

**多層膜ミラーを用いた  
軟 X 線結像光学系の開発と  
EUV 露光装置への応用**

**村上 勝彦**

## 目次

### 第1章 序論

1-1 研究の背景 .....	1
1-2 本論文の構成 .....	2

### 第2章 Mo/Si 多層膜ミラーの開発

2-1 Mo/Si 多層膜ミラーの反射率向上 .....	6
2-1-1 界面拡散層の影響 .....	6
2-1-2 スパッタリングガスによる反射率向上 .....	9
2-2 Mo/Si 多層膜ミラーの応力制御 .....	24

### 第3章 軟 X 線結像光学系の開発

3-1 シュバルツシルド光学系による拡大結像系 .....	30
3-2 シュバルツシルド光学系による縮小投影露光系 .....	42
3-2-1 透過型マスクを用いた波長 13nm での露光実験 .....	42
3-2-2 透過型マスクを用いた波長 4.5nm での露光実験 .....	44
3-2-3 反射型マスクを用いた波長 13nm での露光実験 .....	44
3-3 非球面 3 枚投影系による縮小投影露光系 .....	59
3-4 EUV 光を用いた波面計測技術の開発 .....	69
3-4-1 多層膜ミラーによる位相変化の光学特性に与える影響 .....	69
3-4-2 EUV 光を用いた波面計測方法 .....	70
3-4-3 EUV 実験干渉計を用いた波面計測 .....	72
3-4-4 EUV 光学系波面計測装置を用いた波面計測 .....	74

## 第4章 EUV 露光装置の開発

4-1 高 NA 小フィールド露光実験装置 (HiNA) の開発	89
4-2 EUV 露光装置光学系 (EUV1) の開発	94
4-2-1 EUV1 の照明系	94
4-2-2 EUV1 の投影系	95
4-2-3 EUV1 の露光結果	97
4-3 EUV 露光装置におけるコンタミネーション制御	110
4-3-1 カーボンコンタミネーション堆積の特性評価	111
4-3-2 酸素導入によるカーボンコンタミネーションの抑制	112
4-3-3 UV ドライ洗浄によるカーボンコンタミネーションの洗浄	112
4-3-4 多層膜ミラーの耐酸化性向上	114
4-3-5 シロキサンに起因するコンタミネーション	115

## 第5章 総括

5-1 本論文の総括	126
5-2 今後の EUV リソグラフィについて	127
謝辞	130

## 研究業績

論文リスト	131
学会発表リスト	139
日本登録特許一覧	145
米国登録特許一覧	147

## 第1章 序論

### 1-1 研究の背景

光学系の解像力は、良く知られたレイリーの式で与えられるように、光の波長と光学系の開口数 (numerical aperture: NA) で決められる。短波長化は解像力を上げる有効な手段であるが、波長が 150 nm 付近以下になると透明な硝材が無くなり、従来の屈折を用いた光学系を使用することが出来ない。波長が 10 nm 付近以下の軟 X 線を使って回折限界の結像光学系を構成することができれば、可視光や紫外線では到底実現不可能な高い解像力を期待できる。本研究は、軟 X 線の波長域で回折限界の光学系を開発し、従来の限界を打破する高い解像力の実現を目的とした。この波長域では、屈折系は使えず、反射系を用いて光学系を構成する。通常の鏡では非常に低い反射率しか得ることができないので、重原子層と軽原子層を交互に積層し、多数の界面における反射を相互に干渉させて全体として高い反射率を得る多層膜ミラーを用いる。

X 線多層膜ミラーは、薄膜形成技術の進歩に伴い、1970 年代の終わり頃から研究が盛んになり、X 線顕微鏡や X 線望遠鏡などの様々な用途への応用研究が開始された。中でも産業上の応用分野として重要なのは、半導体デバイスを製造するための微細加工技術、すなわち、リソグラフィ技術である。波長 13.5 nm の軟 X 線を用いたリソグラフィ技術は、EUV (Extreme Ultraviolet; 極端紫外線) リソグラフィと呼ばれており、1980 年台の後半から研究開発が進められている。軟 X 線を用いて結像することにより、従来の光では不可能な高い解像力を実現することが可能になる。

現在半導体デバイスの製造に使われている光リソグラフィ技術は、露光波長の短波長化と投影系の開口数 (NA) の拡大によって解像力を向上してきた。露光波長は、高圧水銀灯の g 線 (436 nm) から始まり、i 線 (365 nm)、KrF エキシマレーザー (248 nm)、ArF エキシマレーザー (193 nm) へと短波長化が進められてきた。しかし、最近の 10 年間は、短波長化は止まっている。一時期 F<sub>2</sub> レーザー (152 nm) を用いたリソグラフィ技術の研究が行われたが、透明な硝材が得られないことから研究開発は中止された。この 10 年間は、短波長化以外の手段で解像力の向上が進められた。投影レンズの先端とウェハの間を空気よりも屈折率の大きい水で満たすことにより実効的な NA を拡大する液浸技術が実用化され、1.35 までの高 NA 化が実現されている。さらに、パターンを半周期ずらして 2 回露光することにより 2 倍のピッチのパターンを形成するダブルパターンニング技術も実用化され、この方法を使うと ArF 液浸リソグラフィで 20 nm までの解像力が得られるようになっている。しかし、これ以上の解像力の向上は困難であり、更なる微細化を進めて 20 nm 以下の解像力を実現するために EUV リソグラフィが期待されている。

## 1-2 本論文の構成

本論文は、X線多層膜ミラーの開発、それをを用いた軟X線光学系の開発、そして、この技術に応用した製品であるEUV露光装置の開発に関するもので、5つの章から構成されている。以下に各章の概要を説明する。

第1章では、X線多層膜ミラーの概要、およびリソグラフィ技術の進展など、本研究の背景について述べる。

第2章では、Mo/Si多層膜ミラーの開発について述べる。Mo/Si多層膜ミラーはSiのL吸収端の12.4 nmの長波長側で高い反射率を示す材料として知られており、EUVリソグラフィの露光波長が13.5 nmに決められたのは、Mo/Si多層膜ミラーの存在によるものである。多層膜ミラーを使って実際の軟X線光学系を構成するためには、反射率だけでなく、大口径化、膜厚分布の制御、内部応力の制御など様々な特性が必要となる。スパッタリング法により、そのような要求性能を満たすEUV露光装置光学系用の多層膜ミラーを成膜する技術を開発した。本章では、その中の高反射率化と内部応力の制御について述べる。

第2章第1節は、Mo/Si多層膜ミラーの反射率向上について述べる。多層膜ミラーの反射率を測定すると、通常は理論値よりもかなり低い値しか得られない。従来、その主な原因は多層膜界面の粗さであると考えられていた。確かに、5 nm以下の比較的波長の短い領域では界面粗さが支配的要因であるが、波長13.5 nm付近のMo/Si多層膜では、界面粗さよりも界面の相互拡散層の形成が反射率に大きな影響を与えることを明らかにした。そして、スパッタリングにおける成膜において、このような拡散層の形成を防いで高反射率を得るためには、従来から使われているArの代わりに、分子量の大きなXeを用いることが有効であることを示し、理論限界に近い約70%の高反射率を実現した。

第2章第2節は、Mo/Si多層膜ミラーの内部応力制御について述べる。スパッタリングにより形成したMo/Si多層膜は一般に圧縮応力を有している。このような内部応力は、高精度に加工されたミラーの形状を変形させ、光学系の収差を大きくする。Mo/Si多層膜のMo層の厚さの比率を大きくすると、反射率は低下するが引っ張り応力が生じる。このような引っ張り応力のMo/Si多層膜を応力相殺層として用い、その上に高反射率で圧縮応力のMo/Si多層膜を反射層として成膜し、全体として応力を低減させる方法が知られていた。しかし、応力相殺層のMo層を厚くすると、Moの微結晶が成長し、表面粗さが増加し、その上に形成した反射層の反射率が低下するという問題が生じた。この問題を解決するために、応力相殺層の周期長を意図的に小さくし、Mo層の厚さを制限することにより、低応力と高反射率を両立させることに成功した。

第3章では、軟X線結像光学系の開発について述べる。最初は2枚の球面鏡から構成されるシュバルツシルド光学系を作製して軟X線による結像性能の評価を行い、高い解像力を確認した。しかし、EUVリソグラフィへ応用するためには、露光領域の拡大が必要である。そこで、3枚の非球面ミラーからなるリングフィールド投影系を試作した。高精度な光学系を製作するためには、使用する波長で光学系の波面を計測する技術が不可欠である。

そのために、EUV 露光装置投影系の波面収差を EUV 光で計測する技術を開発した。

第 3 章第 1 節は、シュバルツシルド光学系による拡大結像系について述べる。最初は、実験室で簡便に取り扱うことのできる電子線励起の X 線源を用いて実験を行った。波長 4.5 nm の C Ka 線を用いた。この波長域では Ni/C 多層膜が比較的高い反射率を示すことが知られていたが、Ni 層を薄くすると島状成長のために界面粗さが増加し、高い反射率が得られなかった。そこで、Ni の代わりに NiCr 合金を用いることにより、島状成長を防ぎ、反射率を向上させた。このような NiCr/C 多層膜ミラーを使って倍率 32、開口数 (NA) 0.2 のシュバルツシルド光学系を製作して結像実験を行い、0.5 nm 以下の分解能を有することを確認した。

第 3 章第 2 節は、シュバルツシルド光学系による縮小投影露光系について述べる。Mo/Si 多層膜ミラーを使って、波長 13 nm 用のシュバルツシルド光学系を作製した。倍率と NA は前節の光学系と同じ 32 倍と 0.2 である。この光学系を用いて、SORTEC 放射光施設において縮小投影露光の実験を行った。PMMA レジストを用いて 50 nm L/S パターンを解像した。当時 (1992 年) の最先端の KrF エキシマレーザーを用いた半導体露光装置の解像力は 250 nm 程度だったので、EUV リソグラフィの圧倒的な高解像力を実感した。当初は SiN メンブレン上に Au のパターンを形成した透過型のマスクを使用していたが、その後、Mo/Si 多層膜上に Ni のパターンを形成した反射型のマスクを使った実験も行った。また、前節で述べた波長 4.5 nm 用のシュバルツシルド光学系を用いた縮小投影露光の実験も試みた。

第 3 章第 3 節は、非球面 3 枚投影系による縮小投影系について述べる。前節までのシュバルツシルド光学系では直径 0.1 mm 程度以下の小さな露光領域しか得られなかったが、半導体露光装置では 20 mm × 20 mm 以上の大きな範囲にパターンを露光しなければならない。EUV 露光装置の光学系を構成する Mo/Si 多層膜ミラーの反射率は、理論限界が 70 % 程度であり 100 % に近い反射率を得ることは出来ない。そのため、極力少ないミラー枚数で光学系を構成する必要がある。収差を補正するために非球面を導入するが、それでも広い範囲を一括して露光する投影系を設計することは困難であり、ある特定の像高だけで収差が補正されたリングフィールド状の露光フィールドを有する投影系を用い、これをスキャンして広い範囲を露光する方法が用いられる。そのような光学系として、3 枚の非球面ミラーからなる倍率 5、NA0.1 のリングフィールド光学系を試作し、ニュースバル放射光施設において露光実験を行った。なお、本研究は姫路工業大学 (当時。現在は兵庫県立大学) 日立製作所とニコンの共同研究として行われた。

第 3 章第 4 節は、EUV 光を用いた波面計測技術の開発について述べる。光学系の波面収差は干渉計によって計測される。EUV の波長域では使用できる光学素子も限られており、ピンホールや回折格子を組み合わせて干渉計を構成する。X 線レーザーのようなコヒーレントな EUV 光源は未だ簡単に使える状況ではなかったので、高輝度な EUV 光源としてニュースバル放射光施設のアンジュレータを用いた。PDI (Point Diffraction Interferometer) 法とシアリング干渉法による波面計測技術の研究を行い、EUV 露光装置の投影系の EUV 光による

波面計測を行うことのできる EUV Wavefront Metrology System (EWMS) を開発した。なお、本研究は、NEDO の委託研究および継続研究として、EUVA ( Extreme Ultraviolet Lithography System Development Association; 技術研究組合 極端紫外線露光システム技術開発機構 ) においてニコンとキヤノンの研究員と共に遂行した。

第 4 章では、EUV 露光装置の開発について述べる。EUV リソグラフィの黎明期 ( 1990 年台初頭 ) には、投影系の NA は 0.1 程度で解像力 100 nm 程度が想定されていたが、その後の光リソグラフィ技術の高解像度化に伴い、EUV リソグラフィは NA を拡大して解像力をさらに向上することが必要となった。そこで、NA0.3 の小フィールド投影系を搭載した小フィールド露光装置を開発した。この開発を通じて投影系の収差を低減する技術を蓄積し、それらを応用して本格的な EUV 露光装置 EUV1 を開発した。EUV1 は NA0.25 のリングフィールド投影系を搭載した。EUV 露光装置におけるコンタミネーションの問題は以前から指摘されていたが、EUV1 で実際に露光を開始すると、ミラー表面のカーボンのコンタミネーションの成長による、光学系透過率の急速な低下に悩まされた。このようなコンタミネーションを抑止および洗浄する技術を開発して、この問題を克服した。

第 4 章第 1 節は、高 NA 小フィールド露光実験装置 ( HiNA ) の開発について述べる。本装置は 2 枚の非球面ミラーからなる倍率 5、NA0.3 の小フィールド投影系を搭載した。投影系は改良を加えながら 3 本製作し波面収差の低減を進めた。非球面の加工精度を向上すると同時に、ホルドによる変形を抑制する新しいホルド技術を開発し、後の EUV1 に繋がる投影系製作の基盤技術を確立した。本装置は NTT 厚木開発センターの Super ALIS 放射光施設に設置され、ASET ( Association of Super-Advanced Electronics Technologies; 技術研究組合 超先端電子技術開発機構 ) により EUV リソグラフィのプロセス技術の研究開発に活用された。

第 4 章第 2 節は、EUV 露光装置 ( EUV1 ) 光学系の開発について述べる。6 枚の非球面ミラーからなる倍率 1/4、NA0.25 のリングフィールド光学系を開発した。波面収差は 0.4 nm RMS、フレアは 8% を達成した。反射型のオプティカルインテグレータであるフライアイミラーを備え、コヒーレンスファクターを可変できる照明系を備えている。通常照明で 25 nm L/S、dipole 照明で 22 nm L/S のパターンを解像した。位相シフトマスクを用いた露光実験も試み、16 nm L/S まで modulation を観察した。なお、EUV1 は 2 台製作し、1 台は Selete ( Semiconductor Leading Edge Technologies, Inc.; 株式会社 半導体先端テクノロジーズ ) へ納入され、産業技術総合研究所のスーパークリーンルームに設置されて EUV リソグラフィのインテグレーション技術の研究開発に活用された。

第 4 章第 3 節は、EUV 露光装置におけるコンタミネーション制御について述べる。多層膜ミラーに EUV 光が照射されると光電子が発生する。多層膜ミラー表面に炭化水素分子が吸着していると、この光電子が炭化水素分子を分解してカーボンコンタミネーションが成長する。多層膜ミラー表面に水分子が吸着していると、光電子により水分子が分解して酸素ラジカルが発生し、多層膜表面を酸化させる。EUV1 では、装置の真空環境の清浄度が不

十分だったこともあり、前者のコンタミネーションに悩まされた。そこで、露光中に酸素を流してカーボンコンタミネーションを防ぐ技術を開発した。既に付着したカーボンコンタミネーションについては、大気中で UV ランプを照射して容易に洗浄、除去できることを見出し、これを応用して露光装置上でミラーを洗浄する技術を開発した。多層膜ミラーの耐酸化性を確保するためには、最上層に酸化防止層として capping layer を設ける方法が知られている。このような capping layer の材料として、従来は Ru が一般的に用いられているが、Ru よりも大幅に耐酸化性を向上した酸化物からなる capping layer を開発した。以上のようなコンタミネーション制御技術を開発するために、九州シンクロトロン光研究センターの放射光施設に専用ビームラインを建設し、EUV 光の照射実験を行った。

第 5 章では、本論文の総括として第 2 章、第 3 章および第 4 章のまとめと、EUV リソグラフィ技術の今後の展望について述べる。

## 第2章 Mo/Si 多層膜ミラーの開発

### 2-1 Mo/Si 多層膜ミラーの反射率向上

Mo/Si 多層膜は Si L 吸収端 (12.4 nm) の長波長側の 13 nm 付近で高い反射率を示すことから、EUV 露光装置光学系用の多層膜ミラー材料として期待されていた[1]。実際に、スパッタリングにより作製された Mo/Si 多層膜は、垂直に近い入射角で理論値に近い高い反射率を示す優れた材料の組み合わせであることが知られていた[2]。

われわれは、マグネトロンスパッタリングとイオンビームスパッタリングにより Mo/Si 多層膜ミラーの開発を行った。当時 (1990 年台初頭) は、周期構造の揺らぎや界面粗さが多層膜ミラーの反射率を制限する要因であることが良く知られていたが[3]、界面拡散層の影響はまだあまり知られていなかった。本研究では、波長 13nm 付近で使用する Mo/Si 多層膜では、周期長の揺らぎや界面粗さよりも、界面拡散層の形成が反射率に大きく影響することを明らかにした。また、スパッタリングにおいて一般的に使用される Ar の代わりに Xe を使用することにより、界面拡散層の成長を抑制して反射率を向上させた。

#### 2-1-1 界面拡散層の影響

マグネトロンスパッタリングとイオンビームスパッタリングにより同一の構造の Mo/Si 多層膜を作製して、反射率の比較を行った。図 2-1-1 に実験に用いた rf マグネトロンスパッタリング装置の模式図を示す。直径 6 インチのターゲットを取り付けたカソードを 2 基備え、基板はターゲットに対向する回転ホルダーに取付けられる。各ターゲットにはシャッターとシールドが、それぞれ取り付けられている。図 2-1-2 に実験に用いたイオンビームスパッタリング装置の模式図を示す。2つのイオン源と直径 6 インチのターゲット 4 枚を備え、自転する基板ホルダーは水冷されている。一方のイオン源は基板にイオンビームを照射するアシストイオン源だが、この実験では使用していない。これらの成膜装置を使用して、周期長 7.5 nm、50 層対の Mo/Si 多層膜を Si 基板上に成膜した。重原子 (Mo) 層の厚さの周期長に対する比率は  $G$  と定義され、ここでは  $1/3$  とした。基板側第 1 層目は Mo 層とし、最表面は Si 層とした。それぞれの装置の成膜条件を表 2-1-1 (a) および (b) に示す。いずれの装置も成膜速度が一定になるように保ち、成膜時間で膜厚を制御した。

図 2-1-3 に Cu K $\alpha$ 線 (波長 0.154 nm) による X 線回折測定の結果を示す。いずれも鋭いピークが現れており、良好な周期構造が形成されていることが分かる。(a) と (b) のピーク位置が一致していることから、両者の周期長は等しく形成されていることが分かる。1次ピークの強度は同程度であり、高次ピーク強度を比較しても特に差は認められない。一般に、 $G$  が  $1/n$  のとき  $n$  の整数倍の次数のピーク強度が低くなる。いずれの場合も 2次ピークの強度が 3次ピークの強度よりも小さくなるのは、 $G$  が設定した  $1/3$  よりも  $1/2$  に近づいていることを示している。

図 2-1-4 に軟 X 線反射率の測定結果を示す。測定には、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory BL-11A の斜入射反射率計を用い、s 偏光で行った。図中の数値は法線から測った入

射角を示す。いずれも 12.4 nm の Si L 吸収端の長波長側で高い反射率を示す。Cu Ka線による X 線回折の測定結果とは対照的に、両者の反射率には著しい差異が認められた。マグネトロンスパッタリングで作製した Mo/Si 多層膜は 70 %に近い高い反射率を示した。それに対し、イオンビームスパッタリングで作製した Mo/Si 多層膜は明らかに反射率が低く、半値幅も減少し、ピーク波長が短波長側へシフトするという特徴が認められた。

Cu Ka線による X 線回折測定では大差無いにも関わらず、軟 X 線による測定では明らかな差が認められた。もし、周期構造の揺らぎがあれば、X 線回折のピーク形状がブロードになったり、ピークが分割するなどの乱れが生じるはずであるが、そのようなことは観察されていないので、周期長の乱れが原因ではない。界面粗さの影響については、計算で調べた。X 線回折強度、軟 X 線反射率を Fresnel の式を使って計算した[4]。Cu Ka線の波長での光学定数には、Henke による原子散乱因子のデータを用い算出した[5]。波長 13 nm での軟 X 線領域の光学定数は、Lawrence Berkeley National Laboratory が公表している原子散乱因子のデータを使って算出した[6]。図 2-1-5 に、界面粗さを変えたときの X 線回折強度の計算値を示す。界面粗さが増加するに従い、入射角度の大きい領域での回折強度が急速に低下する。図 2-1-6 には、界面粗さを変えたときの軟 X 線反射率の計算値を示す。反射率は一様に低下しており、実験で観察された半値幅の減少やピーク波長の短波長化は認められない。以上のように、二つの Mo/Si 多層膜の軟 X 線反射率の違いは、従来の考え方では説明できなかった。そこで、この原因を明らかにするために、断面の透過電子顕微鏡観察と深さ方向 AES 分析により詳しい調査を行った。

図 2-1-7 に多層膜断面の透過電子顕微鏡写真を示す。マグネトロンスパッタリングで作製した多層膜は Mo 層（黒く見える部分）が結晶化しており、Si 層（白く見える部分）はアモルファス状である。両者の界面にアモルファス状の界面層が明瞭に見える。一方、イオンビームスパッタリングで作製した多層膜では、Mo 層も Si 層もアモルファス状である。Mo 層の両端の濃度が薄くなっており界面層があるように見えるが、Mo 層との境界は明瞭ではない。また、いずれも Si 層が所定の厚さ（周期長の 2/3）よりもかなり薄くなっている。Si 層の一部は Mo 層中に拡散して、シリサイドを形成するために消費されたと考えられる。

次に、深さ方向のオージェ分析を行った。マグネトロンスパッタリングで作製した Mo/Si 多層膜を表面から Ar イオンビームでエッチングしながら Si の LMM ピークのオージェスペクトルを取っていくと、図 2-1-8 に示すような二つの形状の間で周期的な変化を示した。このような変化はシリコンの化学状態の違いによることが知られており[7]、Si 単体とシリサイド化した Si であると同定された。両者の深さ方向の分布を因子分析（Factor Analysis）により分離することができる[8, 9]。二つの多層膜の深さ方向の AES 分析結果を図 2-1-9 に示す。実線は Mo、破線は Si 単体、点線はシリサイド化した Si、一点鎖線は Fe の分布を、それぞれ表している。マグネトロンスパッタリングで作製した多層膜（図 2-1-9 (a)）は、Mo 層の両側にシリサイドからなる界面層が形成されており、Mo 層の内部まではシリサイドは侵入していない。一方、イオンビームスパッタリングで作製した多層膜（図 2-1-9 (b)）では、

Mo 層のほぼ全体に渡ってシリサイドが形成されている。もう一つの違いとして、イオンビームスパッタリングで作製した多層膜だけ数 wt% の Fe が不純物として検出された。Fe は波長 13nm の軟 X 線を吸収するので、反射率低下の原因になり得る。

まず、不純物の影響を検討した。図 2-1-10 は、Fe の濃度を変えたときの X 線回折強度の変化の計算値である。Fe 原子が Mo 層中に入った場合と Si 層中に入った場合を計算した。いずれの場合も、10 wt% まで Fe を入れても X 線回折強度は全く変化しない。

Mo/Si 多層膜中に混入した Fe の濃度を変えたときの軟 X 線反射率を計算した。図 2-1-11 (a) は、Mo 層中に Fe が入った場合、図 2-1-11 (b) は Si 層中に Fe が入った場合をそれぞれ示す。Fe 原子の入る場所によって影響は少し異なる。いずれの場合も反射率は低下するが、10 wt% 入れても実験結果を説明できるほどには低下しない。反射率ピーク的位置は、Fe 原子が Mo 層中に入った場合は長波長側にシフトし、Si 層中に入った場合は短波長側にシフトする。半値幅の減少はいずれの場合も認められない。X 線回折では差が無く軟 X 線反射率だけで差が出るという点では実験結果と符合するが、軟 X 線反射率の変化の仕方が実験結果とは一致しない。

次に、界面拡散層の形成が反射率に及ぼす影響を検討した。界面拡散層の組成を Mo の代表的なシリサイドである  $\text{MoSi}_2$  と仮定し、その厚さが変化したときの反射率の変化を調べた。 $\text{MoSi}_2/\text{Mo}/\text{MoSi}_2/\text{Si}$  の繰り返しからなる単純な 4 層モデルの反射率を計算した。ここでは、界面拡散層の厚さは、Si 層上も Mo 層上も同じであると仮定した。シリサイド層は Si 層よりも密度が高いので、原子数が同じで界面にシリサイド層が形成されると多層膜の周期長が小さくなる。そこで、Mo と Si の原子数の比を一定に保ったまま、周期長が同じになるように原子数を増やして計算した。

図 2-1-12 に界面拡散層の厚さを変化させたときの X 線回折強度の計算値を示す。拡散層の厚さが変わると、次数の異なるピークの強度比が変化する。界面拡散層の厚さがゼロのときは 3 次ピークの強度が低いが、界面拡散層の厚さを 2.5 nm まで増加させていくと 3 次ピークが強くなり、2 次と 4 次ピークの強度が低下する。これは、Mo 層と  $\text{MoSi}_2$  層の厚さの合計が重原子層の厚さになり、G の値が増加するためである。但し、G は成膜条件 (Mo 層と Si 層の成膜時間) により大きく変化してしまうので、これと実測値を比較して界面拡散層の厚さを議論することは難しい。

界面拡散層の厚さを変化させたときの軟 X 線反射率の計算値を図 2-1-13 に示す。界面拡散層が厚くなるに従って、ピーク反射率が低下するとともに、半値幅が減少して、ピーク波長が短波長側へシフトする様子が認められた。これらの特徴は、実験結果を良く説明できる。このことから、二つの多層膜の軟 X 線反射率の違いの主な原因は、シリサイドからなる界面拡散層の厚さの違いによることが明らかとなった。波長 13nm 付近で使用する Mo/Si 多層膜では、界面粗さを低減することよりも、むしろ界面拡散層の厚さを低減することの方が重要であるという新たな反射率向上の指針を示すことが出来た。

なお、この当時実験に使用していたマグネトロンスパッタリング装置は、ある程度反射

率の高い Mo/Si 多層膜を作れる成膜条件出しが出来ていたが、イオンビームスパッタリング装置は未だ導入直後だったため、成膜条件出しが不十分であった。その後、イオンビームスパッタリング装置でも高反射率の Mo/Si 多層膜を成膜できるようになった。

#### 2-1-2 スパッタリングガスによる反射率向上

前項では、高反射率の Mo/Si 多層膜ミラーを得るためには界面拡散層の低減が重要であることを明らかにした。界面拡散層が形成される原因の一つとして、スパッタリングに使用するガスがターゲット表面で反跳して、高速中性粒子となって基板へ入射して、堆積しつつある多層膜をミキシングすることが考えられた。通常のスパッタリングでは Ar ガスを用いるのが一般的だが、原子量 39.95 の Ar 原子は原子量 96 の Mo 原子に効率良く反跳されるので、これが界面拡散層形成の原因になっていると考えた。実際、前項の図 2-1-7 (a) の断面 TEM 像と図 2-1-9 (a) の深さ方向オージェ分析結果を子細に観察すると、Mo 層の上に Si 層を堆積するときよりも、Si 層の上に Mo 層を堆積するときの方が界面拡散層の厚さが大きくなっていることが分かる。

以上のような考察から、Ar ガスよりも原子量の大きな不活性ガスとして Xe ガス (原子量:131.3)を用いれば、Mo 原子による反跳が抑制されて界面拡散層を低減できると考えた。そこで、Mo/Si 多層膜ミラーのスパッタリングガスによる特性の違いを調べた。

本実験には、図 2-1-14 に示す RMC (rotary magnet cathode) 方式の DC マグネトロンスパッタリング装置を用いた。本装置は直径 4 インチのターゲットを 2 基備えており、スパッタリングガスには Ar と Xe を選択することができる。ガスの種類と流量を変えて Si 基板上に周期長 7 nm、G0.35、積層数 50 層対の Mo/Si 多層膜を成膜した。Xe ガスでは、3 sccm、4 sccm、10 sccm の条件で成膜を行った。この時の圧力は、それぞれ 0.08 Pa、0.11 Pa、0.27 Pa であった。Ar ガスでは、12 sccm、28 sccm で成膜を行った。この時の圧力は、それぞれ 0.13 Pa、0.29 Pa であった。なお、Xe の 3 sccm と Ar の 12 sccm は、それぞれ、本装置で放電を維持することのできる下限の圧力である。

図 2-1-15 に X 線回折装置で測定した Cu Ka線による反射率測定結果を示す。(a) は低圧の Xe (4 sccm, 0.11 Pa) の場合、(b) は高圧の Xe (10 sccm, 0.27 Pa) の場合、(c) は低圧の Ar (12 sccm, 0.13 Pa) の場合、(d) は高圧の Ar (28 sccm, 0.29 Pa) の場合を、それぞれ示す。Xe を用いた場合も Ar を用いた場合も、高圧にするとピークの形状が崩れており、周期構造に乱れが生じていることが分かる。低圧の Xe の場合に、最も周期構造の均一な多層膜が形成されている。

次に、これらの多層膜の軟 X 線反射率を測定した。測定には、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory BL-12A の斜入射反射率計を用い、s 偏光で行った。図 2-1-16 に軟 X 線反射率の測定結果を示す。Xe ガスは 3 sccm と 4 sccm、Ar ガスは 12 sccm の条件で、ターゲット投入電力もいくつか異なる条件で成膜した。一つの試料について、入射角を変えながら複数のピーク波長位置で反射率を測定し、ピーク反射率をプロットした。Ar ガスを用いた場合は 65 %以下の反射率しか得られていないが、Xe ガス 4 sccm で成膜した多層膜は 66 %

~68%の反射率が得られた。Xeの流量を4 sccmから3 sccmに下げ、ガス圧力を0.11 Paから0.08 Paに下げると、反射率は更に上昇して68%~71%に達した。更にガス圧を下げると放電が不安定になり、安定した成膜が出来なくなった。以上の結果から、スパッタリングガスをArからXeに替えると反射率が上昇すること、放電を維持できる範囲で、ガス圧はできるだけ低いほど反射率が向上することが確認された。

図2-1-17に、最も高い反射率の得られたXeガス3 sccmの条件で成膜した多層膜の軟X線反射率測定結果を示す。(法線からの)入射角 $15^\circ$ 、 $18^\circ$ 、 $21^\circ$ で測定した反射率は、それぞれ、68.8%、70.5%、71.3%であった。

比較のために、高圧で成膜した多層膜の反射率も測定した。図2-1-18は、Xeガス10 sccm、Arガス28 sccmで成膜した多層膜の軟X線反射率の測定結果を示す。比較のためにXeガス3 sccmの結果も併せて示す。Xeガス10 sccmの条件では37%、Arガス28 sccmの条件では20%の反射率となり、Xeガス3 sccmの条件では約70%に達しているのと比べると、著しく低い反射率しか得られていない。

予想通り界面拡散層の形成が抑制されているか確認するために、多層膜断面の透過電子顕微鏡観察を行った。図2-1-19に多層膜断面の透過電子顕微鏡写真を示す。(a)は比較のためにArガスを使ってイオンビームスパッタリング装置で成膜したMo/Si多層膜、(b)は高反射率の得られた条件でRMCマグネトロンスパッタリング装置により成膜したMo/Si多層膜を示す。両者の周期長とGは同じに揃えてある。黒く見えるところがMo層、白く見えるところがSi層である。いずれの多層膜においても、Mo層とSi層の界面に中間のコントラストの領域が観察され、モリブデンシリサイドからなる界面拡散層が形成されていることが分かる。いずれの場合も界面拡散層の厚さは、Mo層上よりもSi層上の方が厚い。これは、Mo層の成膜中にスパッタリングガスがターゲットで反跳されて基板へ入射して、多層膜のミキシングを生じていることを示唆している。(a)と(b)を比較すると、(b)の方が界面拡散層の厚さが明らかに小さくなっている。Arよりも重いXeを使用することにより、界面拡散層の形成が抑制され、その結果、高い軟X線反射率が得られたことを示している。

### 本節に関連する主論文

- l **K. Murakami**, H. Nakamura, T. Oshino, M. Ohtani and H. Nagata, “Characterization of molybdenum/silicon multilayers deposited by ion beam sputtering and rf magnetron sputtering”, Proc. SPIE, **1742**, 614, (1993).
- l **K. Murakami** and M. Shiraishi, “Development of Mo/Si multilayers deposited by low-pressure rotary magnet cathode sputtering for EUV lithography”, Proc. SPIE, **5193**, 145, (2004).

### 参考文献

- [1] H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii, J. Vac. Technol., **B7** (6), 1648, (1989).
- [2] T. Barbee, Jr., S. Stanley and M. Hettrick, Appl. Opt., **24**, 883, (1985).
- [3] A. Michette, *Optical systems for soft x rays*, (Plenum Press, New York, 1986) Chap. 4, 5.
- [4] 波岡 武, 分光研究, **38**, 225, (1989).
- [5] B. Henke, P. Lee, T. Tanaka, R. Shimabukuro and B. Fujikawa, Atomic Data and Nuclear Data Tables, 27, 1, (1982).
- [6] B. Henke, J. Davis, E. Gullikson and R. Perera, Lawrence Berkeley Laboratory report, LBL-26259, (1989).
- [7] 志水 隆一, 吉原 一紘, 「ユーザーのための実用オージェ電子分光法」, 共立出版, 1989.
- [8] S. Gaarenstroom, J. Vac. Sci. Technol., **20**, 458, (1982).
- [9] J. Solomon, Thin Solid Films, **154**, 11, (1987).

表 2-1-1 Mo/Si 多層膜の成膜条件

(a) マグネトロンスパッタリング

	Mo	Si
rf 電力	0.3 kW	0.3 kW
Ar ガス圧力	$5.4 \times 10^{-1}$ Pa	$5.4 \times 10^{-1}$ Pa
成膜速度	0.054 nm/s	0.044 nm/s

(b) イオンビームスパッタリング

	Mo	Si
加速電圧	1000 V	900 V
イオンビーム電流	100 mA	70 mA
Ar ガス圧力	$3.2 \times 10^{-3}$ Pa	$3.2 \times 10^{-3}$ Pa
成膜速度	0.043 nm/s	0.067 nm/s

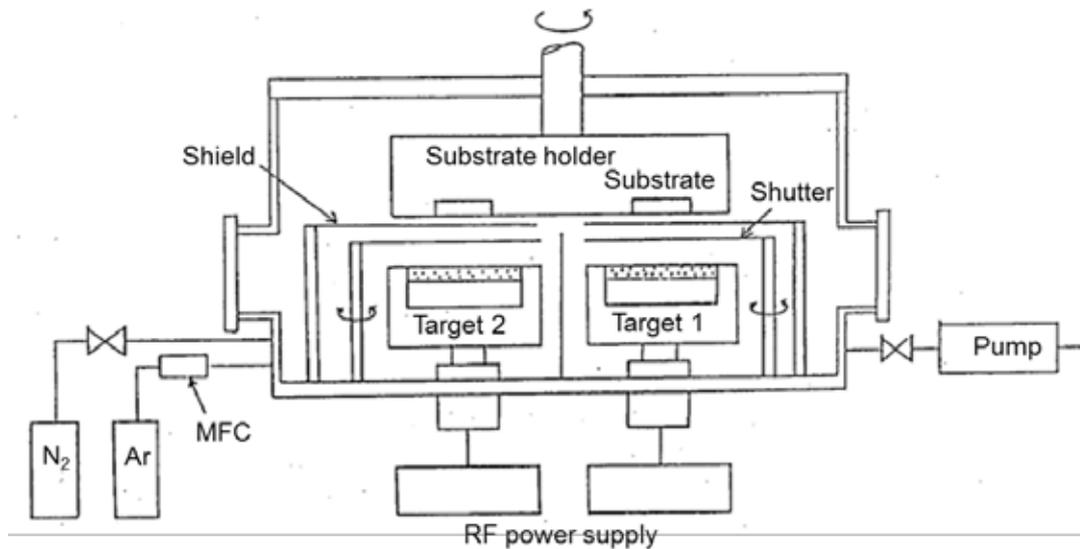


図 2-1-1 rf マグネトロンスパッタリング装置の模式図

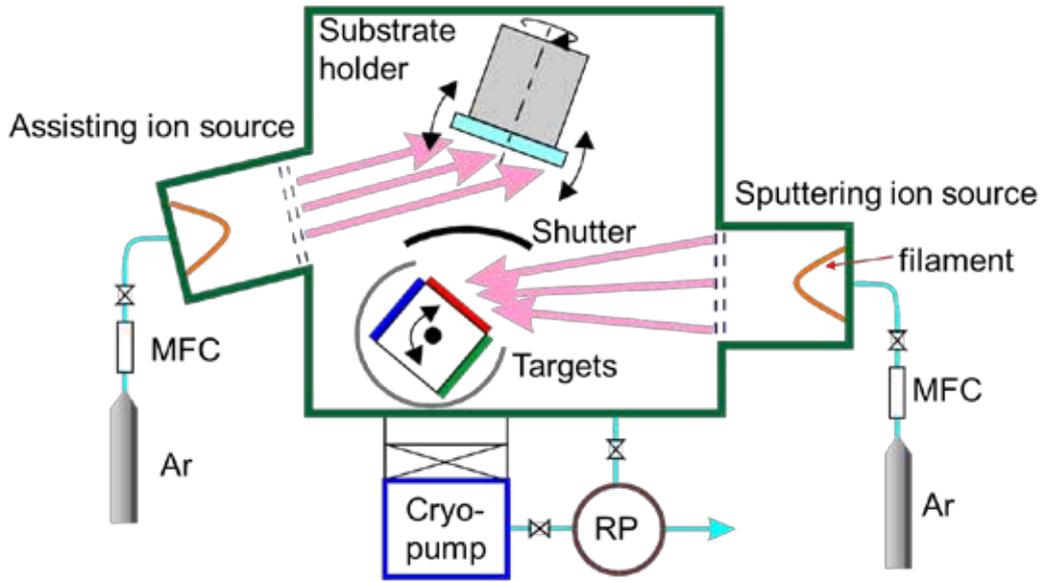


図 2-1-2 イオンビームスパッタリング装置の模式図

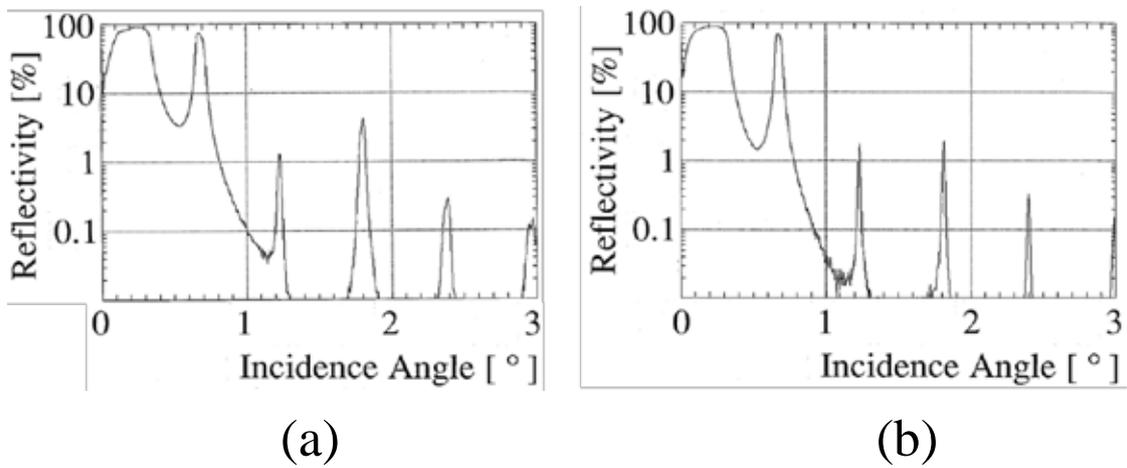
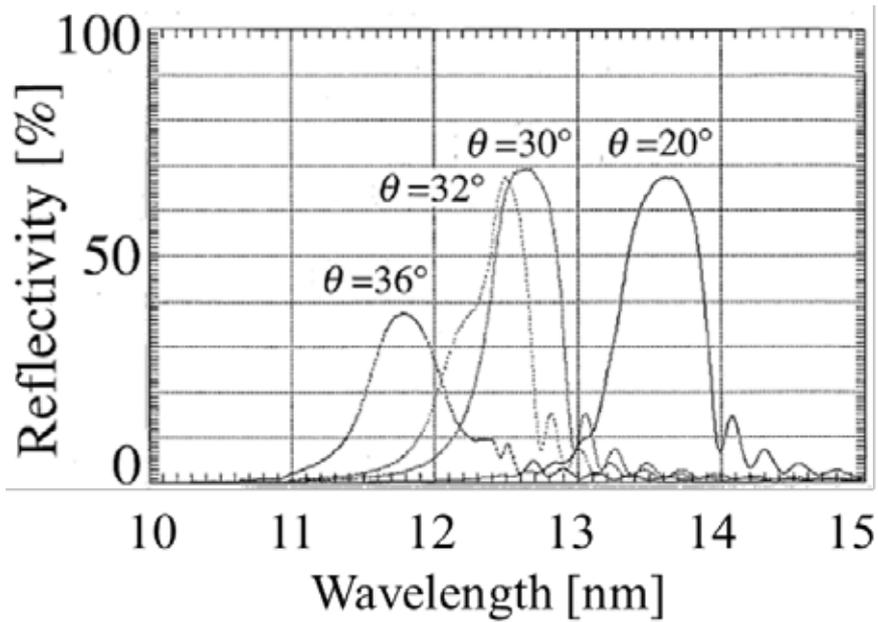
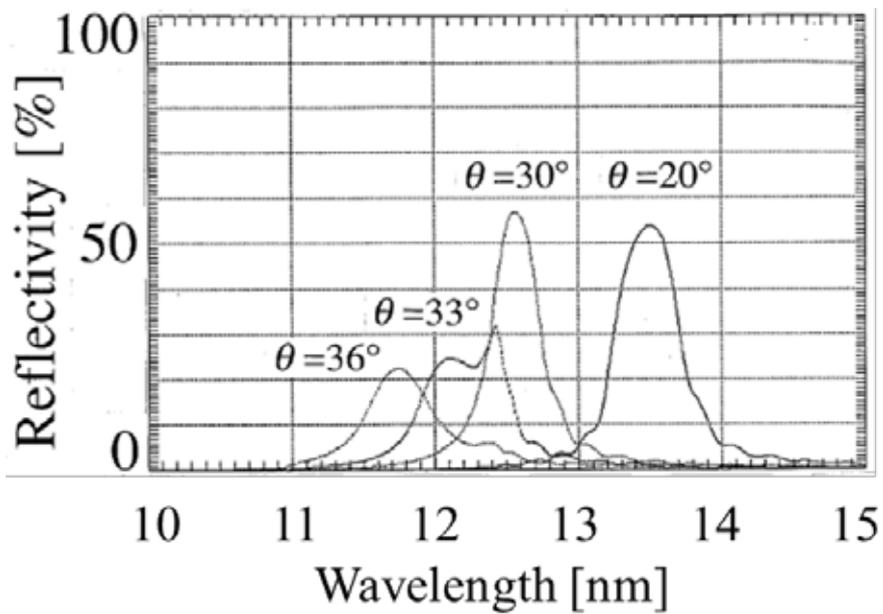


図 2-1-3 Mo/Si 多層膜の Cu Ka線 (波長 0.154 nm) による X 線回折測定結果  
 (a) マグネトロンスパッタリング、(b) イオンビームスパッタリング



(a)



(b)

図 2-1-4 Mo/Si 多層膜の軟 X 線反射率の測定結果

(a) マグネトロンスパッタリング、(b) イオンビームスパッタリング

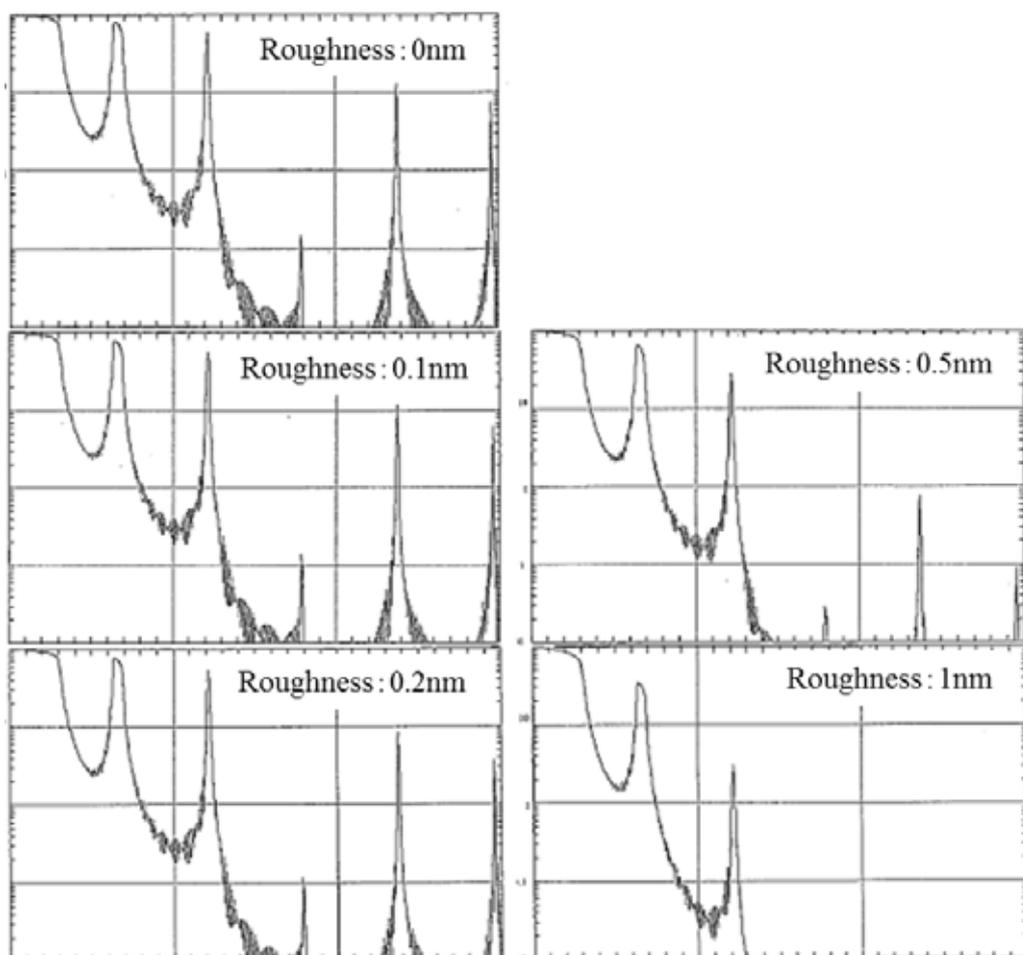


図 2-1-5 界面粗さを変えたときの Mo/Si 多層膜の X 線回折強度の計算結果

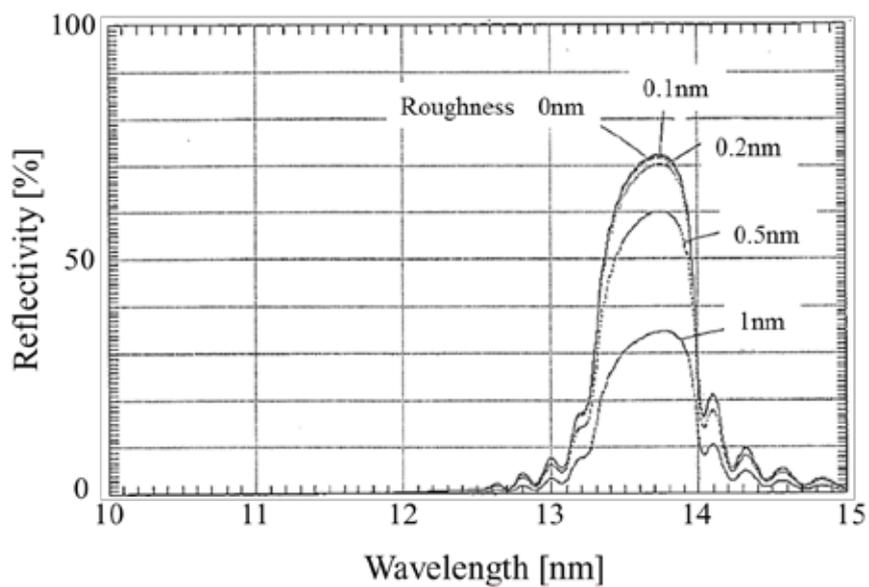
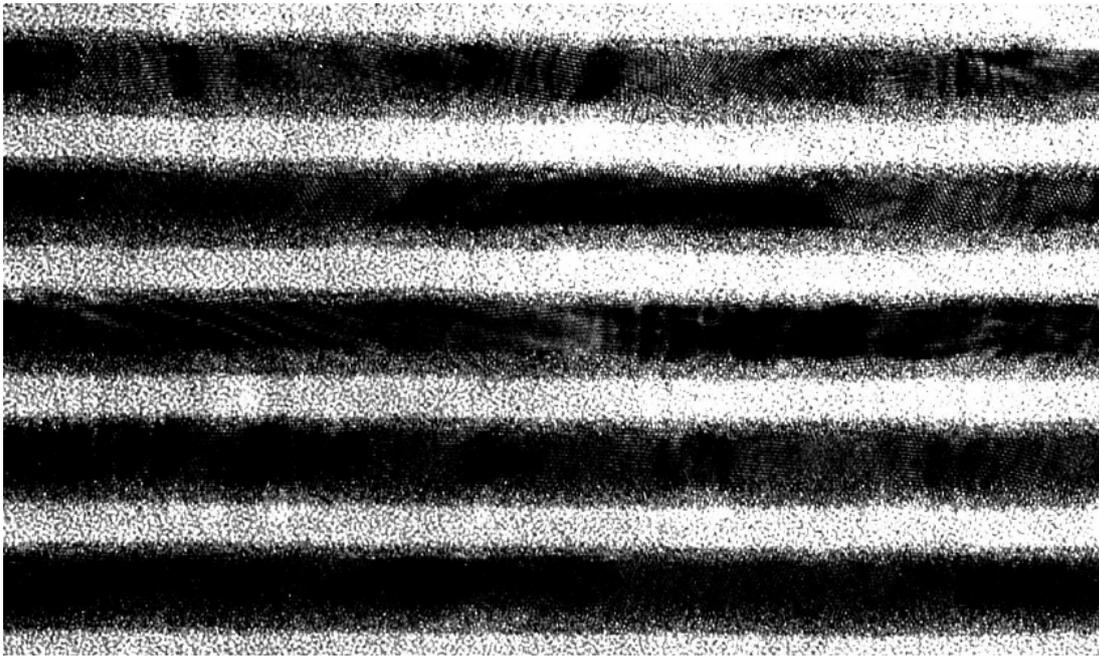
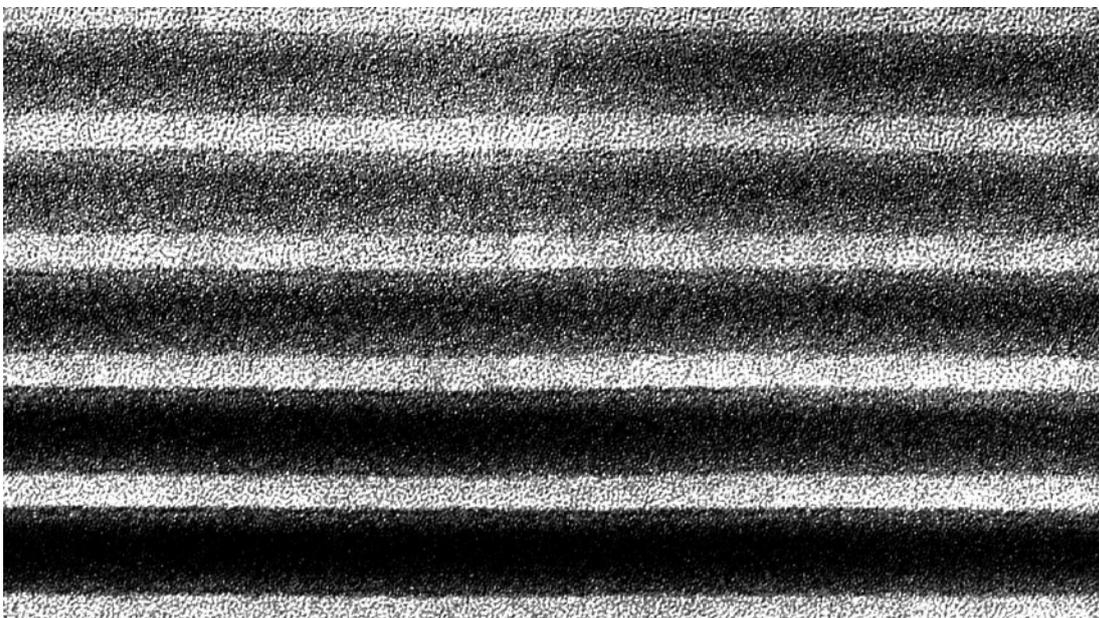


図 2-1-6 界面粗さを変えたときの Mo/Si 多層膜の軟 X 線反射率の計算結果



(a)



(b)

図 2-1-7 多層膜断面の透過電子顕微鏡写真

(a) マグネトロンスパッタリング、(b) イオンビームスパッタリング

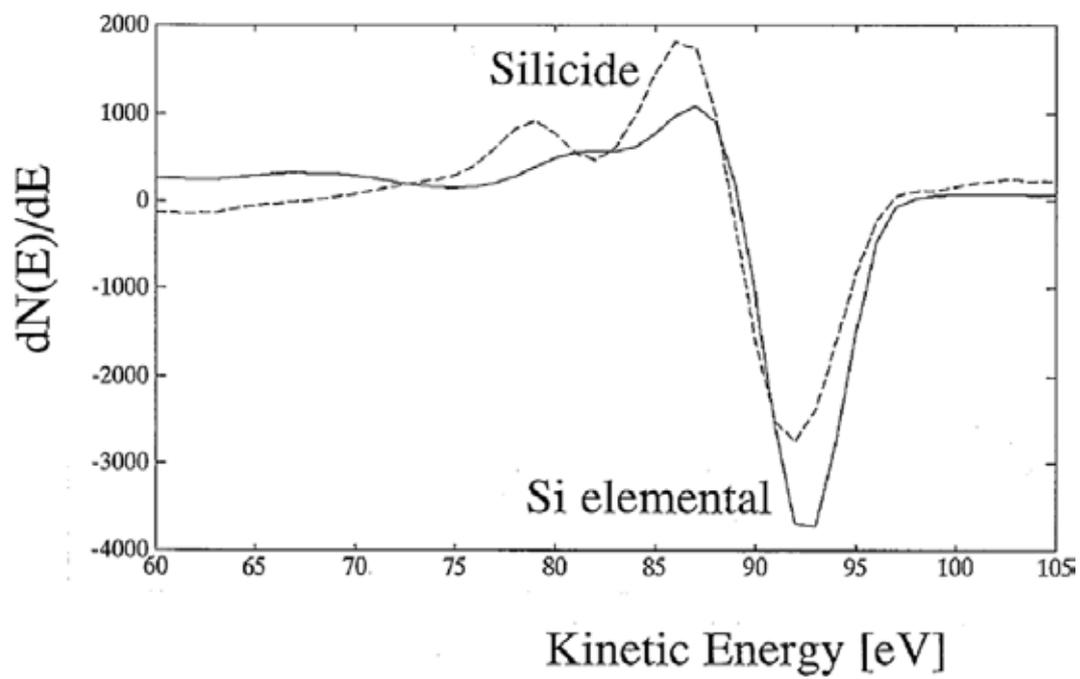
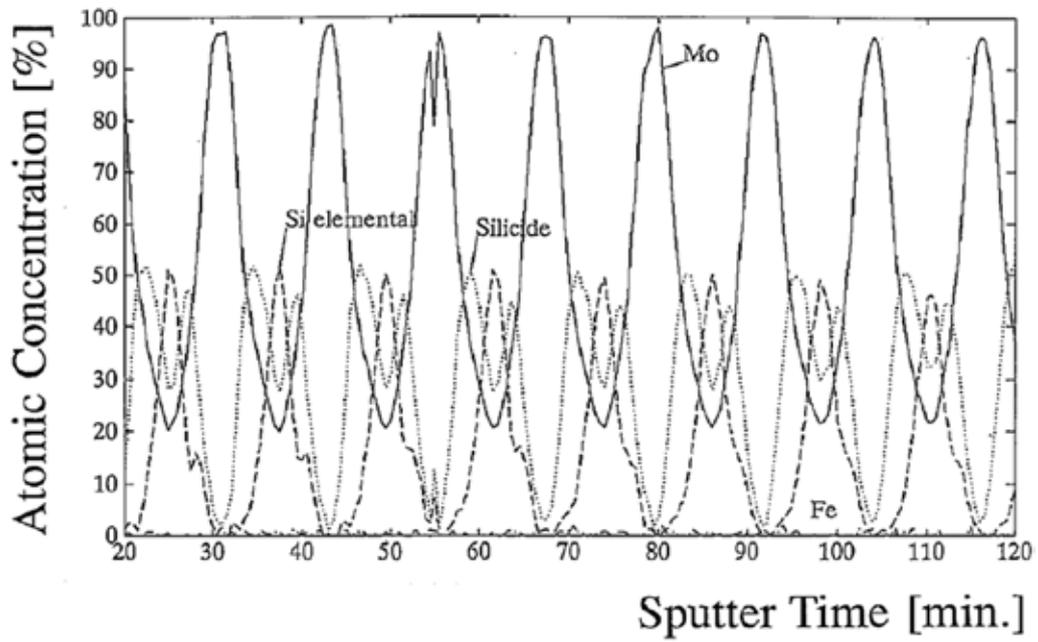
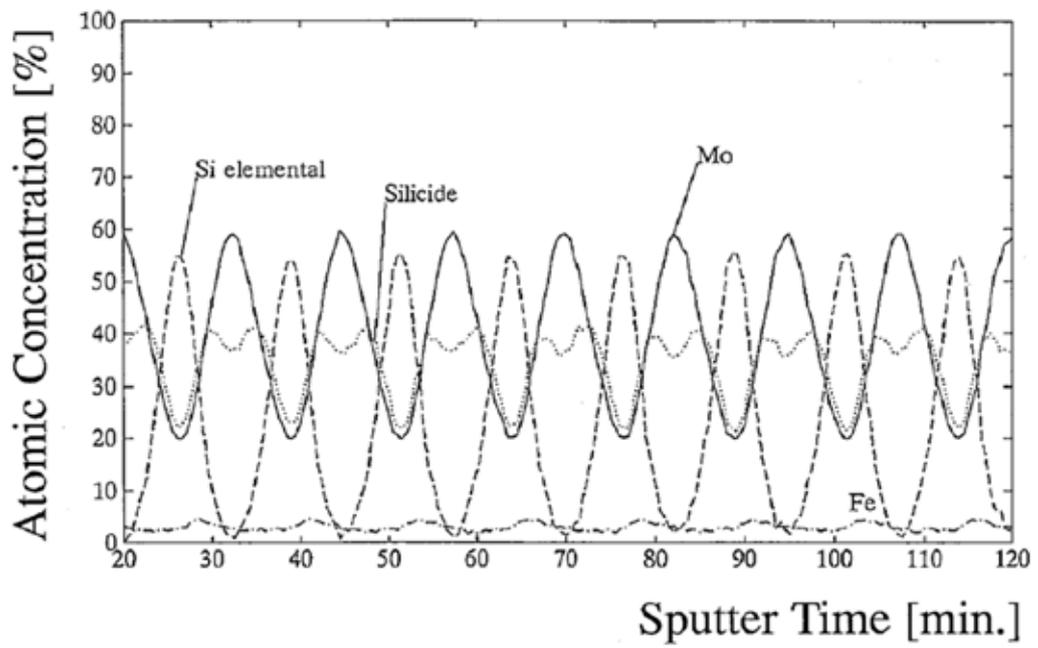


図 2-1-8 Si LMM オージェスペクトル



(a)



(b)

