

リソグラフィー光学

松 本 宏 一

半導体デバイスの発展は、パターンの微細化の歴史であった。光リソグラフィーは、その歴史の中で、半導体デバイスの誕生以来、量産技術の主役をつとめてきている。本稿では、最初に光リソグラフィーの変遷を述べる。歴史をふり返ることで、現在の露光装置の形態の必然性が理解されてくるはずである。次に、投影光学系の結像論をシミュレーションの視点から論じることにより、結像論の基礎的理解を深めることとする。さらに、光リソグラフィー固有の超解像技術について紹介する。最後に、目下の最先端装置での技術トピックス、およびそれ以降の展望について述べる。

1. 光リソグラフィー機器の発展¹⁻⁴⁾

1.1 コンタクト露光

「コンタクト露光」は「密着露光」ともよばれており、半導体製造の初期段階から1970年代初頭まで量産装置として盛んに使われた。露光の原理は原始的で、マスク（パターン原版）と感光材であるレジストを塗布したウェハを密着させ、上方より光を照射するものであり、「日光写真」と同じ原理である。マスクとウェハが密着しているため、光の回折現象が発生せず、当時としては良好な解像力を誇っていた。しかしながら、デバイスの高密度化に伴い、いくつかの欠点も明らかになってきた。そのひとつは、マスクとウェハを密着させるときに生じるマスクの損傷や汚染である。1枚のマスクでは限られた枚数のウェハしか露光できず、当時の4~16 K ビット DRAM の量産ではマスクを頻繁に交換しなければならないという事態を生じた。また別の欠点として、重ね合わせ精度が挙げられた。密着の際に、マスクとウェハの平面度・熱的変

形・機械的変形等が作用して重ね合わせ精度を低下させてしまうのであった。

1.2 プロキシミティー露光

「コンタクト露光」の欠点を補うものとして、1970年代の初めころから、「プロキシミティー露光」が使われるようになってきた。これは、マスクとウェハの間に、10~20 μm 程度のギャップを設けて露光するものである。この方式の「コンタクト露光」と比較した利点として、まず、マスクとウェハを密着させないので、マスクやウェハの損傷が減ったことが挙げられる。また、密着機構が不要なので、アライメントを行ったまま露光でき、重ね合わせ精度が向上したことも見逃せない。

その一方で、マスクとウェハの間のギャップに起因する光の回折（フレネル回折）が影響して、コンタクト露光に比べて解像力の低下を招いたことが指摘できる。フレネル回折は一般的に、光強度分布のリングングが大きいので、さまざまな方向からマスクを照明してリングングを目立たなくするように、つまり、照明光のNAを大きくするように光学系が設計された。

本露光方法では、一般に解像力を R 、露光波長を λ 、マスクとウェハの間隔を g とすると、以下の関係がある。

$$R = k\sqrt{\lambda \cdot g} \quad (1)$$

ここに、 k は定数である。この関係から回折による影響はあるものの、波長を短くすることにより高解像力を達成できるので、「プロキシミティー露光」の「コンタクト露光」に対する優位性はゆるがなかった。

1.3 ミラープロジェクション露光

フレネル回折が像性能を悪化させている要因であると認識されている中では、光学的な共役像で露光しようという発想はきわめて自然である。「プロキシミティー露光」に

(株)ニコン半導体露光装置事業部投影レンズ設計部第1光学グループ (〒360-8559 熊谷市大字御稜威ヶ原 201-9)
E-mail: matsumo@nikongw.nikon.co.jp

続いて登場したのが、等倍の投影露光法である。等倍の結像を実現するのに、反射系による結像と屈折系による結像とが考えられた。反射系がスキャンにより大きな露光面積を目指していたのに比べて、屈折系による結像は一括露光を前提としていたので、カバーできる露光面積に限界を生じ、当時のウェハー大型化のトレンドの中で、その姿を消していった。そこで、この時代を席卷したのが反射系による等倍露光であり、これを「ミラープロジェクション露光」とよぶ。結像系の基本構成は図1に示したごとく、1枚の凹面鏡と1枚の凸面鏡を用いて、同心となるように配置する⁵⁾。同心とすることで、3次収差の範囲内の球面収差とサジタル像面湾曲が補正され、凹面鏡と凸面鏡の曲率半径比を2:1とすることでペッツバル和が補正されている。また、物体面から像面へ至る結像光学系が完全に対称なので、コマ収差・歪曲収差も除去されており、さらに、反射面だけで構成されているので色収差もないという特徴を有している。実際の設計では、高次収差をバランスさせるために、同心性をわずかに崩したり、曲率半径比を2:1からわずかにずらすことが行われていたが、ともかくも、光リソグラフィー用の結像光学系として格好のものであった。

ミラープロジェクションの光学系では、ある特定の像高付近の輪帯領域のみで光リソグラフィーとしての良好な結像が得られている。そのため、マスクとウェハーを同期して走査する必要がある。図1に示した構成のままでは、マスクとウェハーの実際的な配置ができなため、実際の装置では、マスク側・ウェハー側の光束に45度反射ミラーを配して、走査方向を光軸に平行な方向にしてある。本装置は、非コンタクトの露光方法として高い歩留まりを誇ったが、マスク全体をウェハー全体にアライメントする必要があったので、重ね合わせ精度の点で限界があった。

