

EUVマスク欠陥検査に用いる新写像投影 (PEM) 式 電子光学系の製作

畠山 雅規* 村上 武司** 渡辺 賢治*
狩俣 努** 寺尾 健二**

Development of Novel Optical System based on Projection Electron Microscopy (PEM) for EUV Mask Inspection

by Masahiro HATAKEYAMA, Takeshi MURAKAMI, Kenji WATANABE, Tsutomu KARIMATA, & Kenji TERAO

An optical system based on projection electron microscopy (PEM) has been designed and fabricated to provide an EUV mask inspection system for half-pitch (hp) 16 nm devices. Compared to conventional DUV and SEM optics, the novel optical system based on PEM for EUV mask inspection can perform defect inspection at higher resolution and higher speed. To obtain a defect sensitivity of 16 nm, performance improvement requirements have been estimated with reference to a system for hp 2X nm devices (Ebara's current system). After that, the novel optical system based on PEM has been designed and fabricated by establishing specifications that meet the requirements. Regarding aberration and transmittance requirements, this paper presents performance improvements achieved in the novel system.

Keywords: EUV mask, Defect inspection, Projection electron microscopy (PEM), Electron optical system, Imaging electron optics, Electron exposure optics, 1Xnm EUV mask, Aberration, Transmittance, Pixel size

1. はじめに

半導体デバイスは多くの産業の基幹部品として用いられている。高密度集積化の進展によって、その部品を用いた製品の性能・機能の向上とコスト削減が達成されてきた。この高密度集積化を可能としたのは、半導体リソグラフィの微細化技術とその周辺技術の進歩があったからであると言われている。近年、光リソグラフィによる微細化が理論限界を迎え、次世代のリソグラフィ技術へのパラダイムシフトが起こっており、幾つかの候補の中で有望視されているのが波長135 nmの極端紫外線 (EUV: Extreme ultraviolet) を使用した露光技術である。

当社は株式会社 EUVL 基盤センターと共同で、hp (half pitch) 16 nm のデバイスに適用する EUV マスク欠陥検

査装置の開発を行っている¹⁻⁴⁾。リソグラフィ工程ではマスク上の回路パターンをシリコンウエーハ上に1/4で縮小転写するが、マスク上に欠陥があると、この欠陥もシリコンウエーハに転写され、半導体デバイスの品質の低下の要因となるため、マスク製造ではマスクの欠陥検査が行われる。hp16nmのデバイス用のパターンを有するEUVマスクに対しては、高分解能の検査を実現できる電子線方式の欠陥検査装置が望まれている。電子線方式として、SEM (scanning electron microscopy) 式と写像投影 (PEM: Projection electron microscopy) 式の二とおりがある⁵⁻¹⁰⁾。

SEM式は、一般に電子顕微鏡として知られている方式で、数nmレベルの点状の電子ビームをマスク上で走査させながら照射し、照射された点から出た2次電子を検出器で捕集して検査像の形成と欠陥検査を行う (図1のSEM式参照)。このSEM式は高分解能であるが、マスク1枚の検査に数十時間以上掛かる場合もあるといわれている^{5, 8, 11)}。PEM式 (図1のPEM式参照) は、電子照射系 (Exposure electron optics (Exposure EO)) と結像光学系 (Imaging electron optics (Imaging EO)) から

