

半導体露光装置の光技術

牛田 一雄*・吉田庄一郎**

半導体の製造には当初から光リソグラフィーが使われており、ともにその歴史を歩んできた。すなわちコンタクトアライナーから始まり、等倍結像のミラープロジェクション方式から、縮小投影レンズを搭載したステッパー方式への変遷を経て、現在では次世代の露光機として、縮小投影光学系とスキャンステージをもつ、ステップアンドスキャン方式の開発が急がれている。これらの露光方式の変遷は、半導体のデザインルールのとどまることを知らない微細化への要求を満たすべく、高解像力と良好な位置合せ精度を追求してきた結果である。デザインルールが $2\mu\text{m}$ を切ったところからミラープロジェクションからステッパーへ、さらに、 $0.25\mu\text{m}$ 以下ではステップアンドスキャン方式に移っていくと考えられている。本稿では、当初サブミクロンパターン加工の加工すら無理といわれていた光リソグラフィーの限界が、ついにはクォーターミクロンにまで達した過程において、それを可能にしたさまざまな技術を振り返ってみたい。

1. 半導体露光装置の変遷

1.1 ミラープロジェクションの時代

ミラープロジェクション方式の半導体露光装置では、円弧状の露光視野を有する、オフナー型の反射等倍光学系(図1)が使われていた。露光視野が円弧になった理由は、像面湾曲と非点収差を全像高に対して補正することが困難であるため、光学系として使用される像高のレ

ンジを最小限に抑えるためである。オフナー型においては、反射ミラーのみで構成され屈折部材がないため、露光波長が自由に選べる利点がある。光学系の開口数(NA)としては0.1程度であり、i線を露光波長に選ぶと $2\mu\text{m}$ 位までのデザインルールに対応することができた。装置的には、物体面に置かれるマスクと結像面に置かれるウェハーが共通のステージ上により、ステージを移動させながらウェハー全面を露光する、スキャン露光システムになっている。非常にシンプルでかつエレガントな構成であるが、解像力の向上は困難で、半導体露光装置としての最先端の座は徐々にステッパー方式に移っていった。

1.2 ステッパーの時代

ステッパー方式になって、結像光学系が縮小倍率を有し、物体面で長方形または正方形の比較的小さな露光領域(10~20mm角程度)を一括で露光するようになった。結像光学系として屈折系が採用され、開口数も飛躍的に向上した。ただし、広い波長領域に対して色収差を補正することが困難で、超高圧水銀灯の特定のスペクトルを干渉フィルターで選別し、露光波長とした。初期のステッパーにおいては波長436nmのg線が採用され、開口数0.3前後を実現し、 $1\sim 2\mu\text{m}$ のデザインルールに対応することができた。結像系が縮小倍率をもつことにより(当初は1/10倍が主流だったが、すぐに1/5倍に変わった)、以下の利点が生じた。

- (1) 開口数が上げられるため、解像力が向上する。
- (2) 1回の露光視野が狭いため、露光のたびにオートフォーカスをかけることにより、ウェハーフラットネスの影響を少なくできる。最新型のステッパーでは、ウェハーの局所的な傾斜を読みとり、その傾斜

Optical technology for semiconductor exposure apparatus (1996年6月24日受理)

*Kazuo Ushida (株)ニコン光学本部第二光学部 (〒140 東京都品川区西大井 1-6-3)

**Shōichirō Yoshida (株)ニコン (〒100 東京都千代田区丸の内 3-2-2 富士ビル)

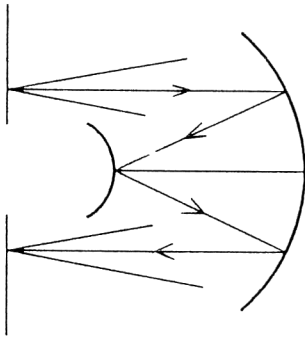


図1 オフナー型光学系.

