極端紫外線露光技術†

木下 博雄* 渡邊 健夫*

浜本 和宏** 椿野 晴繁***

Development of Extreme Ultra-Violet Lithography System

by

Hiroo KINOSHITA*, Takeo WATANABE*, Kazuhiro HAMAMOTO** and Harushige TSUBAKINO***

A three-aspherical-mirror system for Extreme Ultraviolet Lithography has been developed. The aspherical mirrors were fabricated using the computer controlled optical surfacing (CCOS) process and a phase shift interferometer. The mirrors have figure errors of 0.58 nm and surface roughness of 0.3 nm. In order to obtain a high efficiency mirror, M1 and M2 were coated with a graded d-spacing Mo/Si multilayer and M3 was coated with a uniform d-spacing Mo/Si multilayer. The peak reflectivity was 65% at the wavelength of 13.5 nm. The wavelength matching of each mirror spans 0.45 nm. The mirrors were aligned with a Fizeau-type phase shift interferometer, and a final wavefront error of less than 2nm was achieved. Using this system, exposure experiments were performed. 60 nm L & S patterns on the exposure area of 10mm × 10mm were achieved.

Key words: EUVL, Lithography, Multilayer, Reflection mask, Resist, Mirror optics, SR, Laser plasma source

1 ま え が き

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70nmをもつ64Gbit級の半導体メモリーや演算速度10GHz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248nmのKrF（クリプトンフッ素）エキシマレーザ光を光源とし、石英ガラス上に薄いCr（クロミウム）で形成された4倍体のパターンを原画として用い、これをウェハ上に縮小投影光学系により縮小露光する方式である。この装置を用い0.18mmのパターン形成が可能となっている。また、KrFエキシマレーザを用いる露光装置の次の世代として、波長193nmのArF（アルゴンフッ素）エキシマレーザを用いる露光装置が次世代半導体開発に準備されている。

しかしながら、屈折光学系を用いた更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13nmまで短くすることが検討されている。この波長は極端紫外（EUV）領域に属しており、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に近いので、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。このため反射鏡を使用して縮小光学系を構成する露光方式が提案され

た。^{1)~4)} 通常の単層膜、例えばAlを形成した反射鏡の直入射反射率は 4×10^{-4} ほどであり機能しない。しかしながら、波長の1/4程度の厚さをもつ薄膜で軽元素と重元素を交互に積層した多層膜の場合には、その多層構造がBraggの条件を満たす時、それぞれの界面で反射した光の干渉により高い反射強度が得られる。例えば波長13nmで最大反射率が期待されるMo/Siの場合には、直入射で65%以上の反射率が実験的にも得られている。次世代のリソグラフィ技術である極端紫外線露光ではこの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事により、ウェハ上で70nm以下のパターンを形成しようとするものである。

本論文では放射光施設ニュースパルに設置した実用露光領域をもつ露光実験機の概要と、露光装置を用いた転写結果について詳細に述べる。

2 露光装置の概要

Fig. 1に開発した極端紫外線露光装置の概要を示す。⁵⁾ この装置は3枚の非球面からなる縮小光学系、マスクとウェハの同期駆動ステージ、マスクとウェハの位置合せ光学系、ウェハの焦点検出光学系、8インチウェハ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30mm × 1mmとし、半導体のチップサイズ、例えば30mm × 28mmを露光するには、マスクとウェハを倍率を考慮して同期走査駆動させる事により行なえる。Table Iに開発した装置の仕様を示す。

EUV光を利用する縮小投影露光装置の解像性能は、

† 原稿受理 平成13年12月20日 Received Dec. 20, 2001

* 姫路工業大学高度産業科学技術研究所 〒678-1205 兵庫県赤穂郡上群町光都, Lab. of Advanced Sci. and Tech. for Industry, Ako-gun, Hyogo, 678-1205

** 姫路工業大学工学部物質系工学専攻 〒671-2201 姫路市書写, Material Eng., Himeji Inst. of Tech. Shosha, Himeji, 671-2201

*** 正会員 姫路工業大学工学部物質系工学専攻 〒671-2201 姫路市書写, Material Eng., Himeji Inst. of Tech. Shosha, Himeji, 671-2201

Fig. 1. Configuration of the EUVL laboratory tool.

Table I. Specification of EUVL laboratory tool.

