。エキシマレーザのフリーランで

表1 各 NA での λ_{eff} および BW_{eff}

NA	λ_{eff} (nm)	BW_{eff} (nm)
0.4	251.32	1.95×2
0.5	253.28	3.11×2
0.6	255.75	4.62×2

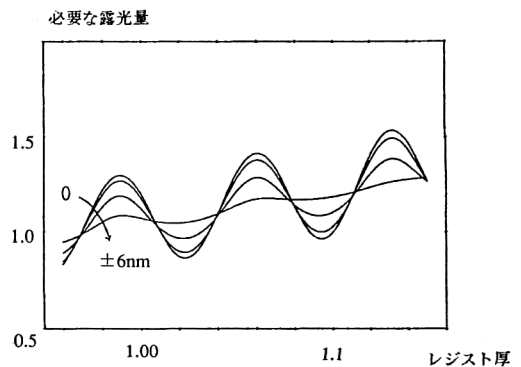


図7 異なる波長幅に対するシングカーブ

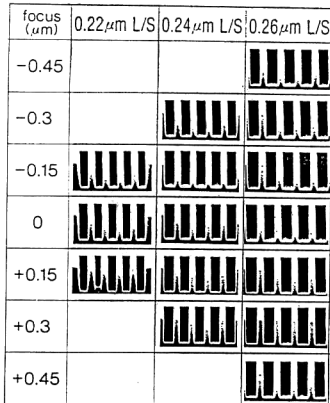


図8 KrFでのレジスト像

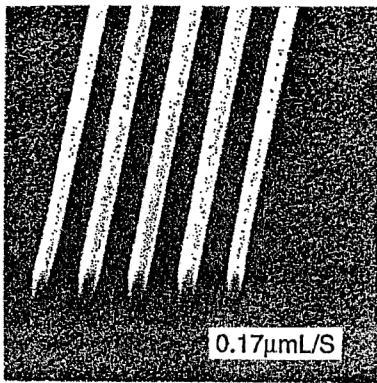


図9 ArFでのレジスト像

は KrF, ArF 共に半値全幅が 0.4 nm くらいであるから、定在波効果の観点からは十分単色光に等しい。超高压水銀灯の g 線と i 線でも半値幅が 2~4 nm 程度しかなく、ほぼ単色光と等しく振舞う。

4.5 エキシマレーザーリソグラフィの現状

図8に NA=0.55, σ=0.55 の KrF 光学系を使用して焼付けられたレジスト像の SEM 写真を示す。斜光照明や位相シフトレチクル等の高解像技術を用いることなく 0.25 μm L/S 付近のパターンが実用的に必要な深度をもって解像している。

図9に NA=0.55, σ=0.8 の ArF 光学系で得られたレジスト像を示す。前述したように ArF レジストプロセスは成熟しておらず、まだ短波長化の恩恵を享受するまでに至っていない。

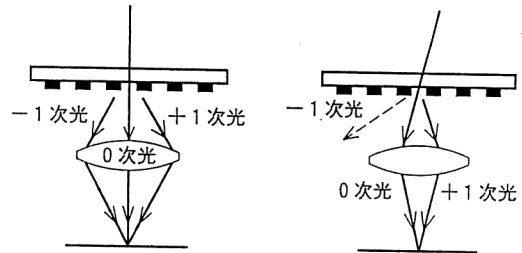
5. 高解像結像技術

光リソグラフィでより細かなパターンを解像する目的で現在までに種々の高解像結像技術³⁻⁵⁾が提案されてい

る。例えば、光源面では変形照明法、マスク面では位相シフトマスク、瞳面では瞳フィルター法、像面では FLEX 法などが代表的である。これらの技術は原則的に波長に関係なく適用でき、エキシマステッパーにおいても実現可能である。

