

EUV リソグラフィー用マスクの評価技術の開発

原田哲男

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 EUV リソグラフィー研究開発センター
〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 1-1-2 ニュースバル

渡邊健夫

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 EUV リソグラフィー研究開発センター
〒678-1205 兵庫県赤穂郡上郡町光都 1-1-2 ニュースバル

要旨

波長13.5 nmの極端紫外線 (EUV) を利用した EUV リソグラフィーは開発が進み、2018年には半導体量産へ適用される。半導体回路基板であるフォトマスク (EUV マスク) は、多層膜コートした反射型で、表面の吸収体を回路パターンに微細加工している。この吸収体で生じる位相シフトや、ガラス基板の凹凸による位相欠陥は EUV リソグラフィー特有の現象であり、EUV による観察が必須となる。本稿ではこれまで開発されてきた EUV 観察手法を紹介し、我々が開発しているコヒーレントスキャトロメトリ顕微鏡 (CSM) について紹介する。CSM はコヒーレント回折イメージングのタイコグラフィー法を適用した EUV 顕微鏡である。EUV 強度像だけでなく、今後重要となってくる EUV 位相を評価できる。CSM による吸収体パターンの位相分布や、極微小な位相欠陥の評価結果について紹介する。

1. 背景

1.1 極端紫外線 (EUV) リソグラフィー

EUV リソグラフィーは、X線領域の光である波長13.5 nmの EUV を利用した、半導体回路パターンのウェハへの転写技術である。原板であるフォトマスク上の回路パターンを、ウェハ上のフォトレジストに縮小露光する。従来の用いられている深紫外線 (193 nm) と比較すると露光波長が短いため、解像度の大幅な向上が可能である。EUV リソグラフィーの量産装置はすでに大手半導体企業 (インテルや、台湾 TSMC 社、韓国 Samsung 社など) に納入されている。長年の課題であった光源出力不足も、実露光機にて EUV 出力が目標の250 W¹⁾を超えて解決してきた。現在では、台湾 TSMC 社と韓国 Samsung 社が2018年に前倒しして半導体の量産に適用すると発表²⁾している状況である。

1.2 ニュースバル放射光施設での取り組み

兵庫県立大学のニュースバル放射光施設では、EUV リソグラフィーの発明者である木下博雄特任教授の下で研究開発を15年以上にわたり続けてきた。現在は3本のビームラインにてフォトマスクとフォトレジストの評価装置の開発を行っている。現在も多くの企業との共同研究を通じて、EUV リソグラフィーの開発にフィードバックを続けている。例えば本稿で取り上げるマスク顕微鏡以外にも、EUV 反射率・透過率計測³⁾、フォトレジストの感度⁴⁾や吸収係数⁵⁾、解像度⁶⁾測定、アウトガスと炭素汚染評価装

置⁷⁾など多くの装置を、企業に開放している。

1.3 EUV マスクの EUV 転写特性評価

EUV リソグラフィーにおいて、回路パターン原板であるフォトマスク (EUV マスク) は反射型が使われる。低膨張ガラス基板の表面には反射増加多層膜である Mo/Si 多層膜が厚さ300 nm程度コーティングされている。この多層膜上に Ta などの EUV 吸収の大きな金属膜が成膜され、微細加工により回路パターンが形成されている。吸収体パターンの不良などのマスク表面の欠陥は、その吸収による反射強度低下が欠陥として転写されるため、振幅欠陥と呼ばれる。一方で、EUV マスクは反射型であるため従来の透過型では問題とならなかった、反射位相ずれによる欠陥が問題となる。具体的には多層膜の下にあるガラス基板表面の凹凸や反射膜中のゴミ (直径30 nm, 高さ1 nm以上) が反射位相を大きくずらし、弱め合いの干渉により強度低下を引き起こし欠陥として転写される。EUV の反射位相がずれるこれらの欠陥は位相欠陥と呼ばれ、EUV リソグラフィー特有の欠陥である。わずか1 nmの凹凸でも波長13.5 nmにとっては、50°以上の位相ずれとなり欠陥となり得る。EUV リソグラフィーでは、この位相欠陥も含めて欠陥を低減する必要がある。しかし、この位相欠陥は多層膜中の欠陥であるため、表面形状とその転写特性は完全には一致しない。原子間力顕微鏡 (AFM) を用いて、これらの位相欠陥のマスク表面での形状を観察し、欠陥として転写されるかどうかの傾向は評価されている⁸⁾が、EUV での検出信号強度と AFM 結果はばらつきがある。

