# 極端紫外光を用いた6インチマスクの位相欠陥検査

## 寺澤 恒男・山 根 武

### At Wavelength Inspection of 6-inch Extreme Ultraviolet Lithography Mask Blank

Tsuneo TERASAWA and Takeshi YAMANE

At wavelength (actinic) full-field extreme ultraviolet (EUV) mask blank inspection tool using dark-field imaging has been developed. The tool consists of an EUV light source, illumination optics including ellipsoidal and plane mirrors, a  $26 \times$  Schwarzschild optics, an EUV sensitive backside-illuminated charge-coupled-device (BI-CCD) camera, and a mechanical mask stage. Dark-field image of a  $0.5 \times 0.5$  mm<sup>2</sup> area at mask blank can be formed by Schwarzschild optics. The inspection tool is operated under time delay and integration (TDI) mode by scanning the mask stage with a constant velocity. In spite of comparatively large effective pixel size of 500 nm on the mask blank, a programmed phase defect of 1.2 nm in height and 40 nm in width was successfully detected with a detection probability of more than 95%. A small native phase defect such as 1.1-nm high and 20-nm wide defect was also detected.

Key words: extreme ultraviolet (EUV), mask blank, phase defect, inspection, dark-field imaging

EUV リソグラフィー (EUVL) で用いるマスクは、EUV 光を反射させる多層膜を基板上にコーティングしたマスク ブランク上に,吸収体パターンを形成した反射型マスクで ある、このマスクブランクを作製する際、基板上に小さな 微粒子やピットが存在すると,その凹凸形状が多層膜の表 面にまで伝播されて位相欠陥になる.また,多層膜を形成 する途中で微粒子を巻き込んでも、同様に位相欠陥とな る. たとえば、マスクの基板に深さ2nmの窪み、あるい は高さ2nmの突起が残存する場合を考えると、反射光に 4 nm の光路差を与えるので、波長 13.5 nm の EUV 光に対 して107度もの位相差を与える。これは致命的な位相欠陥 となりうる. この位相欠陥が残存するマスクブランク上に 吸収体パターンを形成してマスクを製造し、かつ位相欠陥 が吸収体に被覆されないときは、図1に示すように、露光 装置で得られる吸収体パターンの転写像に寸法変化を生 じ、欠陥となる。したがって、吸収体パターンを形成する 前のマスクブランクの段階で位相欠陥の存在を検出してお くことが必要である.

現在多用されている光リソグラフィー用マスクの欠陥検 査には、おもに DUV (deep ultraviolet) レーザー光を検査 光として用いる検査装置が使用されている. この技術を EUVL 用マスクの検査に適用する試みも積極的に行われ, hp 22 nm 世代用として製作された EUVL マスク / マスクブ ランクの致命的な位相欠陥を高い検出確率で検出できた, との報告もある<sup>1)</sup>. しかしながら,位相欠陥の影響は多層 膜の表面形状のみならず多層膜内部の構造にも依存するの で,おもに多層膜表面の凹凸欠陥をとらえる DUV レー ザー光検査方式では検出しにくい位相欠陥が存在する. さ らに,hp 22 nm 世代を超える世代では,検査光学系の分 解能が限界に直面している. このような状況から, EUVL マスクの露光に用いる照明光と同じ波長の EUV 光でマス クブランクを検査する,いわゆる at wavelength 検査の必 要性が高まった.

EUV光を検査光とするマスク/マスクブランクの検査に ついては、すでにさまざまな提案があり、たとえば兵庫県 立大学が保有する EUV 顕微鏡<sup>2)</sup> や SEMATECH-LBNL が 開発した AIT (Actinic inspection tool)<sup>3)</sup> は、シンクロトロ ン放射光から取り出した EUV 光を検査光として、マスク のパターン形状や欠陥を EUV 光で観察した実績を有す る.しかしながら、これらの検査技術は 6 インチマスクブ

(株)EUVL 基盤開発センター(〒305-8569 つくば市小野川 16-1) E-mail: tsuneo.terasawa@eidec.co.jp



図1 位相欠陥とパターン転写像シミュレーションの例.



ランクの有効領域全面にわたる検査を,実用的な検査時間 で実施することを前提とはしていない.そこでわれわれ は,産業技術総合研究所の提案<sup>4)</sup>である EUV 光を用いた 暗視野検査方式と,マスクブランクの走査で検査画像を 連続的に収集する TDI (time delay and integration)技術を 組み合わせた検査方式により,6インチマスクブランク全 面にわたる検査が可能な装置技術の開発を進めた<sup>5-10)</sup>.こ の技術は半導体 MIRAI プロジェクト (2001 年度~2010 年 度)<sup>\*1</sup>において構築し,検証されたものである.本稿で は,検査の原理,検査装置の基本構成,および位相欠陥検 査性能について報告する.