1.4 縮小投影露光 (ステッパー)

1970代末になってくると、日米の各社から縮小投影型露光装置が発表された。結像系としては屈折系を用い縮小倍率とし、1枚のウェハーを多数回の露光でパターンニングするものである。露光装置の呼称としては、「逐次移動式縮小投影露光装置 (step-and-repeat projection system)」などとよばれたが、後には単に「ステッパー」といわれるようになった。ステッパーの特徴としては、まず、ウェハー全面を一括して露光するのではなく、各ショットごとに逐次的に露光していくので、ウェハー全体としての重ね合わせ精度が向上できることが挙げられる。また、結像倍率が縮小であるために、マスクの製造誤差やマスク面上のゴミに対して強い点も見逃せない。

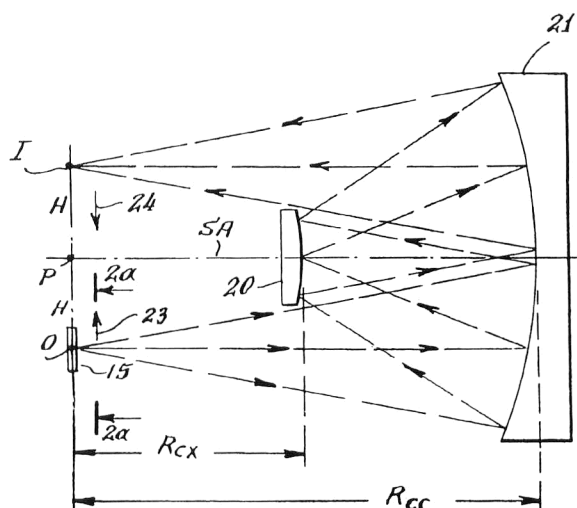


図1 ミラープロジェクションの光学構成⁵⁾。

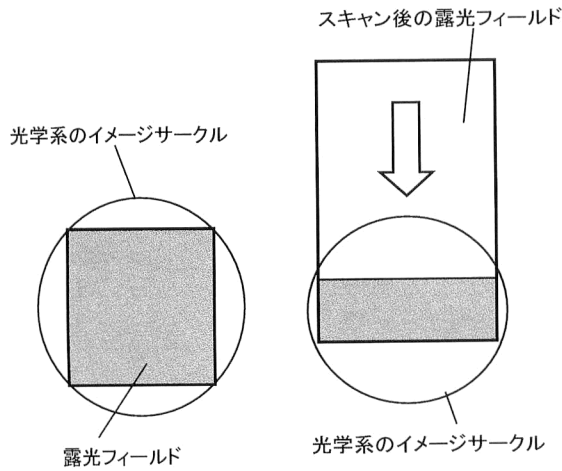
初期のステッパーは、1/10倍系でフィールドサイズは、10 mm □であったが、後に1/5倍系の22 mm □が主流となっている。また、後述するように、1990年代に入ってから、1/4倍系で、1つのフィールド内をさらににスキャン露光する「ステップ・アンド・スキャン」の露光方式がもてはやされている。これらの投影型露光装置の解像力 R は、レイリーの式により以下のように表現される。

$$R = k \frac{\lambda}{NA} \quad (2)$$

ここに、 λ は露光波長、 NA は投影光学系の開口数、 k は定数である。式(2)より自明なように、これ以降の投影光学系の開発は、解像力向上を目指して、短波長化と大NA化の道を歩むこととなった。

1.5 ステップ・アンド・スキャン露光

最先端露光装置の光源が、短波長化のトレンドに従い、超高圧水銀ランプからエキシマーレーザーへとシフトしてきたことにより、一般ガラス材料は透過率の観点から用いることができなくなっている。KrFエキシマーレーザーよりも短波長で使えるガラス材料は、実務的には、石英ガラスとフッ化カルシウム(蛍石)に限られており、大NA化のトレンドとあいまって投影光学系のコストアップを招いてきている。このような状況下で生まれてきたのが、「ステップ・アンド・スキャン」の装置である。この装置は、多くの場合1/4倍の倍率を有しているが、図2に示すごとく、光学系としては長方形のスリット形状のフィールドを露光しつつ、マスクとウェハーを同期スキャンさせることにより、最終的には25 mm × 33 mm程度の露光フィールドを確保するものである。22 mm □のステッパーよりも光学系としては小さなイメージサークルでありながら、より大きな露光フィールドを実現している。このコン



ステップアの露光 ステップ・アンド・スキャンの露光
 図2 ステッパーの露光とステップ・アンド・スキャンの露光。

セプトにより、投影光学系のコンパクト化と大 NA 化とが同時に達成されることになった。また、スキャン露光することのメリットは、スキャンによる平均化効果も忘れてはならない。歪曲収差・像面湾曲・非点収差といった収差は、スキャンにより平均化され実質的に結像性能の向上に寄与している。

