

最近の研究から

EUV リソグラフィ用 Mo/Si 多層膜の評価

神高典明, 村上勝彦
(株) ニコン

Evaluation of Mo/Si multilayer for EUV lithography

Noriaki KANDAOKA, Katsuhiko MURAKAMI
Nikon Corporation

1. はじめに

半導体技術は現在の情報社会を支える技術であり、半導体集積回路の性能を向上させるための技術開発が精力的に行われている。半導体素子の性能向上は半導体集積回路の高集積化によりなされるところが大きく、集積回路の回路パターンを焼き付ける半導体露光（半導体リソグラフィ）技術の向上は特に重要である。我々は、将来のリソグラフィ技術である EUV リソグラフィ（Extreme ultraviolet lithography）を実現するために欠かすことのできない Mo/Si 多層膜の開発を行っている [1]。

半導体リソグラフィでは、レジストと呼ばれる感光性の高分子化合物を表面に薄く塗布したシリコンウエハ上に、レチクル（回路パターンの原版）上のパターンを光によって縮小転写することによって微細な回路パターンを形成する。ここで、レチクル上に光を導き照明するための光学系を照明光学系、レチクル上の回路パターンを縮小転写するための光学系を投影光学系と呼ぶ。半導体リソグラフィにおいて転写できる最小パターンサイズは、露光に使用する光の波長と投影光学系の開口数（NA=numerical aperture；結像点に向かって集光する光の半開き角（ θ ）の正弦（ $\sin\theta$ ）に屈折率 n を掛けた値）によって原理的に制限され、波長が短く NA は大きい方がより細かいパターンを結像することができる。NA を大きくすることには物理的な限界もあることから、パターンサイズの微細化のために露光に使用する光の短波長化が進められてきた。半導体リソグラフィの使用波長の短波長化は、436 nm（水銀ランプの g 線）→ 365 nm（i 線）→ 248 nm（KrF レーザー）→ 193 nm（ArF レーザー）と進んできたが、さらに短波長の領域では透明で安定な物質が存在しないため、光学系を構成するレンズの製作が困難となる。そのため、193 nm（ArF レーザー）の波長を使用し光学系とウエハとの間に屈折率が 1 より大きい液体を満たして実効的な NA を大きくすることによる ArF 液浸と呼ばれる手法により更なる微細化が図られようとしている。

EUV リソグラフィは、上記のような手法をもってしても対応が困難な half-pitch 45 nm 以下のテクノロジーノードに対応するための露光技術である。EUV（Extreme ultraviolet）は極端紫外光と訳されるが、通常、軟 X 線と呼ばれている波長域の光と考えると良く、リソグラフィに使

用するのは波長 13.5 nm 付近の光である。Fig. 1 に EUV 露光装置の概略構成図を示す。EUV 露光装置は大きく分けて、光源、照明光学系、レチクルステージ、投影光学系、ウエハステージからなっている。この波長域では透明な物質が存在しないため透過型の屈折系光学系は使用できず、光学系は反射鏡で構成される。さらに EUV 光は大気によっても吸収されてしまうため、光学系はすべて真空チャンバ内に配置されなければならない。また、物質の屈折率は 1 に近く、通常表面反射ではほとんど反射しないため、表面に 2 種類あるいはそれ以上の物質の非常に薄い層を交互に積層した多層膜反射鏡が使用される。波長 13.5 nm 付近では、モリブデン（Mo）とシリコン（Si）を約 7 nm の