#### 1. 検査装置の構成

われわれが開発した EUV マスクブランク検査装置の暗 視野検査光学系の概念を図2に示す. EUV 光は平面ミラー を介して 90 度折り曲げられてマスクブランクを垂直照明 する.マスクブランクから反射する EUV 光のうち,散乱 角度が  $\theta_{in} \ge \theta_{out}$ の間の成分がシュワルツシルト光学系で



図3 位相欠陥検査装置の構成図.

表1 位相欠陥検査装置のおもな仕様.

	項 目	仕 様
_	EUV 光源	<ul> <li>DPP, 1.9 kHz, Zr フィルター付</li> <li>実際に利用する出力:53 mW/(±8度)</li> <li>光源サイズ:0.4 mm</li> </ul>
	照明光学系	<ul> <li>・楕円鏡+平面鏡</li> <li>・倍率: 2×</li> <li>・照明範囲:マスクブランク上 Ø 0.8 mm の領域</li> </ul>
_	暗視野結像系	<ul> <li>・シュワルツシルト光学系(凸面鏡+凹面鏡)</li> <li>・倍率:26×</li> <li>・中心遮蔽 NA=0.1,集光 NA=0.2~0.27 (可変)</li> </ul>
_	センサー	・背面照射型 CCD カメラ ・ピクセルサイズ:13 μm ・TDI (time delay and integration) モード 対応
	ステージ	<ul> <li>・ストローク X, Y:169 mm, 169 mm</li> <li>・定速移動速度: 1~5 mm/s</li> <li>・レーザー干渉計による位置計測</li> <li>・焦点合わせ機能</li> </ul>

とらえられ、1024×1024のピクセル配列を有する背面照 射型 CCD カメラの受光面に暗視野投影像を形成する.図 2 に示すように、欠陥を含まないピクセルはマスクブラン クの表面粗さに起因して散乱するバックグラウンド成分 BG のみをとらえ、欠陥を含むピクセルは欠陥信号成分 S とバックグラウンド成分 BG をとらえて周囲より明るい信 号を得る.

図3は開発したマスクブランク検査装置の構成を示す図 である.そのおもな構成要素は、EUV 光源、楕円鏡と平 面鏡からなる照明光学系、シュワルツシルト光学系、背面 照射型 CCD カメラ、マスクブランクステージなどであ り、それらの仕様を表1に示した.EUV 光源は市販の DPP (discharged produced plasma) 光源 EQ-10 (Energetiq 社

<sup>\*1</sup> http://www.nedo.go.jp/activities/EF\_00222.html

製)を採用した.光源から発する EUV 光は楕円鏡により ±8度の捕集角度で捕集され、Zrフィルターと平面鏡を介 してマスクブランク上の直径約0.8mmの円形領域を垂直 照明する、シュワルツシルト光学系の倍率は26であり、 CCD カメラのピクセルサイズは 13 µm なので、マスクブ ランク上に換算して 500 nm のピクセルサイズで 0.5 mm× 0.5 mm の領域の暗視野投影像を得ることになる。シュワ ルツシルト光学系の中心遮蔽  $NA(=NA_{in}=sin(\theta_{in}))$ は 0.1, 集光  $NA = NA_{out} = \sin(\theta_{out})$ )は 0.27 である. シュワル ツシルト光学系は球面収差や像面湾曲を有するので,一般 に結像投影できる領域は狭い.しかし、その点像強度分布 (PSF: point spread function)の広がりをピクセルサイズの レベルに許容することにより、0.5 mm×0.5 mm という大 きな投影領域を得ている。同時に検査時の焦点深度も2~ 3 µm と大きな値となり、検査装置のフォーカス合わせに 余裕ができた.

マスクブランクを一定速度で移動させながら, CCD カ メラ内の蓄積電荷の転送速度をマスクブランクの移動速度 に同期させて連続的に信号を取り込む,いわゆる TDI 方 式の採用により,6インチマスクブランク全面にわたる検 査が実現できる.マスクブランクの有効領域を142 mm× 142 mm とすれば,500 nm サイズのピクセル総数は8.066 ×10<sup>10</sup>個である.したがって,データ転送レートが10メガ ピクセル/秒の TDI を採用すれば,検査時間は計算上8066 秒,すなわち2時間14分となり,40メガピクセル/秒の TDI が実現できれば40分以下の検査時間が期待される.