2. 投影結像理論の理解⁶⁻¹⁰⁾

前章でみたように、光リソグラフィーでは、さまざまな形態の投影光学系が用いられてきている。等倍系・縮小系、屈折系・反射系、ステッパー方式・スキャン方式等々の光学系があるが、その形態にかかわらず、模式的には、図3に示すごとく捉えることができる。このような透過照明結像系は、部分的コヒーレント結像系ともよばれ、これを数式表現するのに、本稿では、換算座標系を用いる。つまり、物体面（マスク面）と像面（ウエハー面）の実寸座標を λ/NA で正規化し無次元量として扱う。ここで、 NA はそれぞれ物体側 NA 、像側 NA を用いる。瞳座標についても、瞳の半径を1にするように正規化される。換算座標を用いる利点は、物体面から瞳面へのフラウンホーファー回折、および、瞳面から像面へのフラウンホーファー回折が、数学におけるフーリエ変換と同一の表記になることにある。また、物体側と像側の NA 比は結像倍率に等しいので、換算座標で論じれば、結像倍率に関係なく物体側と像側の幾何光学的共役点か、同一座標として扱えることも挙げられる。また、照明光学系を規定するには、コヒーレンスファクターなるものが定義される。これは物体面からみたときの照明光学系と投影光学系の NA 比であり、 σ 値とよばれることもある。あるいは、別の表現を

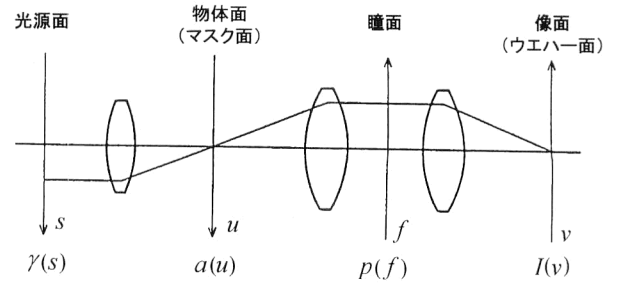


図3 部分的コヒーレント結像の模式図。

すると、 σ 値は光源と投影光学系の瞳の半径比であるともいえる。

部分的コヒーレント結像系で像強度分布を表す基本式はいく種類かのものがあるが、詳論は専門書に委ねることとして、ここでは、光リソグラフィーのシミュレーションで多用されている表現に立脚して論を進めていく。

2.1 瞳面での積分による計算

まず、基本となる式を示す。

$$I(v) = \iint T(f_1, f_2) \bar{a}(f_1) \bar{a}^*(f_2) e^{-2\pi i v(f_1 - f_2)} df_1 df_2 \quad (3)$$

ただし、

$$T(f_1, f_2) = \int \gamma(s) p(s + f_1) p^*(s + f_2) ds \quad (4)$$

$$\bar{a}(f) = \int a(u) e^{2\pi i f u} du \quad (5)$$

ここに、 I は像強度分布であり、 a は物体振幅透過率分布である。 T は相互透過係数とよばれていて、 γ は有効光源、 p は瞳関数である。

実際にどのように像強度分布が算出されるかをみてみよう。簡単のため、1次元的な物体について考える¹¹⁾。物体振幅透過率分布 $a(u)$ を、周期 P の周期関数であるとする。孤立パターンのときは、 P が十分大きいとすればよいのだから、この仮定は一般性を損なわない。そこで、 $a(u)$ をフーリエ級数に展開する。

$$a(u) = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} a_n e^{-i \frac{2\pi}{P} n u} \quad (6)$$

ただし、

$$a_n = \frac{1}{P} \int_{-P/2}^{+P/2} a(u) e^{i \frac{2\pi}{P} n u} du \quad (7)$$

マスクパターンの場合、式(7)の積分は解析的に求められる場合が多い。式(6)をフーリエ変換すると δ 関数の和となり、式(3)に代入、整理すると次式を得る。

$$I(v) = \sum_k c_k e^{-i \frac{2\pi}{P} k v} \quad (8)$$

ただし、

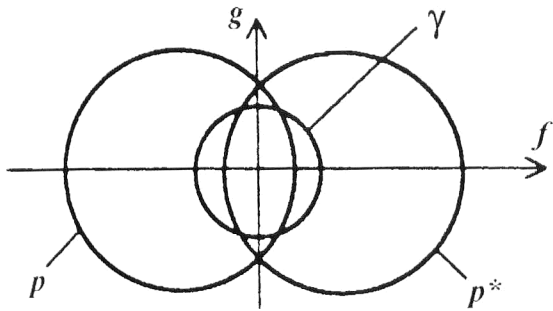


図4 相互透過係数の積分。

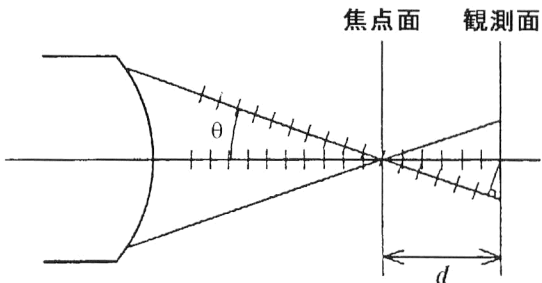


図5 デフォーカスによる収差。

$$c_k = \sum_n a_n a_{n-k}^* T\left(\frac{n}{P}, \frac{n-k}{P}\right) \quad (9)$$

