

微細な波面収差の影響

—— 半導体露光装置用投影レンズにおけるローカルフレア ——

渋谷 真人

Effect of Fine Undulation of Wavefront Aberration

Masato SHIBUYA

Recently, the resolution of stepper projection lens becomes finer and then the phenomenon called local flare becomes remarkable. This is due to the fine undulation of wavefront aberration. In this report, we review some aspects of local flare and discuss the effect of fine undulation of wavefront aberration by classifying it with respect to the spatial frequency of undulation.

Key words: local flare, wavefront aberration, random aberration, non-conserved aberration, CD-variation

半導体露光装置*1の投影レンズには、非常に厳しい波面収差が要求されている。多くの教科書には、ストレーラ強度が0.8以上ならばよく補正されたレンズであると書かれているが¹⁾、ステッパーの投影レンズでは0.99程度が要求されている。このような非常に厳しい波面収差を達成するために、レンズの面形状誤差やガラスの屈折率の均一性に高い精度が要求されている。

どのような加工にも一般にいえることであるが、精度を上げると細かな周期の誤差が発生しやすくなる。着目しているパターンの周囲が明るいときには線幅が変化するという現象が、ステッパー光学系でみられている。これは、周囲の明るいところからの光が波面の微細なうねりのために周辺に回折され、フレア光になって生じたと考えることができ、ローカルフレアとよばれている²⁾。

この現象は、ArFエキシマレーザー（波長193 nm）リソグラフィーから目立つようになってきた。波長の2乗に反比例して全散乱光量が増えること、屈折率均一性が石英に比べて悪い蛍石を用いることによる。また、設計上の波面収差をよくするために非球面が多く使われ、製造誤差による残収差を画面全体にわたって補正するように任意形

状の非球面が複数使われることも³⁾、細かなうねりの発生原因となっている。将来リソグラフィーとして期待されているEUVL (extreme ultraviolet lithography: 波長13.5 nmの縮小投影リソグラフィー) では、反射光学系を使うこと（反射では面形状の2倍の波面収差が発生する）、波長が短いことから、微小うねりによる回折の問題はさらに重要である。ローカルフレアの効果を検査パターンにバイアスとして載せるということも考えられている⁴⁾。

ローカルフレアの現象は、単純に細かな波面のうねりによる光の回折あるいは散乱によるものと考えられるが、必ずしも物理的に明快に現象が説明されているわけではなく、SPIEのMicrolithography 2004においても、解析やモデリングに関する発表がなされている⁵⁻⁷⁾。完全に面形状や屈折率不均一性がわかれば、厳密に回折計算することで性能評価が行え、製造にフィードバックできるが、実際には完全な情報は得られない。うねりの周波数によってその影響の仕方は大きく変わると予想される。周波数による定性的な分類を得ることは、光学系の実際的な評価にとって有益である。研磨面の形状誤差、研磨粗さの影響は、ステッパーに限らず、大型望遠鏡などにおける古く

東京工芸大学工学部メディア画像学科 (〒243-0297 厚木市飯山 1583) E-mail: shibuya@photo.t-kougei.ac.jp

*1 約25 mm □を一括で露光するものをステッパー、約25×8 mmの露光エリアがあり、物体であるレチクルと像面であるウェハーを結像倍率を考慮して、同期して移動させることにより約25×30 mmの領域を露光するものをスキャナーとよぶが、基本的な光学系は同じであり、本稿では総称してステッパーとよぶ。また、一般に等倍結像のときにはマスク、縮小結像のときにはレチクルとよぶ。

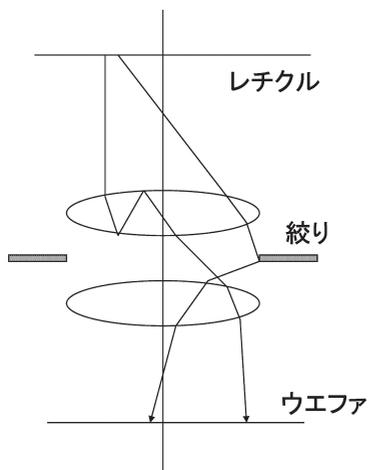


図1 通常のレンズ面反射や鏡筒散乱によるフレア。

からの問題であるにもかかわらず、十分にコンセンサスのとれた分類が確立しているわけではないと思われる。

本稿では、まず波面収差の微細なうねりによる影響のひとつであり、ステッパーにおける重要な課題であるローカルフレアの実際について紹介する。次に、微細な波面収差を、その空間周波数によってどのように影響や性質が変化するかという観点から、私見をまじえて議論し分類してみる。このような議論は、ローカルフレアだけでなくフレア全般の検討、さらにステッパー以外の光学系の評価・開発においても役立つと考える。

