

レジスト像を用いた波面収差の評価

野 村 博

Resist Based Methodology for Measuring Wave-Front Aberrations in Lithography Tools

Hiroshi NOMURA

A method for estimating residual aberrations in a projection lens used in a lithographic exposure tool has been developed using resist patterns on a wafer. Imaging characteristics of three-beam interference, which was easily realized by a combination between coherent factor (σ) of the illumination and pitch of the gratings on a reticle, can simplify the quantitative measurement of the aberration. The new approach is characterized in that a number of pitches and orientations of the gratings turns a light toward given direction and then covers a whole of the lens pupil.

Key words: lithography, aberration, Zernike polynomials

半導体デバイスの微細化は、光源の短波長化、投影レンズの高 NA (numerical aperture) 化および超解像技術の適用などによって進められてきたが、デザインルールが解像限界に近づくにつれて、投影レンズに残留する収差の悪影響が目立つようになってきた。

90 年代初頭、残留収差が転写パターンへ与える影響や、収差の評価法に関する研究が、米国のリソグラフィー研究者の間で行われていた¹⁻⁴⁾。しかし、実際に深刻な被害をもたらすような事例は、90 年代の終りになって噴出した、トレンチ型キャパシターに特有のツインホールパターンが、非対称に変形する問題がはじめてであったと思う。近接する 2 つのホールパターンでサイズが異なると、キャパシターの特性がばらつき、著しい歩留りの低下を引き起こす。この問題は一部の半導体メーカーを震撼させた大事件ではあったが、同時に収差評価の重要性が広く認識されるきっかけともなった。

それまで収差は、下地のパターンに合わせて上層のパターンを重ねる際の、重ね合わせ精度の問題のひとつとして認識されていた^{5,6)}。投影レンズにコマ収差が存在すると、微細なパターンでは転写位置がずれる。重ね合わせ検査用

のマークは収差が問題にならないほど大きいのに対し、実際のデバイスパターンは 1 桁以上細かいため、コマ収差の影響を正確に把握しないと、将来重ね合わせの管理が破綻してしまうのではないか、という危機感があった。その後、前出の事件をへて、評価の対象は収差の影響から波面収差そのものへと移る。いわゆる周期端での線幅異常に代表される収差の影響は、デザインや露光時の照明条件にも左右されるのに対し、波面収差そのものは投影レンズ固有の特性である。したがって、波面収差測定と、測定結果をもとにデザインや照明条件を加味した光学像シミュレーションにより危険箇所を未然に察知し、ますます深刻化する収差起因の製品トラブルを、上流にさかのぼって防ごうとする試みが検討された⁷⁾。このような考えは、一方で収差にやさしいマスクデザインという概念をデバイス設計者へ浸透させ、もう一方ではマスクデザインに合わせて積極的に波面収差を動かす試みへと発展する。

従来から露光装置メーカーでは、PMI (phase measuring interferometry) 装置に投影レンズを載せて収差を測定していた。しかし、この PMI は、装置が半導体工場に納入された後では実施できないため、設置時の変化や経時

変化への懸念から、オンマシーンでの収差測定技術が切望されていた。

露光装置のユーザーが単独で収差測定を行おうとすると、レジスト膜に焼き付けたパターンを用いる以外に手段がない。このような制約のもとで、位相シフトマスクでつくられた円形パターンを露光した際の变形具合を走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察する方法⁸⁾など、いくつかの収差評価手法が提案されている。また、露光装置メーカーからも ZEX⁹⁾、SPIN¹⁰⁾、p-PMI¹¹⁾、あるいは ILIAS^{12,13)} など、オンマシーンでの評価技術が発表されている。ILIAS は lateral shearing 干渉計を、p-PMI はシャック・ハルトマン干渉計を露光装置に組み込んだシステムである。SPIN はハルトマンテストを1枚のマスクで実現した方法で、同種マスクは LITEL 社からも製品化されている^{14,15)}。ZEX は、転写パターンが任意の収差に対してのみ変形するようにチューニングした特殊な照明アパーチャーを用い、その変形具合を SEM で測定することで、各収差を順次同定する方法である。

