

ステッパー用石英ガラスについて

(株)ニコン光学本部 牛田 一雄

Fused silica for optical steppers

Kazuo Ushida

NIKON Corporation, Industrial Optics Dept.

1. はじめに

光学式ステッパーは、現在 VLSI 生産における主力露光機となっているが、年々要求される解像力と光学系の限界との差が縮まってきている。ステッパー投影光学系に要求される解像力は、その時代に生産されている DRAM（記憶保持動作が必要な随時書き込み読み出しメモリー）に採用されるデザインルールによって代表される事が多い。DRAM のデザインルールとその開発・量産時期については、一般に Table 1 の様に予想されている。従って、1990 年現在が 4 MDRAM の本格的量産と 16 MDRAM の開発がスタートした時期である事を考えると、1991 年以降に出荷されるステッパーには、 $0.5\mu\text{m}$ のデザインルールに対応する解像性能が要求される。現在ステッパー用の光源としては、超高圧水銀灯の g 線 (436 nm) か i 線 (365 nm) が使われているが、デザインルールの微細化に対応するため、より波長の短い i 線が主力になりつつある。 $0.5\mu\text{m}$ デザインルールの

16 MDRAM 迄は、i 線ステッパーで量産されると予想され、その際のリソグラフィーに関しても従来技術の延長で可能であると考えられている。問題はその次の 64 MDRAM である。これについては、i 線ステッパーで生産可能か、エキシマステッパーが必要になるのか意見の別れるところである。エキシマステッパー用光源としては、KrF (248 nm) と ArF (193 nm) が注目されている。超高圧水銀灯には i 線より短波長のスペクトルも存在するが、それを使用せずにレーザー光源に切り換える主な理由は、レーザーの単色性の良さにある。300 nm 以下の波長領域では、レンズとして使用できる光学材料が石英と螢石の二種だけしかない。レンズの色収差（波長によるピント、倍率等のズレ）を補正するためには、なるべく分散の差が大きな二種類以上の材料がある事が望ましいが、石英と螢石の分散差は十分と言えず、色収差の補正は困難である。現在のエキシマステッパーでは、狭帯化レーザー（半値幅 0.005 nm 以下）を使い、非色消レンズでもコントラスト低下がないレベルまで単色性を高めている。本稿では、光学ステッパー結像系の現状と将来予測について筆者の考えを述べた後、エキシマステッパー用屈折材料の最有力候補である石英ガラスに期待される品質について言及したい。

Table 1 DRAM time schedule

Year	R & D	Production
1990~	16MDRAM	4MDRAM
1993~	64MDRAM	16MDRAM
1996~	256MDRAM	64MDRAM

2. 投影レンズの解像度と焦点深度

ステッパーの解像度と焦点深度は、露光に使う光の波長とレンズの N. A. によって決まる。N. A. は開口数とも呼ばれ、次の式で定義される。

$$N. A. = n \sin \theta$$

n: 像空間の屈折率 (通常 1.0)

θ : レンズにより結像する光が光軸となす角度
細かいパターンほど、回折光の角度が大きくなり、レンズの N. A. が大きくなければ回折光を取り込めなくなる。また、波長 λ が短いほど同じパターンでの回折光の角度は小さくなり、従って N. A. は小さくてよいことになる。解像度と焦点深度は、N. A., λ で次式のように表わされる。

$$\text{解像度} = k_1 \cdot \frac{\lambda}{N. A.} \quad (1)$$

$$\text{焦点深度} = k_2 \cdot \frac{\lambda}{N. A.^2} \quad (2)$$

(1) 式の解像度は、ステッパーで焼き付け可能な最小のデザインルールと考えてよく、レジスト性能等にも影響されるため、比例定数の k_1 を付けて表現するのが慣例である。量産工場では、 $k_1 = 0.8$ 程度が普通であるが、研究・開発レベルでは、 $k_1 = 0.6$ に相当するデザインルールまで対応可能と言われている。焦点深度の (2) 式に関しては、誤解される事が多く、注意を要する。(2) 式で定義される焦点深度は、与えられた N. A. と λ で決まる解像度が維持される範囲である。N. A. を固定して波長 (λ) を短くすると、(1) 式により解像度が向上し、(2) 式により焦点深度は減少するが、この場合の焦点深度の比較は、同じパターンに対しての比較ではない。N. A. 固定で波長を短くした場合、同じパターンに対する焦点深度は深くなる。解像度を向上させるためには、N. A. を高くするか λ を短くするかのどちらかであるが、(2) 式から明らかな様に、 λ を短くする方が深度の点で有利である。解像度と同様に、焦点深度もレジスト性能等にも影響されるため、(2) 式にも比例定数 k_2 が付けられている。目安としては、 $k_2 \approx 1.0$ と考えてよい。

