

露光機のフォーカス精度測定方法の開発

星野 大子 山内 孝裕 渡辺 明
小野寺 俊雄 東野 秀博

近年半導体デバイスの急速な高集積化に伴い、フォトリソグラフィ技術では露光波長の短波長化、露光投影レンズの大口径化（レンズの高開口数化）だけでなく、位相シフトマスクや光近接効果補正技術、露光照明条件の工夫等のさまざまな超解像技術を駆使して微細パターンの形成を実現している。現在では、露光波長248nmのKrFエキシマレーザ光を露光光としたフォトリソグラフィプロセスで、130nmレベルのパターン形成を可能にしている。

一方、微細化に伴い、露光エネルギーやフォーカス（露光結像面の焦点）のエラー、レジスト塗布におけるレジスト膜厚のばらつき等、プロセス変動に対するパターン形成マージン（プロセスウィンドウ）は益々減少している。図1にテクノロジノード（DRAMセルの半ピッチで規定される最小実現線幅の指標）と焦点深度（パターン形成に支障のないフォーカスエラーの範囲）の関係を示す。

焦点深度は解像度の2乗に反比例するため、高解像力を必要とされる露光プロセスにおいては非常に浅い焦点深度の下で安定したパターン形成が求められる。そこで最近のフォトリソグラフィプロセスでは、露光投影レンズ

の結像性能だけでなく、ウェハ表面やフォトマスクの非平坦性の影響など、焦点深度の低下を招く微小なフォーカスエラーまでも考慮し、これらをいかに抑制するかが重要な課題となっている。

今回我々はフォーカス自動測定技術を用い、KrFスキヤナ型露光機における微小なフォーカスエラーを高精度かつ簡便に測定する技術を独自に開発したので報告する。

フォーカスエラー測定の概要

フォーカスエラー測定については、近年他社においてもさまざまな手法が検討され実用化されている。表1は、現在露光機メーカーの装置調整ツールなどで広く用いられているPSFM法¹⁾、PGFM法²⁾と我々が開発した測定手法の条件について示している。PSFM法は位相シフトパターンの転写位置がフォーカスエラーに比例してシフトする現象を利用しており、PGFM法はPSFM法のマスクパターン配置と露光プロセスを工夫することで測定感度を向上させている。表中のフォーカス測定感度は、フォーカスオフセットに対する測定値（PSFM法、PGFM法はパターン転写位置、OKI手法はパターン寸法）のシフト量の比率で定義しており、感度が高いほど微小なフォーカスエラーを高精度で測定できる。PSFM法やPGFM法ではフォトマスクに複雑なパターン構成の位相シフトマスクを用いるのに対して、我々は単純なパターンのバイナリ

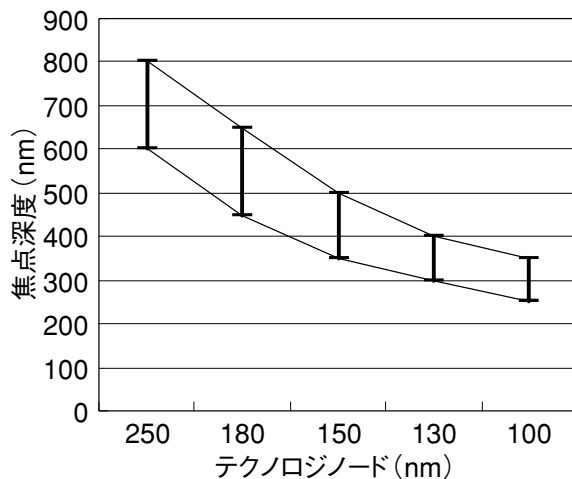


図1 テクノロジノードと焦点深度の関係

表1 フォーカスエラー計測条件

	PSFM	PGFM	OKI
フォトマスク	位相シフトマスク	位相シフトマスク	バイナリマスク
露光照明条件	小 σ 照明	小 σ 照明	制約なし
露光方法	通常露光	二重露光	通常露光
測定機	光学式重ね合せ測定機	光学式重ね合せ測定機	光学式重ね合せ測定機
フォーカス測定感度	~ 0.3	~ 0.6	~ 1.0