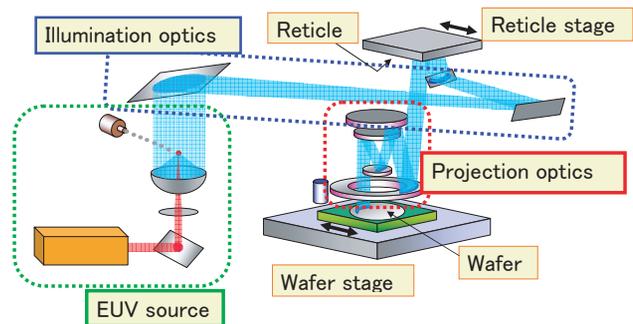


Figure 1 Schematic diagram of EUV lithography system

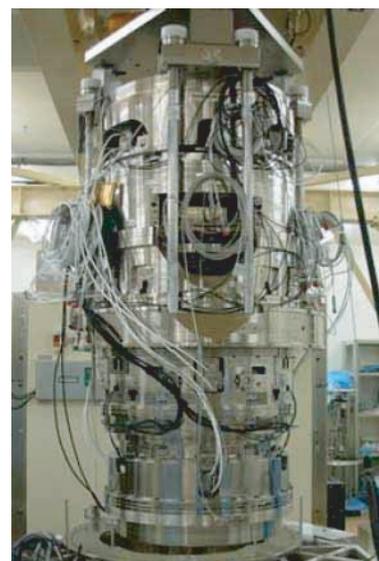


Figure 2 EUV projection optics

周期で交互に成膜した多層膜反射鏡により 70% 近い反射率が得られることから、EUV リソグラフィではこの波長が選択されている。Fig. 2 は EUV 露光装置の投影光学系鏡筒の外観である。外から多層膜反射鏡基板は全く見えないが、内部には高精度に加工・成膜された 6 枚の基板が厳密な精度で位置を調整して設置されており、有効領域内平均で 0.6 nmrms の波面収差を達成している。この鏡筒を使い、EUV 光によって 35 nm 以下の L&S のパターンを露光できることが確認されている。

2. Mo/Si 多層膜反射鏡に求められる性能

EUV リソグラフィの光学系を構成する Mo/Si 多層膜反射鏡にはさまざまな性能が求められる [2-9]。

(a) 高反射率

13.5 nm 付近における Mo/Si 多層膜の多層膜の反射率は理論上 74% を超えるが、表面（界面）の粗さ、モリブデン層とシリコン層の間に形成される拡散層、膜中に含まれる不純物による吸収などによって低下し、実際に得られる反射率は 65 ~ 70% である。EUV リソグラフィでは 10 枚以上の多層膜反射鏡（照明光学系に 4 ~ 6 枚、反射レチクル用多層膜、投影光学系に 6 枚）が使用されるため、各反射面における反射率は少しでも高いことが求められる。1 つの反射面の反射率を 1% 向上させることができれば、光学系全体の透過率は 1 割以上向上し、ウエハ面上により多くの EUV 光を導くことができるようになる。光学系の透過率は露光装置の処理能力（生産能力）に直結するため、反射率の向上は最優先の課題である。

(b) 面内膜厚分布

光学系を構成する反射鏡表面における EUV 光の入射角は基板面上で一定ではない。Mo/Si 多層膜では、入射角が違えば反射率ピーク波長が変化するため、入射角が異なる反射面上で常に 13.5 nm で高い反射率を得るためには面内に周期長分布（膜厚分布）をつけることが必要である。基板の形状、最適の膜厚分布は基板ごとに異なるため、目標の膜厚分布で成膜できるように膜厚分布が制御できなければならない。

(c) 膜応力

EUV リソグラフィの投影光学系では、目標とする光学性能を得るために波面収差を少なくとも 1 nmrms 以下に抑える必要があり、そのために、投影光学系を構成する個々の反射鏡の表面形状の誤差は少なくとも 0.2 nmrms 以下と、まさに原子層レベルの精度が必要である。一般に Mo/Si 多層膜は数百 MPa の圧縮応力を有しているため、成膜前の基板面が全く誤差のない形状に研磨されていたとしても、Mo/Si 多層膜を成膜すると膜応力により基板面が変形してしまう。非常に高い面精度が要求される投影光学系ではその変形が無視できないため、多層膜の応力を低減し膜応力による基板の変形を抑えることが必要である。

