

解説

ミラー結像を用いたリソグラフィ

鈴木 章 義

キヤノン(株)半導体機器開発センター 〒321-32宇都宮市清原工業団地 20-2

(1994年7月11日受理)

Lithography with Mirror Projection Systems

Akiyoshi Suzuki

Semiconductor Production Equipment Development Center, Canon Inc.,
20-2, Kiyohara-kogyo-Danchi, Utsunomiya 321-32

1. 緒 言

微細加工における光リソグラフィの発展は投影光学系の発展と共にある。投影光学系が本格的にリソグラフィの分野に登場したのは16~64 K DRAM時代の1:1のミラー走査からであるが、以降256 K~1 M DRAM前後の時代を境にして、投影光学系はレンズ技術の粋を尽くしたステッパーへ移行した。これはミラー光学系が1:1の結像に限定された、あまりにも自由度の限られた光学系であったためである。実際ステッパーの時代に入ってもミラー光学系の系譜は等倍で続いてはいたが、メインの流れとなることはなかった。

この間、ステッパーのレンズ技術は高NA化、短波長化の流れによって長足の進歩を遂げた。しかしながら、露光波長が超高圧水銀灯でg線からi線へ移り、さらに短いKrFエキシマレーザーの波長域にまで達すると、露光光学系の見直しも必要となっている。その理由の一つは通常DUVと言われるこの波長域で使用できる硝材が実用的には石英しかなく、色収差の補正が困難であること、またもう一つは画面サイズの拡大と高NA化の結果として光学系が大型化したためである。

本稿ではリソグラフィ領域におけるミラー光学系の歴史を振り返ると共に、最近の発展について紹介してみることとしたい。

2. リソグラフィにおけるミラー光学系

ミラー光学系は天体望遠鏡の発達¹⁾を中心に歴史が深い。微細加工の分野に適用したのは図1のOffnerの

発案になる等倍結像システム^{2,3)}にその端を発する。通常、ミラー光学系は結像の特殊解を中心として用いられることが多い。例えば天体望遠鏡の主鏡には平行光を1点に収差なく結像させる放物面鏡が用いられることが多いし、また等倍結像系では球面ミラーの中心点から発した光が中心点に収差なく戻るといった性質が利用される。Offnerの2枚鏡系は等倍結像の性質を同心を利用しながら変形して、軸上から軸外に発展させたものである。

図1の2枚鏡等倍結像系の特徴は軸上を用いず、軸外の特定像高のみを用いるところにある。光束のけられの関係で軸上が使えないことから、光学系は軸外の1像高に対して最適となるように収差補正される。一定像高の軌跡は円環状の良像域を形成するが、この領域の一部である円弧の部分のみを照明して走査露光し、露光域全体をカバーする。Offnerの系は同心の特性とGrammatin⁴⁾による非点収差補正の原理を応用して、その後さまざまな発展系^{5,6)}を生んだが、等倍結像の範囲から逸脱することはなかった。

走査型の系とは別に、等倍のステッパーとして用いられたミラー系にDyson光学系⁷⁾がある。Dyson光学系も等倍ミラー結像の原点より出発するが、コンセントリック性を守りながら、軸上付近の補正範囲を広げる努力をSonnarの設計に準拠する⁸⁾形で行った結果、図2に示す独自の発展⁹⁾を遂げた。最近ではこの系を図3のような形でDUV領域にまで広げようとする試みがあるが¹⁰⁾、結像倍率はやはり等倍である。ミラー縮小系としては、光束のけられがあり軸上付近の狭い領域しか使用できない図4のSchwarzschildの反射光学系¹¹⁾が僅か