#### 2. 欠陥検査信号の解析

#### 2.1 欠陥検出信号

欠陥を含むピクセル信号のうち欠陥検出信号成分Sは, 暗視野光学像を1ピクセル領域内で積分した強度 $R_s$ に比 例した値である.ここで, $R_s$ を以下のように推定した. まず,多層膜中に高さH,半値全幅(FWHM)Wの回転 軸対称なガウシアン形状のバンプ位相欠陥を仮定して多層 膜表面の光振幅分布を計算し,次いで,シュワルツシルト 光学系で得られる暗視野投影像 $I_s(x, y)$ を計算した.最後 に,500 nm×500 nm の1ピクセル領域の中央部に位相欠 陥が存在すると仮定し,光強度を1ピクセル領域内(面積 A)で積分してピクセル信号強度 $R_s$ を予測した.

$$R_{\rm S} = \frac{1}{A} \iint_{\rm Pixel} I_{\rm s}(x, y) \, \mathrm{d}x \, \mathrm{d}y \tag{1}$$

位相欠陥の高さHと半値全幅Wに依存した $R_s$ の計算結 果を図4に示す.欠陥サイズが大きくなるほど $R_s$ は大き くなる傾向にあるが,特定の半値全幅Wに着目すると,



欠陥高さの増加に伴って, R<sub>s</sub>は最初は大きくなるものの, ある高さを超えると小さくなる.

#### 2.2 検出信号のバックグラウンドレベル

マスクブランクに対する暗視野検査画像のバックグラウ ンドレベル BG は、おもにマスクブランクの多層膜表面の ラフネスに起因した見かけ上の反射率  $R_{BG}$ に比例し、 $R_{BG}$ の値はラフネスを表す PSD (power spectrum density)を 用いて、

$$R_{\rm BG} = R \frac{16\pi^2}{\lambda^2} 2\pi \int f \times PSD(f) df \qquad (2)$$

と表される.ここに、*R*は多層膜反射率(~67%)、 $\lambda$ は波 長(13.5 nm)、*f*は空間周波数であり、積分範囲はシュワ ルツシルト光学系の*NA*<sub>in</sub> と*NA*<sub>out</sub>に対応する空間周波数域 内である.ここで、目安として*PSD*(*f*)は1/*f*<sup>2</sup>則に従い、 かつ、SEMI 規格の定義で $\sigma$ =0.15 nm のラフネスである と仮定すると、*NA*<sub>in</sub>=0.1、*NA*<sub>out</sub>=0.27 の場合の*R*<sub>BG</sub>は約 0.2%と求められた。

#### 2.3 検出感度の検討

欠陥を含むピクセルの信号強度の平均値をS+BG,欠陥を含まないピクセルの信号強度の平均値をBGとおき,それらのばらつきを $\Delta_{(S+BG)}$ , $\Delta_{(BG)}$ とおくと,ある閾値を設定して欠陥検出が可能な条件は,

 $(S+BG)-\Delta_{(S+BG)}>(BG)+\Delta_{(BG)}$  (3) と表される. ばらつきの要因は、ショットノイズ、CCD カメラの読み出しノイズ、ブランク表面の粗さのばらつ き、照明強度分布などであるが、ここではショットノイズ が主因であると仮定すると、あらかじめ定めた係数P(例 えばP=3)を用いて、式(2)は以下のように書き換え られる.

$$(S+BG)-(BG) > P\{\sqrt{(S+BG)} + \sqrt{(BG)}\} \qquad (4)$$



図5 照射フォトン数と検出可能な欠陥検出信号との関係.



図6 プログラム位相欠陥.ひとつのセル番号領域に同一寸法 の位相欠陥を10×40 個形成.異なるセル番号領域には異なる サイズの欠陥を形成.