を補正するためウェハーステージを自動的にティルトする機能も装備されている。

- (3) レチクルの描画精度およびゴミの管理基準が、縮小倍率の分だけ緩和される。

これらの利点があったために、ステッパー方式の半導体露光装置は、光リソグラフィーではもう限界であるといわれつつも、その予測を超える高解像力化を実現することができた。ステッパー方式においては、ひとまとめに露光できる領域が投影レンズの有効視野で限定される。一方、半導体の性能向上は、回路パターンの微細化とチップサイズの拡大との両方に依存してきたため、露光装置に対する要求も高解像と広視野の両立ということになった。チップサイズが露光装置の有効視野に比べて十分小さかったころは高解像化に開発のリソースが集中したが、チップサイズの大型化が進み、視野内に2チップしか入らなくなってからは、半導体の世代交代のたびに有効視野の拡大が必須といわれるようになった。表1にステッパー露光装置の開口数と有効視野が、時代とともにどのように変遷してきたかをまとめてみた。レンズを設計する立場からは、開口数の向上と有効視野の拡大を同時に果たすことは困難である。そのためレンズ設計上の負荷を軽減するべく、ステッパー用投影レンズのサイズは巨大化の一途をたどり、最近では共役長1m前後が普通となっている。一方、高解像を実現するための短波長化の歴史についても、この表からわかるように波長436nmのg線に始まり、365nmのi線を経て、最先端をになう248nmのKrFエキシマレーザーを露光光源とするに至っている。一般に光学ガラスの透過率は、波長が短くなるに従い減衰するが、減衰し始める波長はガラスの組成と不純物の管理レベルの両方に左右される。g線レンズを初めて試作した際、硝材透過率に対する見通しが甘く、問題が発生したことがある。g線に関

表1 ステッパー用投影レンズの変遷.

年代	露光波長(nm)	NA	露光領域(mm)
1980~	435.8(g線)	0.30-0.35	φ15
1985~	435.8(g線)	0.45	φ15
	365.0(i線)	0.45	φ15
1990~	435.8(g線)	0.54-0.60	φ17.5-φ21.2
	365.0(i線)	0.50-0.57	φ17.5-φ22.0
1995~	365.0(i線)	0.57-0.63	φ22
	248.4(KrFエキシマ)	0.55-0.60	φ22, 幅25(スキャン)

しては、紫外域での吸収が特に大きな硝種を使うことさえしなければ大丈夫と考えていた。実際、試作レンズの性能評価結果は良好で、なんら問題がないように思われていた。しかしその後の詳細なテストの結果、露光を繰り返すとレンズの倍率等の諸特性が変動することが明らかになった。硝材によるごくわずかな露光光の吸収によりレンズが熱をもち、変形することが原因であった。マスクを照明する照明光学系の開口数は、投影レンズのマスク側開口数より小さくなっており(0.5~0.7倍)、パワーの強いゼロ次光はレンズ中心部に集中する傾向がある。したがって、レンズの温度上昇は中心部において特に顕著で、レンズの変形も等方的な比例拡大、縮小ではなく、レンズ面の非球面化を伴う複雑なものである。レンズ内には応力分布が発生し、また屈折率も均一ではなくなる。今でこそ形状変化と屈折率分布が考慮されたシミュレーターを使い、設計検討段階で露光光の吸収による結像性能変化がチェックされているが、当時はまだ光吸収の危険性が過小評価されていた。光吸収は単なるエネルギーロスとして、露光装置としての効率(スループット)の低下の原因となることはわかっていたが、それ以外の観点での十分な考察がされていなかった。当時の常識では、硝材の光吸収が問題になるのは波長365nmのi線からで、g線ではなんら問題はないはずであった。幸いなことに、試作レンズの結像性能変化は倍率等の結像位置のずれまでで収まっていたため、システムとしてこれらの誤差を補正することで問題は解決した。この試作レンズから筆者らが学んだことは次の2点であった。

- (1) 硝材の吸収は極力小さくしなければならない。さらに投影レンズ設計終了時に、吸収による性能変化量が十分小さいことを確認する必要がある。
- (2) 結像位置の変化は避けられない。露光機として最高の精度を維持するために、補正機構が必須である。