一方、収差に対する認識が露光装置ユーザーにも高まった結果、PMI データの解析に用いられていたツェルニケ収差¹⁶⁾が、メーカー・ユーザー間の共通言語としての役割を果たすまでになってきている。

本稿では、新規のアプローチである三光束干渉法について紹介する。この収差計測法は、3つの光束による干渉パターンのもつ特性を利用して収差を定量的に測定する方法で、マスク上にさまざまな向きやピッチのパターンを配置して瞳内をサンプリングすることに特徴がある。

1. 三光束による光の干渉と収差

マスク上に配置した回折格子パターンを部分コヒーレント光で照明すると、図1に示すように回折光が発生し、投影レンズの瞳内を通過した回折光のみがウェハー上での結像に寄与する。このとき、回折格子の周期長を選ぶことで、0次光、+1次光、および-1次光の3つの回折光による干渉が実現でき、その結果、ウェハー面近傍には図2(a)に示す輝度分布が形成される^{*1}。

例えば、+1次光では位相が進み-1次光では同じだけ位相が遅れる場合、すなわち反対称の収差が存在する場合、図2(b)のように輝度分布はその移相量に比例して横方向にずれ、両1次光とも位相が等しく進んでいる場合、すなわち対称収差が存在する場合では、図2(c)のように

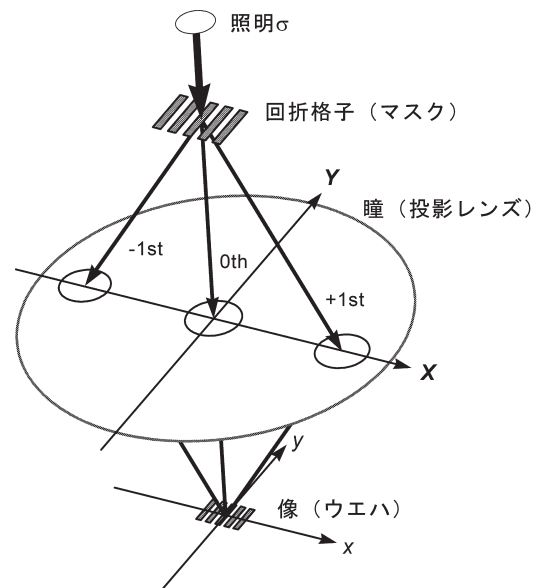


図1 三光束干渉。

輝度分布はその移相量に比例して縦 (フォーカス) 方向にずれる。これは対称収差と反対称収差が混在する場合でも成り立ち、縦方向と横方向の移動量から、それぞれ対称/反対称収差の絶対値を独立に測定することが可能である。なお、対称収差は球面収差や非点収差などの偶関数で表現される収差を、反対称収差はコマ収差などの奇関数で表現される収差を指している。

さらに、輝度分布を構成する個々の輝点や暗点は、収差の有無に関係なく、常に高い対称性が維持される。この特徴により、レジストパターンの断面形状は常に対称的となり、設定フォーカスや露光量の変動によって中心位置が変わることはない。

さらに、奇関数収差の測定においては、 σ 値を小さく設定するほど測定感度が向上する傾向がある。しかし、同時に小 σ ほど画角内の照度均一性が悪化する場合があり、0.03 まで絞った極小 σ での実験では、部分的にレジストパターンが形成できない部分が現れることがしばしばあった。このため、 σ 値は 0.1 くらいが妥当なところと考えられる。

2. 二重露光法と相対位置測定 (高速自動測定の実現)

次に、奇関数収差の測定について説明する。

「大きなパターンによる回折光は瞳の中心付近に集中するため、収差によるこの大パターンの位置ずれは無視でき

^{*1} 結像面の上下には濃淡が逆転したタルボットイメージ (擬解像) が存在しているが、 σ 値が大きな通常の照明条件下では、この擬解像は消滅する。図6(b)も参照のこと。

