

マスク検査装置の欠陥検出画像シミュレーション技術

Captured Image Simulation Technology for 198.5 nm Photomask Defect Inspection Tools

白土 昌孝

本宮 佳典

平野 亮一

■ SHIRATSUCHI Masataka

■ HONGUH Yoshinori

■ HIRANO Ryoichi

近年、半導体製造プロセスは加工寸法の微細化を続けているが、これを支えているのが露光装置の短波長化や露光光学系の高NA (Numerical Aperture : 開口数) 化、位相マスクのような立体的構造を持つ新型フォトマスクなどである。特に位相マスクは、光の透過と遮光だけでなく、透過光の位相も活用するため、これに対応した高精度な検査手法が必要である。

東芝は、これら新型マスクを検査するのに適した光学系の開発にあたり、ベクトル波モデルの回折光解析技術を活用して、高NAの露光光学系やマスクの立体構造などに対応した高精度な結像シミュレーション技術を開発した。これを用いて、より欠陥検出精度の高い検査装置の開発に取り組んでいる。

Semiconductor manufacturing process technologies have been making progress in terms of nanofabrication in recent years. In particular, argon fluoride (ArF) excimer laser exposure tools and alternating phase shifting masks (alt-PSMs) are expected to be utilized in actual production. A feature of the alt-PSM is its three-dimensional (3D) structure to control the wavefront phase as well as amplitude of transmitted light. It is therefore essential to develop a highly precise photomask inspection method to check such newly developed photomasks.

In the development of optical setups suitable for inspecting these new types of photomasks, Toshiba has developed a captured image simulator with a vector model diffraction solver, which is able to appropriately support such 3D photomask structures and high-numerical-aperture (high-NA) magnifying optical systems.

1 まえがき

半導体製造プロセスの最小加工寸法は、今もなお微細化を続けている。マスク欠陥検査装置は、これを支える重要な構成要素の一つである。半導体露光装置では、フォトマスクに描き込んだ回路パターンをウェーハ上に繰り返し投影露光することで、多数の半導体チップを製造する。したがって、元となるフォトマスクに欠陥がないことは極めて重要である(図1)。

近年、位相マスクなどマスクの構造を工夫することで微細化を実現する技術が実用化されつつあり、それら新種のマスクに対応したマスク欠陥検査技術が求められている。

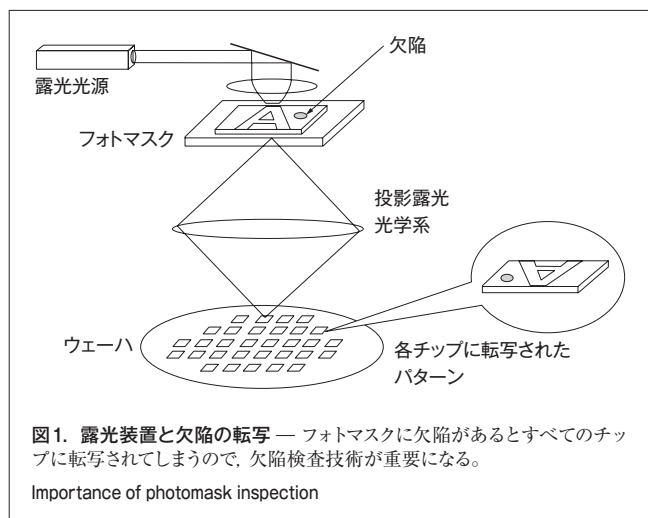
ここでは、マスク欠陥検査の技術開発を支えるシミュレーション技術の一つとして、RCWA (Rigorous Coupled Wave Analysis) 法と呼ばれる回折光解析技術に基づく高精度な結像シミュレーションについて述べる。

2 位相マスク シミュレーションの必要性

最小加工寸法の微小化のために、位相マスクが使われ始めている。位相マスクの欠陥検査に求められる機能と、その開発における高精度なシミュレーションの必要性について述べる。

2.1 位相マスク検査の従来との違い

半導体製造プロセスにおける加工寸法の微細化は、これまで主に、露光に用いる照明光の短波長化や、光学系の高NA化、超解像技術の導入などによって支えられてきた。波長が短くなると、それだけ細かな像を形成することが可能になる。NAは、光をいかに広い角度範囲から集中させられるかを表す指標である。NAが大きいくほど、垂直から大きく外れた入射角の光線が増えてくる。超解像とは、光学系の主に瞳面に細工を行うことで、通常よりも分解能を数十%程度高めるいくつかの技術の総称を指す。