1. フレアの問題と計測

一般に光学系でフレアといえば、図1に示すように、レンズ面の反射によるゴースト像、鏡筒や絞り縁での光の散乱光によるものである。ステッパー光学系でもこのようなフレアは問題であり、極力小さくするように設計、製造がなされている。一方、ローカルフレアとは、図2に示すように、パターン周辺が明るい場合と、暗い場合とでパターン線幅が異なってしまう現象であり、レンズ表面の微細な形状うねりやガラスの屈折率の微細なゆらぎによるものと考えられている。もちろん、ゴースト像が本来のパターンの上に重なるようなときにはローカルフレアと同様な結果になるが、ステッパー光学系では視野も広く、そのような偶然が画面全体にわたって生じることはまずありえない。

図3には、フレアによって線幅が変化する理由を模式的に示した。ポジ型レジストが多く用いられており^{*2}、光の当たったところが現像によって溶解する。それゆえ、フレアが生じると残存レジスト線幅が細く変化する。なお、レ

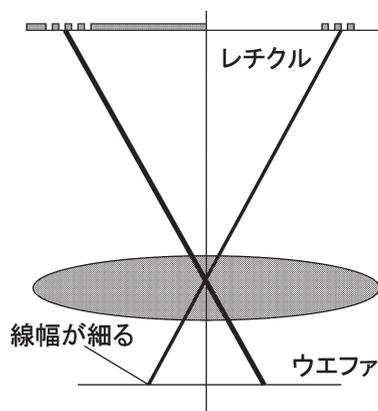


図2 ローカルフレアの現象。

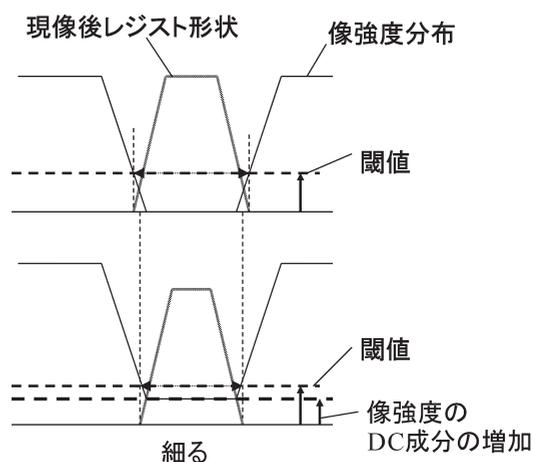


図3 ローカルフレアで線幅が細る理由。

ジストの現像後の残膜量は露光量に対して非線形であり、微細なパターンでは像強度分布は正弦波状であるが、レジストパターンはかなり急峻な矩形となっている。

図4には、ステッパー投影レンズ (NA=0.7) におけるパターン線幅 (critical dimension (CD) とよぶ) 変化の測定結果が示されている⁷⁾。KrF エキシマレーザー (波長 248 μm) に比べて、ArF のローカルフレアが大きいことがわかる。円形開口の中央部におかれた L/S (line and space) パターンの線幅変化が、円形開口の半径の関数として表されている。L/S は line と space のおおよその幅を示しており、パターンピッチはこの2倍となる。これからわかるように、おおよそ数十 μm 程度の領域にフレアの影響が現れている。最近では設計製造上の工夫によって、図5に示されるように、フレア量がかなり低減されている³⁾。