図 2-1-9 Mo/Si 多層膜の深さ方向 AES 分析結果

(a) マグネトロンスパッタリング、(b) イオンビームスパッタリング

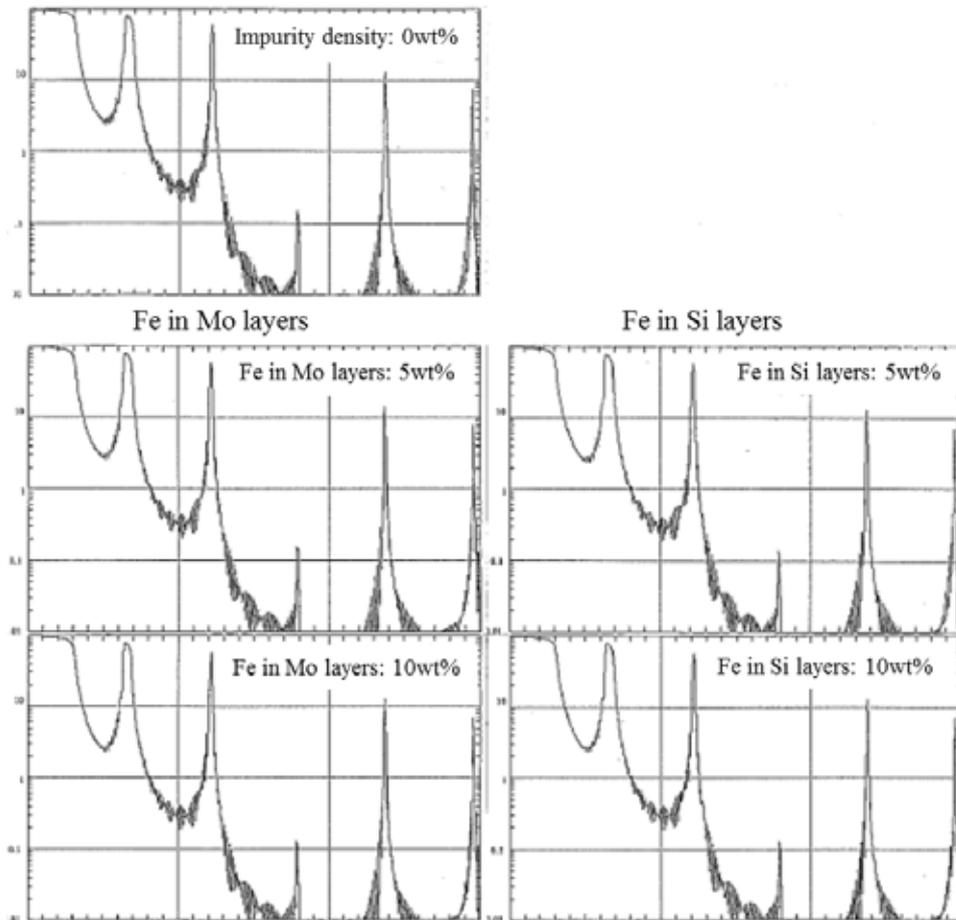


図 2-1-10 Fe の濃度を変えたときの Mo/Si 多層膜の X 線回折強度の計算結果

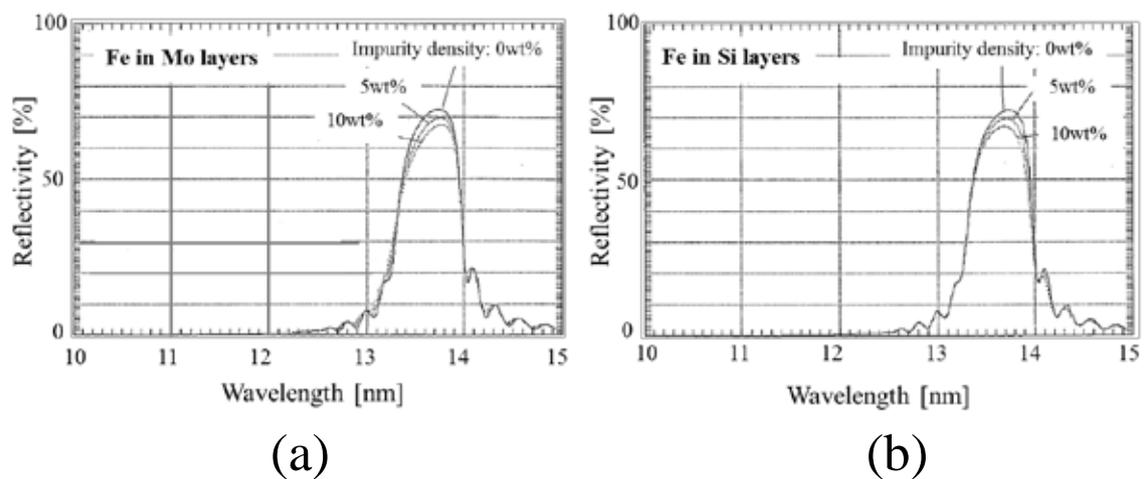


図 2-1-11 Fe の濃度を変えたときの Mo/Si 多層膜の軟 X 線反射率の計算結果  
 (a) Mo 層中に Fe が入った場合、(b) Si 層中に Fe が入った場合

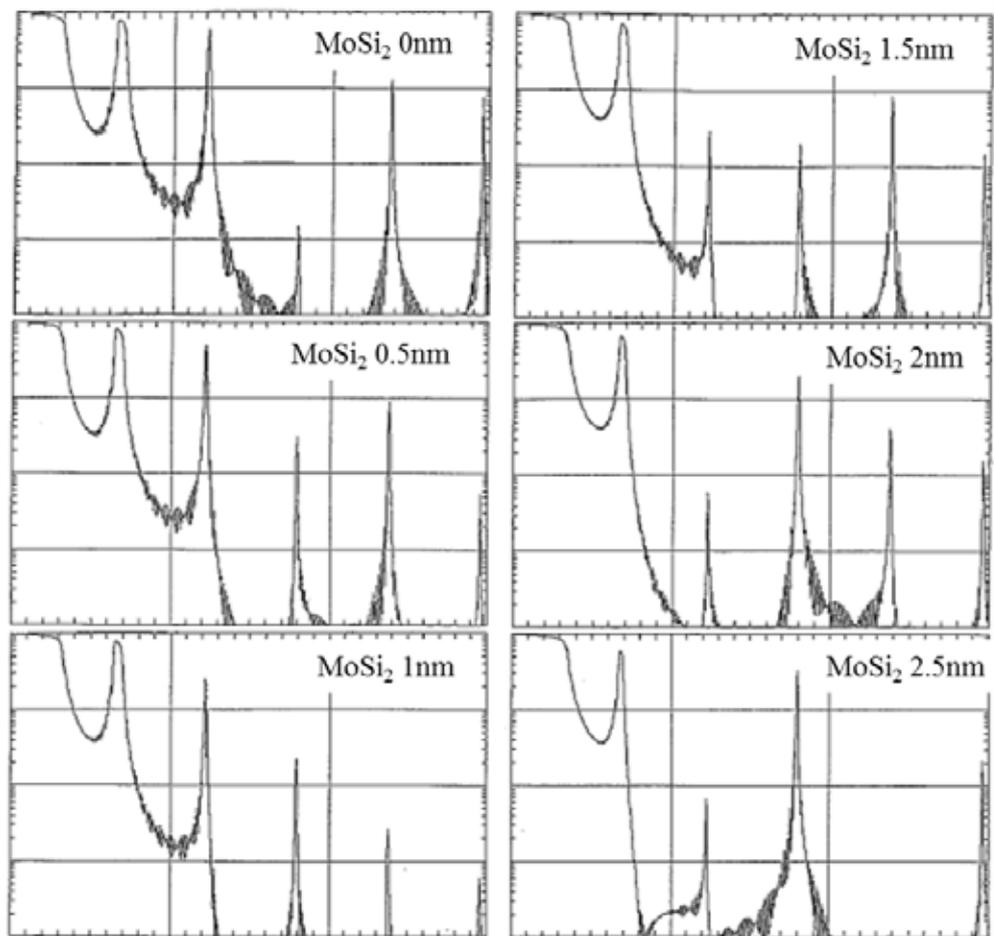


図 2-1-12 MoSi<sub>2</sub> 界面拡散層の厚さを変えたときの Mo/Si 多層膜の X 線回折強度の計算結果

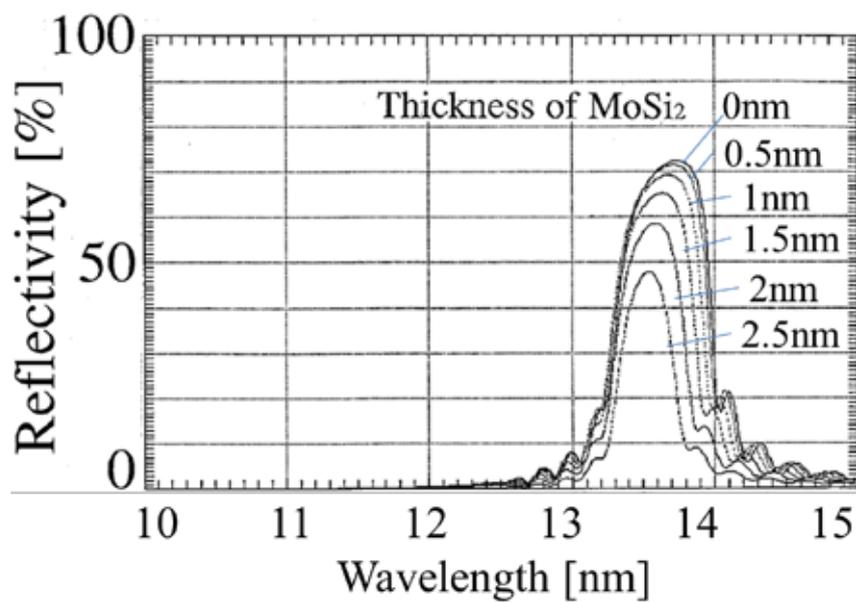


図 2-1-13 MoSi<sub>2</sub> 界面拡散層の厚さを変えたときの Mo/Si 多層膜の反射率の計算結果

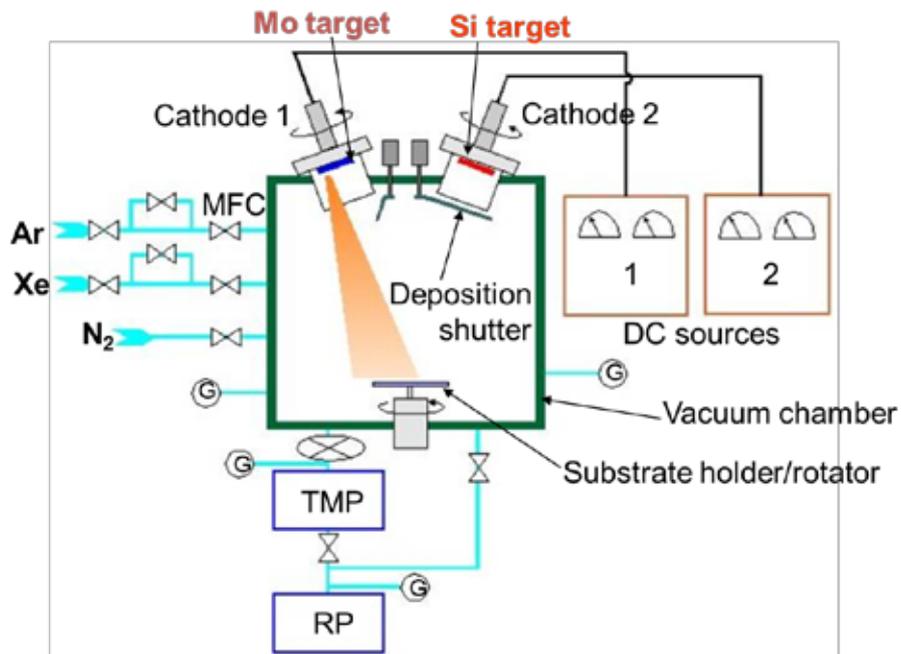


図 2-1-14 RMC 方式 DC マグネトロンスパッタリング装置の模式図

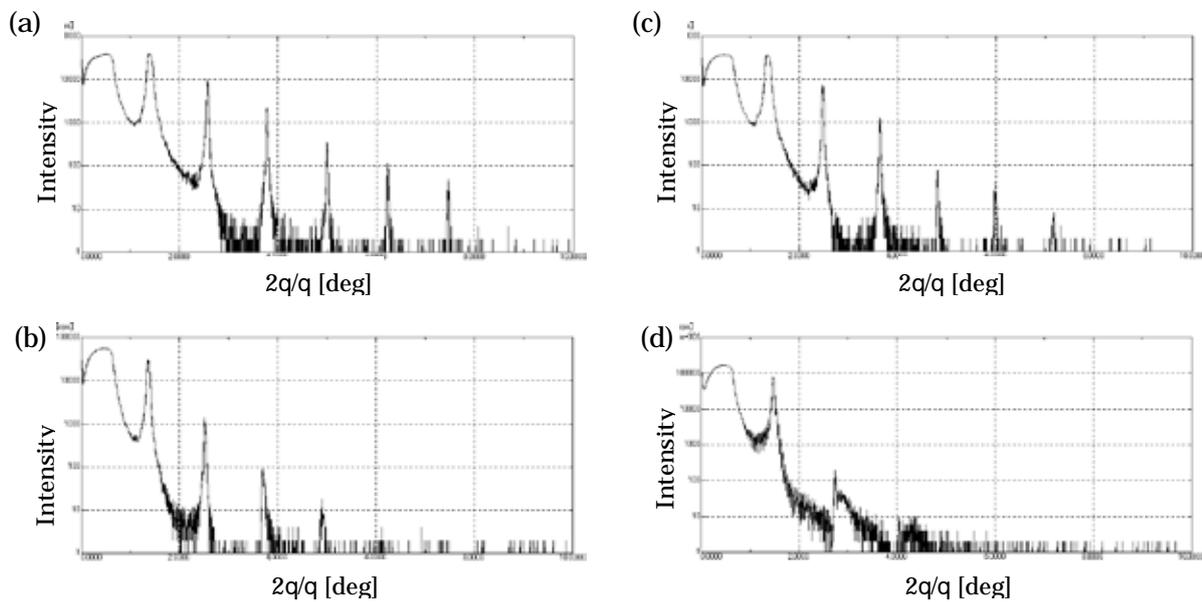


図 2-1-15 ガス種と圧を変えたときの Cu Kα線による反射率測定結果

- (a) 低圧 Xe ( 4 sccm, 0.11 Pa ) (b) 高圧 Xe ( 10 sccm, 0.27 Pa )  
(c) 低圧 Ar ( 12 sccm, 0.13 Pa ) (d) 高圧 Ar ( 28 sccm, 0.29 Pa )

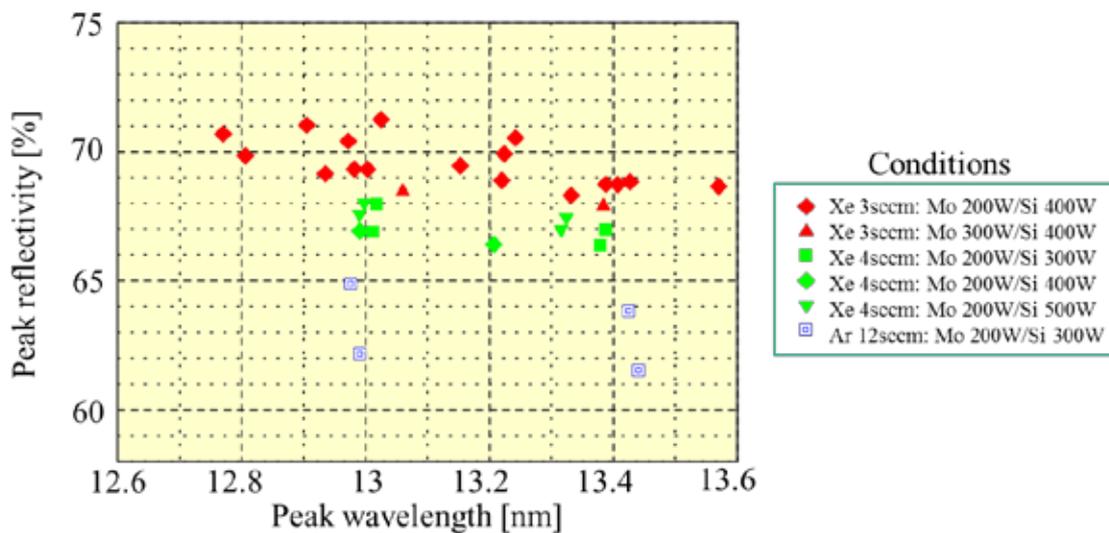


図 2-1-16 ガス種と圧力を変えたときのピーク反射率測定結果

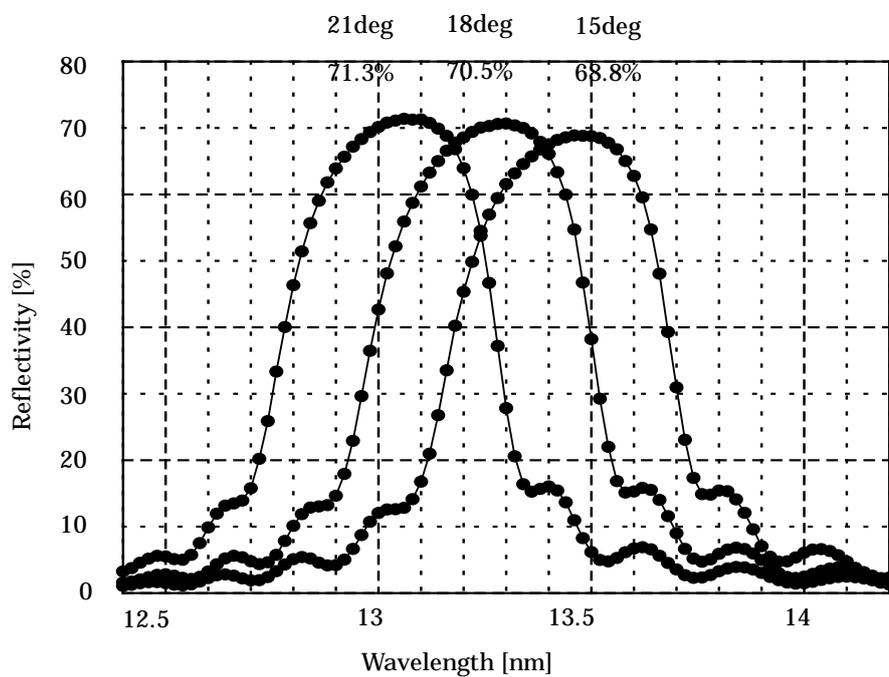


図 2-2-17 高反射率の得られた条件の多層膜の軟 X 線反射率測定結果

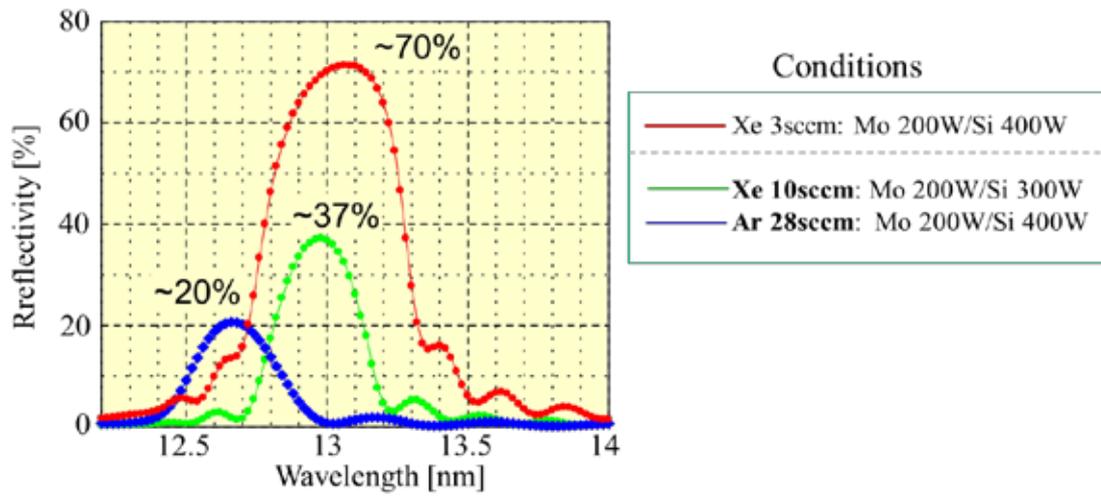


図 2-1-18 高圧で成膜した多層膜の軟 X 線反射率測定結果

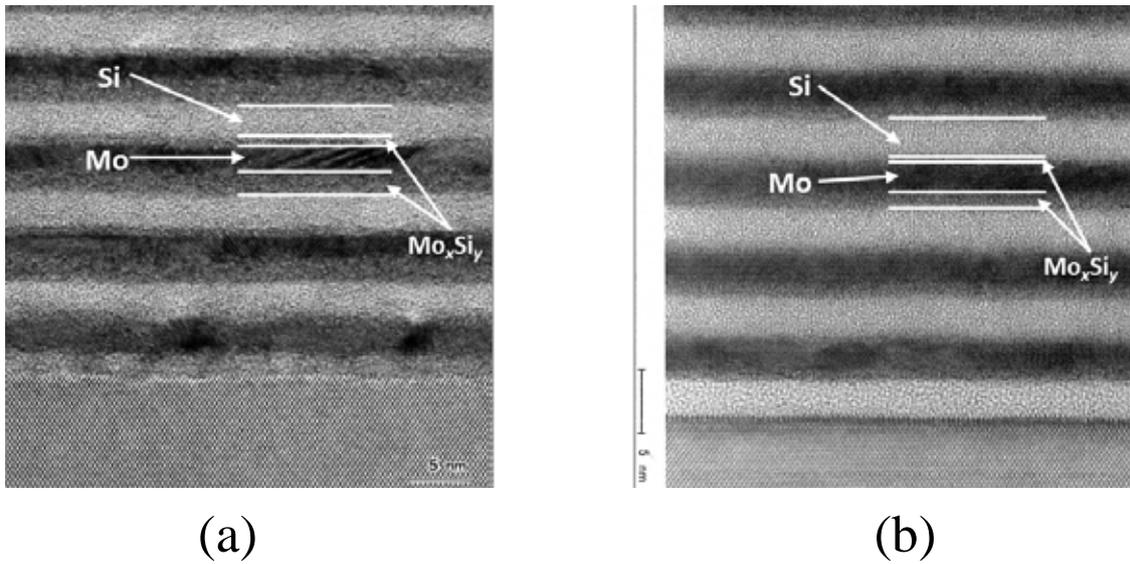


図 2-1-19 Mo/Si 多層膜断面の透過電子顕微鏡写真

- (a) イオンビームスパッタリング
- (b) RMC マグネトロンスパッタリング

## 2-2 Mo/Si 多層膜ミラーの応力制御

軟 X 線光学系を構成する多層膜ミラーは、単に高い反射率を有するだけでなく、精密に制御された膜厚分布や低い内部応力など様々な性能が要求される。光学系に要求される形状精度は波長に比例し厳しくなり、軟 X 線光学系で回折限界の結像を得るには、応力によるミラーの変形は無視できない誤差となる。高反射率の Mo/Si 多層膜は、- 400 MPa 程度の比較的大きな圧縮応力を持っており、これまでに様々な応力低減の手法が検討されてきた[1, 2]。

Mo/Si 多層膜の中で Si 層は圧縮応力を持ち、Mo 層は引っ張り応力を持つことが知られている[1, 3]。そのため、Mo/Si 多層膜の重原子 (Mo) 層の厚さの周期長に対する比率を表す  $G$  を変えると、多層膜全体の内部応力が変化する。 $G$  を小さくすると圧縮応力になり、 $G$  を大きくすると引っ張り応力が得られる。このことを利用して、 $G$  の大きな引っ張り応力の多層膜を応力相殺層として利用して、その上に  $G$  の小さな高反射率の多層膜を成膜して二層構造の多層膜とすることによって全体の応力を低減する方法が知られていた[1, 4]。われわれも、この方法を用いて Mo/Si 多層膜を低応力化することを試みた。

Mo/Si 多層膜の成膜には、前節で説明した RMC 方式 DC マグネトロンスパッタリング装置を用いた。Xe ガス圧力 0.08 Pa で、Si 基板上に周期長 7.2 nm の Mo/Si 多層膜を成膜した。まず、周期長と積層数を一定にして  $G$  を変えたときの Mo/Si 多層膜の内部応力の変化を調べた。積層数は 50 層対とした。図 2-2-1 にその結果を示す。 $G$  が 0.35 のときは - 377 MPa の圧縮応力であるが、 $G$  を大きくしていくと圧縮応力から引っ張り応力に変化して、 $G$  を 0.7 にすると 619 MPa の引っ張り応力になった。

次に、 $G$  0.7、周期長 7.2 nm、30 層対の Mo/Si 多層膜を応力相殺層とし、その上に反射層として  $G$  0.35、周期長 7.2 nm、50 層対の Mo/Si 多層膜を成膜した二重構造多層膜を作製した。この多層膜全体の内部応力は - 35 MPa の引っ張り応力となり、応力制御を行わない場合の - 377 MPa よりも一桁低減することが出来た。

この多層膜の軟 X 線反射率を測定した。測定には、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory BL-12A の斜入射反射率計を用い s 偏光で行った。その結果、軟 X 線反射率は 63 % であり、応力相殺をしていない  $G$  0.35 の多層膜で得られている反射率 70 % よりも大幅に低下した。

この原因を調べるために、まず、 $G$  を変えたときの Mo/Si 多層膜の軟 X 線反射率の変化を測定した。その結果を図 2-2-2 の中で示す。 $G$  が大きくなるに従って、反射率は急速に低下している。図中の は、 $G$  を変えたときの反射率の計算値を示す。実測値と比べると緩やかな低下しか示さず、反射率の急速な低下は  $G$  の違いだけでは説明できない。そこで、 $G$  を変えた Mo/Si 多層膜の表面粗さを AFM で測定した。図 2-2-3 に測定結果を示す。 $G$  0.35 では 0.25 nm RMS、 $G$  0.5 では 0.34 nm RMS、 $G$  0.6 では 0.49 nm RMS、 $G$  0.7 では 0.61 nm RMS となり、 $G$  を大きくするほど表面粗さが大きくなっていることが分かった。なお、基板として用いた Si 基板の表面粗さは 0.12 nm RMS 程度であり、これらの値よりも十分小さい。こ

これらの粗さを考慮した反射率の計算値を図 2-2-2 の中に示す。こちらは実測値と良く一致する傾向を示し、Gの大きいところでは、粗さの増大が反射率低下の支配的要因になっていることが分かった。応力相殺層を設けた二重構造多層膜の表面粗さは図 2-2-3 に示すように 0.39 nm RMS であった。G0.35 の高反射率多層膜の表面粗さ 0.25 nm RMS よりもだいぶ大きくなっている。このとき応力相殺層に用いたG0.7 の多層膜の表面粗さは 0.61 nm RMS と大きい。応力相殺層を設けた多層膜で反射率が低くなった原因は、このような表面粗さの大きい応力相殺層の上に反射層を成膜したために、反射層の界面粗さが大きくなったことにある。

反射層の反射率を低下させないためには、応力相殺層の表面粗さを劣化させないようにしなければならない。Gを大きくすると表面粗さが大きくなるのは、Mo 層の厚さが大きくなるに従い Mo の微結晶が成長するためだと考えられた。これを防ぐためには、応力相殺層の Mo 層の厚さを薄くすれば良い。Mo 層を薄くして、なおかつ引っ張り応力を得るためには、Gを大きくしたまま周期長を小さくすれば良い。ところが、これまでに報告されていた応力相殺層では、暗黙のうちに反射層と同じ周期長が用いられてきた。これは、応力相殺層も多少なりとも反射に寄与させようとする意図からであった。しかし、われわれはこのような従来の方法を改め、応力相殺層は全く反射には寄与せず、応力の調整だけに特化した新しいコンセプトの応力相殺層を考案した。

以上のような目的から、周期長 3.3 nm、G0.7、積層数 130 層対の応力相殺層を成膜して、その上に周期長 7.2 nm、G0.35、積層数 45 層対の反射層を積層した二層構造の Mo/Si 多層膜を作製した。応力相殺層の Mo 層の厚さは  $3.3 \text{ nm} \times 0.7 = 2.31 \text{ nm}$  であり、反射層の Mo 層の厚さ  $7.2 \text{ nm} \times 0.35 = 2.52 \text{ nm}$  を越えないように設定した。この Mo/Si 多層膜の全体の応力は -6 MPa まで低減できた。

この二層構造多層膜の表面粗さを AFM で測定したところ、図 2-2-3 に示すように 0.26 nm RMS に改善されており、予想通りに表面粗さを低減することが出来た。

図 2-2-4 に、改善後の二層構造 Mo/Si 多層膜の軟 X 線反射率測定値を示す。比較のために応力相殺をしていない通常の高反射率の Mo/Si 多層膜の反射率も重ねてプロットした。二層構造にして応力相殺した Mo/Si 多層膜の反射率は、応力相殺をしていない Mo/Si 多層膜の反射率と殆ど同じであり、低応力と高反射率の両立を達成することが出来た。

応力相殺層を用いた二層構造多層膜は、従来の多層膜と比べて複雑な構成となる。多層膜ミラーを実際に使用する際には、上部の反射層は、その仕様（波長と入射角）に合わせて周期長を厳密に調整する必要がある。本研究による二層構造多層膜では、上層の反射層に合わせて、その応力を相殺するように下層の応力相殺層の周期長も厳密に調整する必要がある。多層膜ミラーを成膜するとき、周期長の精密測定には X 線回折が用いられる。X 線の回折角度から多層膜の周期長が計算される。図 2-2-5 は、改善後の二層構造 Mo/Si 多層膜の X 線回折測定結果である。図中で 1 のラベルを付けたピークは周期長 7.2 nm の反射層の周期構造に対応し、2 のラベルを付けたピークは周期長 3.3 nm の応力相殺層の周期構造

に対応する。このように二つのグループの回折ピークは完全に分離することができるので、反射層と応力相殺層の周期長を、それぞれ独立に正確に求めて調整することが可能である。反射層と応力相殺層に異なる周期長を用いることは、実際に多層膜ミラーを製造する際の制御性の点でも有利である。

#### 本節に関連する主論文

- 1 M. Shiraishi, N. Kandaka and **K. Murakami**, “Low-stress and high-reflectivity molybdenum/silicon multilayers deposited by low-pressure rotary magnet cathode sputtering for EUV lithography”, Proc. SPIE, **5374**, 104, (2004).

#### 参考文献

- [1] P. Mirikarimi and C. Montcalm, Proc. SPIE, **3331**, 133, (1998).
- [2] M. Shiraishi, W. Ishiyama, T. Oshino and K. Murakami, Jpn. J. Appl. Phys., **39**, 6810, (2000).
- [3] M. Shiraishi, W. Ishiyama, N. Kandaka, T. Oshino and K. Murakami, Proc. SPIE, **4343**, 590, (2001).
- [4] E. Zoethout, G. Spipos, R. van de Kruijs, A. Yakshin, E. Louis, S. Mullender and F. Bijkerk, Proc. SPIE, **5037**, 872, (2003).

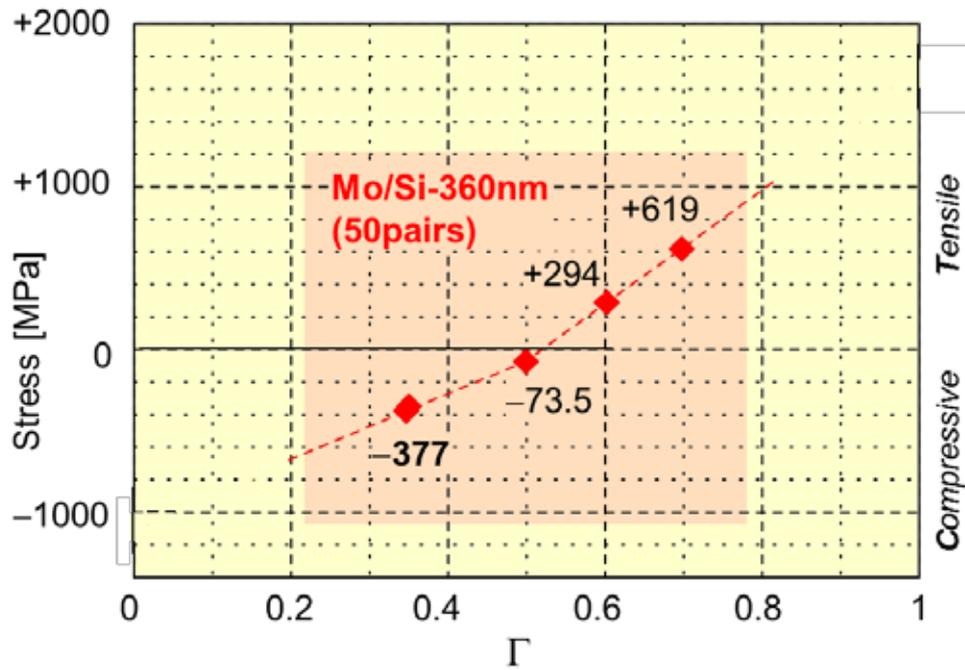


図 2-2-1 Mo/Si 多層膜の $\Gamma$ を変えたときの内部応力の変化

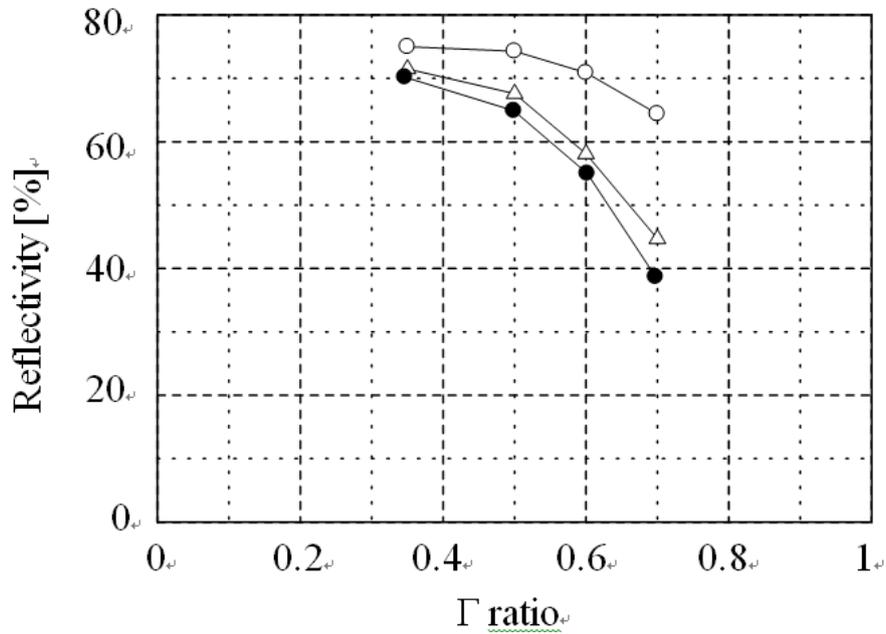


図 2-2-2 Mo/Si 多層膜の $\Gamma$ を変えたときの軟 X 線反射率の変化  
 ○ : 測定値、△ : 計算値、● : 表面粗さの測定値を用いた計算値

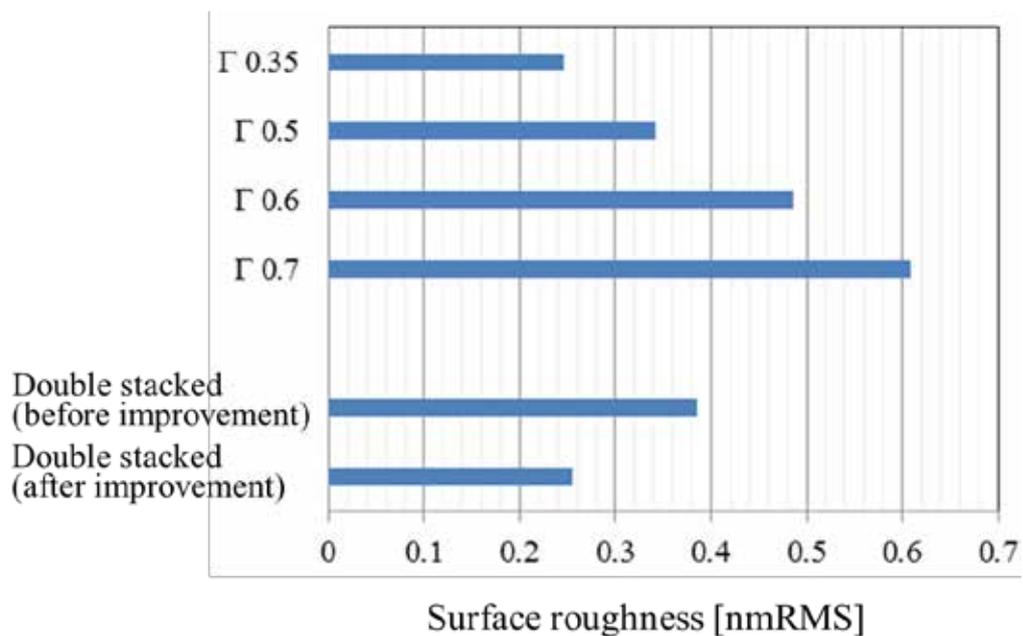


図 2-2-3  $\Gamma$ を変えた Mo/Si 多層膜と二層構造多層膜の表面粗さ

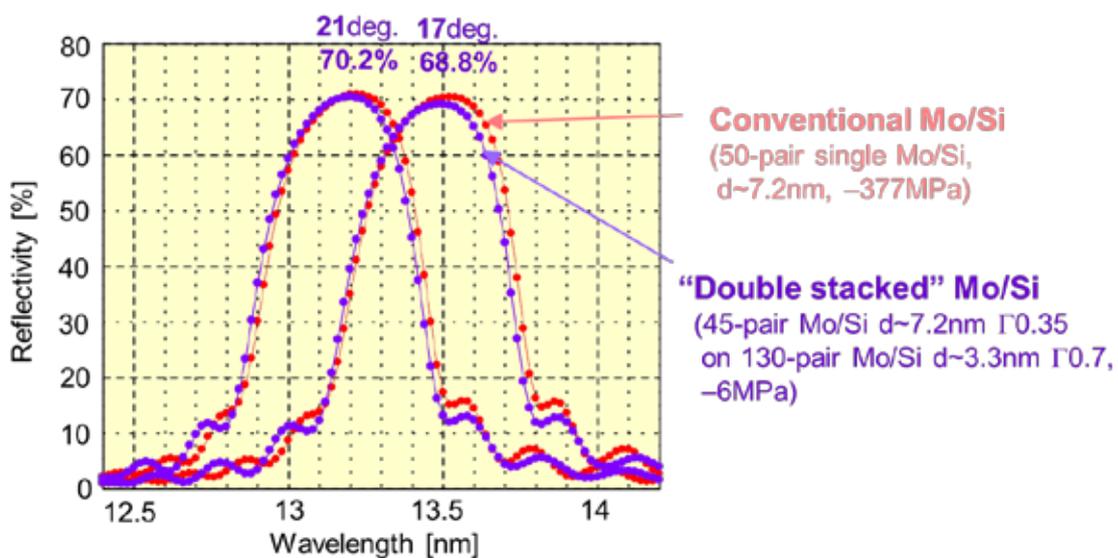


図 2-2-4 応力相殺層と反射層の二層構造 Mo/Si 多層膜の軟 X 線反射率測定値

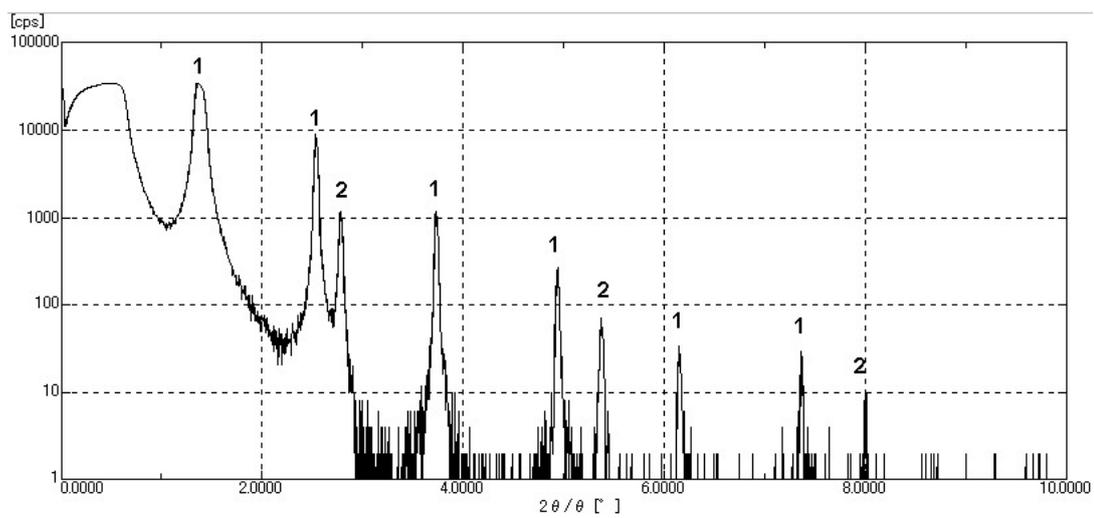


図 2-2-5 応力相殺層と反射層の二層構造 Mo/Si 多層膜の X 線回折測定結果  
 図中の 1 は周期長 7.2 nm、2 は周期長 3.3 nm に対応するピーク

## 第3章 軟 X 線結像光学系の開発

### 3-1 シュバルツシルド光学系による拡大結像系

2枚の球面鏡で構成されたシュバルツシルド光学系は、軟 X 線顕微鏡用の光学系として広く用いられてきた[1-4]。軟 X 線顕微鏡で注目される波長域は、酸素の K 吸収端の 2.3 nm から炭素の K 吸収端の 4.4 nm の間の、いわゆる“水の窓 (Water window)”と呼ばれる領域である。この波長域では水と蛋白質の吸収コントラストが大きいので、生体試料を観察するのに適している。直入射で使用する多層膜ミラーの周期長は使用波長の約半分なので、この波長域でシュバルツシルド光学系を作るのはかなり難しい。われわれは、軟 X 線多層膜光学系の限界に挑むために、“水の窓”に近い波長 4.5 nm 用のシュバルツシルド光学系の開発を試みた。この波長は、実験室での利用が容易な、炭素の Ka 特性 X 線の波長に合わせて選択した。

シュバルツシルド光学系は、穴の開いた凹面鏡と凸面鏡の 2 枚の球面鏡で構成され、入射瞳の中心に遮蔽部のあるリング状の瞳を持つ光学系である。本研究で用いたシュバルツシルド光学系の全長は 1300 mm、倍率は 32 倍、NA は 0.2 とした。入射瞳上には NA 0.1 に相当する大きさの中心遮蔽がある。凹面鏡の曲率半径は約 135mm、直径は 80mm、凸面鏡の曲率半径は約 50 mm、直径は 16 mm とした。この光学系の光学設計上の残収差は、物体側の像高 30 mm で 0.06 mm 以内に抑えられている。

使用する X 線の波長は炭素の K 吸収端 (4.4 nm) よりも僅かに長い波長なので、炭素の吸収係数が小さくなり、多層膜ミラーの一方の物質に炭素を用いると高い反射率が得られる。そこで、W/C, Ni/C, Cr/C, NiCr/C の 4 種類の組み合わせについて検討した。ここで、NiCr は重量%で 80:20 の合金である。図 3-1-1 に、これらの材料からなる多層膜ミラーの、積層数に対する直入射反射率の計算値を示す。多層膜の周期長は 2.25 nm とし、重原子層の厚さの周期長に対する比率  $G$  は 0.5 とした。材料の光学定数は、Henke らによる原子散乱因子のデータから算出した[5]。図 3-1-2 は、これらの多層膜ミラーの、積層数に対する反射率ピークの半値幅  $\Delta I$  の計算値を示す。積層数 300 層対の Cr/C 多層膜を用いると、50 % 程度の反射率が得られる計算になるが、このとき  $\Delta I$  は 0.028 nm となる。これは、多層膜を成膜するときの周期長の許容誤差が非常に厳しいことを示す。少なくともピーク値の半分以上の反射率を得るために許容される多層膜の周期長の誤差  $\Delta d$  は  $\Delta I / 4$  なので、300層対の Cr/C 多層膜の場合は 0.007 nm 以下に制御しなければならないことになる。これは実現困難と考えられたので、積層数を少なくして  $\Delta I$  を大きくすることにした。積層数を 50 層対にすると、どの材料の組み合わせでも  $\Delta I$  は 0.084 nm 程度になり、多層膜の周期長の許容誤差は 0.02 nm 以内で良いことになる。これでもかなり厳しい値ではあるが、実現可能な範囲になった。このときの反射率は、Cr/C 多層膜よりも Ni/C, NiCr/C 多層膜の方が高くなり、約 20 % となる。Ni 薄膜は、薄くすると島状成長により界面粗さが増加し、反射率が低下してしまう。Ni の代わりに Ni と Cr の合金を用いることにより島状成長をある程度抑えることが出来た。以上のような検討から、積層数 50 層対の NiCr/C 多層膜を採用した。

この多層膜は、計算上は 20 %の直入射反射率が得られるが、周期長が 2.25 nm と非常に小さいため、界面粗さによる散乱損失が大きく、実際に得られる反射率は計算値よりもずっと低くなる。どの程度の反射率が得られるのかを調べるために、イオンビームスパッタリングで Si ウェハ上に NiCr/C 多層膜を成膜して、軟 X 線反射率を測定した。測定には、高エネルギー加速器研究機構 Photon Factory BL-11A の斜入射反射率計を用い、s 偏光で測定した[6]。反射率計の都合上、垂直入射では測定できないので、周期長が 2.5 nm と 2.2 nm の二つの多層膜を作製して、波長 4.5 nm での直入射反射率を推定した。積層数は 50 層対とし、Gは 0.5 とした。図 3-1-3 に測定結果を示す。二つの多層膜で同じ波長にピークが来るように入射角を調整して測定を行った。図 3-1-3 (a) は周期長 2.5 nm の NiCr/C 多層膜の反射率で、法線からの入射角 40°、32°、25° で測定を行った。図 3-1-3 (b) は周期長 2.2 nm の NiCr/C 多層膜の反射率で、法線からの入射角 30° と 20° で測定を行った。周期長 2.5 nm の NiCr/C 多層膜は、波長 4.5 nm で約 7.2 %の反射率を示した。他の波長での二つの多層膜の反射率の比較から、周期長 2.2 nm の NiCr/C 多層膜は、波長 4.5 nm で約 3.6 %程度の反射率を示すと推定された。従って、シュバルツシルド光学系で 2 回反射したときの効率は約 0.1 %となる。

多層膜ミラーで軟 X 線を反射する場合、反射面の場所によって入射角が異なるので、多層膜の周期長もそれに合わせて分布をもたせる必要がある。特に、ここで使用する NiCr/C 多層膜は周期長の許容誤差が厳しいので、精密な制御が要求される。そこで、マスクによる周期長分布の補正を行った。凹面多層膜ミラーの場合は、図 3-1-4 (a) に示すように、基板を自転する基板ホルダーに取付け、その直前に固定した分布補正マスクを配置して、マスクの形状により周期長の分布を補正した。図 3-1-4 (b) に、成膜した凹面多層膜ミラーの周期長分布の測定結果を示す。図中の破線で示した周期長の最適値からのズレ量は 0.01 nm 以内に抑えることが出来た。この方法は、マスクの中心と基板の中心を一致させる必要があるため、直径の小さな凸面多層膜ミラーではうまくいかなかった。マスク取付け誤差の影響が大きく、再現性のある分布補正ができなかった。そこで、凸面多層膜ミラーの場合は、図 3-1-5 (a), (b) に示すように、直線状のエッジを持つ分布補正マスクを自転する基板の直前に配置した。基板とマスクを一体にして傾け、成膜粒子の入射方向に対する基板の傾きによって周期長の分布を調整した。図 3-1-5 (c) に、成膜した凸面多層膜ミラーの周期長分布の測定結果を示す。図中の破線で示した周期長の最適値からのズレ量は 0.02 nm 以内に抑えることが出来た。

図 3-1-6 に作製した 2 枚の多層膜ミラーの写真を示す。ミラー基板の材質には熔融石英を用いた。研磨した基板の表面粗さは約 0.3 nm RMS であった。ミラーの面形状精度は、凹面鏡の多層膜成膜前が 2.0 nm RMS、多層膜成膜後が 4.7 nm RMS、凸面鏡の多層膜成膜前が 1.2 nm RMS、多層膜成膜後が 1.8 nm RMS であった。いずれも多層膜の成膜後に形状精度が劣化している。これは多層膜の応力に起因する変形のためと考えられる。干渉計を使って波面収差を測定しながら 2 枚のミラーの位置調整を行った。2 枚のミラーの間隔と傾斜を調

整して、光軸周りに互いに回転させて収差が最小になる位置で鏡筒に固定してシュバルツシルド光学系を完成させた。組み立て完成状態での波面収差は、He-Ne レーザーによる測定で  $67\lambda/10000$  (4.2nm) RMS であった。これは、使用する軟 X 線の波長と同程度である。

この光学系を使って軟 X 線による拡大結像の実験を行った。図 3-1-7 に実験配置図を示す。X 線源には市販の透過型微小焦点 X 線源 (RIGAKU Micro-Flex) を用いた。10 kV の電子ビームを電子レンズで絞ってターゲットに衝突させて X 線を発生する。ターゲット電流は 10 mA である。ターゲットには厚さ 2.2 mm のカーボン膜を用いて、波長 4.5 nm の炭素 Ka 特性 X 線を発生させた。電子レンズを使って電子ビームの焦点位置を変えることによって、X 線源の位置と大きさを調整できる。試料は、ターゲットから 0.5 mm 離れた位置に置いた。その後ろには、可視光を除去するためのフィルターを置いた。フィルターはターゲットと同じ厚さ 2.2 mm のカーボン膜を用いた。このフィルターの X 線透過率は約 30 % である。これらの、ターゲット、試料、フィルターは、それぞれ所定の位置に来るようにシュバルツシルド光学系の鏡筒に対して固定した。X 線の検出器には MCP と写真フィルムを用いた。MCP を使って X 線源の位置、大きさの調整と検出器までの距離の調整を行ってから、フィルムに撮像した。

図 3-1-8 (a) は、2000 本/インチの銅メッシュを試料として撮像した結果を示す。フィルムは Kodak TMAX 400 を使用して 1 時間露光した。12.7 mm ピッチのパターンを明瞭に解像している。像全体は均一な明るさで、周辺まで像の劣化は認められない。像の中心と三方向に延びる影は凸面鏡とこれを支える支柱の影である。このような影が現れるのは、X 線源の大きさが小さいために、メッシュ上の一点を照明した光線の広がり角が小さいためと考えられた。そこで、X 線源を拡大して撮像した結果を図 3-1-8 (b) に示す。影が消えて像全体の寸法も大きくなった。像の鮮明さは図 3-1-8 (a) と比べて特に差は無い。得られた像から X 線源の直径を見積もったところ、X 線源を拡大する前が約 40 mm、拡大した後が約 170 mm だった。

図 3-1-9 は、得られた像をマイクロデンシトメータでトレースした結果を示す。解像力の指針となるエッジ部のコントラストが 25 % と 75 % の間の幅は 0.31 mm であった。少なくとも 0.5 mm 以下の解像力があることが分かったので、更に細かい試料を使って実験を行った。

図 3-1-10 は、1000 本/mm の金製の透過型回折格子を試料として得られた像を示す。フィルムには NEOPAN S ASA100 を用いて、約 2 時間露光した。太い格子状の線は回折格子の補強枠で、一つの正方形の領域の中に 30 本の 1 mm ピッチパターンが見える。

この像の一部を拡大したものを図 3-1-11 に示す。0.5 mm 幅のラインが確かに解像されている。線の凸凹が目立つが、これは光学系の解像力の限界のためではなく、フィルムの粒状性のためと考えられる。以上の結果から、作製した波長 4.5 nm 用シュバルツシルド光学系は、少なくとも 0.5 mm 以下の解像力を有することが確認された。

### 本節に関連する主論文

- | **K. Murakami**, T. Oshino, H. Nakamura, M. Ohtani and H. Nagata, “Normal-incidence X-ray microscope for carbon  $K\alpha$  radiation with 0.5mm resolution”, Jpn. J. Appl. Phys., **31**, L1500, (1992).
- | **K. Murakami**, T. Oshino, H. Nakamura, M. Ohtani and H. Nagata, “Schwarzschild microscope for carbon  $K\alpha$  radiation”, Appl. Opt., **32**, 7057, (1993).

### 参考文献

- [1] R. Haelbich, W. Staehr and C. Kunz, Ann. NY Acad. Sci. **342**, 148, (1980).
- [2] E. Spiller, in *X-Ray Microscopy*, G. Schmahl and D. Rudolph, eds. (Springer-Verlag, Berlin, 1984), 226.
- [3] J. Trail, R. Byer, Opt. Lett., **4**, 539, (1989).
- [4] M. Kado, K. Tanaka, R. Komada, T. Yamanaka, S. Nakai, K. Yamashita, M. Ohtani and K. Kitamoto, Opt. Lett., **16**, 109, (1991).
- [5] B. L. Henke, P. Lee, T. J. Tanaka, R. L. Shimabukuro and B. K. Fujikawa, At. Data Nucl. Tables **27**, 1, (1982).
- [6] M. Yanagihara, M. Niwano, T. Koide, S. Sato, T. Miyahara, Y. Iguchi, S. Yamaguchi and T. Sasaki, Appl. Opt. **25**, 4586, (1986).

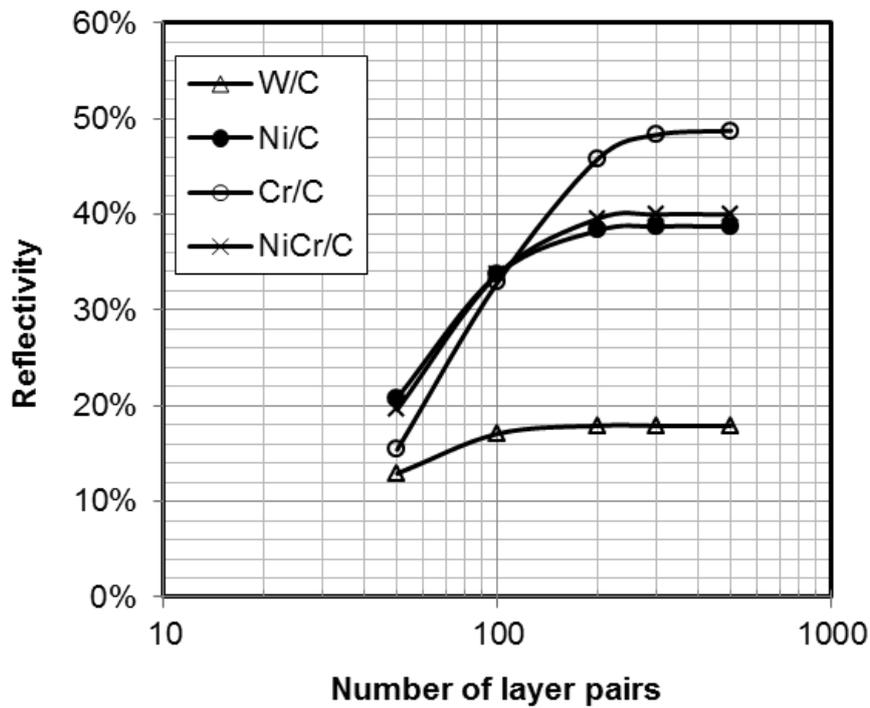


図 3-1-1 W/C, Ni/C, Cr/C, NiCr/C 多層膜の直入射反射率の計算値

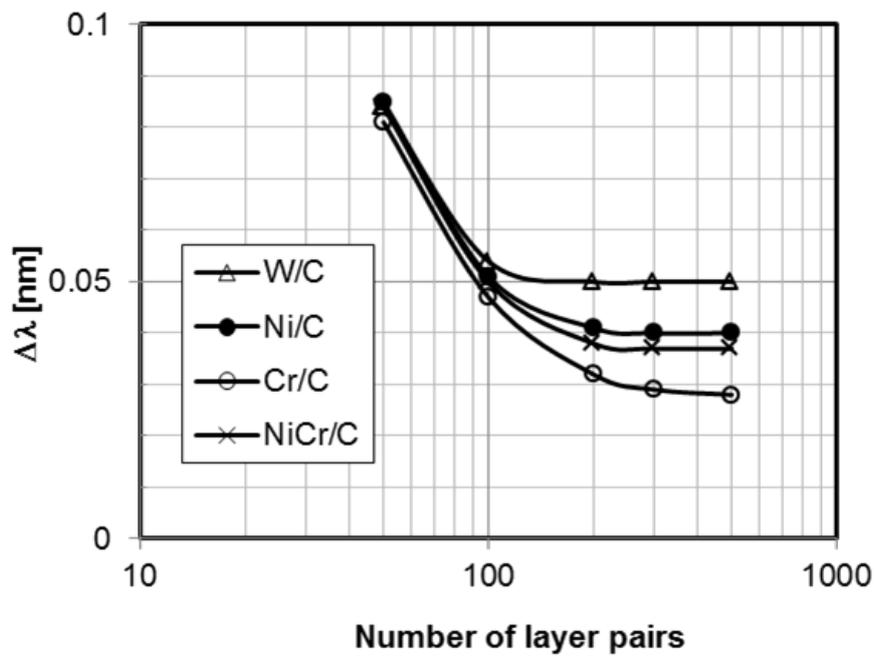
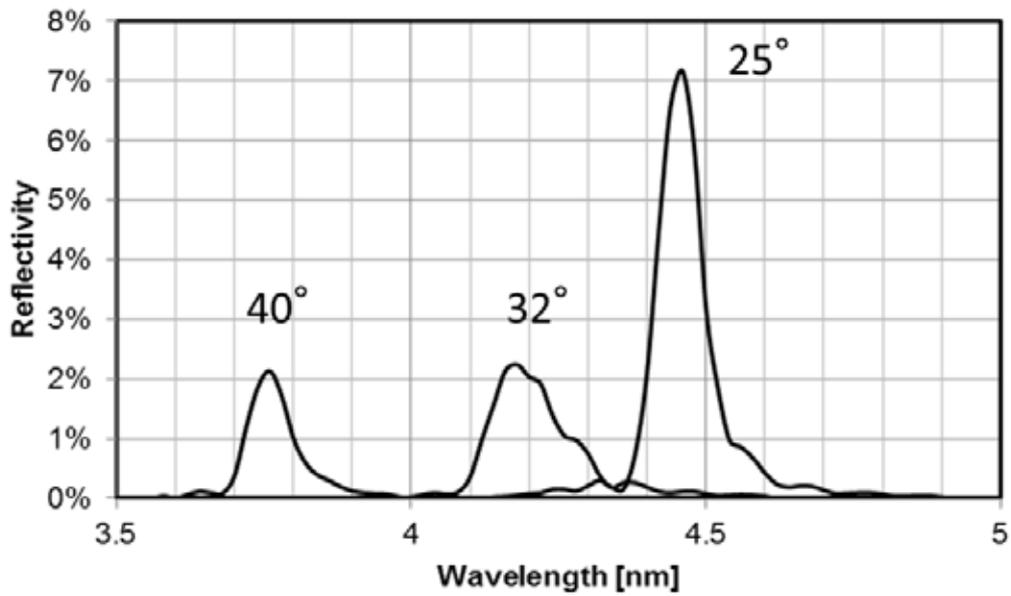
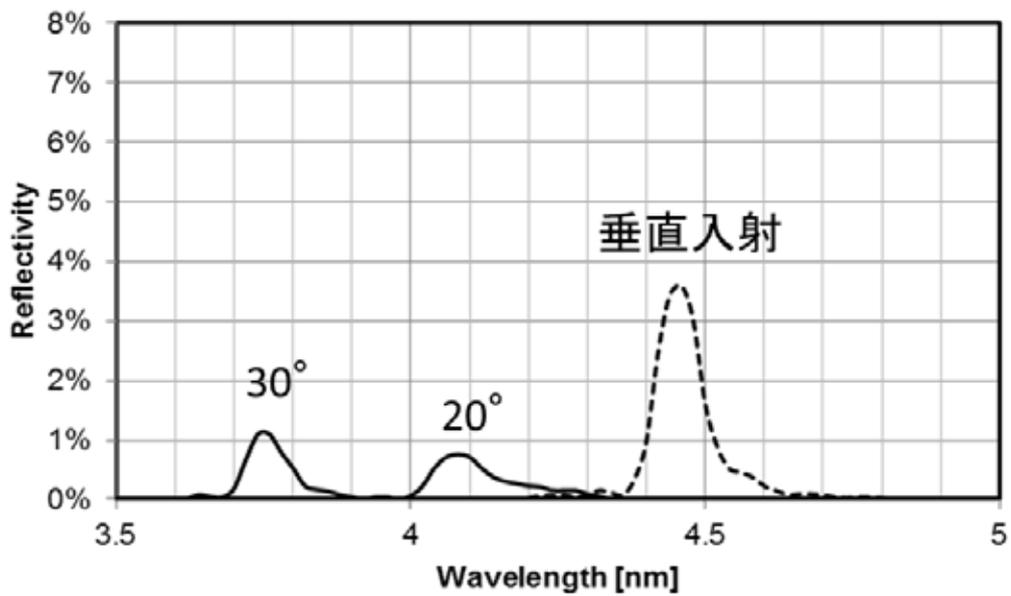


図 3-1-2 W/C, Ni/C, Cr/C, NiCr/C 多層膜のピーク半値幅の計算値



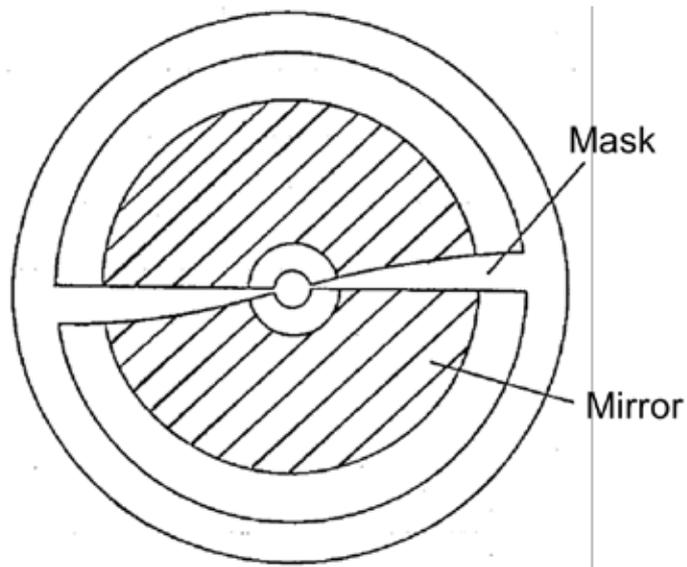
(a)