* 精密・電子事業カンパニー 新事業推進統括部 電子線検査装置事業室 カラム開発グループ

** 同 精密機器事業部 ME製品技術室 開発グループ

** 同 新事業推進統括部 電子線検査装置事業室

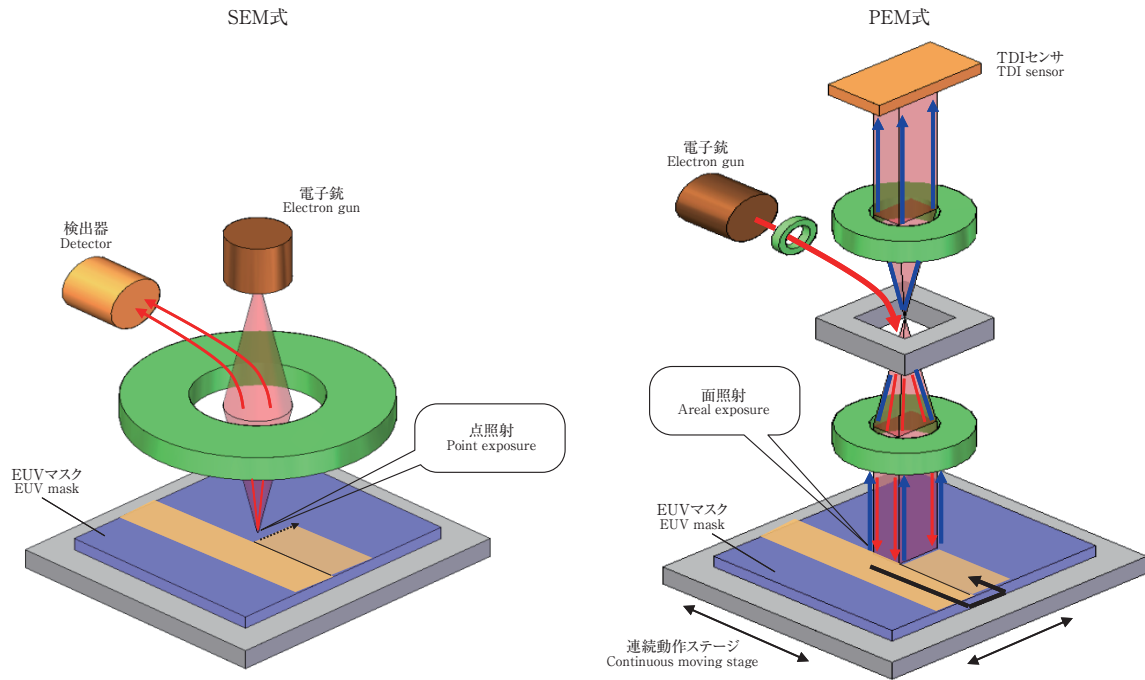


図1 PEM式とSEM式
Fig. 1 Schematics of PEM and SEM

成る電子光学系を有している。電子照射系は、電子銃で発生した電子をEUVマスクへ面状の電子ビーム照射を行い、結像光学系は、照射面上で形成される2次電子像を拡大投影して検出器に結像する。この様に面状の電子像を結像できるため、EUVマスクが設置されているステージを連続移動し、TDI（Time delay integration）検出器で2次元像の連続撮像が可能となる。SEM式と同様に高分解能の電子線像を形成でき、かつ、連続像形成による高速検査が可能であることが特徴であり、SEM式に比べて短時間での検査が可能となる^{5, 8)}。

本報告では、hp16 nmのデバイスに適用するEUVマスク欠陥検査装置に用いるために製作した、新PEM式電子光学系の仕様と基本性能評価について述べる。

2. 新PEM式電子光学系の仕様

2-1 新装置のターゲット²⁾

表1に、hp16 nmのデバイスに適用するEUVマスクパターン欠陥検査装置のターゲットを示す。この新装置では、16 nm画素サイズで16 nmパターン欠陥を検出する。hp2X nmのデバイスに適用するPEM式EUVマスク欠陥検査装置（当社従来装置、以降、従来装置と呼ぶ）では、23 nm画素サイズで23 nmのEUVマスクパターン欠陥を検出することができる。これを基に、新装置の改良項目とその目標値、及び、それを達成するための方策を検

表1 新装置のターゲット
Table 1 Specification target of new system

	従来装置 Current system	新装置 New system
画素サイズ Pixel size	23 nm	16 nm
検査モード Inspection mode	ダイ-ダイ、セル-セル Die - Die, Cell - Cell	ダイ-ダイ、セル-セル Die - Die, Cell - Cell
感度 Sensitivity	23 nm	16 nm

