

解説

X線縮小投影露光技術

木下 博雄

NTT LSI研究所

X-ray Projection Lithography Using Multilayer Mirrors

Hiroo Kinoshita

NTT LSI Laboratories

A feasibility study on soft x-ray reduction lithography using multilayer mirrors has been performed. An exposure wavelength range of 70 to 110 Å is proposed as most suitable with current technology. With the aim of providing multilayers with very sharp interfaces and high reflectivity, we attempted to improve the multilayer fabrication process, with one results being the fabrication of an amorphous Mo/Si multilayer, by controlling substrate temperature. A new telecentric optics consisting of two-aspherical mirrors has been proposed. The experimentals were performed on the SR beam line BL-1 of the KEK-PF storage ring. Demagnifying exposure patterns of less than 0.15 μm have been obtained using multilayer reflecting mask.

1. まえがき

X線縮小投影露光の研究¹⁻⁶⁾は近年急速に進展してきており、最近では0.1 μm技術として位置づけられてきている。その背景には高い反射率をもつ多層膜製造技術の進歩がある。130Åの波長でのMo/Si多層膜の場合には50%以上の反射率が直入射でも容易に得られるようになり、複数のミラーからなる光学系でも十分実用になるものが作られるようになってきている。

筆者らは多層膜を形成した反射縮小光学系による軟X線領域での縮小露光方式を提案してきた。

この方式による特長としては、

- 1) 軟X線による縮小露光のため、0.05 μm程の微細パターン形成も可能。
 - 2) 反射形マスクが使える、歪の無い高精度なパターン形成が可能。また、反射形のため冷却機構が付加でき、熱歪を避けることが可能。
 - 3) 多層膜を用いるため、波長領域が50Å以上となるが、この領域では2次電子の飛程が十分小さく、高精度なパターン形成が可能、また、レジスト感度が向上する。
- などがあげられる。

ここでは、X線縮小投影露光の研究の現状と今後の課題について述べる。

2. X線縮小投影露光システムと露光波長³⁾

表1にX線縮小投影露光システムの目標性能と各構成要素の開発目標を示す。縮小光学系としてリング開口をもつ系を想定している。

レンズ性能としての開口数NAは、波長と解像度とから決められ、波長を130Åとし、解像度dを0.1μmとすると0.07以上を必要とする。要求されるレジスト感度は縮小光学系の効率によって、すなわち何枚のミラーで縮小光学系を構成するかによっても異なる。表1の値は2枚光学系での要求値である。これらの各要素、縮小光学系、多層膜反射率、レジスト等は波長依存性をもち、システム設計においては波長をどこに選ぶかが重要である。以下に波長選択の要因として、波長と光学系の開口数で決まる解像度と焦点深度、多層膜の反射率、レジスト厚と感度について述べる。

図1は光学系を無収差としたときの解像度と焦点深度の波長依存性を示したものである。光学系を無収差とし、光源がインコヒーレント光としたときの解像度dはフランホッフの式(1)を基に、焦点深度dfはレーリの式(2)によって規定される。

$$d = \lambda / (2NA) \tag{1}$$

$$df = \lambda / (2NA^2) \tag{2}$$

ここで、λは波長、NAは開口数である。

目標とする解像度を0.1μm、焦点深度を±1.0μmとすると図の2本の線で囲まれた領域が波長とNAのとりうる値を示す。

長波長側の限界は200Åであり、必要となるNAは0.1である。短波長化するほどNAは小さくてよく、反射光学系の設計の容易さが増大する。焦点深度を±0.5μmとすると400Åの真空紫外光を利用でき、この波長光を用いた0.1μm加工をBell研究所が提案している。このときの光学系のNAは0.2以上必要となり、少ないミラー枚数での露光光学系を構成することが困難となり、短波長化のメリットが活かされない。

このため、縮小光学系としての種々の条件を満足させる反射光学系のNAを0.1とすると200Å以下の波長域がX線縮小投影露光での露光波長と考えられる。

図2に上記の波長領域で高い反射率が期待できる多層膜の波長依存性を示す。ここで、多層膜の製作可能な一層の膜厚を10Å程とすると、40Å程

Table 1 Requirements for X-ray projection lithography.

仕様目標	
解像度	≤ 0.1 μm
焦点深度	≥ ± 0.5 μm
スループット	≥ 25枚/hr (6in)
縮小光学系	反射形マスク
NA ≥ 0.07	最小パターン ≤ 0.5 μm
露光領域 ≥ 20mm	コントラスト ≥ 7(強度比)
縮小率 ≈ 1/5	
多層膜製作	レジスト
反射率 ≥ 40%	感度 ≤ 10mJ/cm ²
バンド幅 ≥ 5 Å	膜厚 ≥ 0.3 μm
	解像度 ≤ 0.1 μm
基板加工	走査位置合わせ機構
非球面	真空中
形状精度 ≤ 20 Å	真直度 0.01 μm/20mm
面粗さ ≤ 5 Å	同期走査