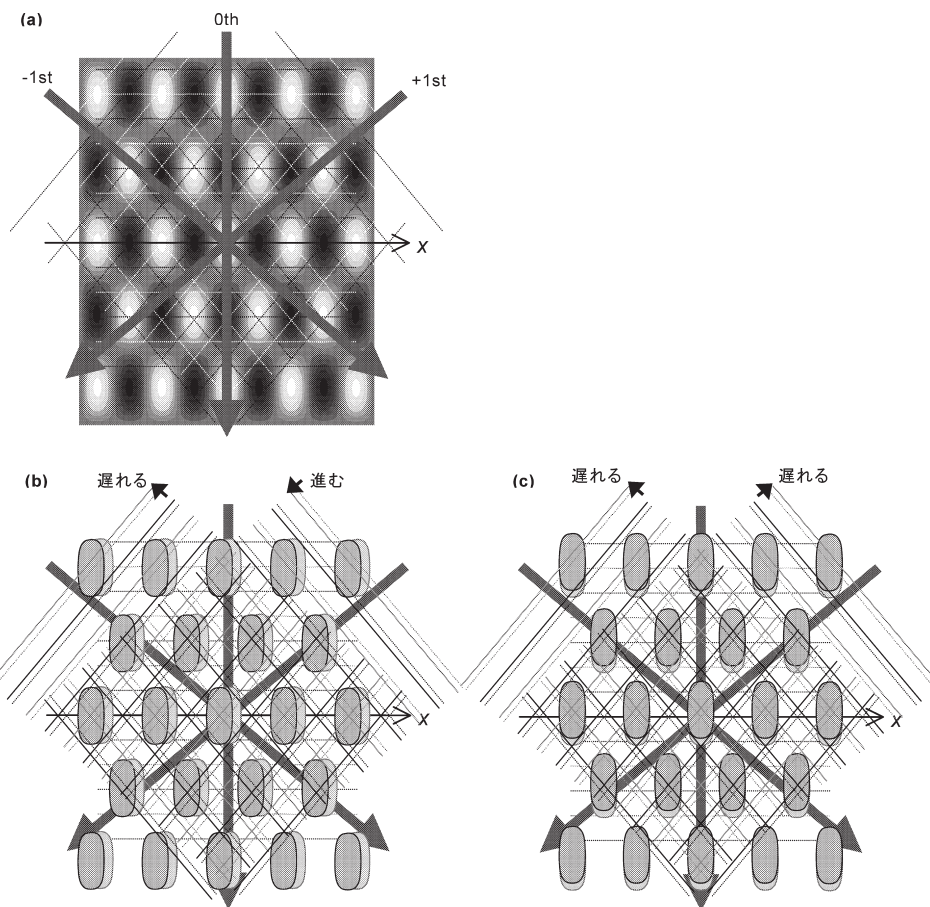


図2 三光束干渉での輝度分布 (a) と、奇関数収差 (b) や偶関数収差 (c) がある場合の変化。

るほど小さい*2]と仮定すると、三光束干渉を実現する微細な回折格子パターンと大パターンとの距離を、その設計値と比較することで奇関数収差を測定することができる。

近接するパターン間の距離を測定する既存の装置としては、測長SEMとオーバーレイ(O/L)検査装置が挙げられる。SEMを通して観察しなければ微細な回折格子パターンを認知することはできないが、大パターンではその高倍率が裏目に出て、同一のイメージ内に両パターンをとらえることができない。このため、測長SEMでは十分な精度が期待できない。一方、O/L検査装置は計測時間が短く、高精度が期待できる反面、光学顕微鏡であるために微細パターンを解像できず、両端で発生する線幅異常の影響により正確な測定ができない問題があった。この問題を解決するために、図3、4に示す二重露光法を提案した¹⁷⁾。線幅異常となる周期端パターンを二重露光によって取り除

くことで、新たな周期端では線幅異常がなくなり、O/L検査装置での測定を可能にするものである。さらに、高速のO/L検査装置の利用は、従来にないきめ細やかな収差評価を可能にした。

30°ずつ回転した測定マークは、図5に示すように、コマ収差だけでなくトレフォイル収差も同時に評価することができることから、最近では、任意角度の測定マークにも対応したO/L検査装置も商品化されている。場合によってはコマ収差以上に困り者となるトレフォイル収差は、3軸回転対称の収差であるが、一見コマ収差と似た振る舞いをするため、誤った判断をしやすい。