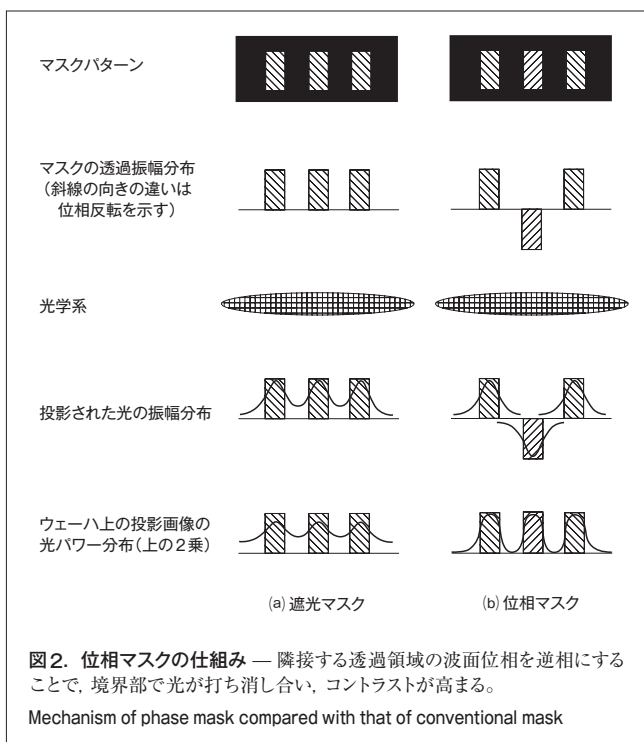


このような露光光学系の改良に加え、近年ではフォトマスクに関しても微細化のための技術革新が進んでいる。これまでの露光光学系は、フォトマスクのパターンをウェーハ上にいかに正確に写し取るかを考えて、極限まで改良が進められてきた。しかし、近年の開発では、目的とする露光パターンを得るために、マスクパターンに細工を施すこともいとわなくなっている。OPC (Optical Proximity Correction) などはその代表例であるが、位相マスクなど一群の新型マスクもその一つである。

従来から使われている遮光マスクと新型の位相マスクは、単にマスクの構造が異なるというだけでなく、機能発現に至る物理的な仕組みも異なっている。ここで、遮光マスクと位相マスク (より具体的には Alt-PSM (Alternating Phase Shifting Mask) と呼ばれるタイプ) の違いについて述べる。

遮光マスクでは、ガラス基板の表面に薄いクロムを遮光層として形成し、マスク表面に光が透過する透過領域と遮光される遮光領域とをパターンニングする。そして、このパターンをウェーハ上に忠実に投影することでパターンを焼き付けていた。すなわち、“透過部は明るく、遮光部は暗く”という単純な制御だけでパターンを形成する仕組みである。しかし、パターンが露光波長程度以下まで細かくなってきたため、ウェーハ上に投影されるパターンは若干ぼけてしまい、黒いラインが白っぽくなってしまっていた (図2(a))。

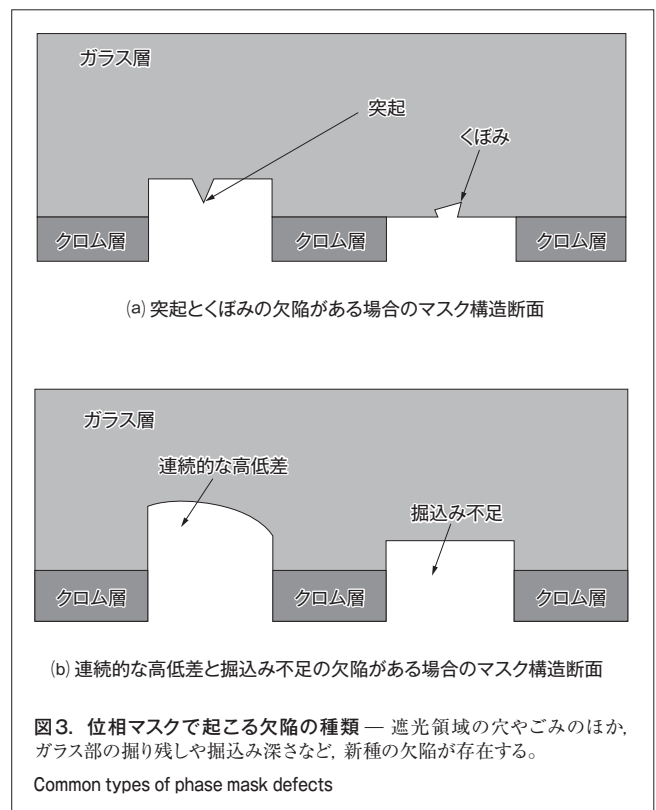
これに対し位相マスクは、透過領域と遮光領域を持つ点は遮光マスクと同様であるが、更に透過領域の一部でガラス基板の表面を一定の深さまで掘り込んだ構造を持つ。掘込みの深さは、掘り込まなかった場合に対して透過光の波面位相が 180°