一方、フレア量を直接測ることも行われている。図6に

^{*2}さまざまなパターンがあるので、ネガ型も使われるが、微細パターンではポジ型レジストがおもに使われている。

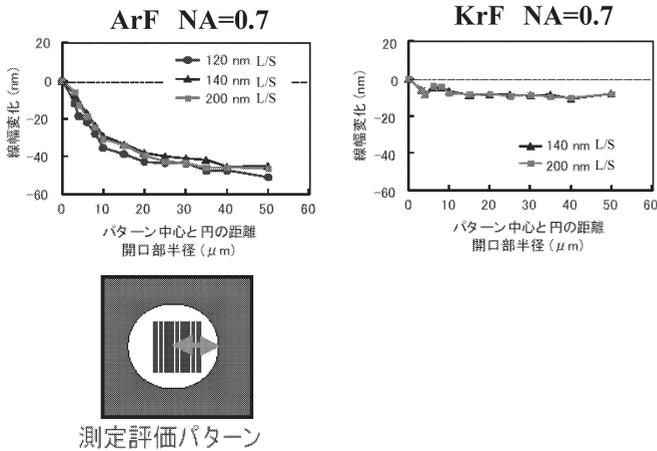


図4 実機におけるローカルフレアによる線幅 (CD) の測定結果。ローカルフレアが議論されはじめたころの測定結果。

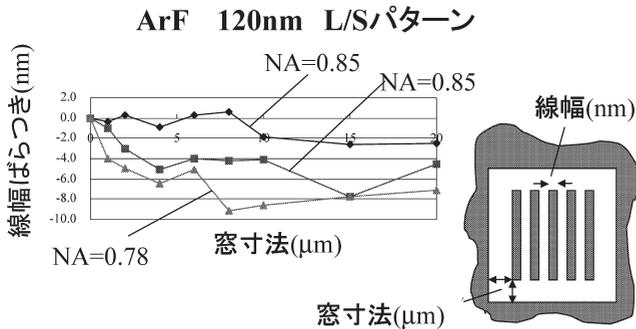


図5 実機におけるローカルフレアによる線幅 (CD) の最近の測定結果。NA=0.85で2つの曲線があるが、新しい世代(画面サイズなども仕様アップになっている)のほうがよくなっている。

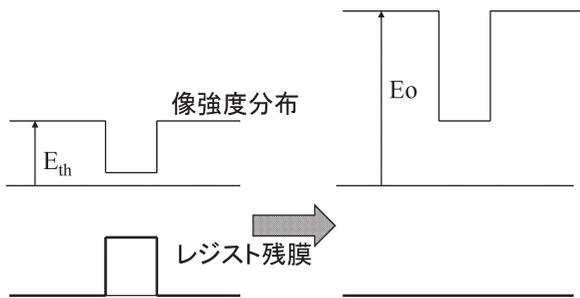


図6 フレア光量の直接の測定法。

は、Kirk-Pad法とよばれる測定の原理を示す。いわゆる、ベリンググレアの測定方法と同じである⁸⁾。適当な大きさ³⁾の遮光パターンがあり、まわりが透明な白い部分であるとする。白い部分の残膜がちょうどなくなる露光量 E_{th} (threshold) をまず求めておく。次に、露光量を増やしていき、遮光部の残膜量がなくなる露光量 E_0 を求める。このとき、フレアの量 F は

³⁾大雑把に点像の回折広がり10倍ということで、 $2\mu\text{m}$ が使われることが多いようである。

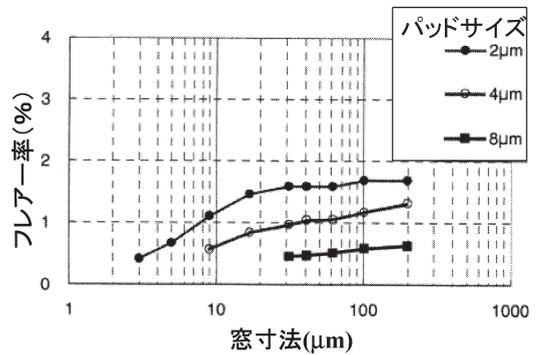


図7 実機におけるローカルフレア光量の直接測定。NA=0.85。

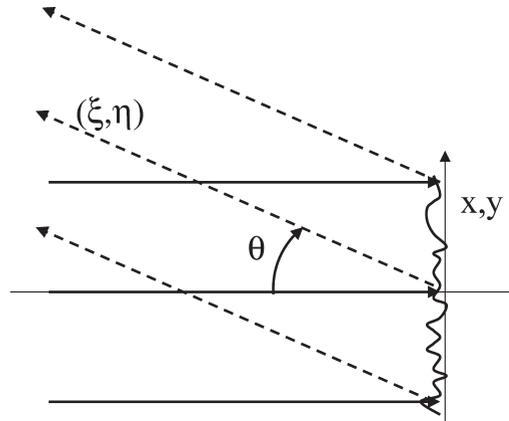


図8 表面うねりによる散乱。

$$F = \frac{E_{th}}{E_0} \quad (1)$$

となる。このような測定結果でも、フレアの領域が数十 μm 程度になることがわかっている。測定例を図7に示す⁹⁾。なお、このような測定では、透明部の大きさによって現像時に異なる影響を受けるので、注意が必要である。