(d) EUV 照射耐性

EUV リソグラフィで使用する EUV 光は約 92 eV のエネルギーを有している。EUV 光は大気中では吸収されるた

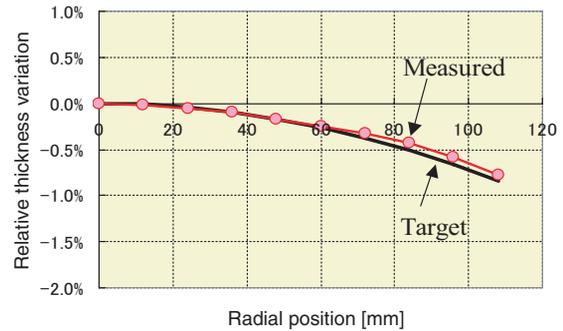


Figure 3 Thickness variation of Mo/Si multilayer

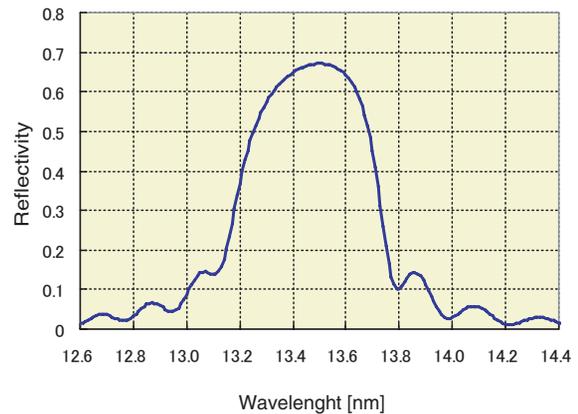


Figure 4 Reflectivity of Mo/Si multilayer for EUV projection optics

め、露光は真空チェンバ内で行われるが、高分子量の有機物が存在する雰囲気中で EUV 光が多層膜反射鏡に照射されると、反射面上で有機物が分解し表面に炭素汚れ（カーボンコンタミ）が付着する。表面に付着した炭素は EUV 光を吸収し、反射率低下の原因となるため、EUV 光照射時に微量の酸素を導入し、 $C + O_2 \rightarrow CO_2$ とすることで炭素の付着を防ぐことが検討されている。しかしながら、酸素を導入した雰囲気では Mo/Si 多層膜の最上層シリコン層が酸化して SiO_2 層となり、これも EUV 反射率を低下させる原因となるため、酸素導入雰囲気中で EUV 光を照射しても酸化しない（反射率が低下しない）多層膜が必要となる。そのために Mo/Si 多層膜の表面に耐酸化性の高い物質を成膜し、酸化の影響を受けない構造とすることが検討されている。このとき、反射率の低下を生じない、あるいは低下量を極力小さくすることが求められる。

実際の EUV 露光装置の基板への成膜では、応力の低減、Cap 層による耐酸化性向上対策を施した多層膜で、基板上で最適な膜厚分布となるように膜厚分布の調整をおこなう。Fig. 3 に、基板上の目標分布と調整の結果得られた分布を示す。目標分布は基板中心に対し回転対称な分布であり、現在我々は 0.1% の精度で膜厚制御することが可能である。この状態で成膜基板面と同じ位置に配置した Si ウエハチップに成膜した多層膜 ($d=7.05$ nm) の反射率を評価したところ 66.8% であった (Fig. 4)。

3. EUV リソグラフィ用 Mo/Si 多層膜における、散乱による光量損失量の評価

3-1. Mo/Si 多層膜の反射率低下要因と散乱光強度分布評価の必要性

EUV リソグラフィ光学系に成膜する多層膜において、反射率を向上させることが最優先課題の1つであることは既に述べた。現在この反射率をさらに高めるための開発を行っているが、反射率の向上のためには反射率低下要因の究明が不可欠であることは言うまでもない。Mo/Si 多層膜の反射率低下要因の主な原因としては、①表面（界面）粗さによって生じる散乱、② Mo-Si 界面における拡散層の形成、③不純物の膜中への混入、の3つが挙げられるが、我々は“①”の要因による反射率の低下量について、散乱光強度の角度分布を実測することにより定量的な評価を行っている。散乱光強度を測定し、どの程度反射率低下に影響しているかを評価することは、反射率の向上を図る上で重要な手がかりとなる。

3-2. 散乱光強度角度分布測定方法

我々は EUV 散乱光強度の評価実験を高エネルギー加速器研究機構の Photon Factory で実施している。散乱光は非常に微弱なため、細く絞った平行に近い大光量のビームをサンプルに照射することができる放射光光源は散乱光強度の測定には適した光源である。Fig. 5 に散乱光強度測定時の配置を示す。測定はビームライン 12A に高精度斜入射反射率計チェンバを配置しておこなっている。分光された EUV 光はチェンバ内に配置したスリットを通過してサンプルに入射し、正反射光だけでなく正反射光の周辺に広がる散乱光を光電子増倍管により検出する。散乱光は正反射と比べると強度が数桁弱いため散乱光検出時には光電子増倍管に印加する電圧を上げ、検出感度を上げて測定をおこなう。測定時の光電子増倍管のバックグラウンド電流は、散乱光測定時の印加電圧（1200 V）でも 0.01 pA 以下と小さく、正反射光受光時と散乱光検出時を比べると 7 桁以上の広いダイナミックレンジでの測定を行うことが可能である。

3-3. 散乱光量測定と損失光量評価の例 [10]