式(8)によれば、像強度分布がフーリエ級数にて表示されているので、一度、係数列 $\{c_k\}$ を求めれば、任意の像面座標での強度が、たちどころに計算できるわけである。また、ここでいうフーリエ級数は、相互透過係数 T が値をもつ範囲内で和をとれば十分であるから、有限級数である。ここで、述べたアプローチによれば、部分的コヒーレント結像における像強度分布の解析式を与えることができる。

相互透過係数 T は、その定義式である式(4)からもわかるように、図4に表されるように、有効光源 γ と、シェアされた瞳関数 p と p^* の共通部分の積分で与えられる。無収差結像系でデフォーカスをゼロを仮定する場合は、共通部分の面積で与えられるが、デフォーカスは焦点深度を議論する際のパラメーターなので、ここでその考慮をしておこう。デフォーカスの効果は、瞳関数の位相項として表現される。図5に示されるように、デフォーカスが d だけあると、光軸上をくる波面と θ だけ傾いた方向からくる波面には、位相差が発生し、この位相差 ϕ は、

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} (1 - \cos\theta) \approx \frac{\pi d}{\lambda} \sin^2\theta \quad (10)$$

となり、デフォーカスにより発生する波面収差は、 θ があまり大きくない範囲において、瞳座標 ($\sin\theta$ に比例する) の2乗に概略比例することがわかる。このように、デフォ

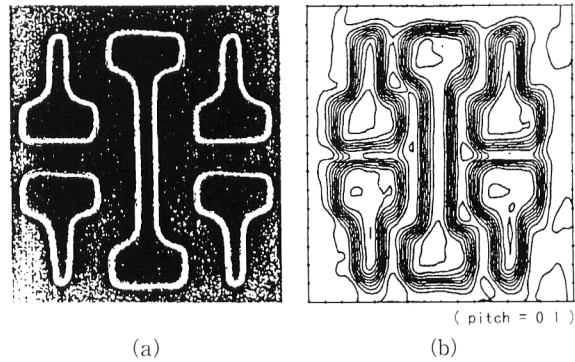


図6 2次元パターン結像: SEM写真とシミュレーション¹⁴⁾。

ーカスによる波面収差を瞳径の二乗に比例するとする仮定下では、詳細は文献12)を参照していただきたいが、本計算は計算速度・計算精度の観点から大きな利点を有する。

マスクパターンを2次元に拡張して、相互透過係数を2次元積分すれば、一般的な像強度分布計算ができる¹³⁾。そして、光学系の光線追跡から定まる波面収差を瞳関数の位相項として取り込めば、実際の収差での結像評価が可能となる。図6にその例¹⁴⁾を示した。SEM写真と等高線表示による光強度分布の対応で示してあり、細かな像の非対称性まで、シミュレーションができていのがみとれる。ここでは、非対称の様子がよくわかるように、光学系を構成するエレメントのうちのひとつを故意に偏芯させた上で、実験とシミュレーションの合致を調べたものである。なお、ここでの光学条件は、 $NA=0.30$ 、 $\lambda=0.436 \mu\text{m}$ 、 $\sigma=0.5$ 、パターンサイズは、 $1.2 \mu\text{m}$ である。

2.2 光源面での積分による計算

まず基本となる式を示す。

$$I(v) = \int \gamma(s) \left| \int \bar{a}(f-s) p(f) e^{-2\pi i v f} df \right|^2 ds \quad (11)$$

図3において、光源上の1点を出る光によって物体が照明されると、瞳面上の振幅分布は、対応する瞳座標の点を原点とした物体の振幅透過率分布のフーリエ変換となる。さらに、瞳関数が掛け合わせられ、フーリエ変換により像面上での振幅分布が与えられる。すなわち、光源上の1点 s を出た光によって像面上にもたらされる振幅分布が、式(11)中の絶対値記号の内側の式で与えられている。通常、光源面は、空間的にインコヒーレントであると想定され、光源面上の異なる点から出る光は、像面上では強度で加算されるので、先の振幅分布を2乗して、光源強度分布でウエイト付けして光源面上で積分すれば像強度分布が得られる。

1次元構造の物体を考える。物体振幅透過率分布のフー

リエ級数表示の式(6)を式(5)・式(11)に代入すると次式を得る¹⁵⁾。

$$I(v) = \int \gamma(s) \left| \sum_n a_n p \left(s + \frac{n}{p} \right) e^{-2\pi i (s + \frac{n}{p}) v} \right|^2 ds \quad (12)$$