屈折面あるいは反射面による散乱の方向と大きさは、通常の回折の式から導かれる。簡単のため、図8に示すように、単位の大きさの平面波が平面反射面に垂直に入射したとする。反射面の座標を x, y 、変位を $w(x, y)$ 、波長を λ とすると、空間周波数 v_x, v_y のうねりによる回折波の振幅 $U(v_x, v_y)$ は、反射では面形状の2倍の光路差となるので、

$$\begin{aligned} U(v_x, v_y) dv_x dv_y &= \iint dx dy \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda} 2w(x, y)\right] \\ &\quad \exp[i2\pi(v_x x + v_y y)] dv_x dv_y \\ &= \iint dx dy \left(1 + i\frac{4\pi}{\lambda} w(x, y)\right) \\ &\quad \exp[i2\pi(v_x x + v_y y)] dv_x dv_y \\ &= \left[\delta(v_x, v_y) + i\frac{4\pi}{\lambda} \tilde{w}(v_x, v_y)\right] dv_x dv_y \end{aligned} \quad (2)$$

と書き表せる。ここで、空間周波数 v_x, v_y と回折波の進行方向の方向余弦 ξ, η との関係は

$$v_x \lambda = \xi, \quad v_y \lambda = \eta \quad (3)$$

となる。反射面の法線と回折波の進行方向のなす角を θ , $dv_x dv_y$ に対応する立体角を $d\Omega$ とおくと、

$$\cos \theta d\Omega = d\xi d\eta = \lambda^2 dv_x dv_y \quad (4)$$

となるので、 P_0 の強さの光が入ったときの $d\Omega$ 内に回折される光量 dP は

$$\begin{aligned} dP &= P_0 \left| \frac{4\pi}{\lambda} \tilde{w}(v_x, v_y) \right|^2 dv_x dv_y \\ &= P_0 \frac{16\pi^2}{\lambda^4} \text{PSD}(v_x, v_y) \cos \theta d\Omega \quad (5) \end{aligned}$$

となる。PSD は power spectral density の略で PSD $(v_x, v_y) = |\tilde{w}(v_x, v_y)|^2$ である。ここで、分母に λ^4 があるが、全散乱光量は式 (5) の中央の式で v_x, v_y について全空間積分することになるので、 λ^2 に反比例することになる¹⁰⁾。散乱角が 90° を超えられないということを考慮すると、厳密には異なる。これは、直接光（ストレーラ強度に相当）が λ^2 に反比例して減少する量と対応している。 λ^4 はまた、次のように分けて考えることができる。 λ^2 に反比例して特定の周波数成分の回折光量は多くなり、 λ^2 に反比例して単位放射立体角 ($\cos \theta d\Omega$) 当たりの空間周波数密度が高くなる。

EUVL では、反射面 (2~6 面) だけの簡単な構成の光学系であり、式 (5) に基づく像面上での散乱光量の見積もりは、ローカルフレア量の実測値とよい対応を示している¹¹⁾。しかしながら、後述するように、散乱光間の干渉性も厳密には考慮しなければならず、必ずしも十分な評価とはいきれない。

なお、ガラスが結晶でないために屈折率の不均質によるレイリー散乱は全散乱光量が λ^4 に反比例するが、石英のレイリー散乱によるフレアは大きな問題にはなっていない。レイリー散乱が対象とするゆらぎのサイズは、波長の 10 分の 1 程度である。

2. 波面収差の細かさによる物理的な分類

このように、単純な回折あるいは散乱と考えると現象論的にローカルフレアは説明されるが、波面収差のどの空間周波数領域がローカルフレアとして影響するかは明確ではない。そこで、微細な波面収差の影響や性質が、空間周波数によってどのように変わるかという観点から分類してみる。

