

投影露光装置と石英ガラス

㈱ニコン ガラス事業室

新田 祐平

Synthetic Silica Glass for use of a Semiconductor Production Equipments

Yuhei Nitta

Glass Division, NIKON Corporation

1. はじめに

近年、LSIの微細化が進み、現在では次世代の65 nm ノードや45 nm ノードを見据えて各種半導体製造装置の開発が加速している。当然のことながら露光装置も例外ではない。近年においては、ウェハ面上により微細なマスク（レチクル；以下レチクルとする）パターン像を転写する、すなわち解像度を向上させるために、光源の波長を短くすることが提案されている。例えば、これまでのg線（436 nm）やi線（365 nm）から、KrF（248 nm）、ArF（193 nm）エキシマレーザー、F₂（157 nm）レーザーへと短波長化が進められている。

上記の投影露光装置内の光学系に用いられる光学部材としては、使用する光源の波長に対する透過率が高いことが望まれる。これは、投影露光装置の光学系は多数の光学部材の組み合わせにより構成されており、たとえレンズ1枚当たりの光損失が少なくとも、それが光学部材の使用枚数分だけ積算されると、トータルでの

透過率低下の影響が大きいからである。透過率が低い光学部材を用いると、露光光を吸収することによって光学部材の温度が上昇して光学部材内の屈折率の不均質化が生じ、さらには光学部材の局所的熱膨張によって研磨面の変形をもたらす。これによって光学性能の劣化が生じる。特に、投影光学系においては、より微細かつ鮮明な投影露光パターンを得るために、光学部材の屈折率の高い均質性が要求される。これは、屈折率のばらつきにより光の進み遅れが生じ、これが投影光学系の結像性能に大きく影響するからである。

一般に、i線よりも長波長を利用した投影露光装置では、結像光学系中の照明光学系あるいは投影光学系のレンズ部材として多成分系の光学ガラスが用いられている。が、このような光学ガラスの場合、光の波長がi線より短くなるとその光に対する内部透過率が急激に低下し、特に250 nm以下の波長を有する光に対してはほとんど透過性を示さなくなる。そこで、波長400 nm以下の紫外域の光源を備えた投影露光装置の光学系に用いられる光学部材の材料としては、紫外域での透過率が高く、均質性に優れた合成石英ガラスあるいはフッ化カルシウム単結晶が一般的に用いられている。これら2つ

〒228-0828 神奈川県相模原市麻溝台1-10-1
株式会社ニコン ガラス事業室
TEL 042-740-6376
FAX 042-740-6336
E-mail: nitta.y@nikon.co.jp

の材料はエキシマレーザの結像光学系で色収差補正を行う上で必要とされる材料である。

上記の光学材料のうち、合成石英ガラスは光透過性が高いこと、耐エキシマレーザ性が良好であることに加えて、温度変化に対して耐性がある；耐食性及び弾性性能が良好である；室温付近の線膨張率が小さい（約 $5.5 \times 10^{-7}/\text{K}$ ）；等の優れた性質を有する。そのため、投影露光装置において、耐紫外線性が良好であり、かつ基板の発熱及びそれによる熱膨張が生じにくいといった光学特性が要求されるレチクル等の光学部材の材料に適用されている。

本稿では、近年の投影露光装置に採用されている石英ガラスについて、その近況動向を紹介する。

2. 投影露光装置光学系と石英ガラス

投影露光装置の光学系は、大きく分けて投影光学系と照明光学系に分けられる。投影光学系はレチクル上のパターンを収差を抑制しつつウェハ上に結像するための光学系であり、解像度及び焦点深度の実力に直結する。また照明光学系は、光源から出た光をレチクルに均一に照射させるための光学系である。投影光学系解像度を上げるためには、露光光源の短波長化及び高 NA 化を行えばよいのだが、同時に焦点深度を小さくしてしまうという欠点が発生してしまう。そこで、ここで、これまでの光源波長及び NA に対する解像度の変遷を図 1 に示す。

両者に求められる光学特性として、使用波長における屈折率均質性、高透過性、耐エキシマレーザ性、低複屈折性があげられる。さらに、投影光学系においては照明光学系より高い屈折率均質性が求められている。