マスク*1)を用いるため、マスク作成が容易でありコストも安い。また、位相シフトマスクを用いる手法では高いフォーカス測定感度を得るために、小σ照明（露光光の入射領域を小さく絞って露光する）の設定を要するが、我々の手法では任意の照明条件で高いフォーカス測定感度が得られる。したがって、本手法はさまざまな照明条件を用いる実用条件に合せたフォーカスエラー測定が可能である。さらに本手法では、露光エネルギーやフォーカス測定用パターンサイズのサイズを変えることによって、フォーカス感度を容易に変化させることも可能である。

フォーカスエラー測定方法

図2にフォーカス測定パターンを示す。図2 (a) のフォトマスクパターンはクロム膜で形成され、数10μmの正方形の四方に微細なラインアンドスペースを配置することを特徴としている。図2 (b-1) は本フォトマスクパターン露光後のフォトレジスト像（光学顕微鏡像）であり、図2 (b-2) は、ラインアンドスペース先端部を拡大したフォトレジスト像（電子顕微鏡像）である。図2 (b-2) のパターンは130nmのライン/スペース幅であり、フォトレジストが分離解像しないようなパターンサイズおよびパターンピッチを用いている。このため分解能の低い光学顕微鏡像（図2 (b-1)）では、パターン測定部位に当るラインアンドスペースの先端部は直線形状となり、光学式

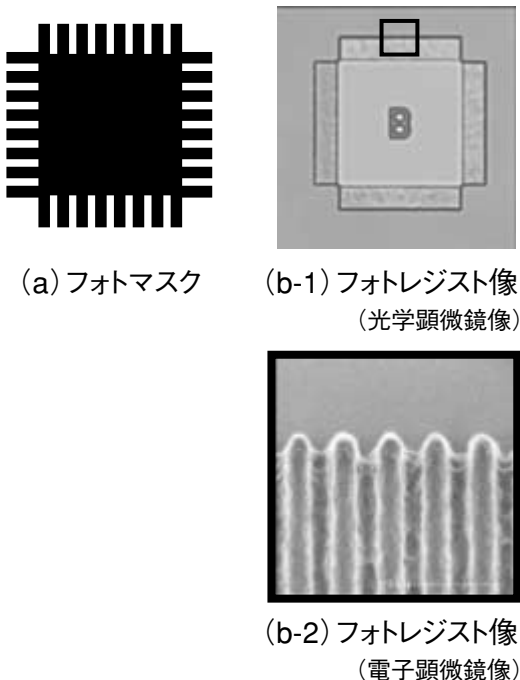
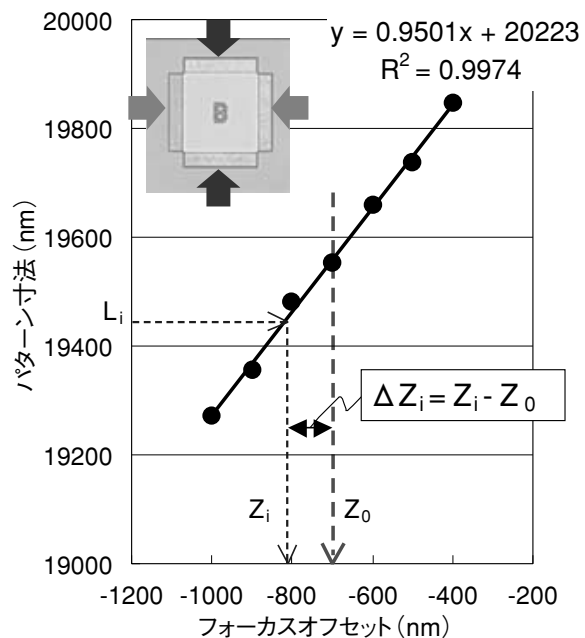