ここで、光源座標については、2次元メッシュによる数値積分を行うこととなる。式(12)の中のexpの項は、像形成は進行方向の異なるさまざまな部分平面波の和であることを表しているの、結像面以外の光軸方向の光強度分布を各部分平面波の位相を変えることで算出できる。ここで、光源面上のメッシュ積分は、有効光源 γ が存在する領域でとれば十分である。また、 n は回折光の次数で、具体的範囲としては、瞳関数が値をもつ範囲内に限られる。

さらに、各部分波の振幅と位相は、いわゆるレジストシミュレーション¹⁶⁾を行う際に必要な情報であり、レジストシミュレーションは、本手法での像強度分布計算とリンクして行われるのが通例である¹⁷⁾。

2.3 瞳面積分と光源面積分の比較

部分的コヒーレント結像を表現するのに、物体面、あるいはそれと共役な像面上で積分する表現もある。しかし、物体面積分をベースにするのは、光リソグラフィーの投影光学系の評価では、あまり用いられていない。理由としては、まず、物体であるマスクパターンは、通常は透過率が1または0の2値しかとらず、しかも形状としては矩形の集合体であることが多く解析的なフーリエ変換を求め易い部分に、数値積分を導入するのは全体の計算効率を落とすことになってしまうという点がある。また、像面と共役な物体面上にて積分メッシュを設けると数値積分の誤差が像面上での光強度分布に大きく効いてしまうという点もある。

さて、前節までで、「瞳面積分の方法」と「光源面積分の方法」を述べたが、この両者の得失をみておこう。まず、瞳面積分の特徴としては、次のようなことが挙げられる。

- (1) 像強度分布のフーリエ級数の係数列が得られる。したがって、像面上の任意の座標位置での強度の値を補間法によらずに算出できる。また、フーリエ級数という数学的形式にて像強度の情報を保持できるので、諸解析が容易になる。
- (2) 光学系の情報を表す相互透過係数と物体の情報を表す物体のフーリエ級数の係数を別個に扱うことができる。つまり、いったん、相互透過係数を算出してしまえば、さまざまな物体形状についての像強度分布シミュレーションが効率的にできる。
- (3) デフォーカスを2次の項までとすると、数値積分

によっている相互透過係数の数値安定性にすぐれている。

他方、光源面積分の特徴としては、次のようなことが挙げられる。

- (1) 像空間での部分波の振幅・位相情報が得られる。したがって、レジスト系まで含めたシミュレーションに対応できる。また、部分波の情報に、光軸方向の方向余弦と座標を付加することで、デフォーカス方向の像強度分布まで効率よく算出することができる。
- (2) 実務的でわかりやすい。これは、ソフトウェアの保守維持・拡張性等を考えると重要なことである。例えば、変形照明を検討する際に、いろいろな形状の光源についてのシミュレーションは、光源面積分の方が容易に対応できる。

結局、瞳面積分と光源面積分は一長一短で、ケースバイケースで使い分けるのがよろしいというのが筆者の結論である。

3. 超解像技術¹⁸⁾

光学では、OTFのカットオフ周波数よりも高い空間周波数の像を形成するのを最も厳密な意味での「超解像」とよぶようである¹⁹⁾。例えば、インコヒーレント結像の場合、カットオフ周波数は、 $2NA/\lambda$ であり、これを光リソグラフィーでよく用いる k ファクターで表現すると、なんと $k=0.25$ となり、光リソグラフィーの世界では考え難いほど細かい線幅になってしまう。光リソグラフィーでは、レジストを介してパターンニングするので、像にある程度以上のコントラストが求められる。それゆえ、光学でいうところの「超解像」とは対象とする空間周波数が異なるのである。しかしながら、光リソグラフィーにおいても、「超解像」なる用語は半ば定着したかの感があるので、ここでも用いることにする。ただし、ここでは、大NA化・短波長化のいずれにもよらない手法により、結像性能を向上させる技術全般を超解像技術とよぶことにする。

3.1 照明法にかかわる超解像技術

変形照明法は、周期パターンに対して効果が大きい超解像技術であり、その原理はパターンからの、 ± 1 次回折光のうち的一方と0次回折光が、投影光学系に入り、しかも、瞳面においておおむね対称の位置を通るように照明光の入射角を選ぶことにある。この方法の効果は、第1に、焦点深度の増大効果が挙げられ、第2に、解像力向上の効果が挙げられる。