反転するように決める。通常は約1波長分の深さとなる。マスクパターンの設計の際には、隣接している二つの透過領域はなるべく波面の位相が反転するように配列する (図2(b))。これにより、隣接する領域のパターンがぼけて広がり、互いに重なり合ったときに、それらの波面の位相が互いに反転しているため打ち消し合い、黒いラインがくっきりと現れる。すなわち、位相マスクでは、透過光の波面を制御し、透過光を意図的に打ち消し合うように干渉させることも加えてパターンを形成する。

位相マスクには、遮光領域の穴やごみなど従来のマスクにも存在した欠陥タイプに加え、図3に示すような小さな突起やくぼみ、掘込み深さの違いなど、新たなタイプの欠陥が存在する。これらの新種の欠陥を高NAの高分解顕微鏡光学系により観察すると、いずれも透過率は高い領域であり、透過波面位相だけの違いになるため、取得画像には低いコントラストでしか現れず、検出が困難である。

このように、位相マスクは従来の遮光マスクと構造の面でも、機能発現プロセスでも、大きく異なっている。したがって、位相マスクに対応する欠陥検査技術の開発が求められている。



2.2 位相マスク対応シミュレーションへの要求

これまで結像シミュレーションは、フレネル回折やフラウンホーファ回折など、スカラー回折モデルと呼ばれる計算方法で行われるのが一般的であった。この計算方法は、低NAの近似と薄いマスクの近似が用いられているもので、数学的には

フーリエ変換と等価なので計算量が非常に少ないという特徴がある。

しかし、今回の対象に関しては、スカラー回折モデルでの計算は非常に誤差が大きく、十分な精度が得られない。マスク欠陥検査装置では、波長程度以下の微細なパターンを検査するために、非常に高NAな顕微鏡光学系を用いて検査を行う。また、前述したようにマスクの立体構造が非常に重要である。特に、位相マスクでは、クロム遮光膜部とガラス基板部の掘込み部の高低差が1波長以上もあり、片方に焦点を合わせるともう片方では焦点ぼけの状態になりえる。

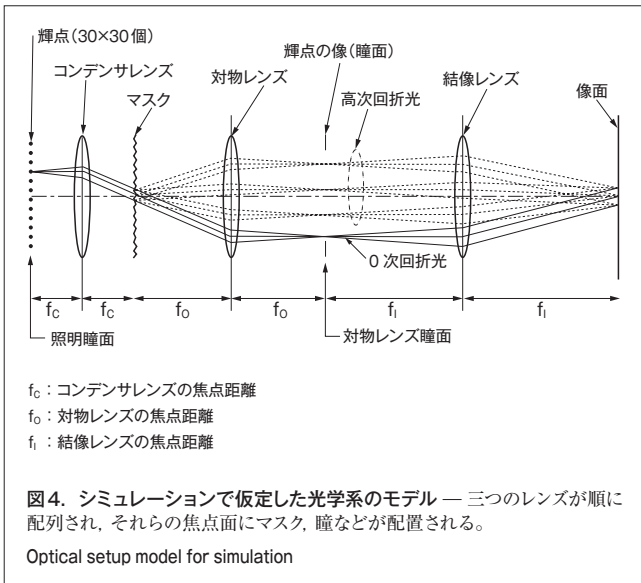
マスク欠陥検査装置では、取得画像の微妙な差異に基づいて欠陥を見つけるため、その光学系の解析でも高精度なシミュレーションが欠かせない。このことから、スカラー回折モデルによる解析では精度的に不十分であり、より厳密な解析を行うために、より高度な回折計算モデルに基づくシミュレーションが必要であった。

3 シミュレーションモデル

位相マスクにも対応可能な検査光学系を検討するにあたり、様々な条件下での画像の見え方をあらかじめ把握できると効果的である。そのために、光学系の瞳の状態なども反映しつつ、精密に取得画像を再現できるシミュレーション技術を構築した。