図2 フォーカス測定パターン

*1) ガラス基板と遮光膜(クロム膜)で構成されているフォトマスク。

の重ね合せ測定機によって再現性良く自動測定することができる。図3は露光機のフォーカスオフセット（露光機ウェハステージのZ座標）とフォーカス測定パターン寸法の関係を示している。フォーカス測定パターンの寸法は、対向するラインアンドスペース先端間の距離を縦方向（Y方向）および横方向（X方向）に対して測定される。図中のグラフはX方向測定したデータを示している。本手法は、ラインアンドスペースパターンの先端部がフォーカスエラーに対して後退する現象を利用している。フォーカス測定パターンは、-400~-1200nmのフォーカス範囲では良好な直線性を示し、かつ1に近い大きな傾きを有している。すなわち、このフォーカス範囲ではフォーカス測定感度は非常に敏感となる。この特性を利用して、以下に示す手順でフォーカスエラーを算出する。

- (ステップ1) 一定のフォーカスオフセット値 (Z_0) にて露光処理を行う。
- (ステップ2) 任意ウェハ上のフォーカス測定パターン寸法 (L_i) を測定する。
- (ステップ3) パターン寸法-フォーカスの関係式からパターン寸法 (L_i) をフォーカス値 (Z_i) に変換する。



Z_0 : 露光時のフォーカスオフセット入力値
 L_i : 任意ウェハ上のフォーカス測定パターン寸法
 Z_i : 任意ウェハ上のフォーカス値
 $\Delta Z_i (= Z_i - Z_0)$: 任意ウェハ上のフォーカスエラー

図3 フォーカス測定パターン寸法のフォーカス依存

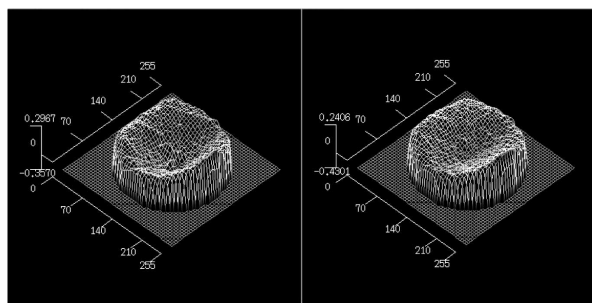
(ステップ4) 任意ウェハ上のフォーカスエラー (ΔZ_i) を算出する。

上記フォーカス測定パターン寸法の測定を、ウェハ面内および複数枚のウェハに対して実施することで、連続露光処理におけるウェハごと、ウェハ内ポジションごとのフォーカスエラーを測定することが可能となる。

KrFスキャナ型露光機のフォーカスエラー測定

本手法をKrFスキャナ型露光機に適用し、フォーカスエラー測定精度について検証した。図4は平坦度の異なるウェハホルダ上に同一のウェハを載せた時のウェハ表面の段差形状を示している。今回使用したウェハホルダは、図4 (a) のホルダAと図4 (b) のホルダBを用いた。ホルダAのRMS値 (ウェハ表面凹凸の σ 値) は105nmであり、ホルダBのRMS値は86nmである。図5は、本実験におけるウェハ露光のショットレイアウトと測定ポイントを示している。ウェハ上にはウェハ面内を右下から蛇行して左上までの45ショット露光されている。露光後のフォーカスエラー測定は1ショット内9箇所 (1箇所あたりXY2方向) について行った。

図6に測定した結果を示す。尚、ウェハマップ上の分布図はXY2方向測定の平均値を示している。ウェハホルダAにおけるフォーカスエラーの最大値はウェハ中央部およびウェハ周辺部で100~150nmであった。ウェハホルダBにおけるフォーカスエラーの最大値は、ウェハ中央部で50~100nmであり、ウェハホルダAと比べると小さかった。これは、図4に示す両ウェハホルダ間のウェハ表面段差形状の差を如実に反映した結果となっている。フォーカスばらつき量として見ても、ウェハホルダBで $3\sigma=74.7\text{nm}$ と、ウェハホルダAの $3\sigma=95.8\text{nm}$ より小さい値であり、ウェハホルダのRMS値と相関する結果となっている。