討し、新PEM式電子光学系の仕様を求めた。

まず、従来装置に対してどの程度の性能向上が必要かを明確にするために、従来装置の性能評価を行った。EUVパターンマスクの作り込み欠陥（PD：Programmed defect）のサイズを高分解能のレビューSEMで求めておき、それに対して、PEM撮像を行い、どのPDサイズまで欠陥感度があるかを評価した。使用したEUVマスクはhp88 nmのL/S（Line/Space）パターンがマスク表面上に形成されている。L/Sパターンの規定の位置にサイズの異なったPDがあり、感度評価では14～40 nmのPDサイズで行った。欠陥感度があったのはPD23 nm以上であった。図2-a)はPEM像でb)はレビューSEM像の例である。双方の像で、白信号部がL（Line）で黒信号部がS（Space）である。レビューSEM像（図2-b）の中心部（印部）にL端部（L/Sの境界部）に凸形状のPD（サ

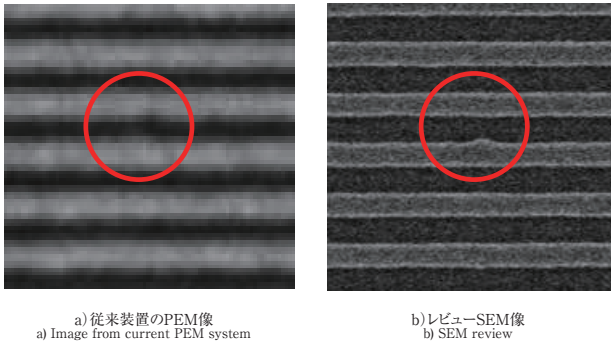


図2 従来装置によるPD像とレビュー SEM 像
Fig. 2 23 nm size PD images from current PEM system and SEM review

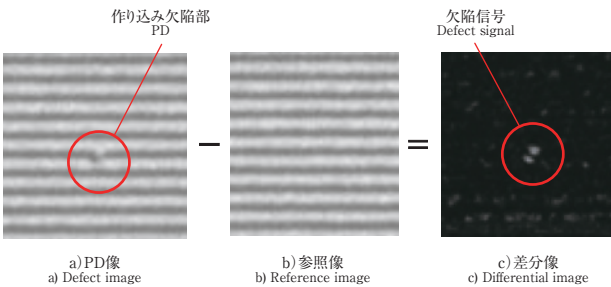


図3 欠陥検出の画像処理例
Fig. 3 Examples of PD, reference, and differential images from current PEM

イズ23 nm)がある。同じPD部を撮像したPEM像(図2-a)で、この凸欠陥を判定できた。

欠陥感度の判定を行うための画像処理の例を図3に示す。欠陥部画像と欠陥のない参照部画像から差分画像を作成し、欠陥部信号のS/N (Signal to noise ratio) が閾値以上であれば欠陥と判定する。

この様に、従来装置のPEM式電子光学系における収差では、欠陥サイズ23 nm以上の感度がある。新装置のターゲットを満足するために、どの程度の電子光学系の性能向上が必要かを従来装置の性能を基に見積もったのが表2である。

新装置は16 nm画素サイズで16 nmの欠陥検出を高速検査で行うことをターゲットとしている。性能改良項目として収差、結像光学系の透過率、そして、電子照射系の透過率の3項目を挙げた。欠陥検出感度に影響する項目としては、倍率を高くし16 nm画素サイズにすることと収差の低減×0.8~0.7(従来装置比)が必要である。これは、収差/欠陥感度=一定と仮定し、要求される収差改良割合を見積もった。また、結像光学系の透過率を×2(従来装置比)以上必要としている。

表2 新PEM式電子光学系に必要とされる性能向上
Table 2 Required progress in novel PEM optics

	従来PEM式電子光学系 Current PEM optics	新PEM式電子光学系 Novel PEM optics
結像光学系の収差 Aberration in imaging EO	1	≤0.7~0.8
結像光学系の透過率 Transmittance in imaging EO	1	≥2
電子照射系の透過率 Transmittance in exposure EO	1	≥10

従来装置では、照射電流の透過率が低く(0.01~0.5%程度)、照射電流を得るためにカソードのエミッションを高くする必要があった。その影響でノイズビームの増加やエネルギー分散が大きくなり、結果として像の解像度を劣化させる。この劣化を低減するため、新装置では、電子照射系の透過率を×10(従来装置比)以上の目標値とした。