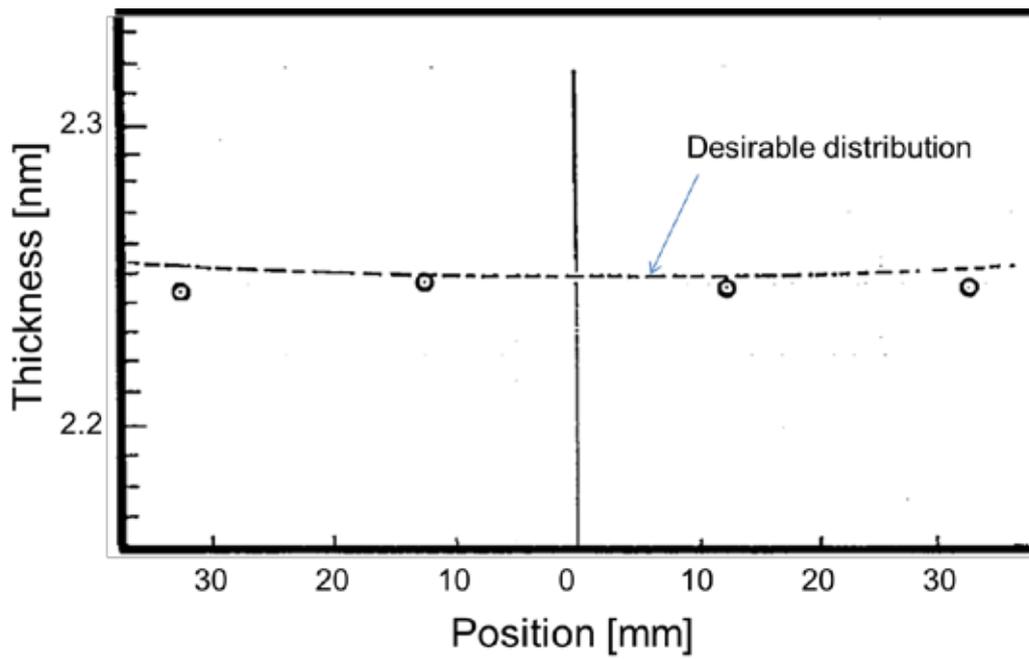
(b)

図 3-1-3 NiCr/C 多層膜の軟 X 線反射率

(a) 周期長 2.5nm, (b) 周期長 2.2nm



(a)



(b)

図 3-1-4 凹面鏡の周期長分布の補正  
 (a) 分布補正マスクの形状、(b) 周期長分布の補正結果

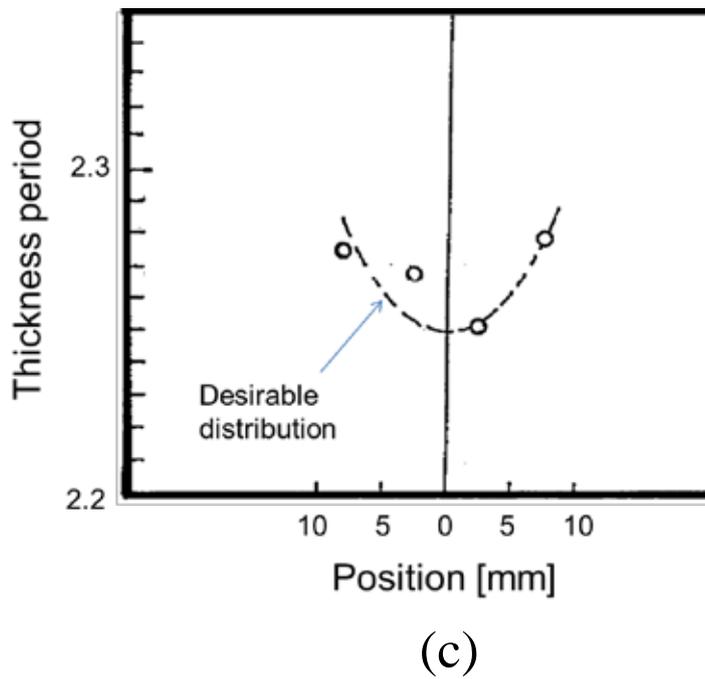
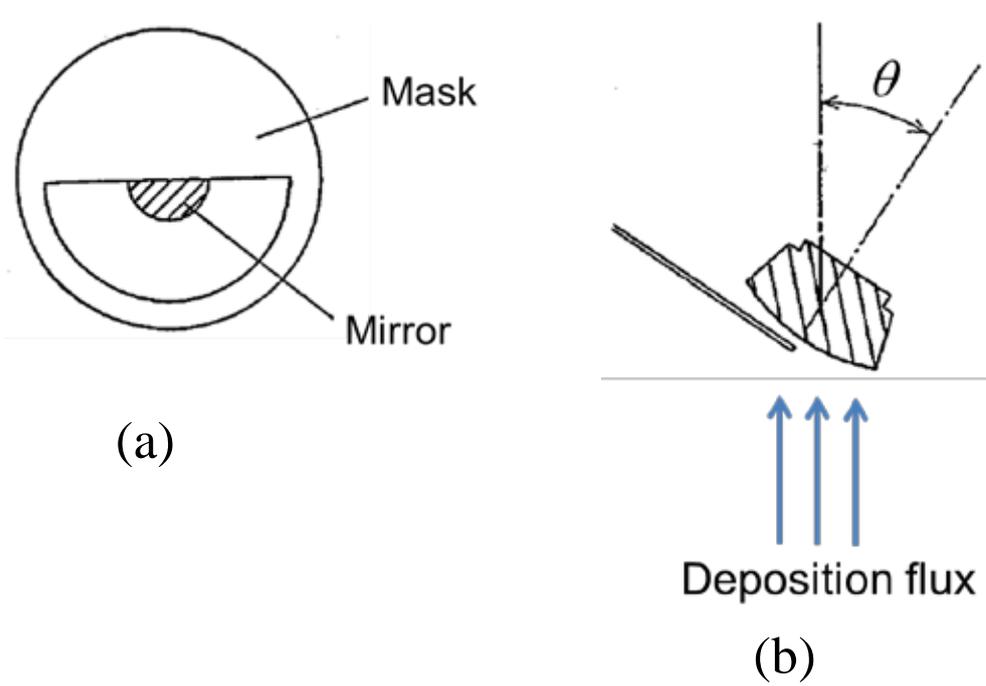


図 3-1-5 凸面鏡の周期長分布の補正

(a) 分布補正マスクの形状 (正面図) (b) 分布補正マスクの形状 (側面図)

(c) 周期長分布の補正結果

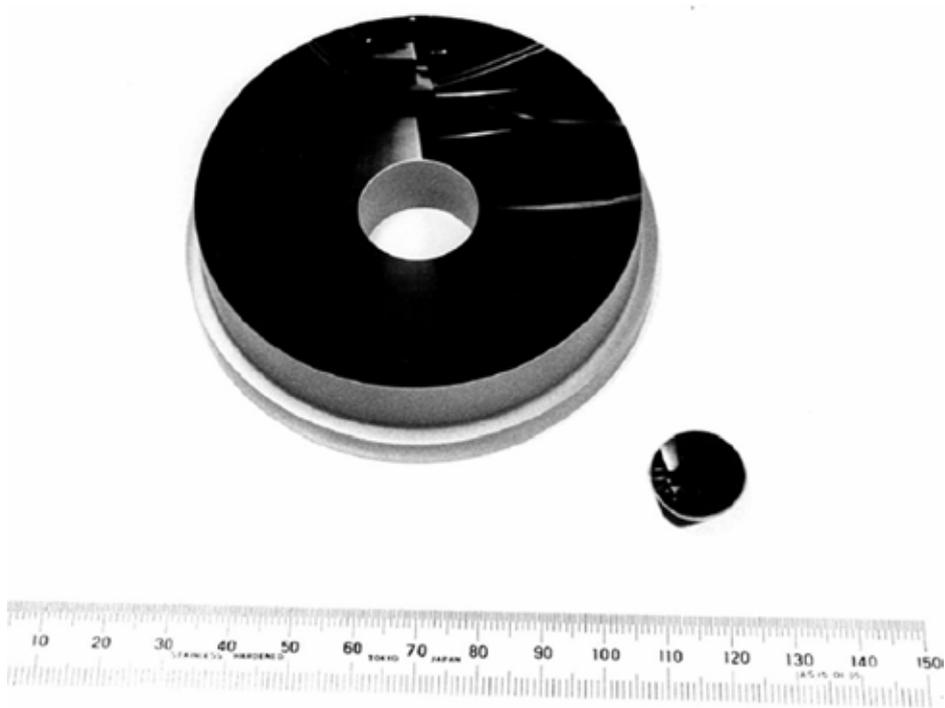


図 3-1-6 凹面多層膜ミラーと凸面多層膜ミラーの写真

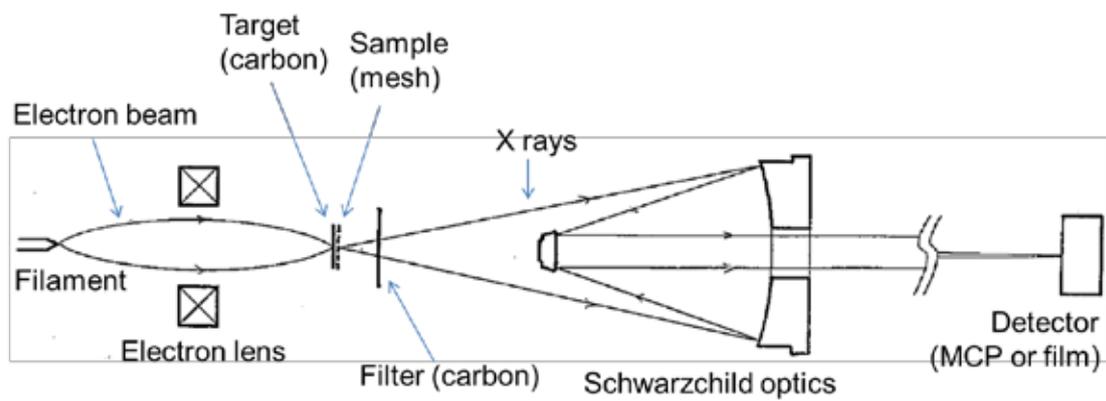
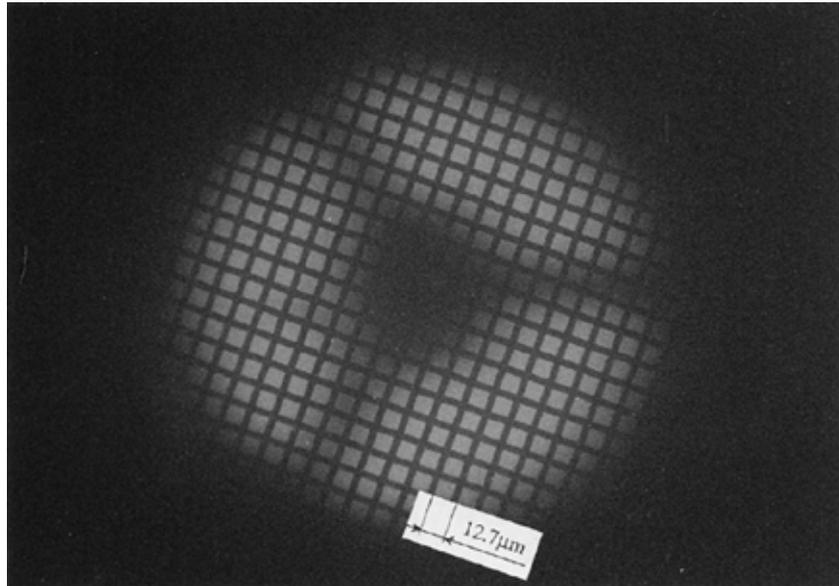
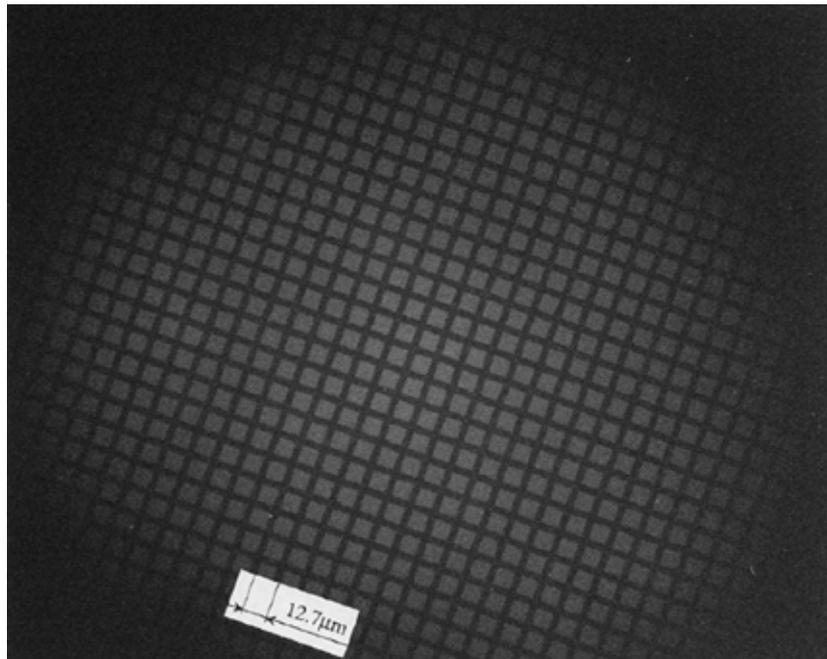


図 3-1-7 シュバルツシルド光学系による拡大結像の実験配置図



(a)



(b)

図 3-1-8 2000 本/インチメッシュの軟 X 線拡大像  
(a) X 線源が小さい (40 mm) 場合、(b) X 線源が大きい (170 mm) 場合

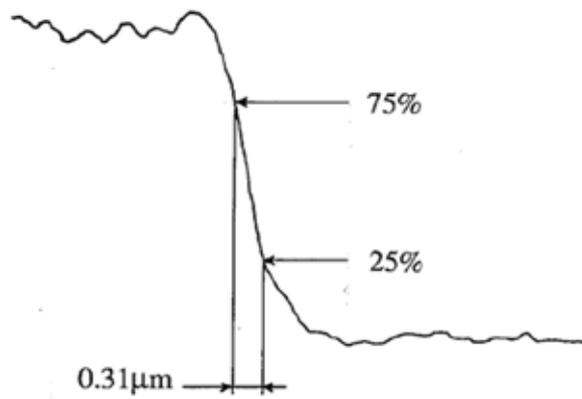


図 3-1-9 2000 本/インチメッシュ像のマイクロデンシトメータによるトレース

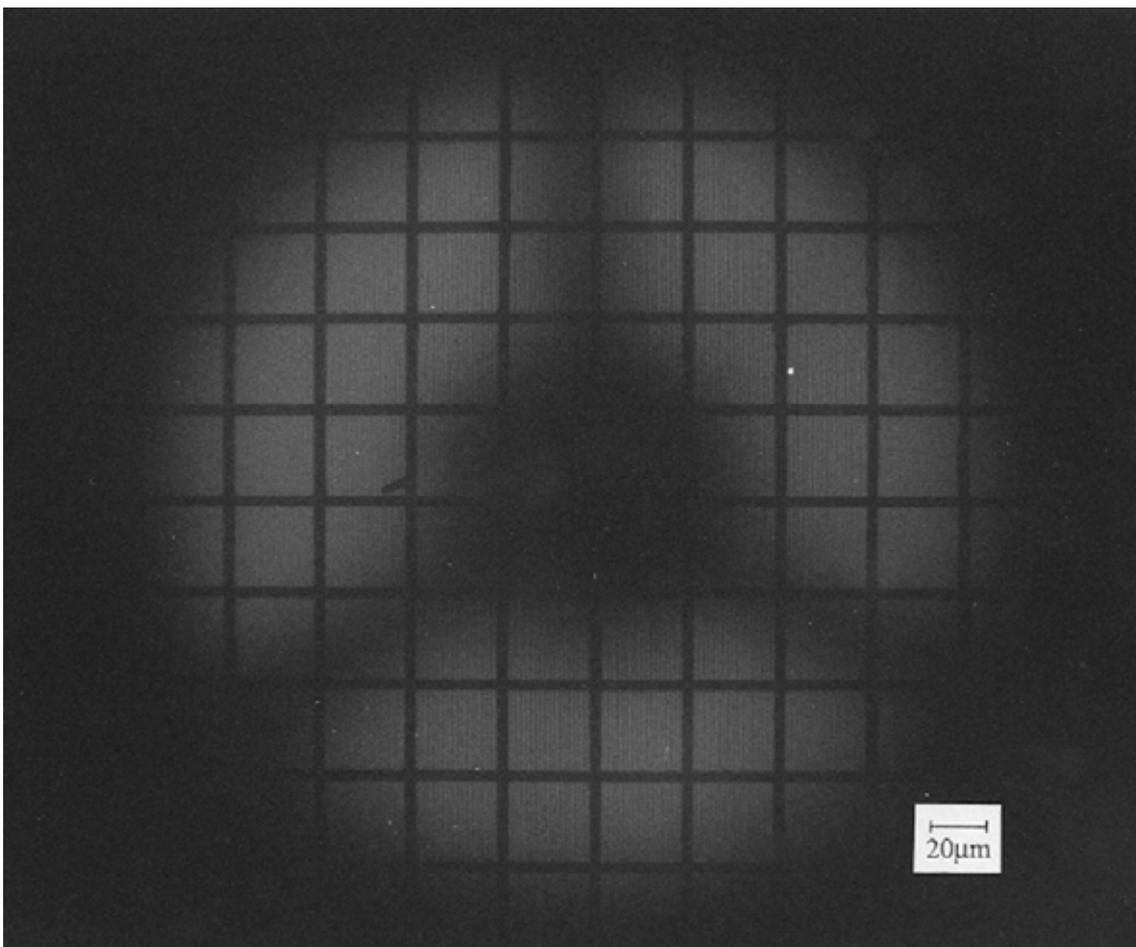


図 3-1-10 1000 本/mm 透過型回折格子の軟 X 線拡大像 (全体)

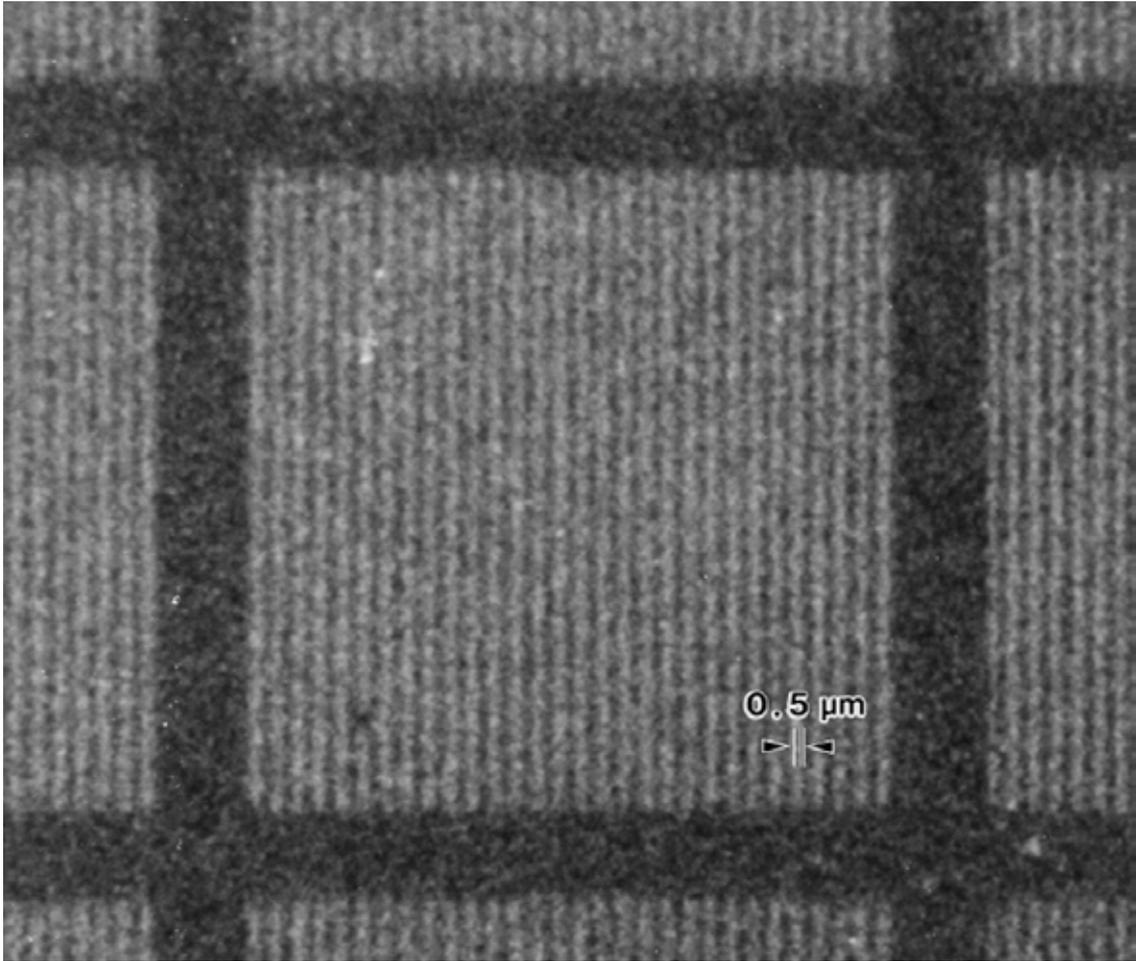


図 3-1-11 1000 本/mm 透過型回折格子の軟 X 線拡大像（一部拡大）

## 3-2 シュバルツシルド光学系による縮小投影露光系

### 3-2-1 透過型マスクを用いた波長 13 nm での露光実験

前節の実験で、軟 X 線を使ってある程度の微細パターンを観察することができることを確認したので、次はリソグラフィの実験を試みた。軟 X 線を使ってマスク上のパターンをウェハ上に縮小投影露光する EUV リソグラフィは、NTT の木下により発明された技術である[1, 2]。その後 AT&T Bell 研究所のグループが 0.05  $\mu\text{m}$  L/S に達する微細パターンの転写に成功し、一躍注目されるようになった[3]。なお、当初は軟 X 線縮小投影露光 (Soft X-ray Projection Lithography; SXPL) と呼ばれていたが、縮小投影光学系を使わない X 線近接露光と区別するために、1993 年頃から EUV リソグラフィ (Extreme Ultraviolet Lithography; EUVL) と呼ばれるようになった。

SORTEC の放射光光源[4]を用いて、軟 X 線縮小投影露光の実験を実施した。投影系には、3-1 項で説明した拡大結像系で使用したものと同一光学設計の、倍率 1/32、NA0.2 のシュバルツシルド光学系を用いた。露光波長は 13 nm とし、この波長の EUV 光を反射するために、多層膜ミラーには Mo/Si 多層膜を採用した。ミラーの面形状精度は、凹面鏡の多層膜成膜前が 1.1 nm RMS、多層膜成膜後が 1.9 nm RMS、凸面鏡の多層膜成膜前が 0.9 nm RMS、多層膜成膜後が 0.8 nm RMS であった。凹面鏡は Mo/Si 多層膜の応力により成膜後の形状が劣化した。直径に対して厚さの大きな凸面鏡は、Mo/Si 多層膜を成膜しても殆ど変形しなかった。なお、ここでは 2-2 節で説明した応力を制御した Mo/Si 多層膜はまだ使用していない。干渉計を使って波面収差を測定しながら 2 枚のミラーの位置調整を行った。2 枚のミラーの間隔と傾斜を調整して、光軸周りに互いに回転させて収差が最小になる位置で鏡筒に固定して光学系を完成した。組み立て完成状態での波面収差は、He-Ne レーザーによる測定で 3.4 nm RMS であった。これは、使用する EUV 光の波長 (13 nm) の約 1/4 である。

SORTEC 放射光施設のビームライン D2 に実験装置を据付けた。図 3-2-1 に実験装置の模式図、図 3-2-2 に実験装置の写真を示す。放射光光源から出た発散角 0.1 mrad の光束は、まず厚さ 1 mm の Be フィルターを通して可視光や紫外光のような長波長成分と 11 nm 以下の波長の軟 X 線を除去した。次に、水平偏向ミラーで 8° だけ水平方向へ曲げて、波長の短い X 線を除去した。この水平偏向ミラーは曲率半径 40 m の緩い球面になっており、照明光学系を兼ねている。水平方向は、光源から発散した光をマスク上に集光するクリティカル照明になっている。垂直方向は、ほぼ平行な光線がマスクを照明する。放射光の発光点から水平偏向ミラーまでの距離は 11.5 m で、水平偏向ミラーからマスクまでの距離は 1.5 m である。水平偏向ミラーの後方には、厚さ 0.1 mm の SiN メンブレンの窓の付いたバルブを設け、これより上流側と下流側の真空を分離した。放射光蓄積リングと繋がっている上流側の真空度は  $10^{-7}$  Pa 以上の高真空に維持し、シュバルツシルド光学系やレジストを塗布したマスク等が入る下流側の真空度は  $10^{-6}$  Pa 台である。その後方にマスクを配置した。マスクは、厚さ 0.1 mm の SiN メンブレン上に厚さ 0.22  $\mu\text{m}$  の金のパターンを形成した透過型マスクを用いた。メンブレンの窓のサイズは 2 mm  $\times$  2 mm である。その後シュバルツシルド

光学系を配置した。レジストを塗布したウェハはシュバルツシルド光学系の鏡筒に固定して、マスクを光軸方向に動かして焦点合わせを行うようにした。光学系の縦倍率は横倍率の二乗なので、この場合は 1024 倍となる。マスクの位置を 0.1 mm 動かせば、ウェハを 0.1 mm 動かしたのと同程度の焦点調整ができる。ウェハ上での露光領域の大きさは、水平方向が約 30 mm、垂直方向が約 60 mm である。水平方向は光源のサイズ (2.5 mm) と水平偏向ミラーの縮小倍率で決まり、垂直方向はマスクのメンブレン窓のサイズ (2 mm) で制限されている。ウェハ上での EUV 光の照度は、約  $1 \text{ mW/cm}^2$  と見積もられた。

まず、マスク上で 10, 6, 4.5, 3, 2, 1 mm L/S のポジとネガのテストパターンを設けたマスクを用いて露光を行った。ウェハ上では 0.3, 0.2, 0.15, 0.1, 0.06, 0.03 mm L/S に相当する。レジストには厚さ 0.18 mm の PMMA (東京応化工業 OEBR-1000) を用いた。露光時間は約 1 分程度であった。図 3-2-3 に得られたレジストパターンの光学顕微鏡写真を示す。縦長の細長い領域が露光されており、これはマスク上の照明領域に対応する。この写真では、0.2 mm 程度のパターンまで解像しているのがわかる。図 3-2-4 にレジストパターンの走査電子顕微鏡写真を示す。一番寸法の大きな 0.3 mm L/S パターンは方向に依らず解像しているが、0.15 mm L/S, 0.1 mm L/S パターンには解像力の異方性が認められた。縦方向 (垂直方向; 図中で左下から右上の方向) のパターンは解像しているが、横方向 (水平方向) のパターンが解像していない。0.1 mm L/S よりも小さい寸法のパターンは、いずれの方向でも解像していない。

次に、更に解像力を評価するために、メンブレンの窓サイズが  $0.7 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$  で、その領域全面に単一の寸法の L/S パターンを形成した透過マスクを使って露光を行った。パターンの方向は、解像性に優れた縦方向の L/S パターンを用いた。厚さ 0.18 mm の PMMA を用いて露光を行い、露光条件や現像条件を最適化したところ、図 3-2-5 に示すような 0.05 mm L/S パターンを解像することが出来た。0.05 mm L/S の解像力は既に AT&T ベル研のグループによって実証されていたが[3]、当時 (1990 年台初頭) の最先端の露光装置は、光源が高圧水銀ランプの i 線 (波長 365nm) から KrF エキシマレーザー (波長 248nm) に代わる頃で、その解像力は漸く 0.5 mm L/S を切る程度だったので、この実験結果は EUV リソグラフィの高い潜在能力を実感させるものであった。

一連の実験における解像力の異方性の原因は、水平方向と垂直方向の照明条件の違いにある。これを説明するために、図 3-2-6 に瞳面上での照明光の様子を示す。瞳面には、NA の半分の大きさの中心遮蔽がある。照明光は、マスク上では水平方向に集光され垂直方向はほぼ平行なので、瞳面上では水平方向に広がった扁平な形状を示す。マスクを透過して真直ぐに進んだ 0 次光が瞳の中心遮蔽で遮られるのを防ぐために、シュバルツシルド光学系は照明光に対して上下方向に少し傾けてある。水平方向の L/S パターンは瞳面の上下方向に回折光を形成するが、空間周波数が  $0.25 \text{ NA}/\lambda$  以上のパターンによる回折光は瞳からはみ出してしまわないので解像しない。これは 0.13 mm L/S に相当する。一方、垂直方向の L/S パターンは瞳面の左右方向に回折光を形成するが、空間周波数  $0.66 \text{ NA}/\lambda$  まで結像に寄与するこ

とができる。これは、0.05 mm L/S に相当する。以上の考察から、これまでの露光実験結果は妥当なものと理解される。

### 3-2-2 透過型マスクを用いた波長 4.5 nm での露光実験

露光波長によるリソグラフィ性能の違いを調べるために、3-1 項で説明した波長 4.5nm 用のシュバルツシルド光学系を用いて縮小投影露光の実験を行った。図 3-2-7 に実験装置の模式図を示す。Be フィルターの代わりに厚さ 2.2 mm の C フィルターを用いた。この C フィルターで、可視光や紫外光のような長波長成分と 4.4 nm 以下の波長の軟 X 線を除去した。その他の装置構成は 3-2-1 項の実験と同じである。透過型マスクも、波長 13 nm の実験と同一のものを用いた。Mo/Si 多層膜ミラーを用いた波長 13 nm 用のシュバルツシルド光学系は 40 % 程度の透過率を持つが、NiCr/C 多層膜ミラーを用いた波長 4.5 nm のシュバルツシルド光学系の透過率は 0.1 % 程度しかない。そこで、PMMA (東京応化工業 OEBR-1000) の他に、より感度の高いネガ型の化学増幅型レジストである AZ-PN 100 (Hoechst) も用いて露光実験を行った。

図 3-2-8 に厚さ 0.3 nm の AZ-PN 100 を用いた露光結果を示す。露光時間は 20 分であった。0.3, 0.2, 0.15 mm L/S パターンが解像している。0.1 mm L/S パターンは、縦方向のものだけ解像している。波長 13 nm の露光よりも短波長化した分だけ解像力が向上する筈だったが、実際の露光結果では解像力は向上しなかった。この光学系の波面収差は約 4.2 nm RMS あり、露光波長の 4.5 nm と同程度であるので、回折限界の結像を行うにはまだ波面収差が大き過ぎるためである。また、波長 13 nm の場合よりも露光時間が一桁以上長くなっているために、露光中の振動の影響も受け易くなっている。

波長 13 nm では材料の吸収のためにレジストの厚さは 0.2 nm 程度が上限であった。波長 4.5 nm ではレジスト材料の吸収が小さくなるので、厚いレジストの加工が可能になる。そこで、厚さ 0.9 nm のレジストの露光を試みた。図 3-2-9 (a) は、厚さ 0.9 nm の AZ-PN 100 レジストに 0.3 mm L/S パターンを露光した結果である。厚いレジストが明瞭に解像されているが、パターンのエッジには粗さが認められた。図 3-2-9 (b) は、厚さ 0.9 nm の PMMA レジストに 0.3 mm L/S パターンを露光した結果である。露光時間は約 2 時間を要した。PMMA の場合は滑らかなエッジのパターンが得られた。

以上のように、露光波長を 13 nm から 4.5 nm に短波長化すると、レジストの厚さを 0.2 nm から 0.9 nm に厚くすることが可能であること、短波長化による解像力向上を実現するためには、光学系の波面収差の更なる向上が必要であることが分かった。

### 3-2-3 反射型マスクを用いた波長 13 nm での露光実験

以上の露光実験には透過型のマスクを用いたが、厚さ 0.1 mm 程度の薄いメンブレンを用いる透過型マスクは大面積化が困難であり、EUV 光照射による熱変形の影響を受けやすい。露光領域を 20 ~ 30 mm 角までに拡大するためには、反射型のマスクが必要である。反射型

マスクは、厚い強固な基板を用いることができるので大面積化が可能であり、裏面から冷却することにより熱変形を抑制することができる。反射型マスクには三種類のタイプが提案されていた[5]。多層膜ミラーの上に吸収体のパターンを形成したもの、多層膜ミラー自体をパターンングしたもの、イオン注入等により多層膜ミラーの構造を局部的に破壊したものである。無欠陥のマスクを作製するためにはパターンの修正が不可欠であるが、上記の三種類のタイプの内、後の二つのタイプは非反射部を反射部に修正することが困難である。そこで、多層膜ミラーの上に吸収体をパターンングしたタイプが実用的であると考えられた。既に、ドライエッチングを用いた吸収体のパターンングが報告されていた[5-7]。しかし、ドライエッチングは多層膜ミラーへのダメージが懸念された。ここでは、多層膜ミラーへのダメージが無く、簡便な方法で反射型マスクを作製できる方法として、メッキにより吸収体を形成する方法を開発した。

まず、吸収体に適した材料の検討を行った。X線の吸収体には Au, W, Ta などの重金属が一般に用いられている。また、グレインサイズが小さく微細加工性に優れた Ge なども用いられている[5, 6]。波長 13 nm で最適な吸収体材料を探索した。図 3-2-10 に、種々の金属の波長 13 nm の軟 X 線の透過率を示す。Au や W よりも Ag もしくは Ni の方が、透過率が低い。透過率が低い方が、吸収体の厚さが薄くて済むために、微細加工精度の点で有利である。例えば、厚さ 0.1 nm の Ni を用いると、マスクコントラストは 400 が得られる。

Ni は、“水の窓”の波長域 (2.3 ~ 4.4 nm) の X 線顕微鏡に用いられる位相ゾーンプレートに適した材料として知られている。このような位相ゾーンプレートを作製するために、メッキ法により 0.1 nm 以下の微細パターンを形成する技術が確立されていた[8]。そこで、この技術を応用してメッキ法により Ni 吸収体を形成して反射型マスクを作製することにした。

まず、Mo/Si 多層膜上に Ni 薄膜をメッキできるかどうかを確かめた。Si ウェハ上にイオンビームスパッタリングで周期長 6.7 nm、積層数 50 の Mo/Si 多層膜を形成したものを試料とした。このとき、最上層を Si としたものと Mo としたものの 2 種類を用意した。この上に、電界メッキ法で Ni 薄膜を形成した。メッキ液には pH4 のスルファミン酸ニッケル水溶液を用いた。メッキ液の組成を表 3-2-1 に示す。添加物の硼酸は pH を一定に保つための緩衝剤であり、ラウリル硫酸ナトリウムは界面活性剤で、基板表面を親水性にして気泡が付着するのを防ぐ役割を果たす。陽極には Pt 電極を用い、試料を陰極として電流密度 2 mA/cm<sup>2</sup> で 3 分間メッキを行った。このときメッキ液の温度は 50 °C に保った。図 3-2-11 に得られたメッキ膜の SEM 像を示す。最上層を Si 層とした試料では、Ni が 3 ~ 10 nm 程度の粒子状に析出しており、均一な薄膜にならない (図 3-2-11 (a))。これは、Si 層表面では導電性が不足しているためにメッキ膜は析出しないが、Si 層が薄い (4nm) ために局部的にリーク電流が流れて、そこへ集中的にメッキが析出したものと考えられる。一方、最上層を Mo 層とした試料では、均一な Ni 薄膜が形成された (図 3-2-11 (b))。このとき、Ni メッキ膜の析出速度は 100 nm/min であった。以上の結果から、Mo/Si 多層膜の最上層を Mo 層とし、この約 3 nm の厚さの Mo 層を電極層として用いることによって Ni 薄膜を電界メッキできることが分か

った。

次に、メッキ液に浸漬することによる Mo/Si 多層膜のダメージを調べた。Si ウェハ上に周期長 6.7 nm の Mo/Si 多層膜をイオンビームスパッタリングにより形成し、50 、pH4 のスルフォミン酸ニッケル水溶液に 90 分間浸漬した。この時間は、実際に Ni メッキ膜を形成するときの浸漬時間の 10 倍以上である。浸漬前後の Cu Ka 線 (波長 0.154 nm) による反射率を図 3-2-12 に示す。4 次のピークまで強度に変化は見られないことから、多層膜の構造に変化は生じていないことが分かる。図 3-2-13 は、浸漬の有無による軟 X 線反射率の違いを示す。測定は高エネルギー加速器研究機構フotonファクトリーの BL-11A で行った。ピーク位置と強度に若干の差があるが、これは多層膜の製造誤差であり、メッキ液に浸漬した Mo/Si 多層膜について反射率の低下は特に認められない。以上の結果より、Ni メッキ液に浸漬しても Mo/Si 多層膜はダメージを受けないことが確かめられた。

次に、電界メッキ法を用いた反射型マスクの製作を試みた。図 3-2-14 に製作工程を示す。Si ウェハを基板とし、この上にイオンビームスパッタリングで周期長 6.7 nm、積層数 50 の Mo/Si 多層膜を形成した。このとき、最上層は Mo 層とした。この上にレジストを塗布し、露光現像してレジストパターンを形成した。露光には g 線 (波長 436 nm) ステッパーと電子ビーム描画を用いた。レジストは、g 線ステッパーでは厚さ 0.8  $\mu\text{m}$  のポジ型ノボラック系レジスト (東京応化工業 OFPR-8800) を用い、電子ビーム描画には厚さ 0.3  $\mu\text{m}$  の PMMA (東京応化工業 OEPR-1000) を用いた。次に、多層膜の最上層の Mo 層を陰極とし、Pt 製の陽極を用いて 50 、pH4 のスルフォミン酸ニッケル水溶液中で、電流密度 3 分ないしは 6 分間メッキを行い、厚さ 0.1  $\mu\text{m}$  ないしは 0.2  $\mu\text{m}$  の Ni 層を形成した。Ni 層は多層膜の露出した部分にだけ析出し、レジスト上には析出しない。その後、酸素による RIE でレジストを剥離した。酸素のガス圧は 25 Pa、rf パワーは 50 W とし、このとき自己バイアスは 40 V であった。自己バイアスが 100 V 以下の酸素の RIE では Mo/Si 多層膜にダメージは入らないことが報告されている[5]。

当初は Mo/Si 多層膜の最上層の Mo 層を電極層に用いていたが、多層膜の成膜とメッキの間に数日間の時間を空けると、メッキ層析出の歩留りが劣化する現象が生じた。これは大気中で保管されていた Mo 層の表面に酸化膜が形成されて、表面の導通が悪くなるためと考えられた。そこで、Mo/Si 多層膜の最上層だけを Mo よりも酸化しにくい Ru に変更した。この変更により、その後は 100 % の歩留りでメッキ層を形成できるようになった。

図 3-2-15 に作製した反射型マスクの SEM 像を示す。図 3-2-15 (a) は、g 線ステッパーでレジストパターンを形成したもので、厚さ 0.1  $\mu\text{m}$  の 3  $\mu\text{m}$  L/S パターンが形成されている。露光実験には、このマスクを用いた。図 3-2-15 (b) は、電子ビーム描画でレジストパターンを形成したもので、厚さ 0.2  $\mu\text{m}$  の 1  $\mu\text{m}$  L/S パターンが形成されている。いずれも多層膜の露出した部分に残渣等の異物や欠陥は認められず、良好な吸収体パターンが形成されている。

作製した反射型マスクを用いて軟 X 線縮小投影露光の実験を行った。SORTEC の放射光

ビームライン BL-D2 を用い、波長 13 nm で露光した。図 3-2-16 に実験配置図を示す。3-2-1 項で説明したものと基本的には同じだが、反射型マスクを使うための改造が施されている。本装置では、ウェハはシュバルツシルド光学系に固定して、マスクを光軸に沿って前後に動かして焦点合わせを行うようになっている。反射型マスクは光軸に対して斜めに配置されるので、マスクを前後に動かすとマスクで反射した後の光軸が平行に移動してしまう。これを防ぐために、折り返しミラーを設けて反射型マスクと一体で動かす仕組みにした。反射型マスクと折り返しミラーへの入射角は  $2^\circ$  とした。

図 3-2-17 に 3 mm L/S の吸収体パターンを形成した反射型マスクを用いて得られたレジストパターンを示す。レジストは、厚さ 0.18  $\mu\text{m}$  の PMMA (東京応化工業 ORBR-1000) を用いた。ややオーバードーズのため線幅が若干細くなっているが、0.1  $\mu\text{m}$  L/S パターンが明瞭に解像されている。以上の結果から、電界メッキ法で作製した反射型マスクが軟 X 線縮小投影露光に有効であることが確認された。

## 本節に関連する主論文

- | H. Oizumi, Y. Maejima, T. Watanabe, T. Taguchi, Y. Yamashita, N. Atoda, **K. Murakami**, M. Ohtani and H. Nagata, “Sub-0.1 $\mu$ m resist patterning in soft X-ray (13nm) projection lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **32**, 5914, (1993).
- | H. Nagata, M. Ohtani, **K. Murakami**, T. Oshino, H. Oizumi, Y. Maejima, T. Watanabe, T. Taguchi, Y. Yamashita and N. Atoda, “Fabrication of 0.1 $\mu$ m line-and-space patterns using soft X-ray reduction lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 360, (1994).
- | H. Nagata, M. Ohtani, **K. Murakami**, H. Oizumi, Y. Yamashita and N. Atoda, “Reduction imaging at 4.5nm with Schwarzschild optics”, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, L1192, (1994).
- | H. Oizumi, M. Ohtani, Y. Yamashita, **K. Murakami**, H. Nagata and N. Atoda, “Resist performance in 5nm soft X-ray projection lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 6919, (1994).
- | **K. Murakami**, S. Shimizu, M. Ohtani, H. Nagata, H. Oizumi, Y. Yamashita and N. Atoda, “Electroplated reflection masks for soft x-ray projection lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **34**, 6696, (1995).

## 参考文献

- [1] H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii and Y. Torii, J. Vac. Sci. Technol., **B7**, 1648, (1989).
- [2] H. Kinoshita, K. Kurihara and H. Takenaka, Jpn. J. Appl. Phys., **30**, 3048, (1991).
- [3] J. E. Bjorkholm, J. Bokor, L. Eichner, R. R. Freeman, J. Gregus, T. E. Jewell, W. M. Mansfield, A. A. MacDowell, E. L. Raab, W. T. Silfvast, L. H. Szeto, D. M. Tennant, W. K. Waskiewicz, D. L. White, D. L. Windt and O. R. Wood II, J. Vac. Sci. Technol., **B8**, 1509, (1990).
- [4] M. Kodaira, N. Awaji, T. Kishimoto, H. Usami and M. Watanabe, Jpn. J. Appl. Phys., **30**, 3043, (1991).
- [5] D. M. Tennant, J. E. Bjorkholm, R. M. D’Souza, L. Eichner, R. R. Freeman, J. Z. Pastalan, L. H. Szeto, O. R. Wood II, T. E. Jewell, W. M. Mansfield, W. K. Waskiewicz, D. L. White, D. L. Windt and W. M. MacDowell, J. Vac. Sci. Technol., **B9**, 3176, (1991).
- [6] D. M. Tennant, L. A. Fetter, L. R. Harriott, A. A. MacDowell, P. P. Mulgrew, J. Z. Pastalan, W. K. Waskiewicz, D. L. Windt and O. R. Wood II, Appl. Opt., **32**, 7007, (1993).
- [7] A. M. Hawryluk and D. Stewart, Appl. Opt., **32**, 7012, (1993).
- [8] N. Katakura, W. Wakana and H. Nagata, Ext. Abstr. 55<sup>th</sup> Autumn Meet. The Japanes Society of Applied Physics, Nagoya, September (1994) 21a-ZN4.

表 3-2-1 反射型マスク作製のメッキ液の組成

物質名	化学式	濃度
スルファミン酸ニッケル	$\text{Ni}(\text{NH}_2\text{SO}_3)_2/4\text{H}_2\text{O}$	450 g/l
硼酸	$\text{H}_3\text{BO}_3$	30 g/l
ラウリル硫酸ナトリウム	$\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$	0.5 g/l

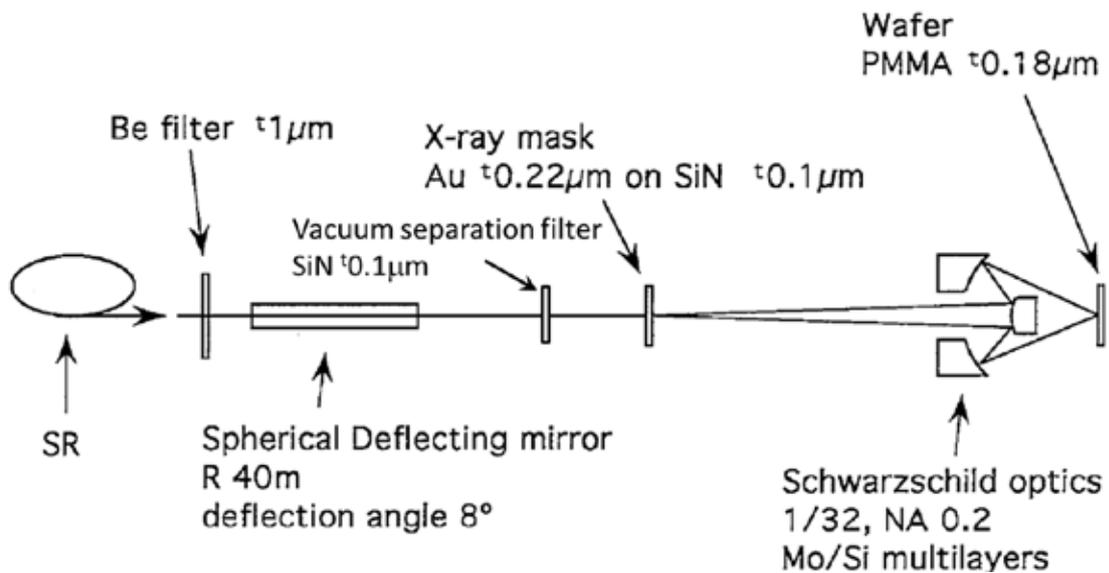


図 3-2-1 SORTEC における軟 X 線縮小投影露光実験装置の模式図  
 (露光波長 13nm、透過型マスク)

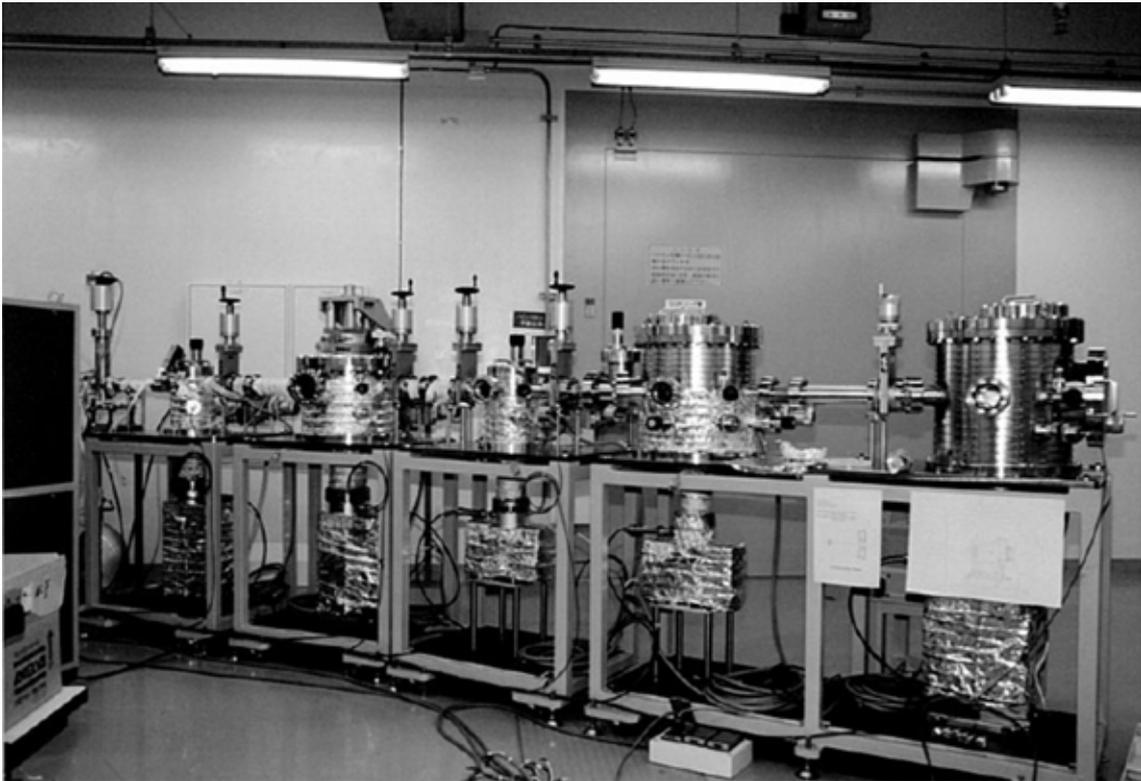


図 3-2-2 SORTEC における軟 X 線縮小投影露光実験装置

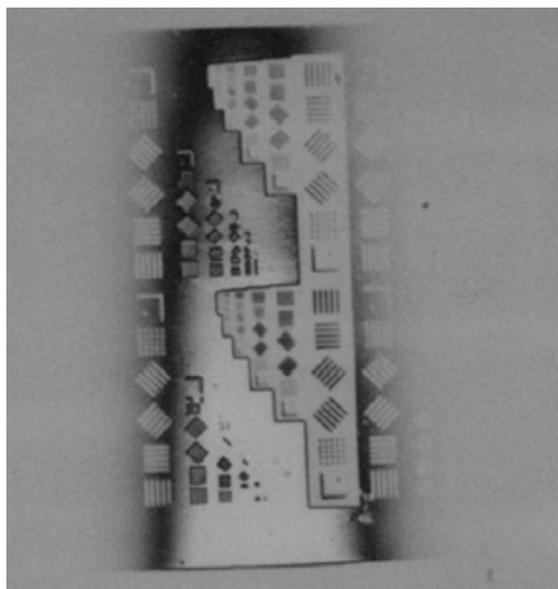


図 3-2-3 露光波長 13 nm、透過型マスクによる露光結果の光学顕微鏡写真  
レジスト：PMMA, 厚さ 0.18 nm

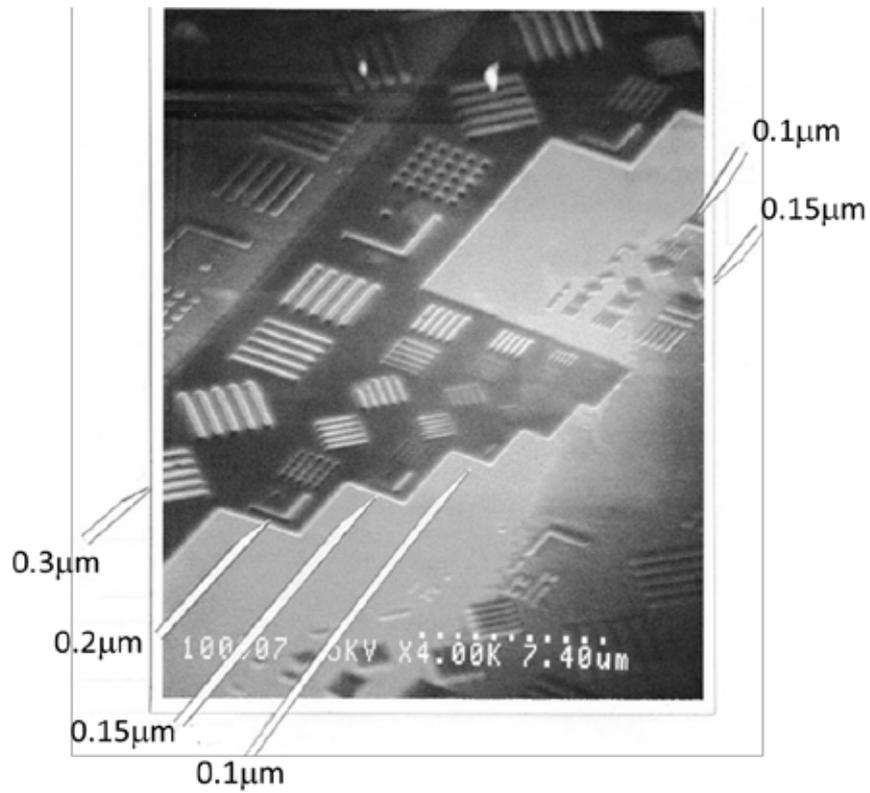


図 3-2-4 露光波長 13 nm、透過型マスクによる露光結果の走査型電子顕微鏡写真  
レジスト：PMMA, 厚さ 0.18 μm

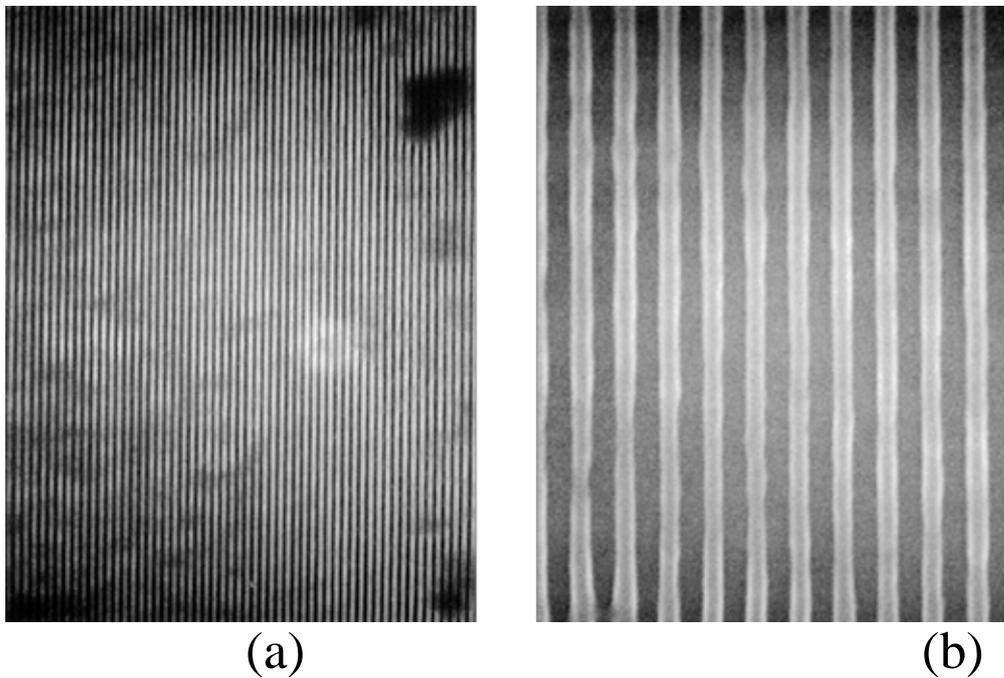


図 3-2-5 露光波長 13 nm、透過型マスクによる 0.05 μm L/S の露光結果  
レジスト：PMMA, 厚さ 0.18 μm (a) 広範囲像、(b) 拡大像

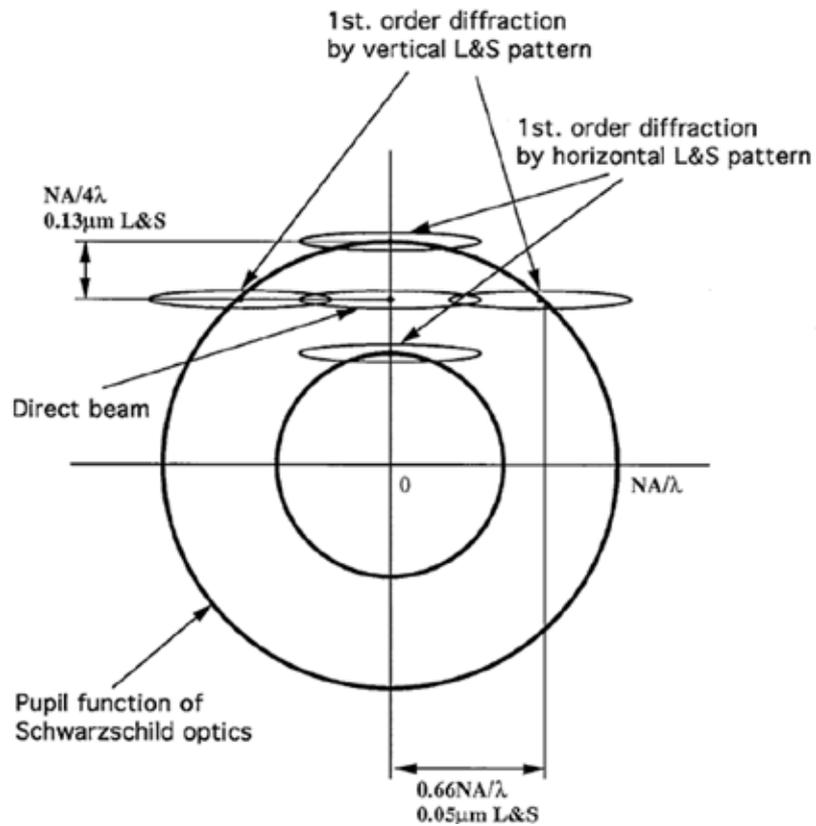


図 3-2-6 シュバルツシルド光学系の瞳面上での照明光の分布

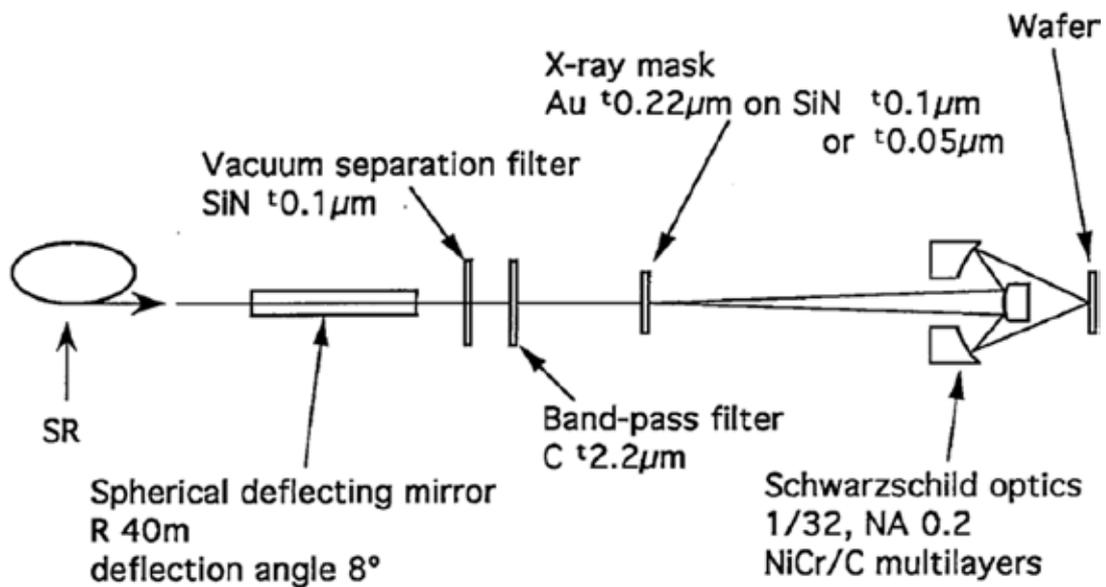


図 3-2-7 SORTEC における軟 X 線縮小投影露光実験装置の模式図  
(露光波長 4.5 nm、透過型マスク)

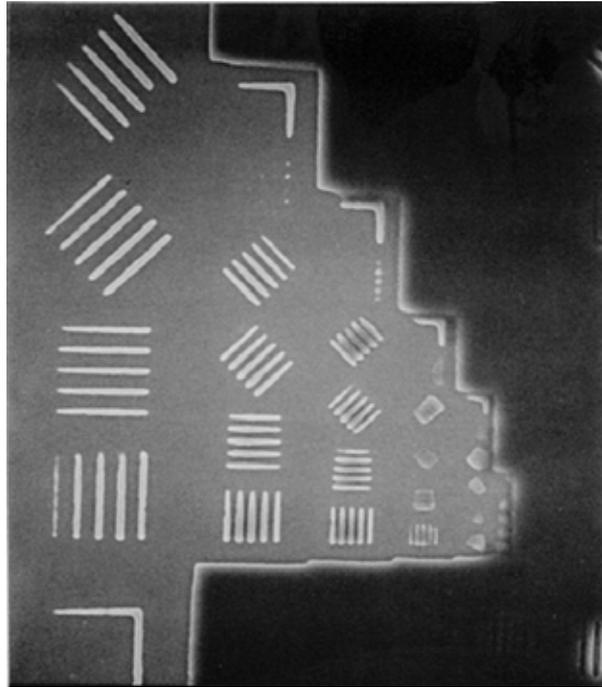
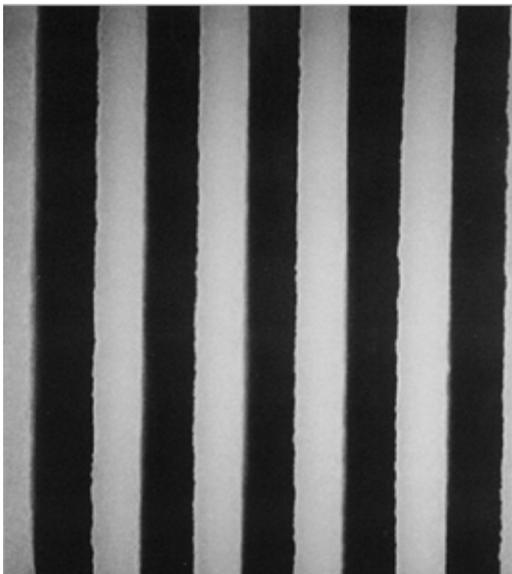
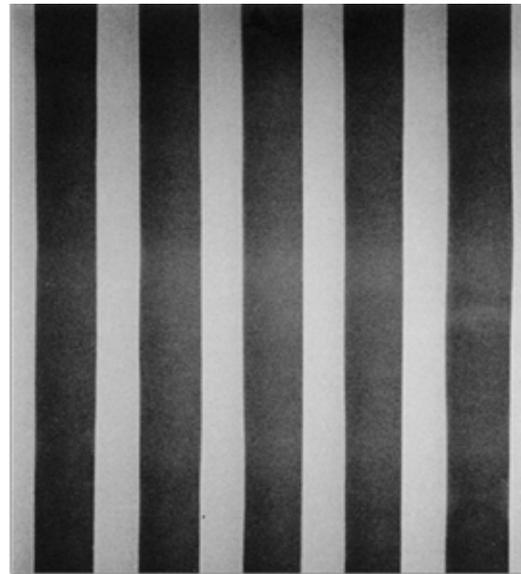


