

# 極紫外リソグラフィー

木下 博雄, 渡邊 健夫, 浜本 和弘

## Extreme Ultraviolet Lithography

Hiroo KINOSHITA, Takeo WATANABE and Kazuhiro HAMAMOTO

Recent activities and remaining problems on extreme ultraviolet lithography (EUVL), which is the most promising technology for next generation lithography, are described. Figure error of less than 0.3 nm for 300 mm diameter was achieved in the fabrication of an aspherical mirror. By developing new technologies for assembling the mirrors and coating multilayers onto the curved optics, the wavefront error of optics of less than 2 nm was achieved. It is confirmed that the resists commercially available for KrF lithography can also be applied for EUVL. There are no showstoppers for developing the EUVL system.

**Key words:** lithography, multilayer, extreme ultraviolet, aspherical mirror

情報機器に用いられている中央演算素子や記憶素子の高集積化は、1970年代より3年に4倍のペースで開発が進められてきた。最近のIT革命以降、微細化のトレンドはさらに加速され、2年サイクルに移行する勢いである。2007年には、最小線幅70 nmをもつ64 Gbit級の半導体メモリーや演算速度10 GHzのMPUの生産が計画されている。このためのキー技術がリソグラフィー技術であり、微細な線幅をもつ各種パターンをシリコン基板上に高精度に形成する加工技術である。現在用いられている露光装置は、波長248 nmのKrFエキシマーレーザー光を光源とし、石英ガラス上に薄いCrで形成された4倍体のパターンを原画として用い、これをウェハー上に縮小投影光学系により露光する方式である。縮小露光装置の解像力は用いる光の波長に比例し、波長が短いほど微細なパターンを形成できる。KrFエキシマーレーザーを用いる露光装置の次の世代として、波長193 nmのArFエキシマーレーザーを用いる露光装置が次世代半導体開発に準備されており、さらにはF<sub>2</sub>レーザー(154 nm)も検討されている。

しかしながら、屈折光学系を用いたさらなる短波長化に

は材料面での限界があり、その先は波長を13 nmまで短くした極紫外(extreme ultraviolet: EUV)を用いることが検討されている。この波長域での光はすべての物質で強く吸収されるとともに、屈折率が1に近いため、原理的に屈折によるレンズ作用を利用することができない。そこで、反射鏡を使用した縮小光学系が開発された。13 nm用の反射膜としてはMo/Siの多層膜が用いられており、直入射で65%以上の反射率が得られている。次々世代のリソグラフィー技術である極紫外露光(extreme ultraviolet lithography: EUVL)ではこのMo/Si多層膜を光学系やマスク基板に形成し、反射型の縮小光学系を構成することにより、ウェハー上で70 nm以下のパターンを形成しようとするものであり、2007年からのデバイス製作に間に合わせるよう本格的な準備が開始されている。ここでは、EUVL研究の歩み、原理、開発の状況について述べる。