例として、過去に測定した2つの Mo/Si 多層膜サンプルの散乱光強度の測定結果を Fig. 6 に示す。これらのサンプル

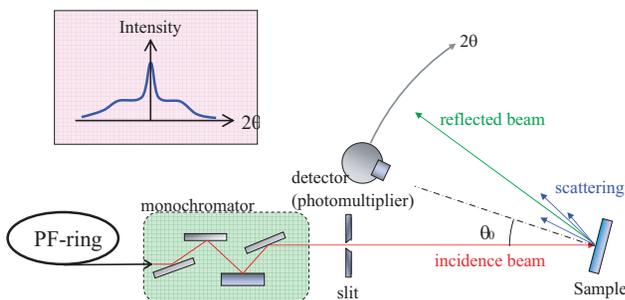


Figure 5 Experimental set-up for EUV angular scattering distribution measurement

A, B は応力の低減、耐酸化性の向上等の対策を施していない多層膜を粗さの違う基板に成膜し、表面（界面）粗さの違う多層膜としたものである。EUV 光の入射角は 14 度で、多層膜の周期長が少し違うためにピーク波長がわずかにずれているが、散乱光の測定はいずれも波長 13.4 nm で行った。成膜は 2 枚の基板を同時に成膜装置にセットして行っており、成膜後の両者の EUV 反射率の差は基板表面粗さによって生じると予想される。グラフの縦軸は相対的な強度であるが、検出面近傍に配置したアパーチャの取り込み立体角を考慮し、サンプルへの入射光強度を 1 とした場合の単位立体角あたりの強度としてある。また、散乱角が 1 度以下の領域は急激に強度が上昇しているが、これは正反射光がアパーチャに入射しているためであり、この角度領域の強度は正確には測定できていないことに注意が必要である。Table 1 にはこれら 2 つのサンプルの AFM による表面粗さの評価結果を示す。AFM での測定は 10 μm × 10 μm, 1 μm × 1 μm の 2 種類の領域でおこなった。EUV 光の散乱を考える場合、入射する波長と同等程度の構造周期の粗さまでを評価する必要があるため、粗さは AFM で評価することが必要である。Fig. 7 にはこれらのサンプルの EUV 反射率を示す。

Fig.6 からわかるように、2 つのサンプルの散乱光強度分布は、散乱角度が小さい領域ではサンプル B の強度が高いが、散乱角度が大きくなっていくにしたがって強度の差は小さくなり、散乱角が 8 度以上の領域では、両者の強度はほぼ同等となった。グレーティングにおける回折現象を考える場合と同様に、粗さの構造周期と散乱角との間には相関があり、構造周期が短いと散乱角度が大きくなる。波長 13.4 nm の場合、EUV 光を 8 度の方向に散乱させる粗さの構造周期はおよそ 100 nm である。よって 2 つのサンプルは、構造周期が 100 nm 以下の細かい粗さは同等であるが、それよりも構造周期の長い粗さはサンプル B の

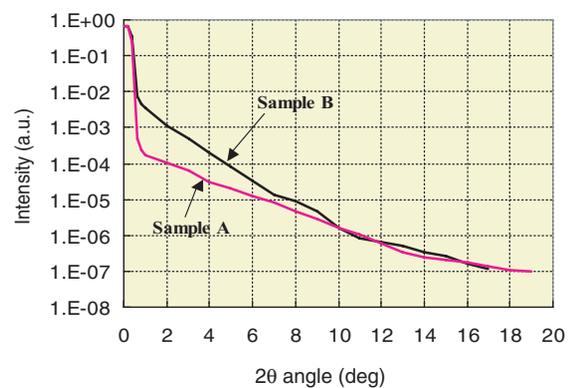


Figure 6 Angular distribution of EUV light scattered on sample A and B

Table 1 Surface roughness of sample A and B calculated from AFM data

	Roughness [nmrms]	
	10×10 μm	1×1 μm
Sample A	0.108	0.112
Sample B	0.273	0.161

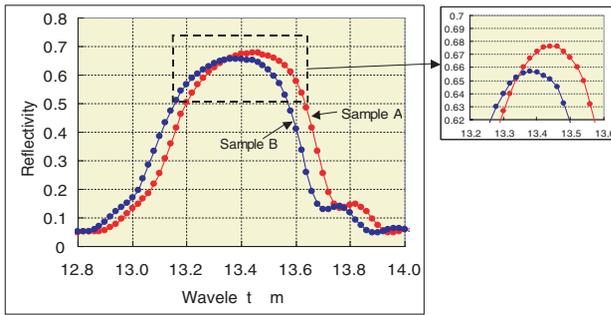


Figure 7 EUV reflectivity of sample A and B

ほうが大きいものと予想される。実際に AFM による粗さの評価結果を見ると、測定領域が $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ の測定結果から評価した粗さでは差が見られるが、より細かい構造周期の粗さを見ている $1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ の測定結果から評価した粗さでは差が小さく、散乱強度分布から予想される傾向と一致している。