2-2 新PEM式電子光学系の仕様²⁾

上述の性能向上目標を達成する方策として、電子エネルギーの増加を行うことを採用し、その計算検証を行った。

モデルは従来装置のPEM式電子光学系と同様であり、電子エネルギーの増加が有効であるかの検証に用いた。結像光学系の電子エネルギーを変えた場合の計算結果を図4に示す。従来装置のPEM式電子光学系の収差を1としている。電子エネルギーを増加すると収差は低減する。また、従来装置に対する収差の低減×0.8~0.7を得るために、電子エネルギーが6以上で達成できる。

電子エネルギーを変えた場合の結像光学系の透過率の

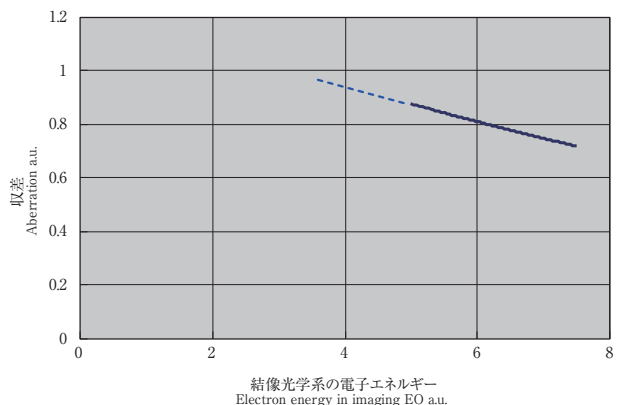


図4 結像光学系の収差と電子エネルギー
Fig. 4 Aberration vs electron energy in imaging EO

計算結果を図5に示す。横軸は電子エネルギーで縦軸は結像光学系の透過率である。電子エネルギーを増加すると透過率は上昇する。×2以上の透過率を得るために、電子エネルギーを×7以上で達成できる。

電子照射系は、結像光学系と同じ電子エネルギーとなる形態を有している。透過率の計算見積りでは、エネルギー7.5で×10以上の透過率が得られた。電子照射系の透過率はカソードのエミッションに対するEUVマスクへの照射電流値としている。

