

深紫外線反射光学系による高感度マスク検査技術

Advanced Mask Inspection Method Using Deep UV Reflected Light Source

藤原 剛 土屋 英雄 遠藤 智

FUJIWARA Takeshi

TSUCHIYA Hideo

ENDO Satoshi

半導体の微細化に伴い、回路パターンの原版であるマスクの欠陥検査の重要性が高まっている。微小欠陥の検出には高輝度な光源の短波長化による高解像度化が有効であるが、ランプ光源で高輝度を得るのは難しい。一方、レーザー光源は高輝度であるが干渉性が高いため、干渉による照明むらが発生する問題があった。

そこで、この照明むらを低減する照明光学系を開発するとともに、照明光学系を透過光学系から反射光学系にすることで信号コントラストを向上できることを、光学シミュレーションで明らかにした。更に両技術を組み合わせることで、90 nm 世代以降のデバイス製作に使用される、ArF(フッ化アルゴン)露光用位相シフトマスクの微小ピンホール欠陥の信号検出に成功した。

The shrinkage of design rules in semiconductor devices requires an advanced mask inspection tool with an inspection light source having a shorter wavelength for detecting minute defects.

We have developed deep ultraviolet (UV) laser illumination optics with a wavelength of 257 nm for application to a mask inspection tool. Optical simulation confirmed that it is possible to enhance the signal contrast by changing the illumination optical system from a transmission optical system to a reflective optical system. Furthermore, by combining these two methods, we have succeeded in detecting signals of minute pinhole defects in phase shift masks for ArF exposure used for the fabrication of devices of the 90 nm generation and beyond.

1 まえがき

半導体の微細化が急速に進んでいる。90 nm 世代以降のデバイス製作には、波長 193 nm の ArF エキシマステップ及び位相シフトマスクが用いられる。これに伴い、ArF 露光用の位相シフトマスクの欠陥検査が重要になってきている。

位相シフトマスクはガラスと遮光部の透過位相を 180 度ずらし、光の干渉効果を利用して微細パターンを解像するマスクである。この中で遮光部を半透明膜にしたハーフトーン (HT : Half-Tone) マスクが多く利用されている。HT マスクは、従来のクロムマスクと異なり、露光波長で高いコントラストが得られるように膜の透過率と位相が決められている。このため、マスク上の微小ピンホール欠陥の信号を検出するには、検査光源の波長を露光波長と同一にすることが有効である。しかし、ArF-HT マスク検査では 200 nm 域の検査光が必要となり、技術面とコストから実現が難しかった。

そこでわれわれは、波長 257 nm の深紫外線レーザー光源と反射光学系の併用により欠陥信号のコントラスト向上を図り、ArF-HT マスクにおける 100 nm の微小ピンホール欠陥の検出をできるようにした。

ここでは、まず、深紫外線レーザー照明光学系を実現するうえで問題となる干渉による照明むらの低減技術⁽¹⁾⁽²⁾につい

て述べ、次に、微小ピンホールのコントラスト向上に反射光学系が有効であることを光学シミュレーションで明らかにする。更に、両者の技術を組み合わせたマスク欠陥検査装置 MC-3500⁽³⁾での信号検出結果について述べる。

2 マスク欠陥検査装置の基本構成と光源の短波長化

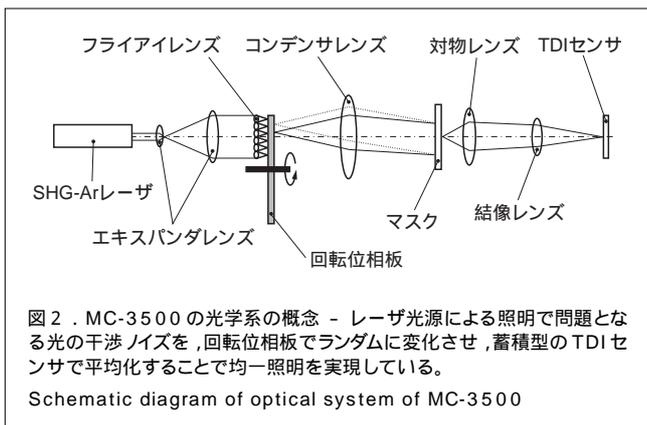
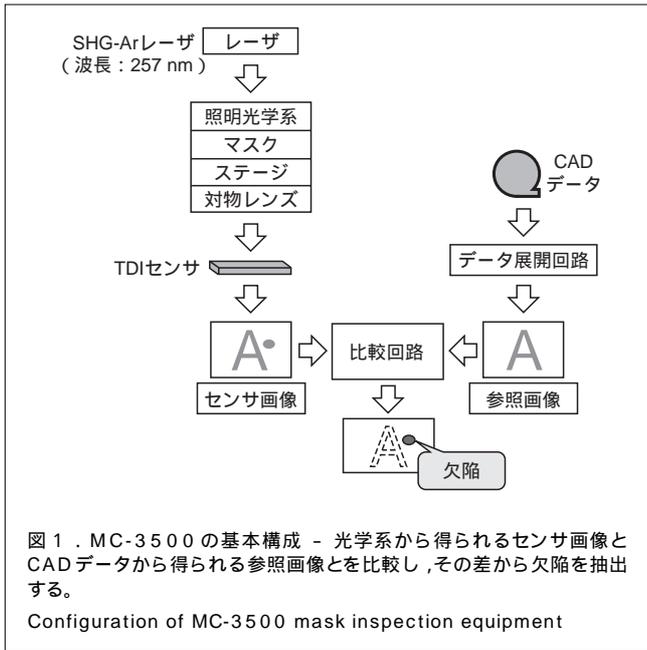
2.1 基本構成