### 1. EUVL研究の歩み

軟X線領域での縮小リソグラフィーの最初の実験は、多層膜を形成したシュワルツシルト光学系によってなされ

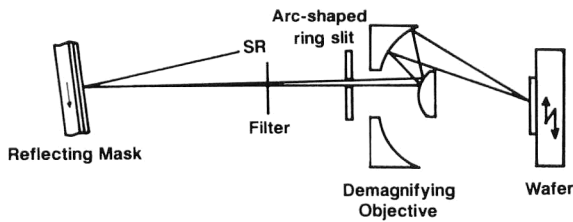


図1 反射型マスクを用いた極紫外露光法の概念図。

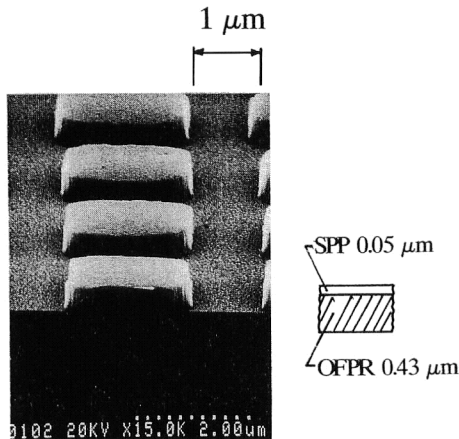


図2 Si含有レジストSPPを用いた2層レジストによるパターン形成。

た。この光学系は走査型のX線顕微鏡の光学系として紹介されており<sup>1)</sup>、軸上の数十 $\mu\text{m}$ の領域では無収差条件が得られる。しかしながら、木下らは、リソグラフィーとしてこの光学系を考え、面積拡大が可能な軸から離れた高さで収差が最小となる領域、すなわち光軸に対して物点が4 mmほど離れた位置で球面収差がゼロとなるよう光学系を設計した。このため像面での露光領域はリング状となり、マスクとウェハを同期駆動させることにより露光面積を拡大できる。この光学系を用い、2 mm $\times$ 0.2 mmの静止露光エリア内での4 $\mu\text{m}$ のパターンを1986年に報告した<sup>2)</sup>。当初は透過型マスクにSiのステンシルマスクを用いたために、コントラストが得られる11 nmを露光波長とし、イオンビーム法で製作したW/C多層膜を用いた。その後、BarbeeらがMo/Si多層膜の試作を試み、波長12.5 nmで60%以上の反射率が得られるとの報告<sup>3)</sup>から、波長を13 nm近辺として光学系の製作精度を高めていった。1989年のEIPBの国際会議では、波長選択性の議論、ならびに波長を13 nmとした反射型マスクを用いた露光光学系(図1参照)により0.5 $\mu\text{m}$ パターン(PMMAレジスト)の実証、また、Si含有のレジストを用いた2層レジストにより、1 $\mu\text{m}$ ではあるが良好なパターン形成を実現している(図2参照)。さらには、今後の本格的な露光光学系と

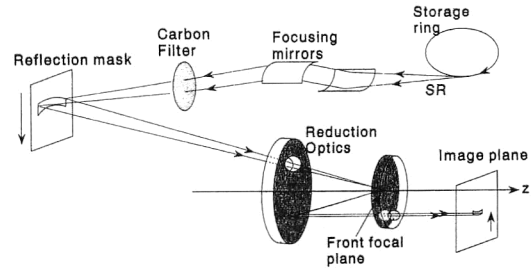


図3 2枚の非球面光学系を用いた露光光学系(像面で20 mm $\times$ 0.5 mmの領域をもつ、NA 0.1、倍率1/5)。

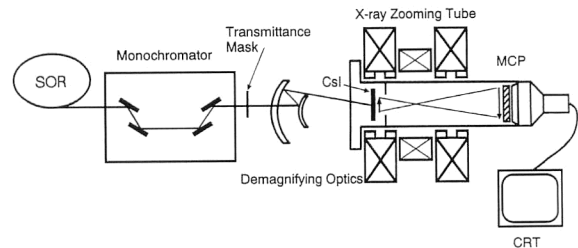


図4 露光波長での光学系の合わせシステム。X線ズーム管によって像面を観察しながら合わせを実現。

して、非球面二枚系でテレセントリック性を持ち、かつ大面積が可能となる光学設計を提案した<sup>4)</sup>。この発表を契機にAT&Tのグループが、それまで波長37.2 nmでIn膜を反射面としたオフナー型光学系による露光を中止し、波長を14 nmとしたシュワルツシルト光学系を用い、軸上の数十 $\mu\text{m}$ の領域ではあるが50 nmのパターン形成に1990年に成功している<sup>5)</sup>。これを契機に、日米での本格的なEUVLの研究が進められた。1993年には、はじめて非球面二枚光学系(図3参照)による10 mm $\times$ 0.2 mmの領域で0.15 $\mu\text{m}$ の転写特性を得<sup>6)</sup>、その後、鏡筒、マスクとウェハの同期ステージ、照明光学系の製作を進め、1995年には10 mm $\times$ 10 mmの大面積露光を実現している<sup>7)</sup>。この間、露光光学系が真に13 nmで露光されているか否かの議論は1989年の報告後も数年続いたが、1993年に行った図4の構成の分光器を通しての実験によりはじめて13.5 nmでのパターン露光との信を得るに至り、EUVを光源とする反射型縮小リソグラフィーとしての方向性が出された(図5参照)<sup>8)</sup>。また、大面積露光を得るための光学設計方式も、1990年にAT&Tのグループが一括大面積露光光学系を提案したが<sup>9)</sup>、歪曲収差が無視できず、現在は1986年に木下らが提案したリング状の領域を同期走査して露光領域の拡大法が用いられている。米国ではAT&Tの報告の後、1993年に国家プロジェクトがスタートし、シュワルツシルト光学系を用いた光学系(10分の1倍)とレーザープラズマ光源によるパターン形成<sup>10)</sup>などシステム化の検討がなされ、1997年からはIntelと3国立研究所を中心とする

表1 DUV リソグラフィーと極紫外リソグラフィーの比較。

	現在の光リソグラフィー	極紫外リソグラフィー
露光波長	KrF レーザー 248 nm	極紫外線 13.5 nm
光学系	屈折光学系	反射光学系
開口数 NA	>0.7	<0.25
解像度	180 nm	<70 nm ITRS では 50 nm からの導入
スループット	80 枚/時	80 枚/時
マスク基板	ガラス 透過基板	ガラス 反射基板
レジスト	KrF 用レジスト	KrF 用レジスト