ここで、マスクブランク表面における単位ピクセル領域 (500 nm×500 nm) あたりに照射される EUV フォトン数を Nとし、前記  $R_{\rm S}$  と  $R_{\rm BG}$  を用いて、

$$(S+BG) = (\eta_{\rm S}R_{\rm S} + \eta_{\rm BG}R_{\rm BG})N$$
$$(BG) = \eta_{\rm BG}R_{\rm BG}N \tag{5}$$

と表される.ここで、 $\eta_{s}$ 、 $\eta_{BG}$ は CCD カメラ内の像の広が りやシュワルツシルト光学系の透過率などにより決まる比 例係数である。開発した検査装置では、それぞれ、0.12、 0.44 とした.バックグラウンドレベル  $R_{BG}$ は前述の解析か ら約 0.002 である。式(5)を式(4)に代入すると、最 終的に、欠陥信号強度計算値  $R_{s}$ と EUV フォトン数 N との 関係として図 5 に示す結果が得られた<sup>11)</sup>.図4 と図 5 か ら、フォトン数を増やすこと、すなわち輝度を増大させる ことにより、より小さい欠陥信号強度計算値  $R_{s}$ の検知が 可能となり、欠陥検出感度が向上することがわかる.

#### 3. 欠陥検出性能の検証

#### 3.1 プログラム欠陥による欠陥検出の基本性能評価

位相欠陥検出感度の検証を行うために,あらかじめサイ ズと高さを種々の値に設定して作り込んだ位相欠陥を含む マスクブランクを準備し,検査実験を行った.図6に示す



図7 プログラム位相欠陥の検出信号.



ように、多数のプログラム欠陥を含むセルをマスクブラン ク上に多数配列し、静止画像取得モードで欠陥検査検出信 号を取得した.得られた欠陥検出信号の強度を図7に示 す.ここで欠陥サイズは、多層膜表面の欠陥部を原子間力 顕微鏡 (AFM)で計測した値である.欠陥のサイズが大き くなるほど欠陥検出信号は大きくなった.図8は、バンプ 欠陥とピット欠陥の欠陥検査検出信号のフォーカス依存性 を評価した結果である.同図から、バンプ位相欠陥は負の デフォーカスで、ピット欠陥は正のデフォーカスで、それ ぞれ欠陥検出信号強度が高くなることがわかる.したがっ て、フォーカス依存性を調べれば欠陥の種類を識別でき る.

#### 3.2 TDIモードによるプログラム位相欠陥検査

高さ1.5 nm,幅60 nmのプログラム位相欠陥をTDIモー ドで検査し、検出確率のマスクステージ移動速度依存性を



マスクブランク走査速度(mm/s)

図 9 検査時間とブランク走査速度との関係. 高さ 1.5 nm, 幅 60 nm の位相欠陥の検出確率を併記.



図 10 TDI モードで得たプログラム位相欠陥の検出確率. ブランク走査速度:3 mm/s.

評価した結果を図9に示す.同図には,速度に依存したマ スクブランク全面検査時間も合わせて示した.われわれの 実験では,ステージ速度が3mm/s以下では100%の検出 確率が得られたが,5mm/sでは明瞭な検出信号は得られ たものの検出確率は90%にまで低下した.一方,マスク ステージ速度を1mm/sから5mm/sに増大すると,マス クブランク全面検査時間を14時間から2~3時間に短縮で きる.現時点では,検出率の確保と検査時間短縮とはト レードオフにあるが,TDIモードは安定しているので,速 度増大に伴う検出確率の低下は検出信号のS/N低下が原 因であると考えている.光源の高輝度化やフィルターを含 む照明光学系の光学透過率の改善などでさらなる検出確率 向上が見込まれる.

次に,3mm/sのステージ速度でプログラム位相欠陥の 検出信号を収集し,擬似欠陥をとらえない閾値を採用して



図11 検出した自然欠陥の原子間力顕微鏡 (AFM) 観察像の例.



図 12 自然欠陥とプログラム位相欠陥の検出信号. 横軸は多 層膜表面の欠陥部分の体積 V = (πHW<sup>2</sup>)/(4·ln2).

検出実験を行った. 結果を図 10 に示す. ここでは, 幅 56 nm 以上のバンプ欠陥では 100%の検出確率が得られた. 幅 55 nm の位相欠陥では 96%, 幅 40 nm, 高さ 1.2 nm の位 相欠陥については 95%の検出確率が得られた. ピット位 相欠陥については, 幅 50 nm 以上の欠陥では 100%の検出 確率が, 幅 48 nm の欠陥では 96%, 幅 44 nm, 深さ 1.1 nm の欠陥では 84%の検出確率が得られた. 幅 40 nm, 高さ 1.2 nm の欠陥は hp 22 nm ノード以降で問題となる欠陥サ イズであることがわかっているので, 少なくとも本検査技 術で, 22 nm ノード対応の性能が得られることがわかった.