MC-3500の基本構成を、図1に示す。レーザー光源、光学系、TDI (Time Delay and Integration) センサ、ステージ、データ展開回路、比較回路から構成されている。光学系から得られたセンサ画像とCADデータから得られる参照画像を比較し、その差から欠陥を抽出する。

2.2 光源の短波長化

光源の短波長化はレーザーを使用することで実現できるが、干渉性が高いため干渉ノイズにより照明むらが発生する。この問題を解決するために回転位相板と呼ばれる干渉性を低減する光学ユニットを開発した。光学系を概念を図2に示す。

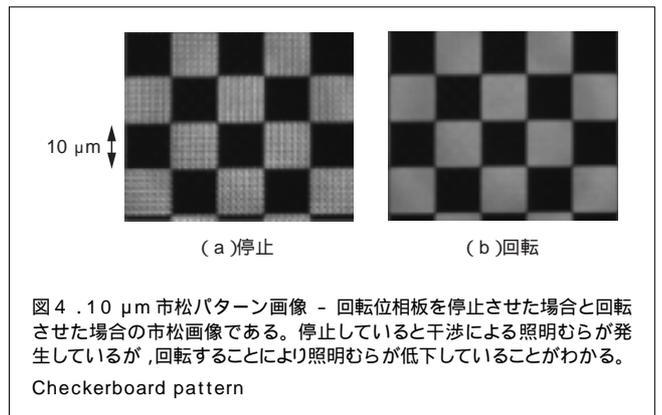
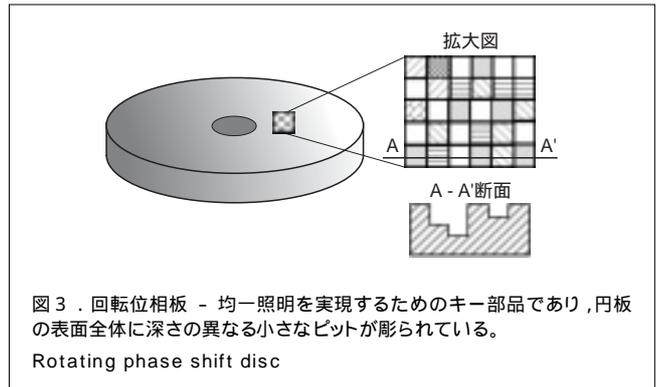
光源は Ar レーザの第二高調波 (SHG : Second Harmonic Generation) を使い、波長は 257 nm である。SHG-Ar レーザから出たレーザー光はエキスパンダレンズで拡大される。拡大されたレーザー光はフライアイレンズで $N \times N$ (N : 自然数)



に分割され、回転位相板を透過した後、コンデンサレンズを通してマスク面を照明する。マスクを透過したレーザー光は、対物レンズを通してセンサ面に入射する。

図3は回転位相板である。ガラスを円形加工したもので、円板の表面全体に深さの異なる小さなピットが彫られている。ピットは、透過する光の位相を90度、180度、270度ずらすようにガラスに彫り込まれている。フライアイレンズで分割されたビームの位相を回転位相板でランダムに変化させ、蓄積型のTDIセンサ上で平均化することで、干渉による照明強度むらを低減させている。

図4は、回転位相板を停止させた時と回転させた時の、市松パターンにおけるセンサ画像の違いを示している。パターンのサイズは10 μmである。図4(a)は停止のときで、光の干渉によるノイズで照明むらが発生しているが、図4(b)のように回転位相板を回転すると、干渉によるノイズがランダムに変化し、照明むらが均一化されていることがわかる。



3 反射光学系の有効性評価

3.1 透過光学系でのピンホール信号強度計算結果

HTマスクの透過率は、露光波長で5～10%になるように作られている。このため、検査波長と露光波長とが近い場合には検査時の透過率は低く、コントラストの高い信号が得られるが、異なる場合にはコントラストが低下し、微小欠陥の信号検出が困難になる可能性がある。