最近では、使用しているレーザ光源の出力がより大きくなることにより、更なる耐エキシマレーザ性の向上について要求がある。エキシマレーザ照射による石英ガラスへの影響は大きく 3 点に分けられ、特に短波長になるほどその影響はより深刻となる。1 点目の影響は、レーザ照射により発生している E' センターと呼ばれる常磁性欠陥である。これが発生すると、約 200 nm の真空紫外領域において吸収が発生し、透過率が低下する。2 点目の影響は、コンパクションである。コンパクションは、長期的に高エネルギー密度のレーザを照射する際に発生する現象で、材料の体積が収縮し硝材の屈折率が増加する。E' センター及びコンパクションについては Si-O-Si の開裂と再結合が原因と考えられており、水素濃度を一定量以上で制御することで改善可能である。3 点目の影響はレアファクションである。これは比較的低エネルギー密度のレーザを長時間照射することにより、材料の体積が膨張し硝材の屈折率が低下していく現象である。この現象は近年発見されたものであるため、メカニズムを含めた詳細な現象は完全に解析しきれてはいない。

しかしながら、今後更なる高フルエンスのレーザに対応するためには、製造技術的には以

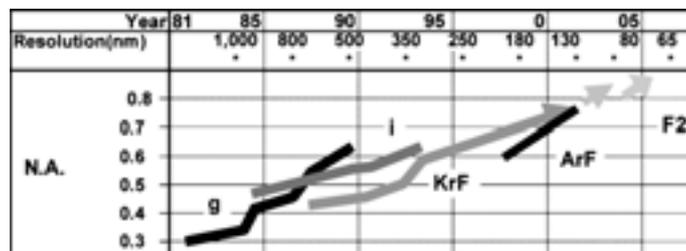


図 1 光源波長及び NA に対する解像度の変遷（ニコン）

上3点の光学特性をすべて見据えたうえで、製造条件をよりバランスよく制御していく必要がある。

3. レチクルと石英ガラス

レチクルはウェハ上にパターン像を形成するためのもので、ウェハ上に転写するネガに当たるものである。その際レチクル上に形成されたパターンをウェハ上に正確に転写するには、レチクル上において均一な照度分布を得ることが不可欠となる。したがって、レチクルに求められる光学特性としては、使用波長における透過率均質性、耐エキシマレーザ均質性があげられる。

また、レチクルに求められる性質としては、上記光学特性の他にサブミクロンオーダーレベルの平面度、オングストロームレベルの表面粗さといったレチクル表面形状の制御も重要である。特に、今後さらに微細化する次世代・次々世代を視野に入れた場合には、レチクル間の光学特性・平面度・面形状の差においても無視できない状況になってきているため、一層の制御が求められる。

投影露光装置内でレチクルを使用する際には、パターンのあるレチクル中心部は露光装置にホールドできないため、レチクル周辺部を真空吸着によってホールドする手法を採用している。このため、使用時のレチクルは常に自重変形しており、変形に十分な再現性がない場合には精度に大きな影響を与えることになる。対策としては、自重変形を避けるために、基板の厚さを大きくすることが考えられる。しかしその場合透過光量の損失と基板重量の増加（マスクを高速で移動する場合に問題となる）のため、実現可能な厚さには限界がでてきてしまう。以上のことから、最終的には基板となるガラスの剛性が非常に重要となる。

また、リソグラフィ業界では、レチクルへのゴミ付着防止を目的としてレチクル近傍に設

置するペリクルと呼ばれる薄膜を用いている。ペリクルは、レチクルとウェハ間の結像光路内に設置されるため、パターンの解像度等に直接影響を与えることになる。従って、面精度や厚さの規格には、今後は露光装置が用いている光学系レンズ並の厳しさが要求されると思われる。

4. 液浸露光装置と石英ガラス

更なる微細化のために、投影露光装置に対する高NA化への要求はより強くなってきている。ここ数年間ArFエキシマレーザ以降の次世代の露光方法として、さまざまな手法が提案されてきた。例えば、軟X線を光源としたEUVリソグラフィーやF₂レーザを光源としたF₂リソグラフィーなどがあげられる。それぞれ技術的なブレークスルーをすべき箇所が多々存在している。