3. PSG法(非対称な完全二光束干渉)

J. Kirk氏が紹介するマイクロステップ多重露光¹⁾を三光束干渉で行うと、図6(b)に示すように、偶関数収差の

*2大パターンの位置ずれは一般にディストーション(歪曲)と表現される。像面湾曲や歪曲は、像高間での相対的な関係を表す収差であり、本稿のテーマである波面収差、すなわちある像高からみたときの波面の崩れとは範疇が異なるため、これらの評価は他文献に譲る。像面湾曲に関しては、例えば、H. Nomura: "A novel technique for measuring defocus with phase shift grating on a photomask," Opt. Rev., 8 (2001) 184-190を参照していただきたい。

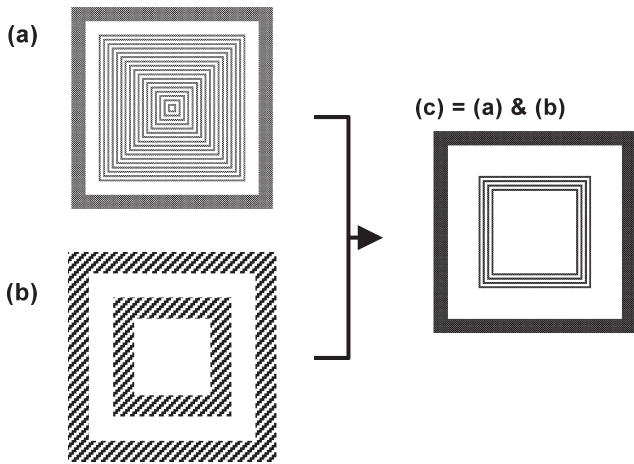


図3 奇関数収差測定マーク. マスクパターン (a), (b) とレジストパターン (c).

存在を視覚的に訴えるのに効果がある¹⁸⁾. この像は、設定フォーカスを微小変化させつつ、図6 (a) のマスクパターンをずらしながら複数回連続に露光して得られる. しかし、定量化、自動化、および高速化が困難であったため、新たに PSG 法を考案した¹⁹⁾.

図7に示す遮光部、透過部、位相掘り込み部が繰り返し並んだ構造をした回折格子パターンは、線幅比 ($n : 1 : 1$) と掘り込み移相角 θ を、次式を満たすように選んでやると、2つある一次回折光のうち、どちらか一方が消滅する特徴をもつ*3 (以降、この回折格子を PSG と呼ぶ).

$$360^\circ / (n + 2) + \theta = 180^\circ \quad (1)$$

特に、線幅比 ($2 : 1 : 1$) と掘り込み移相角 90° の PSG は、転写されたレジストパターンの特性やマスク設計・製作のうえから、最も理想的な PSG といえる. フォトマスク上

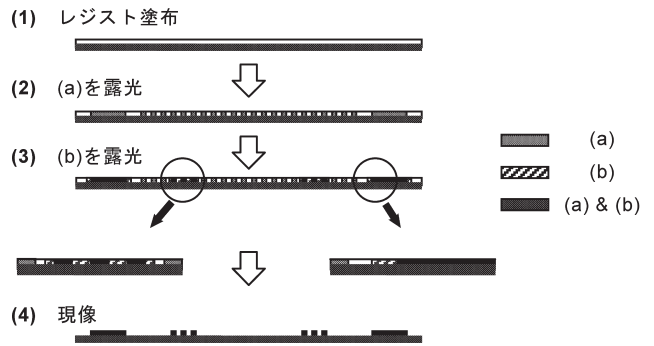


図4 二重露光プロセス.

に配置した PSG は、結像面の近傍に 0 次光と一方の 1 次光による二光束干渉を実現し、結果的に主光線から傾いた定在波を形成するため、この PSG の像はウェハの高さに応じて横ずれする特徴がある. この傾いた定在波は、照明光学系の誤差や収差の有無によらず必ず直線状になることから、フォーカスずれと横ずれの関係は比例関係になることが明らかである. 具体的には、図8に示す計測マークを用い、奇関数収差の測定と同様に二重露光を行う. さまざまなピッチや方向を選んで、瞳内をサンプリングすることで、偶関数収差を定量的かつ高速に測定することが可能である.