前述した様に、結像光学系及び電子照射系において、エネルギーを増加することにより要求される性能向上を達成できる。

次に、この仕様に基づいて、結像光学系と電子照射系の設計・製作を行い、それらの単体性能の評価を行った。

3. 製作した新PEM式電子光学系の基本性能

3-1 結像光学系⁴⁾

結像光学系の基本性能評価を行うために、結像光学系

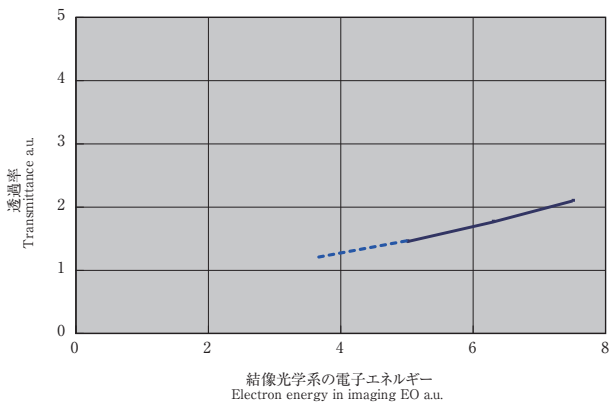


図5 結像光学系の透過率と電子エネルギー

Fig. 5 Transmittance vs electron energy in imaging EO

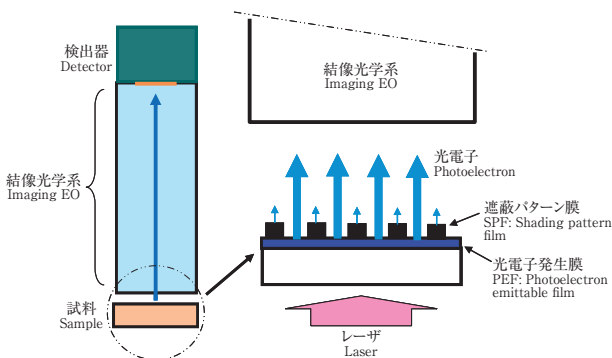


図6 結像光学系の新評価方法（PPEM）

Fig. 6 Schematic of new evaluating method (PPEM) for imaging EO performance

単体で評価を行う、新評価方法を用いた。

図6にその評価方法であるPPEM（Photoelectron pattern-source EO-evaluation method）を示す。結像光学系評価を行うサンプルとして、光電子を発生するPEF（Photoelectron emittable film）上に光電子を出さないSPF（Shading pattern film）がパターン状に形成されたサンプルを用いた。これらの膜はレーザを透過する基板上に形成されている。このサンプルの裏面（図下方向）から、レーザを照射すると、PEFからは光電子が発生するが、SPFからは発生しない。つまり、パターン状の光電子を発生することになる。この発生した光電子のパターン（2次元電子像）が、評価を行う結像光学系を通過して、検出器に結像される。検出器によって得られた画像データを用いて製作した結像光学系の基本性能評価を行うことが可能となる。

評価結果を図7に示す。サンプルは上述のSPFとPEFがあるサンプルで、このサンプルをSPPS（SPF and PEF pattern sample）と呼ぶ。hpl 1μmのパターン部を撮像した。白信号部がPEFの信号で、黒信号部がSPFの信号である。L/S部の撮像結果で、結像倍率は設計値と一致している。

次に、要求される性能向上（表2参照）を満足するため、電子エネルギーを高くした場合の結像光学系の動作検証として、エネルギーを5～7.5の領域で撮像評価を行った。図7は、エネルギー7.5の場合の例であるが、エネルギー5～7.5において、結像条件及び倍率が設計値と一致し、電子光学系の動作が高エネルギーで可能であった。