Wavelength λ	13.5 nm
Numerical Aperture NA	0.1
Demagnification	1/5
Exposure field (Static)	30 mm $\times$ 1mm
Exposure field (Scanning)	30 mm $\times$ 28 mm
Resolution	70 nm
Depth of Focus	1 μ m (70nm)
Wafer size	8 inches
Mask size	8 inches wafer
	6 inches $\times$ 0.25 inches t Glass

Rayleigh's Criterion $0.61\lambda/NA$ で規定される。例えば波長 λ を 13nm, 開口数 NA を 0.25 とすると, 解像性能は 30nm が期待される。この時の焦点深度は λ/NA^2 で与えられ 200nm となる。この焦点深度は現在 0.18 μ m 世代で用いられている KrF エキシマリソグラフィに比べても十分大きな値であり, 短波長化による低 NA の効果が大きい事が分る。しかしながら, 実際の露光特性は反射鏡の形状精度, その上に積む多層膜の完全性, 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。また, この時の n 枚のミラーからなる光学系を構成する 1 枚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 13.5nm で光学系の波面の精度は上記の例では 1nm 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 枚当たりの形状精度は 0.19nm となる。ミラーの表面粗さは Debye-Waller 因子によって規定される。1 枚当たりの反射率の低下 2% を許容すると 0.15nm が要求される。このように EUVL ではミラーの形状精度, 粗さ精度を如何に向上するかが重要な課題とされ, 加工評価の開発を進めてきた。

非球面ミラーの製作は米国 Tinsley 社と共同で進めた。ミラー材料は膨張係数が $0.2 \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ の 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コンピューター制御による加工と評価を繰り返し行なった。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系を開発し, 用いた。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 0.58nm であった, また中間領域の粗さはミラウ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 0.3nm ほどであった。

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。すなわち, 測定領域が 0.2mm 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 2mm ~ 数 10 μ m での粗さは光の散乱を引き起こし, パタンコントラストを低下させる。10 μ 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間領域の粗さの低減が難しく, 中間領域の粗さの低減のための研磨法の改善に大きなブレークスルーが必要である。

ミラーへの多層膜形成は, マグネトロンスパッタ法, およびイオンビームスパッタ法により行なった。⁶⁾ Mo/Si 多層膜の場合には両方法ともに 65% 以上の反射率が容易に得られており, 膜厚制御性 0.1% 以下も可能となっている。ここでの課題は, ミラーへ種々な角度で入射する光の波長を効率よく揃え, 積分反射率を大きく取る事である。Fig. 1 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変化が大きい。このため, Fig. 2 の例に示すように M1 と M2 ミラーは光軸に垂直方向に膜厚分布をもつ Graded な膜とした。M3 ミラーへの入射角は光軸に対して垂直, 水平の両方向共にほぼ 2 度であるため, 一様膜厚をもつ多層膜を形成した。

Fig. 3 に作成したミラーの反射率の測定結果を示す。⁷⁾ M1, M2 ミラーおよび M3 ミラーの反射率の中心波長はそれぞれ 13.54nm と 13.46nm とにあり, ピーク反射率は 65% 以上が得られた。露光光学系の中心波長 13.5nm に対し, $\pm 0.04\text{nm}$ であることが確認されている。また, 3 枚のミラーの半値幅は 0.45nm と大きく取れ, スループット向上に寄与する。

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。⁸⁾ はじめに市販のフィゾー干渉系を用い, 透過波面の測定を行なう。つぎに得られた波面を計算機上で Zernike の式に展開し, その 32 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

Fig. 2. Predicted wavelength distribution of M2 mirror.

Fig. 3. Reflectivity of M1, M2 and M3 mirrors.

量から光学系の収差補正に有効な誤差量を見出し、光軸調整を行ない、再度波面測定を行なう。この測定・調整を繰り返す事により合わせを行なう。最終的な透過波面としては2nmまで調整することができた。

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光の強度はウェハ面上で最大でも10mW程であり、例えば $2\text{mJ}/\text{cm}^2$ 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。Table IIにスループット80枚/時を確保するために必要なウェハ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、レジスト感度 $2\text{mJ}/\text{cm}^2$ からウェハ上でのビームの強度は44mWほどが要求される。光学系のミラー枚数はNAを0.25とした時には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と光源のパワーは12Wほど必要となる。

3 マスクの製作

極端紫外線露光用のマスクは多層膜基板の上に吸収体のパタンを形成することにより製作される。(1) はじめにガラス基板(例えば6インチ角×0.25インチ厚さの低膨張ガラス基板)に多層膜を形成する。(2) 吸収体パタ

