露光装置の収差データ活用技術の研究*

—線幅変動低減のための収差解析—

吉武康裕** 松本俊一** 山本康治*** 古居英樹†

Study on an Application Technology for Aberration Data of Exposure Tools

Yasuhiro YOSHITAKE, Shunichi MATSUMOTO, Koji YAMAMOTO and Hideki FURUI

We have developed techniques for analyzing the imaging performances of KrF exposure tools that use wave aberrations measured at 25 different image heights in a semiconductor fabrication plant. The wave aberrations are obtained by double printing lattice and square patterns and measuring their lateral registration errors. It is confirmed that multiple regression of the 3rd and 5th coma aberration coefficients permits the differences in the widths at the left and right edges of seven pairs of 250nm line and spatial patterns to be predicted to an accuracy of 9.4 nm (2 σ). The results of an exposure and development simulation using wave aberrations agree with experimental results for the changes in the width of a 200 nm isolated line pattern with the focus position. This simulation is applied to quantify focus margins, which are found to be degraded due to astigmatism and spherical aberrations. Controlling the excimer laser wavelength is proposed as a means to reduce the spherical aberrations.

Key words: exposure tool, wave aberration, simulation, process window

1. 緒 言

半導体製造ラインでは、一般的に5～10台の露光装置が使用されている。露光装置はウエハを1ショットずつ移動させながら露光するため、ウエハ一括処理が可能な他の製造装置に比べると多数の台数が必要となる。一方、台数が多くなると各装置の転写性能の把握と、それに基づいた効率的な運用が必須となる。特に、システムLSI等、多品種少量生産に対応するためには、製品の回路パターンに応じて迅速に適切な露光装置を選択し、着工計画を立てる必要がある。また、露光量やフォーカス位置を決める条件出し作業は、製品の数だけ行う必要があり、露光装置の稼働率低下要因となる。製造ラインでは、これらの課題に対応した露光装置の運用方法が望まれている。

露光装置に必要な特性は、回路パターンの線幅が設計通りに形成されることである。これを阻害するのが投影レンズの収差であり、例えば、ライン&スペースパターンの左右端の線幅差やフォーカスマージンの減少を引き起こす。

投影レンズの収差評価に関しては、これまでに、主に転写パターンを計測する手法が開発されている^{1)~3)}。一方で、測定した収差の製造ラインにおける活用方法に関しては報告例があまりなかった。本報告では、複数の露光装置の収差測定データに基づいた装置解析方法、および装置改善手法に関して述べる。また、収差の解析対象は、ライン&スペースの左右線幅差とフォーカスマージンとした。前者は、装置の機差評価に広く用いられている手法であり、後者は、狭小化によってショート等の不良を誘発する重要な指標であるためである。本研究により、

従来、着工前に必要だった製品・装置毎の大量の線幅測定を1回の波面収差測定に代替することが可能となる。これにより、半導体製造ラインでの作業負担低減、および露光装置の稼働率向上が図れる。

2. 露光装置の収差測定

露光装置の投影レンズの波面収差測定方法としては、レンズ単体を干渉計で計測する方法⁴⁾や露光装置でレジストに焼き付けたパターンを計測する方法^{1)~3)}がある。半導体製造ラインでの装置据え付け後のレンズの状態を測定するには後者が有効である。我々は、Litel社のレチクル⁵⁾を用いて露光を行い、現像後のレジストパターンから波面収差を測定した。以下に測定方法と結果を示す。