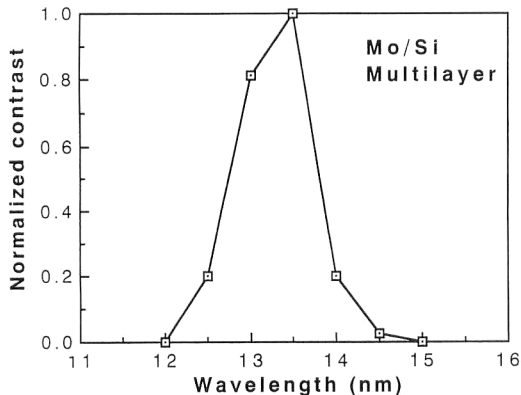


図5 分光器によって波長走査したときの X 線ズーム管の出力。製作した多層膜のピーク波長と一致している。

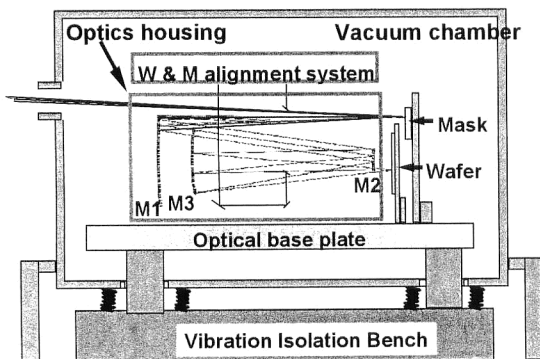


図6 3枚の非球面ミラーからなる露光システム。

EUV-LLC が設立され、4 年間 250 億のプロジェクトにて次世代露光技術としての技術確立を進めてきた。日本では、1998 年 10 月から超先端電子技術開発機構の 1 プログラムとして研究がスタートした。2001 年秋の松江での EUVL ワークショップには、日米欧の三極から 100 件以上の研究報告があり、課題はほぼ解決の見通しが得られた。また、ヨーロッパの露光装置メーカー ASML 社が 2004 年に EUVL 露光機の  $\beta$  機を開発、日本のニコン、キヤノンも 2005 年には  $\beta$  機開発を進めるとの報告もあり、2007 年からは本格的なデバイス製造が進められる予定である。

表2 EUVL 実験機の仕様。

項目	仕様
露光波長	13.5 nm
開口数 NA	0.1
露光フィールド	30 mm×1 mm (静止時) 30 mm×28 mm (走査時)
解像度	60 nm
焦点深度	0.9 $\mu$ m (60 nm)
ウェハー	8 インチ
マスク	8 インチ, ガラス基板 6025

## 2. EUVL の露光原理と装置

極紫外露光法は、従来の半導体リソグラフィーである紫外線縮小投影露光装置と原理的には同じで、縮小光学系を介して、レチクルマスクパターンをウェハー上に縮小転写する技術である。表 1 に KrF リソグラフィーとの違いを示す。冒頭で述べたように、波長を 13~14 nm とするため反射鏡で光学系を構成し、反射用の膜に Mo/Si の多層膜を用いる。また、マスクにも大きな開口のメンブレン製作ができないため、6 インチ角のガラス基板の上に反射膜を形成した反射型としている。

図 6 に、姫路工業大学が開発した EUVL 装置の概要を示す<sup>11)</sup>。この装置は 3 枚の非球面からなる縮小光学系、マスクとウェハーの同期駆動ステージ、マスクとウェハーの位置合わせ光学系、ウェハーの焦点検出光学系、8 インチウェハーのロードロック機構とからなる。露光光学系の露光領域は 1 ショットで 30 mm×1 mm とし、半導体のチップサイズ例えば 30 mm×40 mm を露光するには、マスクとウェハーを倍率を考慮して同期走査駆動させることにより行える。表 2 に装置の仕様を示す。

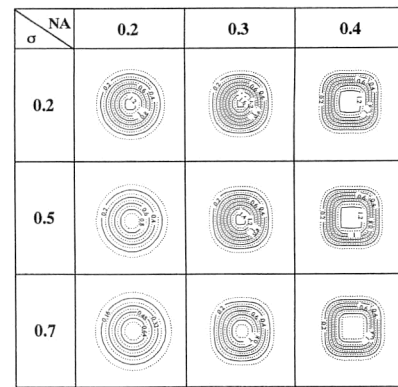
EUV 光を利用する縮小投影露光光学系の解像性能は、レイリー基準  $0.61\lambda/NA$  で規定される。例えば、波長  $\lambda$  を 13 nm、開口数 NA を 0.25 とすると、解像性能は 30 nm が期待される。このときの焦点深度は  $\lambda/NA^2$  で与えられ 200 nm となる。この焦点深度は、現在 0.18  $\mu$ m 世代で用いられている KrF エキシマーリソグラフィーに比べても十分大きな値であり、短波長化による低 NA の効果が大きいことがわかる。光学系の設計は多層膜の反射率が 68%ほ