図 3-2-8 露光波長 4.5 nm、透過型マスクによる露光結果  
レジスト：AZ-PN 100, 厚さ 0.3 nm



(a)



(b)

図 3-2-9 露光波長 4.5 nm、透過型マスクによる 0.3nm L/S の露光結果  
(a) AZ-PN 100, 厚さ 0.9 nm, (b) PMMA, 厚さ 0.9 nm

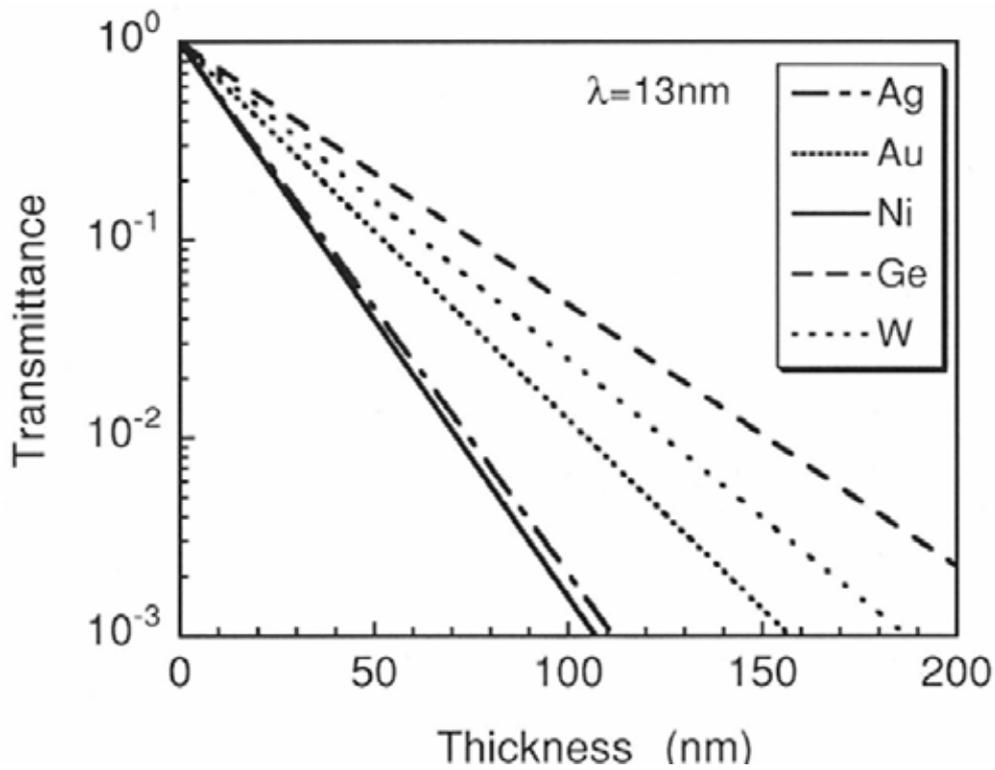
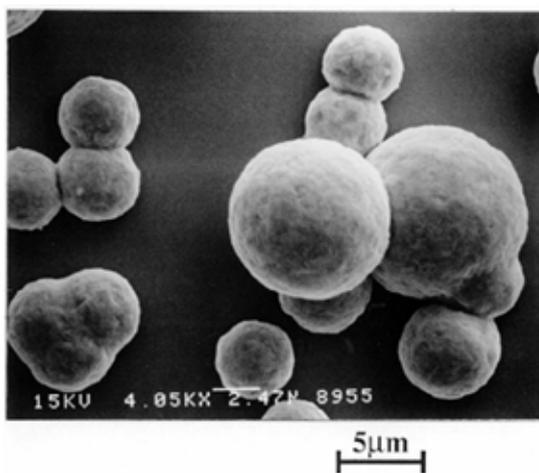
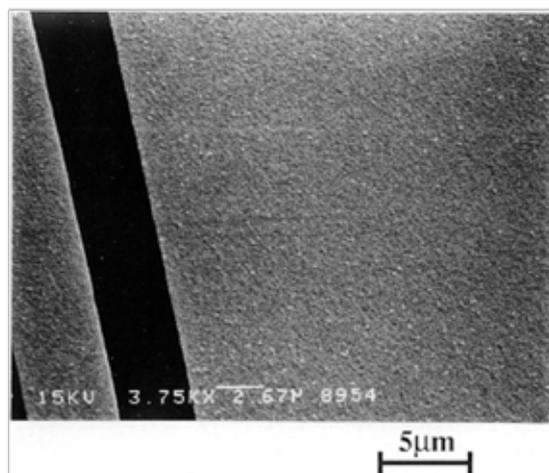


図 3-2-10 金属の軟 X 線 (波長 13 nm) 透過率



(a)



(b)

図 3-2-11 電界メッキ法により Mo/Si 多層膜上に析出した Ni 薄膜

(a) 最上層 Si, (b) 最上層 Mo

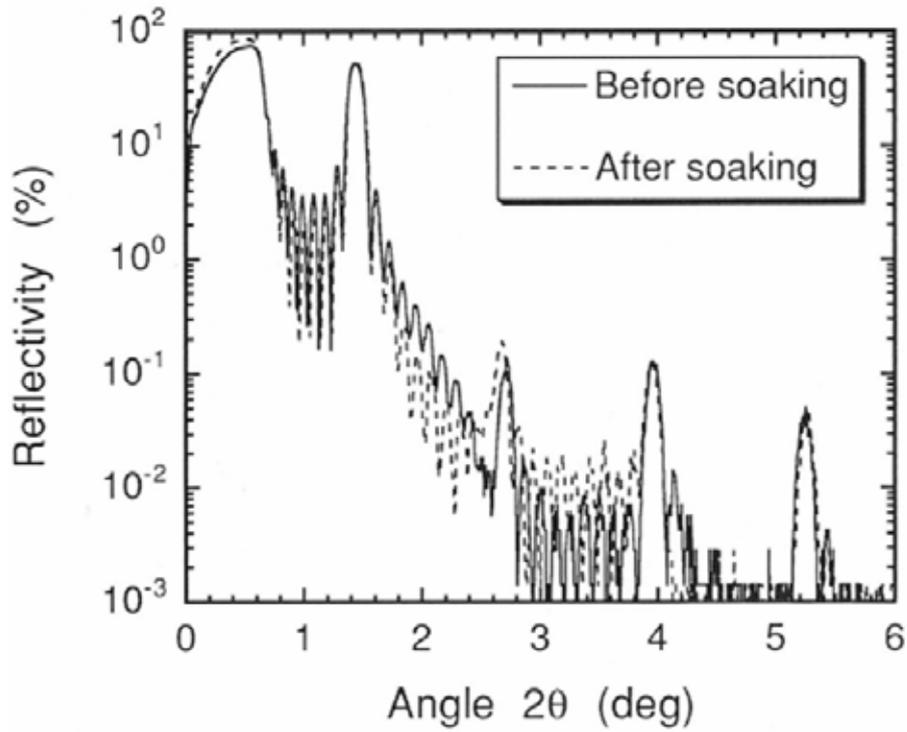


図 3-2-12 メッキ液に浸漬前後の Mo/Si 多層膜の Cu Ka 線 (波長 0.154 nm) 反射率

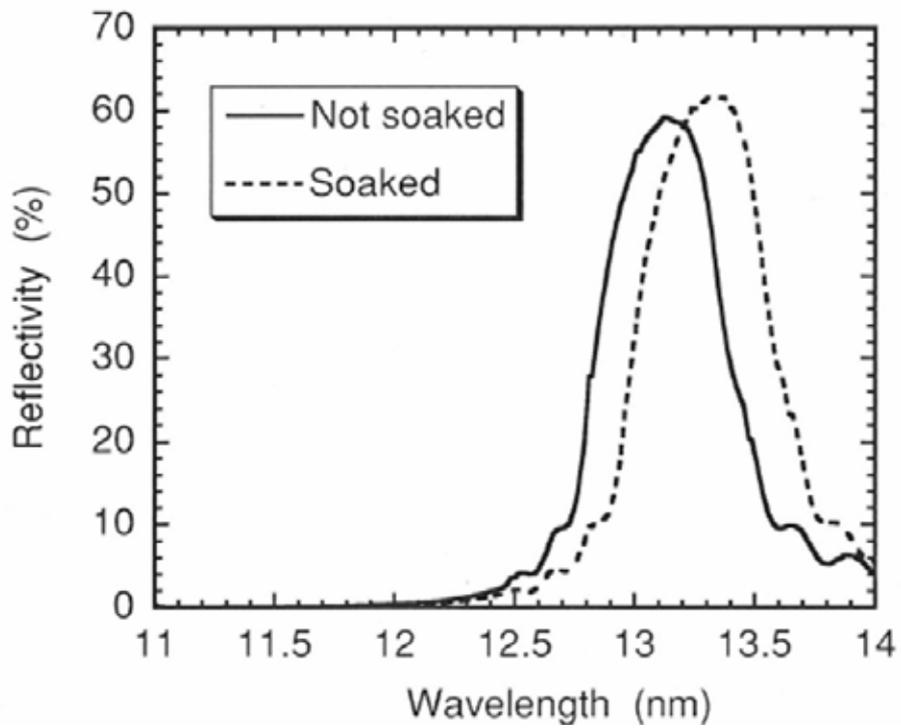


図 3-2-13 メッキ液への浸漬の有無による Mo/Si 多層膜の軟 X 線反射率の違い

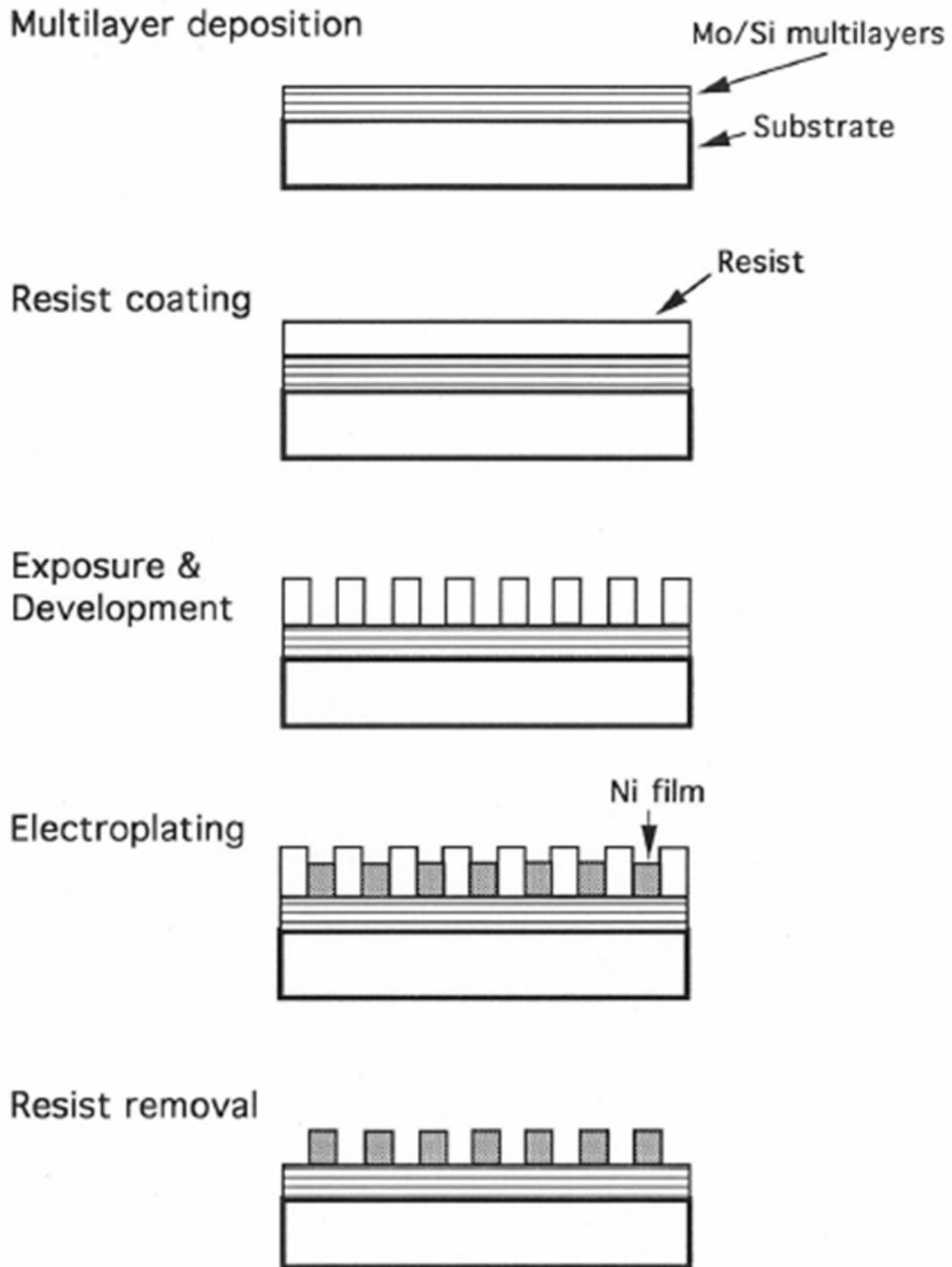


図 3-2-14 電界メッキ法による反射型マスクの製作工程

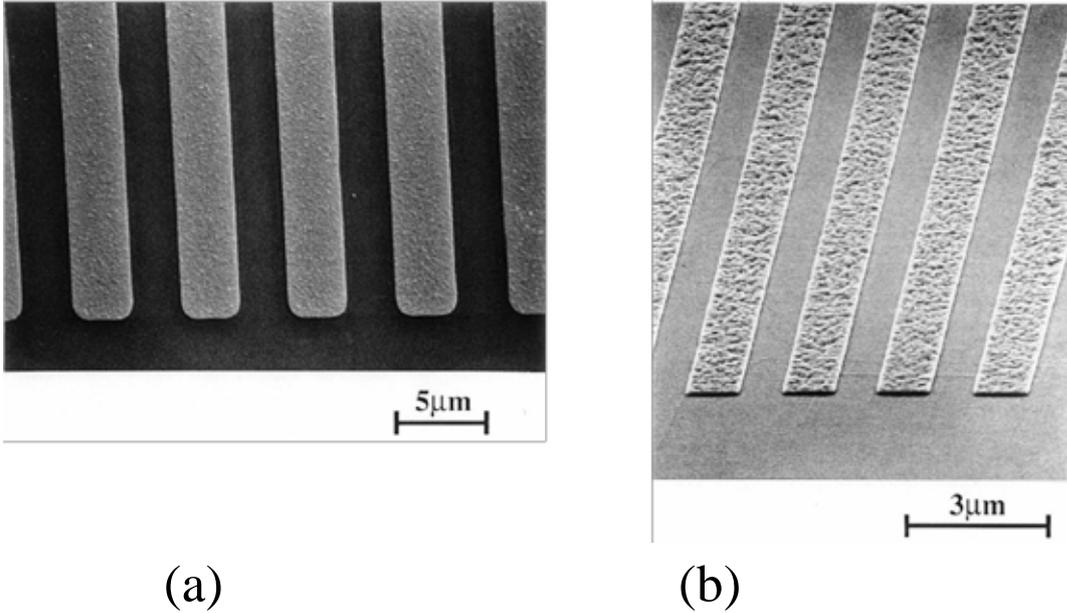


図 3-2-15 作製した反射型マスクの外観写真：  
 Mo 最上層の Mo/Si 多層膜上の Ni 吸収体パターン  
 (a) 3 mm L/S, g 線露光, (b) 1 mm L/S, 電子ビーム露光

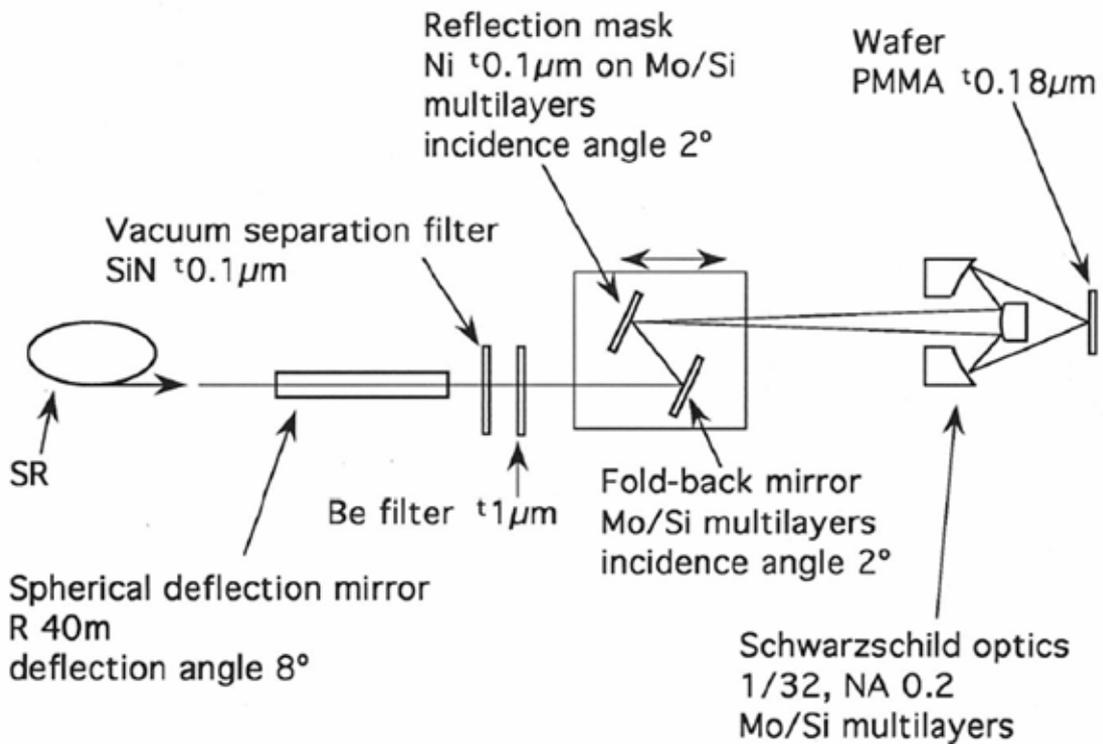
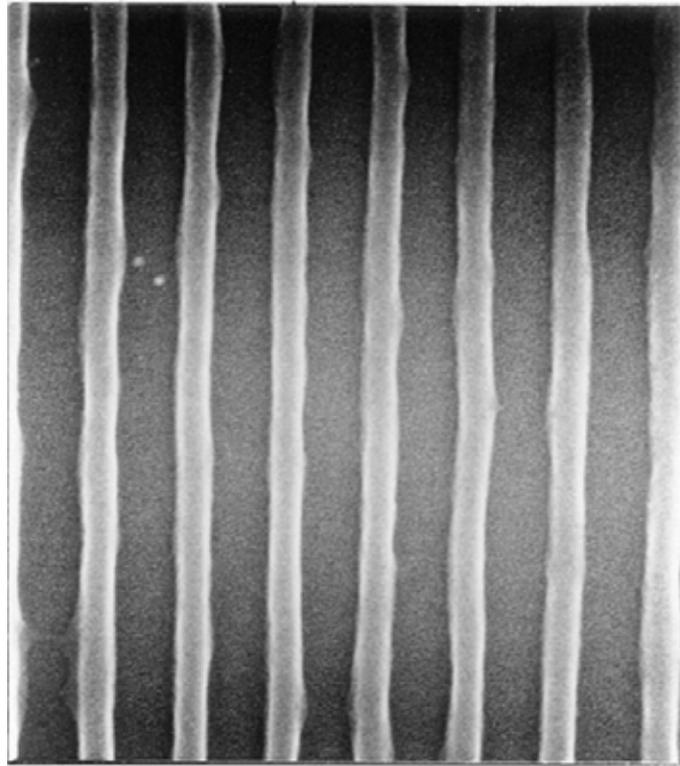


図 3-2-16 SORTEC における軟 X 線縮小投影露光実験装置の模式図  
 (露光波長 13 nm、反射型マスク)



0.5 $\mu$ m

図 3-2-17 反射型マスクを用いた軟 X 線縮小投影露光により得られたレジストパターン  
PMMA, 厚さ 0.18  $\mu$ m, 0.1  $\mu$ m L/S

### 3-3 非球面 3 枚系による縮小投影露光系

前節では、シュバルツシルド光学系を使って 50 nm までの高い解像力が得られたが、ウェハ上での露光領域の大きさは 30 mm×60 mm と、非常に小さい領域に過ぎなかった。半導体露光装置では 20 mm×20 mm 以上の大きな範囲にパターンを露光しなければならない。Mo/Si 多層膜ミラーの反射率は理論限界が 70 % 程度であり、100 % に近い反射率を得ることは出来ない。そのため、極力少ないミラー枚数で光学系を構成する必要がある。収差を補正するために非球面を導入するが、それでも広い範囲を一括して露光する投影系を設計することは困難なので、ある特定の像高だけで収差が補正されたリングフィールド状の露光領域を有する投影系を用いて、これをスキャンして広い範囲を露光する方法が提案されていた[2-4]。そのようなリングフィールド光学系として、3 枚の非球面ミラーからなる投影系を搭載した露光実験装置を試作した。なお、本研究は兵庫県立大学( 当時は姫路工業大学 )、日立製作所とニコンの共同研究として行われた[1]。

光源には兵庫県立大学のニュースバル放射光を用いた。本光源は、周長 119 m、蓄積電子エネルギー 1.5 GeV、蓄積電流 500 mA の中型リングである。実験用のビームラインは、このリングのベンディングマグネットに設けられ、 $10^{11}$  photons/sec/mrad<sup>2</sup>/mA/1%BW のフォトン数が得られる。これを水平方向 40 mrad、垂直方向 3.8 mrad の立体角で 13 nm の光を 2 % バンド幅で集光すると、約 0.27 W のエネルギーの EUV 光を取り出すことができる。この数値は、実用レベルのスループットを得るためには 2 桁以上低いが、レジストプロセスやマスクの開発には充分使用することができる。

図 3-3-1 に EUVL ビームライン全体の模式図を示す。ニュースバル放射光のベンディングマグネットから出た光を 2 枚の斜入射ミラー M1, M2 で集光して平行光にする。その後に SiN メンブレンを入れたフィルターチャンパーがあり、その後に照明系のチャンパーがある。照明系は 2 枚の斜入射トロイダルミラーを用いたシンプルな構成になっている。1 枚目のミラーは凸面で平行光を発散させ、2 枚目の凹面鏡で集光する。主光線は投影光学系の入射瞳面の中心へ集光され、その途中のマスク上ではリングフィールド形状の領域を照明する。ビームラインの一番後ろには露光チャンパーがあり、この中に投影光学系とマスクステージ、ウェハステージが設置されている。露光チャンパーは、 $23 \pm 1$  °、クラス 1000 の恒温クリーンチャンパーの中に設置されている。

表 3-3-1 に EUVL 実験用露光装置の仕様を示す。投影系の開口数は 0.1、倍率は 1/5 で、分解能は 0.1 nm、焦点深度は 1.9 mm である。露光領域はウェハ上で 30 mm×1 mm のリングフィールドである。マスクの寸法は 6 インチ、ウェハの寸法はデバイス試作を考慮して 8 インチであり、それぞれ真空中のスキャンステージを備えている。

投影系は、焦点位置が変動しても露光されたパターンの位置が変動しないように、ウェハ側は主光線が垂直に入射するテレセントリックな配置にした。反射型のマスクを使用するために、マスク側は非テレセントリックな配置とした。倍率は 1/5 である。像のコントラストを表す MTF は、70 % 以上得られるようにした。光学系に distortion が残っているとスキ

ヤンしたときに像が移動してぼけの原因となるので、distortion は 10 nm 以内に抑えた。また、露光波長は Mo/Si 多層膜ミラーを使用できる 13 nm とした。

図 3-3-2 に、以上の設計思想に基づいて設計された投影光学系の図を示す。3 枚の非球面からなるリングフィールド光学系である。光学系全体は光軸に対して回転対称の形状をしており、特定の像高の近傍でのみ収差が補正されている。少ないミラー枚数で収差を補正するために非球面の導入が必至であり、3 枚とも高次非球面が採用されている。光線を蹴らないようにするために、光線を通すための穴や切りかきが設けられている。ミラーの材質には、低熱膨張ガラスである Zerodur-M を採用した。

図 3-3-3 にこの投影光学系の MTF を示す。図 3-3-3 (a) は空間周波数に対するプロットで、図 3-3-3 (b) は 100 nm パターンのデフォーカスに対するプロットである。100 nm L&S は空間周波数で 5000 本/mm に相当する。図 3-3-3 (a) に示すように、このとき MTF は 70 % 以上が得られる。MTF 45 % 以上を解像限界と仮定すると、解像限界の空間周波数は 8000 本/mm になり、これは 60 nm L&S に相当する。図 3-3-3 (b) にはメリジオナル方向とサジタル方向の MTF が示されている。メリジオナル方向は光軸を含む面内で、サジタル方向はそれに垂直な面内である。二つのカーブが殆ど重なっているということは、非点収差が充分補正されていることを示す。この図から、100 nm L&S パターンに対して 1.9 mm の焦点深度が得られることがわかる。

EUV 露光装置用のミラーは非常に高い形状精度が要求される。回折限界の光学系に許容される波面収差の目安として、Marechal による基準がある[5]。Strehl 強度(無収差光学系と収差のある光学系の点像強度の比) 0.8 以上を得るためには、光学系の波面収差を使用波長の 1/14 以下にしなければならないというものである。波長 13 nm で使用する EUVL 光学系では、少なくとも 1 nm 程度以下の波面収差に抑える必要がある。そのためには、ミラーの自重変形や多層膜の応力による変形を無視することは出来ない。そこで、有限要素法によりミラーの自重変形と多層膜の応力による変形を調べた。各ミラーは、側面を 3 点または 2 点で抑えることにより保持されている。

図 3-3-4 は投影系の M3 ミラーを 2 点で支持したときの Z 方向(光軸方向)の変位を示す。左右対称なので、図は右半分しか示していない。色の付いた領域が反射面として使用する領域である。この結果から、変形は支持点の近傍に集中していることがわかる。変位量の差の最大値はおよそ 0.5 nm である。

有限要素法では、多層膜の内部応力を直接境界条件として与えることが出来ない。そこで、多層膜に仮想的な熱膨張係数を設定し、熱膨張により発生する応力が多層膜の内部応力と等しくなるような温度に昇温したときの変形を計算した。図 3-3-5 は投影光学系の M2 ミラーと M3 ミラーについて計算した例である。多層膜の応力による変形は主として曲率半径の変化を生じさせること、ミラーに設けられた穴や切りかきによる非対称な変形は比較的小さいことがわかる。

表 3-3-2 に、光線追跡で得られた MTF 45 % 以上を得るために必要な投影光学系の組立調

整の許容誤差を示す。X は水平方向、Y は垂直方向、Z は光軸方向を示し、a, bはそれぞれ X, Y 軸周りの回転を表す。M1 は比較的緩く、M2 と M3 が厳しくなっている。

図 3-3-6 に投影光学系の鏡筒の図を示す。最も位置精度の厳しい M3 を筒状の鏡筒に固定し、M3 に対して M1、M2 の姿勢を調整できるようにした。各ミラーは、ジンバル構造と変位を縮小するためのテーパブロックを用いた差動マイクロメーターを備えている。

表 3-3-3 に投影光学系の微調機構のストロークと分解能を示す。M1 の X, Y 方向は許容誤差が大きいので省略し、これらを除いた 3 軸の調整機構を備える。M2 は 5 軸全ての調整機構を備える。各調整機構の分解能は、表 3-3-2 に示した許容誤差内に投影光学系を調整するのに十分である。

図 3-3-7 に露光チャンバーの図を、図 3-3-8 にその写真を示す。投影光学系鏡筒の右側にマスクステージとウェハステージがある。マスクには、多層膜の表面に吸収体のパターンを形成した反射マスクを用いる。マスクとウェハは真空中のメカニカルステージに保持されて、上下方向にスキャン動作ができる。ウェハはロードロック室から導入するようになっている。投影系鏡筒とステージ系は真空チャンバーとは独立した除振台に乗っており、排気系や真空チャンバーからの振動から分離されている。

表 3-3-4 にマスクステージとウェハステージの仕様を示す。マスクステージはクロスローラーガイドと真空用ステッピングモーターを用いたメカニカルステージである。マスク側は非テレセンとシックな配置なので、マスクステージを Z 方向に動かすことによって投影光学系の倍率を微調整することができる。マスクの Z 方向移動量 2 mm が、投影系倍率変動の 0.6 ppm に相当する。

ウェハステージは粗動と微動の二段構成になっている。粗動ステージはマスクステージと同様のメカニカルステージで、微動ステージは板バネガイドとピエゾアクチュエーターを用いた市販のステージである。ストロークは小さいが、XY 方向で 1 nm の分解能で動かすことができる。

アライメント光学系を図 3-3-9 に示す。アライメント系は、マスク上とウェハ上のマークを同時に見る TTR (Through The Reticle) 方式を採用した[6]。ハロゲンランプを光源として、マスク上のマークと、投影系によってマスク上に拡大投影されたウェハ上のマークとを重ね合わせて観察する。投影系のウェハ側はテレセントリックな配置になっているので、光線を遮らないように投影系の開口数の半分ずつにマスクへの入射光と反射光をそれぞれ通す。光源側光学系と検出器側光学系はそれぞれ移動ステージに載せられており、露光中は光線を遮らないように待避するようになっている。

アライメントマークは、Sandia NL の 10xII と同様にグレーティング状のパターンを重ね合わせて生じるモワレ縞を利用する[7]。アライメント精度は 30 nm (3σ) を仕様としている。従来の光リソグラフィで TTR 方式を用いる場合には、投影系の色収差が誤差要因であったが、全て反射系で構成される EUVL 光学系では、色収差は原理的に発生しない。

その後、兵庫県立大学と ASET ( Association of Super-Advanced Electronics Technologies; 技

術研究組合 超先端電子技術開発機構) によって本装置を用いた様々な露光実験が行われたが[8]、ここではその詳細は割愛する。今研究で培われたリングフィールド投影系の組み立て調整技術は、その後の HiNA や EUV1 投影系の開発の基礎となった[9]。

#### 本節に関連する主論文

- l **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi and H. Yamanashi, “Experimental EUV exposure system using a synchrotron source”, *Journal of Photopolymer Science and Technology*, **11**, 565, (1998)
- l **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi and H. Yamanashi, “Ring-field extreme ultraviolet exposure system using aspherical mirrors”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 6750, (1998).

#### 参考文献

- [1] H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi, H. Yamanashi, K. Murakami, T. Oshino, Y. Platonov and N. Grupido, *Proc. SPIE*, **3331**, 20, (1998).
- [2] J. Rodgers and T. Jewell: *Proc. SPIE*, **1354**, 330, (1990).
- [3] T. Jewell, J. Rodgers and K. Thompson: *J. Vac. Sci. Technol.* **B8**, 1519, (1990).
- [4] T. Jewell, K. Thompson and J. Rodgers: *Proc. SPIE*, **1527**, 163, (1991).
- [5] M. Born and E. Wolf: *Principle of Optics*, (Pregamon Press, New York, 1970) 4th ed. P. 469.
- [6] K. Nguyen, D. Tichenor, K. Berger, A. Ray-Chauduri, S. Haney, R. Nissen, Y. Perras, R. Arling, R. Stulen, L. Fetter, D. Tennant, D. White and O. Wood II, *Proc. SPIE*, **2723**, 54, (1996).
- [7] D. Tichenor, G. Kubiak, S. Haner, R. Nissen, K. Berger, R. Arling, A. Ray-Chauduri, K. Nguyen, R. Stulen, J. Woronosky, J. Jordan, T. Smith, J. Dornald, P. Kahle, J. Bjorkholm, O. Wood II, G. Taylor and R. Hutton, *Proc. SPIE*, **2437**, 292, (1995) .
- [8] H. Kinoshita, T. Watanabe, Y. Li, A. Miyafuji, T. Oshino, K. Sugisaki, K. Murakami, S. Irie, S. Shirayone and S. Okazaki, *Proc. SPIE*, **3997**, 70, (2000) .
- [9] K. Sugisaki, T. Oshino, K. Murakami, T. Watanabe, H. Kinoshita, A. Miyafuji, S. Irie and S. Shirayone, *Proc. SPIE*, **3997**, 751, (2000).

表 3-3-1 EUVL 実験用露光装置の仕様

露光波長	13 nm
開口数 (NA)	0.1
倍率	1/5
解像力	100 nm
焦点深度	1.9 mm (解像力 100 nm の値)
解像限界	60 nm
ウェハ上露光領域	30 mm × 1 mm
アライメント精度	30 nm (3s)
マスク寸法	6 インチ
ウェハ寸法	8 インチ
スキャンステージ	真空対応

表 3-3-2 投影系の組み立て調整許容誤差

ミラー番号	偏心 [mm]		間隔 [mm]	傾斜 [mrad]	
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
M1	0.7	0.45	0.02	0.1	0.3
M2	0.01	0.008	0.001	0.04	0.07
M3	0.01	0.008	0.001	0.01	0.01

表 3-3-3 投影系鏡筒調整機構の仕様

M1	<i>Z</i>		<i>a</i>		<i>b</i>
ストローク	4 mm		34.9 mrad		34.9 mrad
分解能	1 mm		10 mrad		10 mrad
M2	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>Z</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
ストローク	4 mm	4 mm	8 mm	7 mrad	7 mrad
分解能	1 mm	1 mm	0.2 mm	1.5 mrad	1.5 mrad

表 3-3-4 マスクおよびウェハステージの仕様

ステージ	軸	ストローク	分解能
マスクステージ	<i>Y</i>	100 mm	2 mm
	<i>Z</i>	40 mm	2 mm
	<i>a</i>	$\pm 34.9$ mrad	0.2 mrad
	<i>b</i>	$\pm 34.9$ mrad	0.2 mrad
	<i>q</i>	$\pm 26.2$ mrad	1.5 mrad
ウェハ粗動ステージ	<i>X</i>	200 mm	2 mm
	<i>Y</i>	120 mm	2 mm
	<i>Z</i>	40 mm	2 mm
ウェハ微動ステージ	<i>X, Y</i>	100 mm	1 nm
	<i>Z</i>	100 mm	10 nm
	<i>a, b</i>	3.4 mrad	1mrad
	<i>q</i>	$\pm 1$ mrad	20mrad

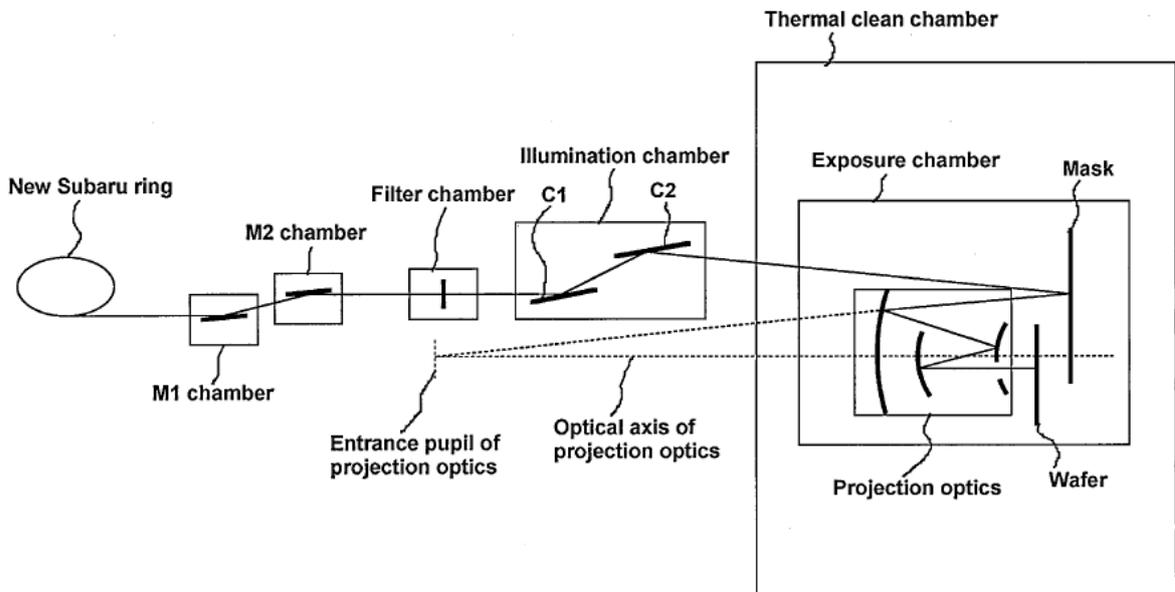


図 3-3-1 EUVL 露光実験用ビームライン全体の模式図

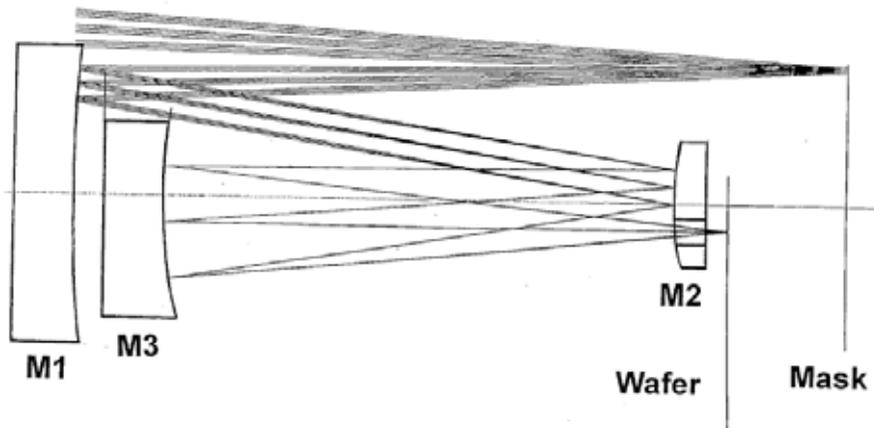
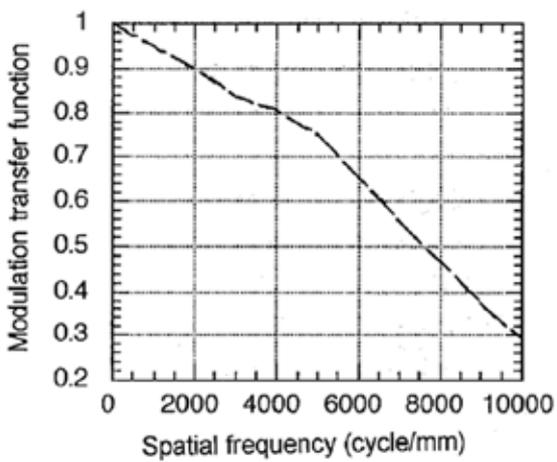
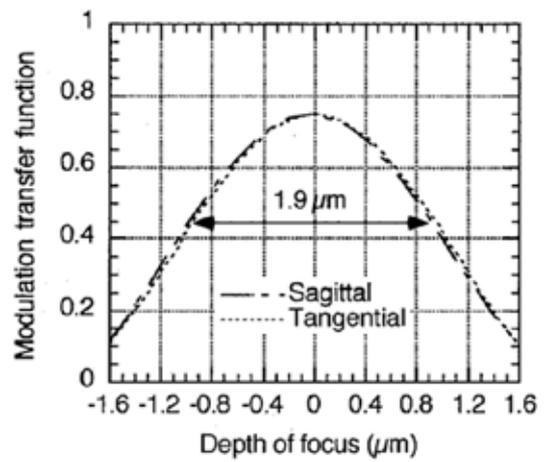


図 3-3-2 非球面ミラー3枚からなる投影光学系



(a)



(b)

図 3-3-3 投影光学系の MTF

(a): 空間周波数依存性 (b): デフォーカス依存性

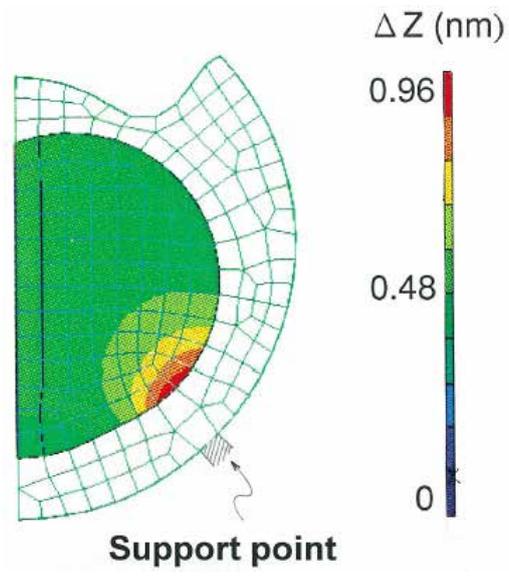


図 3-3-4 M3 ミラーの自重変形

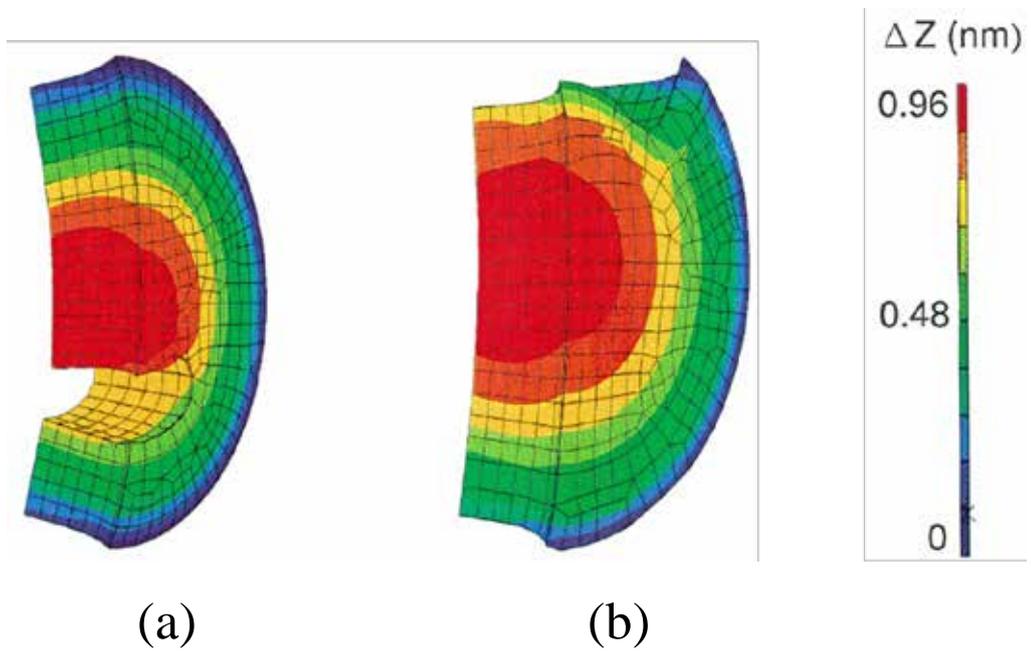


図 3-3-5 M2, M3 ミラーの応力変形  
(a) M2, (b) M3

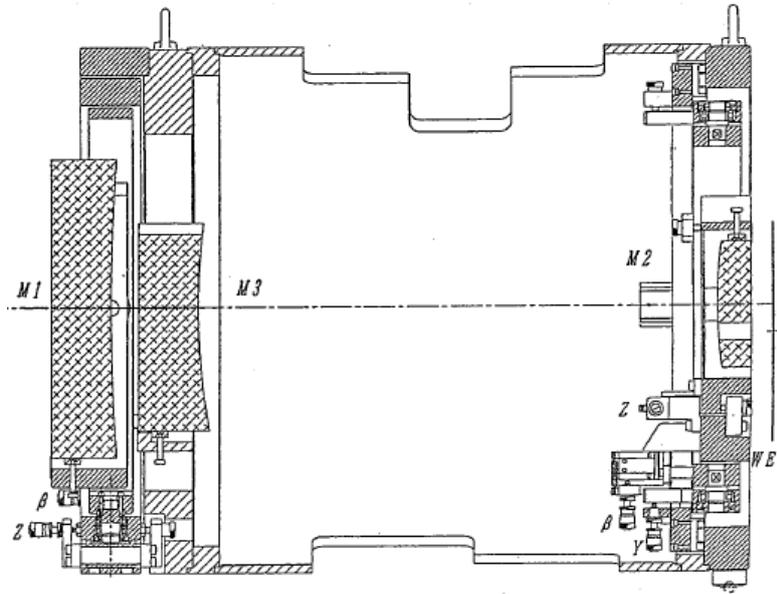


図 3-3-6 投影光学系鏡筒

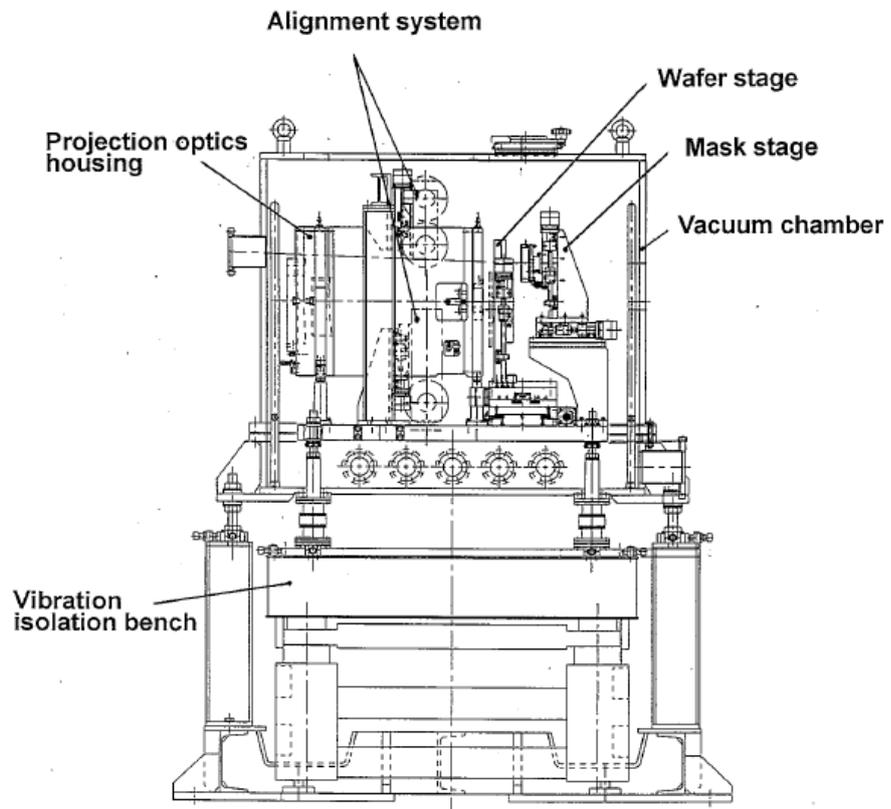


図 3-3-7 露光実験チャンバー

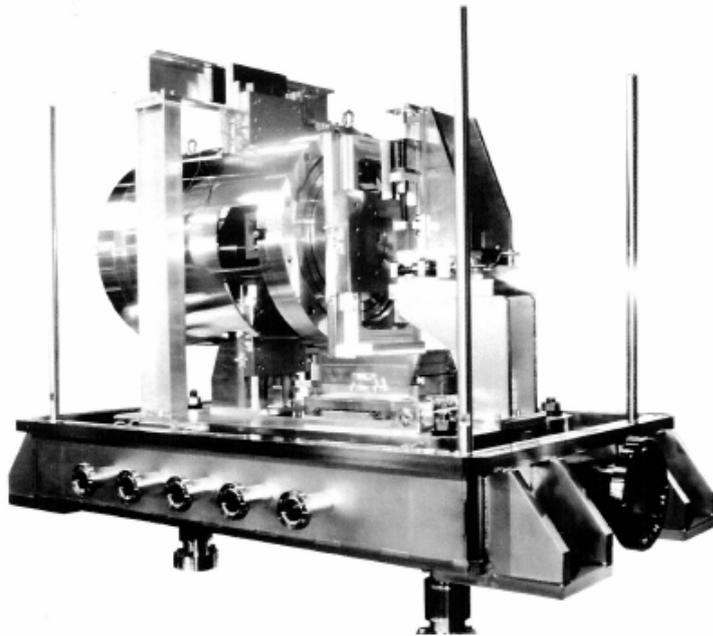


図 3-3-8 露光実験チャンバーの写真

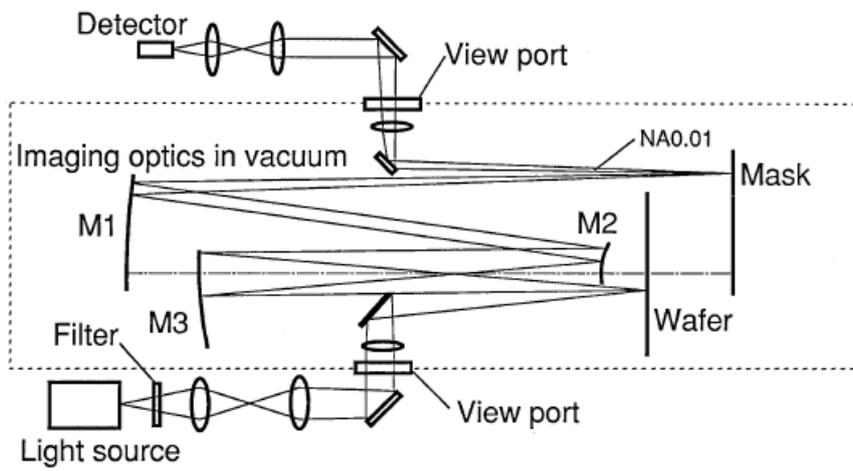


図 3-3-9 アライメント光学系

### 3-4 EUV 光を用いた波面計測技術の開発

#### 3-4-1 多層膜ミラーによる位相変化の光学特性に与える影響

EUV 露光装置の投影光学系は多層膜ミラーによる反射系なので、従来のレンズを用いた投影光学系のような屈折率の波長分散に起因する色収差は存在しない。しかし、多層膜ミラーによる反射は位相の変化を伴う。図 3-4-1 は周期長 7 nm、波長 13 nm の Mo/Si 多層膜の反射率と反射による位相変化の計算値である。ピーク反射率を与える入射角の前後で、反射波の位相が大きく変化している。そのため、EUV 光で計測した波面と、可視光や紫外光で測定した波面とは厳密には一致しない。この不一致が光学特性に与える影響について、具体的な光学系で検討した。

まず、図 3-4-2 (a) に示すような NA 0.2、倍率 1/20、使用波長 13.4 nm のシュバルツシルド光学系について調べた。図 3-4-2 (b) は、多層膜反射を考慮しない場合の点像分布関数 (point spread function; PSF) の計算値である。このときの、光学設計上の残存波面収差は、 $\lambda=13.4$  nm に対して 0.032 $\lambda$  RMS であり、strehl 強度は 0.96 であった。一方、図 3-4-2 (c) は、多層膜反射による位相変化を考慮して計算した PSF を示す。このときの波面収差は 0.038 $\lambda$  RMS で、strehl 強度は 0.94 であり、多層膜を考慮しない場合と殆ど変わらない。以上のように、シュバルツシルド光学系では多層膜反射の影響が小さいことが分かった。

次に、図 3-4-3 (a) に示すような NA 0.25、倍率 1/4、使用波長 13.4nm のリングフィールド光学系について調べた。図 3-4-3 (b) は、多層膜反射を考慮しないで最適化した場合の PSF の計算値である。このときの波面収差は  $\lambda=13.4$  nm に対して 0.002 $\lambda$  RMS であり、strehl 強度は 1.0 であった。良好に収差が補正されていることが分かる。図 3-4-3 (c) は、この光学系に多層膜を貼り付けて、多層膜反射による位相変化を考慮して計算した PSF を示す。波面収差は 0.125 $\lambda$  RMS に増大し、strehl 強度は 0.38 まで低下してしまった。このように、軸外しのリングフィールド光学系では、多層膜反射による位相変化の影響は無視することができないことが分かった。このままではこの光学系は使えないが、多層膜反射の影響を考慮して更に光学設計を最適化することができる。そのような最適化を行った結果を図 3-4-3 (d) に示す。波面収差は 0.038 $\lambda$  RMS に低減し、strehl 強度も 0.94 まで回復した。この光学系の波面を可視光や紫外光などで計測すれば、EUV 光とは全く異なる波面になってしまう。

EUV 光以外で計測した波面から EUV 光による波面を換算することは可能だが、その計算の正しさを検証するためには実際に EUV 光を使って光学系の波面を計測することが必要である。そこで、EUV 光を用いた光学系の波面計測技術の開発を行った。なお、本研究は、NEDO の委託研究 (2001 ~ 2005 年度) および継続研究 (2006 ~ 2009 年度) として、EUVA (Extreme Ultraviolet Lithography System Development Association; 技術研究組合 極端紫外線露光システム技術開発機構) においてニコンとキヤノンの研究員により遂行された。筆者は本研究のプロジェクトリーダーを務めた。

### 3-4-2 EUV 光を用いた波面計測方法

干渉計測法によって光学系の波面計測を行う場合、光源のコヒーレンス長が重要である。コヒーレンス長とは、位相関係の保存された波連 ( wave packet ) の長さを表す。干渉計測では、一つの光源から出た光束を異なる経路を通過させて、再びそれらを重ね合せて干渉縞を形成する。このとき二つの経路の光路長の差が光源のコヒーレンス長よりも大きいと、位相関係は保存されないので干渉縞を観測することが出来ない。レーザー光源はコヒーレンス長が長いので干渉計測に適しているが、本研究の開始時には未だ自由に使える X 線レーザーは存在しなかった。コヒーレンス長が大きいことは単色性が高いことと同義であり、波長  $\lambda$  に対してコヒーレンス長は  $\lambda^2/D\lambda$  で与えられる。単色性の高い EUV 光源として放射光の挿入光源の一種であるアンジュレータがある。本研究では、兵庫県立大学ニュースバル放射光施設の BL9 長尺アンジュレータビームラインを使用した。アンジュレータを用いても単色性  $\lambda/D\lambda$  は 1000 程度であり、得られるコヒーレンス長は 10 mm 程度に過ぎない。そこで、できるだけ光路長の差の小さい共通光路 ( common path ) 干渉計を用いた。

EUV の波長域では使用できる光学素子で制限がある。干渉計を構成するためにはビームスプリッタなどの光学素子が必要とされる。そこで、ピンホールや回折格子の組み合わせにより干渉計を構成した。

使用波長の短い EUV 露光装置では、従来と比べて極めて高い 0.1 nm RMS 程度以下の計測精度が要求される。それまで広く使用されていたフィゾー型干渉計やトワイマン・グリーン型干渉計等は、基準面 ( 原器 ) との比較計測であった。そのため、計測精度は基準面の精度により制限されてしまう。そこで、機械的な基準面を使用しない新しい干渉計測手法を用いた。

以上のような条件を満たす干渉計測手段として、PDI ( point diffraction interferometry ) 法とシアリング法を採用した [1-3]。それらの派生型も含めて、当初は 5 種類の計測手法について実験を行った。以下に、それぞれの計測原理を説明する。

図 3-4-4 (a) に PDI の測定原理、(b) に本方式で使用する入射ピンホールとピンホールマスクの形状を示す [4]。まず入射ピンホールによる回折によって無収差の球面波を発生させる。ピンホールは収差フィルターの役割を果たす。この球面波を回折格子で 0 次光と 1 次回折光に波面分割する。回折格子はビームスプリッタ の役割を果たす。被検光学系を通過した波面はピンホールマスクへ入射する。ピンホールマスクには微細なピンホールと大きな窓が設けられている。回折格子の 0 次光による波面はピンホールへ入射し、1 次回折光による波面は窓へ入射するよう設定されている。0 次光による波面は、再びピンホールによる回折によって無収差球面波を発生する。1 次回折光による波面は、被検光学系の収差を含んだまま窓を通過する。これらの二つの波面の干渉による干渉縞を CCD カメラで観測する。回折格子を横方向にシフトすることにより、二つの波面の位相差を変化させる位相シフト測定 [5] が可能である。

PDI は微細なピンホールにより形成される球面波との比較計測である。形成される球面波

の精度はピンホールの大きさに決まるので、測定精度の信頼性が高い。

本方式では高い測定精度が期待できるが、比較的測定レンジが狭いこと、コヒーレンスの高い光源が必要であることなどの欠点がある。特に NA の大きな光学系の測定を行う際には、ピンホール径を小さくする必要がある。そうすると、検出できる光量が低下し SN 比が劣化して測定誤差が大きくなること、ピンホールの厚さの影響が無視できなくなることなどの課題がある。

図 3-4-5 (a) に LDI (line diffraction interferometry) の測定原理、(b) に本方式で使用する入射スリットとスリットマスクの形状を示す。本方式は、PDI に用いられるピンホールの代わりにスリットを用いた方式である。ピンホールを用いた場合よりも検出できる光量が大幅に増大する利点がある。PDI の検出光量低下の問題を解決する一つの手段である。本方式では、スリットによる回折を使用するので、1 次元情報しか得ることが出来ない。被検光学系の波面の 2 次元情報を得るためには、X-Y 二方向の測定を行って波面を算出する。

図 3-4-6 (a) にシアリング干渉法の一つである LSI (lateral shearing interferometry) の測定原理、(b) に本方式で使用する入射ピンホールと回折次数選択マスクの形状を示す[6, 7]。入射ピンホールによる回折によって無収差球面波を発生させる。被検光学系を通過した波面は、回折格子で波面分割される。本方式の特徴は、 $\pm 1$  次光のみを通過させるオーダー選択マスクを用いた点にある。0 次光と高次の回折光を除去することにより、ノイズ成分を低減して測定精度を向上させる。 $\pm 1$  次光同士による干渉縞を CCD カメラで観察する。回折格子を横方向にシフトすることにより、二つの波面の位相差を変化させる所謂位相シフト測定が可能である。

シアリング干渉法では、PDI のような微細なピンホールを使用しないので、検出できる光量を多く取ることができる。また、測定レンジも比較的広く、光源のコヒーレンス要求も緩和されるなどの利点がある。一方、シアリング干渉法で測定される量は、波面そのものではなく横ずらした方向の波面の微分値なので、波面を求めるためには積分操作が必要となる。この操作で誤差が積算される恐れがあり、誤差を積算しない計算アルゴリズムの開発が課題であった。また、波面を復元するためには、X-Y 二方向に横ずらした測定を行う必要がある。

図 3-4-7 (a) に SLSI (slit lateral shearing interferometry) の測定原理、(b) に本方式で使用する入射スリットと回折次数選択マスクの形状を示す。SLSI は、LSI のピンホールの代わりにスリットを用いることにより、更に検出できる光量を増大させる方式である。本方式も、波面を復元するためには、X-Y 二方向に横ずらした測定を行う必要がある。

図 3-4-8 (a) に DLSI (double-grating lateral shearing interferometer) の測定原理、(b) に本方式で使用する入射マスクと回折次数選択マスクの形状を示す[8]。本方式もシアリング干渉計の一つであるが、二つの回折格子を使用することが特徴である。第 1 の回折格子で波面を分割し、二つの窓を設けた入射マスクで 0 次光と 1 次回折光のみを通過させる。これらの二つの波面は、被検光学系を横方向に互いにずれた位置で通過して第 2 の回折格子で再

び回折する。二つの回折格子は被検光学系に対して共役の位置に配置されており、第 1 回折格子の 0 次光の第 2 回折格子による 1 次回折光と、第 1 回折格子の 1 次回折光の第 2 回折格子による 0 次光とは完全に同じ位置に来る。出射側のマスクは、これらの波面のみを通過させて余分な回折光を遮蔽する空間フィルターである。重なった二つの波面により形成される干渉縞を CCD カメラで観察する。第 1 の回折格子を横方向にシフトすることにより、二つの波面の位相差を変化させる位相シフト測定が可能である。波面を復元するためには、X-Y 二方向に横ずらした測定を行う必要がある。

本方式の特徴はいわゆるワンカラー測定を行う点にある。他の 4 つの計測方式では、CCD カメラ上に到達する二つの波面は横方向に位置ずれしている。そのため、被検光学系が無収差の場合には、一定間隔で乱れの無い干渉縞が観測される。干渉縞の間隔は二つの波面の横ズレ量によって決まる。本方式では二つの波面が完全に重なるので、被検光学系が無収差の場合には干渉縞は全く観測されず一色になる。CCD の画素数の影響などを受けにくいので高精度な計測が期待できる。

### 3-4-3 EUV 実験干渉計を用いた波面計測

以上に述べた 5 種類の EUV 波面計測方式を実際にテストするために、EUV 実験干渉計を製作した。図 3-4-9 に EUV 実験干渉計の模式図を示す。放射光アンジュレータ光源から水平方向に導かれた光束を垂直下方に折り曲げる平面折り曲げミラー、DLSI 計測時に使用する第 3 格子ステージ、PDI および LDI 計測時に使用する第 1 マスクステージおよび第 1 格子ステージが被検光学系の上流に配置される。被検光学系の下流には、シアリング干渉法 (LSI、SSI および DLSI) で使用する第 2 格子ステージおよび第 2 マスクステージが配置され、最後に CCD カメラが配置されている。これらの光学系は、ターボ分子ポンプで排気された真空チャンバー内に設置されている。

EUV 照射による光化学反応により堆積する炭素によってピンホールが詰まるのを防ぐために、第 1 および第 2 マスクステージ近傍に酸素吹き付け機構が設けられている。また、光路の途中で光量モニター用のフォトダイオードが挿入可能である。