表2の従来装置に対し20～30%の収差低減を行うために、エネルギーを高くすることは有効である。実際に収

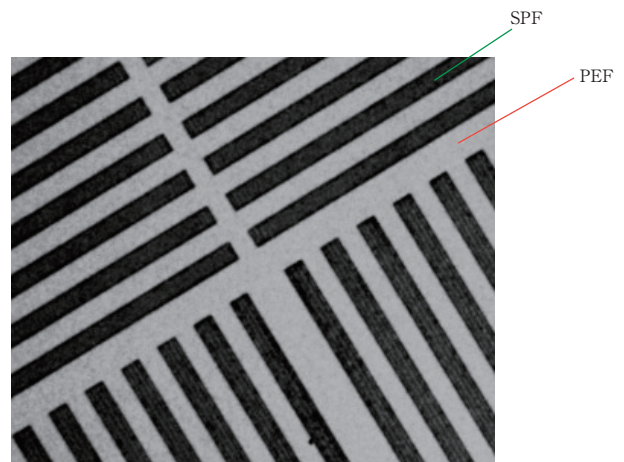


図7 PPEMによるhpl 1μmパターンの撮像例

Fig. 7 PPEM image of hpl 1μm region

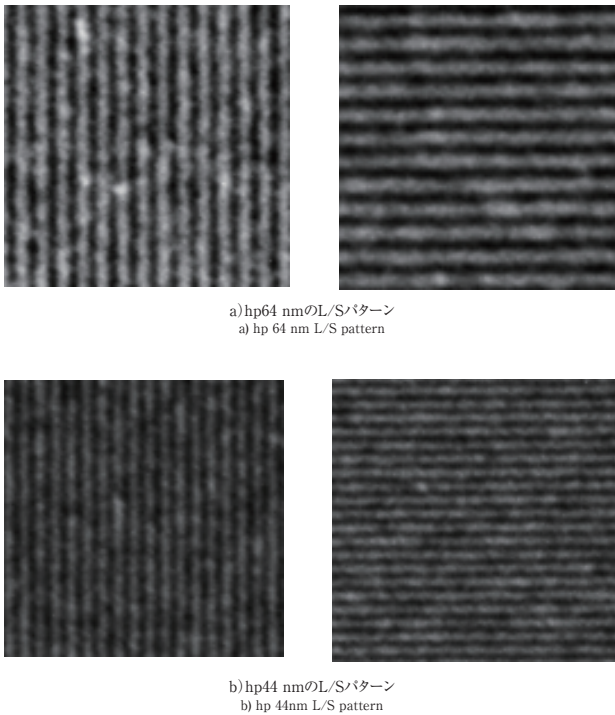


図8 結像光学系の高倍率撮像例
Fig. 8 PPEM images at high magnification

差そのものを測定することは大変困難であるので、16 nm画素サイズの高倍率にて微小サイズのL/Sパターン部を撮像し、そのコントラスト評価を行った。パターンサイズが小さくなり、画素サイズ/hpサイズが0.2以上の領域ではコントラストと収差は反比例関係にある。用いたサンプルはSPPSで、サイズと形状は、hp64 nmとhp44 nmの縦と横のL/Sパターンを用いた。また、エネルギー条件は5である。図8-a), b)は、PPEM方法によって撮像した結果である。縦横とも同等のコントラストが得られており、hp64 nmでは0.65, hp44 nmでは0.4の値であった。hp64 nmの値は、従来装置に比べ30%程度高い値であり、前述の関係から、このときの収差は30%小さくなっている。よって、表2の要求された性能向上を満足していることが分かった。

図9は、製作した結像光学系の透過率の計算見積りと試験結果で、電子光学条件は前述の図7と同様である。横軸はAp (Aperture) サイズで縦軸は透過率 η_{im} である。透過率 η_{im} は従来装置の透過率を1として規格化した。図9に示した結果では、概してApサイズを大きくすると透過率 η_{im} が高くなる傾向を示し、試験値は計算値以上の値が得られた。これは、試験で用いたApサイズが設計値より大きめであったなどの理由が考えられる。製作した結像光学系では、Ap 0.015を用いる予定なので、従

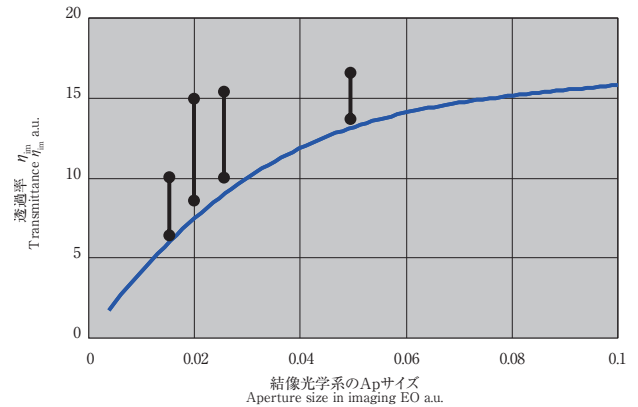


図9 結像光学系の透過率とアパーチャサイズ
Fig. 9 Transmittance vs aperture size in imaging EO

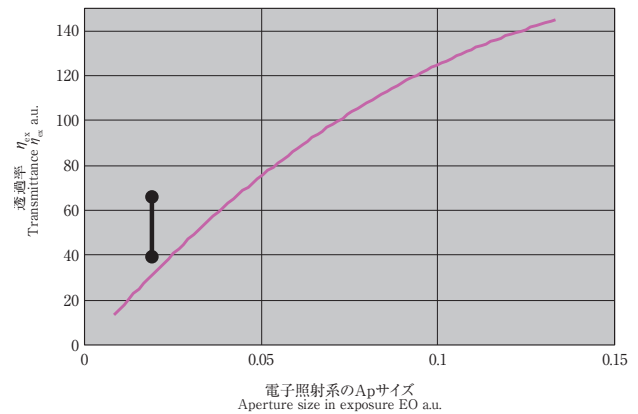


図10 電子照射系の透過率とアパーチャサイズ
Fig. 10 Transmittance vs aperture size in exposure EO

来装置に比べ、×6以上の透過率が得られる。

以上の検証結果にて、表2に示す要求される結像光学系の性能を満足できた。

3-2 電子照射系⁴⁾

製作した電子照射系の基本性能評価として、透過率の測定を行い、要求される性能向上に対する評価を行った(表2参照)。単体での測定ができるように、ジグ真空チャンバに電子照射系単体の設置をして試験を行った。試験条件はエネルギー5, Ap 0.02を用いている。図10に、製作した電子照射系の計算見積りと試験結果を示す。横軸はApサイズで、縦軸は透過率 η_{ex} である。

計算見積りでは、Apサイズを大きくすると透過率が高くなる。また、試験結果は計算見積りより高い値が得られている。製作した電子照射系では、Ap 0.02で使用するので、従来装置に比べ×30以上の透過率を得られる。よって、表2に示す要求される性能向上が満足できた。