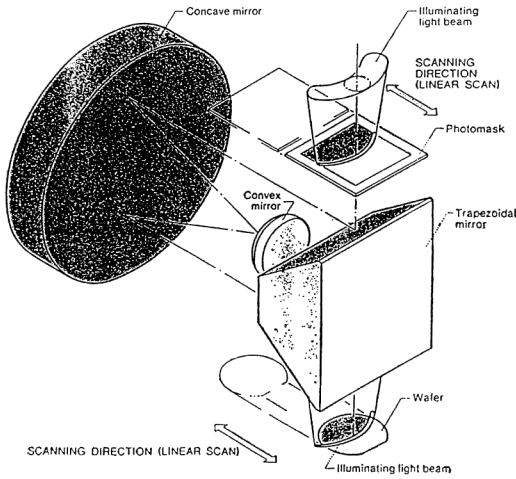


図1 円弧スリット走査による等倍2枚鏡系の露光

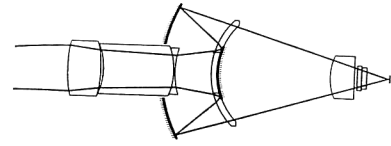


図4 Schwarzschild の縮小光学系

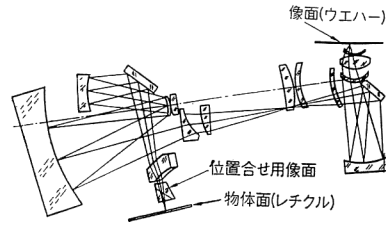


図5 2回の結像を用いたミラー縮小系

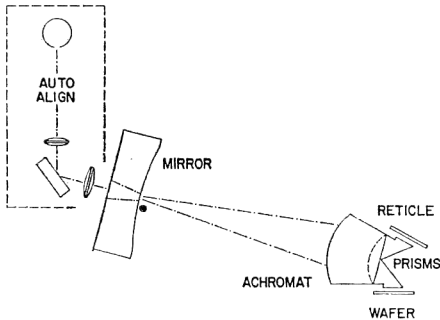


図2 Dyson 光学系の発展系

に実験的に用いられるに過ぎなかった。

しかしながら光学系に対して強い要求があったのはミラーを用いた、けられのない、広画角の本格的縮小光学系の開発であった。特許の領域では全部をミラーで構成

した光学系を含めさまざまな提案がなされているが、実用化された形で現れたのは図5に示すカタジオプトリック光学系¹²⁾からである。究極の形であるミラーのみで構成した投影系については残念ながら現在のところ実用的な解が見つけれられておらず、折衷案としてミラー+レンズの形で光学系の開発が進められている。

3. ミラー光学系の特徴

ミラー光学系の特徴が色収差の補正にあることは、リソグラフィの分野でもカメラや望遠鏡と全く同一である。色収差が重要なのは、DUV 領域で透過率と均一性の観点からリソグラフィ用として使用に堪える硝材が石英しか存在しないことに起因する。単一硝材では色収差の補正が不可能であり、色収差は石英の分散に合わせて出っぱなしとなる。

リソグラフィ用に設計した KrF エキシマレーザー用

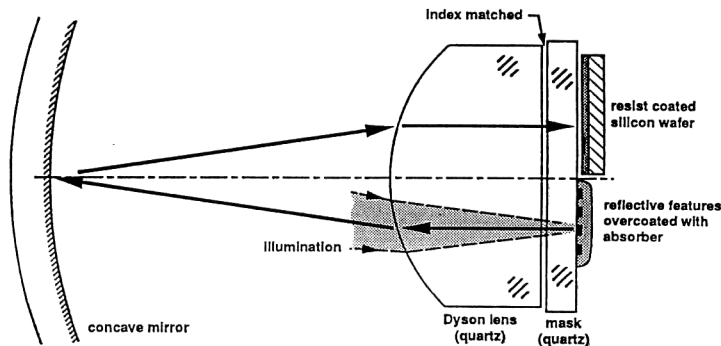


図3 DUV で提案されている Dyson 光学系

レンズでは例えば軸上色収差として $0.164 \mu\text{m/pm}^{13}$ という値が報告されている。この値は投影光学系の諸条件によって多少変化するが、ほぼこの近傍の値に納まる。現在投影光学系の焦点深度は $1 \mu\text{m}$ 前後であり、光源の波長幅によって生じるピントずれを抑えるには、 300 pm ほどあるエキシマレーザーのスペクトルを狭帯域化することが必須となる。光源の波長半値幅の許容量は軸上色収差から逆算して数 pm となり、さらに狭帯域化ユニットという外部制御素子を用いてコントロールする波長の安定性・制御性にも 1 pm 以下の厳しい値が求められる。要求値は NA を大きくするほど小さくなり、レーザーにとって厳しい状態となりつつある。