対象とする光学系の基本モデルを図4に示す。検査装置の光源は、照明瞳面上に格子状に配置した互いにインコヒーレントな(波面位相に相関がない)輝点で表す。各々の輝点を出た照明光は、コンデンサレンズの作用によってマスク面では平行光となり、マスクパターンによって回折作用を受ける。

ここで、マスクを照明したときに発生する回折光を計算するために、RCWA法の回折計算手法を用いる。この手法は、周



期的な立体構造を持つマスクに対して、電磁場をベクトルとして扱い、回折光を計算する厳密な解法である。今回検討の対象としているパターンのように、大きな入射角で照明され、その立体構造も無視できないようなケースに対しても、精密な取得画像の予測が可能である。

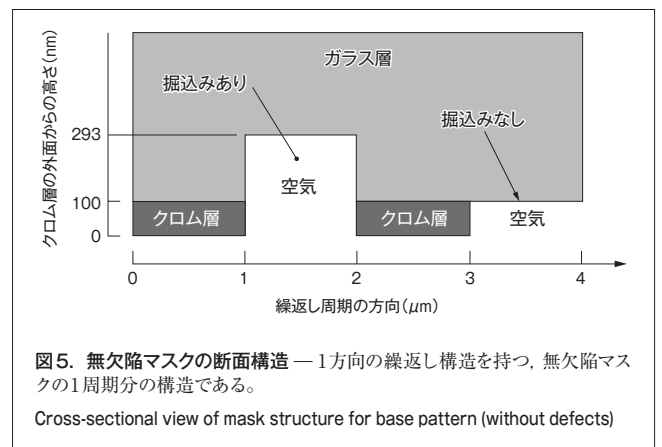
マスクで回折された回折光のうち、対物レンズ焦点面の絞りを透過したものは、結像レンズの作用で画像センサ上に集められ、拡大像を形成する。この過程を、照明瞳面の各輝点に対して計算し、合算することで、最終的に画像センサで得られる画像を計算できる。

RCWA法による回折計算手法は、精密な計算が可能である反面、計算機に対して非常に高速な計算速度や膨大な主記憶容量を要求する。また、数値計算アルゴリズムの面でも、計算誤差が生じやすい数式計算が多く、数値的な発散を抑えるためには各種ノウハウが必要である。東芝は比較的早くからこの技術に着目し、独自のRCWAソルバ^(注1)を開発して、様々な光学系解析に応用し、ノウハウを蓄積してきた。