本手法では図1に示す2重露光を行う。レチクルAには基準パターンである、ウエハ上10 μ m角(20 μ mピッチ)の比較的大きな正方形パターンが描かれている。パターンの転写位置は、像形成時の主成分である1次回折光の入射位置で決まる。ウエハへの1次回折光の入射角 θ は、パターンピッチ P 、波長 λ とすると、次式で与えられる。

$$\sin \theta = \lambda / P \quad (1)$$

ここで、 $\lambda = 248.5\text{nm}$ 、 $P = 20\mu\text{m}$ の場合、 $\sin \theta$ は0.012となる。この値は投影レンズのNA(=0.60)の2%であり、1次回折光はレンズのほぼ中心(瞳半径の2%の領域)を通る。レンズ中心の収差は平坦であるため、基準パターンは収差に影響されず、ウエハ上の設計通りの位置に転写することができる。一方、レチクルBでは格子パターンの下にピンホールが設置されており、この光路制限により、格子の端部を結像する光はレンズの端を通る。この時、収差により光路が曲げられ、設計位置からずれた位置に転写される。

レチクルA、Bによる2重露光・現像後のレジストパターンの顕微鏡像を図2に示す。格子パターンは、投影レンズの瞳内を通過した部分(ウエハ上 $\phi 200\mu\text{m}$ の領域)のみが転写され、

* 原稿受付 平成21年1月27日

** 正会員 (株)日立製作所 生産技術研究所
(神奈川県横浜市戸塚区吉田町292)*** (株)ルネサステクノロジ 生産本部 那珂第一工場
(茨城県ひたちなか市堀口751)† (株)ルネサステクノロジ マイコン統括本部
セキュアMCU事業部 (東京都小平市上水本町5-20-1)

この領域が収差算出対象となる。図 3 に 2 重露光後のレジストパターンの格子 1 つ分の模式図を示す。格子の位置ずれは、旧日立電子エンジニアリング製合わせ検査装置 (LA3000) を用いて測定した。格子の位置ずれマップを図 4 に示す。これらの位置ずれは、図 1 のレチクル B でのレンズ内光路に示すように、瞳面での波面収差の傾きに比例する^④。このため、対応する各点における各 Zernike 収差関数の 1 次微分の和と位置ずれマップから、最小 2 乗法により各収差の係数を算出することができる^⑤。測定された Zernike 収差係数の例を図 5 に示す。露光装置は、キャノン製 FPA3000EX4 (波長 248.5nm, NA0.60) である。測定再現性は 15 回の測定で各収差 0.003 (2 σ) 以下あることを確認した。収差は像高 (結像位置の座標) によって異なる。図 2 の転写パターンは、図 6 に示すように、レチクル A, B 上で、10 $\times$ 10 の領域 (ウエハ上 2mm ピッチ) に配置されており、露光領域内各像高での波面収差を測定することができる。第 3 章では、このうちの 25 点 (図 6 の網掛け部) での測定結果をもとに解析を行った。

Fig.1 Schematic diagram showing projection of reticle_A and reticle_B

Fig.2 Optical microscopy image of photoresist patterns

Fig.3 Schematic diagram showing lattice and base square pattern

Fig.4 Registration error map of lattice patterns

Fig.5 Measured Zernike coefficients

Fig.6 Arrangement of measurement points on reticle_A and reticle_B

3. ライン&スペースパターンの左右線幅差

3.1 コマ収差による左右線幅差の推定

収差データの活用法として、ライン&スペースパターン左右線幅差の推定方法の検討を行った。左右線幅差測定は装置機差評価法の一つである。左右線幅が異なるということは非対称な現象であるので、まず、非対称な収差であるコマ収差と三つ葉状の TRIFOIL に着目した。このうち、ライン&スペース (X) 方向で奇数となり、影響度が大きいと推定される 3 次および 5 次のコマ収差を抽出し、相関解析を行った。

露光装置としては、旧型であり性能ばらつきが比較的大きな FPA3000EX4 を 5 台 (#1~#5) 用い、図 6 に示した視野 20mm 角内 25 箇所において、Si ウエハ上のネガレジストに 7 本の 250nm ライン&スペースパターンを転写した。これらの左右端の線幅を SEM (日立ハイテクノロジーズ製 S9200) で計測し、左右線幅 W_L , W_R の差 $\Delta X (=W_L - W_R)$ を求めた。表 1 に視野内各像高で測定した ΔX および 3 次、5 次の X 方向 (ライン&スペース方向) のコマ収差係数 $XC3$, $XC5$ の例を示す。また、装置 #5 を例に、図 7 に、 $XC3$, $XC5$ に対する ΔX の散布図と、回帰平面を示す。回帰平面は次式で表すことができる。

$$\Delta X = 5.6 \times 10^2 \times XC3 - 7.5 \times 10^2 \times XC5 - 0.43 \quad (2)$$