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_2 、 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、Ta₂N₃、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ンを形成する。(5) 現像後、吸収体パタンをエッチングする。(6) 吸収体パタンの検査・修正を行なう。(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半導体の従来プロセスであり、容易に加工が可能である。唯一ガラス基板にはじめに多層膜を形成するプロセスのみが異なる。このため、検査・修正も高精度化した従来機器の対応が可能である。マスク製作上の問題点は如何に無欠陥な多層膜を形成するかである。Mo/Siは600MPa程の圧縮応力を持つために、過去においては大気中に取り出した時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の制御も容易となり、欠陥個数を通常でも0.1個/ cm^2 ほどと低減できている。しかしながら、15cm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/ cm^2 ほどにせねばならず、さらなる膜形成・評価法が重要となる。

Fig. 4に試作したマスクパタン例を示す。⁹⁾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。¹²⁾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L&Sの加工、0.13 μm の1:2のL&Sのパタン形成も可能である事が分かった。70nm世代ではCrのウェットエッチングでも十分な性能を確保できる。

13nmの波長光は物質とのインターアクションが強く、真空中に浮遊するハイドロカーボンを分解し、カーボンをマスク面あるいはミラー面に形成する。カーボンコンタミネーションを除去する方法としてオゾン雰囲気中での紫外線照射を試みた。Fig. 5にオゾン照射効果を示す。照射時間の増加につれコンタミが除去され、多層膜および吸収体面の粗さが低減するのが明らかである。またFig. 6に除去後の多層膜への影響をX線回折によって調べた。高次ピークまで観察され、多層膜の周期構造へのダメージはないものと考えられる。このようにオゾン雰囲気中の紫外線照射によりカーボンコンタミネーションを除去することが可能となることが明らかに出来た。¹⁰⁾

4 レジスト材料の評価

EUVL用のレジストに求められる特性として、解像度70nm以下、寸法精度10nm以下、波長13nmにおける感度が $10\text{mJ}/\text{cm}^2$ 以下、Wall slope 85°以上、低エッジラフネス、耐環境性、さらに低脱ガスであることなどが挙げられる。ここではまず初めに市販の各種レジストの評価を進め、現存レジストのEUV光に対する特性を明らかにした。感度の評価には分光器を通した光や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。Fig. 7は感度測定の一例である。¹¹⁾ネガの化学増幅レジスト(SAL601)では $2\text{mJ}/\text{cm}^2$ のデータも得られており、ポジ型の化学増幅レジストは $10\text{mJ}/\text{cm}^2$ であった。

このように波長が短く吸収が強いために高感度化は可

Table II. Requirement of Source Power Condition.

Condition		
Exposure Field	25mmx44mm	
Sensitivity of resist	$2\text{mJ}/\text{cm}^2$	
Wefer size	12 inches	
Wafer load & unload time	10 s	
Wafer alignment time	5 s	
Throughput	80 wafers / hour	
Exposure time of one field	0.5 s	
Power on wafer	44mW	
Transmission of Mask and Optics	6%	
Transmission of of Condenser optics	6%	
Power of Source	12W

(a) 0.33 μ m lines and spaces pattern

(b) 0.13 μ m isolated patterns

Fig. 4. Photograph of Cr absorber mask.

Fig. 5. Effect of Ozone treatment to the mask contamination.

Fig. 6. X-ray diffraction pattern after Ozone treatment.

(a) SAL601 negative-tone resist.

(b) DP603 positive-tone resist.

Fig. 7. Sensitivity curves of resist.

能である。また、照射時の脱ガス特性についても測定を進めた。EUVLでは真空チャンバ内で露光を行うため、チャンバ中に脱離した分子、特に炭化水素 (C_xH_y) はEUV光照射により分解され炭素 (C) がマスクやミラーに付着しマスクコントラストや反射率の低下につながる。約100nmの厚さのレジストを塗布したSiウェハをEUVLビームラインの照明光学系の上流にあるチャンバに取り付け、EUVを照射し、発生したガスを四重極質量分析計