ここで、現在最も有力な候補として、光学系とウェハとの間に液体を挿入し投影光学系の開口度(NA)をあげる液浸リソグラフィーが提案されている^{1)~3)}。NA= $n \cdot \sin \theta$ なので、空気の屈折率よりも高い屈折率の媒質をレンズとウェハ間に満たすことで、原理的にはNA<nまで大きくすることが可能である。この結果、解像度や焦点深度(DOF)を向上させることができる。このような検討は、半導体露光装置メーカー3社共に既に開始しており^{4)~6)}、下の図2のような構成が提案されている。

次に実際に液浸の効果を考えてみる。現在製品化されている、媒質が空気であるArFリソグラフィーを基準とした場合の、各波長の液浸露光装置を媒質空気相当の波長に換算した結果を表1に示す。

水を媒質とするArF液浸リソグラフィーは、媒質が空気の場合波長は134nm相当となり、F₂リソグラフィー(空気媒質)の分解能を上回る。また、F₂液浸リソグラフィーの場合、換算した波長は115nm相当と

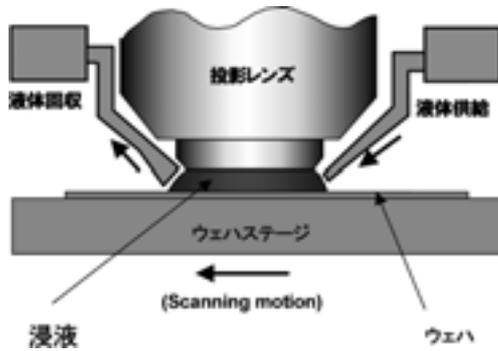


図2 液浸露光装置の構成例

表1 液浸露光装置の効果

	medium	n	λ/n	ratio
193nm dry	Ar	1.0	193nm	1.00
248nm immersion	H ₂ O	1.36	182nm	0.94
157nm dry	N ₂	1.0	157nm	0.81
193nm immersion	H ₂ O	1.44	134nm	0.68
157nm immersion	PFPE	1.37	115nm	0.60

なり、次々世代以降へ耐えうる技術であると推測することができる。最近の報告では、より高屈折率のレンズ材料・液体組成の開発、保護膜の開発など ArF 液浸リソグラフィーの更なる延命化を行うための施策を検討し始めている。

本手法の場合、次世代の光源は ArF エキシマレーザとなるため、現状の合成石英ガラスが使用可能になる。そのため、今後は高エネルギー密度におけるレーザ耐性、低複屈折性をはじめとする合成石英ガラスの開発に対するニーズは依然として続くと思われる。

5. 終わりに

以上、簡単ではあるが露光装置と石英ガラスに関して現状をまとめた。実際のところ、液浸露光装置をはじめとする光リソグラフィー技術自体、より短波長化・より高 NA 化となっていくほど、その計測技術や生産技術のさらなる精度向上を要求される。しかし現在すでに極限近くの精度であるので、これ以上の精度向上をおこなうには ブレークスルーが必要となる。また、露光装置メーカー各社は、幾多ある技術的な壁を乗り越えるための開発に莫大な投資を行ってきた。今後とも、半導体産業が発展をしていくためには、装置の品質を維持しつつコストを下げっていく努力が必要である。その素材である石英ガラスも例外ではない。歩留りの向上と安定した品質を持続して生産していくことが一番現実的な課題であるように思える。

参考文献

- 1) 高橋一雄：特開平 6-124873.
- 2) 牛田一雄，諏訪恭一：特開平 10-303114.
- 3) M. Switkes and Mrothschild: "Resolution Enhancement of 157-nm Lithography by Liquid Immersion," SPIE 4691-206 (2002).
- 4) NIKON, International Symposium on Immersion & 157 nm Lithography, August, 2004.
- 5) ASML, International Symposium on Immersion & 157 nm Lithography, August, 2004.
- 6) CANON, International Symposium on Immersion & 157 nm Lithography, August, 2004.