理論的にこれらの効果を確認してみる。周期パターンとして1:1のラインアンドスペース・パターンを想定して、

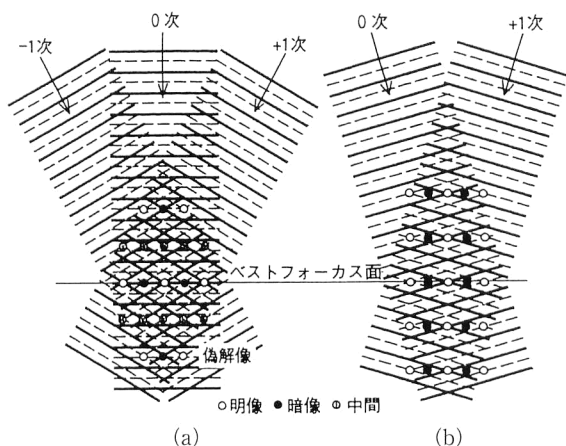


図7 二光束干渉と三光束干渉の結像。(a) 三光束干渉による結像, (b) 二光束干渉による結像。

垂直照明の場合と傾斜照明の場合を比較してみる。パターン線幅と傾斜照明の傾斜角が適当に最適化されているものとする。垂直照明の場合は、0次光と±1次光の三光束により像が形成されるものとして、傾斜照明の場合は0次光と1次光の二光束が光軸に対して等しい角度で像形成をする状態を考える。この場合の像面近傍での振る舞いを視覚的に示したのが図7である。三光束干渉による結像では、0次光を基準にした±1次光の位相がデフォーカスとともに変わっていくので、像コントラストが落ちる。一方、傾斜照明による二光束干渉による結像の場合は、0次光と1次光の光軸に対する傾角がおおむね等しいので、デフォーカスをしたときでも両者の位相差は発生せず、像コントラストは低下しないことが理解される。このように、二光束干渉による結像での焦点深度を増大させるのが、変形照明法の第1の効果である。

さらにパターンが細かく、回折角が大きい場合を考えてみる。垂直照明（通常照明）は、±1次光が投影光学系のNAより大きな傾角を有すると、0次光のみがウェハー面に到達して、一様な強度が像面上に現れることになる。傾斜照明の場合は、0次光と1次光が投影光学系を通過する限りにおいて、像を形成することができる。したがって、傾斜照明は限界解像を向上させる効果があることがわかる。これが、変形照明の有する第2の効果である。

実際の変形照明としては、デバイスのパターンサイズにより、傾斜照明の傾斜角が最適化される。また、パターンの向きについても、縦方向と横方向の周期パターンに注目する場合は光源面で4つの開口を有するいわゆる「四開口照明法」^{20,21)}となり、任意の向きのパターンを考慮する場合は「輪帯照明法」となる。

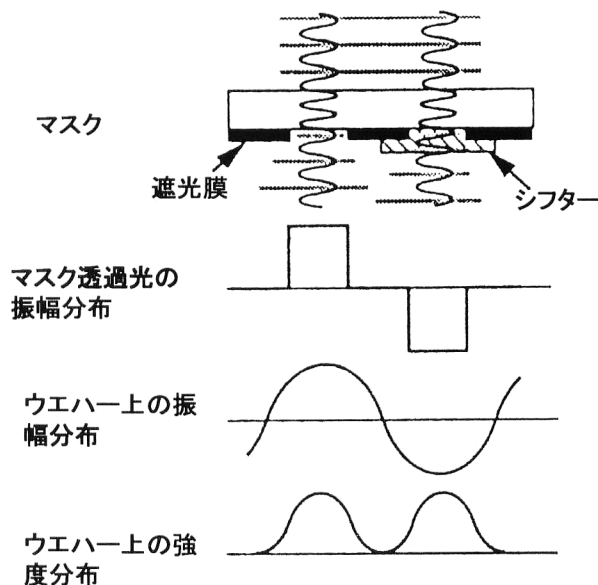


図8 位相シフトマスクの原理。

3.2 マスクにかかわる超解像技術

従来からのマスクは、石英基板にクロムでパターンを形成したものであった。つまり、振幅透過率は、1か0の2値しか取り得ないものであったが、マスクを透過する光に位相差を与え、その干渉を巧く利用することにより解像力を向上させる超解像技術が1980年代初期に提案され²²⁾、現在では、微細化技術のアプローチのひとつとして広く用いられている。マスク面上での位相差の付け方にさまざまなバリエーションがあるが、それらを総称して「位相シフトマスク (phase shift mask: 略称 PSM)」とよんでいる。その原理は、図8に示してあるごとく、隣接した開口部の一方にシフターと一般によばれる位相部材を設け、そこを通過する光の位相を180度変えるようにしてある。したがって、互いに隣接する開口を出る光は、位相が反転しており、隣接する開口の中間部では振幅がゼロ、すなわち、光強度がゼロとなり従来マスクに比べて格段の解像力の向上が図れる。

位相シフトマスク以外にも、マスク上でなされている超解像技術がある。従来マスクを用いたとしても、レジストパターンは、マスクパターンとは必ずしも相似の関係にはない。光リソグラフィーで注目されているのは、矩形パターンの角の部分丸まってしまう現象や周期的パターンと孤立パターンの線幅差などである。これらの現象が発生する理由としては、レジストプロセスに起因するものや光学原理に根差すものもあるが、これらをすべて含めて、マスクパターン上にその分のバイアスを載せて、結果として所望のレジストパターンを得ようということが行われている。この分野の技術は、「光学近接効果補正」(optical