このため EUV 露光における欠陥や回路パターンの転写特性を評価するため、実露光波長である EUV で観察する顕微鏡・検査装置の開発が長年続けられている。

量産に向けて議論されてきた EUV 検査装置として以下の3つがある。①吸収体をコーティングする前のブランクマスク全面の欠陥検査装置。②吸収体パターン付きマスク全面の欠陥検査装置。③露光機と同じ照明条件と結像特性で、吸収体パターン像をエミュレーションできる顕微鏡。

①はレーザーテック社より Actinic Blank Inspection (ABI) 装置⁹⁾として実用化されている。ABI 装置は、暗視野の Schwarzschild 光学系にて EUV マスクを30倍程度の低倍率で観察し、欠陥のあるなしを500 nm の分解能で高速観察する装置である。③は、EUV 露光機の光学系を製作している Carl Zeiss 社が AIMSTM EUV¹⁰⁾として開発している。②は現在実用化されておらず、今後の重要な開発課題となっている。

これらとは別に、回路パターン観察用の EUV 顕微鏡はマスク開発に欠かせない。このため、アメリカ ALS ではフレネルゾーンプレート (FZP) による EUV マスク顕微鏡が AIT¹¹⁾や SHARP¹²⁾として開発されてきた。また、ABI 装置には2段結像による高倍(1200倍)の観察モードがあり、検出した欠陥の EUV 観察が可能である。我々もニュースバル放射光施設にて Schwarzschild 光学系からなる高倍率1400倍の顕微鏡を東北大学や EIDEC と共同で開発し¹³⁾、吸収体パターン位置による欠陥の転写特性の影響などを定量的に評価してきた¹⁴⁾。

しかし、EUV 特有の位相欠陥は反射位相ずれが引き起こしており、その転写特性を理解するには EUV 位相を評価する必要がある。これまで紹介してきた顕微鏡・検査装置は強度像から、転写特性を評価する顕微鏡であり、EUV 位相を評価する装置ではなかった。さらに、回路パターンに用いられる吸収体の Ta なども、屈折率は0.9程度であり、大きな位相シフトを引き起こす。この吸収体の位相シフトを利用する減衰型位相シフトマスク¹⁵⁾も研究されており、反射光の位相を180°ずらし解像度を向上する。ガラス基板上的凹凸で反射位相を制御した位相シフトマスクを開発し、コントラストの高い回路パターンを形成した研究例もある¹⁶⁾。さらに、EUV リソグラフィーは反射型であるためマスクへの入射光は斜め入射である。そのため回路パターン方向と入射面の方向に依存して反射位相は変化し、結像特性が変化する^{17,18)}。よって、位相欠陥、吸収体パターンを EUV 位相像として観察できる顕微鏡が、EUV リソグラフィーのさらなる高解像度化のため求められている。

2. コヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡

2.1 概要

兵庫県立大学のニュースバル放射光施設では回路パター

ンを複雑な光学系なしで高解像度、かつ EUV 位相まで評価する顕微鏡として、コヒーレント回折イメージング (CDI) 法による EUV 顕微鏡「コヒーレントスキャトロメトリー顕微鏡 (CSM)」を開発してきた。CDI 法では、サンプルにコヒーレント光を照射して生じた回折光を検出器で直接記録し、回折光画像からサンプル像を再構築する。再構築には位相情報が必要であるが、位相情報は検出器では記録できない。そのため周波数空間の強度情報である回折画像に対して反復計算処理することで、位相情報を回復する。結像光学素子が必要ないため、主に X 線領域での開発が進んでいる。硬 X 線の CDI では通常吸収を無視して実空間の位相のみを評価するが、EUV を含む軟 X 線領域では吸収と位相ずれの両方が大きく無視できず、実空間の強度と位相ともに像再生する必要がある。

また、EUV マスクは150 mm 角と大きなサンプルであるため、照明光をソフトして複数枚の画像から像再生するタイコグラフィ法を用いた。照明位置は重なりを持たせてステップ測定する。記録した複数枚の回折画像を反復計算処理することで、サンプルの EUV 強度像と EUV 位相像を導出している。照明位置の重なりが拘束条件となる。照明光形状も反復計算において同時に最適化している。

本稿では3つの CSM について紹介する。1つめは、光源に偏向電磁石からの白色光を Mo/Si 多層膜で分光した EUV を利用した、最初の CSM システム¹⁹⁾。2つめは、光源にスタンドアロン光源であるレーザー励起の高次高調波 EUV 光源を利用し、実用化を目指した CSM システム^{20,21)}。最後には、光源は偏向電磁石で、分光器で分光した単色光を FZP で140 nm まで集光して EUV マスクに照射した、微小集光型の CSM (マイクロ CSM²²⁾) を紹介する。