吸収による性能変化を見積もるためには非常に複雑なシミュレーションを行う必要があったが、次世代のi線

レンズでさらに状況がクリティカルになることが予想されたため、シミュレーションソフトを開発することにした。結像位置の変化に対応する補正機構に関しては、一部のレンズ室を密封したうえで、中の空気圧力をコントロールして倍率等を補正する方式を採用した¹⁾。このときの補正量は、投影レンズ中を露光光が通っている時間の割合、レチクルの透過率、そして露光し始めてからの経過時間等、さまざまなファクターを加味して決められる。この補正機構は、光源がi線を経てエキシマレーザーに移りつつある現在に至るまで使われている。また、このときの経験を基に、屈折材料の透過率の規格が明確になり、その後のi線用硝材やKrF、ArF用の屈折材料開発の指針を示すことができたのである。

ステッパー方式の高解像力化は、投影レンズの開口数を大きくし、露光波長を短くすることで達成され、最新の高NAエキシマステッパーでは、0.25 μm のリソグラフィが可能になったといわれている。今後問題となるのは、高解像力とともに広フィールドをどう実現するかである。高開口数と広い露光視野を併せもつ投影レンズは必然的に巨大化し、非常に高価な屈折材料を使わざるを得ないKrFエキシマレンズでは途方もない材料費が必要になる。今後の最先端露光装置において、ステップアンドスキャン方式が主流になると考えられている背景には、本問題も含まれている。

1.3 ステップアンドスキャンの時代

ステップアンドスキャン方式の露光機は、細長い露光視野をもつ縮小投影光学系と、光軸と直交する方向に、かつ光学系の縮小倍率に等しい比率でレチクルとウェハーがスキャンされる機構が組合わされている。図2に各露光方式の露光手順を示してあるが、ステップアンドスキャン方式では1回のスキャンでレチクル全面の露光をし、ステップした後スキャンを繰り返し、ウェハー全面にレチクルの縮小パターンを焼付ける。装置としては、スキャンが必要な分ステージ系の構成が複雑になり、かつ高精度が要求されることになる反面、次のようにステッパー方式にはない利点がある。

- (1) 投影光学系の露光視野が実効的に拡大される。レ

ンズの場合、円形露光領域のうち、直径方向にスリットを設定することが可能で、その長さがスキャン露光領域の短辺を決定する。長辺のほうは光学系の制約を受けず、実質的にはマスクの長辺で限界が決まる。

- (2) ウェハー平面度が同程度であればより正確な焦点合せが可能になる。スキャンの最中、常にオートフォーカスと傾斜補正をかけ続けることができるため、一括露光方式より有利である。

実効的な露光視野の拡大は、投影レンズの巨大化から必然的に起こるコストの上昇に歯止めをかけることができ、焦点合せ精度の向上は高NA化から必然的に問題になる焦点深度の減少をカバーする。これらの利点により、ステッパー方式からステップアンドスキャン方式に移行するのが、自然な方向であると考えられている。なお露光光学系の選択肢が多いのも特徴のひとつであろう。ステッパー方式のように屈折レンズを用いてもよいし、円弧状の露光視野でも使えることから光軸を露光視野からはずす解も成立するため、色収差補正において有利な反射縮小光学系も考えられる。どちらを選ぶかは光源の狭帯化の可能性に依存するところが大きい。

2. 高解像力を求めて

十数年前、光リソグラフィの限界は露光波長の2倍の線幅までといわれていた。当時の光源は超高压水銀灯のg線であったため、0.9 μm が微細化の限界ということになり、それ以降はX線あるいは電子ビーム露光装置に移ると予測する技術者も多くいた。この予測は結局はずれ、光リソグラフィで0.25 μm のパターニングが現実のものとなり、近い将来0.1 μm までも達成可能と考えられるようになった。たったの10数年で約10倍も予想される限界値が違ってきているのである。表2のように、開口数、波長等の光学パラメーターで説明できるのは5倍弱であり、残りの2倍強は感光剤の進歩と位相シフト法に代表される超解像技術に依存する。ここでは、光リソグラフィの限界を伸ばすことに貢献した、各項目について個々に説明したい。

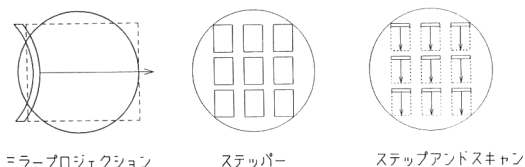


図2 各露光方式の比較。

表2 高解像化の要因。

項目	効果
光学系 開口数	2倍(0.3 → 0.6)
露光波長	2.4倍(436 → 193)
感光剤	1.5倍
超解像技術	1.5倍(周期のみなら2倍)