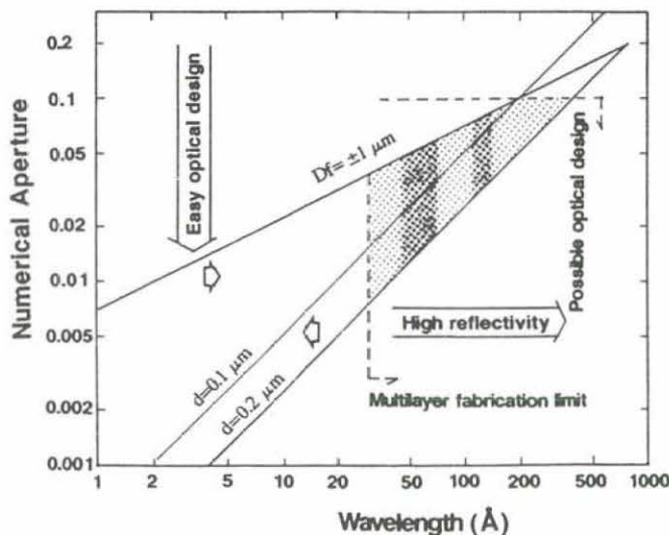


Fig.1 The optical characteristics dependence on x-ray wavelength.

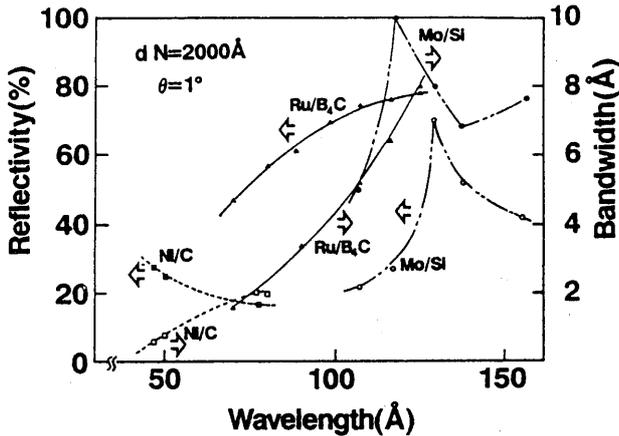


Fig.2 The reflectivity efficiency of Ni/C, Ru/B₄C and Mo/Si multilayer.

が露光波長の下限となる。

40～200Åの波長領域で高反射率が得られる軽元素の物質としてはこの波長領域に吸収端をもつC, B, Be, Siが挙げられる。Cの吸収端を越えた領域では光学定数だけから判断すればNi/Cがよく、反射率として20～30%以上得られるが、半値幅が0.5Å以下と狭くなる。光学系を構成する多層膜ミラーのマッチングを考慮すると1枚ミラーの反射率の半値幅としては5Å以上必要である。

Bは自然界では化合物として存在し、B₄Cを例として考えると、Ru/B₄Cでは70Åの波長で50%の反射率と5Å程の半値幅が得られる。

Beは114Åに吸収端をもつが取扱が難しいことからほとんど作成例がない。

SiはMo, Ru, Rhとの組合せで70%を越える高い反射率が得られ、半値幅として5Å以上が得られる。実際にも70%近い反射率の報告もある。

このように、反射率はCを越えた波長域でも数10%の反射率が得られるが、多層膜の反射強度の半値幅は短波長化につれて狭くなる。ピーク反射率と半値幅の積の大きい事が望まれる露光用の多層膜としては半値幅が5Å以上とれる70Å以上の波長が適している。

図3にPMMA, FBMのポジ型レジスト, ネガ型のSPP (Si含有レジスト)の露光深さの波長依

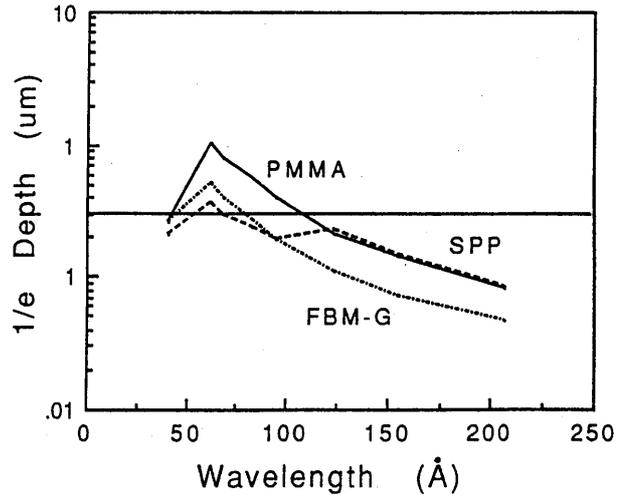


Fig.3 Calculated exposure depth of several resist.