#### 3.3 **自然欠陥の検査**

開発した検査装置で、プログラム欠陥を有しないマスク ブランクを検査し、多層膜製造プロセスに起因する自然欠 陥の検査を行った。実際、ある閾値を超えた欠陥信号をと らえて欠陥の候補となる場所を記憶し、その場所の表面を AFM で観察した。得られた自然欠陥の形状を示す例を図 11 に示す。ここでは、プログラム位相欠陥より小さい、 幅20 nm、高さ1.1 nmの自然欠陥がとらえられた。欠陥サ イズを多層膜表面の欠陥部の体積で表し、自然欠陥の検出 信号強度を前記のプログラム位相欠陥の検出信号と合わせ て図 12 に示す。ここで興味深いのは、微小な自然欠陥に 対する欠陥検出信号強度がプログラム位相欠陥から予測さ れる信号強度よりきわめて大きいことである.この原因は 欠陥部分の多層膜内部構造に起因すると予測されるので, 今後,断面観察などの評価を含めた解析を進めたい.

市販の EUV 光源を採用した暗視野結像方式のマスクブ ランクの検査装置を開発し、検出感度の面では hp 22 nm を超える世代にも対応可能な位相検査検出性能を実証し た.現時点で6マスクブランクの有効領域全面を検査する 時間は約4.8時間であり、他方式の EUV 検査と比べれば飛 躍的な高速検査を実現したが、産業界で要求される検査時 間は1時間以内である。そのためには、光源の輝度向上、 検査系のノイズ低減、検査信号処理技術の改良などが要求 される。これらは、光源メーカーにおける開発技術や、検 査装置メーカーが保有する技術を巧みに組み合わせること により実現できるものと期待している。

本研究開発は、新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の支援のもとに行われた。

#### 文 献

- S. Stokowski, J. Glassera, G. Inderhees and P. Sankuratri: "Inspecting EUV mask blanks with a 193-nm system," Proc. SPIE, **7636** (2010) 76360Z.
- H. Kinoshita, T. Haga, K. Hamamoto, S. Takada, N. Kazui, S. Kakunai, H. Tsubakino, T. Shoki, M. Endo and T. Watanabe: "Actinic mask metrology for extreme ultraviolet lithography," J. Vac. Sci. Technol. B, 22 (2004) 264–267.

- 3) K. A. Goldberg, A. Barty, Y. Liu, P. Kearny, Y. Tezuka, T. Terasawa, J. S. Taylor, H. S. Han and O. R. Wood: "Actinic inspection of extreme ultraviolet programmed multilayer defects and cross-comparison measurements," J. Vac. Sci. Technol. B, 24 (2006) 2824–2828.
- 4) 富江敏尚:特許第 3728495 号.
- 5) T. Tomie, T. Terasawa, Y. Tezuka and M. Ito: "Concept of ultra-fast at-wavelength inspection of defects on multilayer mask blanks using a laser-produced plasma source," Proc. SPIE, **5038** (2003) 41-48.
- 6) Y. Tezuka, T. Tanaka, T. Terasawa and T. Tomie: "Sensitivitylimiting factors of at-wavelength extreme ultraviolet lithography mask blank inspection," Jpn. J. Appl. Phys., 45 (2006) 5359– 5372.
- 7) T. Terasawa, T. Yamane, T. Tanaka, T. Iwasaki, O. Suga and T. Tomie: "Development of actinic full-field EUV mask blank inspection tool at MIRAI-Selete," Proc. SPIE, **7271** (2009) 727122.
- T. Yamane, T. Tanaka, T. Terasawa and O. Suga: "Improvement of actinic blank inspection and phase defect analysis," Proc. SPIE, 7823 (2010) 78231V.
- T. Terasawa, T. Yamane, T. Tanaka, O. Suga and T. Tomie: "Actinic phase defect detection for extreme ultraviolet lithography mask with absorber patterns," Jpn. J. Appl. Phys., 49 (2010) 06GD02.
- 10) T. Yamane, T. Tanaka, T. Terasawa and O. Suga: "Actinic EUVL mask blank inspection capability with time delay integration mode," Proc. SPIE, 7748 (2010) 774803.
- 11) T. Terasawa, T. Yamane, T. Tanaka, T. Iwasaki, O. Suga and T. Tomie: "Actinic mask blank inspection and signal analysis for detecting phase defects down to 1.5 nm in height," Jpn. J. Appl. Phys., 48 (2009) 06FA04.

(2011年10月7日受理)