(a) ウェハホルダA (RMS値 = 105nm) (b) ウェハホルダB (RMS値 = 86nm)

図4 ウェハホルダに搭載したウェハ表面段差形状

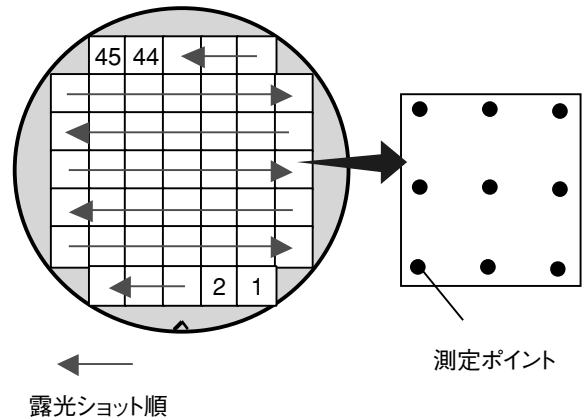
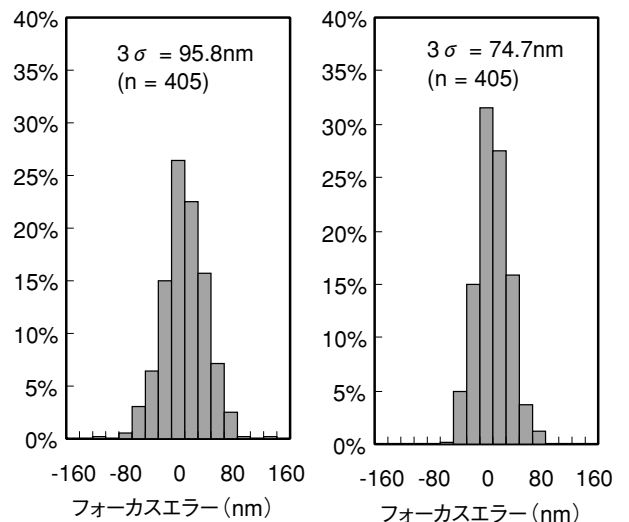
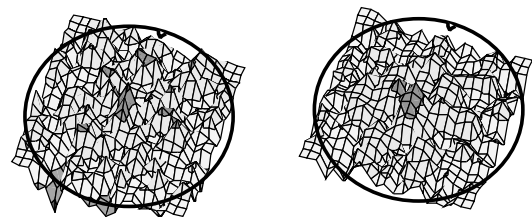
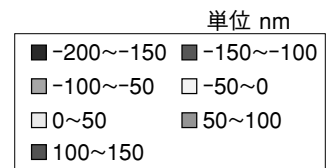


図5 露光ショットレイアウトと測定ポイント



(a) ウェハホルダA (b) ウェハホルダB

図6 露光ショットレイアウトと測定ポイント

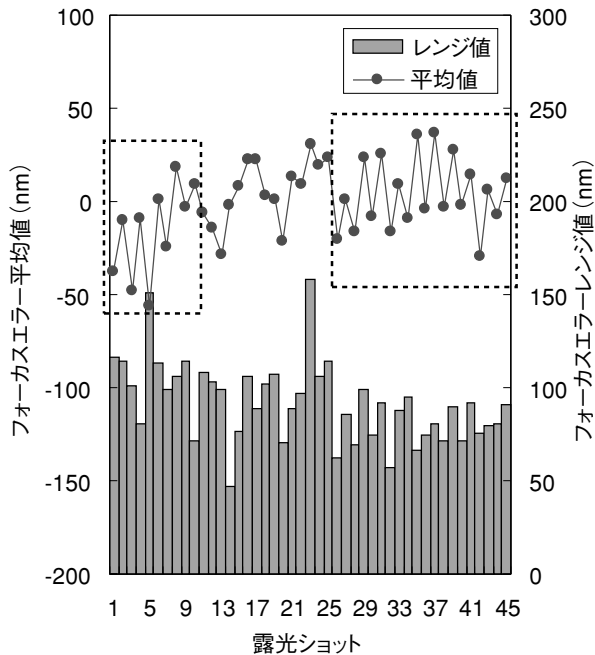


図7 露光ショット別フォーカスエラー
(ウェハホルダB)