存性(計算値)を示す。この値は入射光のエネルギーが1/eに減衰したときの値でのレジストへの光吸収深さを示す。130Å程では吸収のため2000Å程しか光電子が内部に入らない。レジスト厚はパターン幅の3～5倍必要とされており、0.1μmパターンに対しては0.3μm以上の厚さが必要となる。上記のPMMAレジストの場合には波長を110Å以下とせねばならない。130Å以上の波長域では露光深さが0.2μm以下となり、多層構造レジストを用いざるを得ない。

以上のように、X線縮小投影露光の露光波長はレジストに多くの進展がないものとするならば70～110Å程の波長とするのが適当であるが、多層膜の高反射率化を実現せねばならない。露光波長を130Åとするならば、多層構造レジストとせねばならない。もしくは図のSi含有レジスト(SPP)の例のように、この領域で吸収端をもつ物質を添加したレジストの開発、またシリル化等を利用した表層露光に適した新しいレジストプロセスの開発が必要となる。

3. 縮小光学系の設計

ミラー光学系による縮小光学系は色収差が無いために領域を限れば2枚光学系で0.1μm以下の解像度を得ることも可能であるが、リソグラフィ技

術としては1チップ分に相当する露光領域と高いスループットとが要求される。1GDRAMの時代には1チップの短辺が20mm以上とも言われており、大面積をいかに実現するかがミラー光学系の課題である。光学系の縮小率はチップサイズと作成可能なマスクサイズ、広げられる光源の大きさから考えても1/5以下が適当である。

大面積化は、収差の小さな同心円状（リング開口）の領域をマスクとウェハの同期走査によって拡大する方向と一括大面積を可能とする光学系を実現しようとする方向とがある。一般に前者は少ないミラー枚数で実現でき、後者は収差補正のため多くのミラー枚数を必要とし、スループットの低下を余儀なくされる。

これらは使用する光源の性質、放射光もしくはレーザプラズマのような光源を用いるかによっても異なり、放射光の場合には縦の開き角を一様に広げることは容易ならぬことから、前者の同心円状の開口を走査する方式が有利となる。

図4にNTTが提案⁷⁾したリング開口方式の2枚ミラー縮小光学系を示す。この光学系は、ウェハ面に対してテレセントリック性を有しており、焦点深度、位置合わせ等に有利な構成となっている。波長130Åで0.1μmの解像度を確保するようにNA0.07で設計した。縮小率は1/5である。図5に光学特性としてMTF(sin波)を示す。5000本/mmでMTF40%以上の回折限界に近い性能を得ており、焦点深度が1μm変動してもMTF値の変化はほとんどない。また、図6にリングフィールド内での歪を示す。12.5mm半径のリングフィールド内で、歪0.01μm以下とする横幅は0.4mmまでとれる。走査することにより得られる露光領域としては20mm角以上が可能である。この光学系は2枚とも非球面光学系を必要とするが、最小ミラー枚数で要求条件を実現させた案である。

図7にAT&TBell研究所が提案⁸⁾している大面積一括の1/5縮小系の例を示す。露光領域10×15mmで、ディストーションを1μm以下とするため

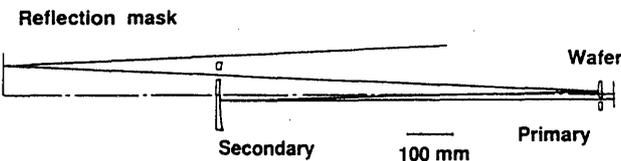


Fig.4 Designed two - mirror telecentric optics.

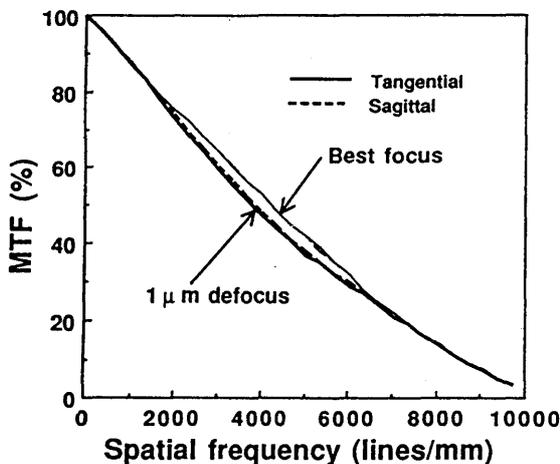


Fig.5 MTF curves of designed optics for incoherent illumination. NA is 0.07, wavelength is 130 Å.

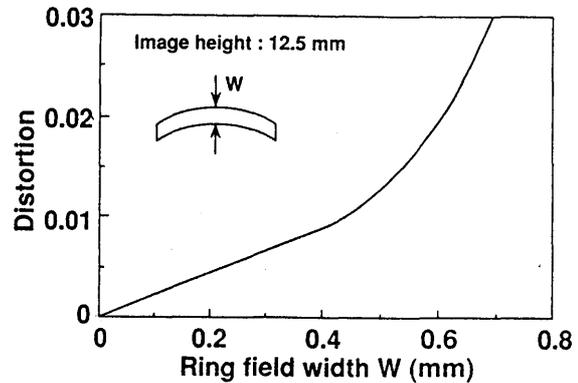


Fig.6 Distortion of designed optics.

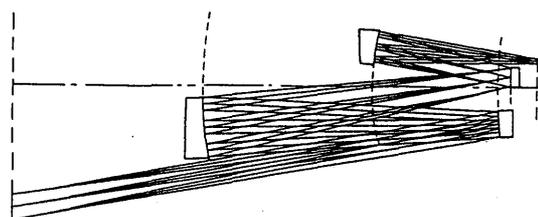


Fig.7 Designed optics with large exposure field (AT&T).