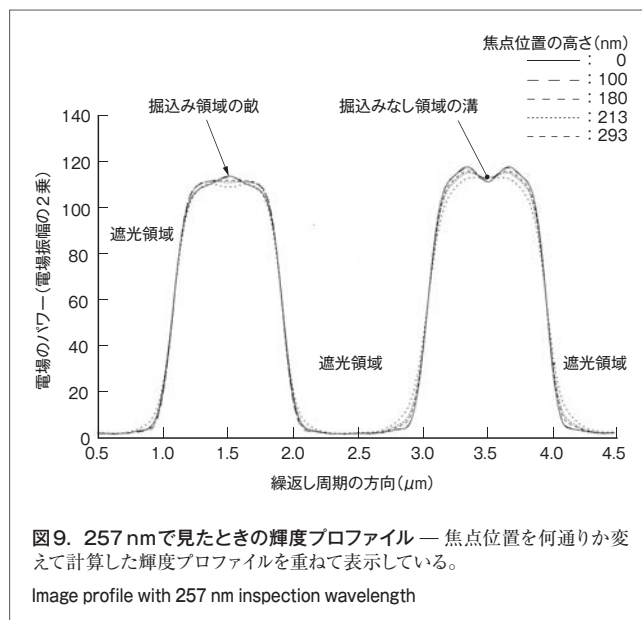
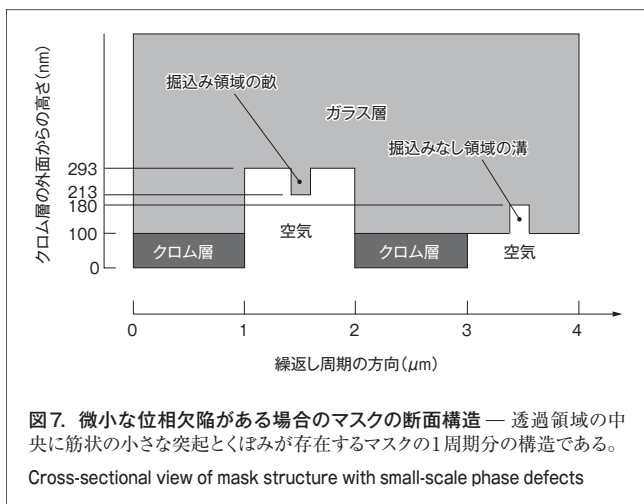
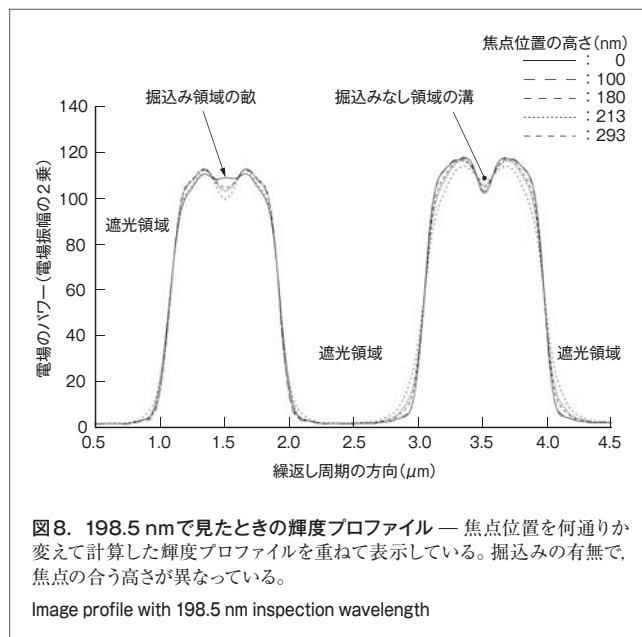
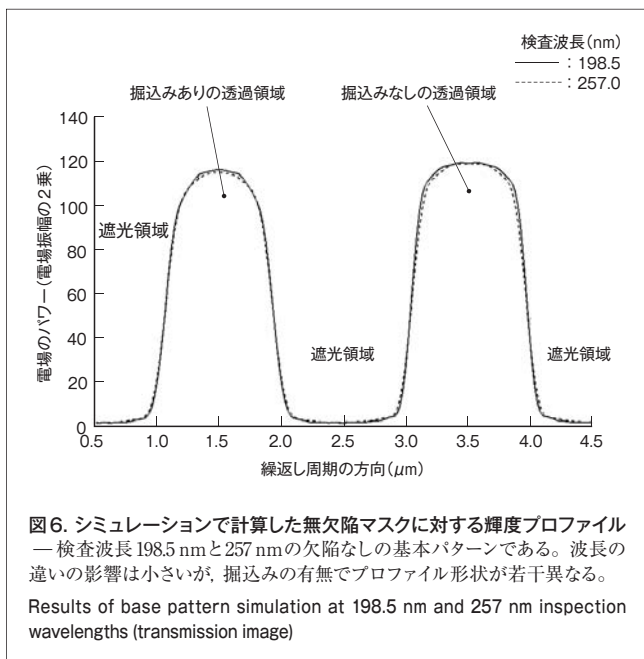
4 計算例

これまで述べたシミュレーションモデルに基づいて、いくつかの構造のマスクに対して結像シミュレーションを行った。ここで述べているのは1次元(ストライプ状)の周期構造を持ったマスクに対する結果だけであるが、2次元(2D)の周期構造のマスクに対する計算も可能である。ただし、計算量や必要な主記憶容量は、2Dのほうがはるかに大量に必要となる。

最初に、基板部に掘込みがある透過領域と、ない透過領域について、見え方の違いを確認する。図5はこのマスクの断面構造で、4 μmの周期で繰り返すストライプパターンを表している。このマスクを欠陥検査装置で見たときの、取得画像の輝度プロファイル(画像中の輝度分布)を図6に示す。ピント



(注1) 有限要素法(FEM)、境界要素法(BEM)などの数値解析では、大規模な連立1次方程式を立てて、解を導き出す。この連立方程式を解くプログラムをソルバと呼ぶ。