被検光学系には NA0.2、全長 1000 mm、倍率 1/20、反射中心波長 13.5 nm のシュバルツシルド光学系を用いた。He-Ne レーザー光で計測した波面収差は 1.06 nm RMS であった。

収差フィルターに用いられるピンホールの直径は十分小さくなければならない。ピンホールを透過した光が、広がり半角  $q$  の範囲で球面波に近似できるためには、ピンホールの直径が、その  $NA (= \sin q)$  でのエアリーディスクの直径  $1.22\lambda / NA$  の約半分の  $0.5\lambda / NA$  以下であれば良い。被検光学系の入射側 (拡大側) の NA は  $0.2/20 = 0.01$  なので、どの計測手段でも共通して使用する入射側のピンホールは、 $0.5 \cdot 13.5 \text{ nm} / 0.01 = 675 \text{ nm}$  よりも小さい直径 500 nm のピンホールを標準的に用いた。PDI に用いるピンホールマスク上のピンホールは  $0.5 \cdot 13.5 \text{ nm} / 0.2 = 34 \text{ nm}$  程度以下にする必要があるが、あまり小さくし過ぎると、透過光量が減少し S/N 比が悪くなり測定再現性が劣化する。また、EUV 光を十分に遮光するためにはピンホールマスクの厚さは少なくとも 100 nm 以上が必要である。そうなると、ピンホー

ルと言っても実際にはトンネルのようなものになってしまう。そのようなトンネルを通過した光の電磁波解析シミュレーションを行って、ピンホール径を最適化した。

EUV 実験干渉計の光源には、放射光アンジュレータ光源を採用した。兵庫県立大学ニューズバル放射光施設アンジュレータ光源の既存のビームライン BL-9 に分岐を設けて、EUV 実験干渉計のための新たな専用ビームラインを建設した。図 3-4-10 にビームラインの構成を示す。長尺アンジュレータ (LU) から出た光は 2 枚の斜入射ミラー (M0、M1) で反射したあと回折格子 (G) とスリット (S1) からなる分光器へ入射する。ここまでは既存のビームラインをそのまま使用した。M4 は新たに設けた分岐ミラーであり、ここから下流部分を新たに製作した。従来のビームラインの集光光学系は、カークパトリック型光学系などの斜入射光学系で構成されるのが普通だったが、アンジュレータからの光をピンホール上で 500 nm 程度に効率良く集光するには不十分であった。そこで、集光光学系には直入射光学系であるシュバルツシルド型光学系 (M6、M7) を採用することにした。斜入射光学系よりも収差を低減できるので、放射光からの光を効率良く集光できるとともに、波面計測の誤差要因を低減することができる。M8 は実験用干渉計本体内の折り曲げミラーである。図には省略されているが、ビームラインの上流が変動しても集光点をピンホール上に維持するビームトラッキング機構を備えている。光を通す穴の開いた 4 分割フォトダイオードでビームの位置を検出して、M8 ミラーの姿勢を駆動する。図 3-4-11 に完成した EUV 実験干渉計とビームラインの写真を示す。

本装置を用いて様々な実験が行われた[8-15]。図 3-4-12 に、本装置を使って得られた EUV 光による干渉縞の画像を示す。瞳全体の像の上に、一部を拡大した像を重ねて示してある。前述の PDI, LDI, LSI, SLSI, DLSI の他に、後述する CGLSI (cross-grating lateral shearing interferometry) と DTI (digital Talbot interferometry) の測定結果も併せて示した。このような干渉縞画像を解析して、波面復元のアルゴリズムの検討、アライメント調整手段の検討、誤差要因の解析および補正手段の検討等の研究を行った。

PDI は予想通り高精度な計測が可能であることが確認され、測定再現性は 0.04 nm RMS が得られた。LDI は、入射側にスリットを配置した基本形では、干渉縞に異常が発生して波面測定ができなかった。そこで、入射側スリットをピンホールに替えた改良型 LDI を試みたところ、干渉縞に異常は発生せず PDI よりコントラストの高い干渉縞が得られた。しかし、X 方向のスリットと Y 方向のスリットによる測定の間僅かな光軸方向のドリフトが非点収差を発生させるという問題点があった。

LSI は非点収差を正しく測定できなかった。1 次元の回折格子を用いた LSI では、X 方向に横ずらした波面の計測と Y 方向に横ずらした波面の計測の間に、回折格子の光軸方向の位置が極僅かずれてしまい、それが被検物には存在しない非点収差が発生する原因になっていた。SLSI と DLSI にも同様の問題点があった。この問題を克服するために、2 次元の回折格子を用いて X, Y 方向を同時に計測する CGLSI を考案した。CGLSI から回折次数選択マスクを取り除いた DTI も試みた[16]。

図 3-4-13 に DTI 測定と CGLSI 測定の光学配置図を示す。CGLSI は、2 次元の回折格子を用いて、4 つの窓のある回折次数選択マスクを用いる点だけが LSI とは異なる。X 方向と Y 方向の測定を同時に行うことができるので、1 次元回折格子を用いた LSI のように非点収差が発生することは無い。

同様に 2 次元回折格子を用いて回折次数選択マスクを用いない方法が DTI である。回折次数選択マスクを取り除くと、高次成分まで含めて多くの回折光が重畳されてしまうが、回折格子と像点の間の距離がある特定の条件 (Talbot 条件) を満たすときにコントラストの高い干涉縞が得られる。具体的には、回折格子のピッチを  $d$ 、波長を  $\lambda$  としたときに、回折格子と像点の距離が  $2nd^2/\lambda$  となる条件である。ここで  $2n$  は整数である。整数または半整数の  $n$  を Talbot 次数と呼ぶ。

CGLSI および DTI の波面復元には、いろいろ試みたが最終的には FFT 法を用いた。図 3-4-14 に CGLSI の波面復元フローを示す。CCD で撮像した干涉縞画像を 2 次元フーリエ変換する。周波数空間で、収差成分は干涉縞のピッチに相当するキャリア周波数の周りに分布する。X 方向の 1 次回折成分、Y 方向の 1 次回折成分に相当する部分を切り出し、それぞれ逆フーリエ変換を行うと、それぞれ X 方向と Y 方向に横ずらした波面の差分 (差分波面) が得られる。差分波面から元の波面を求めるためには、Zerinke 多項式で表現された波面を X 方向、Y 方向に横ずらし分だけ差分した式を使って、X 方向および Y 方向の差分波面にフィッティングする差分 Zerinke フィッティング法を用いた。CGLS および DTI を用いることにより、シアリング干涉法でも非点収差を精度良く測定できるようになった。

図 3-4-15 に PDI と CGLSI で測定した波面を示す。全く異なる測定原理に基づくにも係らず、測定された波面の形状は非常に良く似ている。PDI で測定した波面収差は 1.25 nm RMS、CGLSI で測定した波面収差は 1.26 nm RMS であり、収差の値も良く一致した。両者の差分は 0.15 nm RMS であり、これがこの測定の絶対精度の目安と考えることができる。波面を直接計測せずに、波面の傾斜を測定するシアリング干涉法は、当初はそれほど高精度の計測はできないのではないかと予想していたが、様々な誤差要因を慎重に取り除いた結果、PDI に匹敵する精度で波面測定が可能であることが明らかになった。

#### 3-4-4 EUV 波面計測装置を用いた波面計測

以上のように EUV 光を使って高精度な波面計測が可能になったので、実際に EUV 露光装置 EUV1 に搭載されるフルフィールド投影系 (NA0.25, 倍率 1/4) の波面計測が可能 EUV 波面計測装置 (EUV Wavefront Metrology System ; EWMS) を開発した。図 3-4-16 に EWMS の模式図を示す。被検光学系の上流側と下流側に、EUV 実験干涉計と同様に光学素子用のステージが設けられている。本装置では、被検光学系の視野内の異なる位置で波面計測ができるように、被検光学系は回転ステージに搭載され、照明系は前後に移動可能になっている。EWMS を設置するためにビームライン光学系も一部改造した。図 3-4-17 にビームラインの構成図を示す。照明系にシュバルツシルド光学系を用いるのは EUV 実験干涉計と同じだが、より小さな入射側ピンホールへ光を集光できるように、倍率を上げてミラーの口

径も拡大した。 $0.5l / NA = 0.5 \cdot 13.5 \text{ nm} / 0.0625 = 108 \text{ nm}$  なので、入射側ピンホールは直径 100 nm を標準的に用いた。図 3-4-18 に完成した EWMS とビームラインの写真を示す。左側の円筒状の真空チャンバーが EWMS 本体であり、右側の四角い真空チャンバーの中に照明系が設置されている。この写真では完成直後の剥き出しの状態だが、その後、図 3-4-19 に示すように、全体を恒温チャンバーで覆い、温度変動  $\pm 0.1$  以内の環境で運用した。EWMS では、PDI よりもアライメントが容易で測定時間も短い CGLSI および DTI を主な計測手段として使用し、基準となる PDI との比較計測を適宜行った。被検光学系には EUV1 の投影系を用いた。

まず、可視光で測定した波面と EUV 光で測定した波面の比較を行った。当初被検光学系に使用した EUV1 のプロトタイプ投影系は、波面収差が約 10 nm と大きかったので、波面を復元する際の位相の接続( unwrapping )に苦労したが、何とかデータを得ることができた。図 3-4-20 (a) に EWMS を使って DTI 法により EUV 光で測定した波面を示す。図 3-4-20 (b) は、同一の投影系の波面を波長 532.2 nm の可視光による干渉計で測定して、それを EUV の波面に換算したものである。波面の形状は両者で良く一致しており、収差の値は EUV 光で 9.93 nm RMS、可視光で 8.37 nm とかなり近い値が得られた。二つの波面の差分をとると 3.76 nm RMS であった。図 3-4-20 (c) は、両者のデータを Zernike 係数で比較したもので、傾向は非常に良く一致している。元の収差の値が大きいため差分の数値も大きいですが、両者の測定の間整合性があることは十分確認することができた。

以上の測定では、被検光学系の収差が大きいため十分な測定再現性が得られなかった。そこで、収差の小さい投影系を用いて DTI の測定再現性を調べた。8 回続けて測定を行い、二つの測定データから一つの波面形状を算出し、全部で 4 セットの波面データを取得した。図 3-4-21 (a) に得られた波面形状を示す。図 3-4-21 (b) は Zernike 係数の比較を示す。波面収差の値は  $1.57 \text{ nm} \pm 0.04 \text{ nm RMS}$  の範囲に収まっており、0.04 nm の高い再現性が得られた。

最後に測定結果の絶対精度を見積るために、PDI と DTI の比較を行った。図 3-4-22 (a) は直径 40 nm のピンホールを用いた PDI で測定した波面形状で、波面収差の値は 1.79 nm RMS であった。図 3-4-22 (b) は DTI で測定した波面形状で、波面収差の値は 1.32 nm RMS であった。二つの波面の差分を取ると、Zernike 係数の 5 から 36 項では 1.08 nm、非点収差を除いて 7 から 36 項までとると 0.37 nm RMS、更にコマ収差を除いて 9 から 36 項までとると 0.24 nm RMS であった。両者の測定結果の差異は、主に非点収差やコマ収差など低次の収差成分であり、高次の収差成分は非常に良く一致していることが確かめられた。低次の収差は、アライメントのズレ等の測定条件の影響を受けやすい。測定条件の改善により、更に測定精度を向上することが可能である。

以上のように、EUV 露光装置に搭載するフルフィールドの投影系の波面収差を EUV 光で測定する技術を確認することができた。この技術は、その後、放射光光源を使わずに、EUV 露光装置の露光用光源を使って、露光装置上で投影系の波面を計測することが可能な MISTI (Multi incoherent source Talbot interferometer) へと発展した[17-20]。

## 本節に関連する主論文

- l K. Murakami, J. Saito, K. Ota, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, K. Sugisaki, Y. Zhu, M. Hasegawa, Y. Sekine, S. Takeuchi, C. Ouchi, O. Kakuchi, Y. Watanabe, T. Hasegawa, S. Hara and A. Suzuki, “Development of an experimental EUV interferometer for benchmarking several EUV wavefront metrology schemes”, Proc. SPIE, **5037**, 257, 2003.
- l K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki, Y. Zhu, J. Kawakami, K. Murakami, C. Ouchi, M. Hasegawa, S. Kato, T. Hasegawa, H. Yokota, T. Honda and M. Niibe, “EUV Wavefront Measurement of six-mirror optic using EWMS”, Proc. SPIE, **6921**, 69212U, 2008.

## 参考文献

- [1] K. A. Goldberg, R. Beguiristain, J. Bokor, H. Medeck, K. Jackson, D. Attwood, G. E. Sommargren, J. P. Spallas and R. Hostler, Proc. SPIE, **2437**, 347, (1995).
- [2] H. Medeck, E. Tejn, K. A. Goldberg and J. Bokor, Opt. Lett., **21**, 1526, (1996).
- [3] P. P. Naulleau, K. A. Goldberg, S. H. Lee, C. Chang, D. Attwood and J. Bokor, Appl. Opt, **38**, 7252, (1999).
- [4] Y. Sekine, A. Suzuki, M. Hasegawa, C. Ouchi, Y. Kuramoto, S. Hara, T. Hasegawa, S. Kato, K. Murakami, J. Saito, K. Ota, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, K. Sugisaki, Y. Zhu, K. Otaki and Z. Liu, J. Vac. Sci. Technol., **B22**, 104, (2004).
- [5] D. Malacara, Optical Shop Testing, Jon Wiley & Sons, Inc. New York, p. 501, (1992).
- [6] Y. Zhu, K. Sugisaki, K. Murakami, K. Ohta, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, J. Saito, A. Suzuki, M. Hasegawa, Y. Sekine, S. Takeuchi, C. Ouchi, O. Kakuchi, Y. Watanabe, T. Hasegawa and S. Hara, Jpn. J. Appl. Phys., **42**, 5844, (2003).
- [7] Y. Zhu, K. Sugisaki, C. Ouchi, M. Hasegawa, M. Niibe, A. Suzuki and K. Murakami, Proc. SPIE, **5374**, 824, (2004).
- [8] Z. Liu, Y. Zhu, M. Ishii, J. Saito, K. Murakami, K. Sugisaki, A. Suzuki and M. Hasegawa, Jpn. J. Appl. Phys., **43**, 3718, (2004).
- [8] M. Hasegawa, C. Ouchi, T. Hasegawa, S. Kato, A. Ohkubo, A. Suzuki, K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki, K. Murakami, J. Saito, M. Niibe and M. Takeda, Proc. SPIE, **5533**, 27, (2004).
- [9] Z. Liu, K. Sugisaki, M. Ishii, Y. Zhu, J. Saito, A. Suzuki, M. Hasegawa and K. Murakami, J. Vac. Sci. Technol., **B22**, 2980, (2004).
- [10] S. Kato, C. Ouchi, M. Hasegawa, A. Suzuki, T. Hasegawa, K. Sugisaki, M. Okada, Y. Zhu, K. Murakami, J. Saito, M. Niibe and M. Takeda, Proc. SPIE, **5751**, 110, (2005).
- [11] Z. Liu, M. Okada, K. Sugisaki, M. Ishii, Y. Zhu, K. Ohtaki, J. Saito, A. Suzuki, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Kato, K. Murakami and M. Niibe, Proc. SPIE, **5752**, 663, (2005).
- [12] Y. Zhu, K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki, Z. Liu, M. Ishii, J. Kawakami, J. Saito, K. Murakami,

- C. Ouchi, M. Hasegawa, S. Kato, T. Hasegawa, A. Suzuki and M. Niibe, *Proc. SPIE*, **5752**, 1192, (2005).
- [13] K. Sugisaki, M. Okada, Y. Zhu, K. Otaki, Z. Liu, J. Kawakami, M. Ishii, J. Saito, K. Murakami, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Kato, T. Hasegawa, A. Suzuki, H. Yokota, M. Niibe and M. Takeda, *Proc. SPIE*, **5921**, 59210D, (2005).
- [14] C. Ouchi, S. Kato, M. Hasegawa, T. Hasegawa, H. Yokota, K. Sugisaki, M. Okada, K. Murakami, J. Saito, M. Niibe and M. Takeda, *Proc. SPIE*, **6152**, 61522O, (2006).
- [15] Y. Zhu, K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki, Z. Liu, J. Kawakami, M. Ishii, J. Saito, K. Murakami, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Kato, T. Hasegawa, A. Suzuki, H. Yokota, and M. Niibe, *Appl. Opt.*, **46**, 6783, (2007).
- [16] M. Takeda, S. Kobayashi, *Appl. Opt.*, **23**, 1760, (1984).
- [17] K. Otaki, Y. Ichikawa, K. Sugisaki, Y. Zhu, K. Murakami, C. Ouchi, N. Kohara, S. Kato, M. Hasegawa, T. Honda and M. Taketa, *Extended Abstracts (The 71<sup>st</sup> Autumn Meeting, 2010)*, The Japanese Society of Applied Physics, 15a-ZT-6, (2010).
- [18] C. Ouchi, N. Kohara, S. Kato, M. Hasegawa, T. Honda, K. Otaki, K. Sugisaki, Y. Ichikawa, Y. Zhu, K. Murakami and M. Takeda, *Extended Abstracts (The 71st Autumn Meeting, 2010)*, The Japanese Society of Applied Physics, 15a-ZT-7, (2010).
- [19] Y. Ichikawa, K. Otaki, K. Sugisaki, Y. Zhu, K. Murakami, C. Ouchi, N. Kohara, S. Kato, M. Hasegawa, T. Honda and M. Takeda, *2010 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, ML-02*, (2010).
- [20] K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, K. Nomura, H. Kawai, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada and Y. Ohkubo, *Proc. SPIE*, **7969**, 79690P, (2011).

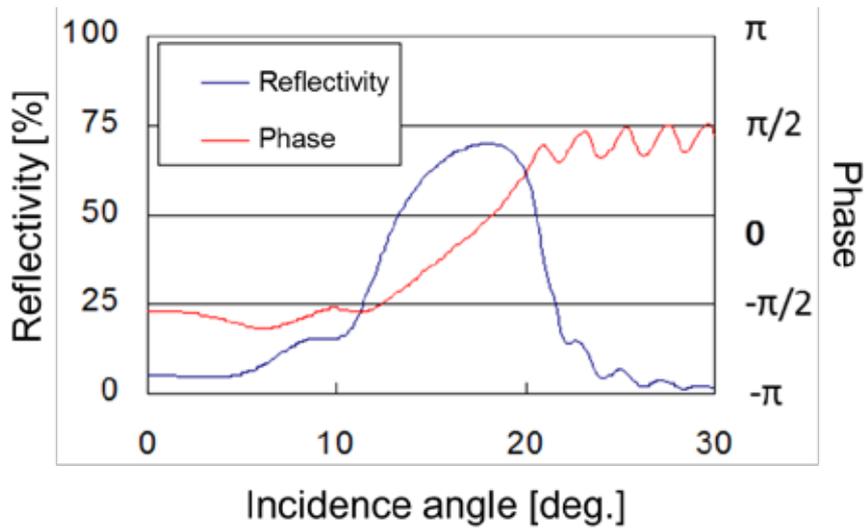


図 3-4-1 Mo/Si 多層膜ミラーの反射率と位相変化

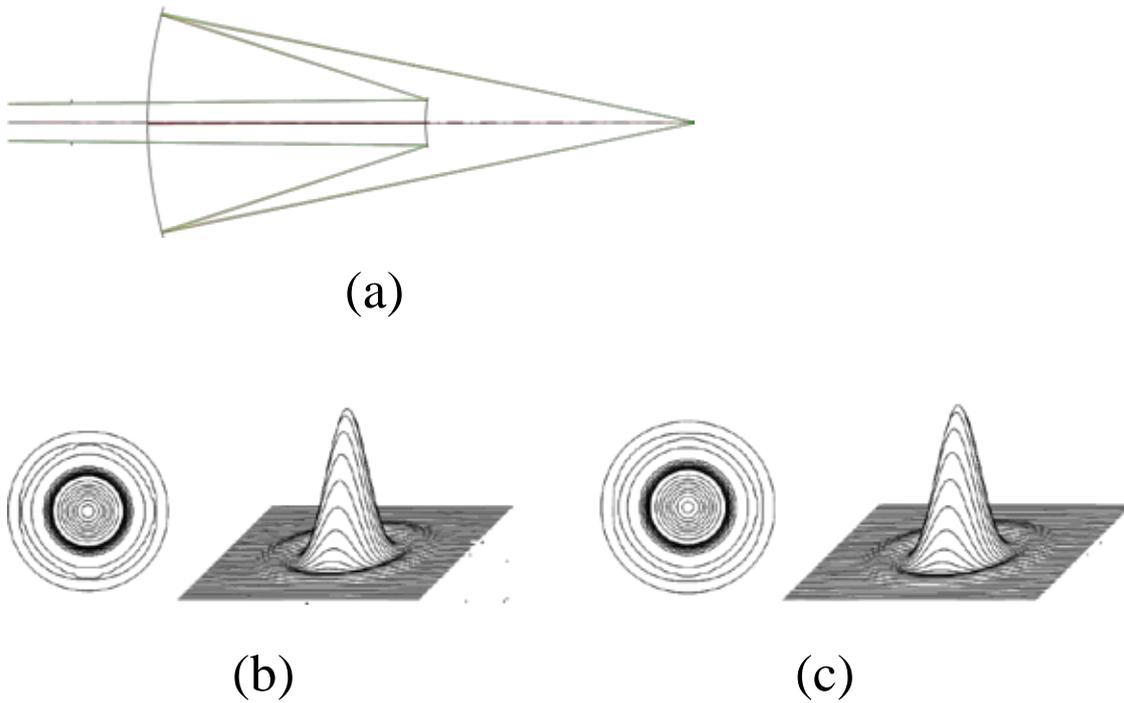


図 3-4-2 シュバルツシルド光学系における多層膜反射の影響  
 (a) シュバルツシルド光学系、  
 (b) 多層膜無しの点像分布関数、  
 (c) 多層膜反射を考慮した点像分布関数

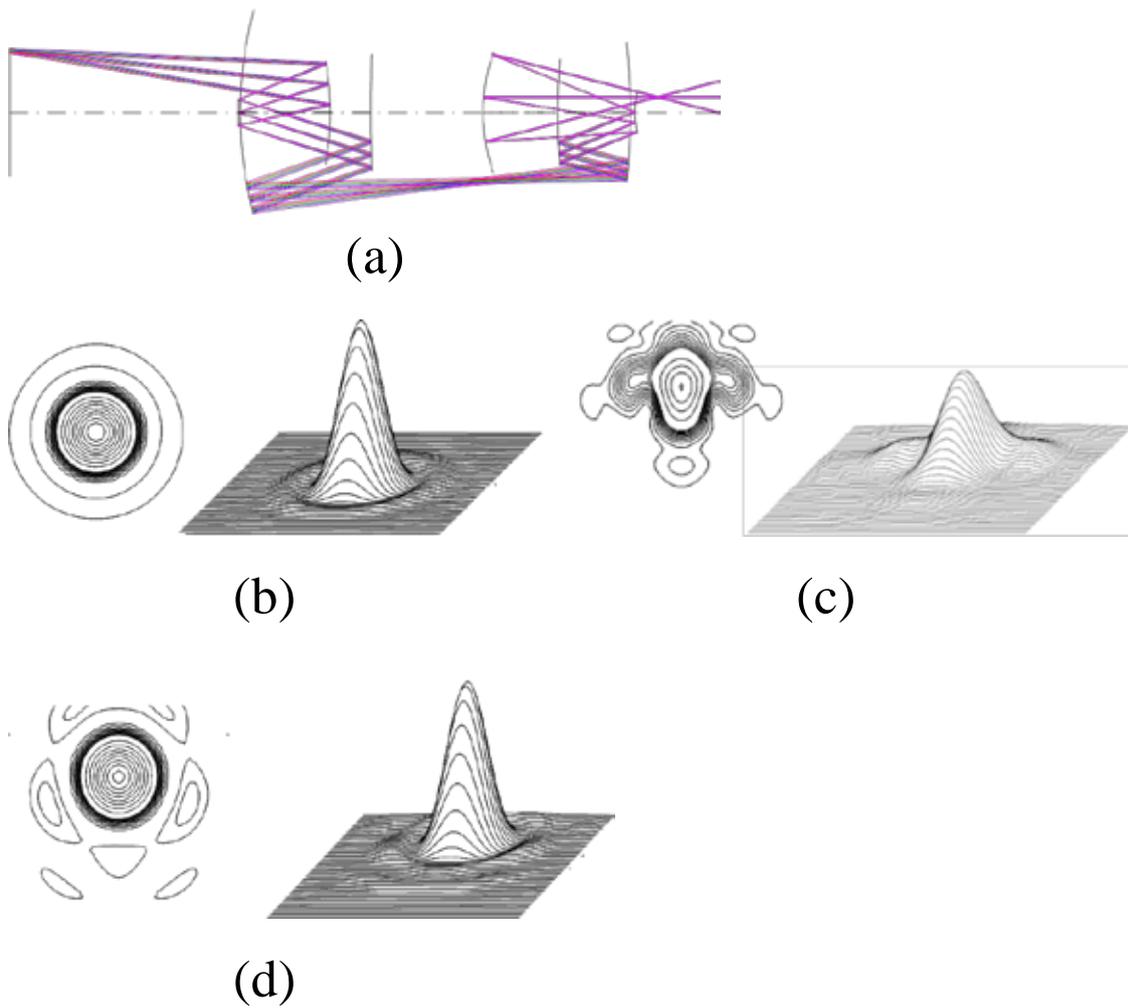


図 3-4-3 リングフィールド光学系における多層膜反射の影響  
 (a) リングフィールド光学系、  
 (b) 多層膜無しの点像分布関数、  
 (c) 多層膜反射を考慮した点像分布関数、  
 (d) 多層膜反射の影響を考慮して最適化したときの点像分布関数

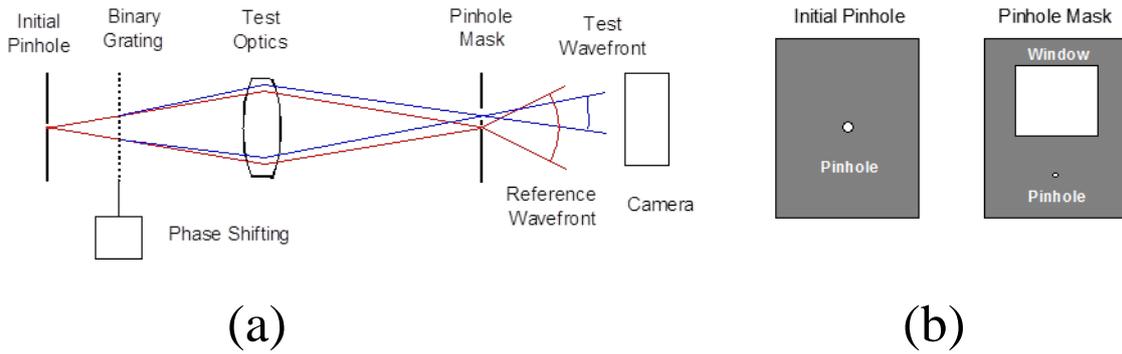


図 3-4-4 Point diffraction interferometer (PDI)

(a) PDI の測定原理、(b) 本方式で使用する入射ピンホールとピンホールマスク

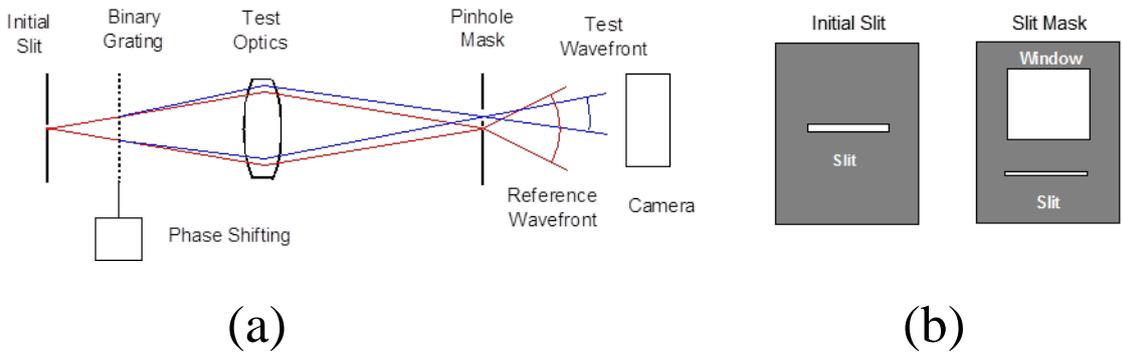


図 3-4-5 Line diffraction interferometer (LDI)

(a) LDI の測定原理、(b) 本方式で使用する入射ピンホールとピンホールマスク

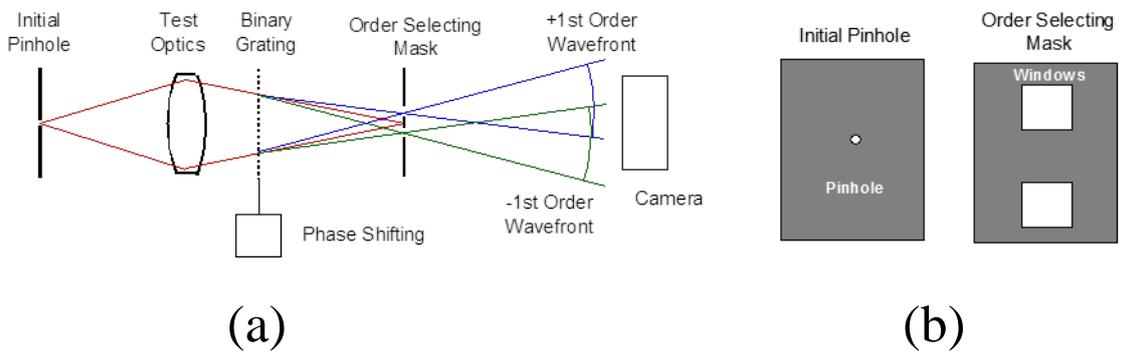


図 3-4-6 Lateral shearing interferometer (LSI)

(a) LSI の測定原理、(b) 本方式で使用する入射マスクと次数選択マスク

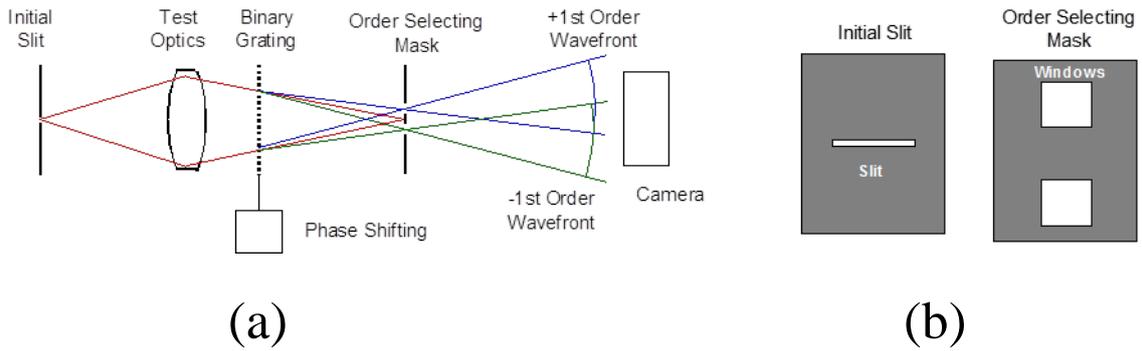


図 3-4-7 Slit shearing interferometer (SSI)

(a) SSI の測定原理、(b) 本方式で使用する入射マスクと次数選択マスク

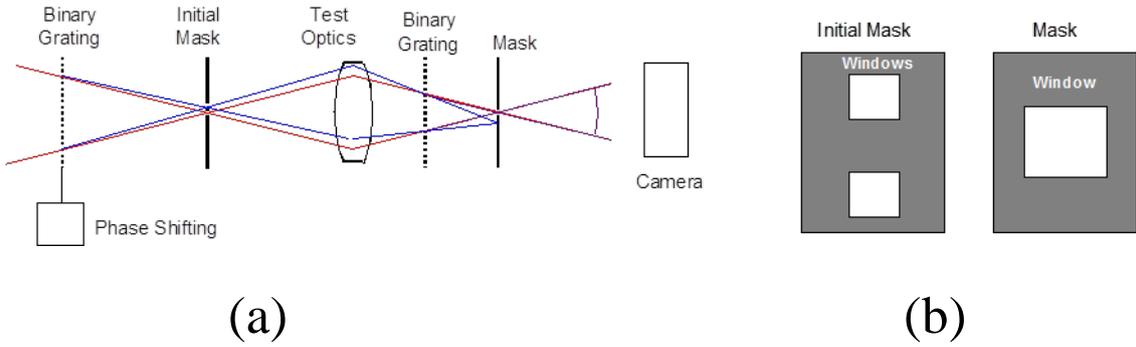


図 3-4-8 Double-grating lateral shearing interferometer (DLSI)

(a) DLSI の測定原理、(b) 本方式で使用する入射マスクと第 2 マスク

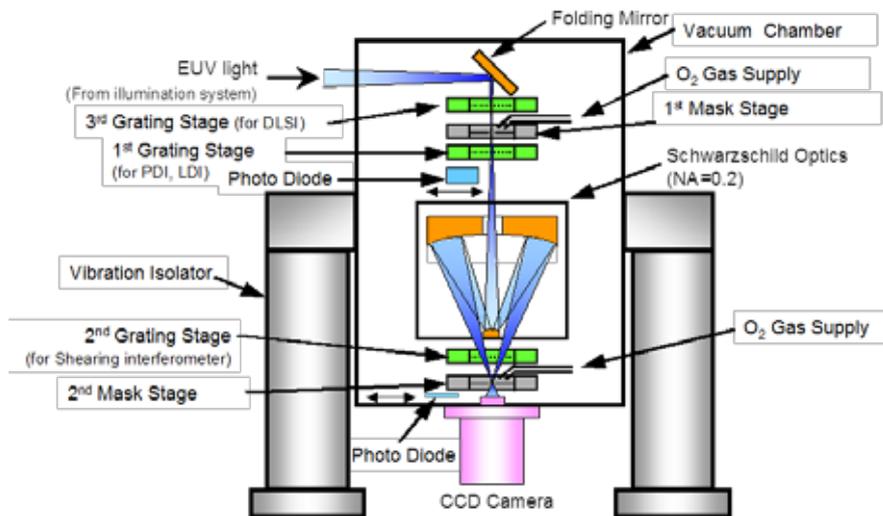


図 3-4-9 EUV 実験干渉計の模式図

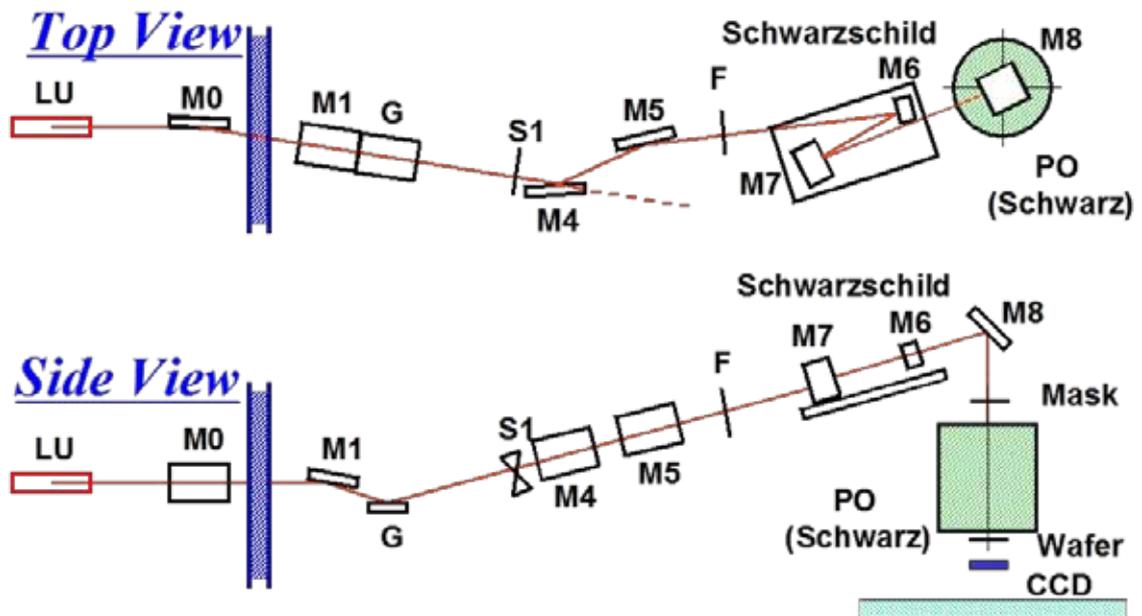


図 3-4-10 EUV 実験干渉計ビームライン全体の構成

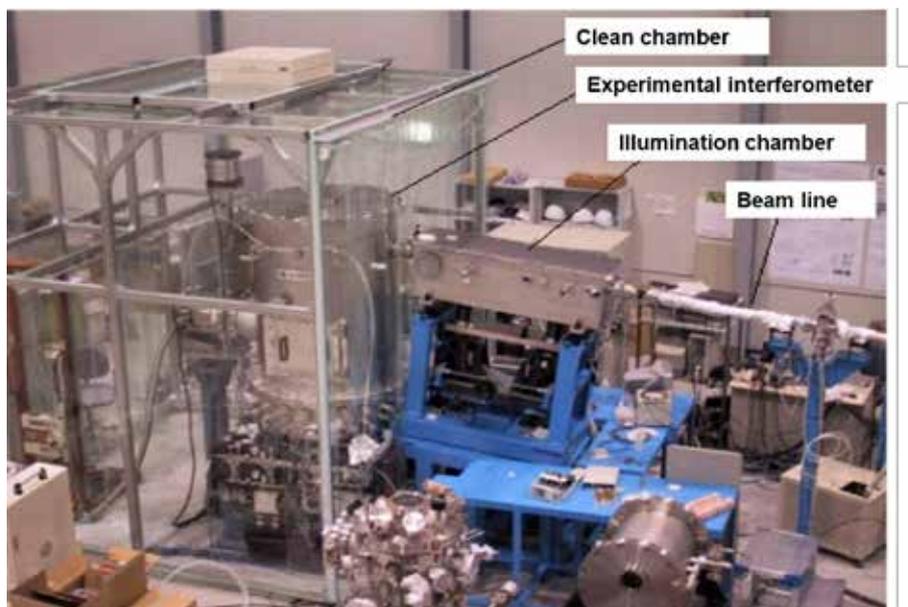


図 3-4-11 EUV 実験干渉計とビームライン

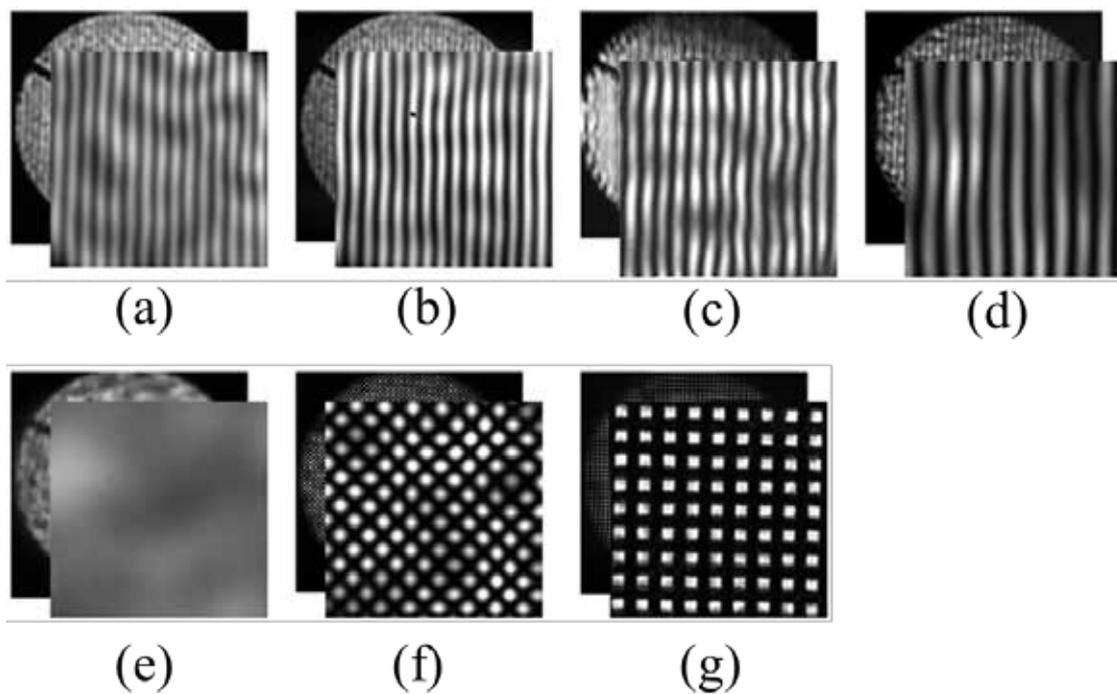


図 3-4-12 EUV 実験干渉計で得られた EUV 光による干渉縞  
 (a) PDI, (b) LDI, (c) LSI, (d) SLI, (e) DLSI, (f) CGLSI, (g) DTI

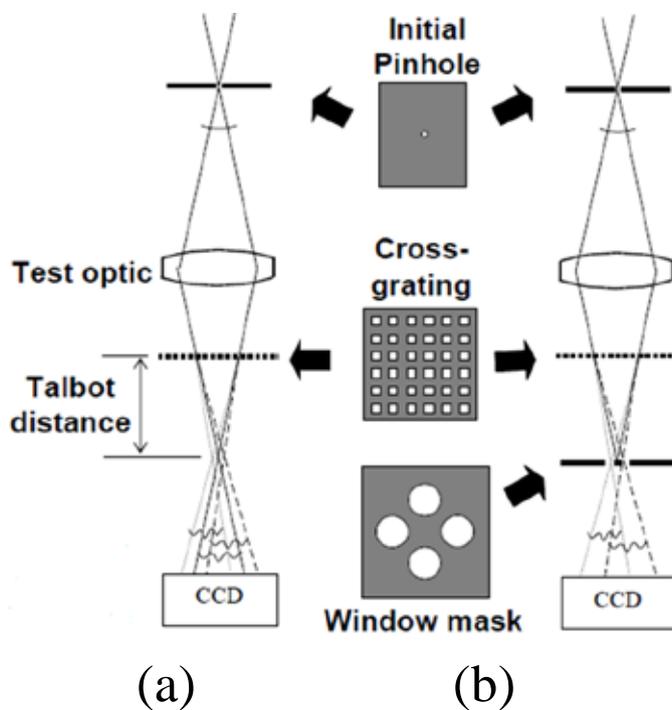


図 3-4-13 DTI と CGLSI 測定の光学配置図  
 (a) DTI, (b) CGLSI

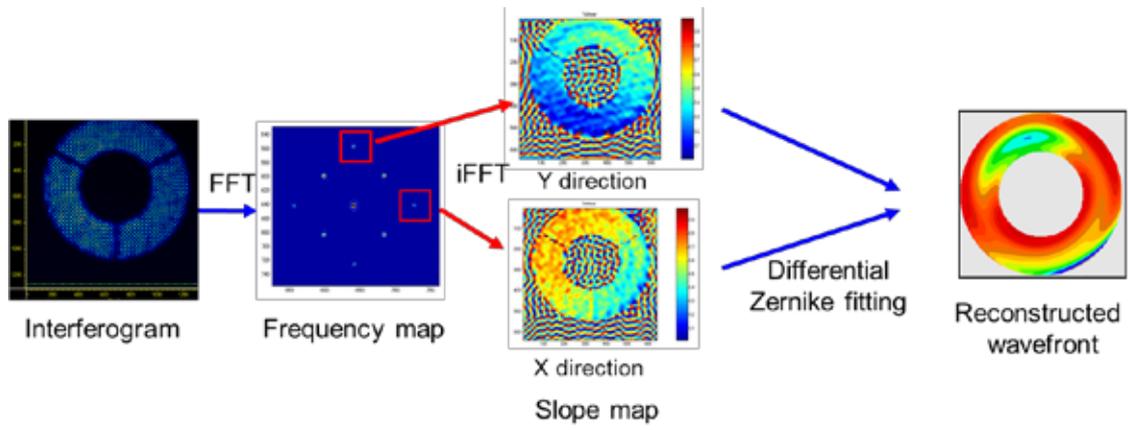


図 3-4-14 CGLSI の波面復元フロー

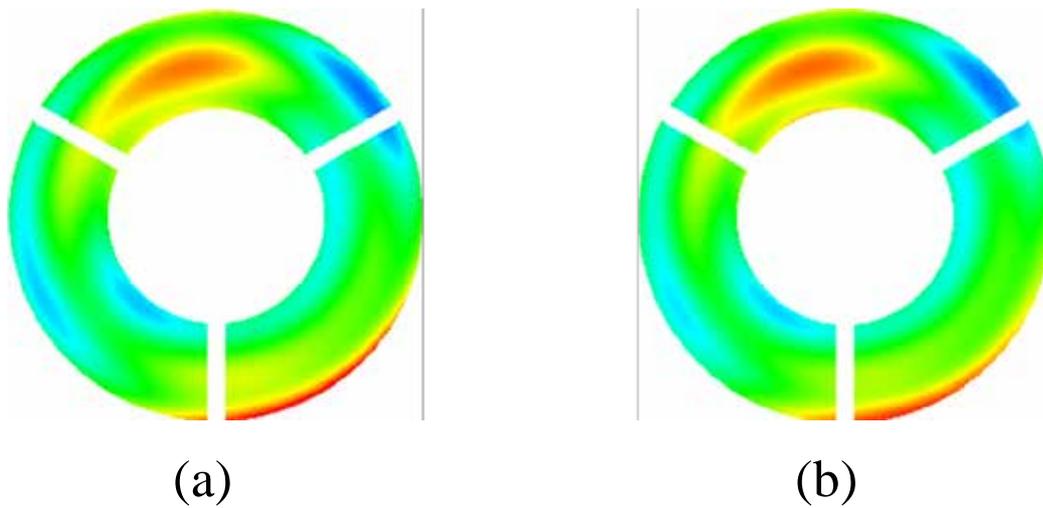


図 3-4-15 PDI と CGLSI の測定波面の比較 (a) PDI, (b) CGLSI

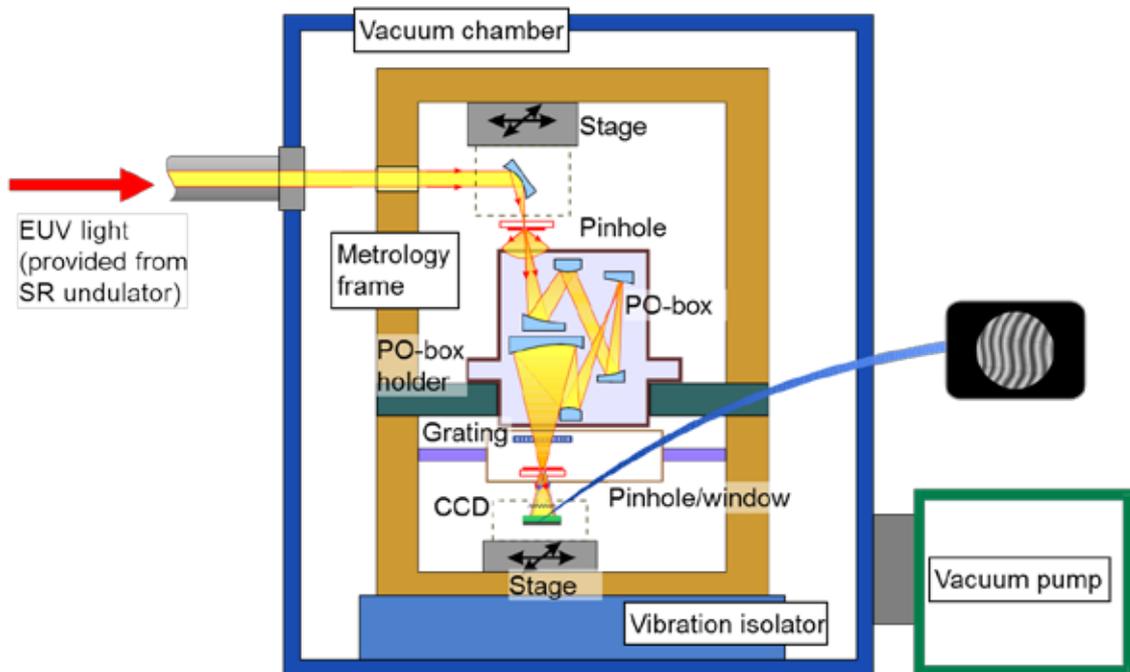


図 3-4-16 EWMS (EUV Wavefront Metrology System) の模式図

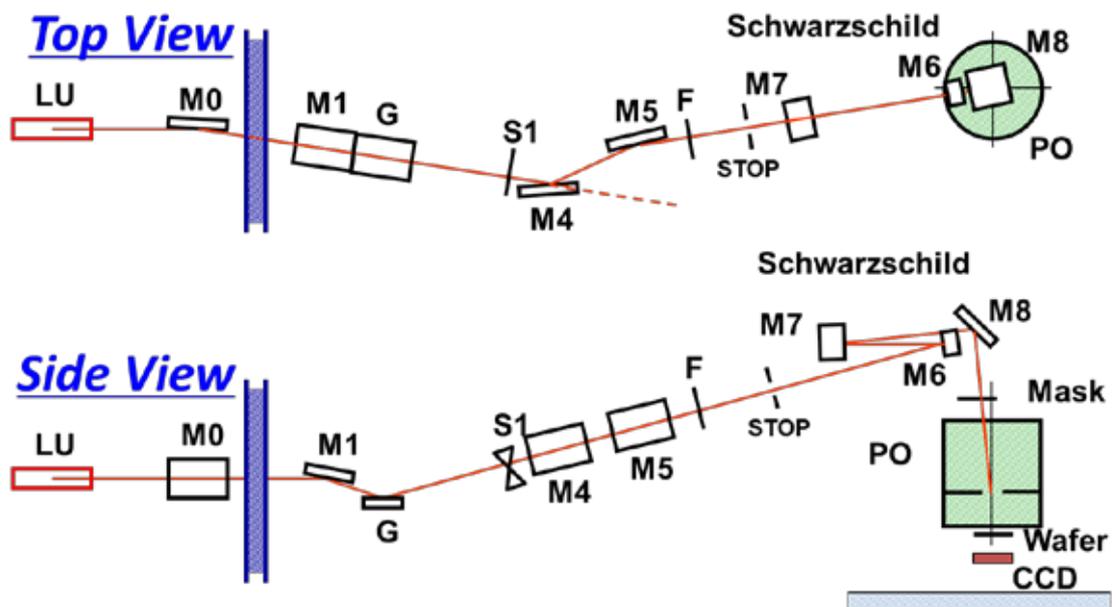


図 3-4-17 EWMS 用ビームライン全体の構成

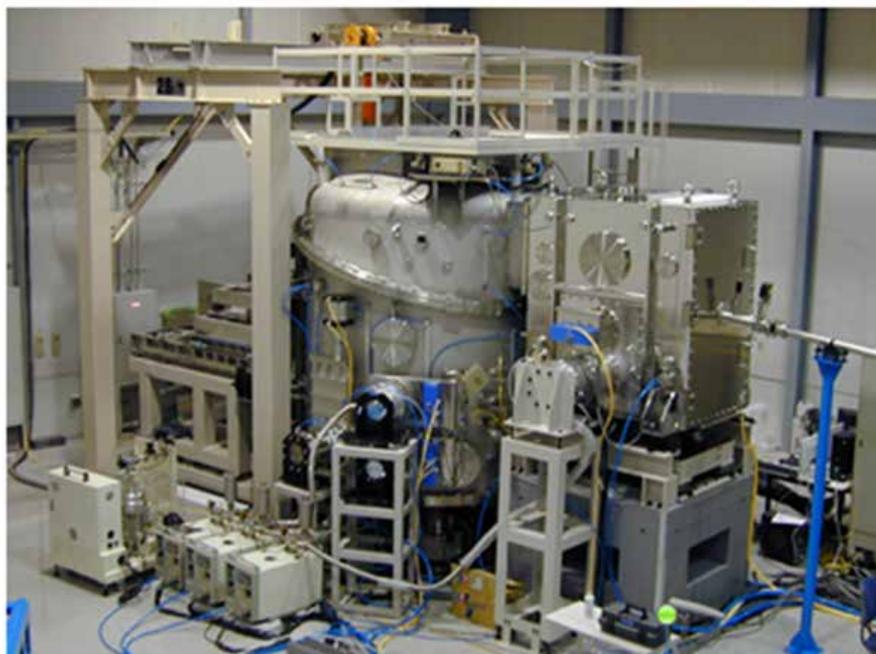
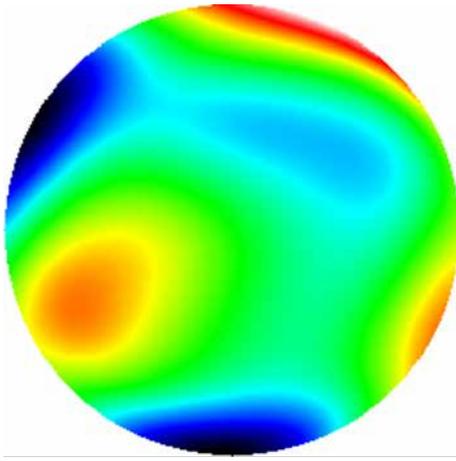


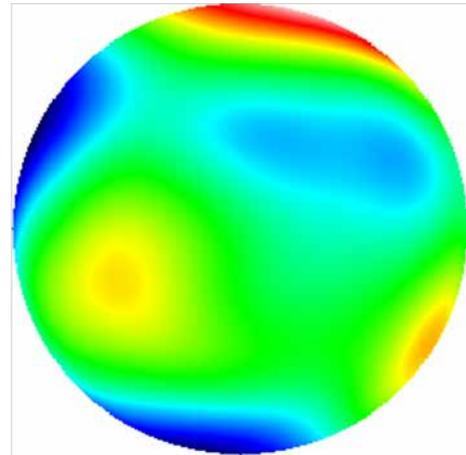
図 3-4-18 EWMS とビームライン



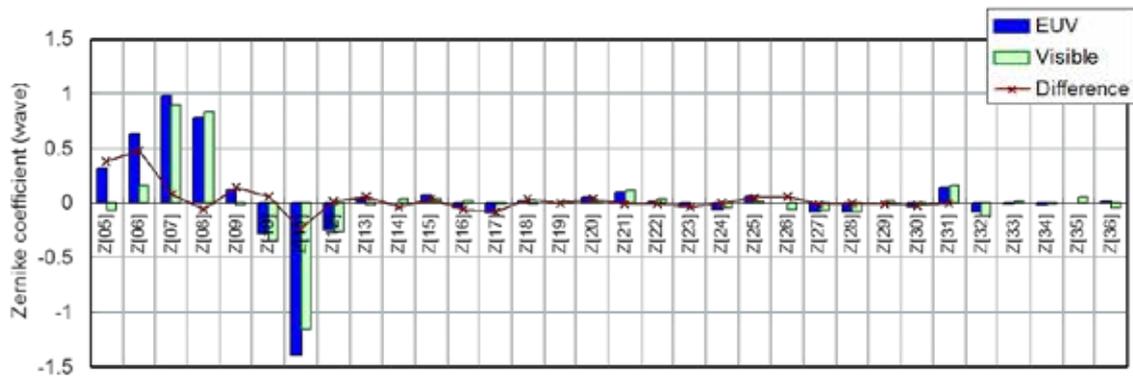
図 3-4-19 恒温チャンバーで覆われた EWMS



(a)



(b)



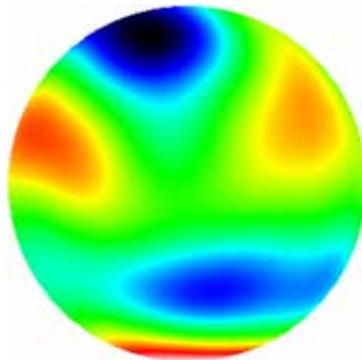
(c)

図 3-4-20 DIT で測定した波面と可視光で測定した波面の比較

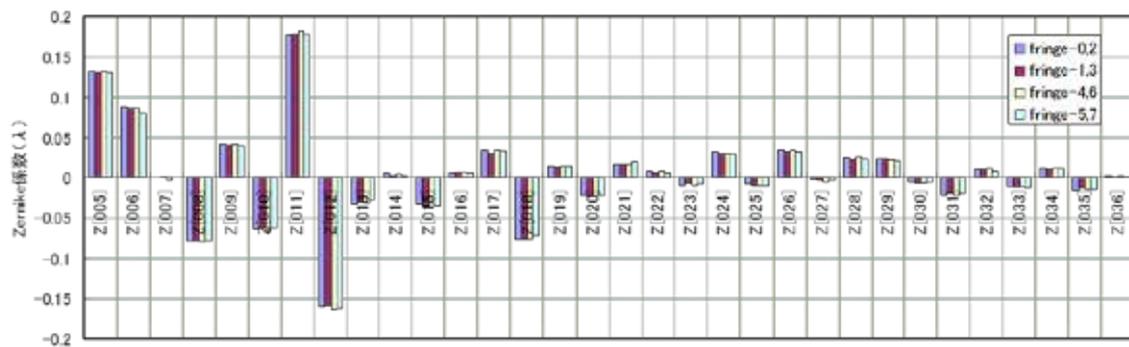
(a) EWMS で DTI 法により測定した波面

(b) 可視光干渉計で測定した波面

(c) 両者の Zernike 係数の比較

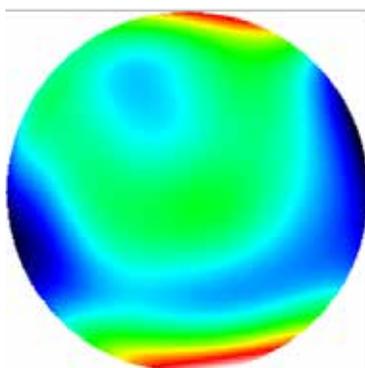


(a)

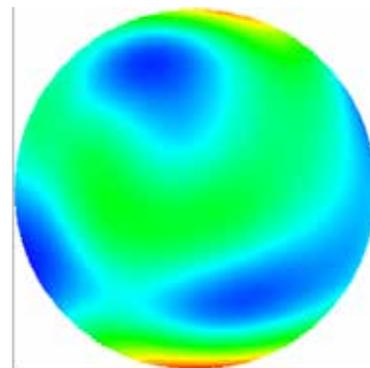


(b)

図 3-4-21 DTI の測定再現性  
(a) 波面形状、(b) Zernike 係数の比較



(a)



(b)

図 3-4-22 PDI と DTI の比較  
(a) PDI で測定した波面形状、(b) DTI で測定した波面形状

## 第4章 EUV 露光装置の開発

前章までに説明したように多層膜ミラー、軟 X 線光学系、EUV 波面計測等の基盤技術が蓄積されてきたので、これらの技術に基づいて EUV 露光装置の開発に着手した。EUV リソグラフィの黎明期（1990 年台初頭）には、投影系の NA は 0.1 程度で解像力 100 nm 程度が想定されていたが、その後の光リソグラフィ技術の高解像度化に伴い、EUV リソグラフィは NA を拡大して解像力を更に向上することが必要となった。フルフィールド EUV 露光装置 EUV1 は、NA0.25 の 6 枚の非球面ミラーからなる投影系を搭載した。その前段階として、2 枚の非球面からなる NA0.3 の小フィールド投影系を搭載した小フィールド露光装置（high-NA small field exposure tool; HiNA）を開発して、非球面を用いた高精度光学系の加工技術を蓄積した。

### 4-1 高 NA 小フィールド露光実験装置（HiNA）の開発

図 4-1-1 に HiNA の全体構成を示す。HiNA は、照明系、投影系、マスクステージ、ウェハステージ、フォーカスセンサ、ウェハロードロック室と、それらを収納する真空チャンバから構成される[1]。投影系は 2 枚の非球面ミラーで構成されており、露光フィールドサイズは 300 mm × 500 mm である。照明系は、投影系とマスクステージ間に配置される。この照明系は、一部のミラーを動かすことによって部分コヒーレント照明（ $s = 0.8$ ）とコヒーレント照明（ $s = 0$ ）を切り替えることができる。部分コヒーレント照明にはインテグレーターとして反射型フライアイ素子を用いた[2]。フライアイ素子は 4 mm 角の微小球面ミラーを 40 個並べた素子である。

反射型マスクは機械的クランプ機構によってマスクステージに固定される。ウェハは、静電チャックによりウェハステージに固定される。ウェハはロードロック室を介して真空を破らずに交換することができる。フォーカスセンサにはウェハと投影系の間に配置した静電容量センサを用いた。露光波長は 13.5 nm である。本装置は NTT 厚木開発センターの Super ALIS 放射光施設に設置され、ASET（Association of Super-Advanced Electronics Technologies; 技術研究組合 超先端電子技術開発機構）により EUV リソグラフィのプロセス技術の研究開発に活用された。

図 4-1-2 に HiNA の投影系を示す。NA は 0.3、倍率は 1/5 である。凸面ミラー M1 と凹面ミラー M2 の形状は、いずれも高次非球面である。これらの非球面量はいずれも約 4 nm であった。光学設計上の残存収差は 0.019 nm RMS である。この光学系はマスク側もテレセントリックな光学系なので、反射型マスクを使用するために光軸に対してマスクを傾けた。これに合わせてウェハも傾けてある。マスクとウェハの傾斜角度はそれぞれ  $5^\circ$  と  $1^\circ$  である。各ミラーは光路との干渉を避けるために、中心に穴が開いている。マスクからウェハへ直接向かう光をカットするために 2 つのミラーの間に遮光板を設けた。開口絞りは M1 の反射面直上に配置した。

HiNA の投影系は、全部で 3 本製作した。非球面を用いた光学系で 1 nm RMS 以下の波面

収差を実現することを目標とし、1本毎に改良を加えて波面収差を向上させた。回折限界の結像を行うために許容される波面収差の目安として、Maréchalの基準が良く知られている[3]。これは、波長を $\lambda$ としたときに、光学系の波面収差を $\lambda/14$ 以下にすればstrehl強度0.8以上が得られるというものである。波長13.5 nmのEUV光を使用するEUV露光装置投影系では、1 nm以下ということになる。

HiNAの投影系のミラー基板材料には、いずれもULEやZerodur等の低熱膨張ガラスよりも加工の容易な石英を用いた。

図4-1-3に投影系Set-1とSet-2の写真を示す。Set-1では、M1とM2を各支持リングに設けた板ばねに接着し、それらの支持リングを金属筒の両端に固定した。投影系の波面収差は、He-Neレーザーを光源とする可視光PDI装置で計測した[4, 5]。表4-1-1に、測定した波面収差の値を示す。Set-1では、生データが7.5 nm RMS、Zernike多項式36項までのフィッティング値で6.2 nm RMSと、目標の1 nm RMSには程遠い結果だった。これは、ミラー面形状から予想される値よりもずっと大きい。波面収差不良の主な原因は、ミラーの保持変形であると推定された。ミラー保持変形を抑制するために板ばね機構を設けたが、その剛性の最適化が不十分であった。金属筒に支持リングを固定する際に、ミラーに過剰な応力が加わって変形したと考えられた。

そこで、Set-2では全面的に改良したミラーマウント機構を開発した。Set-2の鏡筒機構は、ベースフランジ部とミラーマウント機構とミラーの位置調整機構で構成される。M1は支持リングの板ばねに接着固定した。板ばねの剛性をSet-1鏡筒の剛性よりも低減して、ミラー変形を抑制した。M2は側面3箇所支持し、ミラーマウント機構を介して支持リング上に固定した。ミラーマウント機構は、メタルクリップとマウントフレクシャからなる。メタルクリップをミラー側面に設けた3箇所の突起に接着剤を使用せずに固定した。メタルクリップをつけたミラーは、ミラーの保持変形を最小限に抑えるために複数の板ばねで構成したフレクシャに固定した。M2の支持リングは、ミラー位置調整機構を介して鏡筒の本体であるフランジに固定した。ミラー位置調整機構は、板ばねガイドとDCモーターで構成されており、M2を5軸の自由度で駆動することができる。駆動分解能は、シフトが0.1mm、間隔が0.5mm、チルトが0.3mradである。これらの数値は、調整誤差を十分小さくできるよう決定された。ミラーの位置調整は遠隔操作が可能であり、干渉計で波面収差を観察しながら行うことができる。搬送によるミラーの位置ずれを避けるために、鏡筒にロック機構を設けた。調整を行った後、ロック機構によって支持リングをフランジに直接固定した。ロックした後は、DCモーターを取り外して使用した。

測定した波面収差を表4-1-1に示す。Set-2は、ミラーマウント機構の全面的な改良により波面収差を大幅に改善し、生データで1.9 nm RMS、Zernike多項式36項までのフィッティング値で1.2 nm RMSが得られた。測定した波面の形状を図4-1-4(a)に示す。細かい構造が見えており、これは保持変形に起因するものではなく、ミラーの面形状そのものを反映している。そこで、Set-3では新しい研磨方法を導入して、非球面ミラーの面形状の改善に

注力した。

表 4-1-2 に Set-2 と Set-3 のミラーの面形状データを示す。LSFR (low-spatial-frequency roughness) は、空間周波数が  $1 \text{ mm}^{-1}$  以下の形状精度の領域であり、主に収差に影響する。MSFR (mid-spatial-frequency roughness) は、空間周波数が  $1 \text{ mm}^{-1}$  から  $1 \text{ mm}^{-1}$  の範囲のうねりに相当する領域であり、主にフレアに影響する。HSFR (high-spatial-frequency roughness) は、空間周波数が  $1 \text{ mm}^{-1}$  以上の表面粗さに相当する領域であり、主に反射率に影響する。LSFR は非球面計測用の干渉計で測定した。36 項の Zernike 多項式で近似した場合の値も併せて示した。MSFR は Zygo 社製の顕微干渉計 New View で測定した。HSFR は AFM で測定した。M2 はサイズが大きいため AFM による測定は出来なかったが、M1 と同じ加工方法を用いたので、M1 と同程度の HSFR が達成されていると推定される。Set-2 と Set-3 を比べると、Set-3 では全ての空間周波数領域で形状精度が向上していることが分かる。これは、収差の低減だけでなく、フレアの低減にも寄与する。

Set-3 の鏡筒機構は Set-2 と同一のものを使い、組み立て調整工程も Set-2 と同じ方法で行った。測定した Set-3 投影系の波面の形状を図 4-1-4 (b) に示す。Set-2 に認められた波面の凹凸が滑らかに修正されていることが分かる。波面収差の値は表 4-1-1 の中に示してあるが、生データで  $0.90 \text{ nm RMS}$ 、Zernike 多項式 36 項までのフィッティング値で  $0.74 \text{ nm RMS}$  が得られた。目標としていた  $1 \text{ nm RMS}$  以下の波面収差を達成した。これで、非球面ミラーを用いた高精度な光学系の製造技術の基本を確立することが出来た。次節で説明する EUV1 のフルフィールド投影系も、ここで確立した技術をベースとして開発した。

#### 本節に関連する主論文

- 1 T. Oshino, S. Takahashi, T. Yamamoto, T. Miyoshi, M. Shiraishi, T. Komiya, N. Kandaka, H. Kondo, K. Mashima, K. Nomura, **K. Murakami**, H. Oizumi, I. Nishiyama and S. Okazaki, “Development of projection optics Set-3 for high-numerical-aperture extreme ultraviolet exposure tool (HiNA)”, J. Vac. Sci. Technol. B, **22**, 2975, (2004).