に4枚とも非球面化している。NAは0.08であり、MTFは5000本/mmで40% (矩形波) 程であり、解像度 $0.1\ \mu\text{m}$ を露光可能とする光学系案を得ている。このような光学系では、MTFとディストーションとがトレードオフの関係にあり、両方を満足させるにはさらに多くの反射枚数を必要とする。

上記の2つの例で1枚のミラーの反射率を50%とするとスループットとしては4枚系の後者は1/4に低下し、高スループット化にはいかに少ないミラー枚数で実現するかが要点である。また、1枚のミラーの形状精度への要求値もミラー枚数を n とすると $\lambda/8n$ となりミラー枚数の増加につれて加工精度も厳しくなる。

以上のように、20mm以上の露光領域で $0.1\ \mu\text{m}$ を解像する光学設計案は各種得られており、今後はいかに高精度な非球面光学系を大口径で実現するかが課題である。

4. 多層膜の製作

露光システムの高スループット化では多層膜ミラーの反射率の向上が最も重要となる。X線による近接露光システムとのスループット比較の点か

ら1枚ミラーの多層膜の反射率としては40%以上、半値幅としては 5\AA 以上が望まれる。また、多層膜の反射率は重元素と軽元素の物質の組合せと波長で決められるが、実際には、多層膜製作法に多くを依存しており、2つの層の界面が急峻で、かつそれぞれの層が均質 (アモルファス) に形成されることが重要である。

多層膜の製膜技術としてはマグネトロンスパッタ、イオンビームスパッタ、電子ビーム蒸着法が検討されている。イオンビームスパッタ法は膜形成時の真空度も低く、良質なアモルファスな膜が形成できているが、膜形成速度が遅いため、多層化するほど装置の不安定性に起因するとおもわれる膜厚変動が生じ、十分な反射率が得られていない。電子ビーム蒸着法はスパッタ源の形状変化、水晶振動子による膜厚制御性に問題がある。このため、現状の膜形成法ではマグネトロンスパッタによる膜形成が最も高反射率化に適している。

図8にNTTの境界領域研が開発したマグネトロンスパッタによる多層膜形成装置⁹⁾を示す。6インチのターゲット3個を有し、試料ホルダーには4インチウェハを6枚まで装着可能である。この装置は高精度な膜厚制御のために試料ホルダーの回

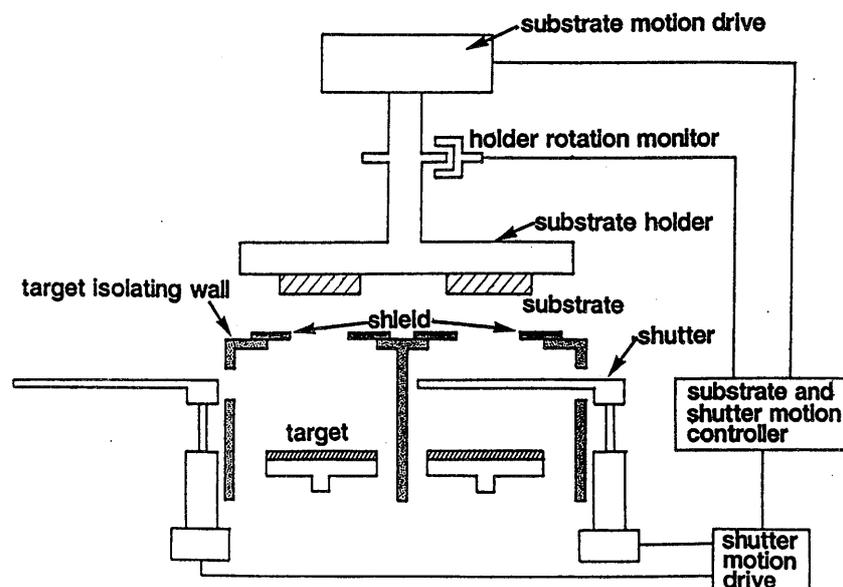
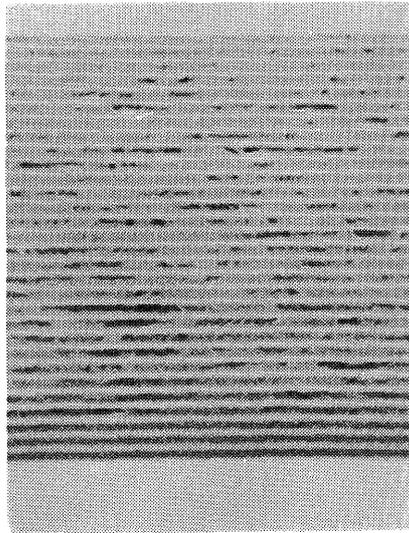
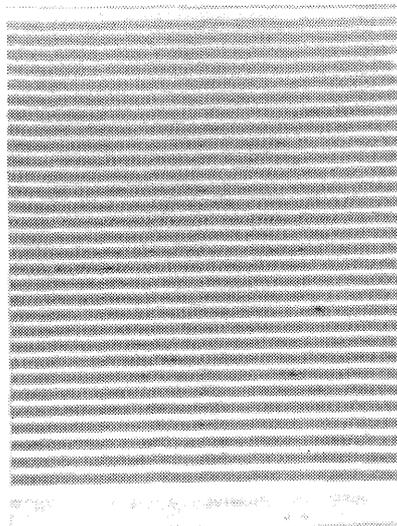


Fig.8 Schematic illustration of magnetron sputter deposition system.