結像に関係するパラメータとして、N. A., λ と共に重要な σ がある。 σ はコヒーレンスファクターとも呼ばれ、次式で定義される。

$$\sigma = \frac{\text{照明系の N. A.}}{\text{投影レンズのレチクル側 N. A.}}$$

ステッパーの結像光学系では、 $\sigma = 0.5$ 近辺に設定される事が多い。 σ 値と解像力、焦点深度等を簡単な式で結びつけるのは無理があるため、レジスト性能等と同様に、 k_1, k_2 を決める諸条件のひとつとして扱われる。

3. 光学系の収差

現実の光学系においては収差が存在するため、必ずしも理論通りの解像度や焦点深度が得られるとは限らない。収差には設計上残存したものと、製造誤差により発生するものがあるが、基本的にはザイデルの 5 収差と呼ばれる次の各収差に分類される。

- 1) 球面収差
- 2) コマ収差
- 3) 非点収差
- 4) 像面湾曲
- 5) 歪曲収差

上記 5 収差は単色光に対して定義されるが、実際の光学系では結像光に波長幅があるため、色収差も存在する。各収差について簡単に説明してみよう。

球面収差: Fig. 1 の様に、無限遠から来る平行光束を結像する凸レンズを考える。屈折面が球面で形成されているレンズでは、一般にレンズ周辺部を通る光線を必要以上に曲げ過ぎる特性があるため、周辺光は光軸近傍の光束が結像する位置よりもレンズに近い所に集光する。これを球面収差と呼ぶ。球面収差が存在すると、像コントラストが低下する。

コマ収差: レンズ光軸からはずれた所での結像

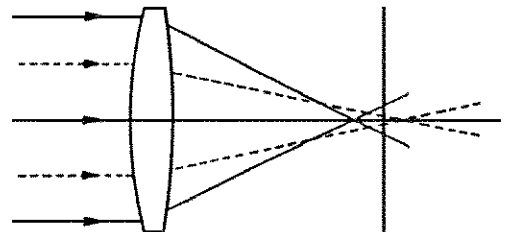


Fig. 1. Spherical aberration

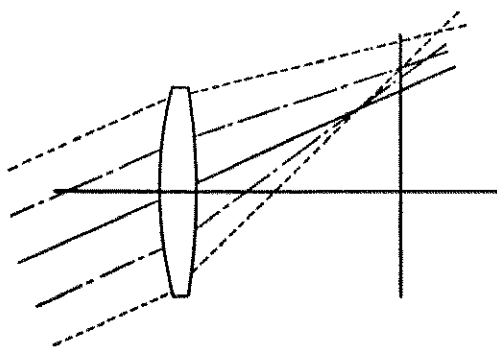


Fig. 2. Coma

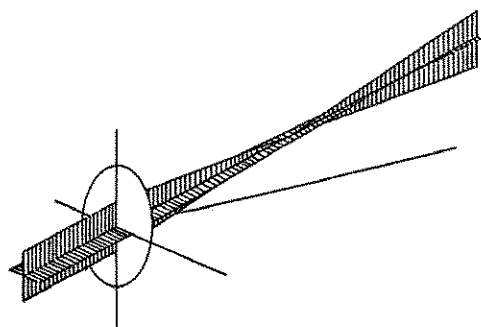


Fig. 3. Astigmatism

には、非対称な収差が存在する。Fig. 2では、結像光束の中心となる光線（厳密には、開口絞りの中心を通る光線＝主光線）に対し、それを取り囲む光線群が光軸より遠い側に焦光している。コマはすい星の中心部の核のまわりにぼんやり光る部分を指すが、点像（例えば星）をコマ収差のあるレンズで結像させると、すい星の様に尾を引いて見える。コマ収差という名称はここに由来する。