#### 参考文献

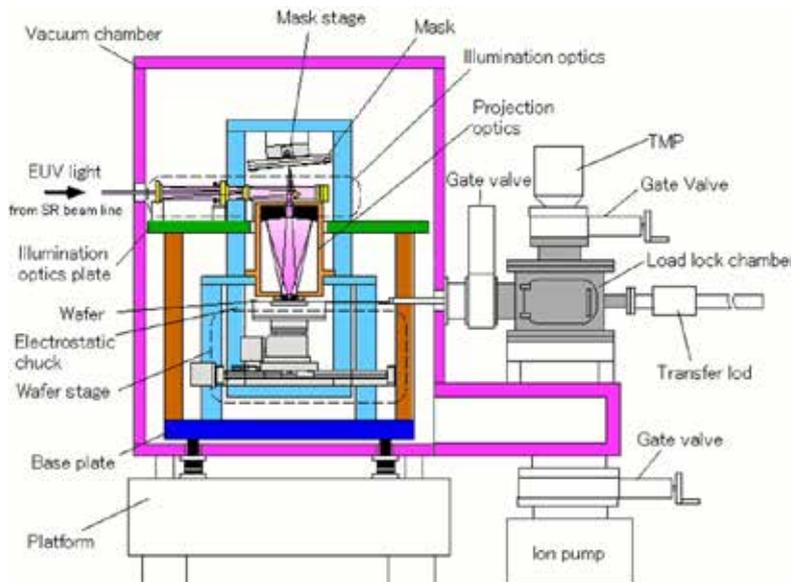
- [1] T. Oshino, M. Shiraishi, N. Kandaka, K. Sugisaki, H. Kondo, K. Ota, K. Mashima, K. Murakami, H. Oizumi, I. Nishiyama and S. Okazaki, Proc. SPIE, **5037**, 75, (2003).
- [2] H. Komatsuda, Proc. SPIE, **3997**, 765, (2000).
- [3] A. Maréchal, Rev. d’Optique, **26**, 257, (1947).
- [4] K. Otaki, T. Yamamoto, Y. Fukuda, K. Ota, I. Nishiyama and S. Okazaki, J. Vac. Sci. Technol., **B20**, 295, (2002).
- [5] K. Otaki, K. Ota, I. Nishiyama, T. Yamamoto, Y. Fukuda and S. Okazaki, J. Vac. Sci. Technol., **B20**, 2449, (2002).

表 4-1-1 HiNA 投影系の波面収差

	生データ	Zernike 36 項
Set-1	7.5 nm RMS	6.2 nm RMS
Set-2	1.9 nm RMS	1.2 nm RMS
Set-3	0.90 nm RMS	0.74 nm RMS

表 4-1-2 HiNA 投影系ミラーの形状精度

		LSFR		MSFR	HSFR
		生データ	Zernike 36 項		
Set-2	M1	0.52 nm RMS	0.22 nm RMS	0.34 nm RMS	-
	M2	0.66 nm RMS	0.40 nm RMS	0.32 nm RMS	-
Set-3	M1	0.25 nm RMS	0.14 nm RMS	0.17 nm RMS	0.10 nm RMS
	M2	0.25 nm RMS	0.20 nm RMS	0.20 nm RMS	-



(a)



(b)

図 4-1-1 HiNA 全体構成

(a) 模式図、(b) 外観写真

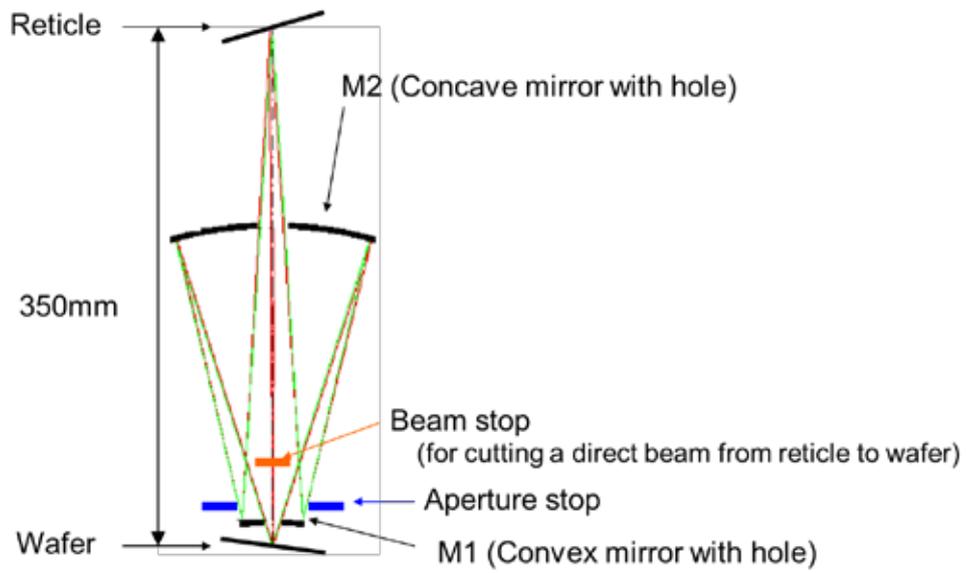
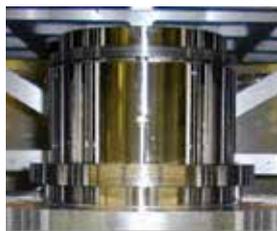
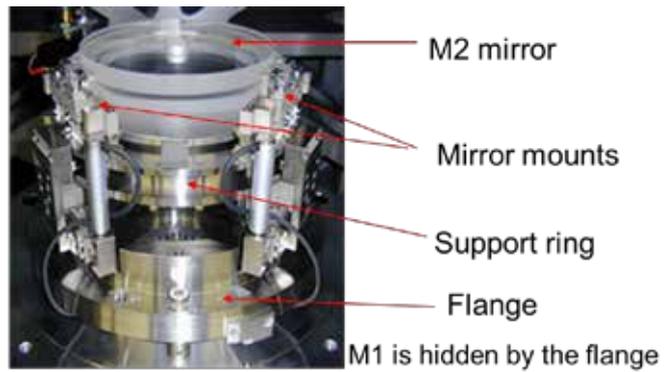


图 4-1-2 HiNA 投影系

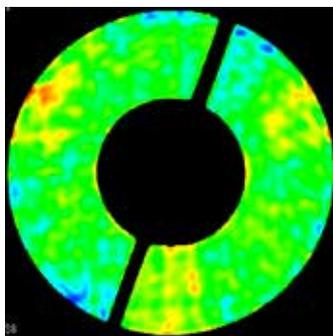


(a)

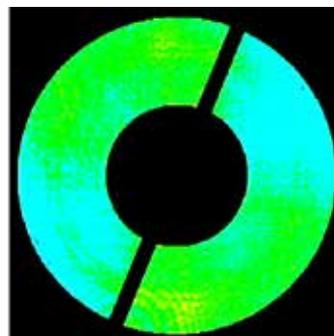


(b)

图 4-1-3 HiNA 投影系写真 (a) Set-1, (b) Set-2



(a)



(b)

图 4-1-4 HiNA 投影系の波面形状 (a) Set-2, (b) Set-3

## 4-2 EUV 露光装置光学系 (EUV1) の開発

これまでに開発してきた軟 X 線結像光学系技術の製品への応用展開として、フルフィールド EUV 露光装置 EUV1 を開発した。EUV1 は 26 mm×2 mm のフィールドをスキャンして 26 mm×33 mm の領域を露光するスキャン露光装置である。投影系の NA は 0.25、倍率は 1/4 である。照明系はコヒーレンスファクター  $s = 0.8$  の通常照明だが、絞りを入れることにより変形照明も可能である。EUV1 は 2 台製作した。1 台は Selete (Semiconductor Leading Edge Technologies, Inc.; 株式会社 半導体先端テクノロジーズ) へ納入され、産業技術総合研究所のスーパークリーンルームに設置されて、EUV リソグラフィのインテグレーション技術の研究開発に活用された[1]。もう 1 台はニコン熊谷製作所に設置され、ユーザー評価に使用された。

### 4-2-1 EUV1 の照明系

露光装置の照明系は、単にマスク上を均一に照明するだけでなく、投影系の入射瞳面上での光線の分布 (照明条件) を制御する役割を果たす。そのような二つの役割を両立するために小松田によって考案された EUV 露光装置用の照明系を図 4-2-1. に示す[2]。反射型のオプティカルインテグレータであるフライアイミラーを用いる点が特徴である。上流側のフライアイミラー (FE1) は照明されるマスクと共役の位置に配置され、下流側のフライアイミラー (FE2) は投影系の入射瞳と共役の位置に配置される。図 4-2-2. (a) に FE1、(b) に FE2 の反射面の形状を示す。何れもセグメント化された多数の反射面を持つ。FE1 の各セグメントは照明領域と同じ形状の円弧上の形状を有し、FE2 の各セグメントは正方形の形状を有する。FE1 のセグメントと FE2 のセグメントは 1 対 1 に対応する。図 4-2-3. に、その様子を示す。光源から来た光束は FE1 で多数の光束に分割され、FE2 の各セグメント上に光源の像を結像する。FE2 は、これを反射してマスク上で円弧上の照明領域に重畳させて均一な照度分布を実現する。FE2 は投影系の入射瞳と共役の位置にあるので、FE2 上での光源像の分布が照明条件に対応する。EUV1 は、FE2 上に絞りを挿入できるようになっており、これを使って照明条件を変化させた。

図 4-2-4 に作製したフライアイミラーの写真を示す。図 4-2-4 (a), (b) は FE1 ブロック、(c), (d) は FE2 ブロックである。(b), (d) は、それぞれ (a), (c) の拡大像を示す。製造工程の詳細はここでは省略するが、金属を切削加工して形状を作り、反射面には Mo/Si 多層膜が成膜されている。

図 4-2-5 に EUV1 の照明系を可視光で評価した結果を示す。円弧上の照明領域が均一に照明されている。フィールドの中央部および端部における投影系の入射瞳面上での光線の強度分布も併せて示した。フライアイミラーによって分割された光源像が、入射瞳面内に均一に分布している。フィールド内のどの位置でも同じ条件の照明がなされていることが分かる。

#### 4-2-2 EUV1の投影系

EUV1では図4-2-6に示すような6枚の反射面からなる投影系を用いた[3]。収差を補正するために6枚の反射面の形状は全て高次非球面である。ウェハ側で2mm幅の領域で収差が補正されたリングフィールド光学系である。スキャン露光により26mm×33mmの領域を露光する。ウェハ側は従来の露光装置の投影系と同様にテレセントリックな配置になっているが、マスク側は反射型マスクを使用するために非テレセントリックな配置になっている。この投影系のNAは0.25、倍率は1/4である。

光学系の解像力は $k_1 \cdot \lambda / NA$ で与えられる。 $\lambda$ は露光波長で、EUV1では13.5nmである。 $k_1$ はプロセスに依存する係数で、通常の照明条件でラインアンドスペース(L/S)パターンを露光した場合、 $k_1$ は0.5である。従って、この投影系は27nm L/Sまでの解像力が期待できる。変形照明や位相シフトマスク等の超解像技術を適用すれば、 $k_1$ を0.5以下にできるので更に解像力を上げることが可能である。光リソグラフィの経験によれば、変形照明のような弱い超解像技術を用いると0.4程度の $k_1$ を実現できる。渋谷レベンソン型位相シフトマスクのような強い超解像技術を用いると、0.3程度の $k_1$ を実現することができる。

他の誤差要因を無視して、光学系の収差は各ミラーの面形状誤差の二乗和平方根で与えられると考えると、6枚のミラーからなる光学系の収差は各ミラーの面形状誤差の2.6倍になる。2倍するのは、ミラーの場合は光が往復するためである。波面収差1nm RMS以下を実現するためには、1枚のミラーに許容される形状誤差は0.2nm RMS以下になる。このような高精度の非球面を加工するためには、まず面形状の計測技術の向上が必要であった。そのために、新たに非球面計測用の高再現性干渉計を開発した。高再現性干渉計は、ミラーの研磨加工を行う際に何度も繰り返し測定して補正量を求めるために使用するもので、測定再現性を追求した計測器である。

図4-2-7に従来から面形状測定に使われているフィゾー型干渉計(a)と高再現性干渉計(b)の構成を示す。フィゾー型干渉計は参照面で反射した光と被検面で反射した光との干渉縞を計測する。即ち、参照面と被検面の比較計測が行われる。参照面は一般に球面なので、非球面形状を計測する際には、参照面と被検面の間に球面波を所定の非球面波に変換するヌルレンズを挿入する。このような従来のフィゾー型干渉計では、被検面で反射した光路は参照面で反射した光路よりもヌルレンズを往復する分だけ長くなる。この光路の異なる部分で空気揺らぎが生じると計測誤差の要因となる。高再現性干渉計は、そのような空気揺らぎの影響を取り除くために、参照面を被検面の直上に配置した。そのため、参照面の形状は球面ではなく、測定しようとする被検面の裏返しの形状の非球面である。このような配置にすることにより、参照面で反射した光路と被検面で反射した光路の差は殆ど無くなるので、空気揺らぎの影響を除去することができる。

図4-2-8(a)に製作した高再現性干渉計を示す。この写真では本体が剥き出しになっているが、実際には本体を恒温チャンバーで覆って運用している。図4-2-8(b)は本装置の構成図を示す。被検査ミラーは反射面が上向きの状態で測定される。本装置で計測できるミラ

一の最大有効径は 300 mm である。本装置の測定再現性を評価したところ、被検物の載せ降ろしをしない繰り返し測定の再現性で 6 pm RMS、被検物の載せ降ろしを行った場合でも 17 pm RMS という非常に高精度な測定が可能であることが確認された。

高精度な形状精度を維持するためには、自重変形を無視することはできない。0.2 nm RMS 程度の形状は、ミラーの姿勢を変えただけで容易に変形してしまう。そこで、投影系用のミラーは、使用時と同じ姿勢で面形状計測を行う方針とした。そのために、図 4-2-9 に示すような反射面が下向きの状態で測定を行う高精度干渉計を別途製作した。本装置も計測できるミラーの最大有効径は 300 mm である。

以上のような高再現性干渉計を駆使して、非球面ミラーの研磨加工を行った。図 4-2-10 に加工結果の一例を示す。グラフは空間周波数に対するパワースペクトル密度を示す。LSFR, MSFR, HSFR の測定結果も併せて示した。LSFR は 27 pm RMS、MSFR は 70 pm RMS、HSFR は 66 pm RMS が得られており、広い空間周波数領域で良好な形状精度が得られた。

加工した非球面ミラーには反射コーティングとして Mo/Si 多層膜を成膜した。成膜にはイオンビームスパッタリングとマグネトロンスパッタリングを用いた。図 4-2-11 に多層膜ミラーの評価結果の一例を示す。光学系に使用する多層膜ミラーは、高反射率であるだけでなく、変形を抑制するために応力が低減されていることや、ミラー面上での光線の入射角分布に合わせて膜厚分布が設けられていることを両立しなければならない。図 4-2-11 (a) は反射率の測定結果を示す。波長 13.5 nm で 67 % の反射率が得られている。この多層膜ミラーは、何もしないと約 -400 MPa の圧縮応力を有するが、第 2 章第 2 節に説明した応力相殺層を用いて約 -170 MPa に低応力化されている。図 4-2-11 (b) は、この多層膜ミラーの膜厚分布の測定結果を示す。目標とする膜厚分布に対して、0.1 % 以内の誤差で分布が制御されている。

図 4-2-12 は、6 枚の非球面多層膜ミラーからなる EUV1 の投影系を示す。ミラーのホールド機構は、前節で説明した HiNA M2 のホールド機構に更に改良を加えて保持変形を極力抑えた機構を用いた。各ミラーはピエゾで伸縮する平行リンク機構で保持されており、6 自由度で姿勢を変化させることができる。本投影系は、ミラーの温調機構も備えている。ミラーに直接冷媒配管を取り付けてしまうと、振動により光学系の精度が劣化するので、非接触の輻射冷却を採用した。各ミラーの裏面にはペルチェ素子で温度制御された輻射板が設けられており、これでミラーの温調を行う。

投影系の組み立て調整には、EUV 光による波面計測ではなく可視光による波面計測を用いた。可視光で測定した波面から、計算により EUV 光の波面を算出して、それが最適値になるようにミラーの調整を行った。EUV1 実機に搭載する投影系は 2 本製作した。図 4-2-13 (a) は 1 本目の投影系 (PO #1) の波面計測結果を示す。ウェハ上で 26 mm × 2 mm の領域内の 33 ヶ所で波面を測定した。波面収差は、最大で 0.8 nm RMS、最小で 0.3 nm RMS、平均で 0.6 nm RMS であり、1 nm RMS 以下の波面収差を実現した。図 4-2-13 (b) には、2 本目の投影系 (PO #2) の波面計測結果を示す。波面収差は、最大で 0.5 nm RMS、最小で 0.3 nm RMS、

平均で 0.4 nm RMS であり、1 本目の投影系よりも更に波面収差を低減することができた。後述するように、波面収差だけでなくフレアも PO #2 の方が改善された。

#### 4-2-3 EUV1 の露光結果

まず PO #1 を使って露光フィールドの中央部で静止露光を行った。照明条件は、 $s$  0.8 の通常照明である。図 4-2-14 に elbow 型のパターンを露光した結果を示す。図 4-2-14 (a), (d) は 32 nm L/S、(b), (e) は 35 nm L/S、(c), (f) は 45 nm L/S である。図 4-2-14 (a) ~ (c) は露光フィールドに対してラインの向きが水平と垂直に配置されており、(d) ~ (f) は 45° 傾けて配置されている。いずれの方向のラインも良好に解像している。

図 4-2-15 は、L/S パターンの露光結果を示す。図 4-2-15 (a) ~ (f) は、それぞれ 28 nm L/S, 30 nm L/S, 32 nm L/S, 35 nm L/S, 40 nm L/S, 45 nm L/S である。28 nm L/S は端の方に少し欠陥があるが、少なくとも 30 nm L/S までは明瞭に解像した。

図 4-2-16 は、コンタクトホールの露光結果を示す。図 4-2-16 (a) ~ (f) は、それぞれ 28 nm C/H, 30 nm C/H, 32 nm C/H, 35 nm C/H, 40 nm C/H, 45 nm C/H である。多少の欠陥はあるが、28 nm C/H まで解像した。

次に、露光フィールド全体の静止露光評価を行った。図 4-2-17 にその結果を示す。図 4-2-17 (a) に示すように露光フィールド内の 11 ヶ所で露光結果を調べた。図 4-2-17 (b) は、32 nm の 45° 傾いた elbow パターンの露光結果を示す。図 4-2-17 (c) は、32 nm L/S の露光結果を示す。いずれも、フィールド内のどの場所でも明瞭に解像している。図 4-2-17 (d) ~ (f) は、このとき露光フィールドの中央部で露光した 26 nm L/S, 27 nm L/S, 28 nm L/S パターンを示す。前述の図 4-2-15 のときよりもレジストプロセスが改善されたため、27 nm L/S パターンまで明瞭に解像している。これは、解像力  $k_1 \cdot \lambda / NA$  の  $k_1$  がちょうど 0.5 に対応しており、当初の期待通りの高い解像力を得ることができた。この後、スキャン露光の評価を実施し、静止露光と同様の解像力が得られることを確認した。この後の実験データは全てスキャン露光の結果である。

通常照明で予想通りの解像力が得られたので、次は、変形照明による解像力向上の効果を調べた。図 4-2-18 は、変形照明の一種である dipole 照明による露光実験の結果を示す。ここでは図 4-2-18 (a) に示すように、露光フィールド内の 4 ヶ所での露光結果を調べた。投影系の入射瞳と共役の位置にある、照明系 FE2 の直上に絞りを挿入して変形照明を実現した。具体的には、投影系の入射瞳の図 4-2-18 (b) に示す黄色い部分だけを照明するようにした。図 4-2-18 (c) に、28 nm L/S から 19 nm L/S までの L/S パターンの露光結果を示す。露光フィールドの中央部では 21 nm L/S、端部では 22 nm L/S まで解像し、変形照明による解像力向上が確認された。22 nm L/S の解像力は、 $k_1$  が 0.4 に対応する。

更に解像力の限界を調べるために、渋谷レベンソン型の位相シフトマスクを用いた露光実験を行った。位相シフトマスクは、Intel から支給されたものを使用した[4]。ここでは、収差の小さい PO #2 を使用し、 $s$  0.3 の通常照明で行った。図 4-2-19 に 28 nm L/S から 16 nm L/S の露光結果を示す。21 nm L/S 以下になると欠陥が生じているが、これは主としてパタ

ーン倒れ等レジストの性能に起因するものである。16 nm L/S でもパターンの一部は観察されており、レジストの性能が向上すれば解像できると考えられる。16 nm L/S の解像力は、 $k_1$  が 0.3 に対応する。

以上のように、EUV リソグラフィにおいても、従来の光リソグラフィで用いられてきた超解像技術が有効であることが確かめられた。

次に、フレアの評価について述べる。投影系のフレアの測定は Kirk 法で行った[5]。直径 2 mm のパターンを用いた場合のフレア（暗部の中心に来る光の明部に対する強度比）は、PO #1 が 16 %、PO #2 が 8.5 %であった。ミラーの面形状データから算出したフレアは PO #1 が 15 %、PO #2 が 8 %であり、実測値と良く一致した[6]。ミラーの MSFR と HSFR の改善により、PO #2 のフレアは PO #1 の約半分に改善された。

図 4-2-20 はフレアの影響を評価した露光実験の結果を示す。図 4-2-20 (a) に示すような、パターン周辺が明部の領域と暗部の領域に、それぞれパターン領域の大きさの異なる 32 nm L/S パターン（ウェハ上寸法）を設けたマスクを用いて露光を行い、各パターン領域の中央部のレジストパターンを観察した。パターン領域の寸法は、一辺の長さが 0.5 mm から 50 mm の範囲で変化させた。パターン領域が小さいほど周辺からのフレアの影響を受けやすくなる。照明条件は  $s$  0.8 の通常照明を用い、投影系は PO #1 と PO #2 の比較を行った。同一のマスクで一度に露光しているので、露光量はどの領域でも同じである。露光量は、一番大きい 50 mm のパターン領域の中心部で最適化した。

図 4-2-20 (b) に、パターン領域の周辺が暗部の場合の露光結果を示す。フレアが大きい場合は、パターン領域を小さくしていくと、フレアとしてパターン領域の外へ出て行く光の割合が増加して露光量が足りなくなる。比較的フレアの大きい PO #1 では、パターン領域が 0.5 mm になると露光量が足りなくなり、レジストパターンを解像できなくなっている。比較的フレアの小さい PO #2 では、パターン領域が 0.5 mm になってもレジストパターンを解像した。

図 4-2-20 (c) は、パターン領域の周辺が明部の場合の露光結果を示す。フレアが大きい場合は、パターン領域を小さくしていくと、フレアとしてパターン領域の外から入ってくる光の割合が増加して露光量が過剰になる。比較的フレアの大きい PO #1 では、パターン領域が 0.5 mm になると露光量が過剰になり、レジストパターンが消失しかけている。比較的フレアの小さい PO #2 では、パターン領域が 0.5 mm でもレジストパターンを解像した。

以上のように、投影系のフレア改善による結像性能の向上を確認することが出来た。

### 本節に関連する主論文

- | **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and H. Iwata, “Development of optics for EUV lithography tools”, Proc. SPIE, **6517**, 65170J, (2007).
- | **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and H. Iwata, “Development status of projection optics and illumination optics for EUV1”, Proc. SPIE, **6921**, 69210Q, (2008).
- | **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, M. Shiraishi, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and J. Nishikawa, “Development progress of optics for extreme ultraviolet lithography at Nikon”, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, **8**, 041507, (2009).

### 参考文献

- [1] I. Mori, O. Suga, H. Tanaka, I. Nishiyama, T. Terasawa, H. Shigemura, T. Taguchi, T. Tanaka and T. Itani, Proc. SPIE, **6921**, 692102, (2008).
- [2] H. Komatsuda, Proc. SPIE, **3997**, 765, (2000) .
- [3] 高橋友刀, 特開 2004-258178
- [4] P. Yan, A. Myers, Y. Shroff, M. Chandhok, G. Zhang, E. Gullikson and F. Salmassi, Proc. SPIE, **7969**, 79690G, (2011).
- [5] J. Kirk, Proc. SPIE, **3331**, 72, (1998).
- [6] M. Shiraishi, T. Oshino, K. Murakami, H. Chiba, Jpn. J. Appl. Phys., **50**, 06GB04, (2011).

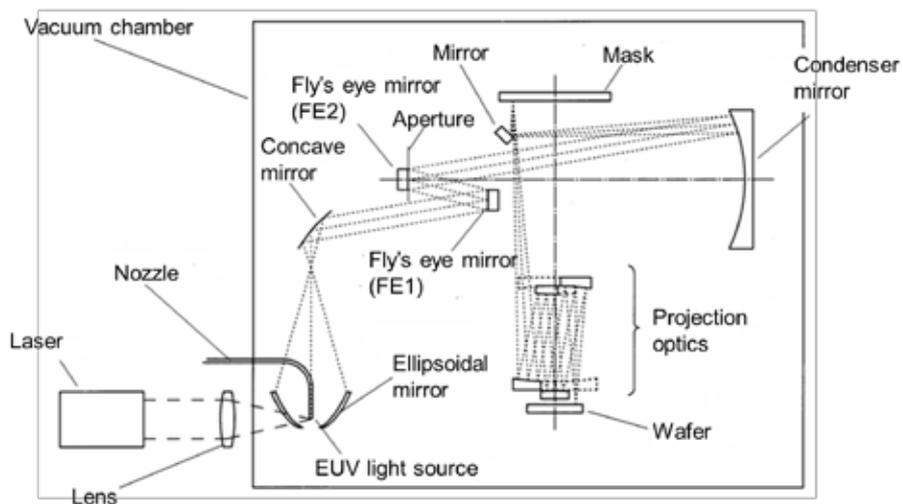
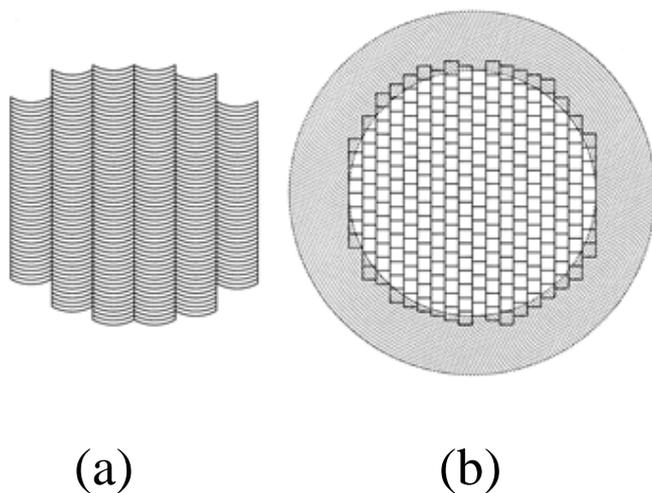


図 4-2-1 EUV 露光装置用の照明系



(a)

(b)

図 4-2-2 フライアイミラーの反射面の形状 (a) FE1, (b) FE2

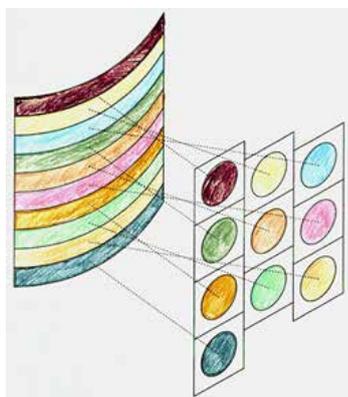


図 4-2-3 FE1 と FE2 のセグメントの対応

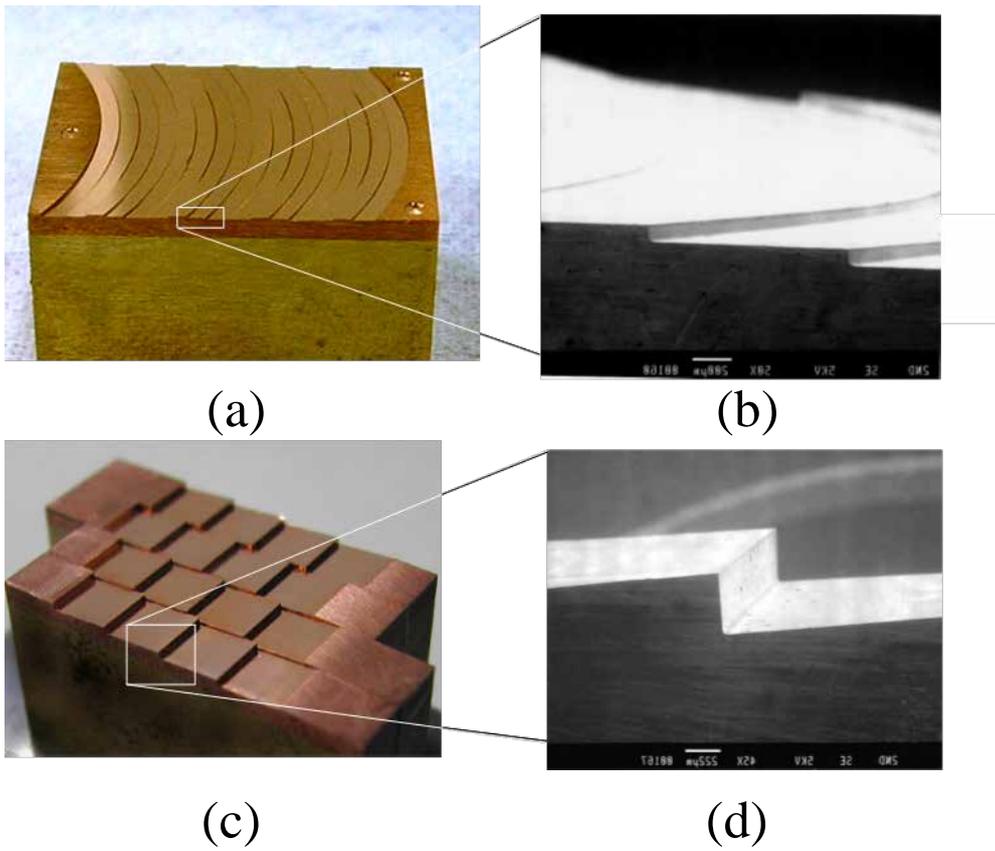


図 4-2-4 フライアイミラー (a), (b) FE1, (c), (d) FE2

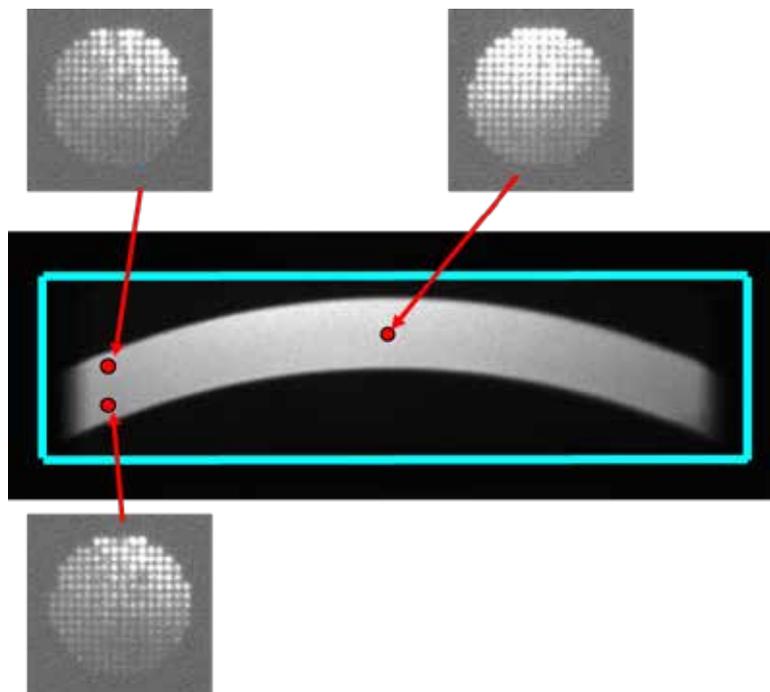


図 4-2-5 EUV1 照明系の可視光による評価

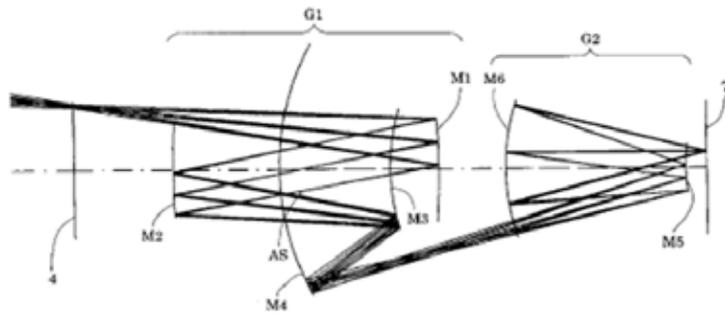


図 4-2-6 6枚の反射面からなる投影系

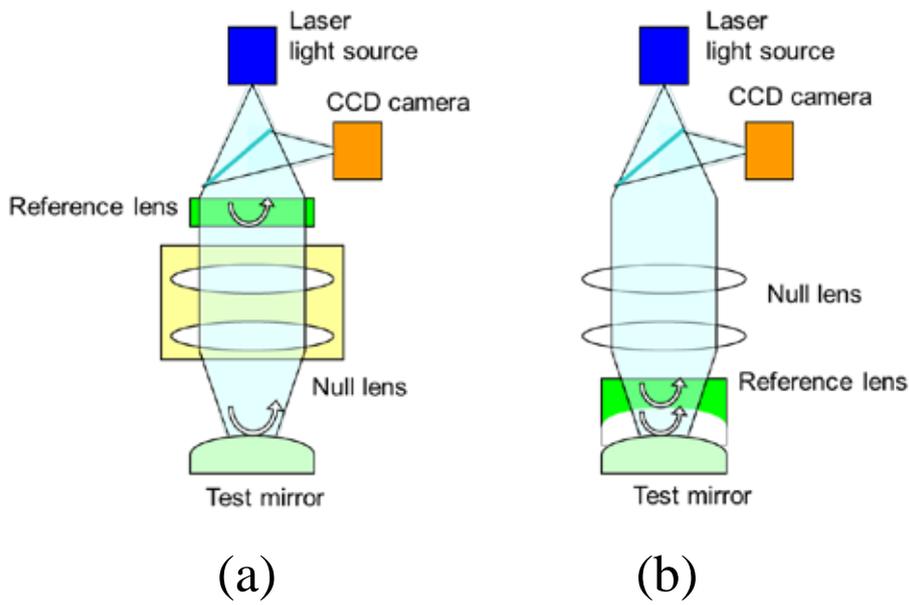


図 4-2-7 面形状測定に使われる干渉計の構成図  
(a) 従来のフィゾー型干渉計、(b) 高再現性干渉計

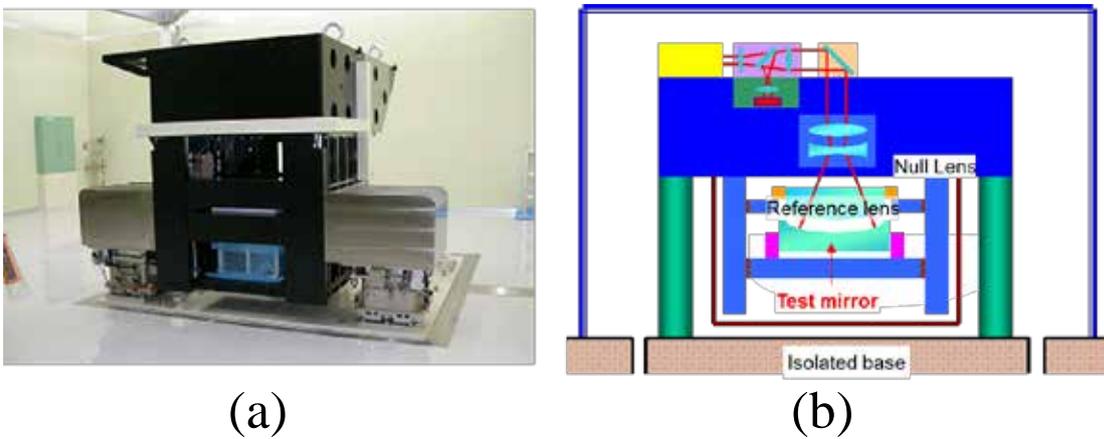
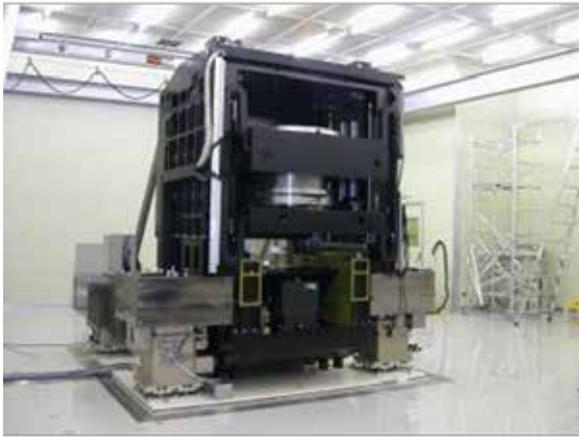
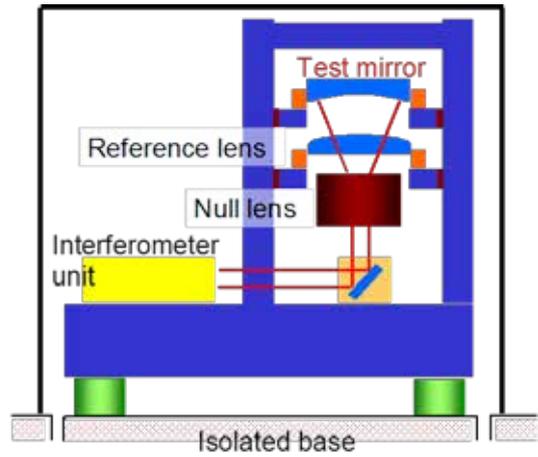


図 4-2-8 上向きミラー測定用の高再現性干渉計  
(a) 外観写真、(b) 構成図



(a)



(b)

図 4-2-9 下向きミラー測定用の高再現性干渉計  
(a) 外観写真、(b) 構成図

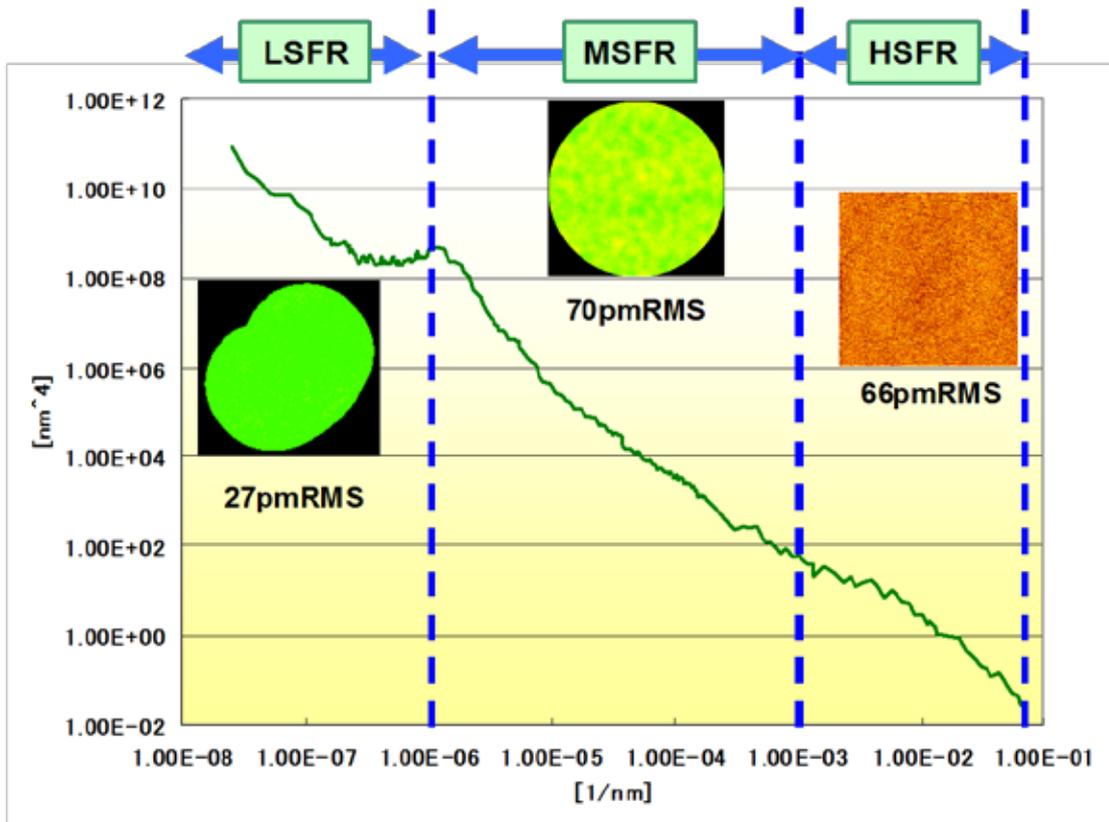
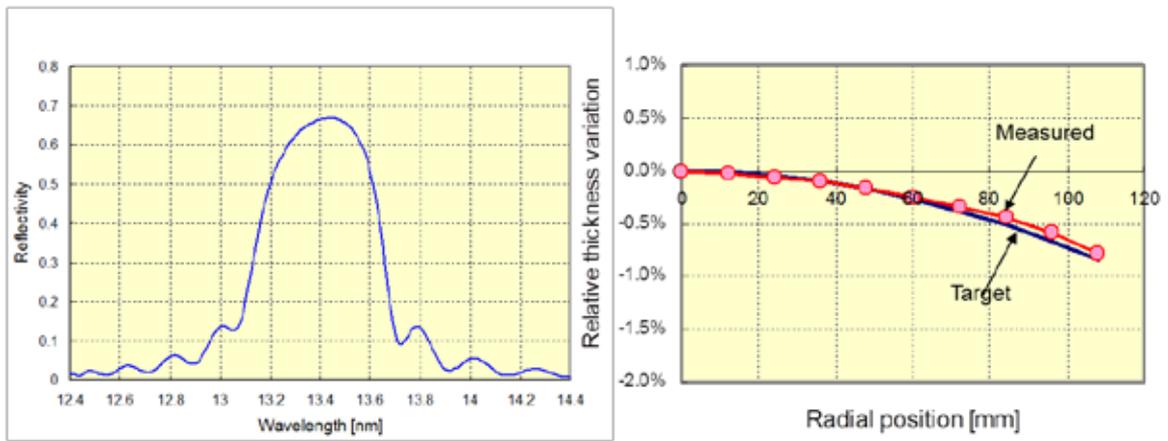


図 4-2-10 非球面ミラーの加工結果の一例



(a)

(b)

図 4-2-11 多層膜ミラーの評価結果の一例

(a) 反射率、(b) 膜厚分布

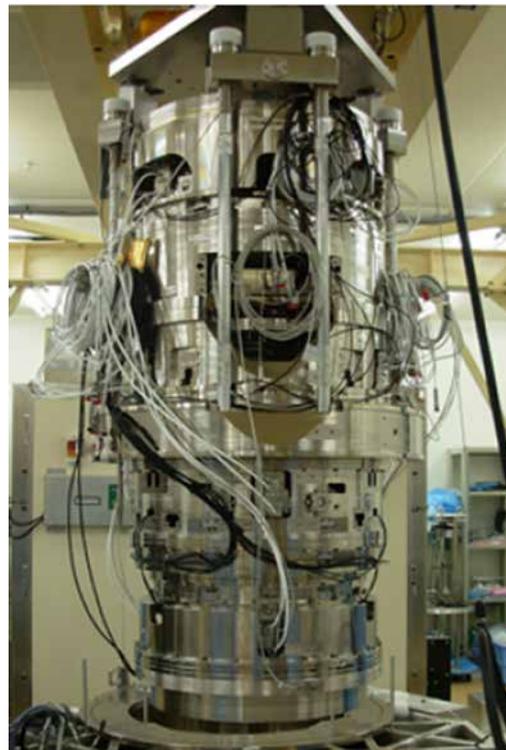
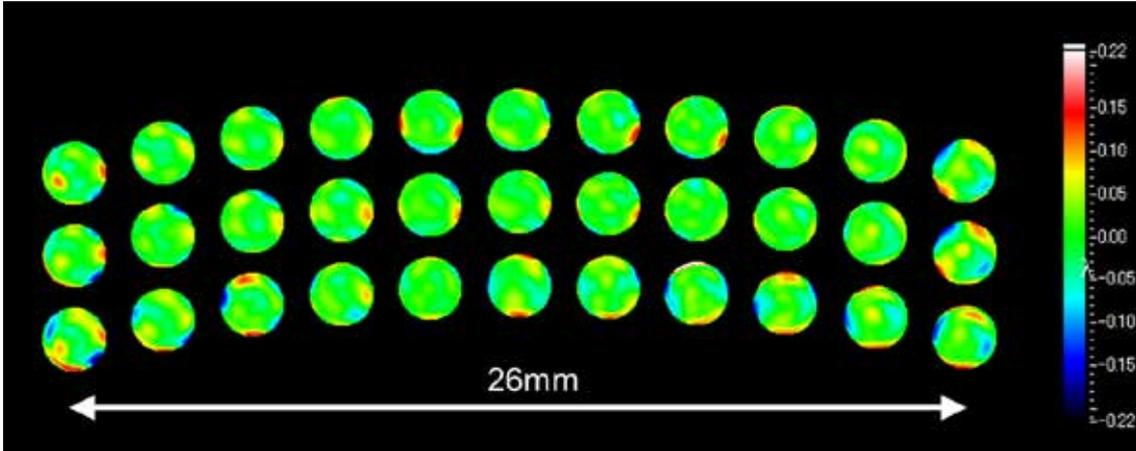
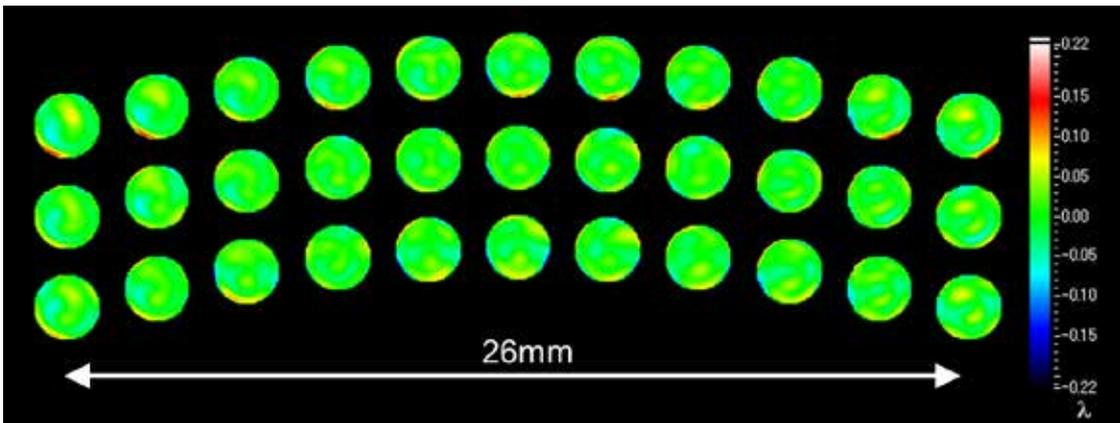


図 4-2-12 EUV1 の投影系



(a)



(b)

図 4-2-13 EUV1 投影系の波面収差 (a) #1 PO, (b) #2 PO

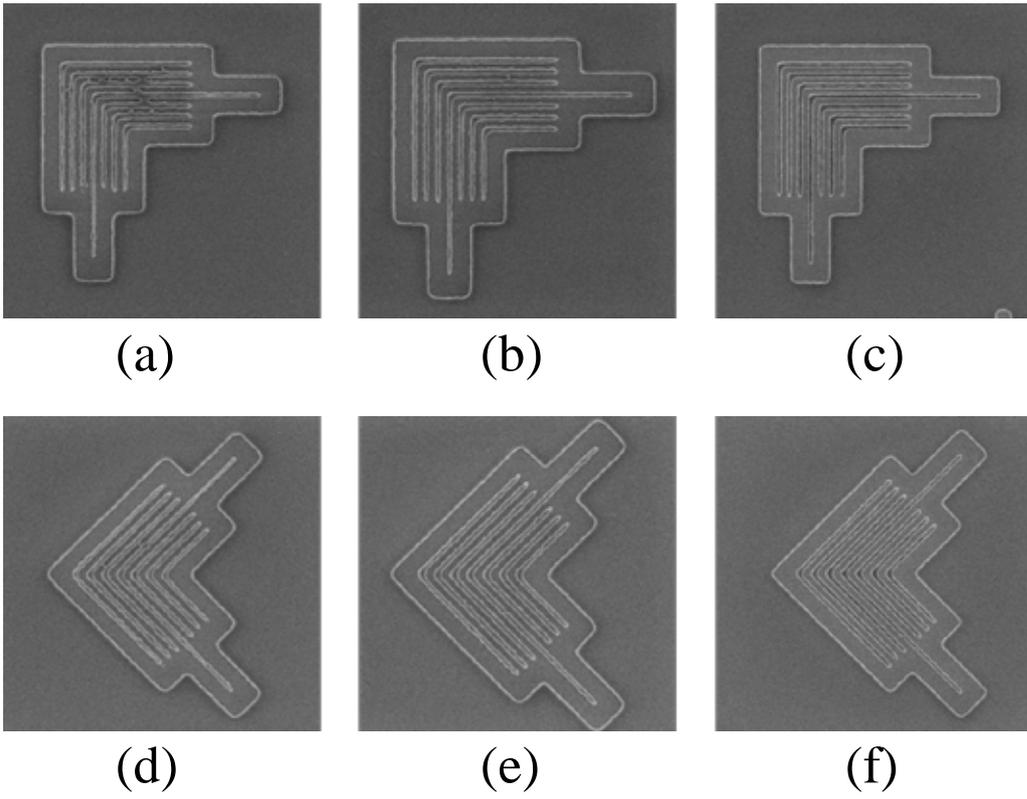


図 4-2-14 elbow 型のパターンの露光結果  
 (a), (d): 32 nm L/S, (b), (e): 35 nm L/S, (c), (f): 45 nm L/S

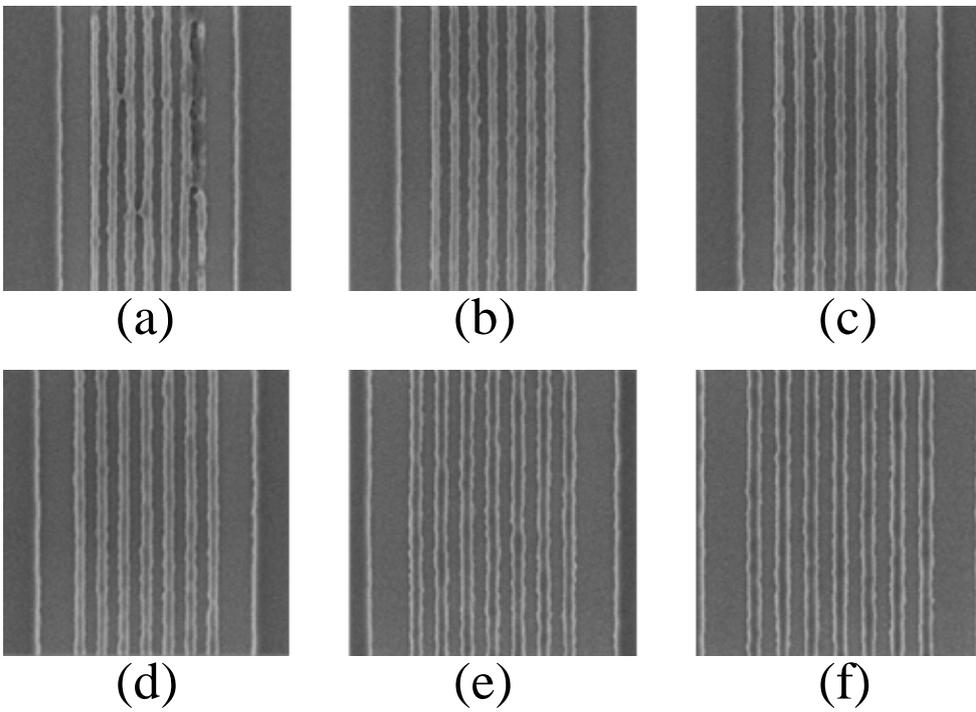


図 4-2-15 L/S パターンの露光結果  
 (a): 28 nm L/S, (b): 30 nm L/S, (c): 32 nm L/S, (d): 35 nm L/S, (e): 40 nm L/S, (f): 45 nm L/S

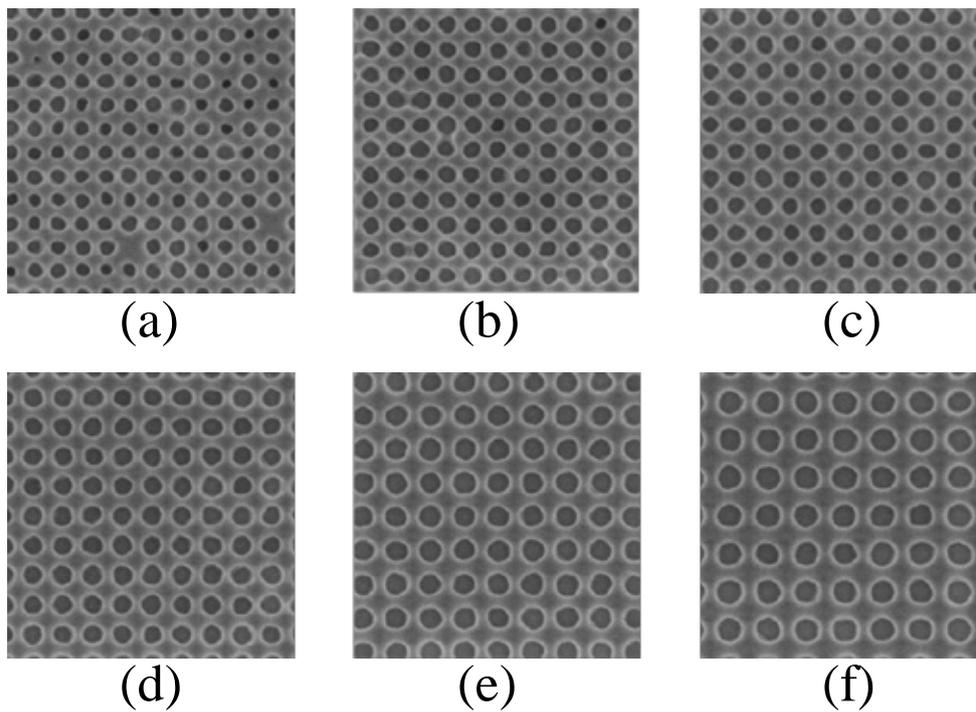


図 4-2-16 コンタクトホール露光結果

(a): 28 nm C/H, (b): 30 nm C/H, (c): 32 nm C/H, (d): 35 nm C/H, (e): 40 nm C/H, (f): 45 nm C/H