どであるため、できるだけ少ないミラー枚数で収差をとる必要がある。1章で述べたように、大面積化は収差のとれたリング状のエリアをステージ走査により行う。また、同期走査時に光路を遮らないようにマスクとウェハは光学系に対して両サイドの配置が好ましく、ミラー枚数は偶数枚とする。現在、NAが0.25以上の六枚系が検討されている。図7は、50 nmのホールパターンとエルボーパターンに対するNAと、光学系のNAに対する照明系のNAの比 $\sigma$ によるパターン特性のシミュレーション結果を示す。エルボーパターンはNA 0.2以上ではほぼ露光線幅(CD)に対して10%以内を確保できるが、ホールパターンはNA 0.2では丸く形成され、0.3でもまだ十分とはいえない。EUVLは波長がパターンサイズに比べて1/3以下ではあるが、同時にNAも現在のDUV(deep ultraviolet)リソグラフィーのNAの1/3ほどであるため、十分なホール形状を得るのは難しい。

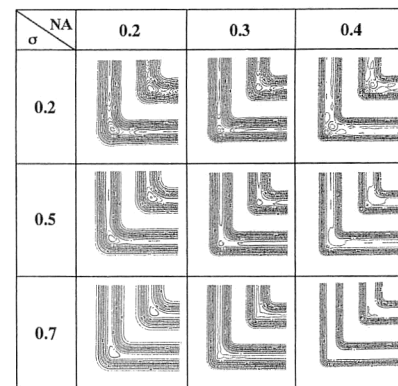
一方、実際の露光特性は反射鏡の形状精度、反射面である多層膜構造の完全性、さらに光学系を組む多数の反射鏡の配置精度に支配される。光学系が設計上の回折限界性能を満足させるためには、光学系全体の波面収差量をMarechalの回折の式で規定される $\lambda/14$ 以下とせねばならない。このため、光学系を構成する1枚あたりのミラーの形状精度としては $\lambda/28\sqrt{n}$ が要求される。例えば、波長13.5 nmで光学系の波面の精度は、上記の例では1 nm以下である必要があり、ミラー枚数を6枚としたときの1枚あたりの形状精度は0.2 nmとなる。また、反射面の表面粗さはデバイワラー因子によって規定される。1枚あたりの反射率の低下2%を許容すると0.15 nmが要求される。このように、EUVL光学系ではミラーの形状精度、粗さ精度をいかに向上するかが重要な課題とされ、評価法の開発がなされてきた。

EUVL用の非球面ミラーの製作は、米国Tinsley社によって1992年以来先導的に行われてきた。ミラー材料は膨張係数がゼロに近いSchott-Zerodur Mを用い、加工は各種の大きさをもつ研磨工具によって加工と評価が繰り返し行われた。評価には、理想的な非球面形状を再生するホログラム面を参照面とするトワイマン・グリーン型位相干渉計を開発し、用いてきた。

一般に、粗さは測定する空間周波数(領域)の大きさによって3つに分類される。測定領域が0.2 mm以上での粗さは形状精度を示し、光学系の解像度を決定する。中間領域の2 mm~数十 $\mu\text{m}$ での粗さは光の散乱を引き起こし、パターンコントラストを低下させる。10  $\mu\text{m}$ 以下の微小領域での粗さは反射率の低下となる。上記の加工法では、中



(a)



(b)

図7 50 nmのホール、エルボーパターンに及ぼす光学系の開口数NAと照明光学系の $\sigma$ 値の計算結果。(a)ホールパターン。(b)エルボーパターン。

間領域の粗さの低減が困難とされていた。1999年3月に入手した時点での図6のミラーの非球面の形状精度は、位相干渉計測によっていずれも0.58 nmであった。また、中間領域の粗さはミロー式光波干渉顕微鏡によって測定され0.3 nm、微小領域は原子間力顕微鏡での粗さも0.3 nmほどであった。その後、中間領域の粗さの低減のための研磨法の改善がなされ、2000年10月には形状精度0.3 nm、中間粗さ0.15 nm、微小粗さ0.15 nmを達成し、加工評価に大きなブレイクスルーを見出すことができた。

形状評価では、ローレンスリバモア国立研究所のSommergrenの提案<sup>12)</sup>である点回折干渉計の開発が大きい。参照波として、ファイバー端面から発生される理想的な球面波を利用する。測定物の反射波あるいは透過波がこの球面波と作用して生じる干渉縞から、測定対象の形状を評価する。ファイバーの利用は空間的自由度も高い。この装置によって0.2 nmでの測定を実現した。しかしながら、この方式ではNAを大きくとることができず、シアリング干渉等の利用も検討されている。