非点収差：Fig. 3の様に、レンズ光軸からはずれた場所での結像において、主光線近傍の光束の結像位置が方向によって異なる現象を言う。レンズ面の曲率半径が方向によって異なる場合には、光軸上にも非点収差が発生する。乱視の人の眼球は、曲率半径が方向により異なる場合が多く、視野中心部でも非点収差が存在する例である。非点収差があると、縞模様解像力チャートに対する

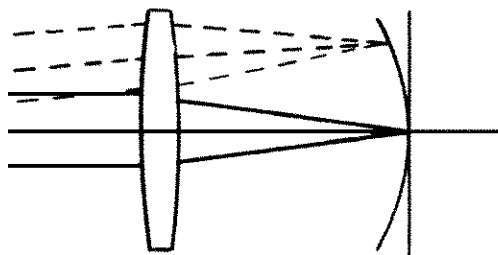


Fig. 4. Field curvature

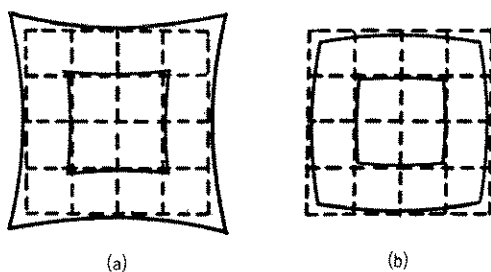


Fig. 5. Distortion (a) Pin-cushion (b) Barrel

ベストフォーカス位置が縞の方向により異なるため、全体としての焦点深度が低下する。

像面湾曲：原版が平面であっても、レンズによって結像されると必ずしも平面に結像せず、一般には球面上に結像する。Fig. 4の様に、レンズ光軸上のピント位置と、周辺部のピント位置がずれるわけである。像面湾曲が存在すると、非点収差と同様、全体の焦点深度を低下させる。

歪曲収差：レンズの倍率、又は焦点距離によって決定される理想像点からのずれに関する収差である。光軸方向のずれは、像面湾曲であるが、歪曲収差は光軸と直交する結像面内でのずれである。Fig. 5の様に糸まき型とたる型に分類される。ステッパーは、多色刷りの版画の様に、一枚のウエハーに対して複数レチクルの像を次々と焼き付けていくため、ステッパー間で歪曲収差の特性が異なると位置ずれが発生してしまう。全露光を単一のステッパーで行なうのは、生産の効率上好ましくないため、歪曲収差の少ない事がステッパー

レンズに求められる性能として重視されている。

色収差：レンズ材料の屈折率が光の波長により異なる（分散）ため、意識的に補正しない限り、レンズの結像位置は波長によって異なる。これを色収差と呼ぶ。ステッパー用光源として使われている超高圧水銀灯のi線およびg線は、スペクトルの半値幅が数nmのレベルであることから、少なくともその範囲では色収差が補正されている必要がある。エキシマステッパーの場合は、通常狭帯化されたレーザーが使用され、スペクトル半値幅を0.005nm以下にできるため、非色消タイプの投影レンズでも使用可能である。

4. 超高圧水銀灯を光源とするステッパー

16 MDRAMの量産までは、超高圧水銀灯を使った従来型ステッパーで露光可能と言われている。16 MDRAMのデザインルールである $0.5\mu\text{m}$ のリソグラフィーに対しては、 $\text{N.A.}=0.5$ のi線レンズで対応できると考えられている。

更に細かいデザインルールに対応するためには、より高N.A.のレンズが必要になる。i線レンズの限界がどこにあるかを見極める目的で、 $\text{N.A.}=0.65$ のi線レンズを試作し、解像力と焦点深度を調査した。Fig. 6は、その結果である。目標を64 MDRAMのデザインルールである $0.35\mu\text{m}$ に設定すると、最新のレジストを使用しても焦点深度は $0.8\mu\text{m}$ しかない。（レジスト厚 $1.2\mu\text{m}$ の時）多層レジストプロセスを導入すれば、図中のレジスト厚 $0.6\mu\text{m}$ に相当する深度が得られるが、そ

れでも $1.0\mu\text{m}$ の焦点深度しかなく、ICの量産するための十分なマージンとは言い難い。その上、多層レジストプロセスは製造コストがかかる点で従来のシングルレジストプロセスと比較にならないため、IC量産現場では極力これを使わずに、露光装置側の進歩できりぬけたいという声強い。