2.2 最初の放射光 CSM¹⁹⁾

最初の CSM システムを設置した BL-3 は、偏向電磁石からの白色光を2枚の斜入射ミラーで平行化している分光器なしのビームラインである。直径20 mm 程に広がった白色光から、空間的にコヒーレントな成分を取り出すため直径5 μm ピンホールを利用した。

ピンホールからの光を Mo/Si 多層膜ミラー2枚で分光している。1枚目のミラーは凹面鏡であり、ピンホール像をマスク上に等倍で結像している。よって、マスク上の照明サイズはピンホールサイズと同様の直径5 μm 程度となる。

可視光や紫外光などの迷光成分をカットするため、上流で Zr フィルターを挿入している。構成写真を Fig. 1 に示す。照明光の波長幅は多層膜の反射スペクトルで決まり、0.5 nm 程度であった。マスクへの入射角は6°で、実際の EUV 露光機と同じである。

EUV マスクからの正反射光と回折光を裏面照射型の CCD カメラ (MTE-2048B Roper Scientific 社) で直接記

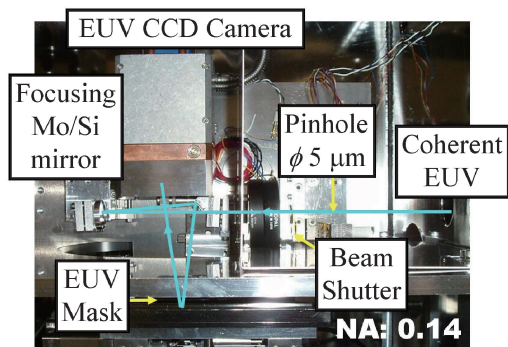


Fig. 1 (Color online) Schematic view of CSM with the bending synchrotron light (NewSUBARU BL-3).

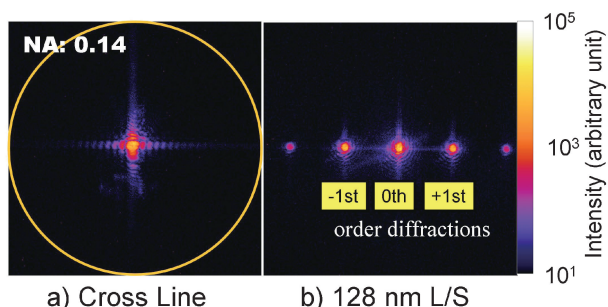


Fig. 2 (Color online) Diffraction image from EUV mask pattern of (a) cross line pattern, (b) 128 nm L/S pattern. Numerical aperture of the CSM was 0.14. The intensity is shown in logarithm scale.

録する。素子サイズは $27.6 \text{ mm} \times 27.6 \text{ mm}$ (2048×2048 pixel)で、 -50°C に冷却して利用している。CCDカメラの取り込み角は、光学系の開口数 (NA) に相当し、0.14である。空間分解能はハーフピッチ60 nm程度である。

Fig. 2にCSMで記録したEUVマスク上のパターンからの回折画像例を示す。Fig. 2(a)は幅 $2 \mu\text{m}$ 、長さ $10 \mu\text{m}$ の十字パターン中心からの回折光で、Fig. 2(b)は128 nmライン&スペース (L/S) パターンからの回折光である。Fig. 2(a)の円はNA0.14の範囲を示している。十字パターンの十字部分が反射領域で、その他が吸収体領域である。パターン形状に応じた十字状の回折と、パターン幅 $2 \mu\text{m}$ に応じたフランホーファー回折が記録されている。

L/Sパターンではライン部分が反射領域で、吸収体がスペース部分である。パターンの周辺部分はすべて吸収体領域となっている。回折画像では中心に0次光、その左右に ± 1 次光、 ± 2 次光が記録されている。タイコグラフィ法による測定では照明光を $2 \mu\text{m}$ ステップで移動し、 6×6 点で回折画像を記録した。各点の露光時間は20秒である。

Fig. 3に回折画像から計算により像再生したパターン像(強度像と位相像)を示す。(a)と(b)は回折画像を示した十字パターンとL/Sパターンである。(c)はガラス基板上