散乱により失われている光量を見積もるためには、測定した散乱角度分布を全立体角領域で積分すればよい。サンプル A, B の測定結果から見積もられる損失光量は、サンプル入射光の強度を 100% とした場合、サンプル A では $0.3\% \pm 0.2\%$ 、サンプル B では $2.6\% \pm 0.2\%$ であった。ここで $\pm 0.2\%$ というエラーバーは散乱角が 1 度以下の領域の強度分布をどのように外挿するかによって生じるばらつきを見積もったものである。この結果からサンプル B はサンプル A よりも散乱により失われる光量が約 2.3% 多く、よって反射率も 2.3% 低いことが予想される。Fig. 7 に示した両者の反射率を比較すると、サンプル B の方が 2% 低く、散乱損失光量の見積もりから得られた結果とほぼ一致した。このように、散乱光強度分布を測定することにより、実際に散乱により失われている光量を見積もることができる。

3-4. EUV リソグラフィ用多層膜の評価結果

EUV リソグラフィ用多層膜の散乱光強度分布の評価結果を Fig. 8 に示す。成膜を行った Si ウエハチップの粗さはサンプル A の基板と同程度である。Fig. 6 と比較すればわかるように、この散乱光強度分布はサンプル A 散乱光強度分布とほぼ同様で、全立体角内で積分し見積もった散乱損失光量は $0.4\% \pm 0.2\%$ であった。この結果から、EUV リソグラフィ用多層膜において散乱損失光量は小さく、低応力化、高耐酸化性化対策、あるいは高精度に膜厚分布を制御することによって散乱損失光量が増大することはないといえる。また、散乱による反射率の低下量は 0.5% 以下であることから、今後 EUV 反射率の向上を図るためには散乱損失光量低減以外の改良が必要であることがわかった。

4. まとめ

EUV リソグラフィ用に開発した多層膜の散乱光強度角度分布を測定し、散乱による損失光量を見積もった。その結果、損失光量は 0.4% 程度と小さく抑えられていること

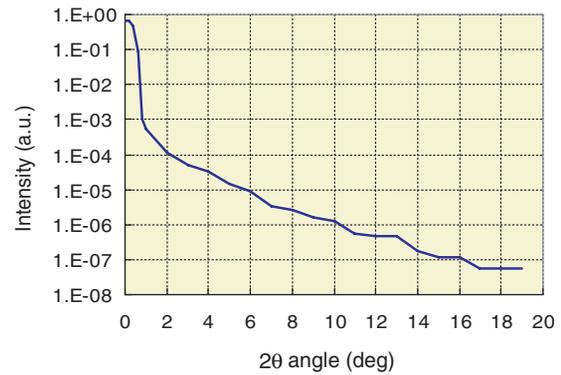


Figure 8 Angular distribution of EUV light scattered on multilayer for EUV lithography optics

が確認できた。

なお、本実験は高エネルギー加速器研究機構との共同研究“シンクロトロン放射光による X 線多層膜の評価研究”の中で実施した。

引用文献

- [1] K. Murakami, et al., SPIE Proc. **6921** to be published (2008).
- [2] M. Shiraishi et al., SPIE Proc. **5037** pp249-256 (2003).
- [3] S. Matsunari et al., Papers of Technical Meeting on Light Application and Visual Science, LAV-06, NO.1-7, p29-33 (2006).
- [4] T. Aoki et al., SPIE Proc. **5751**, 1137 (2005).
- [5] 松成 他, 第 55 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集, to be published (2008).
- [6] 小宮 他, 第 51 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集, p780 (2004).
- [7] 白石 他, 第 51 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集, p780 (2004).
- [8] 友藤 他, 第 51 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集, p781 (2004).
- [9] 神高 他, 第 51 回応用物理学関係連合講演会 講演予稿集, p781 (2004).
- [10] N. Kandaka et al., NGL Workshop 2004 Proc. pp81-83 (2004).

(原稿受付: 2008 年 3 月 19 日)

著者紹介

神高典明 Noriaki KANDA

(株)ニコン 精機カンパニー開発本部第二開発部

〒228-0828 神奈川県相模原市麻溝台 1-10-1

TEL: 042-740-6074 FAX: 042-740-6475

e-mail: kandaka.n@nikon.co.jp

略歴: 1992 年 (株)ニコン入社, 現在, EUV リソグラフィ用多層膜の開発に従事。

村上勝彦 Katsuhiko MURAKAMI

(株)ニコン 精機カンパニー開発本部第二開発部