最近話題になっている位相シフト法などは、露光装置の進歩とは言えないかも知れないが、位相シフター付レチクル（原版）を使うことで焦点深度や解像度等の限界を大きく引き上げることができ、しかもレチクルをいったん作ってしまえば、プロセスコストは従来と変わらないため、注目度が大きい。通常のレチクルを使う場合と比較して、照明条件を変えなければ効果が上がらない事が知られており（ σ を小にして、コヒーレンスを上げる必要がある）、装置側での対応が必要となる。ただ、位相シフト法は、焼き付けるパターン形状により得手・不得手があり、孤立パターンよりも周期パターンに対しての方が、より効果的である。位相シフト法が実際のIC製造時のパターンに対してどの程度有効であるかについては、現在各ICメーカーおよび装置メーカーで研究中である。64 MDRAMの量産に対し、i線ステッパーが使われるか否かについては、次に述べるエキシマステッパーの進歩とポテンシャルを考え合わせた上で論じられるべきであるが、エキシマステッパーが現時点でかかえている諸問題の解決に対して悲観的な見方をしている技術者は、i線にふみとどまって $0.35\mu\text{m}$ デザインルールを達成しようと努力している。i線以外に手段がないとすれば、コストのかかる多層レジストプロセスに位相シフト法を組み合わせても、64 MDRAMをi線で量産することになるであろう。

5. エキシマレーザーステッパー

エキシマレーザーは、使用するガスにより発振されるレーザー光の波長が異なる。ガスの種類と波長の関係についてTable 2にまとめてみた。これらのうちリソグラフィー用レーザー光源として現在注目されているのは、KrF (248 nm) と ArF (193 nm) エキシマレーザーである。とりわけ KrF エキシマステッパーは、試作レベルとは言え各露

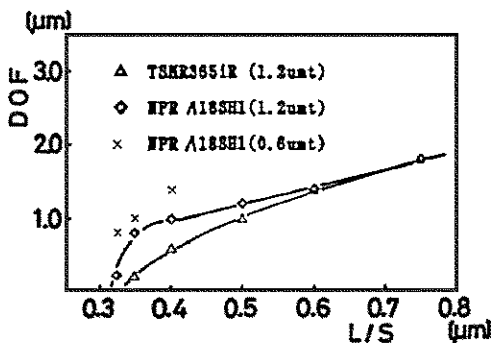


Fig. 6. The Depth of focus for Various L/S Patterns with i-line 0.65 N.A.

Table 2 Wave length of excimer laser

	F	Cl	Br
Xe	351 nm	308 nm	282 nm
Kr	248	222	
Ar	193	175	
F	153		

光装置メーカーにより製品化され、IC メーカーの研究・開発セクションで実際に使われている。ArF エキシマレーザーステッパーに関しては、まだ開発がスタートした段階であり、KrF と同列では論じられない。193 nm の光は、空気中の酸素と反応するため、露光装置の光路から酸素を除去しなければならず、装置構成上の制約は増えるが、短波長であることによるポテンシャルの高さには大きな魅力がある。波長より 3～4 割大きいデザインルールがその波長での限界とすると、193 nm で 256 MDRAM が可能ということになり、21 世紀に入っても光リソグラフィーが IC 量産用露光装置の主流であることになる。

現在のエキシマステッパーが解決すべき問題点をまとめると、以下の様になる。

○レーザの部品寿命の延長とメンテナンスコストの低減

○短波長光に適合する感光剤の開発

○ステッパーのアライメント精度の向上

レーザの部品寿命とメンテナンス性については、研究・開発用として使われている間は大きな問題にならないが、量産用装置を前提とするとまだまだ心もとないレベルにあると言える。KrF レーザの狭帯化については、半値全幅で 0.003 nm が達成されており、現時点ではほぼ満足できる値であるが、将来のより広フィールド・高解像度のレンズにおいてはレンズ自体のサイズが今以上に大型化すると予想され、そのため色収差の影響がより厳しくきいてくるはずである。筆者の個人的見解であるが、半値全幅で 0.002 nm になれば将来を考えても十分であると思う。ArF レーザに関しては、狭帯化がより困難であり、その上屈折材の分散（屈折率の波長依存性）もより大きくな