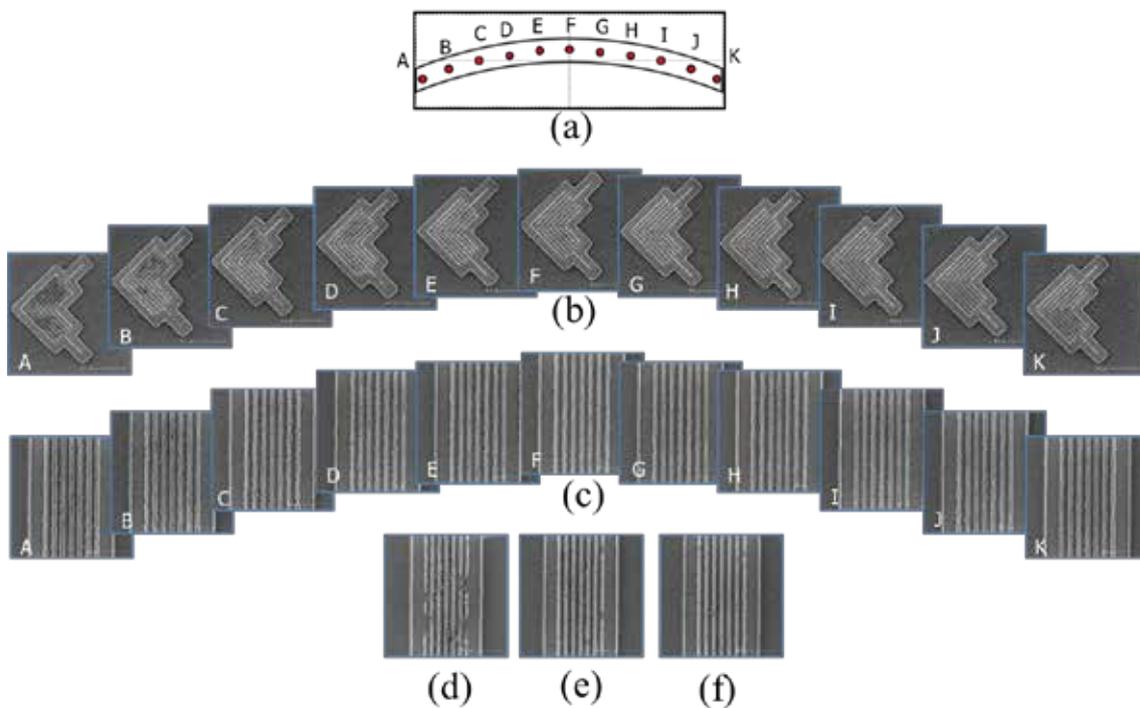


図 4-2-17 露光フィールド全体の静止露光結果

(a): 評価位置, (b): 32 nm elbow, (c): 32 nm L/S, (d): 26 nm L/S, (e): 27 nm L/S, (f): 28 nm L/S

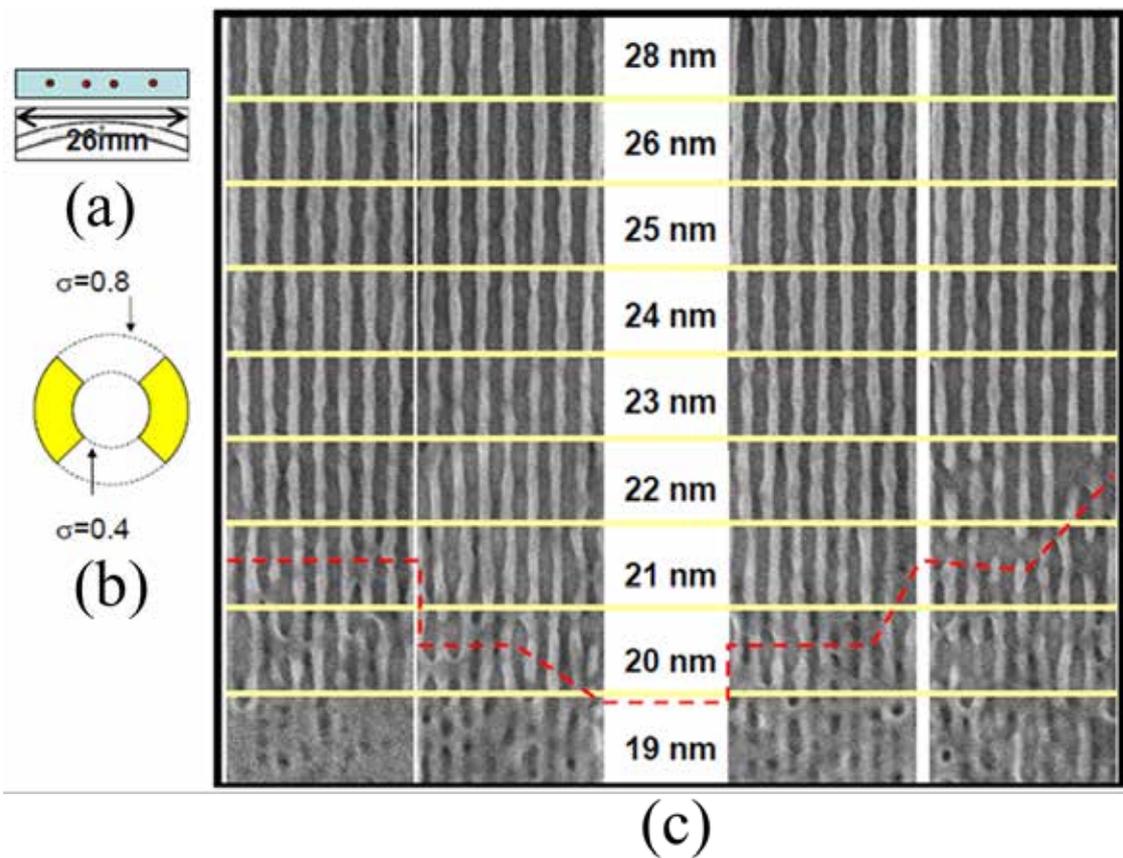


図 4-2-18 dipole 照明による露光結果  
 (a): 露光フィールド内の評価位置、(b): 投影系入射瞳状の照明光の分布、(c): 露光結果

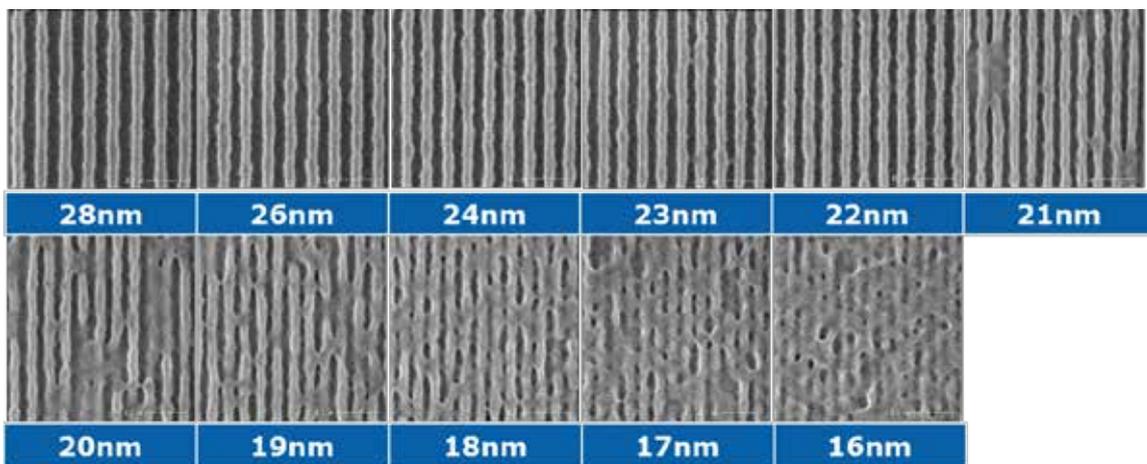


図 4-2-19 位相シフトマスクを用いた露光結果

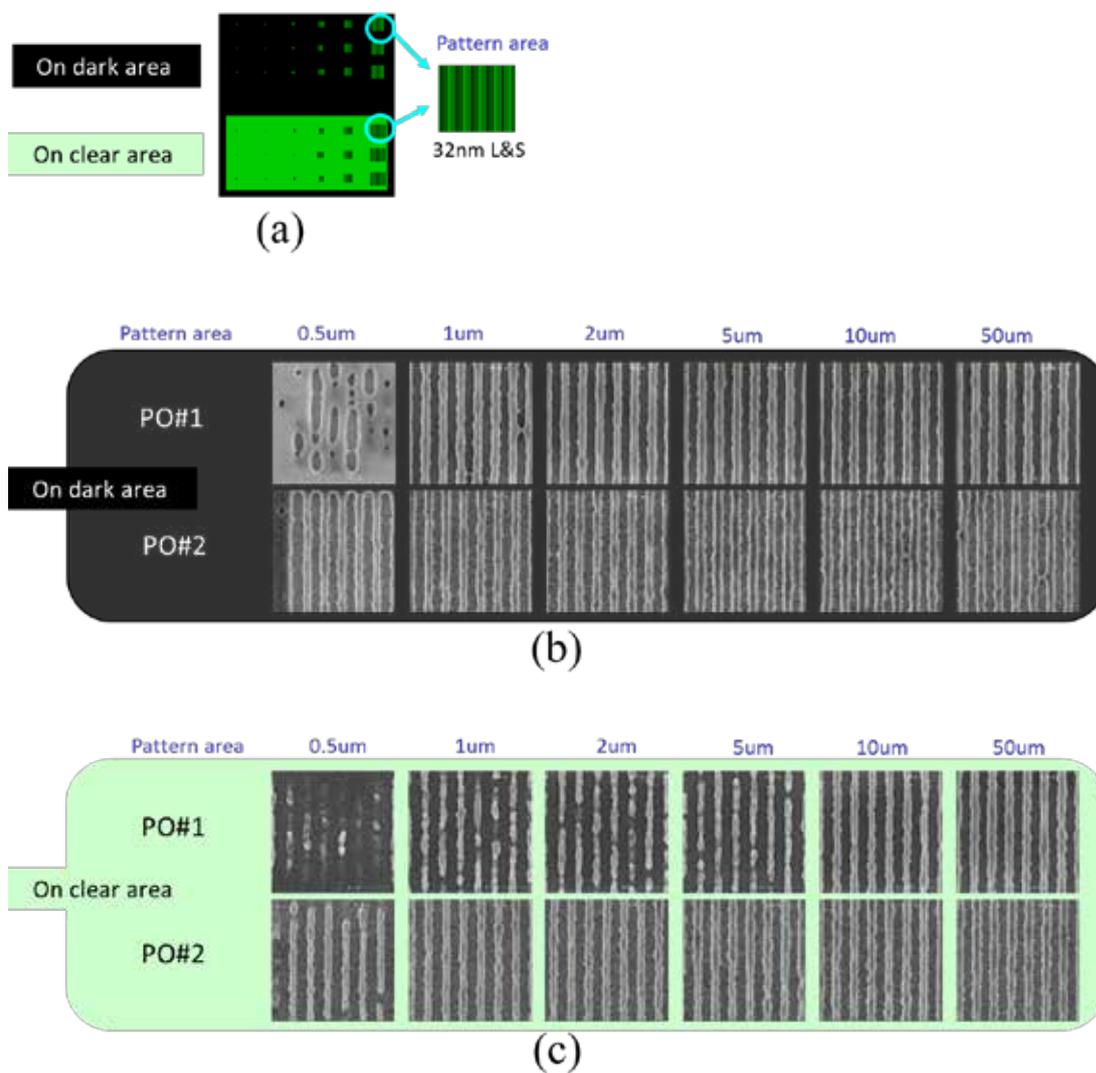


図 4-2-20 フレアの影響を評価した露光実験結果  
 (a): 実験に使用したマスク、  
 (b): パターン領域の周辺が暗部の場合の露光結果、  
 (c): パターン領域の周辺が明部の場合の露光結果

### 4-3 EUV 露光装置におけるコンタミネーション制御

EUV 露光装置において光学系のコンタミネーションによる劣化は重要な課題である。EUV 露光装置では真空環境下で露光が行われるが、そこには多少なりともハイドロカーボンやフルオロカーボン等のカーボンを含む高分子が残留している。これらの高分子は光学素子の表面で吸着と脱離を繰り返しているが、ここへ EUV 光が照射されると、光学素子の内部から光電子が発生して、この光電子が光学素子表面に吸着しているハイドロカーボンやフルオロカーボン等を分解し、その結果として表面にカーボンコンタミネーションが成長する[1]。

このようなカーボンコンタミネーションは光学素子の反射率を低下させてしまうので、付着を防止する技術、付着してしまったものを洗浄する技術の開発が必要である。本研究では、主に酸素を用いたカーボンコンタミネーションの付着防止、および洗浄技術の開発を行った。

一方、清浄度の高い真空環境中で最後に残る気体分子は水である。真空環境中から水を排除するにはベーキングが有効だが、非常に高精度な光学系や機構系を内部に備えた EUV 露光装置では、通常の真空装置のように高温でベーキングを行うことが出来ない。水蒸気雰囲気中で光学素子に EUV 光を照射すると、光学素子の内部で発生した光電子は、表面に吸着した水分子を分解し、その結果発生した酸素原子が、光学素子の表面を酸化させる[2]。光学素子の表面が酸化すると反射率が低下してしまうので、これを防ぐために耐酸化性に優れた保護層 (capping layer) を多層膜ミラーの表面に設けることが行われている。現在は Ru が代表的な capping layer 材料として広く使われており、最上層を Si 層にした通常の Mo/Si 多層膜ミラーよりも耐酸化性に優れているが、量産対応の EUV 露光装置では未だ耐酸化性が足りないと予測される。本研究では、酸化物を用いて従来よりも格段に耐酸化性を向上した capping layer を開発した。

また、本研究では、シロキサン等の Si を含んだガスがコンタミネーションの原因になることを新たに突き止めた。他のコンタミ源と比較して反射率の低下速度は速く、酸素による洗浄では除去することが出来ないのが厄介な問題である。従来から知られていたカーボンコンタミネーションや酸化とは別の第三のコンタミネーションとして注意しなければならない。

一連の実験には九州シンクロトロン光研究センターの放射光施設 SAGA Light Source (SAGA-LS) を使用した[3]。SAGA-LS は蓄積電子エネルギー 1.4 GeV、蓄積電流 200 mA、周長が 75.6 m の放射光光源である。この BL 18 に EUV 光によるコンタミネーション研究専用のビームラインを建設した。図 4-3-1 に建設したビームラインの構成図を示す。図 4-3-1 (a) は側面図、(b) は上面図である。ベンディングマグネットで発生した放射光を、2 枚の斜入射ミラーで照射実験装置へ導いている。図 4-3-2 は、照射実験装置の構成図を示す。放射光光源から来た白色光を、Mo/Si 多層膜をコートしたミラーで下方へ折り曲げて試料上に集光する。この多層膜ミラーと Zr フィルターで EUV 光を単色化している。試料に照射される

EUV 光の中心波長は 13.5 nm で、バンド幅は 1.1 nm である。試料上での集光径は  $\phi$ 0.4 mm である。試料で反射した EUV 光はフォトダイオードへ入射し、照射中の反射率の変化が測定される。このフォトダイオードは向きを変えられるようになっており、同一の検出器で直接光を測定して反射率の絶対値を算出することができる。照射実験装置の真空チャンバー内の背圧は  $5 \times 10^{-7}$  Pa で、様々なガスを導入しながら照射実験ができるようになっている。図 4-3-3 に実験装置の写真を示す。図 4-3-3 (a) は EUV 光照射実験装置、(b) は BL 18 の全景を示す。

#### 4-3-1 カーボンコンタミネーション堆積の特性評価

前述の EUV 光照射実験装置を用いて、様々な有機物ガスを導入しながら Mo/Si 多層膜試料に EUV 光を照射してカーボンコンタミネーションの堆積速度を調べた。当初は炭化水素材料を用いて実験を行って実機における光学系の劣化速度を見積もっていたが、EUV 露光装置 EUV1 の運用を開始するとカーボンコンタミネーションによる照明系の急速な透過率の劣化に直面した。コンタミの原因は、主として冷媒として用いられていたフッ素系ガスのリークであったが、その圧力と EUV 光の照度から予測される速度よりも格段に速い速度でコンタミが成長した。この原因を明らかにするために、実機 (EUV1) に近い条件になるように EUV 光の照度を下げた照射実験を行った。メッシュ状の ND フィルターを挿入して照度を下げることによって、EUV 光の照度を  $0.002 \sim 8 \text{ W/cm}^2$  の範囲で変化させて実験した。

図 4-3-4 に照射実験結果を示す。フッ素系ガスの主成分である perfluorohexane ( $\text{C}_6\text{F}_{14}$ ) を  $5 \times 10^{-5}$  Pa 導入しながら、最上層が Si の Mo/Si 多層膜ミラー試料上に EUV 光を照射した。横軸は積算照射量、縦軸は反射率の相対変化を示す。図 4-3-4 (b) は、図 4-3-4 (a) の積算照射量の小さい範囲を拡大したものである。この実験から、積算ドーズ量 (積算照射エネルギー) が同じでも、照度によって反射率の低下量は大きく異なることが判明した。それまでは、コンタミによる反射率の低下は積算ドーズ量のみ依存して照度には依存しないと考えていたが、この仮定は明らかに誤っており、非常に大きな照度依存性があることが明らかになった。

図 4-3-5 は、 $\text{C}_6\text{F}_{14}$  を導入したときのカーボンコンタミネーションの成長速度の照度依存性の両対数プロットを示す。参考のために、それまでの照射実験に用いてきた decane ( $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$ ) を  $5 \times 10^{-5}$  Pa 導入したときのコンタミネーション成長速度も示す。 $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$  を導入した場合は、傾きが 1 の直線に乗っており、コンタミネーション成長速度は照度に比例すること、即ち、カーボンコンタミネーションの成長量は積算照射量に比例することが分かる。

一方、 $\text{C}_6\text{F}_{14}$  を導入した場合は、 $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$  の場合よりもコンタミネーションの成長速度は大きく、また、照度の比較的低い領域と高い領域とで異なる挙動を示した。照度が比較的低い領域では、 $\text{C}_{10}\text{H}_{22}$  の場合と同様に、カーボンコンタミネーション成長速度は照度に比例するが、照度が比較的高い領域では、コンタミネーション成長速度は照度に依存せず一定値となる。カーボンコンタミネーションの成長速度は、EUV 光の強度とコンタミネーション

原因物質の供給量で決まる[4]。照度の比較的低い領域では、原因物質は十分に供給されており、コンタミネーション成長速度は EUV 光の強度に比例する。一方、照度が比較的高い領域では、原因物質の供給がコンタミネーション成長速度を決めるようになるので照度には依存しなくなる[5]。

これまでの放射光を用いた照射実験においては、比較的照度の高い領域で実験を行い、その結果から、カーボンコンタミネーション成長速度は照度に比例すると仮定して、実機上の比較的照度の低い領域のカーボンコンタミネーション成長速度を推定していた。そのため、 $C_6F_{14}$  の場合には、実際の値よりもずっと低い成長速度を予測してしまっていたのである。このような材料では、高照度の領域で照射実験を行う加速試験はもはや成り立たず、実機と同じ照度で実験を行わなければならないことが明らかになった。

#### 4-3-2 酸素導入によるカーボンコンタミネーションの抑制

次に、カーボンコンタミネーションが堆積した試料に酸素を導入しながら EUV 光を照射して、コンタミネーションを除去する実験を行った。図 4-3-6 に結果を示す。酸素の圧力は  $2 \times 10^{-2}$  Pa とした。 $C_6F_{14}$  を導入したときのコンタミネーション成長速度も併せて示した。この条件では、EUV 光照度が比較的低い領域では洗浄速度よりもコンタミネーション成長速度の方が大きい、EUV 光照度が比較的高い領域では洗浄速度がコンタミネーション成長速度を上回ることが分かる。露光中に酸素を流すだけの簡便な方法で光学素子上へのカーボンコンタミネーションの堆積を抑止することができる。この方法は EUV1 にも採用した。

EUV1 では、運用開始当初から酸素導入によるカーボンコンタミネーションの抑制機構を備えていたが、酸素の流量が不十分であった。以上のような一連の実験結果に基づいて、酸素の流量の最適化を行った。その結果を図 4-3-7 に示す。図の横軸は光源の発光パルス数の累積で時間軸を表している。縦軸は照明系の透過率の変化である。ミラーを交換した後、指数関数的に透過率は低下していたが、酸素流量の最適化を行った後は透過率の低下を止めることが出来た。照度が高いほど洗浄速度は大きくなるので、EUV1 よりも高出力の EUV 光源を備えた量産対応の EUV 露光装置にも本手法は効果的である。

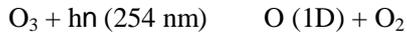
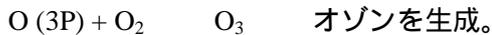
#### 4-3-3 UV ドライ洗浄によるカーボンコンタミネーションの洗浄

EUV1 の運用を開始した直後、照明系のミラーにカーボンコンタミネーションが付着して、レチクル上での EUV 光の照度が急速に低下していくという問題点に直面した。コンタミネーションが付着したミラーは、その都度交換して照度を回復させたが、交換用のミラーの製作も追い付かない状況であったので、付着してしまったカーボンコンタミネーションを除去することが急務であった。そこで、図 4-3-8 に示すような市販の UV ドライ洗浄装置を用いて洗浄を試みた。本装置は、低圧水銀ランプから出た紫外線を空气中で試料上に照射するシンプルな構成であり、有機物の汚染の除去に一般的に使用されている。

UV ドライ洗浄のメカニズムは下記の通りであり、低圧水銀ランプから発生する 185 nm と 254 nm の二つの波長の紫外線が洗浄に寄与する。



波長 185 nm の UV 光で光路中の酸素分子を分解。



波長 254 nm の UV 光で光路中のオゾンから励起状酸素原子を生成。

励起状酸素原子が有機物と結合して除去。

図 4-3-9 には、EUV1 で使用した照明系用のミラーの UV ドライ洗浄前後の外観を示す。洗浄前は、図 4-3-9 (a) に示すように、ミラーの中央部に茶色くコンタミネーションが付着していた。洗浄後は、図 4-3-9 (b) に示すように、コンタミネーションはほぼ完全に除去されている。

このミラーの UV ドライ洗浄前後の EUV 光に対する反射率の測定結果を図 4-3-10 に示す。洗浄前はコンタミネーションの付着により中央部の反射率が大きく低下していたが、洗浄後の反射率分布は平坦になり、元の反射率を回復した。

以上のように、UV ドライ洗浄は空气中で試料に紫外線を照射するだけで容易にカーボンコンタミネーションを除去することができるので、UV ドライ洗浄の EUV 露光装置のオンボディコンタミネーション洗浄技術への展開を検討した。

市販の UV ドライ洗浄装置は、低圧水銀ランプと試料の間隔が 10 mm 程度に設定されている。洗浄速度は紫外線の照度に比例するので、ランプと試料の間隔を拡大すると、空気による吸収のために紫外線の照度が低下し、洗浄速度は急速に低下してしまう。EUV 露光装置において、露光光を遮らないように各ミラーの直前に低圧水銀ランプを配置することは困難なので、このままでは UV ドライ洗浄をオンボディコンタミネーション洗浄技術に適用することは難しい。無理にランプをミラーの直前に配置しようとする、露光中にはランプを退避させる機構が必要になり、装置の機構が複雑化して故障の原因にもなる。ランプと試料の間隔を広げて露光光を遮らない場所にランプを設置できるようにするためには、減圧して空気による吸収を下げるのが有効である。そこで、減圧したときの UV ドライ洗浄速度の圧力依存性を調べた。

図 4-3-11 に実験に用いた装置を示す。図 4-3-11 (a) に示すように、真空チャンパーの中に低圧水銀ランプと試料等を配置し、減圧して試料に紫外線を照射した。カーボンコンタミネーションの代用試料には、実際のコンタミネーションに性状が近いと考えられるフォトレジストや BARC (bottom anti-reflection coating) 材料等を用いた。図 4-3-11 (b) は、真空チャンパー内でランプを点灯して、試料へ紫外線を照射している様子を示す。

図 4-3-12 に実験結果を示す。この実験では、EUV1 実機上でミラーに付着したコンタミネーションを試料として用いた。低圧水銀ランプと試料間の距離は 100 mm とした。赤い四角が実験結果を、青い線は計算値を示す。予想通り、減圧すると紫外線の空気による吸収が低下して、洗浄速度が増大することが確認された。洗浄速度は、大気圧の 1/300 に減圧した場合に最大となり、それ以上減圧すると低下した。これは、酸素ラジカル (O (1D)) の寿

命による。酸素ラジカルは一定の寿命(0.1  $\mu\text{s}$  程度)と速度(500 m/s 程度)を持っており、活性を維持したまま進むことのできる距離(移動可能距離)は、圧力によらず一定(数十  $\mu\text{m}$  程度)である。一方、大気圧の 1/300 に減圧したときの酸素ラジカルの平均自由行程は約数十  $\mu\text{m}$  となり、ちょうどラジカルの移動可能距離と一致する。そのため、試料上近傍の空間中で励起された酸素ラジカルが効率的に洗浄に寄与することができる。これよりも更に減圧していくと、試料上近傍の空間中で励起された酸素ラジカルが試料の表面に到達しない内に失活してしまう割合が増えるので、その結果、洗浄速度は急速に低下する。

以上のような実験結果により、紫外線の照度、ガス圧等のパラメータと洗浄速度の関係を明らかにし、それに基づいて EUV1 のオンボディ洗浄機構を開発した。照明系の各ミラーの近傍に低圧水銀ランプを取り付けて、ミラーを取り外すこと無く、装置上で UV ドライ洗浄を実施できるようになった。

#### 4-3-4 多層膜ミラーの耐酸化性の向上

Mo/Si 多層膜ミラーに、水蒸気が残留する雰囲気中で EUV 光を照射すると、表面が酸化して反射率が劣化することが知られている。これを防ぐために、多層膜の最上層に酸化を防ぐための保護層(capping layer)を設けることが行われている。現在は、Ru が代表的な capping layer 材料として広く使われているが、量産用の EUV 露光装置の光学系に用いるには未だ耐酸化性が不足しており、更なる改善が期待されている。本研究では、金属酸化物を capping layer 材料として用いることにより、耐酸化性の大幅な改善を試みた。図 4-3-13 に示すように、Mo/Si 多層膜の Si 層の上に金属酸化物からなる capping layer を設けた。これまで、様々な金属酸化物 capping layer の評価を行ってきたが、その中でも耐酸化性に優れた NbOx と MoOx について詳しく調べた。

図 4-3-14 に EUV 光照射実験結果の一例を示す。Capping layer 無し(最上層は Si 層)、Ru capping layer 付き、MoOx capping layer 付き、NbOx capping layer 付きの Mo/Si 多層膜上に、圧力  $1 \times 10^{-3}$  Pa の水蒸気を導入して、 $8 \text{ W/cm}^2$  の照度の EUV 光を照射した。何れの多層膜も表面の酸化により反射率が低下しているが、低下速度は大きく異なる。Capping layer 無しで最上層が Si の多層膜の劣化速度が最も速い。Ru capping layer を設けると、これよりは劣化が遅くなるものの、依然として大きな劣化が認められた。一方、MoOx と NbOx は、Ru よりも遥かに耐酸化性に優れていることが確認された。MoOx と NbOx を比較すると、NbOx capping layer 付き Mo/Si 多層膜の方が初期の反射率が高いこと、MoOx capping layer 付き Mo/Si 多層膜は EUV 光を照射しなくても反射率の経時変化(低下)があることなどから、NbOx を耐酸化性 capping layer 材料の第一候補として選択した。

図 4-3-15 に NbOx capping layer 付き Mo/Si 多層膜の非照射領域と照射領域の XPS 分析結果を示す。図 4-3-15. (a) は Si の酸化度を、図 4-3-15 (b) は Nb の酸化度をそれぞれ示す。NbOx 層は 100% が Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> で構成されており、完全に酸化されている。EUV 照射の有無で酸化度は全く変化していない。EUV 光を照射すると、NbOx 層の下の Si 層の酸化が進んでいくことが分かる。

図 4-3-16 は、MoO<sub>x</sub> capping layer 付き Mo/Si 多層膜の非照射領域と照射領域の XPS 分析結果を示す。図 4-3-16 (a) は Si の酸化度を、図 4-3-16 (b) は Mo の酸化度をそれぞれ示す。NbO<sub>x</sub> capping layer の場合とは異なり、MoO<sub>x</sub> 層は色々な酸化度の酸化物で構成されている。EUV 照射の有無で MoO<sub>x</sub> 層の酸化度は殆ど変化していない。EUV 光の照射により、MoO<sub>x</sub> 層の下に Si 層の酸化が進行していることが分かる。下地の Si 層の酸化度が EUV 光を照射する前から比較的高い点が NbO<sub>x</sub> とは異なる。これが、初期反射率が NbO<sub>x</sub> capping layer の場合よりも低いことの原因と考えられる。

#### 4-3-5 シロキサンに起因するコンタミネーション

EUV 光を用いた実験装置におけるカーボンコンタミネーションの多くに、シリコンが含まれていることが Selete の穴沢らによって報告されている[6]。シリコンを含むコンタミネーションの原因物質として考えられるのはシロキサンである。シロキサンは多くの樹脂に含まれており、ごく普通に存在する揮発性の材料であり、半導体プロセス用のクリーンルームの中でも検出される。そこで、シロキサンを導入しながら多層膜試料に EUV 光を照射して、コンタミネーションによる反射率の劣化を調べた。シロキサンには多くの種類が存在するが、この実験では図 4-3-17 に示す C<sub>10</sub>H<sub>30</sub>O<sub>5</sub>Si<sub>5</sub> (decamethylcyclopentasiloxane) を用いた。

図 4-3-18 に照射実験結果を示す。参考のために C<sub>6</sub>F<sub>14</sub>、BHT、および nonanar を導入した場合の結果も併せて示した。C<sub>6</sub>F<sub>14</sub> は EUV1 におけるカーボンコンタミネーションの主要因であったフッ化炭素と類似したフッ化炭素、BHT と nonanar は EUV1 の真空チャンバー内のガスを分析して検出された典型的な炭化水素である。いずれも、導入したガスの圧力は  $5 \times 10^{-5}$  Pa、EUV 光の照度は 0.1 W/cm<sup>2</sup> で実験した。シロキサンによる反射率の低下は C<sub>6</sub>F<sub>14</sub> によるものよりも速く、これまで実験した材料の中で最も速かった。

シロキサンに起因するコンタミネーションの組成を調べるために、XPS 分析を行った。Mo/Si 多層膜中の Si と区別するために、Al 製の基板の上にコンタミネーションを堆積させた試料を用いた。分析結果を表 4-3-1 に示す。コンタミネーションの付着した領域を三箇所分析した。Ref. は、比較のため評価したコンタミが付着していない領域である。コンタミネーションの主成分はシリコンと酸素から成り、SiO<sub>x</sub> が形成されていることが明らかになった。

シリコンの酸化物は不揮発性なので、酸素の導入による付着防止が逆効果になることが懸念された。そこで、シロキサンと酸素を同時に導入した場合のコンタミネーションによる反射率の劣化を調べた。その結果を図 4-3-19 に示す。この実験は、EUV 光照射度 20 mW/cm<sup>2</sup> で行った。懸念された通り、酸素を同時に流すとシロキサンだけの場合と比べて、反射率の低下が著しく加速されることが明らかになった。このコンタミネーションは、酸素では除去することが出来ない。これまで、EUV 露光装置におけるコンタミネーションの問題として検討されてきた“カーボン堆積”と“酸化”とは異なる第三のコンタミネーションとして重要な課題である。

しかしながら、EUV1におけるカーボンコンタミは酸素導入により抑制することが可能であり、また、一度付着してしまったコンタミも4-3-3項で述べたように酸素を使って容易に除去することが出来た。そこで、EUV1の照明系用ミラーに付着したカーボンコンタミの組成をXPS分析で調べた。その結果を図4-3-20に示す。コンタミの付着した場所と付着していない場所(Reference)の間で差異は認められず、EUV1におけるカーボンコンタミにはシリコンは含まれていないことが確認された。

EUV1を設計製作する際は、真空チャンバー内に入れる部品、ユニットのアウトガス測定を行って、コンタミの原因となる可能性のある物質を極力排除した。現実には、冷媒に用いたフッ素化合物がリークしてしまい、カーボンコンタミの主要因となってしまったが、それ以外の不純物は十分に低く抑えられており、シリコンを含有するガスの存在しない、清浄な真空が実現されていたことが確認された。量産対応のEUV露光装置においても、EUV1と同様のアプローチによって部品、ユニットの選定を行えば、シリコン含有カーボンコンタミの問題は回避できると考える。

#### 本節に関連する主論文

- | **K. Murakami**, T. Yamaguchi, A. Yamazaki, N. Kandaka, M. Shiraishi, S. Matsunari, T. Aoki and S. Kawata, “Contamination study on EUV exposure tools using SAGA Light Source (SAGA-LS)”, Proc. SPIE, **7636**, 76361U, (2010).
- | **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, K. Nomura, H. Kawai, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada and Y. Ohkubo, “Development of EUV lithography tools at Nikon”, Proc. SPIE, **7969**, 79690P, (2011).
- | **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, Y. Kawabe, T. Ono, N. Kandaka, A. Yamazaki, T. Yamaguchi, R. Shibata and M. Shiraishi, “Development of EUV lithography tool technologies at Nikon”, Proc. SPIE, **8322**, 832215, (2012).

#### 参考文献

- [1] K. Boller, R. Haelbich, H. Hogrefe, W. Jark and C. Kunz, Nucl. Inst. Meth., **208**, 273, (1983).
- [2] M. Malinowski, C. Steinhaus, D. Meeker, W. Clift, L. Klebanoff and S. Bajt, Proc. SPIE, **5037**, 429, (2003).
- [3] S. Matsunari, Y. Kakutani, T. Aoki, S. Kawata and K. Murakami, Proc. SPIE, **7271**, 72713R, (2009).
- [4] J. Hollenshead and E. Klebanoff, Proc. SPIE, **5374**, 675, (2004).
- [5] M. Shiraishi, T. Yamaguchi, A. Yamazaki, N. Kandaka, T. Oshino and K. Murakami, Proc. SPIE, **7969**, 79690N, (2011).
- [6] T. Anazawa, N. Takagi, O. Suga, I. Nishiyama, K. Yamawaki, H. Yano, A. Izumi, T. Miura and M. Kekura, 2010 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, RC-P04, (2010).

表 2-2-1 シロキサンによるコンタミネーションの XPS 分析結果

試料	Al	Si	C	O	F	N	S	Mg	Na
#1	-	28.9	4.7	65.8	0.5	< 0.1	-	-	-
#2	-	28.9	4.5	66.2	0.4	< 0.1	-	-	-
#3	-	28.7	5.9	64.6	0.6	0.2	-	-	-
Ref.	8.8	7.8	32.2	44.6	2.5	4.0	-	0.3	-

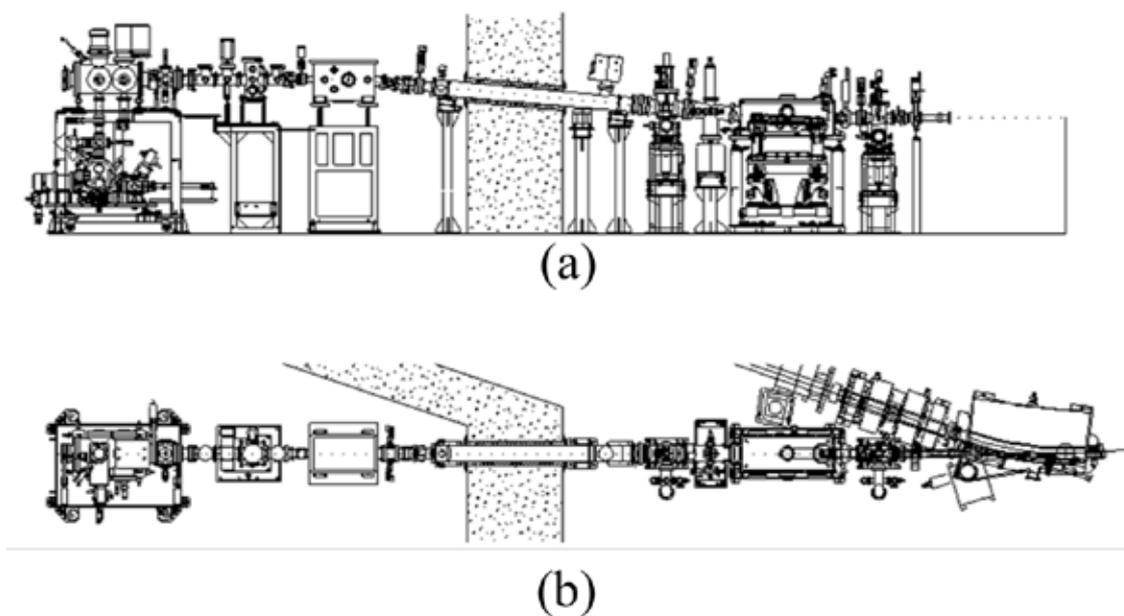


図 4-3-1 コンタミネーション研究用ビームライン SAGA Light Source BL18

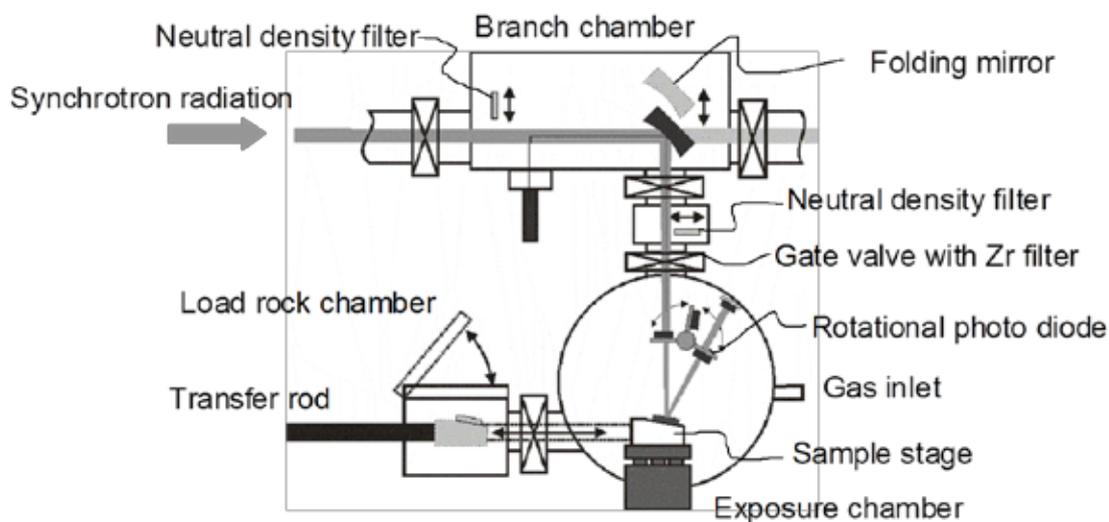


図 4-3-2 EUV 照射実験装置の構成図

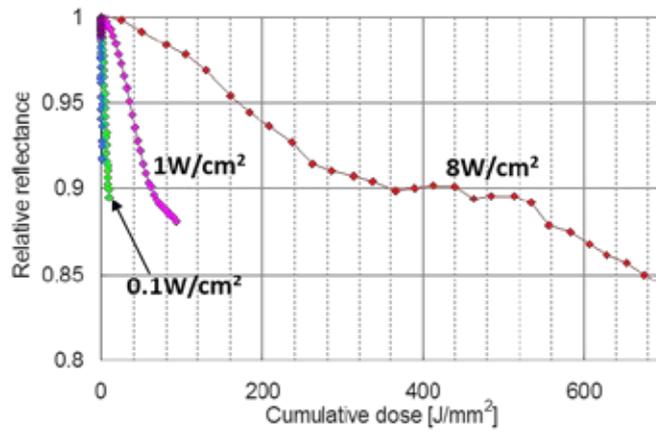


(a)

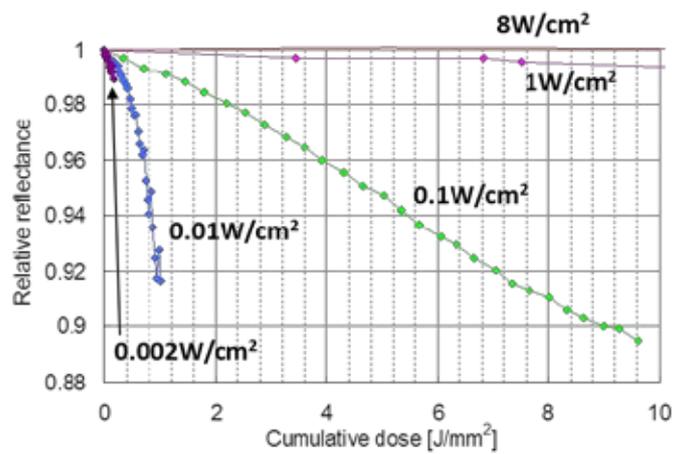


(b)

図 4-3-3 EUV 照射実験装置とビームライン  
 (a) EUV 照射実験装置、(b) SAGA LS BL18 全景



(a)



(b)

図 4-3-4 C<sub>6</sub>F<sub>14</sub> を導入して EUV 光を照射したときの Mo/Si 多層膜ミラーの反射率変化  
 (a) EUV 照度: 0.1 ~ 8 W/cm<sup>2</sup>、(b) EUV 照度: 0.002 ~ 8 W/cm<sup>2</sup>

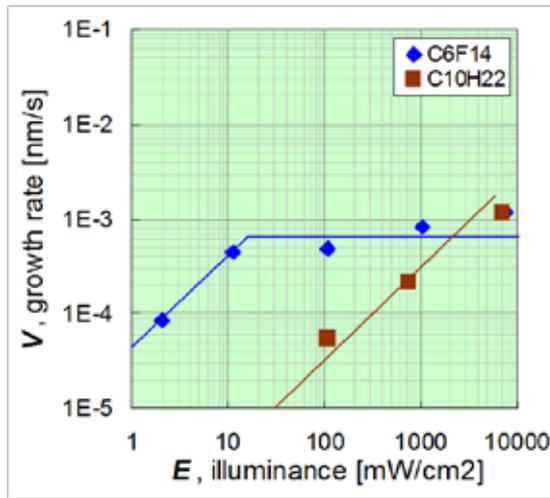


図 4-3-5 カーボンコンタミネーション成長速度の照度依存性

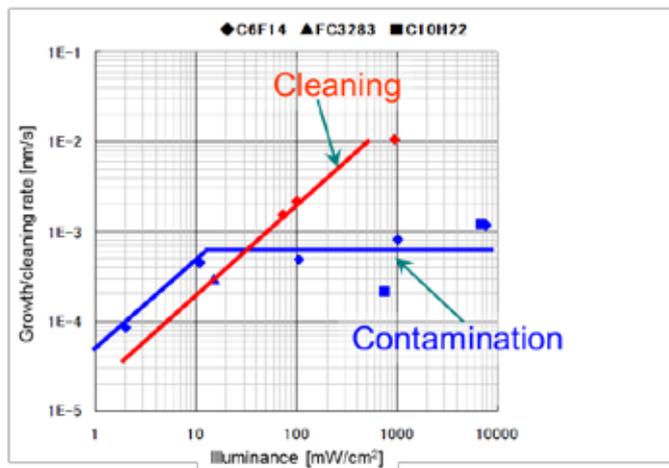


図 4-3-6 酸素導入によるカーボンコンタミネーションの洗浄速度

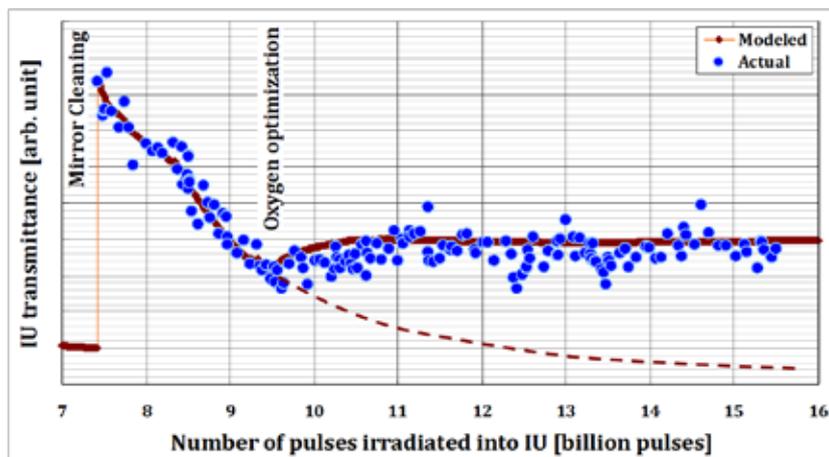
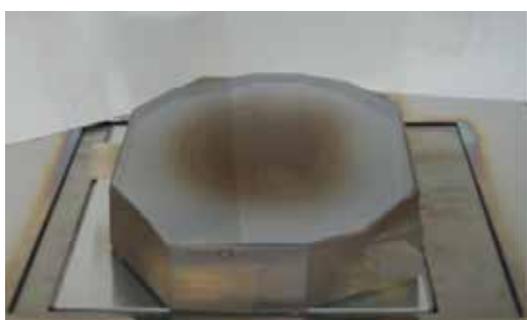


図 4-3-7 EUV1 における照明系透過率変化の履歴



図 4-3-8 UV ドライ洗浄装置



(a)



(b)

図 4-3-9 EUV1 照明系ミラーに付着したカーボンコンタミネーションの UV ドライ洗浄  
(a) 洗浄前、(b) 洗浄後

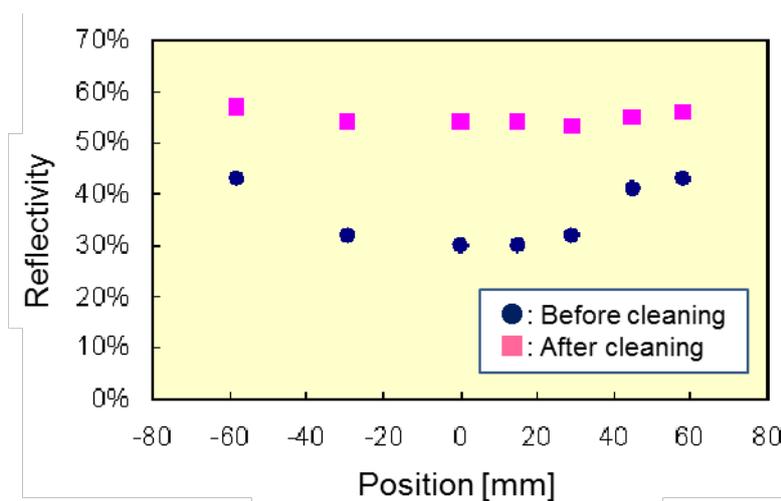


図 4-3-10 UV ドライ洗浄前後の反射率測定値

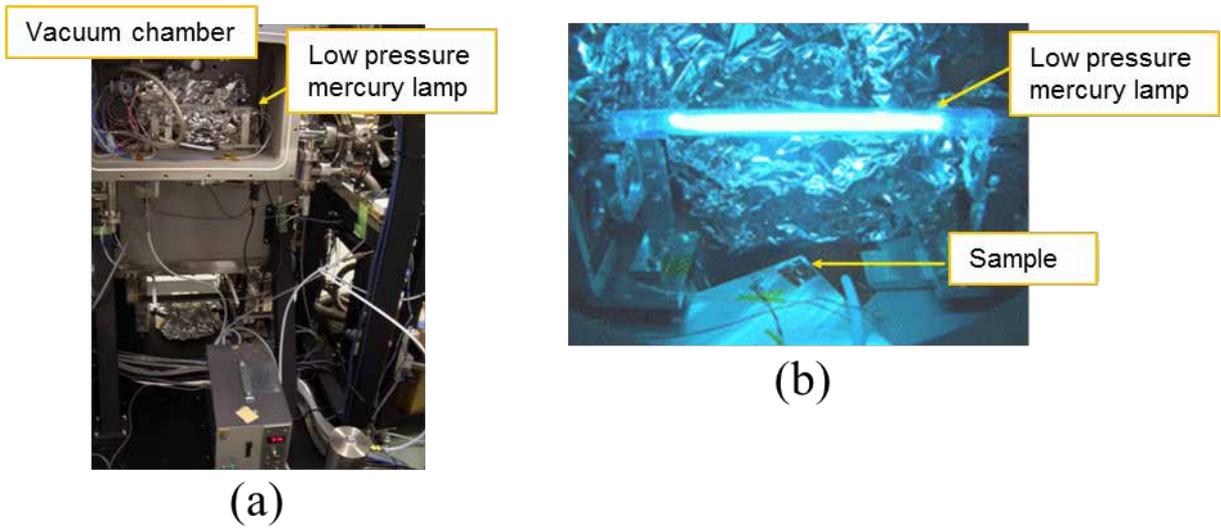


図 4-3-11 減圧 UV ドライ洗浄実験  
 (a) 実験装置、(b) 試料に UV 光を照射している様子

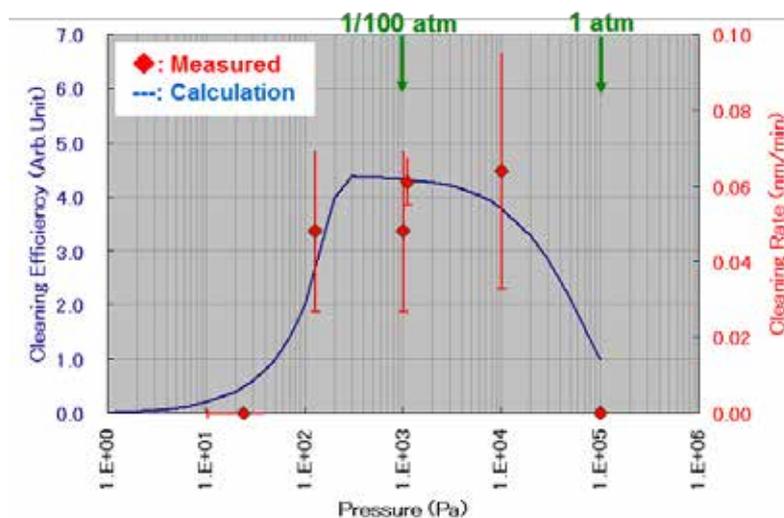


図 4-3-12 UV ドライ洗浄速度の圧力依存性



図 4-3-13 金属酸化物 capping layer 付き Mo/Si 多層膜

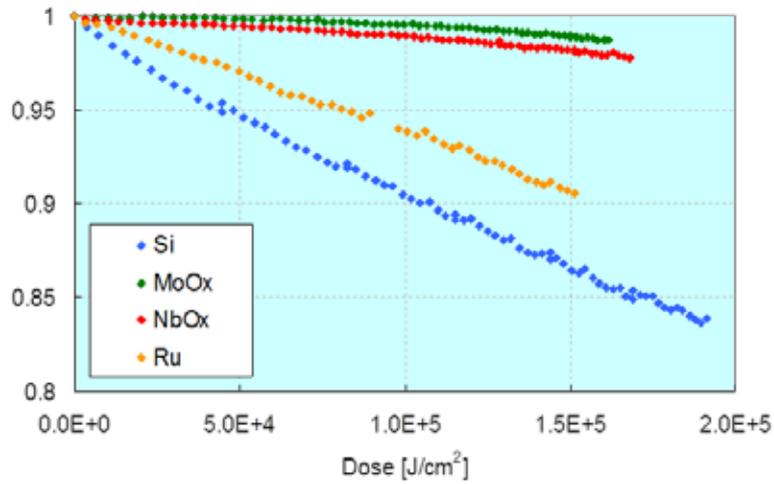


図 4-3-14 各種 capping layer 付き Mo/Si 多層膜の耐酸化性

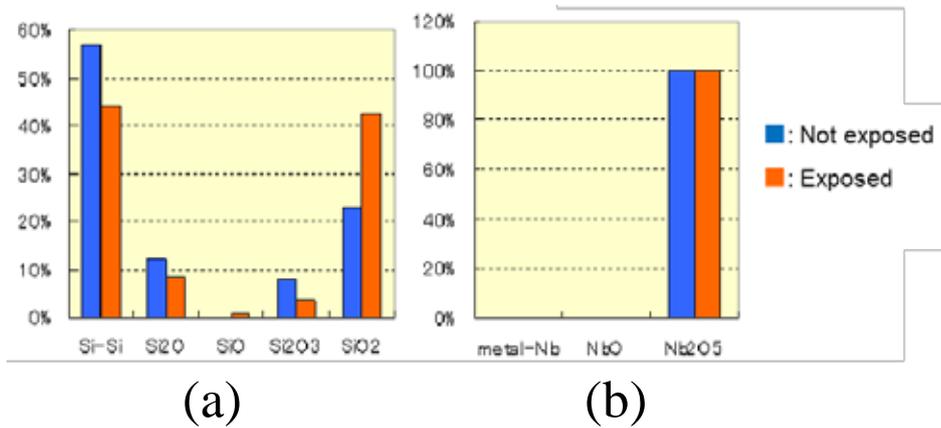


図 4-3-15 NbOx capping layer 付き Mo/Si 多層膜の XPS 分析結果  
(a) Si の酸化度、(b) Nb の酸化度

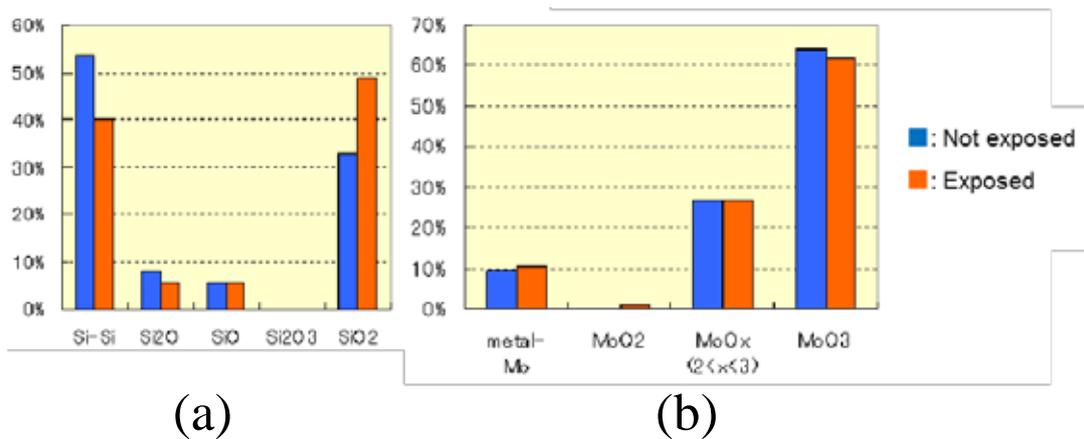


図 4-3-16 MoOx capping layer 付き Mo/Si 多層膜の XPS 分析結果  
(a) Si の酸化度、(b) Mo の酸化度

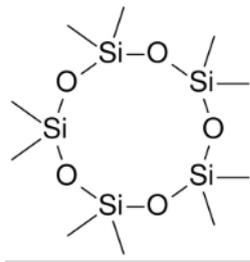


図 4-3-17  $C_{10}H_{30}O_5Si_5$  (decamethylcyclopentasiloxane)

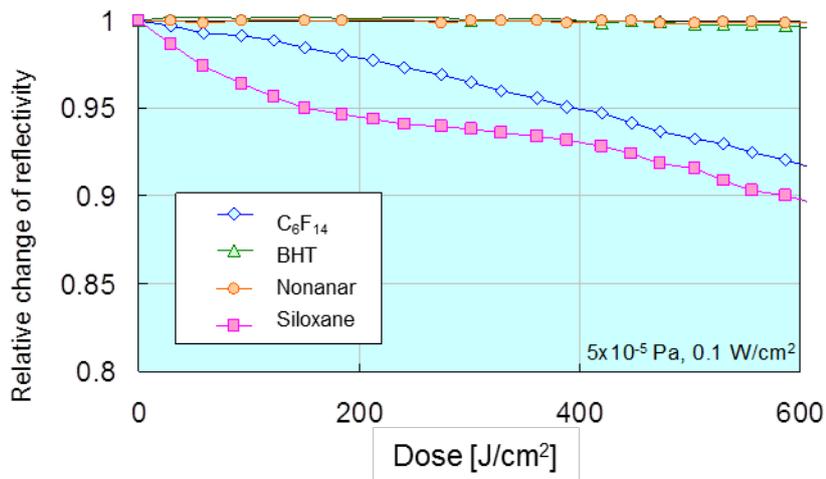


図 4-3-18 シロキサンを導入して EUV 光を照射したときの反射率の低下

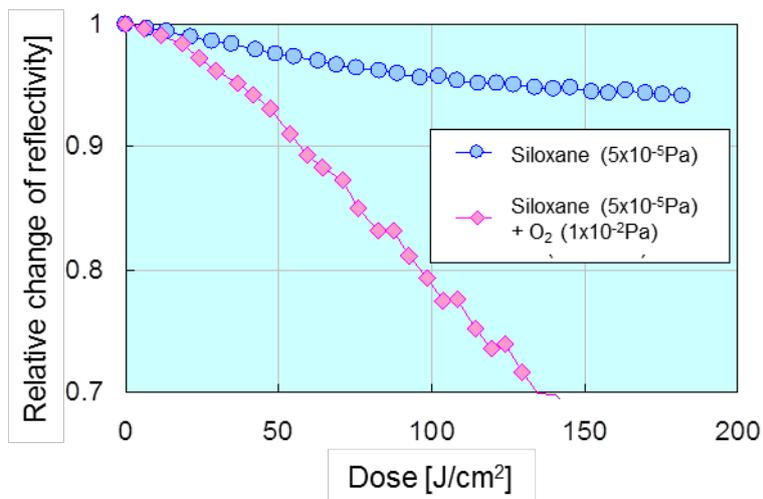
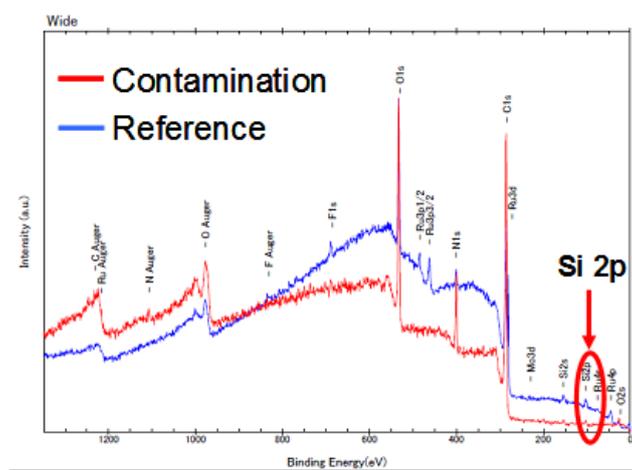
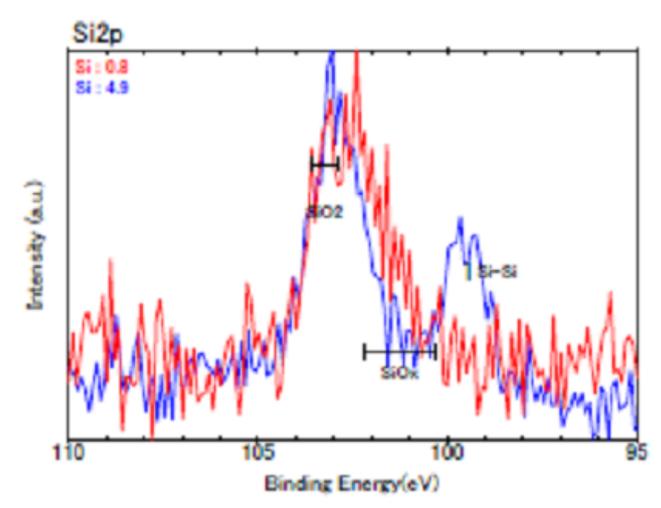


図 4-3-19 シロキサンと酸素を導入したときの反射率の劣化



(a)



(b)

図 4-3-20 EUV1 におけるカーボンコンタミネーションの組成分析結果  
 (a) スペクトル全体、(b) Si 2P 付近の拡大

## 第5章 総括

### 5-1. 本論文の総括

第1章では、本研究の背景と論文の構成について述べた。

第2章「Mo/Si 多層膜ミラーの開発」では、EUV リソグラフィで重要な波長 13.5 nm 付近で使用する Mo/Si 多層膜ミラーにおいては、従来から知られていた多層膜界面の粗さよりも、多層膜の界面に形成される界面拡散層の厚さが EUV 光に対する反射率に大きな影響を及ぼしていることを明らかにした。この知見に基づいて、界面拡散層を抑制して反射率を向上する具体的な手段を検討した結果、スパッタリングによる多層膜成膜に用いるガスを、従来の Ar から質量の大きい Xe に変更することによって、Mo/Si 多層膜の反射率を向上することが出来た。応力相殺層を用いた Mo/Si 多層膜の応力低減において、高反射率と低応力を両立する手法を確立した。

第3章「軟 X 線結像光学系の開発」では、波長 4.5 nm 用のシュバルツシルド光学系を開発した。反射面には NiCr/C 多層膜ミラーを用いた。C Ka線による拡大結像の実験を行い、0.5 mm 以下の解像力を確認した。次に、Mo/Si 多層膜ミラーからなる波長 13 nm 用のシュバルツシルド光学系を開発し、放射光光源を用いた縮小投影露光実験を行い、50 nm L/S の解像力を実証した。当初は SiN メンブレン上に Au のパターンを形成した透過型マスクを用いていたが、その後、Mo/Si 多層膜上に電界メッキで Ni のパターンを形成して大面積化が可能な反射型のマスクを開発した。波長 4.5 nm でも縮小投影露光の実験を行い、0.9 mm の厚いレジストを露光できることを確認した。露光領域を拡大するために 3 枚の非球面ミラーからなる投影系を備えた露光実験装置を開発した。放射光を用いて EUV 光による波面計測技術の研究を行い、PDI 法およびシアリング法をベースとした波面計測手法を確立し、フルフィールド投影系の波面計測が可能な EUV 波面計測装置を開発した。