4. ツェルニケ多項式と離散データのフィッティング

本手法を用いると、一次回折光が通過する瞳位置での OPD (optical path difference) の絶対値を簡便に測定できることを説明してきた. 測定マークの周期長や向きで瞳内をサンプリングしてあげれば、図9に示すように、波面収差全体の様子を1時間以内でうかがい知ることが可能で

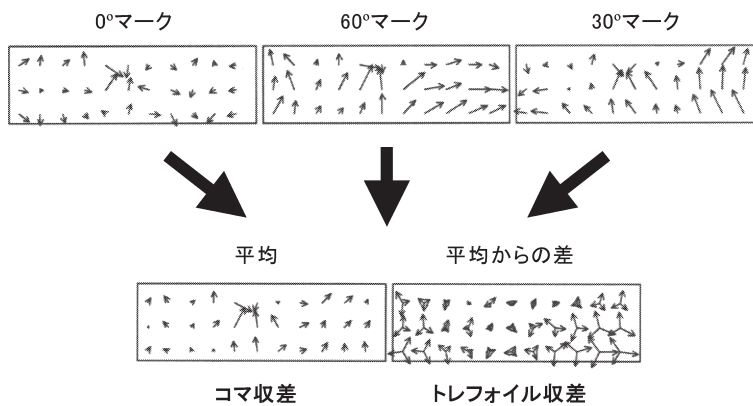


図5 コマ収差とトレフォイル収差の測定例.

*3 渋谷・レバソン型位相シフトマスクでは、 180° の位相掘り込みを形成するため、通常ドライとウェットの2段階エッチングを採用している. このドライエッチングでの移相角に合わせて線幅比をチューニングすれば、マスクプロセスに負荷を与えることなく PSG を製品マスクに混載でき、実際の製品工程でのフォーカス履歴管理に活用できるだろう.

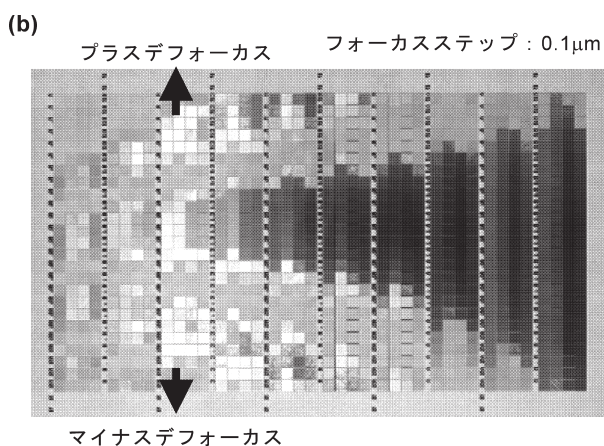
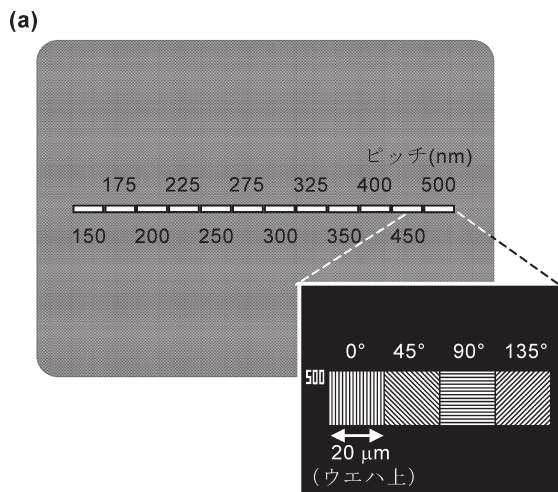


図6 偶関数収差の評価例. マスクパターン (a) と転写結果の光顕像 (b).

ある。しかし、このように離散的に取得した OPD データからツェルニケ収差係数を算出するのは簡単ではない。理論式に含まれる変数を複数の実測値から決定する場合、実測値と理論値の差分二乗和が最小になるように決定する、いわゆる最小二乗法が一般に用いられる。しかし、離散的に取得した波面データからツェルニケ収差係数を求める場合、以下に示す理由から最小二乗法は不適當である。

- 1) 測定点と測定点の間や測定点の外側で、不自然な振る舞いをする事が多い
- 2) 何次の係数までを考慮するかによって、計算結果が大きく異なる
- 3) 測定誤差が計算結果に大きく影響する