る方向であるため、色収差によるコントラスト低下をどう防ぐかが重要でかつ困難な問題である。そのため、ArF エキシマレーザーステッパー用の結像光学系は、屈折系だけでは解がなく、色収差を補正する上で有利な反射光学系、又は反射・屈折の混合光学系を開発すべきであるとの意見もある。

レジストに関しては、KrF 用としていくつか開発されているが、g 線や i 線用のレジストと比較して完成度が低いという評価が一般的である。ArF 用はさらにむずかしく、現時点では比較にならない段階にある。

さて、問題の透過屈折材であるが、KrF およびそれ以下の波長の光に対して十分な透過率を有し、かつレンズとして使えるものとして、石英と螢石の二種類がよく知られている。超高圧水銀灯を光源とする従来型のステッパー用投影レンズでも、フィールドサイズや N.A.等のスペック向上に伴い段々と大型化しており、硝材についても大型で高品質なものが要求される様になってきている。エキシマステッパーのターゲットは、64 MDRAM 以降の IC であり、投影レンズの解像度が高くなければならないだけでなく、フィールドサイズが広くなければ効率の良い量産がしにくい。従って、将来エキシマステッパー用のレンズ材として、相当大型のものが必要になると予想される。現在 i 線レンズが g 線に代わってステッパーの主流になりつつあるが、それは i 線に対して十分な透過率を確保し、高い内部均質性を持った大型の硝材が得られる様になったからである。エキシマレンズにおいても、レーザに関する諸問題が解決しさえすれば、あとは高品質の屈折材を確保できるか否かがキポイントとなるであろう。

6. ステッパー用投影レンズに必要な石英ガラス

ステッパー用の結像光学系に石英ガラスが使われる事を想定した場合、以下の様な品質が要求される。

- 透過率 (10 mm) ≥99.9%……安心レベル
≥99.0%……最低レベル
- サイズ ≥200 mmφ, 50 mm t

- 蛍光 250~500 nm 付近で強い蛍
 光が出ない事
- ソラリゼーション $\leq 0.1\%$ (10 mm ϕ)
- 内部均質性 1×10^{-6} 以下
- 歪 (複屈折) 1 nm/cm 未満

上記数値には筆者の独断も含まれており、絶対的なものではないが、大きくはずれているとは思わない。現在手に入る石英ガラスのサイズから考えると、均質性を維持した上での 200 mm ϕ , 50 mm ϕ 以上は大変なレベルであり、また透過率に対しての要求も、ArF の波長域では非常に困難な値と思われる。石英ガラスの開発にたずさわる技術者の、より一層のがんばりを期待したい。

7. おわりに

次世代の IC 製造用露光装置には、エキシマレーザー等の DUV 光源が使われるとの予想が一般的である。その場合、どのような光学系になるのか、まだ決まっていないが、レンズ材料の諸性能（例えば透過率）が光学設計の要求を満たせる事がすべての前提である。IC 製造装置は光を使うもの以外に E ビームも注目されており、次世代または、次々世代は E ビームに移行するという意見もある。光学設計に従事している筆者としては、ぜひとも高品質の大型石英ガラスを使って、DUV 露光装置を実用化し、光リソグラフィーの時代を伸ばしたいと考えている。

〔筆者紹介〕



牛田 一雄 (うしだ かずお)
昭和 50 年 東京大学工学部応用物理学科卒、昭和 50 年 (株)ニコン入社、現在ステッパー用投影レンズの設計・開発を担当。

〔連絡先〕

〒140 東京都品川区西大井 1-6-3
株式会社ニコン
光学本部第二光学部第二光学課
TEL 03-3773-1111

Abstract

Due to the continuous requirement for smaller design rules of VLSI devices, exposure wavelength of steppers is now being changed from 436nm (g-line) to 365nm (i-line). I-line is considered to be the shortest wavelength for which optical glass has sufficient transparency to be used for stepper lenses.

Next generation exposure equipment will be either DUV optical steppers or non-optical apparatus such as EB (electron beam). In DUV projection optics, fused silica is one of the most promising candidates for lens material. What kind of optics will be adopted for DUV exposure equipment will be very much dependent upon quality and size of refractive material available at the time.

In this paper, the present status of optical steppers is first discussed and then the author's personal view on the near future exposure equipment is shown.