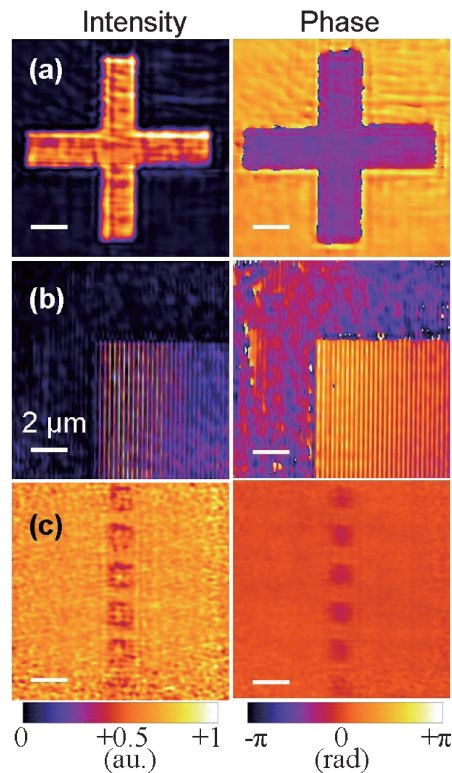


Fig. 3 (Color online) Reconstructed image of the mask patterns shown in intensity contrast (left images), and phase contrast (right images). The scale bar shows $2 \mu\text{m}$. (a) the Cross pattern, (b) 128 nm L/S pattern, and (c) a programmed phase defects with $1 \mu\text{m}$ square size.

に微細加工して作成した $1 \mu\text{m}$ 角のプログラム位相欠陥である。プログラム位相欠陥は、ガラス基板上に電子線描画とエッチングにより凹凸パターンを形成し、その上から多層膜をコーティングして作成した人為的な欠陥である。

Fig. 3が示すとおりマスクパターンの形状を像再生でき、同時にEUV位相像を得ることができた。十字パターンにおいて、吸収体部分の位相差は 145° であり、吸収体構造からの計算値と一致した。また、L/Sパターンにおける照明光の方向は、紙面左側から右側に入射角 6° である。よって、パターン方向と入射面が直交した斜め照明で測定している。L/Sパターン中の吸収体位相は、周辺の吸収体と大きく違っており、斜め入射による吸収体パターンの位相ずれを初めて測定できた。Fig. 3(c)の位相欠陥では、位相から導出された欠陥深さは7.0 nmであった。プログラム欠陥を多層膜上からAFMで測定した値(7.0 nm)とよく一致した。測定した $1 \mu\text{m}$ 角の位相欠陥のように大きな欠陥では、位相ずれは表面形状と一致することが予想される。よって、CSMによって定量的なEUV位相の評価が可能であることが確認できた。

2.3 高次高調波 EUV 光源を利用した CSM^{20,21)}

前節で紹介したように、放射光 CSM によって、CDI 法

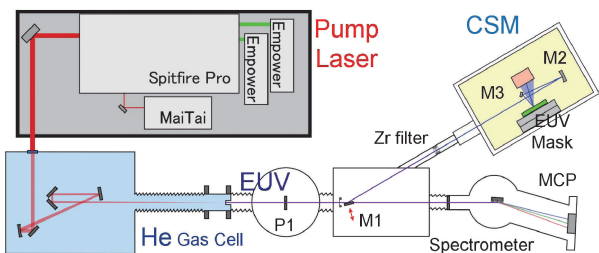


Fig. 4 (Color online) Schematic layout of a CSM system with high-harmonic-generation EUV source.

によるパターン観察と定量的な EUV 位相観察が実証できた。しかし、CSM 実用化のためには、最終的には半導体製造工場パターン観察する必要がある。そのためには放射光ではなく、スタンドアロンの高輝度光源が必要となる。我々はスタンドアロンの高輝度 EUV 光源として、高次高調波 EUV 光源を理化学研究所緑川グループと共同開発した²⁰⁾。開発した CSM システムの概要を Fig. 4 に示す。励起光源として Spectra Physics 社の Spitfire Pro 6W を用いた。励起光源のフェムト秒レーザーを、17 kPa の He ガスセルに集光し、非線形相互作用により高調波を発生する。励起レーザー（波長 800 nm）の 59 次高調波（波長 13.5 nm）を利用する。得られた EUV 出力は 200 nW で、輝度にするると 1.3×10^{14} photons/sec/0.1% BW/mm²/mrad² と、ニュースバル偏向電磁石の 20 倍の輝度を得ている。高次高調波においては、励起光源の低減が非常に重要である。我々はガスセル下流に $\phi 300 \mu\text{m}$ の P1 ピンホールを設置し、高次高調波と励起光の発散角の違いを利用し、励起光強度を 1/100 に低減した。斜入射の Mo コート分岐ミラー（M1）で CSM チャンバーに EUV 光を導いている。2 枚の Zr フィルターで、残りの励起光や迷光を除去している。多層膜をコートした集光ミラー（M2）と折り返しミラー（M3）で、ガスセルで発生した EUV 光をマスク上に 1/17 倍で縮小投影する。マスク上の照明光サイズは半値幅で $1.6 \mu\text{m}$ となった。なお CSM の大まかな構成は放射光での CSM と同様であるが、比較すると高次高調波システムは輝度が高く、集光サイズが小さく、ピエゾステージによる高精度な位置スキャン方式に改善されている。