これは、最小二乗法が測定点での一致を重視し、測定点周辺の傾向を考慮していないことと、ツェルニケ多項式の正規直交性を無視していることが原因であると考えられる。収差の測定結果は、露光装置の再調整や経時変化の確認な

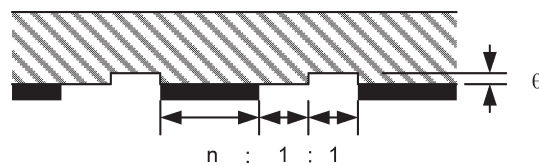


図7 PSGの断面図。

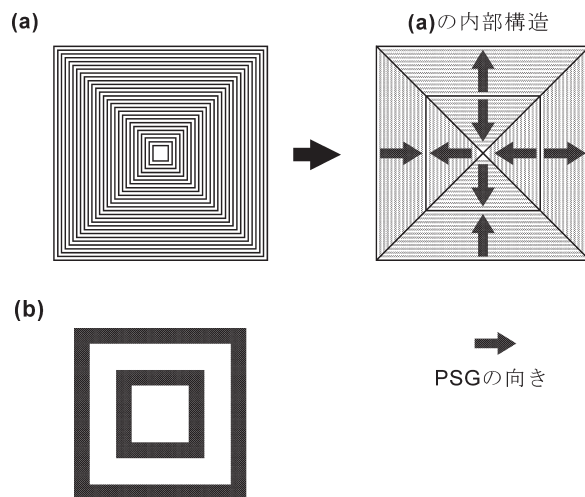


図8 偶関数収差測定マーク。

どもにも使われるため、十分な信頼性を確保することがまず求められる。

計測誤差を考慮したうえで、複数の測定点を自然に様々な方法として、例えば平滑化スプライン法が挙げられる²⁰⁾。補間した連続的な収差波面を $W(\rho, \theta)$ とし、同時にツェルニケ多項式が無限に続く線形和

$$W(\rho, \theta) = c_1 Z_1(\rho, \theta) + c_2 Z_2(\rho, \theta) + c_3 Z_3(\rho, \theta) + \dots \quad (2)$$

で表されるとすると、ツェルニケ多項式の正規直交性、すなわち

$$\int_0^1 \int_0^{2\pi} Z_i Z_j r dr d\theta = \begin{cases} 0 & \text{for } i \neq j \\ 1 & \text{for } i = j \end{cases} \quad (3)$$

より、各ツェルニケ収差係数 c_i は、 $W(\rho, \theta)$ と c_i に対するツェルニケ多項式 $Z_i(\rho, \theta)$ との積を単位円で面積積分することで得られる。

$$c_i = \int_0^1 \int_0^{2\pi} W(\rho, \theta) \cdot Z_i(\rho, \theta) r dr d\theta \quad (4)$$

このような手法をとることで、不自然な振る舞いがなく、何次の収差まで考慮するかによっても計算結果は変わらず、計測誤差の影響が少ない、ツェルニケ収差係数の算出が可能となるだろう。ただし、平滑化スプライン法においても、最適化に対してさまざまなアプローチがあり、どれも一長一短といったところではある。

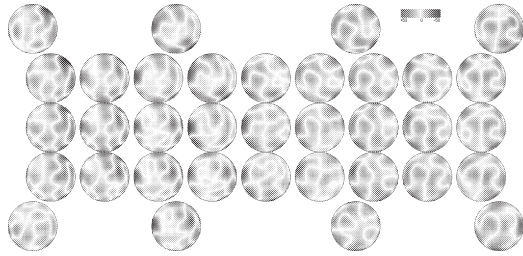


図9 三光束干渉法による露光領域全体での測定例。

ツェルニケ収差係数の算出には、瞳の最外周付近の振る舞いによって計算結果全体が大きく影響されてしまう問題がある。しかし、いかなる補間方法を用いようとも、データ間の内挿に比べて、最外データより外側への外挿が極端に難しいことは、株価の近未来予想が難しいことから明らかであろう。

三光束干渉を収差測定に活用しようという試みは、ほぼ同時期にボストン大学の M. Yeung 教授からも提案されている²¹⁾。彼の論文は、計測手法の具体性には欠けるものの、基本的なコンセプトが等しく、コマ収差測定の有効性をシミュレーションから検証している。