(a)



(b)

Fig.9 Cross-section TEM photograph of Mo/Si multilayer fabricated at a different substrate temperature (a) high temperature (b) low temperature.

転精度を向上させ、回転数とシャッターの開閉時間とから膜厚を制御している。各層の厚さのバラツキは平均1原子以下である。また、特殊な形状のシールドマスクをターゲット-試料間に設けることにより半径方向の膜厚補正を行い、4インチウェハ全面での膜厚変化1%以下を実現している。

成膜上の問題としては界面の粗さの低減化が検討されている。図9はマグネトロンスパッタで作成したMo/Si多層膜のTEM像¹⁰⁾である。

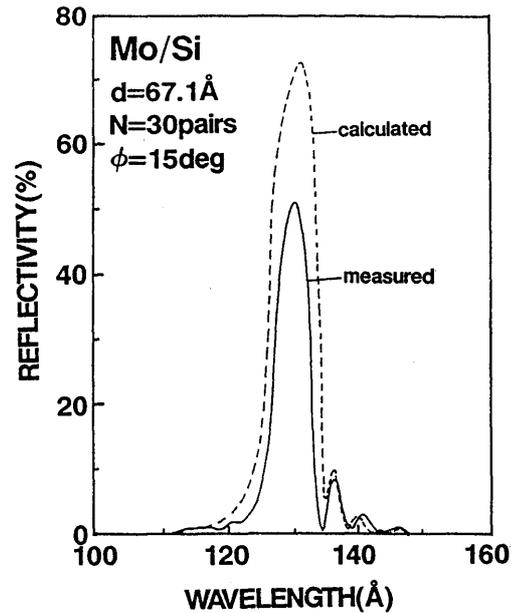


Fig.10 Measured reflectivity of a Mo/Si multilayer mirror.

(a)は通常の条件(基板加熱)での作成例であり、Mo層が多結晶化しているのが観察される。結晶の大きさは100Å程もあり、これが界面の粗さを増大させている。このためMo層のアモルファス化を試みた。(b)は基板を冷却して膜形成した例であり、Mo層をアモルファス化することができ、界面あらさを低減させることができた。その他Mo層のアモルファス化としてMoの合金化¹¹⁾、Siの化合物化の検討がなされている。

多層膜の反射率評価には、使用する波長、入射角での評価を必要とするため放射光を用いている。

図10に放射光を用いた反射率測定例を示す。反射率測定は高エ研BL-1Bに平面回折格子型分光器を置き、 $\theta-2\theta$ をもつ反射率計で測定した。波長130Å、入射角15度でのMo/Si多層膜の反射率として51%、半値幅も6Å近く得られている。この多層膜を用いれば上記の2枚反射形縮小光学系と反射型マスクを含めた3枚ミラー構成でも12%以上の反射効率が得られ、以下で述べる長波長でのレジスト感度の向上とを合わせて高スループットの見積りも可能となる。

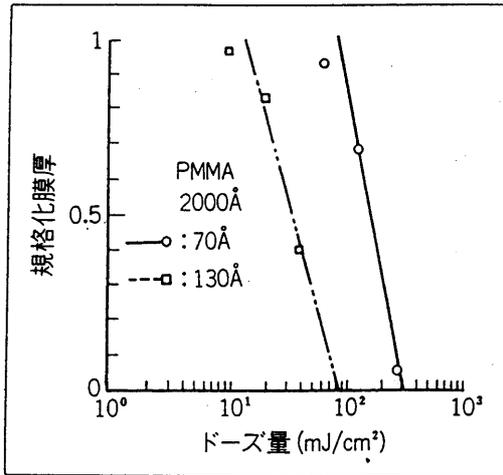


Fig. 11 Measured sensitivity of PMMA resist.

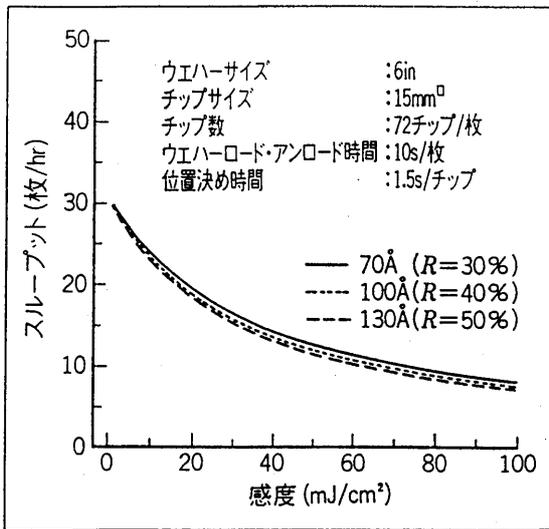


Fig. 12 Estimation of throughput.