系全体としての色特性は、光を曲げるパワーを色収差の発生しないミラーに分担させることによって大幅に改善される。したがってミラー系の第1にあげられる特徴は光源に対する要求の緩和となって現れる。実際、図5のミラー系の許容波長幅は 15 nm とレンズのみの系に対して桁違いに大きく、狭帯域化エキシマレーザーの代りに XeHg ランプを用いることができるほどとなる。

第2にあげられるのは短波長への発展性である。メインのパワーをミラーに持たせてレンズ枚数を少なくできることは吸収率、色収差の両面で短波長化に有利である。石英の分散は次世代と目される ArF エキシマレーザー (193 nm) の波長で、KrF エキシマレーザー (248 nm) における値の3倍弱になることが知られており¹⁴、レンズ系だとレーザー狭帯域化への要求が現状では困難なほど厳しくなる。ただし ArF についてはレジストなど周辺技術も含めまだ未成熟で、今後の進展に俟つところも多い。

続いてあげられる効果に定在波の軽減¹⁵がある。種々の段差上にパターンを焼き付けるリソグラフィ工程では、像を形成するレジスト層内で基板反射による定在波の発生をいかに抑えるかが重要課題である。広い波長幅を用いることができれば、波長による平均化効果で定在波がならされ、基板状態の影響の小さい像形成を行うことができる。

またミラー系を用いる利点として光学系がコンパクトにできることもあげられる。リソグラフィ用のレンズは高 NA と大画角という二つの条件を満たすため、ガウス型の変形タイプ¹⁶となる。高 NA のガウス型レンズの特徴は、いったん広げた光束を絞り位置で小さくし、絞り近傍の凹面で再び広げてまた収束させるという形式となる。したがって高 NA 化と大画角化という方向は必然的にレンズを大きくすることとなり、最近では総重

量 500 kg を越えるレンズも出現したといわれる。

ミラー系の場合にはほぼ絞り位置にミラー面が存在し、基本的にはミラーに広がってきた光束を単純に折り返す形の光路となるため、光学系を小さくできる可能性がある。使用できる唯一の硝材である石英の値段が高価なため、光学系をコンパクトにできるというメリットには大きなものがある。

4. 縮小ミラー光学系の実際

縮小ミラー光学系として最初に実用化された光学系が図5に示したものであることは既に述べた。この光学系は NA が 0.35 で露光画面サイズ $20 \times 32.5 \text{ mm}^2$ 縮小倍率 $1/4 \times$ 対象線幅 $0.5 \mu\text{m}$ の系である。結像光束が曲がっていても光学系は共軸系で、光は1回結像してからまた広がり、2度の結像で所望の収差に補正される。

この光学系の特徴は Offner 型の等倍ミラー系と同様に軸上の結像光束は使用せず、軸外の特定像高のみを用いることにある。したがって収差はその特定像高で最適となるように補正され、像高一定の軌跡の一部である円弧状の領域が露光に用いられる。画面全体の露光は円弧スリットをレチクルおよびウェハーに対して相対的に走査して行われる。実際の走査は光学系が固定で、レチクルとウェハーを縮小比に合わせて $4:1$ で精密に同期して動かすことによって達成される。

図5の光学系は色収差が 15 nm の範囲で補正されており、露光光源として XeHg ランプが使用できる。しかしながら光路が複雑に重なっているため軸外光束をけらずに用いる配置条件が厳しく、高 NA 化は困難である。また2回結像を行っているため、光学系自体の大きさもコンパクトとはいえない。

一般にリソグラフィの領域では diffraction limited な像を忠実性よく結像するために、若干の例外はあるが¹⁷カメラの望遠レンズ等のように瞳の中央に大きな vignetting を発生させることは行わない。このような制約条件を克服するため、図6に示すビームスプリッタを用いた光学系¹⁸も提案されている。以下、このデータをもとに解析を行う。

図6の系は大きなガラスブロックからなるビームスプリッタを用いているのが特徴である。いったんビームスプリッタを透過した光はミラーで反射され、続いてビームスプリッタを反射して結像面に到達する。NA は 0.45 、画面サイズ $\phi 30 \text{ mm}$ 、縮小率 $1/4 \times$ で、図5の系よりさらに高 NA 化されている。ビームスプリッタを用いた結果、軸上光束も利用できるため、特別に vignett-