4. おわりに

hp16 nmのデバイスに適用するEUVマスクパターン欠陥検査を実現するため、結像光学系と電子照射系から成る新PEM式電子光学系を設計・製作し、その基本特性評価を行った。要求される性能向上は、結像光学系で、収差20～30%低減、透過率 $\eta_{im} \times 2$ 以上、電子照射系で透過率 $\eta_{ex} \times 10$ 以上である。行った基本特性評価の結果は、それらの性能向上を達成したことが確認できた。

次段階は、新PEM式電子光学系を搭載した欠陥検査装置の性能評価を行う予定である。

5. 謝 辞

本研究は、(株)EUVL基盤開発センターと共同で行った内容であり、関係者に謝意を表します。また、経済産業省、(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の支援を受けており、ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) International Technology Roadmap for Semiconductors 2012 Update, Lithography, Table LITH6.
- 2) M. Hatakeyama, T. Murakami, T. Karimata, K. Watanabe, Y. Naito, T. Amano, R. Hirano, S. Iida, H. Watanabe, T. Terasawa, "Development of Novel Projection Electron Microscopy (PEM) system for EUV Mask Inspection", Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XIX, Proc. SPIE Vol.8441, 844116 (2012).
- 3) R. Hirano, H. Watanabe, S. Iida, T. Amano, T. Terasawa, M. Hatakeyama, T. Murakami, "Study of EUV mask inspection using projection EB optics with programmed pattern defect", Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XIX, Proc. SPIE Vol.8441, 84411G (2012).
- 4) M. Hatakeyama, T. Murakami, K. Terao, K. Watanabe, Y. Naito, T. Amano, R. Hirano, S. Iida, T. Terasawa, H. Watanabe, "Development of Optical System on Novel Projection Electron Microscopy (PEM) for EUV Masks and its Basic Performance Evaluation", Photomask and Next-Generation Lithography Mask Technology XX, Proc. SPIE Vol.8701, 87010S (2013).
- 5) 山口真司, 中 真人, 平野 隆, "写像投影式電子ビームを用いたEUVマスク欠陥検査装置開発" 東芝レビュー vol.67, No.4.
- 6) T. Satake, N. Noji, T. Murakami, M. Tsujimura, I. Nagahama, Y. Yamazaki, and A. Onishi, "Electron beam inspection system for semiconductor wafer based on projection electron microscopy" Proc. SPIE, vol.5375, pp.1125-1134, 2004.
- 7) I. Nagahama, A. Onishi, Y. Yamazaki, T. Satake, and N. Noji, "Inspection performance of the electron beam inspection system based on projection electron microscopy", Proc. SPIE, vol.5375, pp.921-928, 2004.
- 8) T. Hirano, S. Yamaguchi, M. Naka, M. Itoh, M. Kadowaki, T. Koike, Y. Yamazaki, K. Terao, M. Hatakeyama, H. Sobukawa, T. Murakami, K. Tsukamoto, T. Hayashi, K. Watanabe, N. Kimura and N. Hayashi, "Development of EB inspection system EBeyeM for EUV mask", Proc. SPIE 7823, 78232C. (2010).
- 9) S. Yamaguchi, M. Naka, M. Kadowaki, T. Koike, T. Hirano, M. Itoh, Y. Yamazaki, K. Terao, M. Hatakeyama, K. Watanabe, H. Sobukawa, T. Murakami, K. Tsukamoto, T. Hayashi, N. Kimura, N. Hayashi, "Performance of EBeyeM for EUV Mask Inspection", Proc. SPIE Vol.8166, 81662F (2011).
- 10) T. Amano, S. Iida, R. Hirano, T. Terasawa, H. Watanabe, M. Hatakeyama, T. Murakami, "EUV mask pattern inspection using EB projection optics" 2011 Inter. Symposium on EUVL, 17-19 October Miami, US (2011).
- 11) Shmoolik Mangan, Aya Kantor, Nir Shoshani, Asaf Jaffe, Dror Kasimov, Vladislav Kudriashov, Ran Brikman, Lior Shoval, and Anoop Sreenath, "Evaluation of novel EUV mask inspection technologies", Proc. SPIE Vol.7748, 774822 (2010).