以上のように、マグネトロンスパッタ技術によってSiの吸収幅より長い125Å以上の波長域では50%以上の実用反射率が得られている。今後はより短波長域(70Å程)での高反射率化が課題である。このためにはさらなる界面の粗さの低減化の検討が必要である。

5. 長波長域でのレジスト感度測定¹²⁾とスループット試算

図11に放射光を用いたPMMAレジストの70-130Åでの感度測定結果を示す。測定には分光光を用い、70-130Åでのドーズ量と露光深さを求め

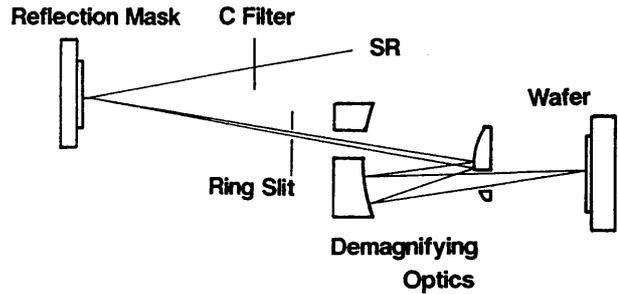


Fig. 13 Schematic illustration of the experimental setup to evaluate the image forming characteristics.

た。感度は長波長化するにつれて向上し、130Åの波長で2000Åの膜厚を露光するのに必要なエネルギーは100mJ/cm²程である。これは波長10Åの露光感度に比べて10倍ほど向上している。

図12に2枚ミラー光学系でのスループット試算を示す。放射光の強度は高エネルギー物理学研究所放射光施設BL-1とした。全反射ミラーの反射率を85%, 70, 100, 130Åでの多層膜の反射率をそれぞれ30, 40, 50%とした。この結果波長に関係なく、上記の100mJ/cm²では6インチウェハ5枚程得られることがわかる。25枚/時を満足させるためには10mJ/cm²とすればよく、現存させるレジスト、例えばSAL 601 (Shipley製)では3mJ/cm²以下の感度を得られており¹³⁾、高スループット化も期待できる。

6. 縮小露光実験^{5,6)}

6.1 実験装置の概要

以上の検討をもとに、多層膜を用いた光学系によるパタン転写特性の評価を進めた。

図13はシュバルツシュルツ光学系に多層膜を形成して構成した縮小投影露光実験装置である。光源には、高エネルギー物理学研究所のフォトンファクトリBL-1を用いた。3度曲げのトロイダルミラーによって短波長をカットし、0.1μmのカーボンあるいはボロンのフィルターを用いて長波長カットをし、縮小光学系へ適当な波長幅をもつSOR光を入射する。縮小光学系の前段には円弧状の切り欠きをもつ遮光板を置き光軸に対して同心

円となす光のみをウェハ上に集光させる。マスクとウェハを同期移動させ、かつ、ウェハをマスクに対して縮小倍率分低速で移動させることにより、広い領域のマスクパターン像をウェハ上に形成させることができる。

図14に反射型マスクの製造プロセスの1例を示す。はじめに多層膜を平面度、粗さ精度の高いSi基板上に形成し、次にレジストをコートし、電子ビームあるいはフォトリソグラフィによって露光し、現象する。最後に多層膜をエッチングする。この方法により多層膜の反射率を損なうことなくパターン形成が可能であり、また、吸収部の基板は

プラズマにさらされるため表面荒れを生じ、コントラストの向上化にもなる。また、反射面をパターン面としているため入射角依存性もなく高精度なパターン形成が可能である。図15に反射形マスクの形成例を示す。4インチ全面で一様なマスクが形成できている。

光学系のミラー合わせにはX線ズーミング管(浜松ホトニクス製)を用いた。図16に評価系の構成を示す。光学系による結像位置にCsIの光電面を置き電子光学系により200倍に拡大した像をMCPを通し、CCDカメラで撮影する。光学系は3軸ステージ上にあり、像をみながらX線領域での合わ

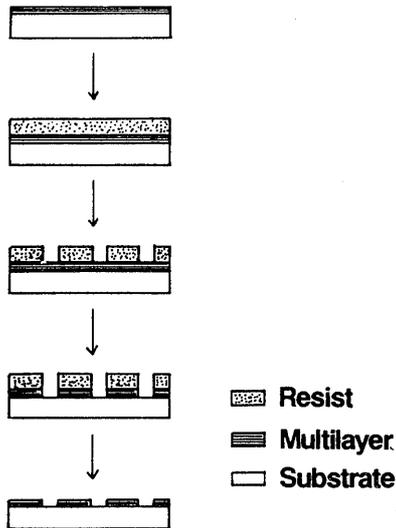


Fig.14 Procedure of a reflection mask fabrication.

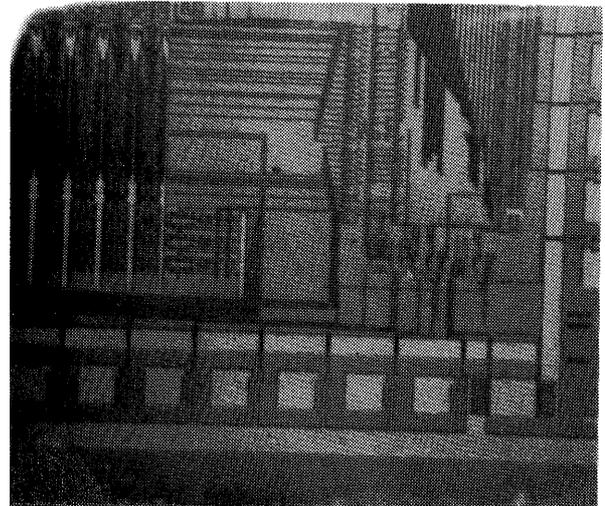


Fig.15 Photograph of a reflection mask.