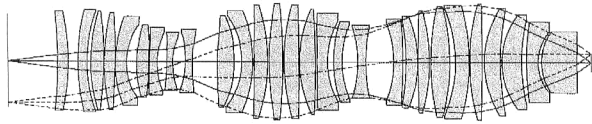


図9 屈折光学系の例²⁶⁾.

proximity correction : 略称 OPC) とよばれている。

3.3 瞳面での超解像

近年、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なされている。本手法は、コンタクトホールのような孤立パターンを対象としている。位相分布型のフィルターを用いるものや²³⁾、可干渉性の分布を変えたフィルターを用いるもの²⁴⁾が提案されているが、実務上の難点もあり、商業ベースではいまだ実用化されていない。

3.4 ウェハ面上での超解像技術

ウェハ面上での超解像技術は、広義に解釈すれば、レジストプロセスに関する進歩はすべて、この範疇に含まれてしまうことになるが、光学的な技術としては、FLEX²⁵⁾を挙げることができる。これは、フォーカスを移動させながら多重露光を行うものである。例えば、コンタクトホールのように暗視野中に孤立する明パターンに対して、焦点深度を増大させる効果がある。

4. 今後の発展

4.1 屈折系と反射屈折系

ArF 光学系以降の光学系の構成は、光源のエキシマーレーザーのスペクトル幅との関連で捉えなければならない。レーザーのスペクトル幅を狭帯化するのにも限界があることから、一般に屈折系で光学系を構成する場合は色収差補正が必須である。ArF 光学系の場合は、石英ガラスとフッ化カルシウム（蛍石）の2種の透過部材を組み合わせ、色収差補正を行っている。一方、反射屈折光学系は、主たるパワーが凹面鏡にあるので色収差補正の点では余裕がある。また、光学系の種類としての、屈折系と反射屈折系の代表的構成を図9²⁶⁾と図10^{27,28)}に示した。

反射屈折系の設計でポイントとなるのは、凹面反射鏡である。凹面反射鏡は、発散波を収束波に変換するという点で、機能的には屈折系における凸レンズに対応するものであるが、いくつかの以下のような相違点も見いだされる。

- (1) 凹面鏡は波長依存性にかかわる分散がないが、レンズは分散がある。
- (2) 凹面鏡はペッツバル和としてはマイナスの値をとるが、レンズはプラスの値をとる。

そこで、反射屈折系は、主たるパワーを凹面鏡に配せ

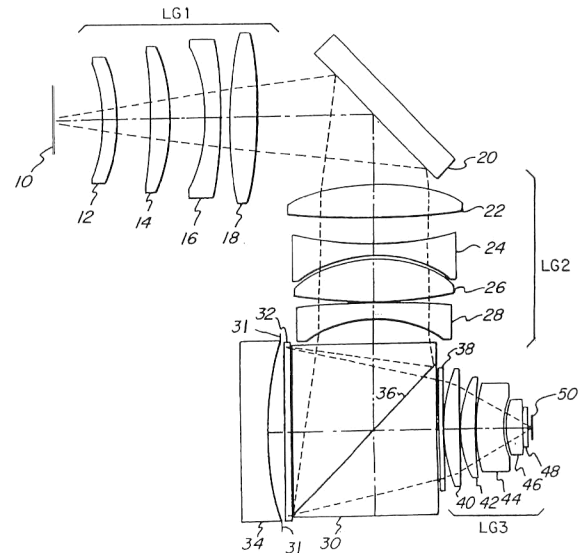


図10 反射屈折光学系の例²⁷⁾.

ば、色収差が小さく、レーザーに波長幅に対する余裕度が大きくできる。また、凹面鏡自体がマイナスのペッツバル和を有しているため、系全体のペッツバル和を小さくするのは比較的容易であり、併せて、光学系全体をコンパクトに設計することが可能となる。

他方、図10に示した反射屈折系の場合には、偏光ビームスプリッター (polarized beam splitter: PBS) と1/4波長板 (quarter wave plate: QWP) が具備されていて、凹面鏡への入射光と凹面鏡からの反射光を物理的に分離する働きをしている。そのため、PBSやQWPの欠陥は、像面上のフレアーをもたらし結像性能の劣化となって現れる。さらに、PBSを構成している石英ガラスは、構成上、光軸が2本あるので直交する2方向からみた屈折率の均一性が求められる。これらは、反射屈折系における課題である。今まで述べてきたように、屈折系と反射屈折系の間の選択に当たっては、賛否両論あるところであり、各メーカーの判断の分かれるところである。

4.2 ArF 以降の展開

ArF 以降の光リソグラフィーの候補としては、F2エキシマーレーザー ($\lambda = 157 \text{ nm}$) の露光装置と EUVL (extreme ultra violet lithography) とよばれている X 線を用いた縮小露光装置が挙げられている。

F2エキシマーレーザーの波長では、石英ガラスは透過率の低下をきたしてしまっているため、主たる透過部材は、フッ化カルシウム（蛍石）である。さらに、昨今は、フッ化バリウムもリソグラフィー光学への用途を視野に入れた研究開発がなされていて、色収差補正をした屈折光学系の可能性も議論されている。反射屈折光学系について