Fig. 3(a) と同様の十字パターンを、 $0.8 \mu\text{m}$ ピッチで、 15×15 点測定した。1 点あたりの露光時間は 0.3 秒、CCD カメラの読み出し時間は 4.5 秒である。十字パターンの観察時間は 17 分であったが、ほとんどの時間は CCD カメラの読み出しである。像再生結果を Fig. 5 に示す。左側が、強度像で右側が位相像である。放射光システムと比較すると像品質が大幅に向上している。また、十字パターン下部の吸収体欠陥も EUV の強度と位相で観察できている。欠陥部の位相が吸収体と同様のため、エッチング不良による欠陥と考えられる。よって、高次高調波 EUV 光源を利用

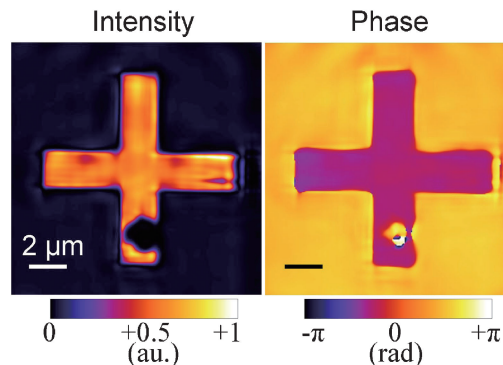


Fig. 5 (Color online) Reconstructed images of a cross pattern with the standalone system.

したスタンドアロンシステムにより、EUV マスクパターンを EUV の強度・位相像として観察することに成功した²¹⁾。

2.4 マイクロ CSM²²⁾

50 nm 以下の微細な位相欠陥を CSM で観察する場合、EUV マスク上の多層膜からの散乱光が大きなバックグラウンドとなり、欠陥信号が検出できない。多層膜からの散乱光を抑え、位相欠陥からの回折信号を検出するには、照明光を微小集光する必要がある。そこで、集光素子として軸外し FZP を利用した、CSM（マイクロ CSM と呼ぶ）をニュースバル BL-10 にて開発した。光学系の概要を Fig. 7 に示す。分光器からの単色光を $\phi 100 \mu\text{m}$ ピンホール上に集光し、空間コヒーレンスを改善している。ピンホールの 2.6 m 下流に Fig. 6 のマイクロ CSM が設置されている。集光に用いた FZP の開口数は 0.08 で、マスク上に $\phi 140 \text{ nm}$ で集光した。EUV マスクでの正反射光と、位相欠陥からの回折光を CCD カメラで直接記録し、これまで同様にタイコグラフィ法により像再生する。CCD カメラの開口数は 0.27 であり、空間分解能はハーフピッチ 30 nm 程度となる。

Fig. 7 にマイクロ CSM で記録した回折画像を示す。Fig. 7(a) は欠陥がない部分を測定しており、中心の明るい部分は FZP 集光がマスクに正反射された成分であり、FZP 瞳形状に一致する。周辺に弱い回折光が観察されており、これが多層膜からの散乱光である。集光サイズが大きい場合は、この散乱光が支配的となり、欠陥信号の検出が難しい。Fig. 7(b) は、プログラム位相欠陥に照射した場合の回折画像である。プログラム位相欠陥の設計サイズは幅 60 nm、深さ 1 nm である。欠陥からの回折光が正反射光の周りに強く現れた。

照明光を 140 nm と微小集光しているため、微小欠陥からの回折光を効率よく記録できる。左側の回折光が記録されていない領域は折り返しミラーの影である。位相回復計算においては折り返しミラーの影の領域を省いて計算し

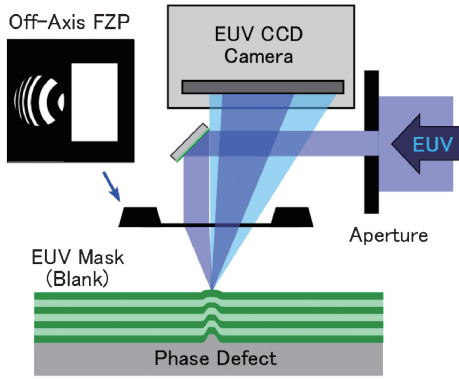


Fig. 6 (Color online) Schematic layout of micro-CSM, which has FZP for focusing optics.