検査波長におけるKrF(フッ化クリプトン)-HTマスク及びArF-HTマスクの透過率を表1に示す。KrF-HTマスクでは検査波長と露光波長が近いため透過率は低いですが、ArF-HTマスクでは約30%と透過率が高いのでコントラストが低下し、微小ピンホール欠陥の信号検出が困難となることが予想される。そこで、反射光学系の有効性を透過光学系と比較して調べた。

計算は図5に示す光学系モデルで行った。波長は257 nm、コンデンサレンズと対物レンズのNA(Numerical Aperture)は0.75である。

透過光学系におけるピンホールの信号強度を計算した結果を、図6に示す。図6(a)は、KrF-HTマスク、図6(b)はArF-HTマスクの計算結果であり、図中のA-A'断面プロファイルを表示している。ピンホールの中心からのピンホールのサイズdが小さくなるに従い、信号強度は低下している。

表1. 検査波長(257 nm)におけるHTマスクの透過率

Transmittance of halftone (HT) mask

	KrF-HTマスク	ArF-HTマスク
透過率(%)	6	30

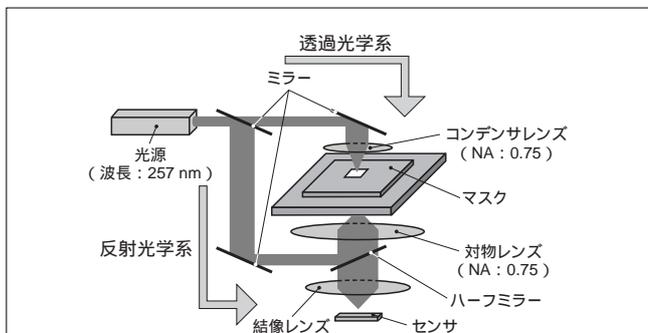


図5. 光学シミュレーションの条件 - 光学シミュレーションは透過光学系, 反射光学系とも波長, 照明のNA, 対物レンズのNAを同一にして計算する。

Conditions of optical simulation

KrF-HTマスクでは, 180 nmのピンホールまで解像している。一方, ArF-HTマスクでは250 nmのピンホールまで解像しているが, 200 nmのピンホールは解像していない。転写性が懸念される200 nm以下の微小ピンホールの信号検出が, 透過光学系ではできないことがわかる。

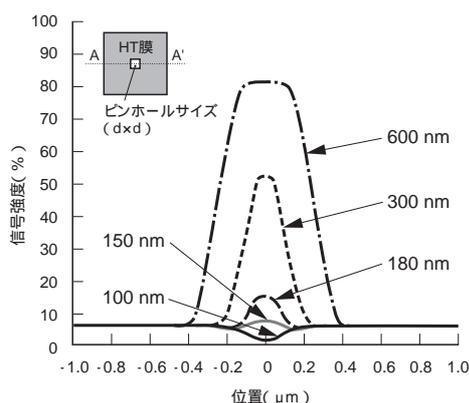
3.2 反射光学系でのピンホール信号強度計算結果

反射光学系におけるArF-HTマスクのピンホール信号強度の計算結果を図7に示す。ArF-HT膜の反射率は約17%であり, グラフでは反射率が17%のときの信号強度を100%としている。

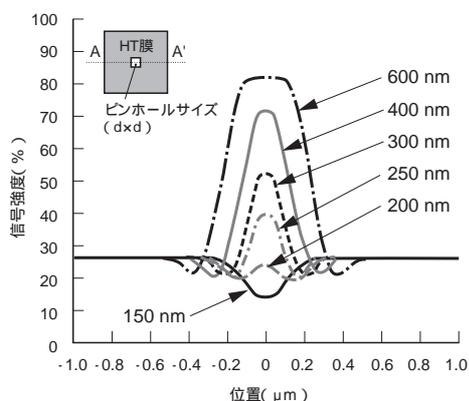
ピンホールのサイズが小さくなるに従い信号は小さくなるが, 100 nmの微小ピンホールで約65%の信号強度が得られている。コントラストは約35%となり, マスク上の100 nm以下のピンホールまで信号検出できることが予想できた。

4 ArF-HTマスクにおける微小欠陥信号の検出結果

光学シミュレーションにて反射光学系の有効性を示した。この結果をもとに, 深紫外反射光学系を持つMC-3500を開発し, 検証を行った。図8は, ArF-HTマスクのピンホールをMC-3500で取り込んだ画像であり, 同一ピンホールを透過光学系及び反射光学系にて測定した。その結果, 透過光学系では光学シミュレーションと同様に230 nmのピンホール欠陥の信号を検出しているが, それ以下のサイズのピンホールは検出できていない。一方, 反射光学系では100 nm以下のピンホールの信号まで検出できることがわかった。