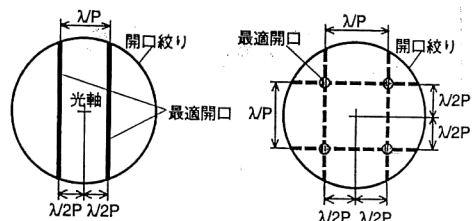
まず変形照明であるが、これは周期パターンに対して有効な方法である。光源の形状に従来の円形とは異なる輪帯形状や四開口形状を採用した場合の結像が近年盛んに研究されている。これらの変形光源は、照明光束のなかで最適な角度を持った斜光照明の成分がなるべく大きくなるように工夫されたものである。この場合の最適な角度とは、周期パターンによって回折された ±1 次光のうち的一方と 0 次光が投影光学系の瞳面において概ね対称の位置を通るようになる角度である。

図10に垂直入射照明と斜光照明の結像の様子を視覚的に示してある。高次回折光が投影光学系に取り込まれるような粗い周期のパターンは除外して考えると、垂直入射では 0 次光と ±1 次光の三光束干渉で結像するのに対し、斜光照明では二光束干渉である。三光束干渉では、0 次光を基準にした ±1 次光の位相が、デフォーカスと共に変わってしまうため、像コントラストが低下する。二光束干渉で、0 次光と 1 次光の傾斜が等しい場合は、デフォーカスによる位相差が発生せず、像コントラストの低下がない。変形照明法により焦点深度が伸びる理由は、結像する光のうちで、二光束干渉の成分が増え



(a) 垂直照明 (b) 傾斜照明

図10 パターンからの回折光の発生と結像



(a) X方向のみ考える場合 (b) X, Y方向共に考える場合

図11 最適光源形状

ることによる。また、回折角が同じ場合、二光束干渉のほうが小さい NA で結像することになるため、変形照明法により限界解像力を高めることも可能である。

X方向に周期を持つパターンに対する最適開口は図 11(a)に示されるように、光軸から $\pm\lambda/2P$ 離れた 2本の線になる。Y方向に周期 P を持つパターンに対しても同時に最適化すると図 11(b)の如く四開口^{6,7)}になる。マスク上のパターンがX, Y方向の周期パターンであれば、この配置が最適である。(a)の線開口が大ききゼロの場合あるいは(b)の四開口が大ききを持たない点の場合、周期 P のパターンにおける焦点深度は無限大になる。現実には、照明パワーの観点での効率も考えて適当な開口の大きさを決定する。当然開口が大ききほど周期 P のパターンに対する焦点深度は浅くなる。最適入射角でない斜光照明成分が増えるためである。

XY方向だけでなく全方位角の周期パターンを考慮すると輪帯照明になる。図 12 に輪帯照明と四開口照明(SHRINC)による焦点深度向上の例を示す。図 13 に四開口照明時の $0.2\ \mu\text{m}$ L/S の SEM 写真を示す。露光波長は KrF (248 nm), NA=0.55, レジストは化学増幅型ポジレジストである。通常照明の結果である図 8 と比較して、実用深度を確保した上での解像力が約 2 割改善