第4章「EUV 露光装置の開発」では、2 枚の非球面ミラーからなる NA0.3 の小フィールド投影系を備えた露光実験装置を開発した。投影系のミラー保持機構の改良と非球面形状の向上により、1 nm RMS 以下の波面収差を実現した。NA0.25 のフルフィールドの投影系を備えた EUV 露光装置 EUV1 を開発した。投影系の波面収差は 0.4 nm RMS 以下を達成した。通常照明による露光では、 $k_1$  が 0.5 に相当する 27 nm L/S パターンを解像した。Dipole 照明による露光では 22 nm L/S を解像し、渋谷レベンソン型位相シフトマスクを用いた露光では 16 nm L/S までパターンの一部を解像した。EUV リソグラフィにおいても、従来の光リソグラフィで使われてきた超解像技術が有効であることを実証した。露光中の酸素導入によるカーボンコンタミネーション抑止手段を EUV1 に採用し、照明系の透過率低下を抑制することに成功した。UV ドライ洗浄によるコンタミネーション除去手段を開発し、EUV1 のオンボディ洗浄機構として適用した。EUV 照射時の Mo/Si 多層膜ミラー表面の酸化を防ぐための capping layer の性能向上を行い、従来から使われている Ru よりも耐酸化性を大幅に向上した NbOx, MoOx capping layer を開発した。

## 5-2. 今後の EUV リソグラフィについて

現在の最先端のリソグラフィ技術は、光リソグラフィの延命策が極限まで突き進められ、波長 193 nm の ArF エキシマレーザーを使って、液浸露光技術による NA の拡大と、ダブルパターンニング技術の採用によって 20 nm までの解像力が実現されている。液浸露光技術とは投影レンズとウェハの間の空間を水で満たして屈折率を変えることにより、実効的な NA を拡大する技術であり、1.35 までの NA が実現されている。水の代わりに更に屈折率の大きい液体を使って更に NA を拡大する方法も研究されたが、適当な材料が見つからず断念された。ダブルパターンニング技術とは、一度 L/S パターンを露光した後に L/S の半分の周期だけずらして二度目の露光を行ったり、一度露光・現像して形成したレジストパターンの両側の側壁に堆積物を付けて元のレジストを除去し、元の周期の二倍の周期のパターンを形成する技術である。光リソグラフィの短波長化として波長 157 nm の F<sub>2</sub> レーザーが過去に研究されたが、透明な硝材を開発することが出来ず開発は中止された。光リソグラフィの短波長化は既に 10 年間止まったままである。残された光リソグラフィの延命策は、ダブルパターンニングを複数回繰り返し行うマルチパターンニングしか残されていない。しかし、プロセスが非常に複雑になり半導体デバイスの製造コストが上昇するという問題点がある。マルチパターンニングによるコスト上昇を防ぐ技術の候補として、DSA (directed self-assembly) が最近注目を集めている。親水性樹脂と疎水性樹脂を繋げた樹脂を用い、ガイドパターンで自己組織化を制御する技術である。ガイドパターンの間に複数のラインを形成することによって微細なパターンを形成することができる。

一方、波長 13.5 nm の EUV リソグラフィは、どこまでの微細化が期待できるだろうか。表 5-2-1 に投影系の NA と L/S パターンの HP (half pitch) に対する  $k_1$  の値を示す。 $k_1$  が 0.5 以上は青、0.4~0.5 は緑、0.3~0.4 は薄緑、0.25~0.3 は黄色、0.25 以下は灰色で色分けしてある。この表から、NA をいくつにしたら、どの程度の解像力が得られるかを推測することができる。NA0.25 の EUV1 では、通常照明で  $k_1$  0.5 に対応する 28 nm HP、dipole 照明で  $k_1$  0.4 に対応する 22 nm HP まで解像した。渋谷レベンソン型位相シフトマスクを使うと、 $k_1$  0.3 に対応する 16 nm HP まで部分的に解像した。EUV1 と同じ構成の 6 枚系では、NA0.43 程度までの光学設計解が得られている。レジストの性能が向上することを前提として、EUV1 と同じ  $k_1$  の値まで解像すると仮定すると、通常照明で 18 nm HP、dipole 照明で 14 nm HP、渋谷レベンソン型位相シフトマスクで 10 nm HP が得られる。投影系の光学設計にシュバルツシルド光学系のような中心遮蔽を許容すると更に NA を拡大することが可能になり、NA0.5 以上の設計解が得られる。そうすると、通常照明で 14 nm HP、dipole 照明で 11 nm HP、渋谷レベンソン型で 8 nm HP が得られることになる。以上のように、EUV リソグラフィは 1 回の露光で 10 nm HP 以下の微細パターンの形成が可能な露光技術である。

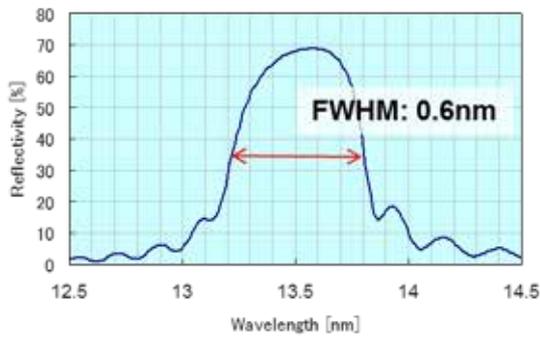
ダブルパターンニング技術や DSA 技術は、光リソグラフィだけでなく EUV リソグラフィにも同様に適用できる技術である。これらの技術を併用すると、更に高い解像力が可能になる。

それほどに潜在能力の高い EUV リソグラフィだが、まだデバイス量産への適用はされておらず、苦勞して光リソグラフィの延命が続けられている。現在、EUV 露光装置実用化の最大の障害は光源の出力である。量産対応 EUV 露光装置の EUV 光源の出力は、中間集光点で 250 W が目標にされており、少なくとも 100 W 以上が必要である。これまで、なかなか光源メーカーの計画通りに出力が向上せず、現在稼働している EUV 露光装置の光源出力は 10 W 程度に過ぎない。しかし、最近になって 50 W 以上の出力を安定して長時間維持できることが報告され、漸く出力上昇の兆しが見えてきた。光源以外にも、マスクの欠陥やレジスト性能等の課題は残されてはいるが、今後、光源の出力向上に伴い実用化が一気に進むものと予想される。

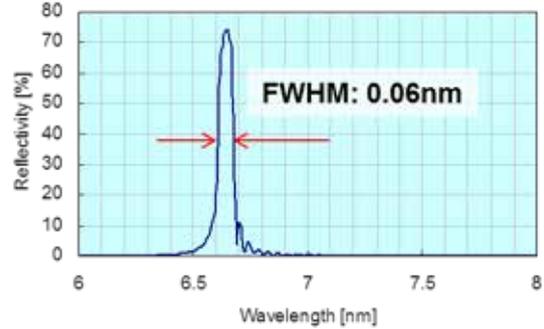
最近、EUV リソグラフィの波長を更に短くして解像力を上げようという研究が行われている。波長 6.7 nm で La/B<sub>4</sub>C, LaN/B などの多層膜ミラーを用いる。しかし、この方式の実用化は困難であると考えられる。いくつか理由は挙げられるが、最大の問題点は多層膜ミラーのバンド幅である。図 5-2-1 に多層膜ミラーの反射率曲線の計算値を示す。(a) は波長 13.5 nm 用の Mo/Si 多層膜ミラー、(b) は波長 6.7 nm 用の La/B<sub>4</sub>C 多層膜ミラーである。ピーク反射率は同じような値が得られるが、バンド幅は、Mo/Si 多層膜よりも La/B<sub>4</sub>C 多層膜は一桁小さい。光学系の効率はバンド幅も考慮した積分反射率で決まるので、波長 6.7 nm 用光学系の透過率は、波長 13.5 nm 用光学系の透過率よりも桁違いに低くなる。その結果、光源出力に対する要求は桁違いに高くなる。波長 13.5 nm でも光源の出力不足が最大の障害なのだから、これは得策ではなからう。

表 5-2-1 波長 13.5nm の EUV リソグラフィの NA と HP に対する  $k_1$  の値

NA \ HP	32nm	28nm	25nm	22nm	20nm	18nm	16nm	14nm	13nm	11nm	10nm	9nm	8nm
0.25	0.59	0.52	0.46	0.41	0.37	0.33	0.30	0.26	0.24	0.20	0.19	0.17	0.15
0.33	0.78	0.68	0.61	0.54	0.49	0.44	0.39	0.34	0.32	0.27	0.24	0.22	0.20
0.35	0.83	0.73	0.65	0.57	0.52	0.47	0.41	0.36	0.34	0.29	0.26	0.23	0.21
0.40	0.95	0.83	0.74	0.65	0.59	0.53	0.47	0.41	0.39	0.33	0.30	0.27	0.24
0.45	1.07	0.93	0.83	0.73	0.67	0.60	0.53	0.47	0.43	0.37	0.33	0.30	0.27
0.50	1.19	1.04	0.93	0.81	0.74	0.67	0.59	0.52	0.48	0.41	0.37	0.33	0.30



(a)



(b)

図 5-2-1 多層膜ミラーのバンド幅の比較

(a) 波長 13.5 nm 用 Mo/Si 多層膜ミラー、(b) 波長 6.7 nm 用 La/B<sub>4</sub>C ミラー

## 謝辞

本論文は、株式会社ニコンにおいて長年に渡って行ってきた研究開発の成果をまとめたものです。本論文をまとめるにあたり、多くの方々に御指導と御助言を頂きました。

まず、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 EUV リソグラフィ研究開発センター長の木下博雄教授には、本研究の初期の段階から色々と御指導を頂いて参りましたが、今回はこの論文を書くきっかけを与えて頂き、論文作成の遂行と取りまとめにあたり終始懇切な御指導と御鞭撻を頂きました。ここに深く感謝致します。また、論文を査読、御助言、御指導を賜りました、兵庫県立大学大学院工学研究科物質系工学専攻 村松康司教授、兵庫県立大学大学院工学研究科機械系工学専攻 格内敏教授、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所 渡邊健夫准教授に深く感謝申し上げます。

また、本論部の執筆にあたり、論文の引用を快く許可して下さいました永田浩氏、老泉博昭氏、押野哲也氏、杉崎克己氏、白石雅之氏に感謝致します。

本研究は、多くのニコンの関係者と一緒に実施してきたものですが、それだけでなく、社外の多くの方々に御助力を頂きました。研究の一部は、NEDO（独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）経済産業省及び文部科学省の委託研究あるいは継続研究として実施させて頂きました。多大なる御援助に感謝致します。

株式会社ソルテック筑波研究所所長の阿刀田伸史氏には、ソルテック放射光を用いた初期の露光実験をさせて頂き、また、その後 NEDO へ移られた後は委託研究の遂行に関して懇切な御指導を頂き、ありがとうございました。

日立製作所中央研究の伊東昌昭氏には、兵庫県立大学ニュースバル放射光における非球面リングフィールド投影系を用いた露光実験の三者共同研究を遂行させて頂き、ありがとうございました。

ASET（技術研究組合 超先端電子技術開発機構）EUV 研究室長の岡崎信次氏には、高 NA 小フィールド露光装置 HiNA の開発や可視光 PDI 干渉計などの開発を通じて、非球面加工計測技術等ニコンの EUV リソグラフィの基盤技術を高めて頂きました。ありがとうございました。

EUVA（技術研究組合 極端紫外線露光システム技術開発機構）専務理事の小川眞佐志氏には、EUV 波面計測技術、非球面加工計測技術、コンタミネーション制御技術の研究開発を遂行させて頂き、ありがとうございました。EUVA の中では、ニコンとはライバルであるキヤノン株式会社の研究員の方々とも共同研究をさせて頂き、色々と刺激を受けることが出来ました。ありがとうございました。

Selete（株式会社 半導体先端テクノロジーズ）第 3 研究部長の森一朗氏には、EUVI を Selete へ導入して頂き、ニコンにおける EUV 露光装置開発を大きく加速して下さいました。どうもありがとうございました。

ここでは一部の方々のお名前しか挙げられませんでした。本研究は非常に多くの方々の御協力と御援助により達成されました。ここに、心より感謝の意を表します。

## 論文リスト

1. **K. Murakami**, H. Nakamura, T. Oshino and H. Nikaido, “Tungsten/carbon multilayers prepared by ion-beam sputtering”, OSA Proceedings on Soft-X-Ray Projection Lithography, **12**, 101, (1991).
2. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Nakamura, M. Ohtani and H. Nagata, “Normal-incidence X-ray microscope for carbon K $\alpha$  radiation with 0.5 $\mu$ m resolution”, Jpn. J. Appl. Phys., **31**, L1500, (1992).
3. **K. Murakami**, H. Nakamura, T. Oshino, M. Ohtani and H. Nagata, “Characterization of molybdenum/silicon multilayers deposited by ion beam sputtering and rf magnetron sputtering”, Proc. SPIE, **1742**, 614, (1992).
4. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Nakamura, M. Ohtani and H. Nagata, “Schwarzschild microscope for carbon K $\alpha$  radiation”, Appl. Opt., **32**, 7057, (1993).
5. H. Oizumi, Y. Maejima, T. Watanabe, T. Taguchi, Y. Yamashita, N. Atoda, **K. Murakami**, M. Ohtani and H. Nagata, “Sub-0.1 $\mu$ m resist patterning in soft X-ray (13nm) projection lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **32**, 5914, (1993).
6. T. Oshino, **K. Murakami**, H. Nakamura, M. Ohtani and H. Nagata, “Improvement of the uniformity of tungsten/carbon multilayers by thermal processing”, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 280, (1994).
7. H. Nagata, M. Ohtani, **K. Murakami**, T. Oshino, H. Oizumi, Y. Maejima, T. Watanabe, T. Taguchi, Y. Yamashita and N. Atoda, “Fabrication of 0.1 $\mu$ m line-and-space patterns using soft X-ray reduction lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 360, (1994).
8. H. Nagata, M. Ohtani, **K. Murakami**, H. Oizumi, Y. Yamashita and N. Atoda, “Reduction imaging at 4.5nm with Schwarzschild optics”, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, L1192, (1994).
9. H. Oizumi, M. Ohtani, Y. Yamashita, **K. Murakami**, H. Nagata and N. Atoda, “Resist performance in 5nm soft X-ray projection lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **33**, 6919, (1994).
10. H. Oizumi, M. Ohtani, Y. Yamashita, **K. Murakami**, H. Nagata and N. Atoda, “Resist performance in 5nm and 13nm soft X-ray projection lithography”, Microelectronic Engineering, **27**, 317, (1995).
11. **K. Murakami**, S. Shimizu, M. Ohtani, H. Nagata, H. Oizumi, Y. Yamashita and N. Atoda, “Electroplated reflection masks for soft x-ray projection lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **34**, 6696, (1995).
12. T. Sakao, H. Hara, T. Kosugi, S. Tsuneta, R. Kano, T. Yoshida, S. Nagata, T. Shimizu, **K. Murakami**, W. Wasa, M. Inoue, K. Miura, K. Taguchi and K. Tanimoto, “Japanese sounding rocket experiment with the solar XUV Doppler telescope”, Proc. SPIE, **2804**, 153, (1996).
13. S. Nagata, T. Yoshida, H. Hara, T. Sakao, T. Shimizu, S. Tsuneta, W. Ishiyama, **K. Murakami** and T. Oshino, “Development of multilayer mirrors for the XUV Doppler telescope”, Proc.

- SPIE, **3113**, 193, (1997).
14. S. Nagata, S. Tsuneta, T. Sakao, T. Yoshida, H. Hara, R. Kano, W. Ishiyama, **K. Murakami** and M. Ohtani, "High wavelength resolution XUV multilayer mirror", *Appl. Opt.*, **36**, 2830, (1997).
  15. H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi, H. Yamanashi, **K. Murakami**, T. Oshino, Y. Platonov and N. Grupido, "Three-aspherical-mirror system for EUV lithography", *Proc. SPIE*, **3331**, 20, (1998).
  16. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi, H. Yamanashi, "Experimental EUV exposure system using a synchrotron source", *Journal of Photopolymer Science and Technology*, **11**, 565, (1998).
  17. 村上 勝彦, "使用波長による光学系の計測評価", *精密工学会誌*, **64**, 987, (1998).
  18. 村上 勝彦, "縮小露光光学系・照明光学系の設計", *精密工学会誌*, **64**, 996, (1998).
  19. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi and H. Yamanashi, "Ring-field extreme ultraviolet exposure system using aspherical mirrors", *Jpn. J. Appl. Phys.*, **37**, 6750, (1998).
  20. 村上 勝彦, "電析法による軟 X 線縮小投影リソグラフィ用反射マスクの作製", *表面技術*, **49**, 849, (1998).
  21. 村上 勝彦, "Point Diffraction 干渉計による極紫外光学部品計測", *O plus E*, **21**, 426, (1999).
  22. K. Soyama, W. Ishiyama and **K. Murakami**, "Enhancement of reflectivity of multilayer neutron mirrors by ion polishing : optimization of the ion beam parameters", *J. Phys. Chem. Solids.*, **60**, 1587, (1999).
  23. H. Hara, S. Nagata, R. Kano, K. Kumagai, T. Sakao, T. Shimizu, S. Tsuneta, T. Yoshida, W. Ishiyama, T. Oshino and **K. Murakami**, "Narrow-bandpass multilayer mirrors for an extreme-ultraviolet Doppler telescope", *Appl. Opt.*, **38**, 6617, (1999).
  24. H. Kinoshita, T. Watanabe, Y. Li, A. Miyafuji, T. Oshino, K. Sugisaki, **K. Murakami**, S. Irie, S. Shirayone and S. Okazaki, "Recent advances of three-aspherical-mirror system for EUVL", *Proc. SPIE*, **3997**, 70, (2000).
  25. M. Shiraishi, W. Ishiyama, T. Oshino and **K. Murakami**, "Stress reduction of molybdenum /silicon multilayers deposited by ion-beam sputtering", *Proc. SPIE*, **3997**, 620, (2000).
  26. K. Sugisaki, T. Oshino, **K. Murakami**, T. Watanabe, H. Kinoshita, A. Miyafuji, S. Irie and S. Shirayone, "Assembly and alignment of three-aspherical-mirror optics for extreme ultraviolet projection lithography", *Proc. SPIE*, **3997**, 751, (2000).
  27. S. Irie, T. Watanabe, H. Kinoshita, A. Miyafuji, K. Sugisaki, T. Oshino and **K. Murakami**, "Development for the alignment procedure of three-aspherical mirror optics", *Proc. SPIE*, **3997**, 807, (2000).
  28. H. Kondo, N. Kandaka, K. Sugisaki, T. Oshino, M. Shiraishi, W. Ishiyama and **K. Murakami**,

- “Development of an EUV reflectometer using a laser plasma x-ray source”, Proc. SPIE, **4144**, 76, (2000).
29. T. Watanabe, H. Kinoshita, H. Nii, Y. Li, K. Hamamoto, T. Oshino, K. Sugisaki, **K. Murakami**, S. Irie, S. Shirayone, Y. Gomei and S. Okazaki, “Development of the large field extreme ultraviolet lithography camera”, J. Vac. Sci. Technol. B, **18**, 2905, (2000).
  30. M. Shiraishi, W. Ishiyama, T. Oshino and **K. Murakami**, “Low-stress molybdenum/silicon multilayer coatings for extreme ultraviolet lithography”, Jpn. J. Appl. Phys., **39**, 6810, (2000).
  31. K. Ota, **K. Murakami**, H. Kondo, T. Oshino, K. Sugisaki and H. Komatsuda, “Feasibility study of EUV scanners”, Proc. SPIE, **4343**, 60, (2001).
  32. M. Shiraishi, W. Ishiyama, N. Kandaka, T. Oshino and **K. Murakami**, “In-situ stress measurement of molybdenum/silicon multilayers and low-stress multilayers for extreme ultraviolet lithography”, Proc. SPIE, **4343**, 590, (2001).
  33. N. Kandaka, H. Kondo, K. Sugisaki, T. Oshino, M. Shiraishi, W. Ishiyama and **K. Murakami**, “Development of an EUV reflectometer using a single line emission from a laser-plasma x-ray source”, Proc. SPIE, **4343**, 599, (2001).
  34. **K. Murakami** and M. Shiraishi, “Stress control of Mo/Si-based multilayer coatings deposited by ion-beam sputtering”, Proc. SPIE, **4506**, 56, (2001).
  35. M. Shiraishi, W. Ishiyama, N. Kandaka, T. Oshino and **K. Murakami**, “Effect of argon and non-argon ion impingement on the stress reduction of multilayers for extreme-ultraviolet lithography”, Proc. SPIE, **4688**, 516, (2002).
  36. S. Irie, M. Endo, M. Sasago, N. Kandaka, H. Kondo and **K. Murakami**, “Measurement of resist transmittance at extreme ultraviolet wavelength”, Jpn. J. Appl. Phys., **41**, 4027, (2002).
  37. S. Irie, M. Endo, M. Sasago, N. Kandaka, H. Kondo and **K. Murakami**, “Study of transmittance of polymers and influence of photoacid generator on resist transmittance at extreme ultraviolet wavelength”, Jpn. J. Appl. Phys., **41**, 5864, (2002).
  38. Y. Li, K. Ota and **K. Murakami**, “Thermal and structural deformation and its impact on optical performance of projection optics for extreme ultraviolet lithography”, J. Vac. Sci. Technol. B, **21**, 127, (2003).
  39. T. Oshino, M. Shiraishi, N. Kandaka, K. Sugisaki, H. Kondo, K. Ota, K. Mashima, **K. Murakami**, H. Oizumi, I. Nishiyama and S. Okazaki, “Development of illumination optics and projection optics for high-NA EUV exposure tool (HiNA)”, Proc. SPIE, **5037**, 75, (2003).
  40. M. Shiraishi, N. Kandaka and **K. Murakami**, “Mo/Si multilayers deposited by low-pressure rotary magnet cathode sputtering for extreme-ultraviolet lithography”, Proc. SPIE, **5037**, 249, (2003).
  41. **K. Murakami**, J. Saito, K. Ota, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, K. Sugisaki, Y. Zhu, M. Hasegawa, Y. Sekine, S. Takeuchi, C. Ouchi, O. Kakuchi, Y. Watanabe, T. Hasegawa, S.

- Hara and A. Suzuki, “Development of an experimental EUV interferometer for benchmarking several EUV wavefront metrology schemes”, Proc. SPIE, **5037**, 257, (2003).
42. 村上 勝彦, 岡崎 信次, “EUV リソグラフィと露光装置”, J. Plasma. Fusion Res., **79**, 221, (2003).
  43. Y. Zhu, K. Sugisaki, **K. Murakami**, K. Ohta, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, J. Saito, A. Suzuki, M. Hasegawa, Y. Sekine, S. Takeuchi, C. Ouchi, O. Kakuchi, Y. Watanabe, T. Hasegawa and S. Hara, “Shearing interferometry for at wavelength wavefront measurement of extreme-ultraviolet lithography projection optics”, Jpn. J. Appl. Phys., **42**, 5844, (2003).
  44. 村上 勝彦, “極限の波面計測”, O plus E, **26**, 43, (2004).
  45. Y. Sekine, A. Suzuki, M. Hasegawa, C. Ouchi, Y. Kuramoto, S. Hara, T. Hasegawa, S. Kato, **K. Murakami**, J. Saito, K. Ota, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, K. Sugisaki, Y. Zhu, K. Otaki and Z. Liu, “Wavefront errors of reference spherical waves in High NA Point Diffraction Interferometers”, J. Vac. Sci. Technol. B, **22**, 104, (2004).
  46. Z. Liu, Y. Zhu, M. Ishii, J. Saito, **K. Murakami**, K. Sugisaki, A. Suzuki and M. Hasegawa, “Double gratings lateral shearing interferometer for EUVL”, Jpn. J. Appl. Phys., **43**, 3718, (2004).
  47. **K. Murakami** and M. Shiraishi, “Development of Mo/Si multilayers deposited by low-pressure rotary magnet cathode sputtering for EUV lithography”, Proc. SPIE, **5193**, 145, (2004).
  48. K. Otaki, Y. Zhu, M. Ishii, S. Nakayama, **K. Murakami** and T. Gemma, “Rigorous wavefront analysis of the visible-light point diffraction interferometer for EUVL”, Proc. SPIE, **5193**, 182, (2004).
  49. M. Shiraishi, N. Kandaka and **K. Murakami**, “Low-stress and high-reflectivity molybdenum /silicon multilayers deposited by low-pressure rotary magnet cathode sputtering for EUV lithography”, Proc. SPIE, **5374**, 104, (2004).
  50. K. Sugisaki, M. Hasegawa, S. Kato, C. Ouchi, J. Saito, M. Niibe, A. Suzuki and **K. Murakami**, “Evaluation of contamination deposition on pinholes used in EUV at-wavelength PDI”, Proc. SPIE, **5374**, 702, (2004).
  51. T. Hasegawa, C. Ouchi, M. Hasegawa, S. Kato, A. Suzuki, K. Sugisaki, **K. Murakami**, J. Saito and M. Niibe, “EUV wavefront metrology system in EUVA”, Proc. SPIE, **5374**, 797, (2004).
  52. Y. Zhu, K. Sugisaki, C. Ouchi, M. Hasegawa, M. Niibe, A. Suzuki and **K. Murakami**, “Lateral shearing interferometer for EUVL: theoretical analysis and experiment”, Proc. SPIE, **5374**, 824, (2004).
  53. T. Oshino, T. Yamamoto, T. Miyoshi, M. Shiraishi, T. Komiya, N. Kandaka, H. Kondo, K. Mashima, K. Nomura, **K. Murakami**, H. Oizumi, I. Nishiyama and S. Okazaki, “Fabrication of aspherical mirrors for HiNA (high numerical aperture EUV exposure tool) set-3 projection optics”, Proc. SPIE, **5374**, 897, (2004).

54. T. Oshino, S. Takahashi, T. Yamamoto, T. Miyoshi, M. Shiraishi, T. Komiya, N. Kandaka, H. Kondo, K. Mashima, K. Nomura, **K. Murakami**, H. Oizumi, I. Nishiyama and S. Okazaki, “Fabrication of aspherical mirrors for EUV projection optics set-3 of HiNA”, Proc. SPIE, **5533**, 10, (2004).
55. M. Hasegawa, C. Ouchi, T. Hasegawa, S. Kato, A. Ohkubo, A. Suzuki, K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki, **K. Murakami**, J. Saito, M. Niibe and M. Takeda, “Recent progress of EUV wavefront metrology in EUVA”, Proc. SPIE, **5533**, 27, (2004).
56. T. Oshino, S. Takahashi, T. Yamamoto, T. Miyoshi, M. Shiraishi, T. Komiya, N. Kandaka, H. Kondo, K. Mashima, K. Nomura, **K. Murakami**, H. Oizumi, I. Nishiyama and S. Okazaki, “Development of projection optics set-3 for high-numerical-aperture extreme ultraviolet exposure tool (HiNA)”, J. Vac. Sci. Technol. B, **22**, 2975, (2004).
57. Z. Liu, K. Sugisaki, M. Ishii, Y. Zhu, J. Saito, A. Suzuki, M. Hasegawa and **K. Murakami**, “Astigmatism measurement by lateral shearing interferometer”, J. Vac. Sci. Technol. B, **22**, 2980, (2004).
58. H. Oizumi, Y. Tanaka, F. Kumasaka, L. Nishiyama, H. Kondo, M. Shiraishi, T. Oshino, K. Sugisaki and **K. Murakami**, “Lithographic performance of high-numerical-aperture (NA=0.3) EUV small-field exposure tool (HINA)”, Proc. SPIE, **5751**, 102, (2005).
59. S.Kato, C. Ouchi, M. Hasegawa, A. Suzuki, T. Hasegawa, K. Sugisaki, M. Okada, Y. Zhu, **K. Murakami**, J. Saito, M. Niibe and M. Takeda, “Comparison of EUV interferometry methods in EUVA Project”, Proc. SPIE, **5751**, 110, (2005).
60. Z. Liu, M. Okada, K. Sugisaki, M. Ishii, Y. Zhu, K. Ohtaki, J. Saito, A. Suzuki, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Kato, **K. Murakami** and M. Niibe, “Double-grating lateral shearing interferometer for EUV optics at-wavelength measurement”, Proc. SPIE, 5752, 663, (2005).
61. Y. Zhu, K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki, Z. Liu, M. Ishii, J. Kawakami, J. Saito, **K. Murakami**, C. Ouchi, M. Hasegawa, S. Kato, T. Hasegawa, A. Suzuki and M. Niibe, “Experimental comparison of absolute PDI and lateral shearing interferometer”, Proc. SPIE, **5752**, 1192, (2005).
62. K. Sugisaki, M. Okada, Y. Zhu, K. Otaki, Z. Liu, J. Kawakami, M. Ishii, J. Saito, **K. Murakami**, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Kato, T. Hasegawa, A. Suzuki, H. Yokota, M. Niibe and M. Takeda, “Comparison between EUV at-wavelength metrological methods”, Proc. SPIE, **5921**, 59210D, (2005).
63. 村上 勝彦, “EUV 光学系絶対波面計測技術の開発”, 超精密, **15**, 45, (2005).
64. K. Sugisaki, M. Hasegawa, M. Okada, Y. Zhu, K. Otaki, Z. Liu, M. Ishii, J. Kawakami, **K. Murakami**, J. Saito, S. Kato, C. Ouchi, A. Ohkubo, Y. Sekine, T. Hasegawa, A. Suzuki, M. Niibe and M. Takeda, “EUVA's challenges toward 0.1nm accuracy in EUV at-wavelength interferometry”, Proc. Fringe 2005, 252, (2005).

65. T. Miura, **K. Murakami**, K. Suzuki, Y. Kohama, Y. Ohkubo and T. Asami, “Nikon EUVL development progress summary”, Proc. SPIE, **6151**, 615105, (2006).
66. Y. Kakutani, M. Niibe, Y. Gomei, H. Takase, S. Terashima, S. Matsunari, T. Aoki, **K. Murakami** and Y. Fukuda, “Effect of residual gas atmosphere on lifetime of Ru-capped EUVL projection optics mirror”, Proc. SPIE, **6151**, 61510H, (2006).
67. M. Niibe, Y. Kakutani, S. Terashima, H. Takase, Y. Gomei, S. Matsunari, T. Aoki, **K. Murakami** and Y. Fukuda, “New contamination experimental equipment in the NewSUBARU and evaluation of Si-capped multilayer mirrors using it”, Proc. SPIE, **6151**, 615134, (2006).
68. H. Takase, S. Terashima, Y. Gomei, M. Tanabe, Y. Watanabe, T. Aoki, **K. Murakami**, S. Matsunari, M. Niibe and Y. Kakutani, “Study of ruthenium-capped multilayer mirror for EUV irradiation durability”, Proc. SPIE, **6151**, 615135, (2006).
69. C. Ouchi, S. Kato, M. Hasegawa, T. Hasegawa, H. Yokota, K. Sugisaki, M. Okada, **K. Murakami**, J. Saito, M. Niibe and M. Takeda, “EUV Wavefront Metrology at EUVA”, Proc. SPIE, **6152**, 61522O, (2006).
70. M. Niibe, Y. Kakutani, S. Terashima, H. Takase, Y. Gomei, S. Matsunari, T. Aoki, **K. Murakami** and Y. Fukuda, “New extreme ultraviolet irradiation and multilayer evaluation system for extreme ultraviolet lithography mirror contamination in the New SUBARU”, Jpn. J. Appl. Phys., **45**, 5373, (2006),
71. T. Miura, **K. Murakami**, K. Suzuki, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada and Y. Ohkubo, “Nikon EUVL development progress update”, Proc. SPIE, **6517**, 651707, (2007).
72. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and H. Iwata, “Development of optics for EUV lithography tools”, Proc. SPIE, **6517**, 65170J, (2007).
73. Y. Zhu, K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki, Z. Liu, J. Kawakami, M. Ishii, J. Saito, **K. Murakami**, M. Hasegawa, C. Ouchi, S. Kato, T. Hasegawa, A. Suzuki, H. Yokota, and M. Niibe, “Wavefront measurement interferometry at the operational wavefront of extreme ultraviolet lithography (EUVL)”, Appl. Opt., **46**, 6783, (2007).
74. S. Renwick, D. Williamson, K. Suzuki and **K. Murakami**, “Optical lithography in the extreme UV”, Optics & Photonic News, **18**, 35, (2007).
75. Y. Kakutani, M. Niibe, Y. Gomei, H. Takase, S. Terashima, S. Matsunari, T. Aoki, **K. Murakami** and Y. Fukuda, “Inhibition of contamination of Ru-capped multilayer mirrors for extreme ultraviolet lithography projection optics by ethanol”, Jpn. J. Appl. Phys., **46**, 6155, (2007).
76. T. Miura, **K. Murakami**, K. Suzuki, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada, Y. Ohkubo and H. Kawai, “Nikon EUVL development progress update”, Proc. SPIE, **6921**, 69210M, (2008).
77. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and H. Iwata, “Development status of projection optics and illumination optics for EUV1”, Proc. SPIE, **6921**,

- 69210Q, (2008).
78. T. Nakayama, H. Takase, S. Terashima, T. Sudo, Y. Watanabe, Y. Fukuda, **K. Murakami**, S. Kawata, T. Aoki, S. Matsunari, Y. Kakutani and M. Niibe, “Phenomenological analysis of carbon deposition rate on the multilayer mirror”, Proc. SPIE, **6921**, 69213B, (2008).
  79. K. Sugisaki, M. Okada, K. Otaki, Y. Zhu, J. Kawakami, **K. Murakami**, C. Ouchi, M. Hasegawa, S. Kato, T. Hasegawa, H. Yokota, T. Honda and M. Niibe, “EUV Wavefront Measurement of six-mirror optic using EWMS”, Proc. SPIE, **6921**, 69212U, (2008).
  80. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, K. Nomura, H. Kawai, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada, Y. Ohkubo and T. Miura, “Development of EUV lithography tools at Nikon”, Proc. SPIE, **7140**, 71401C, (2008).
  81. T. Miura, **K. Murakami**, H. Kawai, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada and Y. Ohkubo, “Nikon EUVL development progress update”, Proc. SPIE, **7271**, 72711X, (2009).
  82. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, M. Shiraishi, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and J. Nishikawa, “Development progress of optics for EUVL at Nikon“, Proc. SPIE, **7271**, 72713R, (2009).
  83. S. Matsunari, Y. Kakutani, T. Aoki, S. Kawata and **K. Murakami**, “Durability of capped multilayer mirrors for high volume manufacturing extreme ultraviolet lithography tool”, Proc. SPIE, **7271**, 72711Z, (2009).
  84. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, M. Shiraishi, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and J. Nishikawa, “Development progress of optics for extreme ultraviolet lithography at Nikon”, J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS, **8**, 041507, (2009).
  85. T. Miura, **K. Murakami**, H. Kawai, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada and Y. Ohkubo, “Nikon EUVL development progress update”, Proc. SPIE, **7636**, 76361G, (2010).
  86. **K. Murakami**, T. Yamaguchi, A. Yamazaki, N. Kandaka, M. Shiraishi, S. Matsunari, T. Aoki and S. Kawata, “Contamination study on EUV exposure tools using SAGA Light Source (SAGA-LS)”, Proc. SPIE, **7636**, 76361U, (2010).
  87. M. Shiraishi, T. Oshino, **K. Murakami** and H. Chiba, “Flare modeling and calculation for EUV optics”, Proc. SPIE, **7636**, 763629, (2010).
  88. 村上 勝彦, “EUV 露光装置の将来動向”, OPTRONICS, **348**, 80, (2010).
  89. M. Shiraishi, T. Yamaguchi, A. Yamazaki, N. Kandaka, T. Oshino and **K. Murakami**, “A simple modeling of carbon contamination on EUV exposure tools based on contamination experiments with synchrotron source”, Proc. SPIE, **7969**, 79690N, (2011).
  90. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, K. Nomura, H. Kawai, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada and Y. Ohkubo, “Development of EUV lithography tools at Nikon”, Proc. SPIE, **7969**, 79690P, (2011).
  91. M. Shiraishi, T. Oshino, **K. Murakami** and H. Chiba, “Improvement of flare modeling and

- derivation for extreme ultraviolet optics”, Jpn. J. Appl. Phys., **50**, 06GB04, (2011).
92. **K. Murakami**, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, Y. Kawabe, T. Ono, N. Kandaka, A. Yamazaki, T. Yamaguchi, R. Shibata and M. Shiraishi, “Development of EUV lithography tool technologies at Nikon”, Proc. SPIE, **8322**, 832215, (2012).
93. **村上 勝彦**, “フルフィールド極端紫外露光装置の開発”, 光学, **43**, 132, (2012).

## 学会発表リスト

1. 村上 勝彦, 中村 浩, 押野 哲也, 二階堂 秀夫, “イオンビームスパッタ法による W/C 多層膜”, 第 51 回応用物理学会学術講演会, 1990 年 9 月 28 日, 岩手大学.
2. K. Murakami, H. Nakamura, T. Oshino and H. Nikaido, “Tungsten/carbon multilayers prepared by ion-beam sputtering”, OSA Soft-X-Ray Projection Lithography Topical Meeting, 11-Apr-91, Monterey, CA, USA.
3. 村上 勝彦, 中村 浩, 押野 哲也, 大谷 正之, 永田 浩, “Mo/Si 多層膜の作製と評価”, 第 52 回応用物理学会学術講演会, 1991 年 10 月 9 日, 岡山大学.
4. 村上 勝彦, 押野 哲也, 大谷 正之, 中村 浩, 永田 浩, “CK $\alpha$ 特性 X 線によるシュバルツシルド顕微鏡”, 第 39 回応用物理学関係連合講演会, 1992 年 3 月 28 日, 日本大学.
5. K. Murakami, H. Nakamura, T. Oshino, M. Ohtani and H. Nagata, “Schwarzschild microscope for carbon K $\alpha$  radiation”, OSA Soft-X-Ray Projection Lithography Topical Meeting, 8-Apr-92, Monterey, CA, USA.
6. K. Murakami, H. Nakamura, T. Oshino, M. Ohtani and H. Nagata, “Characterization of molybdenum/silicon multilayers deposited by ion beam sputtering and rf magnetron sputtering”, SPIE Annual Meeting 1992, 20-Jul-92, San Diego, CA, USA.
7. 村上 勝彦, 真島 清人, 大谷 正之, 永田 浩, “X 線縮小投影露光の照明光学系”, 第 54 回応用物理学会学術講演会, 1993 年 9 月 27 日, 北海道大学.
8. K. Murakami, “Condenser optics for EUVL”, US-Japan Workshop on EUV Lithography, 27-Oct-93, Hotel Mt. Fuji.
9. K. Murakami, M. Ohtani, H. Nagata, H. Oizumi, Y. Yamashita and N. Atoda, “Soft-x-ray projection imaging at 4.5nm using Schwarzschild optics”, OSA Extreme Ultraviolet Lithography Topical Meeting, 20-Sep-94, Monterey, CA, USA.
10. 村上 勝彦, “ハードフォトン用光学技術”, 第 42 回応用物理関係連合講演会「ハードフォトン技術の展望」シンポジウム, 1995 年 3 月 28 日, 東海大学.
11. K. Murakami, S. Shimizu, M. Ohtani, H. Nagata, H. Oizumi, Y. Yamashita and N. Atoda, “Electroplated reflection masks for soft x-ray projection lithography”, The 8th International MicroProcess Conference, 20-Jul-95, 仙台国際センター.
12. 村上 勝彦, “X 線光学素子用薄膜とその応用”, 薄膜第 131 委員会 第 178 回研究会「機能性薄膜の開発動向」, 1995 年 10 月 3 日, 箱根湯本温泉「ホテル滝亭」.
13. K. Murakami, “Schwarzschild type X-ray microscope (Invited)”, The 3rd International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures (PXRMS'96), 5-Mar-96, Breckenridge, CO, USA.
14. K. Murakami, “Optical elements for hard photon (Invited)”, Photon Technology Workshop, 12-Mar-96, 工業技術院つくば研究センター.
15. K. Murakami, T. Oshino, S. Shimizu, W. Wasa, H. Kondo, M. Ohtani, N. Kandaka, K. Mashima

- and K. Nomura, "Basic technologies for EUV lithography (Invited)", OSA Extreme Ultraviolet Lithography Topical Meeting, 3-May-96, Boston, MA, USA.
16. K. Murakami, "Soft x-ray imaging using Schwarzschild optics (Invited)", X-Tech 96 Workshop, 1-Oct-96, Berlin, Germany.
  17. 村上 勝彦, "EUV によるポスト 0.1 $\mu$ m リソグラフィ", 日本電子工業振興協会 ポスト 0.1 $\mu$ m 技術と産業専門委員会, 20-Dec-96.
  18. 村上 勝彦, "電析法による軟X線反射マスクの作製", 表面技術協会 第 95 回講演大会, 24-Mar-97, 武蔵工業大学.
  19. 村上 勝彦, "EUV リソグラフィ光学系におけるミラー変形の検討", 放射光の半導体への応用技術研究委員会 第 31 回定例会, 24-Oct-97.
  20. K. Murakami, T. Oshino, H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi and H. Yamanashi, "Experimental EUV exposure system using a synchrotron source", The 15th Conference of Photopolymer Science and Technology with The International Symposium on Materials & Processes for Giga-bit Lithography 1998, 24-Jun-98, 千葉大学.
  21. K. Murakami, T. Oshino, H. Kinoshita, T. Watanabe, M. Niibe, M. Ito, H. Oizumi and H. Yamanashi, "Ring-field extreme ultraviolet exposure system using aspherical mirrors", 1998 International Microprocess and Nanotechnology Conference (MNC98), 15-Jul-98, Kyoungju, Korea.
  22. 村上 勝彦, "EUVL用反射マスクブランクのピーク波長面内均一性に関する考察", 第 60 回応用物理学学会学術講演会, 1999 年 9 月 1 日, 甲南大学.
  23. K. Murakami, "Consideration of the intrafield reflectance uniformity of reflection mask blanks for EUVL", 1999 International Workshop on X-ray and Extreme Ultraviolet Lithography (XEL'99), 15-Nov-99, 横浜シンポジウム.
  24. K. Murakami, "Developments in EUV lithography in Japan", Euspen International Seminar, Future direction for nanotechnology in Europe and Japan, 18-Sep-00, Warwick, UK.
  25. K. Murakami, H. Kondo, N. Kandaka, K. Sugisaki, T. Oshino, M. Shiraishi and W. Ishiyama, "Development of compact EUV reflectometer using a laser-plasma source", 2nd International Workshop on EUV Lithography, 17-Oct-00, San Francisco, CA, USA.
  26. K. Murakami, M. Shiraishi, T. Oshino and W. Ishiyama, "Stress control of Mo/Si multilayers", 2nd International Workshop on EUV Lithography, 18-Oct-00, San Francisco, CA, USA.
  27. 村上 勝彦, "最近の超精密形状計測技術 - EUV 露光機光学系の開発へ向けて -", 第 4 回次世代フロンティア技術懇話会, 2000 年 11 月 22 日.
  28. K. Murakami, "Nikon 's activities and plans on EUVL", 1st ASET EUVL Workshop, 2001 年 5 月 23 日, ASET セミナールーム (TIME24).
  29. 村上 勝彦, "EUV 露光機光学系開発用の超精密面形状計測技術の現状", オプトメカトロニクス協会 平成 13 年度 第 1 回 フォトンテクノロジー技術部会, 2001 年 6 月 13 日.

30. K. Murakami, "Nikon's activities on EUVL", 2001 International Tutorial Lecture on EUVL Technology", 18-Jul-01, Yong-Pyong, Kangwondo, Korea.
31. K. Murakami and M. Shiraishi, "Stress control of Mo/Si-based multilayer coatings deposited by ion-beam sputtering", SPIE Annual Meeting 2001, 31-Jul-01, San Diego, CA, USA.
32. 村上 勝彦, "EUV 光学系と計測", ワークショップ「EUV 露光技術の現状と課題」, 2002 年 2 月 7 日, 東条インペリアルパレス.
33. 村上 勝彦, 真島 清人, 白石 雅之, 近藤 洋行, "顕微光電子分光用 X 線マイクロビーム光学系の設計検討", 第 49 回応用物理関係連合講演会, 2002 年 3 月 27 日, 東海大学.
34. 村上 勝彦, 斎藤 旬, 太田 和哉, 近藤 洋行, 石井 幹彦, 川上 潤, 押野 哲也, 杉崎 克己, 朱 郁葱, 鈴木 章義, 長谷川 雅宣, 関根 義之, 竹内 誠二, 大内 千種, 此内 修, 渡辺 豊, 長谷川 隆行, 原 真一, "ASET における EUV 波面計測技術開発計画", 第 63 回応用物理学関係連合講演会, 2002 年 9 月 27 日, 新潟大学.
35. K. Murakami, J. Saito, K. Ota, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, K. Sugisaki, Y. Zhu, M. Hasegawa, Y. Sekine, S. Takeuchi, C. Ouchi, O. Kakuchi, Y. Watanabe, T. Hasegawa, S. Hara and A. Suzuki, "Development plan of EUV wavefront metrology system in ASET", EUVL Symposium 2002, 15-Oct-02, Addison, TX, USA.
36. K. Murakami, J. Saito, K. Ota, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, K. Sugisaki, Y. Zhu, M. Hasegawa, Y. Sekine, S. Takeuchi, C. Ouchi, O. Kakuchi, Y. Watanabe, T. Hasegawa, S. Hara and A. Suzuki, "Development of EUV wavefront metrology technology in ASET", 2002 International Microprocesses and Nanotechnology Conference, 6-Nov-02, Tokyo Fashion Town.
37. K. Murakami, K. Mashima, M. Shiraishi and H. Kondo, "Optical design of EUV micro-beam optics for micro EUV-photoelectron spectroscopy", International Symposium on Technology and Applications of Photoelectron Micro-Spectroscopy with Laser-based VUV Sources, 4-Dec-02, Tsukuba International Congress Center.
38. K. Murakami, J. Saito, K. Ota, H. Kondo, M. Ishii, J. Kawakami, T. Oshino, K. Sugisaki, Y. Zhu, M. Hasegawa, Y. Sekine, S. Takeuchi, C. Ouchi, O. Kakuchi, Y. Watanabe, T. Hasegawa, S. Hara and A. Suzuki, "Development of an experimental EUV interferometer for benchmarking several EUV wavefront metrology schemes", SPIE Microlithography 2003, 25-Feb-03, Santa Clara, CA, USA.
39. 村上 勝彦, "EUV 光学系絶対波面計測技術の開発", H14 年度 EUVA 研究成果報告会, 2003 年 6 月 10 日, コクヨホール.
40. K. Murakami and M. Shiraishi, "Development of Mo/Si multilayers deposited by low-pressure rotary magnet cathode sputtering for EUV lithography", SPIE Annual Meeting 2003, 7-Aug-03, San Diego, CA, USA.
41. 村上 勝彦, 押野 哲也, 山本 貴広, 三好 達朗, 白石 雅之, 小宮 毅治, 神高 典明, 近

- 藤 洋行, 真島 清人, 野村 和司, 老泉 博昭, 西山 岩男, 岡崎 信次, “高NA小フィールド EUV 露光装置 HiNA の投影光学系非球面ミラー (set-3) の製作”, 第 51 回応用物理学関係連合講演会”, 2004 年 3 月 29 日, 東京工科大学.
42. 村上 勝彦, “EUV 光学系絶対波面計測技術の開発”, H15 年度 EUVA 研究成果報告会, 2004 年 6 月 8 日, コクヨホール.
  43. K. Murakami, “Development of small-field EUV projection optics HiNA-3”, NGL workshop 2004, 29-Jun-04, コクヨホール.
  44. 村上 勝彦, “EUV 波面計測技術”, 電気学会第 12 回超微細リソグラフィ技術調査専門委員会”, 2004 年 7 月 16 日, 日本交通協会.
  45. 村上 勝彦, “EUV 光学系絶対波面計測技術の開発”, 2004 年度精密工学会秋季大会シンポジウム「EUV リソグラフィ技術の最前線」, 2004 年 9 月 17 日, 島根大学.
  46. 村上 勝彦, “超精密波面計測”, 日本オプトメカトロニクス協会 フォトンテクノロジー技術部会「ナノ世代のフォトン応用技術」, 2004 年 11 月 25 日, 機械新興会館.
  47. K. Murakami, T. Oshino, S. Takahashi, T. Yamamoto, T. Miyoshi, M. Shiraishi, T. Komiya, N. Kandaka, H. Kondo, K. Mashima, K. Nomura, T. Okuyama, H. Oizumi, I. Nishiyama and S. Okazaki, “Sub-nm wavefront-precision projection optics for high-NA small field EUV exposure tool (HiNA)”, 2nd International Symposium on Technology and Application of Photoelectron Micro-Spectroscopy with Laser-Based VUV Sources, 14-Jan-05, Tsukuba International Congress Center.
  48. 村上 勝彦, “EUV 光学系絶対波面計測技術の開発”, H16 年度 EUVA 研究成果報告会, 2005 年 6 月 7 日, コクヨホール.
  49. K. Murakami, N. Kandaka, T. Tomofuji, T. Komiya and M. Shiraishi, “X-ray multilayer coating technology for extreme ultraviolet lithography tools”, The 8th International Conference on the Physics of X-Ray Multilayer Structures (PXRMS2006), 13-Mar-06, Sapporo.
  50. 村上 勝彦, “EUV 光学系絶対波面計測技術の開発”, H17 年度 EUVA 研究成果報告会, 2006 年 6 月 13 日, コクヨホール.
  51. 村上 勝彦, “EUV 絶対波面計測”, 2006 年度精密工学会秋季大会シンポジウム「製造現場を支える形状計測」, 2006 年 9 月 22 日, 宇都宮大学.
  52. K. Murakami, Katsumi Sugisaki, Masashi Okada, Katsura Ohtaki, Zhu Yucong, Zhiqian Liu, Jun Saito, Chidane Ouchi, Seima Kato, Masanobu Hasegawa, Takayuki Hasegawa, Hideo Yokota, Masahito Niibe and Mitsuo Takeda, “Development of EUV wavefront metrology system (EWMS)”, 5th International EUVL Symposium, 17-Oct-06, Barcelona, Spain.
  53. K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and H. Iwata, “Development of optics for EUV lithography tools”, SPIE Advanced Lithography 2007, 27-Feb-07, San Jose, CA, USA.
  54. 村上 勝彦, “EUV 光学系絶対波面計測技術の開発”, H18 年度 EUVA 研究成果報告会,

- 2007年5月30日, 国立博物館平成館講堂.
55. K. Murakami, K. Sugisaki, M. Okada, K. Ohtaki, Z. Yucong, Z. Liu, J. Saito, C. Ouchi, S. Kato, M. Hasegawa, T. Hasegawa, H. Yokota, M. Niibe and M. Takeda, "Development status of EUV wavefront metrology system (EWMS)", 6th International EUVL Symposium, 31-Oct-07, 札幌コンベンションセンター.
  56. K. Murakami, EUVL technology development, LithoVison 2008, 24-Feb-08, San Jose, CA, USA.
  57. K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and H. Iwata, "Development status of projection optics and illumination optics for EUV1", SPIE Advanced Lithography 2008, 26-Feb-08, San Jose, CA, USA.
  58. 村上 勝彦, "極紫外線露光装置", 東北大学先端計測シンポジウム '08 -軟X線顕微鏡計測 -, 2008年3月5日, 東北大学片平さくらホール.
  59. 村上 勝彦, "EUV 光学系絶対波面計測技術の開発", H19年度 EUVA 研究成果報告会, 2008年5月16日, コクヨホール.
  60. K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba and K. Nomura, "Improvement of optics for EUV exposure tools", 2008 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, 01-Oct-08, Lake Tahoe, CA, USA.
  61. K. Murakami, Improvement of optics for EUV exposure tools, NGL 研究会, 2008年10月21日, 海事センタービル.
  62. K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, K. Nomura, H. Kawai, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada, Y. Ohkubo and T. Miura, "Development of EUV lithography tools at Nikon", SPIE Lithography Asia 2008, 04-Nov-08, Taipei, Taiwan.
  63. K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo, M. Shiraishi, H. Chiba, H. Komatsuda, K. Nomura and J. Nishikawa, "Development progress of optics for EUVL at Nikon", SPIE Advanced Lithography 2009, 24-Feb-09, San Jose, CA, USA.
  64. 村上 勝彦, "ニコンの EUVL 技術開発", H20年度 EUVA 研究成果報告会, 2009年6月12日, 日本未来科学館.
  65. K. Murakami, T. Yamaguchi, A. Yamazaki, N. Kandaka, M. Shiraishi, S. Mastunari, T. Aoki and S. Kawata, "Contamination study on EUV exposure tools using SAGA Light Source (SAGA-LS)", SPIE Advanced Lithography 2010, 24-Feb-10, San Jose, CA, USA.
  66. 村上 勝彦, "ニコンの EUVL 技術開発", H21年度 EUVA 研究成果報告会, 2010年4月23日, 日本未来科学館.
  67. 村上 勝彦, "EUV 露光装置の開発状況と今後の展望", Electric Journal 第 258 回 Technology Symposium, EUV 露光技術の最前線徹底検証, 2010年8月24日, 総評会館.
  68. 村上 勝彦, "次世代デバイス用 EUVL 露光装置の開発", 砥粒加工学会 HEAT 専門委員会 研究会, 2010年12月8日, ニコン相模原製作所.

69. K. Murakami, “EUVL technology challenges for HVM”, LithoVision 2011, 27-Feb-11, San Jose, CA, USA.
70. K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, K. Nomura, H. Kawai, Y. Kohama, K. Morita, K. Hada and Y. Ohkubo, “Development of EUV lithography tools at Nikon”, SPIE Advanced Lithography 2011, 28-Feb-11, San Jose, CA, USA.
71. 村上 勝彦, “EUV リソグラフィ”, STRJ-WG3 会議, 2011 年 4 月 25 日, JEITA.
72. 村上 勝彦, “EUV リソグラフィ”, 電気学会 環境調和型磁気支持応用技術調査専門委員会研究会, 2011 年 6 月 16 日, ニコン相模原製作所.
73. K. Murakami, “Development of EUV exposure tool technology at Nikon” NGL Workshop 2011, 12-Jul-11, 東京工業大学 蔵前会館 (Tokyo Tech Front).
74. 村上 勝彦, “EUV 露光装置の開発状況と今後の展望”, Electric Journal 第 876 回 Technology Seminar, EUV 露光技術の最前線徹底検証, 2011 年 8 月 25 日, 総評会館.
75. K. Murakami, H. Chiba, M. Kanaoka, K. Nomura, K. Otaki, M. Shiraishi, A. Yamada, S. Takahashi, N. Kandaka, A. Yamazaki, T. Yamaguchi, T. Oshino, H. Kondo and K. Ota, “Development of EUV lithography tool technologies in Nikon”, 2011 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, 17-Oct-11, Miami, FL, USA.
76. K. Murakami, “EUVL technology challenges for HVM”, LithoVision 2012, 12-Feb-12, San Jose, CA, USA.
77. K. Murakami, T. Oshino, H. Kondo, H. Chiba, Y. Kawabe, T. Ono, N. Kandaka, A. Yamazaki, T. Yamaguchi, R. Shibata and M. Shiraishi, “Development of EUV lithography tool technologies at Nikon”, SPIE Advanced Lithography 2012, 15-Feb-12, San Jose, CA, USA.
78. 村上 勝彦, “EUV リソグラフィの現状と課題”, 応用物理学会 日本光学会 第 123 回 微小光学研究会「超精密微小光学」, 2012 年 3 月 1 日, 東海大学.
79. 村上 勝彦, “EUV リソグラフィ”, 第 50 回応用物理学会スクール「半導体リソグラフィ技術の基礎」, 2012 年 3 月 16 日, 早稲田大学.
80. 村上 勝彦, “波面収差 sub-nm の投影系を備えた EUV 露光装置の開発”, 日本光学会光設計研究グループ研究会, 2012 年 11 月 2 日, 板橋区グリーンホール.
81. K. Murakami, N. Kandaka, T. Yamaguchi, A. Yamazaki, T. Hagiwara, T. Oshino, J. Inoue and K. Ota, “Contamination control in EUV exposure tools (Invited)”, 2013 International Workshop on EUV Lithography, 12-Jun-13, Maui, HI, USA.

## 日本登録特許一覧

1. 特許第 2569447 号, 1996. 10. 24, 多層膜反射鏡の製造方法, 村上 勝彦
2. 特許第 2814595 号, 1998. 08. 14, 多層膜反射鏡, 村上 勝彦
3. 特許第 2979667 号, 1999. 09. 17, 反射型の X 線露光用マスク, 村上 勝彦
4. 特許第 2993147 号, 1999. 10. 22, X 線高次光除去フィルター, 村上 勝彦
5. 特許第 2993261 号, 1999. 10. 22, X 線多層膜反射鏡, 村上 勝彦, 押野 哲也
6. 特許第 3018648 号, 2000. 01. 07, X 線多層膜反射鏡の製造方法, 村上 勝彦, 大谷 正之
7. 特許第 3033323 号, 2000. 02. 18, X 線多層膜反射鏡の製造方法, 村上 勝彦, 押野 哲也
8. 特許第 3077422 号, 2000. 06. 16, X 線露光装置, 村上 勝彦
9. 特許第 3144175 号, 2001. 01. 05, X 線光学素子および X 線光学系, 村上 勝彦
10. 特許第 3178182 号, 2001. 04. 13, 非球面ミラー製造方法, 村上 勝彦
11. 特許第 3189528 号, 2001. 05. 18, X 線投影露光装置, 村上 勝彦, 真島 清人, 永田 浩
12. 特許第 3254771 号, 2001. 11. 30, X 線縮小投影露光装置および方法,  
村上 勝彦, 影山 元英
13. 特許第 3267000 号, 2002. 01. 11, 非球面ミラー製造方法, 村上 勝彦
14. 特許第 3279090 号, 2002. 02. 22, 照明装置および露光装置,  
村上 勝彦, 押野 哲也, 真島 清人
15. 特許第 3316699 号, 2002. 06. 14, X 線反射用光学素子およびそれを有する X 線光学系,  
村上 勝彦
16. 特許第 3336361 号, 2002. 08. 09, 縮小投影露光用反射型 X 線マスクの検査装置および検査方法, 村上 勝彦, 押野 哲也
17. 特許第 3336514 号, 2002. 08. 09, X 線反射型マスク及び X 線投影露光装置, 村上 勝彦
18. 特許第 3358097 号, 2002. 10. 11, X 線投影露光装置, 村上 勝彦
19. 特許第 3395224 号, 2003. 02. 07, 薄膜形成方法およびその装置ならびに光学部品,  
村上 勝彦, 押野 哲也
20. 特許第 3608015 号, 2004. 10. 22, 照明装置および露光装置,  
村上 勝彦, 押野 哲也, 真島 清人
21. 特許第 3794442 号, 2006. 04. 21, 照明装置および露光装置, 村上 勝彦, 真島 清人
22. 特許第 4120502 号, 2008. 05. 09, 集光光学系、光源ユニット、照明光学装置および露光装置, 村上 勝彦
23. 特許第 4320578 号, 2009. 06. 12, 多層膜反射鏡の製造方法, 村上 勝彦
24. 特許第 4374735 号, 2009. 09. 18, 反射型軟 X 線顕微鏡、マスク検査装置及び反射マスクの製造方法, 村上 勝彦, 近藤 洋行
25. 特許第 4539335 号, 2010. 07. 02, 多層膜反射鏡、EUV 露光装置、及び多層膜反射鏡におけるコンタミネーションの除去方法, 村上 勝彦
26. 特許第 4683231 号, 2011. 02. 18, EUV 光源、EUV 露光装置、及び半導体デバイスの製造

方法, 村上 勝彦

27. 特許第 4715525 号, 2011. 04. 08, 多層膜反射鏡、及び EUV 露光装置, 村上 勝彦
28. 特許第 4924604 号, 2012. 02. 17, 投影光学系、露光装置および半導体デバイスの製造方法, 村上 勝彦, 小宮 毅治

## 米国登録特許一覧

1. 5,572,564, 1996/11/5, Reflecting photo mask for x-ray exposure and method for manufacturing the same, Katsuhiko Murakami
2. 5,581,605, 1996/12/3, Optical element, production method of optical element, optical system, and optical apparatus, Katsuhiko Murakami, Kiyoto Mashima, Takashi Mori, Osamu Tanitsu
3. 6,160,867, 2000/12/12, Multi-layer X-ray-reflecting mirrors with reduced internal stress, Katsuhiko Murakami
4. 6,295,164, 2001/9/25, Multi-layered mirror, Katsuhiko Murakami, Masayuki Shiraishi
5. 6,333,961, 2001/12/25, Reflection masks, microlithography apparatus using same, and integrated circuit manufacturing methods employing same, Katsuhiko Murakami
6. 6,377,655, 2002/4/23, Reflective mirror for soft x-ray exposure apparatus, Katsuhiko Murakami, Tokio Kato, Kuninori Shinada
7. 6,441,963, 2002/8/27, Multi-layered mirror, Murakami Katsuhiko, Masayuki Shiraishi
8. 6,522,716, 2003/2/18, Multilayer-film reflective mirrors, extreme UV microlithography apparatus comprising same, and microelectronic- device manufacturing methods utilizing same, Katsuhiko Murakami, Yutaka Ichihara
9. 6,522,717, 2003/2/18, Reflective-type soft x-ray microscope, Katsuhiko Murakami, Hiroyuki Kondo
10. 6,861,656, 2005/3/1, High-luminosity EUV-source devices for use in extreme ultraviolet (soft X-ray) lithography systems and other EUV optical systems, Katsuhiko Murakami
11. 7,385,212, 2008/6/10, Collector optical system, light source unit, illumination optical apparatus, and exposure apparatus, Katsuhiko Murakami
12. 7,417,708, 2008/8/26, Extreme ultraviolet exposure apparatus and vacuum chamber, Katsuhiko Murakami
13. 7,456,417, 2008/11/25, Laser plasma EUV light source, target material, tape material, a method of producing target material, a method of providing targets, and an EUV exposure device, Katsuhiko Murakami, Hideya Inoue
14. 7,741,616, 2010/6/22, EUV light source, EUV exposure equipment, and semiconductor device manufacturing method, Katsuhiko Murakami
15. 7,773,196, 2010/8/10, Projection-optical systems and exposure apparatus comprising same, Katsuhiko Murakami, Takaharu Komiya
16. 8,121,254, 2012/2/21, Optical element, exposure apparatus using this, and device manufacturing method, Katsuhiko Murakami, Takaharu Komiya