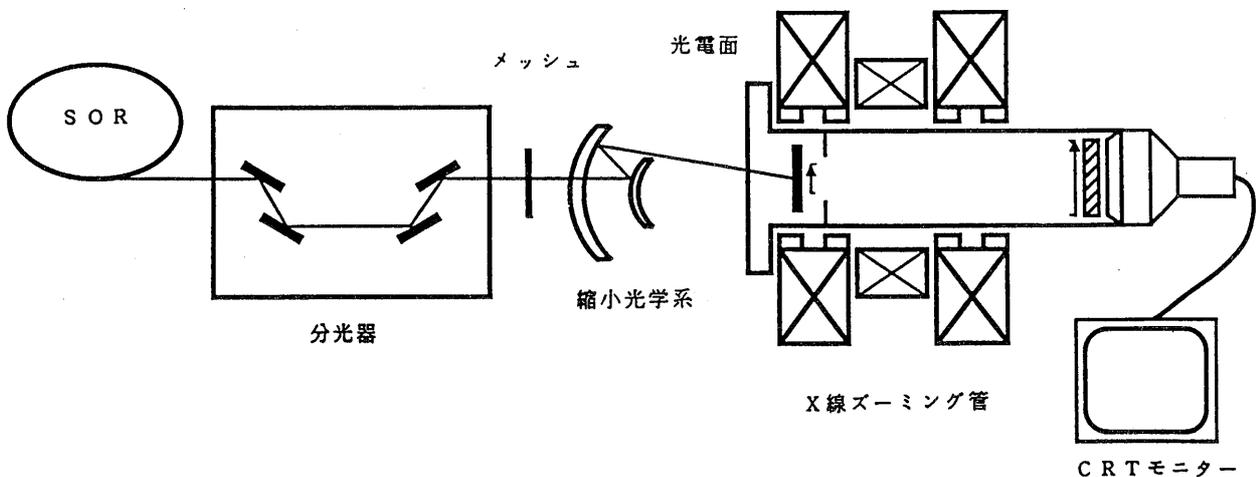


Fig.16 Schematic illustration of evaluation system for optics.

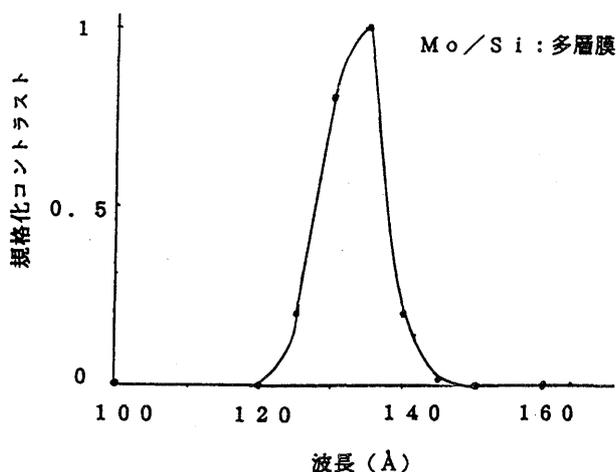


Fig.17 Characteristics of demagnifying optics.

せが可能である。図17は分光光を多層膜光学系に入射したときの映像出力を示している。130Åをピーク波長として作成した多層膜の反射率の波長特性とよく一致していることから、2枚の多層膜ミラーのマッチング度も測定できることがわかる。現状での解像度は0.5 μm程であり、光学系の解像度評価には不十分であるが、X線による光学系の合わせには十分な性能を確認できた。

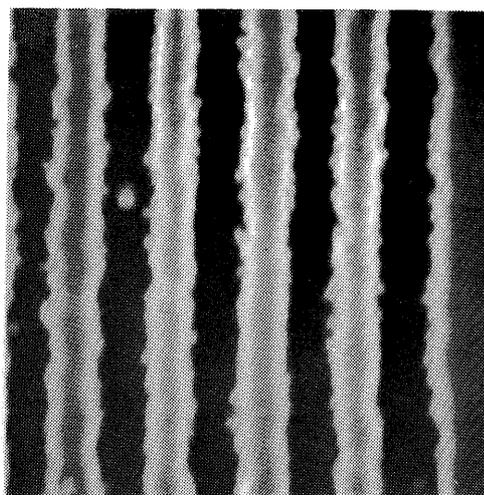
6.2 実験結果^{5,6)}

図18に反射形マスクを用いた露光結果を示す。多層膜にはMo/Siを用いており、露光波長は130Åとした。露光領域は、0.8 × 0.15mmである。レジストは高アスペクト比のパターンを得るために、3層構造とし、構成はPMMA (800Å) / a-Si (200Å) / OFPR (4000Å) である。PMMAを露光現象後、中間層のa-SiをSF₆、下層レジストをO₂の反応性イオンエッチングで加工した。