ミラーへの多層膜形成は、マグネトロンスパッター法、



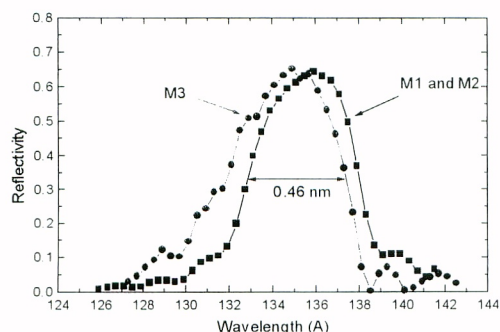


図8 3枚の非球面光学系に形成された多層膜の反射率測定結果。

およびイオンビームスパッター法によりなされている。Mo/Si多層膜の場合には、両方法ともに65%以上の反射率が得られており、膜厚制御性0.1%以下も実現されている。光学系用の形状ミラーでの多層膜形成では、種々な角度でミラーへ入射する光の波長を効率よくそろえ、積分反射率を大きくとることである。図6の例では、M1ミラーへの入射角は4度から5度まで変化し、M2ミラーは4度から9度まで変化する。また、これらは光軸方向に対して垂直方向への変化が大きい。このため、M1とM2ミラーは、光軸に垂直方向に膜厚分布をもつ膜とした。M3ミラーへの入射角は光軸に対して垂直、水平の両方向ともにはほぼ2度であるため、一様な膜厚をもつ多層膜を形成した。図8に、作製したミラーの反射率の測定結果を示す。M1、M2ミラーおよびM3ミラーのピーク反射率は65%以上が得られた。中心波長はそれぞれ13.54 nmと13.46 nmとにあり、光学系の中心波長13.5 nmに対し、 $\pm 0.04$  nmであった。この結果、3枚のミラーの半値幅は0.45 nmと大きくとれ、スループット向上が図られる<sup>13)</sup>。

製作したミラーの形状精度を維持しながら3枚のミラーを設計精度内で合わせる必要がある<sup>14,15)</sup>。図9に、ミラー光学系の調整法の概要を示す。はじめに市販のフィゾー干渉計を用い、透過波面の測定を行う。つぎに得られた波面を計算機上でツェルニケの式に展開し、その37項の値を光線追跡プログラムに入力し、理想面との比較を行う。比較計算のプログラムから得られる収差量から光学系の収差補正に有効な軸の調整量を算出し、光軸調整を行い、再度波面測定を行う。この測定・調整を繰り返すことにより合わせを行う。最終的な透過波面としては2 nmまで調整することができた。また、さらなる合わせ精度の確保として、13.5 nmの露光波長光を用いた合わせ法の検討もローレンスバークレー国立研究所にて開発された<sup>16)</sup>。先に述べたレーザー光による点回折干渉計と同様に、理想球面波をピンホールによって得ようとする方法で、収差をもった被検波面とピンホールからの球面波を干渉させたときにできる干渉縞をCCDカメラで読み取ることにより計測する。0.1 nm以下の再現性も得られている。

露光光源には放射光を用いている。放射光から得られるEUV光の強度はウェハー面上で最大でも10 mWほどであり、例えば $2 \text{ mJ/cm}^2$ の感度をもつレジストを用いても露光には数秒要する。このため、生産用の光源としての放射光の利用は困難である。表3に、スループット80枚/時を確保するために必要なウェハー面上のパワーの計算例を示す。1チップでの露光を0.5秒以下とすると、44 mWほどが要求される。光学系のミラー枚数はNAを0.25としたときには6枚必要とされており、マスクを含めた効率を6%とし、照明光学系も4~6枚で構成されると仮定する

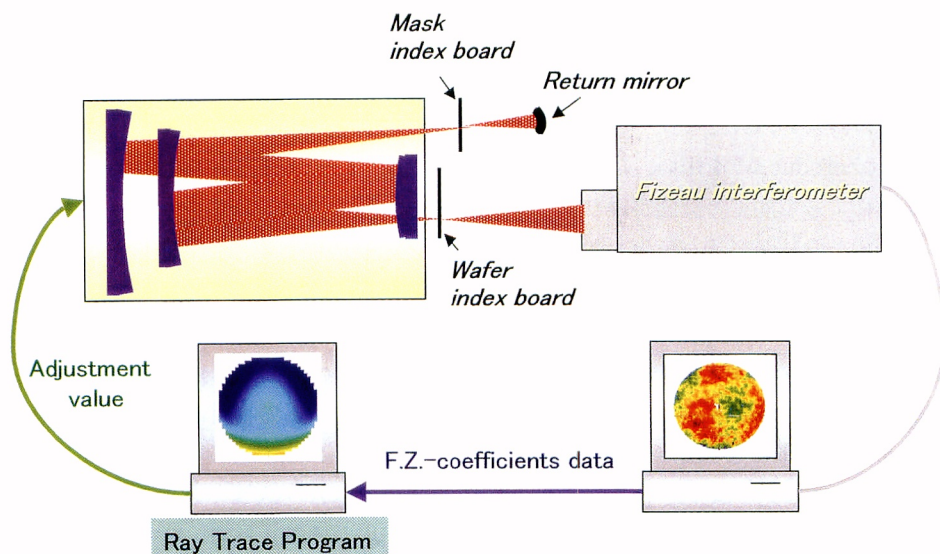


図9 3枚の非球面光学系の調整法概要図。

表3 スループット見合いの光源パワー。

露光フィールド	25 mm×44 mm
レジスト感度	2 mJ/cm <sup>2</sup>
ウェハーサイズ	12 インチ
ウェハーロード&アンロード	10 秒
ウェハーアライメント時間	5 秒
スループット	80 枚/時
露光時間	0.5 秒
ウェハー面上の EUV 強度	44 mW
光学系+マスクの反射効率	6%
照明光学系の反射効率	6%
照明光学系での必要となる EUV 強度	12 W