2.1 開口数の拡大 (高 NA 化)

ステッパー方式の初期において 0.3 前後であった投影レンズの開口数が、最新のものでは 0.6 を越えている。開口数の理論的限界は、空気中での使用を前提として 1.0 であるが、光学設計上の限界についての議論がよくされたものである。結局、現在 0.6 前後で収まっているのは、光学設計というよりリソグラフィにおいて最低限必要な焦点深度によって決められている。関連するファクターとしては、ウェハー基板のフラットネス、前工程で作られた段差、感光剤自身の厚さ、そして露光装置のもつ焦点合せ誤差等があり、露光装置側で解決できない部分の比率が高い。開口数についての今日的な見解としては、必要があればさらに大きなレンズを設計・製造できる、しかし本当にその性能を生かすことができるかが問題であるということで、少なくとも光学設計上の議論ではなくなっている。

2.2 短波長化

露光を重ねることで屈折材に吸収された露光光が熱エネルギーに変化し、投影レンズの結像性能に影響を与えることをすでに説明したが、このことから明らかなように、露光光源の短波長化における最大のテーマは、十分な透過率をもつ屈折材の開発であった。特に g 線から i 線への移行は、発光効率やスペクトル半値幅等への配慮から多少の違いはあるが、どちらも光源が超高压水銀灯であることに変わりなく、光学系としての差はほとんど使用された屈折材の違いのみであった。したがって i 線投影レンズの開発は、365 nm の波長において十分な透過率をもつ光学ガラスの開発であったと言い換えられる。超高压水銀灯を光源にした場合、数 nm のスペクトル半値幅に対して投影光学系の色収差補正を行う必要がある。したがって、i 線投影レンズの実現のためには、複数種類の i 線用硝材が必要であった。短波長における透過率を優先すると、低屈折率、低分散になりがちであり、光学設計者が望む高屈折率、高分散は得にくい。したがって、i 線用硝材の開発は、硝材開発担当者と光学設計者の間で十分な情報交換と議論がなされたうえで進められた。結果的には、光学設計の難易度が少々上がったが、露光光吸収の観点では g 線レンズに遜色ないレベルを達成できた。超高压水銀灯は i 線が最後（反射縮小光学系を採用した露光装置ではこの限りでない）で、次の光源としてエキシマレーザーが登場する。波長 248 nm の KrF エキシマレーザーである。この波長になると、光学ガラスの使用はほぼ不可能といえる。屈折材料として使えるのは石英と蛍石の 2 種類で、それ以外はめ

ったに使われない。なかでも加工面での優位性と大口径化しやすいこととで、石英が多く使われる。この波長領域で使える屈折材料の光学パラメーターは、すべて光学ガラスというクラウン系に相当し、低屈折率、低分散のものばかりである。したがって、屈折系で色収差補正を実現するためには、各レンズエレメントのパワーが強くなりすぎ、設計・製造ともにきわめて困難となる。狭帯化されていない KrF エキシマレーザーのスペクトル半値幅は 400 pm 程度あり、このまま露光光源として使う場合、色収差補正を完全に行う必要がある。ひとつの解は、反射屈折光学系を採用することで、色収差補正の困難を解消することである。投影レンズが色収差を発生するのは、集光作用をすべて屈折に依存するため凸の屈折パワーが勝つことによる。そうでないと集光レンズにならない。反射屈折光学系では、集光作用を主に反射ミラーに依存し、収差や縮小倍率の補正のためにレンズを使用する。このため色収差の発生がもともと少ない。図 3(a)²⁾、(b)³⁾ に反射屈折光学系の例を示す。図 3(a) の例では、ミラーで反射される前後の光路をビームスプリッターでできり分けることにより光路の干渉を防いでおり、高 NA を達成しやすいことを特徴とする。図 3(b) はそれより古いタイプであるが、光軸が露光視野に含まれていないことを利用して光路の干渉を避けている。ただし、図から容易に想像できるように、NA を上げると光学エレメントがぶつかり合うため、高 NA 化は困難である。これらの反射屈折光学系は、いずれもステップ