Table 1 Measured data at each field point

Field point No.	Exposure tool #1			Exposure tool #5		
	ΔX	XC3	XC5	ΔX	XC3	XC5
1	-8	0.028	0.032	0	0.007	0.043
2	-5	-0.011	0.007	3	0.015	0.015
25	-16	-0.067	-0.036	5	-0.047	-0.038

Fig.7 Regression plane surface for the 3rd and 5th coma coefficients and the differences in widths between the left and right 250nm lines and spatial patterns in the field of exposure tool #5.

これを左右線幅差の予測式とした時、-15nm~22nmの線幅差に対し誤差は7.4nm(2 σ)、寄与率 R^2 (相関係数の2乗)は0.88となった。同様に他の4台の左右線幅差の重回帰予測式を求めた。図8に実測値と予測値の散佈図を示す。全体の寄与率 R^2 は0.85、予測誤差(重回帰式からの乖離)9.4nm(2 σ)が得られた。これにより、3次と5次のコマ収差からライン&スペースの左右線幅差が ± 10 nm以下の精度で求められることを確認した。この予測式を用いて、収差データを線幅の機差に変換することができる。例えば、装置#2は像高により線幅差が-10~25nmとばらつくが、

Fig.8 Scatter plot of differences in the widths of the left and right 250 nm line and spatial patterns as measured by SEM and predicted from the 3rd and 5th coma coefficients.

Fig.9 Simulation profile of 7 pairs of 250nm lines and spatial pattern with and without the 3rd coma of 0.10 and 0.20.

Fig.10 Line widths of the left and right 250nm line and spatial pattern with and without the 3rd coma of 0.10 and 0.20.

装置#3は全て ± 10 nmに入っており比較的良好である等の判断ができ、製品着工時の号機選定に活用することが可能になる。

3.2 露光シミュレーションによる考察

ここで、ライン&スペースの左右線幅差に現れるコマ収差の影響に関し、露光シミュレーション⁴⁾を用いて考察する。図9に、波長248.5nm、NA0.60で露光した時の250nmライン&スペース7本の空間像において、3次コマ収差係数が0, 0.10, 0.20の場合の波形を示す。ネガレジストでは光が照射された部分でパターンが形成されるため、空間像はレジストパターンのプロファイルを示す。右端を除く各ラインの右側のスロープはコマ収差増大に応じて緩やかになっているが、右端のラインではその傾向がない。コマ収差係数0において250nmの線幅が得られるしきい値(最大強度の38%)での左右端の線幅変化を図10に示す。左端の線幅はコマ収差により増大しているが、右端では若干減少している。これにより、露光シミュレーションからもコマ収差が左右線幅差に影響を与えていることが確認できた。

4. プロセスウィンドウの推定

プロセスウィンドウは、露光量とフォーカス位置を縦軸・横軸とした時、目標の $\pm 10\%$ の線幅が得られる領域を指す。各露光装置では、この領域の中心の露光量・フォーカス位置の値が最適条件として設定される。この値は転写パターンや装置で異なるため、製品・装置毎に実験で求める必要があった。しかし、この作業には5時間程度要するため、その間の装置稼働率が低下していた。そこで、2章で測定した波面収差を用い、シミュレーションによるプロセスウィンドウの推定を試行した。