と、照明系に入射するパワーは 12 W ほど必要となる。実際には、照明光学系のミラー枚数がいまだ不明なため、より高いパワーをもつ (50~150 W) 光源が必要とされている。現在、飛散粒子 (デブリ) 等を考慮して、Xe ガスにレーザーを照射し、EUV 光の発生が検討されている。発生効率が 1% 以下であり、15 W ほどである。しかしながら、ドライブ用のレーザー装置が大きく、高コストなど、実用レベルに達しておらず、さらなるコンパクトな低価格、高効率光源の開発が急務である。

### 3. マスクの製作

EUVL 用マスクは、ArF や KrF と違い波長が短いため位相シフトマスクや近接効果補正を必要としないなど、製作上の困難さは軽減される。図 10 に、代表的なマスク製作プロセスを示す。(1) はじめにガラス基板に多層膜を形成する。(2) 吸収体パターンのエッチングあるいはイオンビームによる修正のため、SiO<sub>2</sub>、SiNO、Ru 等のバッファ層を形成する。(3) 吸収体層として例えば Ta、TaBN、Ta<sub>2</sub>N、Cr 等を形成する。(4) レジストを形成し、電子ビームによりパターンを形成する。(5) 現像後、吸収体パターンをエッチングする。(6) 吸収体パターンの検査・修正を行う。(7) バッファ層をエッチングにより除去する。これらのプロセスは従来マスクの製作プロセスと大きな差はみられないが、多層膜を下層とすることで、例えば(6)の工程でのイオンビームの修正時の多層膜へのダメージ、(7)のバッファ層のエッチング時の多層膜表面の粗さの増大等に気をつけねばならない。最大の課題は、プロセスの(1)の工程でいかに無欠陥な多層膜を形成するかである。Mo/Si は 600 MPa ほどの圧縮応力をもつために、過去においては大気中に取り出したときに無数のピットの生成を観測しているが、最近では膜形成時のパラメーターの制御も容易となり、欠陥個数を通常でも 0.1 個/cm<sup>2</sup> ほどと低減できている。しかしながら、15 cm 角のマスク基板で 1 個あるかないかとするためには 0.002 個/cm<sup>2</sup> ほどにせねばならず、

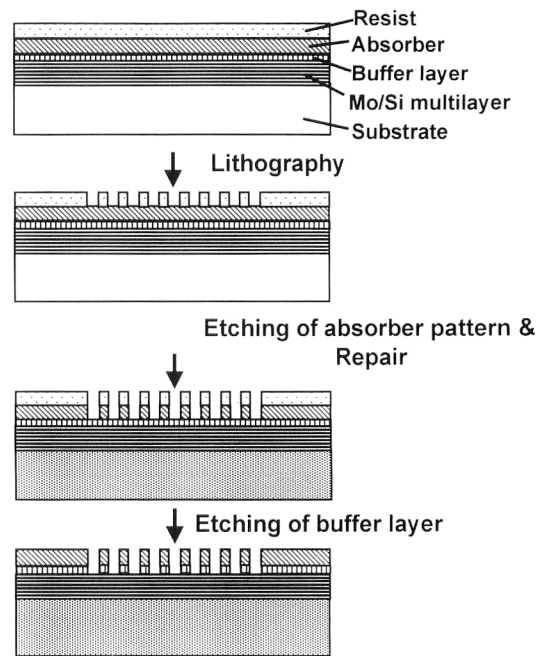


図 10 極端紫外線露光用マスクの製作プロセス。

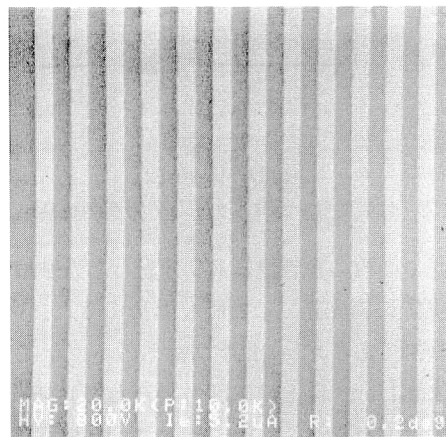


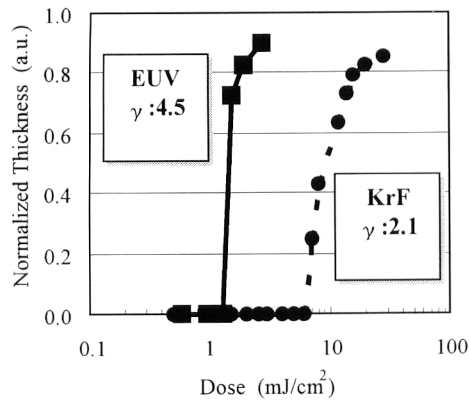
図 11 Cr を吸収体とする EUVL マスク試作例；0.3 μm L&S パターン。