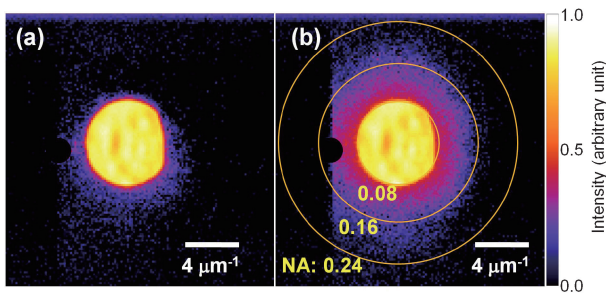


Fig. 7 (Color online) Diffraction images by micro-CSM, which captured on (a) no-defect region, and (b) a programmed defect (W 60 nm, H 1 nm).

た。そのため、縦方向と横方向で空間分解能は28 nm と 35 nm と多少異なる。

これまででは作成したプログラム欠陥の評価であったが、次は実際の EUV マスク上に存在する実欠陥を測定した例を紹介する。タイコグラフィーにおけるステップサイズは 100 nm で、照射点数は 10×10 点である。EUV マスクは半導体製作に用いるのと同グレードを用いた。あらかじめ ABI 装置でマスクの全面検査をすることで欠陥位置を検出し、検出した欠陥をマイクロ CSM で測定した。実際のマスクでは FZP の焦点を導出するためのアライメントマークがないため、多層膜散乱のスペックル構造を利用したフォーカス導出方法も開発した²³⁾。Fig. 8 に位相欠陥の観察結果を示す。強度像と位相像を示している。同一の欠陥を AFM でも観察しており、その表面形状から導出したサイズは (a) $70 \times 34 \text{ nm}^2$ 、高さ 2.1 nm (b) $33 \times 28 \text{ nm}^2$ 、高さ 1.7 nm である。Fig. 8 における 1 ピクセルは分解能の 30 nm 程度である。CDI 法であるため収差の影響がなく、(a) のような非対称欠陥、(b) のような 30 nm サイズの極微小欠陥も観察できた。同一マスク上の 25 個の欠陥を観察し、マイクロ CSM で測定した最大位相量と AFM 測定値との間に良い相関を確認した。しかし、位相量は最大で 2 倍程度相関からはずれることがあり、EUV による評価が大切であることが改めて分かった。

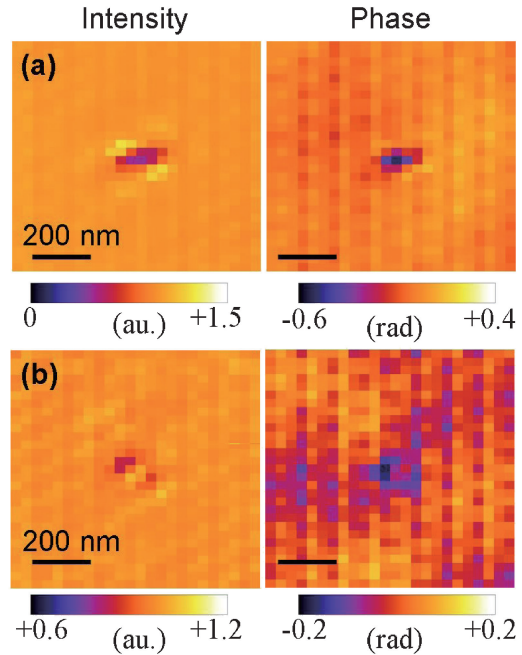


Fig. 8 (Color online) Reconstructed images by micro-CSM. AFM defect size were (a) $70 \times 34 \text{ nm}^2$, H 2.1 nm (b) $33 \times 28 \text{ nm}^2$, H 1.7 nm.

CDI 法では周波数空間の強度と位相情報が得られる。周波数空間でのフィルターは、任意形状の瞳をもつ光学系での結像に相当する。よって、周波数空間の CSM データに対して、露光機や様々な検査機の瞳形状フィルターを適用することで、各装置での EUV 像を計算可能である。