筆者らは、この基本コンセプトをもとに二重露光法を適用することによって、奇関数収差の計測手法を具体化し、PSG の開発により偶関数収差の計測手法にも拡大した。この収差測定方法は、他の多くの方法が相対値測定に限定されるのに対し、ツール（マスク）の固体差が発生しないために校正の必要がなく、絶対値測定にも適している。さらに、PSG は偶関数収差だけでなく、フォーカスの計測にも有効である。これら一連の計測技術を広く普及させることを目的に、2004 年 1 月より、「PSG テストマスク」としてフォーカス計測技術のビジネスを本格的に開始した。収差計測のためのマスクデザインも、この PSG テストマスクにオプションとして付加している。

今日、半導体製品の生産性に直接的な影響を与える主要因は、「収差」「フォーカス」そして「重ね合わせ」であるといわれている。これら 3 要因とも、同一の検査装置（O/L 検査装置）によって簡単に計測できることとなった。

文 献

- 1) J. Kirk: "Astigmatism and field curvature from pin-bars," Proc. SPIE, **1463** (1991) 282-291.
- 2) P. Yan *et al.*: "Effect of lens aberration on oblique illumination stepper system," Proc. SPIE, **1927** (1993) 167-180.
- 3) D. Flagello *et al.*: "The influence of photoresist on the optical performance of high NA steppers," Proc. SPIE, **2440** (1995) 340-348.
- 4) T. Brunner: "Impact of lens aberrations on optical lithography," IBM J. Res. Dev., **41** (1997) 57-67.
- 5) T. Saito *et al.*: "Effect of variable sigma aperture on lens distortion and its pattern size dependence," Proc. SPIE, **2725** (1996) 414-423.
- 6) T. Saito *et al.*: "Overlay error of fine patterns by lens aberration using modified illumination," Proc. SPIE, **3051** (1997) 686-696.
- 7) H. Nomura *et al.*: "Aberration monitoring toward wavefront matching with device patterns," Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) 92-96.
- 8) P. Dirksen, *et al.*: "Novel aberration monitor for optical lithography," Proc. SPIE, **3679** (1999) 77-86.
- 9) Y. Shiode *et al.*: "Method of Zernike coefficients extraction for optics aberration measurement," Proc. SPIE, **4691** (2002) 1453-1464.
- 10) T. Kanda *et al.*: "0.85NA ArF exposure system and performance," Proc. SPIE, **5040** (2003) 789-800.
- 11) 藤井 透ほか：特開 2004-14865 (2004)。
- 12) D. Flagello *et al.*: "Optimizing and enhancing optical systems to meet the low K1 challenge," Proc. SPIE, **5040** (2003) 139-150.
- 13) D. Malacara: *Optical Shop Testing*, 2nd ed. (John Wiley and Sons, New York, 1985) pp. 123-172, pp. 367-396.
- 14) A. H. Smith: U. S. Patent No. 5828455 (1998).
- 15) N. Farrar *et al.*: "In-situ measurement of lens aberrations," Proc. SPIE, **4000** (2000) 18-29.
- 16) D. Flagello *et al.*: "Towards a comprehensive control of full-field image quality in optical photolithography," Proc. SPIE, **3051** (1997) 672-685.
- 17) H. Nomura *et al.*: "Techniques for measuring aberrations in lenses used in photolithography with printed patterns," Appl. Opt., **38** (1999) 2800-2807.
- 18) H. Nomura *et al.*: "Aberration measurement from specific photolithographic images: A different approach," Appl. Opt., **39** (2000) 1136-1147.
- 19) H. Nomura: "Accurate measurement of spherical and astigmatic aberrations by a phase shift grating reticle," Jpn. J. Appl. Phys., **40** (2001) 6316-6322.
- 20) J. S. シモノフ：平滑化とノンパラメトリック回帰への招待 (竹澤邦夫・大森宏訳，農林統計協会，1999)。
- 21) M. Yeung: "Measurement of wave-front aberrations in high-resolution optical lithographic systems from printed photoresist patterns," IEEE Trans. Antennas Propag., **47** (1999) 1615-1622.

(2004 年 10 月 5 日受理)