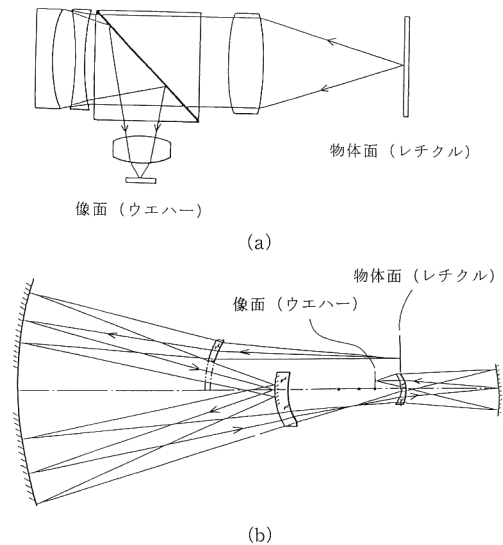


図3 (a) ビームスプリッター式反射縮小光学系の例、(b) 円弧視野をもつ反射縮小光学系の例。

アンドスキャン方式の半導体露光装置に実際使われている。KrF エキシマレーザーを光源とする露光機におけるもう一つの流れは、レーザースペクトル自体を狭帯化し、屈折光学系を使用する方式である。色収差補正がまったくされていない高 NA の投影レンズが使えるためには、スペクトル半値幅を 1 pm 程度まで絞り込むことが必要になる。最新の KrF エキシマレーザーでは、エタロンを使って安定的にこの値が保証できるようになり、色消しされていない単色投影レンズを使うことに伴う不安が解消されている。まだ実用化されていないがさらに次世代の候補としては、波長 193 nm の ArF エキシマレーザーが有力である。この波長域においては、屈折材料の対レーザー耐久性が最大の技術的課題であるといわれる。KrF と同様にパルスレーザーであるため光の集中度が高く、かつフォトンエネルギーとしては、30%近く高くなるためである。石英ガラスにおける問題点としては、2光子吸収により発生するといわれる E* センターの発生および収縮（コンパクション）等がよく知られている⁴⁾。石英ガラス内に存在する構造欠陥の数が多いほど、これらの現象は進行しやすいと考えられている。困難なテーマではあるが、開発担当諸氏の努力によりいずれ解決されることを期待したい。

2.3 感光剤（レジスト）の性能向上

過去の感光剤と最新のものを同じ条件で比較するのは難しい。露光光の短波長化に対応するための感光剤側の変更も含まれてしまうと、同じ光学パラメーターで比較

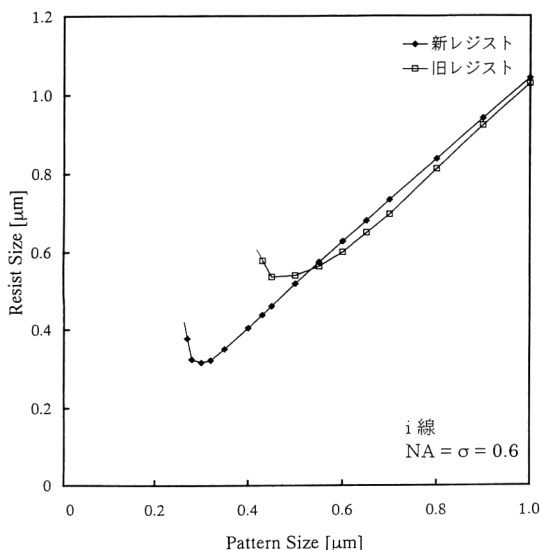


図4 レジストによる解像力の差。

されたデータもない。したがって、ここでは計測されたレジストパラメーターを基に、シミュレーションでの比較を試みた。図4は感光剤の新旧による解像力の差を示すものである。同じ開口数、同じ波長での比較で、解像力の差としておよそ1.5倍あることがわかる。これはi線での比較であるため、レジストはどちらもノボラック系のポジ型である。KrFになると化学増幅型と呼ばれるタイプが使われるが、最新のものは波長で規格化した上でノボラック系の最新版以上の解像力性能が得られる。残念ながら、ArFにおいてこれに匹敵するレジストは、いまだ得られていない。しかしながら有力な候補として、KrFと同じ化学増幅型と表面反応型と呼ばれる2つのタイプについての開発が進んでいる。