3. まとめと将来展望

2018 年へ前倒しでの半導体量産開始がせまる EUV リソグラフィーにおいて、EUV マスクの位相制御はさらなる解像度向上には重要となっている。また、EUV リソグラフィー特有の位相欠陥は EUV での観察が必須である。我々は、EUV マスクの EUV 強度・位相像を観察する顕微鏡として、CDI・タイコグラフィー法を適用した CSM を開発してきた。放射光と高次高調波を光源とした CSM では、吸収体パターンの EUV 位相を初めて実際に観察できた。特に、斜入射照明の影響による吸収体パターンの位相ずれは、今後の EUV リソグラフィーの解像度向上において、観察し制御することが非常に重要となる。レーザー励起の高次高調波光源にてパターン観察でき、CSM が半導体工場で利用可能であることを実証できた。集光に FZP を利用したマイクロ CSM では、実際の EUV マスク上の実欠陥を観察した。集光サイズが $\phi 140 \text{ nm}$ と小さいため、最小で 30 nm サイズの位相欠陥の観察に成功した。CSM は EUV マスク上の吸収体パターン・位相欠陥の EUV 位相を評価する顕微鏡として利用可能であることを

実証できた。

スイス PSI グループでは CSM と同様の手法で、1.3 節の②に相当するパターン付きマスク全面の検査装置を目指している^{24,25)}。レーザー逆コンプトン散乱を利用した高輝度なコンパクト光源と、XFEL 用に開発した高速検出器を組み合わせて、実用的なスループットで、マスク全面を検査する。この様に CDI・タイコグラフィ法は、EUV 領域においても非常に強力な手法であり、簡便な光学系で、収差の影響なく、強度・位相像を得ることができる。

我々も CSM 実用化のため、高次高調波光源のさらなる高出力化と安定化、高速検出器の開発を予定している。特に、現状での最大のボトルネックは検出器の読み出し速度である。現在利用している裏面照射 CCD センサではなく、新しい裏面照射 CMOS センサの評価をニュースバルにおいて進めている。そして EUV 領域だけでなく軟 X 線領域での有機物評価可能な顕微鏡として実用化することで、様々な先端材料開発で活用できるものと考えている。

謝辞

兵庫県立大学・木下博雄特任教授には CSM 研究全般のご支援をいただきました。理化学研究所・永田豊研究員には高次高調波の開発を担当いただきました。東北大学・豊田光紀助教には高倍率 EUV 顕微鏡開発を担当いただきました。高次高調波 CSM は JST/CREST の支援を受けて開発いたしました。マイクロ CSM は NEDO にご支援いただきました。ニュースバル放射光施設のスタッフ、ならびに木下・渡邊研究室の学生のご協力に感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) SEMICON West 2017にて ASML が 250W の EUV 光源のデモを発表。
- 2) 日経エレクトロニクス 2017年 8月号, p.12 (2017).
- 3) H. Iguchi, H. Hashimoto, M. Kuki, T. Harada, H. Kinoshita, T. Watanabe, Y.Y. Platonov, M.D. Kriese and J.R. Rodriguez: Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 06GC01 (2016).
- 4) T. Watanabe, H. Kinoshita, N. Sakaya, T. Shoki and S.Y. Lee: Jpn. J. Appl. Phys. **44**, 5556 (2005).
- 5) S. Niihara, D. Mamezaki, M. Watanabe, T. Harada and T. Watanabe: J. Photopolym. Sci. Technol. **30**, 87 (2017).
- 6) T. Urayama, T. Watanabe, Y. Yamaguchi, N. Matsuda, Y. Fukushima, T. Iguchi, T. Harada and H. Kinoshita: J. Photopolym. Sci. Technol. **24**, 153 (2011).
- 7) T. Watanabe, Y. Kikuchi, T. Takahashi, K. Katayama, I. Takagi, N. Sugie, H. Tanaka, E. Shiobara, S. Inoue, T. Harada and H. Kinoshita: Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 056701 (2013).
- 8) T. Amano, H. Watanabe, T. Abe and J. Micro: Nanolith. MEMS MOEMS **14**, 013502 (2015).
- 9) A. Tchikoulaeva, H. Miyai, T. Suzuki, K. Takehisa, H. Kusunose, T. Yamane, T. Terasawa, H. Watanabe, S. Inoue and I. Mori: Proc. SPIE **8679**, 86790I (2013).
- 10) M.R. Weiss, D. Hellweg, J.H. Peters, S. Perlit, A. Garetto and M. Goldstein: Proc. SPIE **9048**, 90480X (2014).
- 11) K.A. Goldberg, P.P. Naulleau, A. Barty, S. Rekawa, C.D. Kemp, R.F. Gunion, F. Salmassi, E.M. Gullikson, E.H. Anderson and H.S. Han: Proc. SPIE **6730**, 67305E (2007).
- 12) K.A. Goldberg, M.P. Benk, A. Wojdyla, I. Mochi, S.B. Rekawa, A.P. Allezy, M.R. Dickinson, C.W. Cork, W. Chao, D.J. Zehm, J.B. Macdougall, P.P. Naulleau and A. Rudack: Proc. SPIE **9048**, 90480Y (2014).
- 13) M. Toyoda, K. Yamasoe, A. Tokimasa, K. Uchida, T. Harada, T. Terasawa, T. Amano, M. Yanagihara and H. Kinoshita: Appl. Phys. Exp. **7**, 102502 (2014).
- 14) T. Amano, T. Terasawa, H. Watanabe, M. Toyoda, T. Harada, T. Watanabe and H. Kinoshita: Proc. SPIE **9048**, 904827 (2014).
- 15) M. Sugawara, A. Chiba and I. Nishiyama: Jpn. J. Appl. Phys. **42**, 2639 (2003).
- 16) P. Naulleau, C.N. Anderson, W. Chao, K.A. Goldberg, E. Gullikson, F. Salmassi and A. Wojdyla: Proc. SPIE **9984**, 99840P (2016).
- 17) K. Otaki: Jpn. J. Appl. Phys. **39**, 6819 (2000).
- 18) I. Mochi, V. Philipsen, E. Gallagher, E. Hendrickx, K. Lyakhova, F. Wittebrood, G. Schiffflers, T. Fliervoet, S. Wang, S. Hsu, V. Plachecki, S. Baron and Bart Laenens: Proc. SPIE **9776**, 97761S (2016).
- 19) T. Harada, M. Nakasuji, Y. Nagata, T. Watanabe and H. Kinoshita: Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 06GB02 (2013).
- 20) 永田豊, 原田哲男, 渡邊健夫, 緑川克美, 木下博雄: 電気学会論文誌 A **133**, 509 (2013).
- 21) D. Mamezaki, T. Harada, Y. Nagata and T. Watanabe: Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 06GB01 (2017).
- 22) 原田哲男, 橋本拓, 渡邊健夫: 電気学会論文誌 A **137**, 260 (2017).
- 23) T. Harada, H. Hashimoto and T. Watanabe: Proc. SPIE **9985**, 99851T (2016).
- 24) I. Mochi, P. Helfenstein, I. Mohacsi, R. Rajeev, D. Kazazis, S. Yoshitake and Y. Ekinci: J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS **16**, 041003 (2017).
- 25) R. Rajendran, I. Mochi, P. Helfenstein, I. Mohacsi, S. Redford, A. Mozzanica, B. Schmitt, S. Yoshitake and Y. Ekinci: Proc. SPIE **10145**, 101450N (2017).