(a) KrF-HTマスク



(b) ArF-HTマスク

図6. 透過光学系によるピンホール信号計算結果 - KrF-HTマスクでは検査波長と露光波長が近いので信号コントラストは高いが, ArF-HTマスクでは, 検査波長と露光波長が異なるためコントラストが低下する。

Cross-section profiles of pinhole in HT mask (results of optical simulation of transmission optical system)

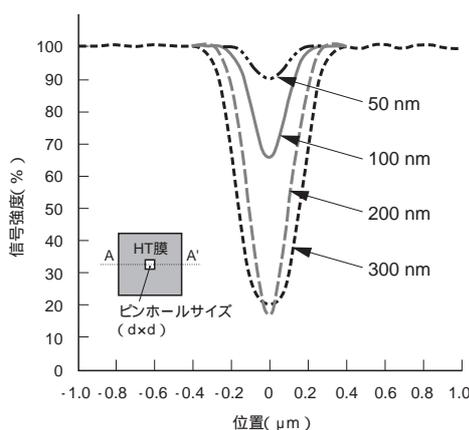


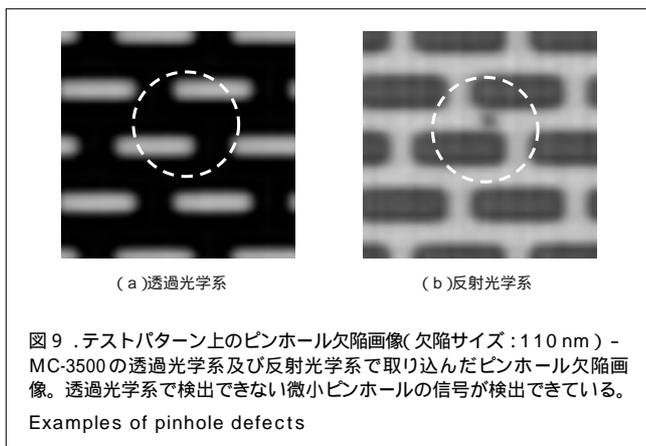
図7. 反射光学系によるArF-HTマスク上のピンホール信号計算結果 - ピンホールサイズが小さくなるに従い信号のコントラストは低下するが, 100 nmの欠陥で30%のコントラストが得られている。

Cross-section profiles of pinhole in HT mask (results of optical simulation of reflective optical system)

欠陥サイズ	80 nm	107 nm	231 nm
透過画像			
反射画像			

図8 . MC-3500 の透過光学系及び反射光学系で取り込んだピンホール画像 - 透過光学系では微小ピンホールを検出できないが、反射光学系にすると80 nmの微小ピンホールまで信号検出ができています。
Images of ArF-HT mask pinhole (MC-3500)

図9は、テストパターン中の欠陥検出結果で、同一パターンを透過光学系及び反射光学系にて測定した。欠陥サイズは110 nmである。透過光学系で検出できていないピンホールが、反射光学系で検出できていることがわかる。ArF-HTマスク使用時に懸念される200 nm以下のピンホール欠陥が検出できることを確認した。



5 あとがき

波長257 nmの深紫外線レーザを備える深紫外線照明技

術を開発し、反射光学系の有効性を明らかにして、以下を実現した。

- (1) レーザ光源を使用する場合に問題となる干渉ノイズを低減するため、回転位相板と蓄積型のTDIセンサを組み合わせると均一照明光学系を実現した。
- (2) 光学シミュレーションにより、透過光学系で検出困難であったArF-HTマスクにおける200 nm以下の微小ピンホールの信号を、反射光学系で検出できることを明らかにした。
- (3) 上記の技術を組み合わせたマスク検査装置MC-3500を使って、ArF-HTマスクにおける100 nm以下の微小ピンホールの信号を検出できた。

文献

- (1) Oohashi, K., et al. Newly developed mask inspection system with DUV laser illumination. SPIE. 4066, 2000, p.452 - 461.
- (2) 小野 明ほか . 深紫外顕微鏡における干渉パターンノイズの均一化 . 光学 . 30 , 1 , 2001 , p.35 - 40 .
- (3) Tsuchiya, H., et al. High-performance DUV inspection system for 100nm-generation masks . SPIE. 4754, 2002, p.526 - 533.



藤原 剛 FUJIWARA Takeshi

生産技術センター 光応用システム技術センター研究主務。
半導体検査装置の技術開発に従事。応用物理学会会員。
Quality Control System Technology Center



土屋 英雄 TSUCHIYA Hideo

研究開発センター LSI基盤技術ラボラトリー主任研究員。
マスク欠陥検査装置の技術開発に従事。電気学会会員。
Advanced LSI Technology Lab.



遠藤 智 ENDO Satoshi

(株)ニューフレアテクノロジー EBマスク装置技術部主幹。
マスク欠陥検査装置の技術開発に従事。
NuFlare Technology Inc.