さらなる膜形成・評価法が重要となる。評価には従来のガラスマスク基板欠陥検査装置で用いられている DUV 光の散乱光を検出する方法での検査がなされているが、実際の露光光とは異なるために、露光光での検査が重要である。

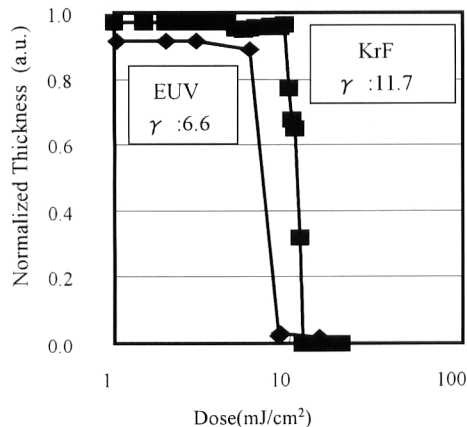
図 11 に示すマスクは Cr を吸収体層とするもので、ウェットエッチングを試みたものである<sup>17)</sup>。従来マスクの Cr ウェットエッチングと比較しても遜色はなく、しかも 0.3 μm のラインアンドスペース (L&S) の加工、0.13 μm の 1:2 の L&S のパターン形成も実現できた。

### 4. レジスト材料の評価

EUVL 用のレジストとしては、これまでに各種の市販レジストの評価を進めてきている。感度の評価には分光器



(a) SAL601 resist



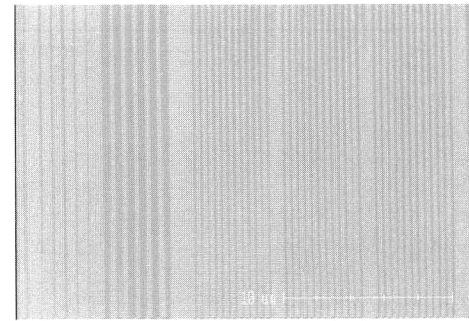
(b) DP603 resist

図12 代表的なレジストのEUV感度測定結果.

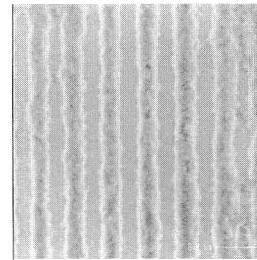
を通した光や2枚の多層膜により分光した光を用いて、できるだけ実際の露光光での評価を進めてきた。図12は感度測定の一例であり、(a)化学増幅系のネガタイプのレジストでは $2 \text{ mJ/cm}^2$ ほどの感度も得られている。また(b)のポジ型では $9 \text{ mJ/cm}^2$ であった。また、照射時の脱ガス特性についても測定を進めている<sup>18)</sup>。これまでのDUV光源と比較すると、脱ガス量が少ないことが明らかとなった。

### 5. ETS-1 露光実験機による露光結果

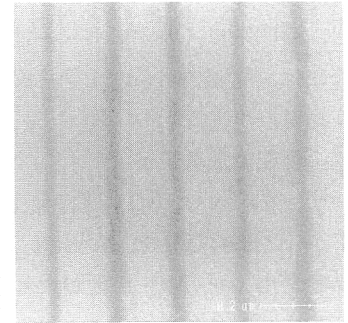
これまでに、上記の露光装置を用いて解像度評価のための露光実験を進めている。レジストには化学増幅系の各種レジストならびに非化学増幅系レジストを用いている。図13(a)に、 $10 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ の露光領域での $0.1 \mu\text{m}$ のL&Sを示す。化学増幅系のネガ、ポジ、非化学増幅系ともに十分解像されており、とくに非化学増幅系の場合にはエッジもシャープである。(b)に $80 \text{ nm}$ のパターン特性を示す。ポジ型の化学増幅系でも十分な解像特性が得られているが、さらなるエッジラフネスの低減が必要となる。(c)には $40 \text{ nm}$ の孤立パターンを示す。レジストにはZEP520を用いており、レジスト膜は $0.1 \mu\text{m}$ である。 $40 \text{ nm}$ の孤立



(a)



(b)



(c)