2.4 超解像技術

光リソグラフィー用の超解像技術に関しては数多くの論文、特許等が発表されており、この分野への関心の高さ、ひいては光露光方式の延命への強い要求を表している。超解像技術は次のように分類される。

- (1) レチクル上で位相，振幅を操作するタイプ。

例：渋谷・レベンソン型位相シフト法⁵⁻⁷⁾

ハーフトーンレチクル

- (2) 変形照明で高解像を実現するタイプ。

例：輪帯照明法⁸⁾

四開口照明法^{9,10)}

- (3) 投影光学系の瞳面を操作するタイプ。

例：中心遮蔽型瞳フィルター¹¹⁾

- (4) その他

例：非線形レジスト多重露光法 (NOLMEX 法)¹²⁾

これらの超解像技術のなかでも特に著名なのが、渋谷・レベンソンタイプの位相シフト法であろう。周期パターンの解像限界と焦点深度の両方を劇的に向上させることができる。図5に通常結像と位相シフト使用時の結像の様子を比較した。簡略化するため照明系の開口数は

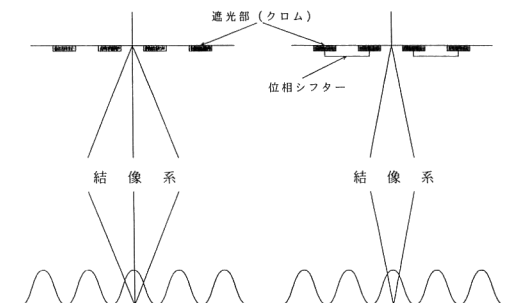


図5 通常結像と位相シフト結像の比較。

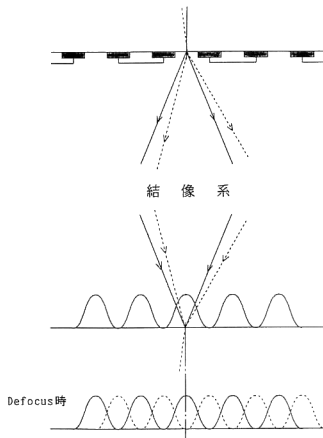


図6 斜光成分がある場合の位相シフト結像。

0, つまり平行光での照明を仮定してある。図から明らかかなように、位相シフト法では、マスク上で 180° の位相膜を倍周期で付加することで0次光が消され、1次光の回折角が半分になる。通常結像と比較して半分の開口だけで同じ周期のパターンが結像されることになる。したがって同じ開口数を使えば、通常結像の倍の周期まで解像することができる。さらに注目すべき特徴として、光軸方向に対して対称な2光束干渉での結像となるため、デフォーカスによる光束同士の位相差が生じない。つまり無限の焦点深度が得られることになる。通常結像では0次光が存在し3光束による干渉となるため、デフォーカスによる位相差が生じコントラスト低下が起こる。実際には照明の開口が有限の値をもつため、図6のように光軸方向に対し非対称な2光束結像成分が存在し、それ自体のコントラスト低下はないものの、デフォーカスにより像が横ズレをおこす。その結果最終的な結像は互いにずれた像の重ね合せになり、その結果コントラストの低下が起こる。横ズレ量はデフォーカスと照明開口角の積に比例するので、照明系の開口数が大きくなるにつれ焦点深度が浅くなる。以上のことから、渋谷・レバンソンタイプの位相シフト法を用いる場合は、照明系の開口数を通常の半分以下に絞るのが普通になっている。

さて、位相シフト法では0次光を消し去ることで2光束干渉を実現したが、通常マスクを用いて斜光照明をしても、パターン周波数と投影光学系の開口数の関係が条件を満たせば、0次光と1次光の2光束干渉になる。要は図7のように、2つある1次光のうち一方だけが、投影光学系でけられれば良い。変形照明法により、解像