4.1 露光・現像シミュレーションと実験との比較

ウエハ上にポジレジストを400nm厚で塗布し、200nm幅の孤立パターンに対し、 $\pm 10\%$ の線幅変化を生じさせるレンジ(800nm)でデフォーカスさせ、この時の転写パターンをSEMで測定した。像高は、図6に示した赤い点、即ち、DL(左下)、DR(右下)、CC(中

Fig.11 Comparison of line width change as a function of focus position between experiment and simulation

央), UL(左上), UR(右上)の5カ所, 露光装置は, 200nm 線幅を転写するため, 高NA レンズを搭載した FPA3000EX6(波長 248.5nm, NA0.65)を3台(#6~#8)用いた. 現像シミュレーションにおいては, 次式で表す各レジストパラメータ A, B, C, および酸拡散長 ρ が必要となる.

$$A = \frac{1}{d} \cdot \ln\left(\frac{T_{\infty}}{T_0}\right) \quad (3)$$

$$B = -\frac{1}{d} \cdot \ln(T_{\infty}) \quad (4)$$

$$C = \frac{A+B}{AI_0T_0(1-T_0)} \cdot \frac{dT_0}{dt} \quad (5)$$

ここに, T_0 は露光前のレジスト透過率, T_{∞} は露光後のレジスト透過率, d はレジスト初期膜厚, I_0 はレジスト表面での光強度, dT_0/dt は時間 $t=0$ における透過率 T の変化 (露光直後の透過率変化) である. パラメータ A は感光剤の光吸収, B は樹脂の光吸収, C は感光剤の分解速度 (レジストの光学感度) を示す⁷⁾. また, 化学増幅レジストは, 露光後発生した酸を触媒に, 加熱工程によってレジストの保護基の分解を行う. この加熱工程での酸の拡散はガウス分布で表すことができる. この拡散の大きさ (ガウス分布の分散) を表すパラメータが酸拡散長 ρ である.

上記の A, B, C, ρ の値は, 半導体ラインでは直接計測することが困難であるため, 露光量とフォーカスを変化させたサンプルの線幅変化からシミュレーションを用いて決定した. 図 11 に, 実験, シミュレーションで得られた, デフォーカスに対する線幅変化を示す. 装置, および像高によって, 線幅変化の仕方は様々であるが, 測定した波面収差を取り入れたシミュレーションの予測値が, ほぼ実験値と一致しており, 波面収差をモデルに取り入れた効果が確認できた. このことから, プロセスウィンドウがシミュレーションで予測可能であると判断した.

4.2 プロセスウィンドウ推定とフォーカスマージン改善策

このシミュレーションにより, 線幅 160nm のゲートパターン

のプロセスウィンドウを求めた. 図 12 に結果を示す. FPA3000EX6 (NA0.65) 7 号機の各像高での波面収差を入力し, 露光・現像シミュレーションを行い, 目標線幅 160nm の $\pm 10\%$ となる線を実線で示した. 転写領域中心での線幅 CC-CD (橙色の実線) を例に取ると, 上下の橙色の実線で挟まれた領域が, 目標線幅の $\pm 10\%$ のパターンが得られる条件を示す. これに加え, レジスト断面のテーパ角 (Side wall angle) が 85 度となる線を点線でプロットしている. この線より右側が 85 度以上のテーパ角が得られる領域を示す. 従って, これらの線に囲まれた領域が, 線幅変化 $\pm 10\%$ 以下, テーパ角 85 度以上のパターンが得られる条件を示す. ここで, 露光量の許容変動幅は 5% 必要なことから, 縦辺の長さを 5% に固定すると, この領域に内接する長方形が一義的に決まるため, この長方形をプロセスウィンドウとした. この時, 横辺の長さがフォーカスマージンとなる. FPA3000EX6 各装置, 像高毎のフォーカスマージンを図 13 に示す. 6 号機はフィールド全面でほぼ均一, 7 号機は全体的にマージンが小さく, 8 号機は像高毎のばらつきが大きい. これらの原因を探るため