図13 露光パターン例。(a) $0.1 \mu\text{m}$  L&Sパターン、レジストZEP520、 $100 \text{ nm}$ 厚、(b) $80 \text{ nm}$  L&Sパターン、レジストDP708、 $100 \text{ nm}$ 厚、(c) $40 \text{ nm}$ 孤立パターン、レジストZEP520、 $100 \text{ nm}$ 厚。

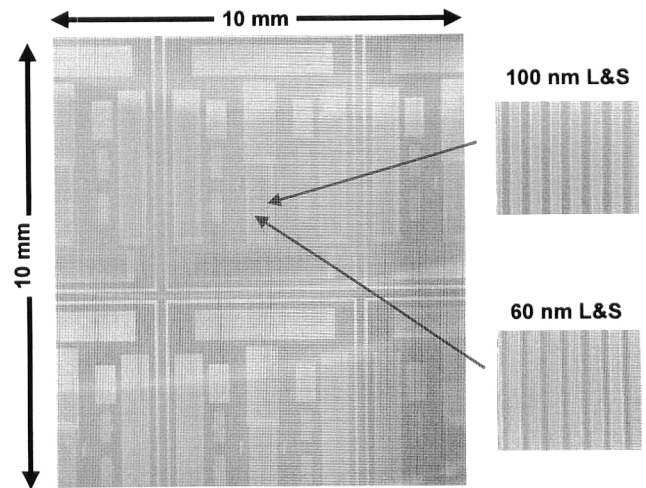


図14 EUVL実験機による大面積露光パターン。

パターン形成も可能である。図14は、マスクとウェハーステージ走査によって大面積 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ の露光領域を得たものである。垂直方向は $60 \text{ nm}$ までクリアに転写できているが、走査方向に垂直なパターンは同期精度の誤差で十分解像していない<sup>19)</sup>。このように、大面積化ではステージの性能の向上が重要である。

極紫外領域での 13.5 nm を露光波長とする露光光学システムを開発し、光学特性の評価を進め、光学系の回折限界(理論)性能の 40 nm の孤立パターン形成、ならびにマスクとウェハの同期走査ステージを用いた露光により 10 mm×10 mm での 60 nm L&S の形成を確認した。ULE (ultra low expansion) のガラス基板に製作したマスクでの転写特性も良好であり、化学増幅系のレジストにも 5 mJ/cm<sup>2</sup> の高感度かつ LER (line edge roughness) の少ない 60 nm の解像性も得られている。このように、多層膜と反射光学系を用い、可視領域と同様な光学構成で、短波長化の特性を引き出すことができ、今後の放射光利用によるナノメートルの加工とサブナノメートルの計測の新たな可能性を明らかにできた。

今後の個別課題としては、(1) 高出力かつ低価格な光源の開発、(2) 無欠陥マスク、とくに無欠陥多層膜の形成法と評価が残されている。さらに、照明光学系を含めた大面積露光可能な装置の開発が急務であり、マスク欠陥の問題、レジスト開発等を進めていく必要がある。

## 文 献

- 1) I. Lovas, *et al.*: Proc. SPIE, **316** (1981) 90-95.
- 2) 木下博雄ほか：第 47 回応用物理学学会学術講演会予稿集 (1986) p. 322.
- 3) T. W. Barbee: Proc. SPIE, **563** (1985) 20-25.
- 4) H. Kinoshita, *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, **7** (1989) 1648.
- 5) J. E. Bjorkholm, *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, **8** (1990) 1509-1513.
- 6) H. Kinoshita: *OSA Proceedings on Soft X-Ray Projection Lithography*, Vol. 18 (1993) pp. 74-78.
- 7) T. Haga *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, **13** (1995) 2914-2918.
- 8) H. Kinoshita: Appl. Opt., **32** (1993) 7079-7083.
- 9) J. M. Roders *et al.*: Proc. SPIE, **1354** (1990) 330-336.
- 10) D. A. Tichnor, *et al.*: *OSA Proceedings on EUVL*, Vol. 23 (1994) pp. 89-97.
- 11) H. Kinoshita, *et al.*: Proc. SPIE, **3331** (1998) 20-31.
- 12) G. Sommargren: *OSA TOPS on EUVL*, Vol. 4 (1996) pp. 108-112.
- 13) H. Kinoshita, *et al.*: Proc. SPIE, **3767** (1999) 164-171.
- 14) K. Sugisaki, *et al.*: Proc. SPIE, **3997** (2000) 751-758.
- 15) S. Irie, *et al.*: Proc. SPIE, **3997** (2000) 807-813.
- 16) D. Attwood, *et al.*: IEEE J. Quantum Electron., **35** (1999) 709.
- 17) H. Nii, *et al.*: Proc. SPIE, **4409** (2001) 681-686.
- 18) J. Goldsmith, *et al.*: Proc. SPIE, **3676** (1999) 264-271.
- 19) T. Watanabe, *et al.*: J. Vac. Sci. Technol. B, **18** (2000) 2905-2910.

(2002年2月27日受理)