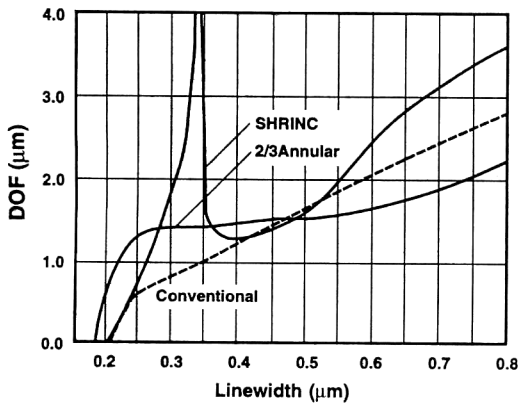


図 12 輪帯および四開口での焦点深度

focus (μm)	$0.20\ \mu\text{m}$ L/S
-0.3	
-0.15	
0	
+0.15	
+0.3	

図 13 KrF 四開口照明でのレジスト像

されている。ここでは、 $0.24\ \mu\text{m}$ L/S に最適化しているが、照明開口をより細い線幅に最適化することもできる。

次に、マスク面においては強度変調、位相変調の両方とも結像に効果を及ぼす。強度変調の例としては、パターンバイアスや Serif⁸⁾ 等がある。これらはいずれも結像面で望ましい像強度分布を得るために、マスク面上でのパターンを幾何光学から決まる形状から変形させておく技術である。位相変調の例としては、渋谷・レベンソントタイプの位相シフトマスクが有名である。これは、等しい線幅のラインとスペースで形成される周期パターンの開口部(ポジレジストでのスペース部)に対して一つおきに $\lambda/2$ の位相差を与える方法である。このマスクに垂直入射照明を与えると 0 次光が消滅し、倍の周期に相当する回折角を持つ ± 1 次光が生じる。結果的には前述した最適角度での斜光照明と見かけ上同じ結像形態になり解像力、焦点深度等への効果もほぼ等しい。渋谷・レベンソントタイプの位相シフト法においては、斜光照明成分が増えるほど、言い換えれば、照明系の σ 値が大きくなるほど焦点深度は減少する。四開口照明法において各開口が大ききほど焦点深度が減少するのと同じ理屈である。

次に投影レンズの瞳面であるが、ここでは強度と位相の変調が共に意味を持つ。投影光学系の瞳面にフィルターを配して、結像性能を向上させる試みが近年盛んになされている⁹⁾。コンタクトホールのような孤立パターン(暗視野中の明パターン)に対して効果が大きく、この点で変形照明法と異なっている。強度変調の例としては、瞳の中心部を遮光し、輪帯状の開口とすることで、像空間に長焦点の点像強度分布を得る方法がある。原理的には、変形照明の二光束干渉で長焦点が得られるのと同じである。位相変調の例としては、輪帯状に位相反転領域を設けて二焦点を得ることにより、孤立パターンの焦点深度を深くする技術がある。像面上で行えることとしては、孤立パターンに対して効果がある FLEX¹⁰⁾ が有名である。これはフォーカスを移動しながら多重露光を行うことで深い焦点深度を得る技術である。

以上のような高解像技術を進展させ、かつ実用化することにより、光リソグラフィの限界をほぼ一世代は延命できると考えられる。半導体デバイス設計時の最小線幅は一世代で約 0.7 倍ずつ微細化している。KrF の波長(248 nm)では 256 MDRAM ($0.25\ \mu\text{m}$ 線幅)が限界であると考えられているが、それを高解像結像技術を使うことにより 1 GDRAM の第一世代 ($0.18\sim 0.2\ \mu\text{m}$ 線

幅)にまで適用できる可能性がある。ArFの波長(193 nm)では0.13~0.15 μm の4GDRAMまでがターゲットになったと考えてよいだろう。

文 献

- 1) S. Kawata, I. Hikima, Y. Ichihara and S. Watanabe: "Spatial coherence of KrF excimer lasers," *Appl. Opt.*, **31** (1992) 387-396.
- 2) Y. Ichihara, S. Kawata, I. Hikima, M. Hamatani, Y. Kudoh and A. Tanimoto: "Illumination system of an excimer laser stepper," *Proc. SPIE*, **1138** (1989) 137-143.
- 3) 福田 宏, 岡崎信次: "超解像リソグラフィ", *光学*, **19** (1990) 290-294.
- 4) 田辺容由: "ステップ光学系における超解像技術の比較", *光学*, **21** (1992) 415-423.
- 5) 滝川忠宏 (編集代表): ULSI リソグラフィ技術の革新, 第1章第3節 超解像技術 (サイエンス・フォーラム社, 近刊予定).
- 6) N. Shiraishi, S. Hirukawa, Y. Takuuchi and N. Magome: "New imaging technique for 64 M-DRAM," *Proc. SPIE*, **1674** (1992) 741.
- 7) M. Noguchi, M. Muraki, Y. Iwasaki and A. Suzuki: "Subhalf micron lithography system with phase-shifting effect," *Proc. SPIE*, **1674** (1992) 92.
- 8) A. Starikov: "Use of a single size square serif for variable print biascompensation in microlithography: method, design, and practice," *Proc. SPIE*, **1088** (1989) 34.
- 9) H. Fukuda, T. Terasawa and S. Okazaki: "Spatial filtering for depth of focus and resolution enhancement in optical lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 9** (1991) 3113.
- 10) H. Fukuda, N. Hasegawa and S. Okazaki: "Improvement of defocus tolerance in a half-micron optical lithography by the focus latitude enhancement exposure: Simulation and experiment," *J. Vac. Sci. Technol.*, **B 7** (1989) 667.