著者紹介

**原田哲男**

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 助教

E-mail: harada@lasti.u-hyogo.ac.jp

専門：軟 X 線光学

【略歴】

2007年3月東北大学大学院工学研究科博士後期課程修了，博士（工学）。2007年4月東北大学多元物質科学研究所研究支援者。2008年より現職。

**渡邊健夫**

兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 所長・教授

E-mail: takeo@lasti.u-hyogo.ac.jp

【略歴】

1990年9月大阪市立大学大学院理学研究科後期博士課程修了，理学博士。1990年10月シャープ株式会社技術本部中央研究所。1996年1月姫路工業大学（現兵庫県立大学）高度産業科学技術研究所助手。2007年4月同研究所助教。2008年4月同研究所准教授。2015年4月同研究所教授。2016年4月同研究所所長。

Development of EUV microscopes for EUV mask evaluation

Tetsuo HARADA

University of Hyogo, LASTI, Center for EUV Lithography
NewSUBARU, 1-1-2, Kouto, Kamigori, Ako-gun, Hyogo, 678-1205, Japan

Takeo WATANABE

University of Hyogo, LASTI, Center for EUV Lithography
NewSUBARU, 1-1-2, Kouto, Kamigori, Ako-gun, Hyogo, 678-1205, Japan

Abstract These days, there is great progress in extreme ultraviolet (EUV) lithography especially in the EUV source power. EUV lithography will therefore apply for high volume manufacturing of semiconductor devices in 2018. Working wavelength of EUV lithography is 13.5 nm. A EUV photomask is reflection type, which is coated with the Mo/Si multilayer. Reflection phase are modulated by absorber material, absorber structure, and bump/pit structure on glass substrate. Thus, at-wavelength observation by inspection tool or microscopes is necessary for EUV lithography. We review these inspection tools and microscopes, and introduce our microscope for EUV phase observation that is based on ptychography. EUV phase control will be a key technology to enhance the spatial resolution of EUV lithography. In this paper, CSM observation results of the EUV phase images of mask patterns and tiny phase defects are shown.