図7に露光ショット別のフォーカスエラーを示す。図中の平均値とレンジ値は、図6 (b) に示したウェハホルダBにおけるフォーカスエラー測定データから、1ショットあたり18個のデータ（ショット内9箇所、1箇所あたりXY2方向測定）に対して計算され、露光ショット順にプロットされている。ここで注目すべきは露光ショット間の平均値の変動であり、特に1～10ショット目と26～45ショット目（図中点線枠内のデータ）で、フォーカスエラーが約40nmの幅でショットごとに交互に変動している。これはスキャナ型露光機特有の、スキャン方向の違いに依存したフォーカス差が寄与していると考えられる^{*2)}。

以上の結果から、我々は本手法によってウェハホルダ平坦性の差に依存したフォーカスエラーの差を確認できた。また、フォーカスエラーデータを解析することで、スキャナ型露光機のスキャン方向に依存したフォーカス差を確認できた。このように、本手法は数nmレベルの極めて微小なフォーカスエラー測定を高精度に測定できるため、さまざまなフォーカスエラー要因の影響を特定することが可能である。本手法を用いることで、既に示したウェハホルダ平坦性やスキャン方向依存性といった露光機起因だけでなく、この他のウェハ平坦性やフォトマスク平坦性といった材料起因によるフォーカスエラーの影響についても確度高く調べることが可能である。

*2) スキャナ型露光機は、ウェハステージを手前から奥、奥から手前と交互に繰り返し移動(スキャン動作)させながら露光していく。

あ と が き

微細なラインアンドスペースパターン先端部の後退がフォーカスエラーに比例する現象を利用して、数nmレベルの微小なフォーカスエラーを高精度に測定できることが実証できた。また、バイナリのフォトマスク、および既存の光学式合せ測定機を用いることによって、低コストかつ非常に簡便なプロセスでフォーカスエラー測定を実現した。本手法は、露光機のフォーカス精度に関する装置性能評価や量産装置の工程管理、またウェハやフォトマスクの平坦性に関する材料選定などで有効な手段となり得る。また、本手法を用いて検出されたフォーカスエラーを露光機のフォーカス制御系にフィードバックすることにより、パターン寸法均一性を向上させることも可能である。我々は、現在主に露光機の装置性能評価や次期デバイス用ウェハの選定評価に活用している。

今後は、より高いフォーカス精度が求められる次期ArFエキシマ露光機の装置性能評価への適用を進めていく。



参考文献

- 1) T.A. Brunner *et al.*: Quantitative stepper metrology using the focus monitor test mask, SPIE.Vol.2197, pp.541-549, 1994
- 2) H. Nomura: New phase shift gratings for measuring aberrations, SPIE.Vol.4346, pp.1355-1361, 2001

筆者紹介

星野大子: Daigo Hoshino. シリコンマニュファクチャリングカンパニーWPビジネス本部 WPビジネス推進部 マスクチーム
 山内孝裕: Takahiro Yamauchi. 宮城沖電気 開発部 プロセス開発1チーム
 渡辺明: Akira Watanabe. 宮城沖電気 開発部 プロセス開発1チーム
 小野寺俊雄: Toshio Onodera. シリコンマニュファクチャリングカンパニーWPビジネス本部 WPビジネス推進部 マスクチーム
 東野秀博: Hidehiro Higashino. シリコンマニュファクチャリングカンパニーWPビジネス本部 WPビジネス推進部 マスクチーム