Fig.12 Calculated process window of 160 nm gate pattern of exposure tool #7

Fig.13 Focus margins of 160 nm line pattern for three exposure tools

Fig.14 R squared value of each aberration coefficient to focus margin

フォーカスマージンと各収差係数の相関を調べ寄与率 R^2 を算出した。図 14 に結果を示す。これにより、非点収差と球面収差の寄与が大きいことが分かった。

これらの改善には、通常、レンズの厚さ、間隔、曲率半径等の調整が必要となる。しかし、製造ラインで行うには、調整、検証に数日装置を止める必要がある。そこで、より簡便な方法として、露光波長をわずかに変化させることで、収差が調整できないかを実験で検証した。FPA3000EX4 の 3 号機を用い、光源であるエキシマレーザの回折格子の角度を制御し、波長を設定波長の 248.5nm に対して $\pm 10\text{pm}$ 変化させた。絶対値の較正はホロカソードランプの吸収線 (248.3nm) で行った。図 6 に示した 5 像高 (UL, UR, CC, DL, DR) における 0 度方向の 3 次非点収差と 3 次球面収差係数の波長依存性を図 15 に示す。球面収差は全ての像高において変化率が $0.015/10\text{pm}$ で一定である。これに対し、非点収差は像高によって振る舞いが異なるが、変化量は小さい ($0.005/10\text{pm}$)。このことから、波長制御により球面収差だけを調整可能であることが確認できた。以上より、波長制御により非点収差を悪化させることなく球面収差を低減させることができ、球面収差起因のフォーカスマージンを改善できる可能性があることを見出した。

5. 結 言

露光装置の収差データ活用に関する本研究により、次の結果を得た。

Fig.15 Change of aberration coefficient with wavelength deviation

- (1) 測定した波面収差を用い、7 本の 250nm ライン & スペースパターンの左右線幅差の推定が 9.4nm (2σ) の精度で可能なことを示した。
- (2) 200nm 線幅の孤立パターンにおいて、波面収差を用いた露光・現像シミュレーションにより、フォーカスマージンの定量評価が可能であることを示した。
- (3) フォーカスマージンへの影響が大きい球面収差が光源の波長制御で低減可能であることを示した。

以上により、製造ラインにおける着工前の装置評価作業削減、およびそれによる装置稼働率向上が可能になる。本報告では、パターン線幅の変動を抑えるための収差管理技術の検討を行った。一方、図 9 に示すように、コマ収差は線幅だけでなく、パターン全体の位置シフトも生じさせている。今後の課題は、波面収差によるパターンの位置ずれの影響を評価、解析し、改善策を立てることである。

なお、本論文で述べた結果は、波面収差と転写パターンの回折光の相互作用に基づく露光の物理に関するものであり、最先端プロセスである、波長 193nm、液浸対応高 NA のレンズに対しても、原理としては適用可能である。

参 考 文 献

- 1) H.Nomura and T.Sato, "Techniques for measuring aberrations in lenses used in photolithography with printed patterns", *Applied Optics*, **38**, No.13, (1999) 2800.
- 2) H.Nomura et al., "Aberration measurement from specific photolithographic images: a different approach", *Applied Optics*, **39**, No.7, (2000) 1136.
- 3) M.Ma et al., "Aberration measurement of projection optics in lithographic tools based on two-beam interference theory", *Applied Optics*, **45**, No.32, (2006) 8200.
- 4) Y. Yoshitake et al., "Multispot scanning exposure system for excimer laser stepper", *SPIE*, **1463**, (1991) 678.
- 5) N.Farrar et al., "In-situ measurement of lens aberration", *SPIE*, **4000**, (2000) 18.
- 6) E.Moreno-Barriuso and R.Navarro, "Laser ray-tracing versus Hartmann-Shack sensor for measuring optical aberrations in the human eye", *J. Opt. Am. A*, **17**, No.6, (2000) 974.
- 7) F.H.Dill et al., "Characterization of positive photoresist", *IEEE Trans.*, **ED-22**, No.7, (1975) 445.