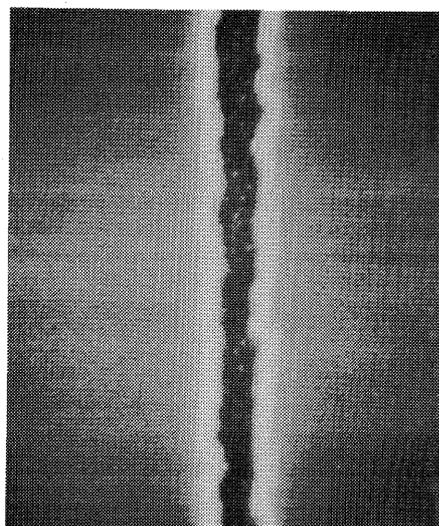
(a)では1/8に縮小された0.2 μmのラインアンドスペースパターンが形成できている。(b)は、孤立パターンの形成例である。0.15 μmのパターンが形成できている。

7. あとがき

以上述べてきたように、多層膜を用いたX線縮小投影露光によって微小領域(1mm以下)では0.1 μm



(a)



(b)

Fig.18 Example of replicated pattern.

(a) 0.2 μm lines and spaces pattern (b) 0.15 μm isolated pattern.

程のパターン形成も実現できており、微細加工性能を実証できた。しかしながら、リソグラフィ技術としてみたときにはその実現化のためのスタートラインにようやく立った状況にあり、今後は非球面光学系の製作によって大面積露光の可能性を早急に明らかにせねばならない。

文献

1) 木下博雄, 金子隆司, 武井弘次, 竹内信行, 石原

- 直, X線縮小投影露光の検討, 第47回応用物理学学会学術講演会予稿集 p.322(1986).
- 2) A.M. Hawryluk and L.G. Seppala, J. Vac. Sci. Technol. **B6**, 2162(1988).
 - 3) H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii, Soft X-ray reduction lithography using multilayer mirrors, J. Vac. Sci. **B7**, 6(1989)1648.
 - 4) D.W. Berreman, J.E. Bjorkholm, M. Becker, L. Eichner, R.R. Freeman, T.E. Jewell, W.M. Mansfield, A.A. MacDowell, M.L. O'Malley, E.L. Raab, W.T. Silfvast, L.H. Szeto, D.M. Tennant, W.K. Waskiewicz, D.L. White, D.L. Wendt and O.R. Wood, Appl. Phys. Lett. **56**(22), 28 May(1990).
 - 5) H. Kinoshita, K. Kurihara, T. Mizota, T. Haga, Y. Torii, H. Takenaka, Y. Ishii, Soft X-ray reduction lithography using a reflection mask OSA Proceedings on Soft-X-Ray Projection Lithography, **12**, 11(1991).
 - 6) H. Kinoshita, K. Kurihara, H. Takenaka; Soft X-ray reduction lithography using multilayer mirrors J. J. A. P 1991. Nov.
 - 7) K. Kurihara, H. Kinoshita, N. Takeuchi, T. Mizota, T. Haga and Y. Torii, J. Vac. Sci. Technol **B9**, (1991).
 - 8) T.E. Jewell, J.M. Rodgers and K.P. Thompson: Reflective systems design study for soft-X-ray projection lithography, J.Vac. Sci. Technol. **B8**, (1990)1519.
 - 9) Y. Ishii, H. Takenaka and H. Takaoda; MRS Int'l. Mth. on Adv. Mats. **10**, 321(1989).
 - 10) H. Takenaka, Y. Ishii, H. Kinoshita, K. Kurihara, Soft and Hard X-ray Reflectives of Multi-layers Fabricated By Alternating-material Sputter Deposition, Proc. SPIE, **1345** 213 (1990).
 - 11) 芳賀恒之他; 第52回秋季応物 9a-ZB-4(1991).
 - 12) 溝田 勉, 芳賀恒之, 栗原健二, 木下博雄, 長波長領域におけるレジスト感度特性, 第52回応用物理学学会学術講演会予稿集 9AZG-11.
 - 13) G.D. Kubiak, E.M. Kneeder, K.W. Berger, R.H. Stulen, J.E. Bjorkholm, W.M. Mansfield and N. Windischmann; Resist Characterization at Soft-X-Ray Wavelengths, OSA Proceedings on Soft-X-Ray Projection Lithography, **12**, 124(1991).

キーワード

X線縮小投影露光

軟X線領域での縮小露光技術。縮小光学系にはミラー光学系に多層膜を形成したものをを用いる。露光波長は44Åから200Åが用いられており、光源にはシンクロトロン放射光の他、レーザプラズマ光源が検討されている。マスクには多層膜を反射面とした反射型が用いられる。解像度の限界は100Å程である。

多層膜

重元素からなる物質と軽元素からなる物質を交互に幾層にも形成した膜。軟X線領域で直入射でも数10%の反射率が得られる。波長、入射角、周期長(1組の厚さ)がブラッグの条件で決められ、分光素子として作用する。