も、種々のバリエーションが設計検討されていて、F2光学系としての形態が確定してくるのには、もう少し時間を要すると思われる。

EUVLでは、波長が13 nmまたは11 nmのものが考えられている。この短波長化による解像力向上の恩恵は大きく、 $NA=0.1$ 程度の反射光学系による露光装置がひとつの開発ターゲットになっている。しかし、要素技術的には多くの課題がある。

光リソグラフィー以外にも、電子ビームリソグラフィーも着実な進歩を遂げてきている。従来は、電子ビームリソグラフィーはスループット（単位時間当たりの処理能力）が低くて半導体デバイスの量産には向いていないとされてきたが、今後は、電子ビームリソグラフィーも含めて、デバイスのレイヤーに対応して複数の露光方式が組み合わせで用いられる時代になっていくものと思われる。

本稿は「リソグラフィー光学」というタイトルでリソグラフィーにかかわる光学の話題を述べてきた。しかしながら、学術分野としての「リソグラフィー光学」があるわけではない。リソグラフィーという工業目的のために、光学技術をいかに使っていくかが肝要であろう。光リソグラフィーの今後の発展は、いまだに無限の可能性を秘めている。光リソグラフィーの分野で今後の活躍を志す方にとって、拙稿が少しでも役に立てば筆者の喜びである。

文 献

- 1) 垂井康夫編集総監：超LSI技術総集編（ダイヤモンド社，1982）p. 151.
- 2) 飯田進也，中村正克編：半導体製造装置実用便覧（サイエンスフォーラム社，1984）p. 210.
- 3) 鈴木将成責任編集：半導体製造技術集成（新技術センター，1982）p. 147.
- 4) 諏訪恭一：日経マイクロデバイス（1998）100-107.
- 5) A. Offner: U. S. Patent No. 3,748,015.
- 6) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, fifth ed., Chap. 10 (Pergamon Press, 1975).

- 7) 伊藤徳久：ステッパーの光学（1），光学技術コンタクト，**27**（1989）762.
- 8) 伊藤徳久：ステッパーの光学（2），光学技術コンタクト，**28**（1990）59.
- 9) 伊藤徳久：ステッパーの光学（3），光学技術コンタクト，**28**（1990）108.
- 10) 伊藤徳久：ステッパーの光学（4），光学技術コンタクト，**28**（1990）165.
- 11) E. C. Kintner: "Method for the calculation of partially coherent imagery," *Appl. Opt.*, **17** (1978) 2747-2753.
- 12) S. Subramanian: "Rapid calculation of defocused partially coherent images," *Appl. Opt.*, **20** (1981) 1854-1857.
- 13) 松本宏一，今野邦男，安西 暁：“縮小投影露光光学系の計算機による評価”，光学，**11**（1982）625-628.
- 14) K. Matsumoto, K. Konno and K. Ushida: "Development and application of photolithography simulation program for step-and-repeat projection system," *Kodak Microelectronics Seminar Interface '83* (1983) pp. 74-79.
- 15) M. Yeung: "Modeling aerial images in two and three dimensions," *Kodak Microelectronics Seminar Interface '85* (1985) pp. 115-126.
- 16) F. H. Dill, A. R. Neureuther and J. A. Walker: "Modeling projection printing of positive photoresists," *IEEE Trans. Electron. Dev.*, **ED-22** (1975) 456.
- 17) M. Yeung: "Modeling high numerical aperture optical lithography," *Proc. SPIE*, **922** (1988) 149-167.
- 18) 滝川忠宏，相崎尚昭，岡崎信次，森本博明編集：ULSI リソグラフィ技術の革新（サイエンスフォーラム，1994）p. 4.
- 19) 小瀬輝次：“超解像”，応用物理，**37**（1968）853.
- 20) N. Shiraishi, S. Hirukawa, Y. Takeuchi and N. Magome: *Proc. SPIE*, **1674** (1992) 741.
- 21) M. Noguchi, M. Muraki, Y. Iwasaki and A. Suzuki: *Proc. SPIE*, **1674** (1992) 92.
- 22) 渋谷真人：特公昭 No. 62-50811.
- 23) H. Fukuda, T. Terasawa and S. Okazaki: *J. Vac. Sci. Tech.*, **B9** (1991) 3113.
- 24) N. Shiraishi and K. Matsumoto: *Opt. Rev.*, **2** (1995) 207-210.
- 25) H. Fukuda, N. Hasegawa and S. Okazaki: *J. Vac. Sci. Tech.*, **B7** (1989) 667.
- 26) 松澤 均，石井幹彦，田中一政：特開平 No. 8-166540.
- 27) D. M. Williamson: U. S. Patent No. 5,537,260.
- 28) D. Williamson, J. McClay, K. Andresen, G. Gallatin, M. Himel, J. Ivaldi, C. Mason, A. McCullough, C. Otis, J. Sharmaly and C. Tomczyk: *Proc. SPIE*, **2726** (1996) 780-786.

(2000年12月6日受理)