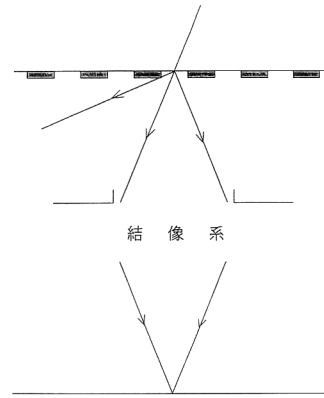


図7 斜光照明。

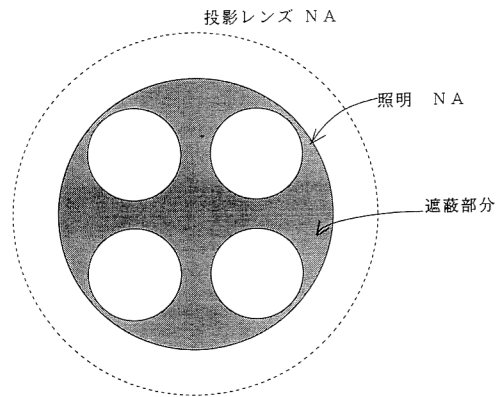


図8 4開口。

限界と焦点深度が伸びるのは、2光束干渉成分が通常照明に比べて増加することによる。パターン周期によって最適な入射角が異なるのと、斜光照明の方位としてはパターンの周期方向に入射光の向きが合っていないため効果が期待できない。全方位のパターンに対して平等に斜光照明を行うのが輪帯照明法であり、縦横のパターンに対してのみ最適化したものが4開口照明法(図8)である。どちらも瞳の中心部が遮蔽されており、3光束干渉成分ないし回折光がすべてけられる(コントラストゼロ)成分がカットされている。最新の露光機では開口数が0.6程度あり、通常照明条件でも露光波長と同等の線幅ぐらゐまでのパターンングが可能である。i線では露光波長にほぼ等しい $0.35\ \mu\text{m}$ が通常照明での限界といわれているが、輪帯照明あるいは4開口照明を用いれば、実用的な、つまり焦点深度も確保したうえでの解像限界が $0.25\sim 0.30\ \mu\text{m}$ まで伸びる。

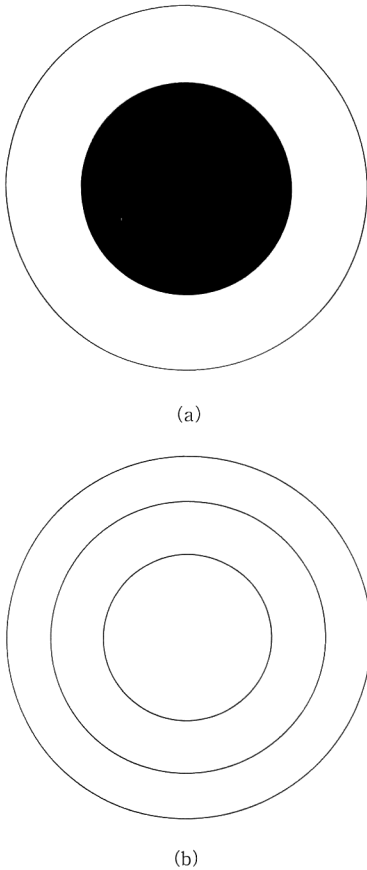


図9 (a)遮蔽型瞳フィルター, (b)位相板瞳フィルター.

以上の説明から明らかなように、渋谷・レベンソン型位相シフト法と変形照明法は、超解像を達成するメカニズムがよく似ている。対象とするパターンはいずれも周期パターンであった。これに対して、投影光学系の瞳にフィルターを挿入して達成される超解像効果は、コンタクトホールと呼ばれる、多くは孤立のホールパターンに対してきわめて有効である。最もシンプルな例は図9(a)に示されるような中央部遮蔽フィルターであろう。このタイプのフィルターの極限は、遮蔽部の半径が広がって、投影光学系の最大開口部のみ光が通る場合である。このとき、円周上の開口部が等位相（視野中心にホールがある場合）であれば、光軸上のどのフォーカス点においても全開口の光が等位相となり、焦点深度が無限大になる。周期パターンにおける2光束干渉の2次元版で、ベッセルビームと呼ばれている。実際にはエネルギー効率の観点から、円周に幅をもたせるため、この幅により深度が決まることになる。位相シフト法において照

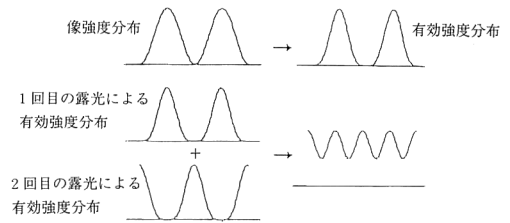


図10 NOLMEX法.