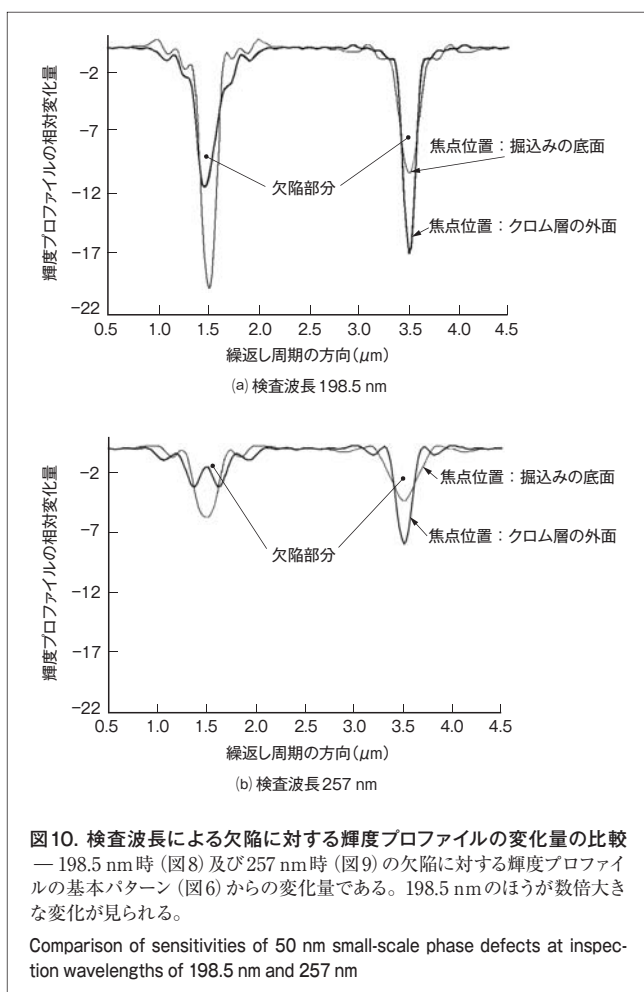
位置は図5のクロム層の外表面の位置であるので、掘り込まれた透過領域のほうが入り込んで位置から外れている。図6を見ると、掘り込まれた透過領域のほうが開けて輝度プロファイルが丸まっているのが確認できる。なお、スカラーシミュレーションではマスクの厚さや立体構造を考慮できないので、このような違いを調べることはできない。

次に、掘込みがある場合とない場合の各透過領域の中央に微小な欠陥が存在するときについても検討する。ここでも1次元のストライプ状マスクを考えるが、その1周期分の断面構造を図7に示す。得られた取得画像の輝度プロファイルを図8と図9に示す。図8は検査波長 198.5 nm で観察した場合で、図9は 257 nm で観察した場合である。この二つの図には何本かの曲線がプロットされているが、それぞれクロム層の外表面からガラス層側に少しずつ焦点位置をずらしたときの輝度プロファ

イルのグラフである。

このような、焦点位置とマスクの立体構造を考慮した結像計算により位相欠陥の影響を予測することも、スカラーモデルではできなかった計算である。これらも、ベクトルモデルの回折計算により可能になる。

図8と図9を比較することで、波長の違いによる欠陥検出感度の違いを詳細に議論することができる。よりわかりやすいように、図8と図9の各々から無欠陥の場合の輝度プロファイル(図6)を差し引いたものを図10に示す。検査波長が短いほう(a)が細かな欠陥に対して敏感になるということは容易に想像がつくが、場合によってはその感度の差は数倍以上にも及ぶということがわかる。



5 あとがき

位相マスクなどの実用化に向けて、マスク欠陥検査技術の確立は非常に重要であり、この開発のために、高精度な取得画像の予測シミュレーション技術が必要である。

当社は、ベクトル回折モデルに基づくRCWA法の回折計算ソルバを早期から独自開発して、高精度な結像シミュレーション技術を確立し、マスク欠陥検査装置の特性解析に応用してきた。これらは位相マスク検査に不可欠な技術であり、今後のマスク欠陥検査技術の開発にも活用していく予定である。

文献

- (1) Shiratsuchi, M., et al. Development of a captured image simulator for 199 nm mask inspection tools. Proc. SPIE. 6607. 2007. 66072J.



白土 昌孝 SHIRATSUCHI Masataka

研究開発センター 機械・システムラボラトリー主任研究員。
光学設計技術、光応用機器の研究・開発に従事。日本光学会会員。
Mechanical Systems Lab.



本宮 佳典 HONGUH Yoshinori, Ph.D.

研究開発センター 機械・システムラボラトリー研究主幹、理博。
光応用機器の研究・開発に従事。日本物理学会、応用物理学会、日本光学会、OSA 会員。
Mechanical Systems Lab.



平野 亮一 HIRANO Ryoichi

研究開発センター LSI 基盤技術ラボラトリー室長附。
マスク欠陥検査装置の開発に従事。応用物理学会、精密工学会会員。
Advanced LSI Technology Lab.