(M-QA200F, アネルバ) で測定した。¹²⁾照射面積は 18mm × 11mm であり, 試料と検出器との距離は約 100mm である. 測定前に質量分析計のフィラメントからのガスを取り除くために 600 秒焼きだし運転を行っており, チャンバ内の真空度は約 1×10^{-4} Pa に保っている. Fig. 8 にベース樹脂が α -chloromethacrylate と α -methylestyrene の共重合体である電子線描画用ポジ型レジスト ZEP520 の EUV 照射時の脱ガス特性を示す. 電子線描画では主鎖切断型のレジストであるが EUV の照射によってベンゼン以外にメタンや二酸化炭素などのイオン脱離種が観測された. このことは主鎖以外に, 分子量の低い官能基が分解されているということが考えられる. 他のレジストと比較して特に質量数 50 の増加が目立ったが, これはベンゼン環を示していると考えられる. Fig. 9 に KrF 用化学増幅系ポジ型レジストである EUV001 の脱ガス特性を示す. ベース樹脂は poly (vinylphenol-co-tert-buty-

lacrylate) で酸発生剤 (PAG) には onium salt, 溶媒には propylene glycol monomethyl ether acetate (PGMEA) が用いられている. EUV 照射により onium salt から分解された酸によって分解された C_4H_8 が観測されているが, さらに C_4H_8 が光励起反応によって分解されたと考えられるガス脱離種 (C_xH_y) が観測された. Fig. 8 に比べて脱ガス量が低い事が明らかである. このように KrF リソグラフィ用に開発した化学増幅系レジストは感度が高く, 脱ガス量も少ない事が明らかになり, EUVL レジストとして使える見通しが得られた. 今後はエッジラフネスの低減と光源開発との兼ね合いでより高感度化が要請されるであろう.

5 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. Fig. 10 (a) に 10mm × 2mm の露光領域での 0.1 μ m の L & S を示す. また (b) には 40 nm, 80nm の L & S 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 μ m である. 光学特性からも 0.1 μ m は十分な解像をしているが, 40nm パターンではラインエッジラフネスの影響が大きい. Fig. 11 はマスクとウェハのステージ走査によって大面積 10mm × 10 mm の露光領域を得たものである. 0.1 μ m の L & S およ

Fig. 8. Outgas distribution of ZEP520 resist.

Fig. 9. Outgas distribution of EUV001 resist.

(a)

(b)

Fig. 10. Exposure pattern in the field of 10mm × 2mm.

Fig. 11. Exposure patterns in the field of 10mm × 10mm.

び $0.06\mu\text{m}$ の L & S をはじめて実現することができた。

6 あとがき

極端紫外線領域での 13.5nm 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）性能のパターン形成が可能であることを確認した。反射型マスクの製法を明らかにし、Cr のウェットエッチングにより 70nm 世代対応の良好なパターン形成を得、導入可能性を示唆した。レジストでは感度、脱ガス量、および露光機による評価を進め、KrF リソグラフィに開発したレジストの適応可能性を得た。また大面積露光の実現のため、マスクとウェハステージを同期走査露光を行った結果 60nm の L & S パタンの形成に成功した。今後の課題は (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である。

参考文献

- 1) 木下博雄, 金子隆司, 武井弘次, 竹内信行, 石原 直, 第 47 回応用物理学会学術講演会予稿集, 322 (1986).
- 2) H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii, J. Vac. Sci. Technol., **B7**, 1648 (1989).
- 3) H. Kinoshita, Appl. Opt., **32**, 7079 (1993).
- 4) T. Haga and H. Kinoshita, J. Vac. Sci. Technol., **B13**, 2914 (1995).
- 5) H. Kinoshita, T. Watanabe, N. Niibe, M. Ito, K. Murakami and N. Platonov, Proc. SPIE, **3331**, 20 (1998).
- 6) H. Kinoshita, T. Watanabe, D. Bajuk and Y. Platonov, Proc. SPIE, **3767**, 164 (1999).
- 7) H. Kinoshita and T. Watanabe, J. Photopolymer Sci. & Technol. **13**, 379 (2000).
- 8) K. Sugisaki, T. Oshino, T. Watanabe and H. Kinoshita, Proc. SPIE, **3997** (2000).
- 9) H. Nii, T. Watanabe, H. Kinoshita and Y. Sugie, Proc. SPIE, **4409**, 681 (2001).
- 10) H. Nii, T. Watanabe, H. Kinoshita and Y. Sugie, Proc. SPIE, **4409**, 687 (2001).
- 11) H. Kinoshita and T. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 6771 (2000).
- 12) T. watanabe, K. Hamamoto, H. Kinoshita, H. Hada, M. Endo and M. Sasago, J. Photopolymer Sci. & Technol., **14**, 555 (2001).