明系開口数により深度が決まる事情によく似ている。このタイプの超解像技術の変形として、図9(b)に示されるごとく投影光学系の瞳面を同心の輪帯領域に分割し、各々の領域に露光光のコヒーレンス長をこえる位相差を与える位相板をセットする方法が考えられている。こうすることで、結像は各輪帯領域の結像の強度の和となり、図7の例と同等のメカニズムで深度増大効果（厳密には中心に近い領域の結像ほどぼけてくるが）が得られる。この場合中心部はホール結像に寄与せず、DC成分となる（ぼけすぎる）ため、遮蔽する方がよい結果が得られる。

最後に、最近話題になっている非線形レジスト多重露光法について簡単に述べておく。NOLMEX法と呼ばれるこの超解像技術は、光強度に対して非線形な感度をもつ感光剤（2光子吸収レジスト等）を使用し、多重露光との組合わせで周期パターンの解像限界を伸ばす。普通の感光剤の場合、感光反応は露光強度と露光時間の積に比例するが、非線形レジストでは露光強度が低いと、露光時間を増やしても反応しない。強度があるレベルを超えて初めて有効な露光となる。したがって、露光強度をコントロールすることで、光強度分布のピークだけに感光剤が反応するようにできる。図10に示すように、1回目の露光の後、ウェハーステージをパターンの半周期分シフトさせてから2回目の露光を行うと、感光剤には倍周期の縞模様が記録される。感光剤の非線形性次第では、高解像化に原理的な限界は存在しない。ただし、サッカーボールで地面に線を引くときに、描きうる線の細さに原理的な限界がないと主張するのと同じで、現実の誤差要因（露光強度のコントロール等）を考慮しないという前提がある。NOLMEX法が実プロセスで有効に機能するか否かは、感光剤の非線形性をどこまで高められるかに依存する。

半導体露光装置の解像性能は当初の予想を大きく超える向上を果たしてきた。なんととしても光を使って半導体

を作り続けたいという強いモチベーション（経済効率の観点から発する）により、光学と材料のエンジニアが努力を重ねた結果、今日の姿がある。本稿では、その向上の全体像が見渡せるようにすべての要因を網羅すると同時に、平易で定性的な説明を心がけたつもりである。今後も、急テンポで開発が進んでいる ArF 露光光学系が実用化され、超解像技術と併用されることにより、光で $0.1\ \mu\text{m}$ の壁に挑戦することも夢ではないと考える。

文 献

- 1) 安西 暁, 大野康一: 特開昭 60-28613.
- 2) S. Hashimoto and Y. Ichihara: U. S. Patent No. 5289312 (1994).
- 3) K. Matsumoto: U. S. Patent No. 4812028 (1989).
- 4) 藤ノ木朗: “エキシマレーザーリソグラフィー用光学石英ガラス”, *Optics Design*, No. 3 (1994) 20-25.
- 5) 渋谷真人: 特公昭 62-50811.
- 6) 渋谷真人: “位相シフト法”, 半導体研究所報告, **30**, 3 (1995) 9-16.
- 7) 岡崎信次: “位相シフト技術”, *光学*, **20** (1991) 488-493.
- 8) 堀内敏行, 鈴木正則, 渋谷真人: 特公平 5-52487.
- 9) N. Shiraishi, S. Hirukawa, Y. Takeuchi and N. Magome: “New imaging technique for 64 M-DRAM,” *Proc. SPIE*, **1674** (1992) 741.
- 10) M. Noguchi, M. Muraki, Y. Iwasaki and A. Suzuki: “Subhalf micron lithography system with phase-shifting effect,” *Proc. SPIE*, **1674** (1992) 92.
- 11) N. Shiraishi and K. Komatsu: “A new imaging method with a spacial filter for incoherent stream,” *Opt. Rev.*, **2** (1995) 207-210.
- 12) H. Ooki, M. Komatsu and M. Shibuya: “A novel super-resolution technique for optical lithography-nonlinear multiple exposure method,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, **33** (1994) L 177.