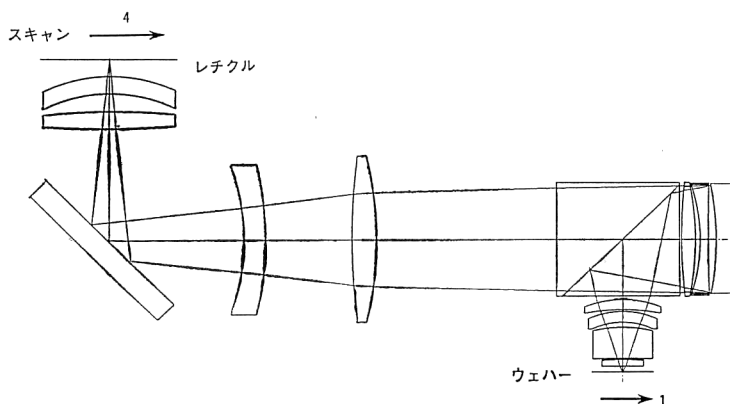


図6 ビームスプリッタを用いたミラー縮小系

ing の影響を斟酌する必要はない。実際、この系には変形例としてさらに高 NA 化された設計もあり、現状発表されているレンズ系と仕様の的に遜色がない。したがってこのミラー結像系は露光波長 (0.248 nm) に見合った $0.25 \mu\text{m}$ の解像を実現できるものと評価できる。

露光は光軸を含む長方形のスリットで図5の系と同じく走査を行って全面をカバーする。スリット形状より、使用像高は図5のように軸外の特定像高ではなく軸上から軸外に至る全ての像高となる。このため図6の系は特に走査型ではなく、ステッパー用の投影光学系としても十分用いることができ、また色収差補正も含めて考えれば、レンズ系のみより仕様の高い光学系に挑戦することができる。実際、図6の色収差の補正域は 8 nm で、図5の系より若干小さくなっているとはいえ、レンズ系の許容値である 1 pm のオーダーに比べ桁違いであり、光源として同じく XeHg ランプを用いることができる。

この系で最も特徴のある光学素子はビームスプリッタである。系の構成上 100 mm 角以上の大きな石英のブロックが必要とされるが、材質の均一性には従来以上の厳しい値が要求される。周期的な非均一性があるとブロック内で位相格子が形成され、ゴーストイメージが発生することも報告されている¹⁹⁾。またビームスプリッタのコーティングは、位相特性がそのまま波面収差として結像に影響を与えるため、膜特性がレンズ系以上に重要な役割を果たす。

ビームスプリッタを用いた光学系の変形例には既に様々な提案がなされている。ビームスプリッタをプリズム型から板ものにした形式、あるいはミラー系本来の特徴である色収差を改善したタイプなどがあるが、光量の犠牲はあるものの vignetting という大きな要素を解決し

たことで、図6の形式は光学系の新しい可能性を開いたといえよう。

5. 走査の効果

リソグラフィ用のミラー光学系を特徴付ける大きな要素に走査露光を行い、全画面をカバーするという思想がある。

走査露光法の最大の特徴は露光できる画面サイズにある。この方法だと走査する距離を長くさえすればいくらでも大きな画面サイズに対応できることになり、ステッパーがたどってきた「大画面化即大きな光学系」という定式を否定することができる。特に DUV 領域では石英を用いるため光学系の大きさがシステムの構成上重要な要素となり、大きさに歯止めがかかる効果は大きい。

性能的な点で興味深いのは走査により様々な像高を用いるため起こる収差の平均化である²⁰⁾。平均化される収差は像面、ディストーションなど多岐にわたる。リソグラフィの領域では画面全体の像の均一性を特に重要視するため、平均化は効果的である。ただし、ディストーションを平均化するとその操作内で像ずれが生じて線幅の均一性に影響を与えるといった副作用もあり、予め高精度な系が要求されることは言うまでもない。

走査露光のもう一つの利点は走査しながらダイナミックにフォーカス制御を行えるところにある。ステッパーのような一括露光でレベリングして得られる平面度は、画面が大型化するにつれて悪化する。これに対し、高解像力化に伴い深度の要求はより厳しくなるという矛盾がある。ダイナミックなフォーカス制御はスリット内のみのフォーカス補正を考え、露光走査と同時にウェハー形

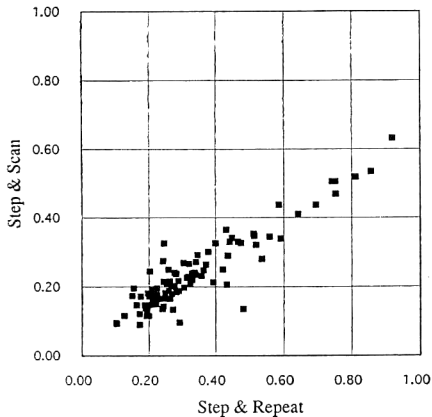


図 7 スリット走査による平面度の矯正効果

状をトラッキングする方式である。これだとスリット面積が全画面より小さい分、一括露光より平面からのウェハーのずれを小さくできる可能性がある。図 7 は横軸にステッパーの 28 mm 角での平面度、縦軸が $5 \times 28 \text{ mm}^2$ のスリットで走査したときに補正される平面度を示したものである。狭いエリアで最適化できる分、平面度が小さい値となり、補正が効果的に働いていることがわかる。

走査光学系では、走査によって今までの一括露光の光学系ではなかった時間という新しいパラメータが加わって自由度が増え、新たな可能性が生まれる。しかし一方ではその可能性を実現するための高度な制御技術が不可欠になる。制御技術は光軸と直交する方向に 4 : 1 という異なる速度で対象物を動かすと同時に、フォーカスのため光軸方向にも駆動を行う複雑なものである。リソグラフィが単なる光学技術だけでなく、周辺も含めた総合技術となっていることの証左であろう。

6. 結 語

リソグラフィにおけるミラー光学系は長く閉じ籠っていた等倍の世界から、新たな時代に移行しつつある。特にエキシマレーザー波長域の DUV の世界では、光による $0.25 \mu\text{m}$ 解像の確立を目指して、独自の技術を築いていくものと思われる。今後の発展に注目したい。

文 献

- 1) R. Kingslake: *Lens Design Fundamentals* (Academic Press, 1984).
- 2) A. Offner: *Opt. Eng.*, **14** (1975) 130.
- 3) A. Offner: U.S. Patent No. 3, 748, 015 (1973).
- 4) A. P. Grammatin: *Sov. J. Opt. Technol.*, **38** (1971) 210.
- 5) A. Suzuki: *Appl. Opt.*, **22** (1983) 3943.
- 6) A. Offner: U.S. Patent No. 4, 293, 186 (1981).
- 7) J. Dyson: *J. Opt. Soc. Am.*, **49** (1959) 713.
- 8) 松居吉哉: レンズ設計法 (共立出版, 1972).
- 9) R. Hershell: *Proc. SPIE*, **221** "Semiconductor Microlithography V" (1980) 39.
- 10) R. F. Pease: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **31** (1992) 4103.
- 11) D. C. Schaver, *et al.*: *Proc. SPIE* **1674**, "Optical/Laser Microlithography V" (1992) 766.
- 12) J. D. Buckley, D. N. Galburt and C. Karatzas: *J. Vac. Sci. Technol.*, **B7** Nov/Dec (1989) 1607.
- 13) T. E. Jewell, *et al.*: *Proc. SPIE*, **774** "Lasers in Microlithography" (1987) 124.
- 14) M. Sasago, *et al.*: *Proc. SPIE*, **1264** "Optical/Laser Microlithography III" (1990) 466.
- 15) M. Barrick, *et al.*: *Proc. Microlithography Seminar Interface '90* (1990) p. 245.
- 16) E. Glatzel: *Proc. SPIE*, **237** "1980 International Lens Design Conference" (1980) 310.
- 17) S. Wittekoek, *et al.*: *Proc. SPIE*, 1264 "Optical/Laser Microlithography III" (1990) 534.
- 18) D. M. Williamson: USP 4, 953, 960 (1990).
- 19) A. K. Pfau, *et al.*: *Appl. Opt.*, **31** (1992) 6658.
- 20) H. Sewell: *Semicon/Korea 92 Tech. Symp.* (1992) p. 43