波面収差のピッチが細かくなると、まず幾何光学的な評

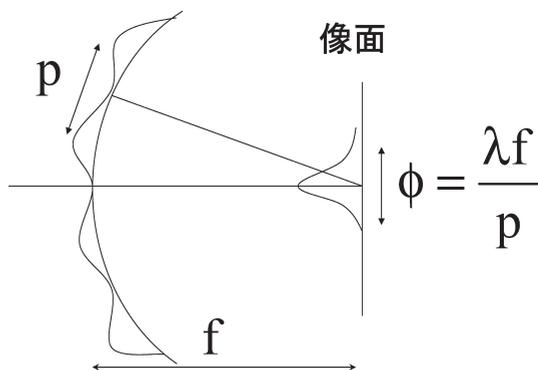


図9 波面のうねりの1周期を開口と考えたときの、像面上での広がり。

価の限界がある。次に、波面の形状を考慮しないといけな領域と、単に波面の大きさだけで十分評価できる領域の境界がある。さらに細かくなってくると、レンズ面で発生した波面収差が瞳面あるいは像面まで伝達しない領域となる。このような分類にしたがって、微細な波面収差の影響を述べてみる。

2.1 幾何光学的限界

ステッパ光学系のように収差がよい場合には波動光学的な評価をしなければならないので、この分類はなくてもよいが、微細な波面収差を深く理解する上で、幾何光学的な限界を知ることは重要と考える。

収差が悪くて設計上の評価が幾何光学で十分な場合でも、微細な波面収差の幾何光学による評価は適切でない場合がある。幾何光学では光線がエネルギーを運ぶと考えているが、微細なうねりになると、その微細な波面による回折のために光線概念は適用できない。図9に示すように、光学系の参照球面上にうねりをもった波面を考える。そのピッチを P とすると、そのひとつの周期を小さな開口と考えたときの回折広がりはおおよそ λ/P である。それが像面に到達するときの広がり ϕ は、参照球面の半径を簡単のため焦点距離 f と同じとして⁴⁾、

$$\phi \approx \frac{\lambda f}{P} \quad (6)$$

となる。この大きさが、幾何光学的な広がり (スポットダイアグラム) よりも十分小さくないと、幾何光学的な評価は適当ではない。あるいは、像面上での特定の空間周波数 ν の MTF (modulation transfer function) を評価するときならば、

$$\phi \ll \frac{1}{\nu} \quad (7)$$

⁴⁾ 一般には、射出瞳からの距離を考えるべきである。

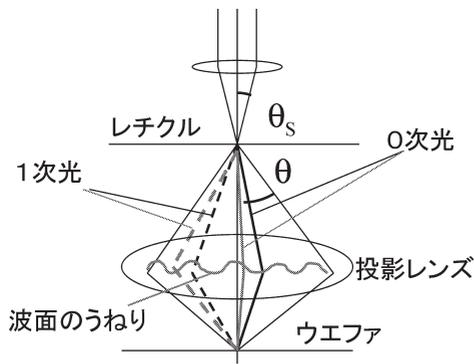


図10 ランダム収差の考え方。0次光と1次光間の波面収差の変動の様子。

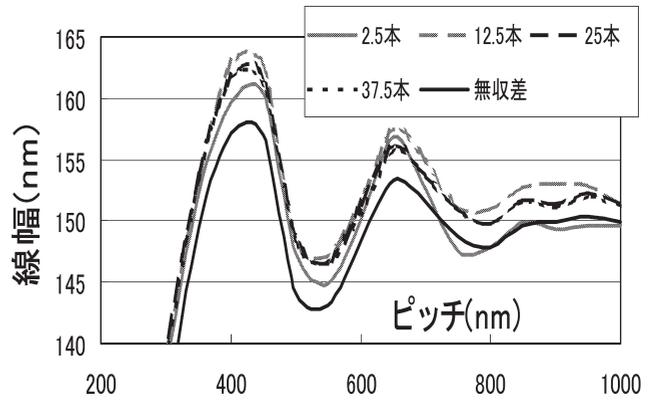


図12 図11と同条件である。無収差とうねり2.5~37.5本/瞳半径の場合について、ピッチ1000 nmまでプロットした。

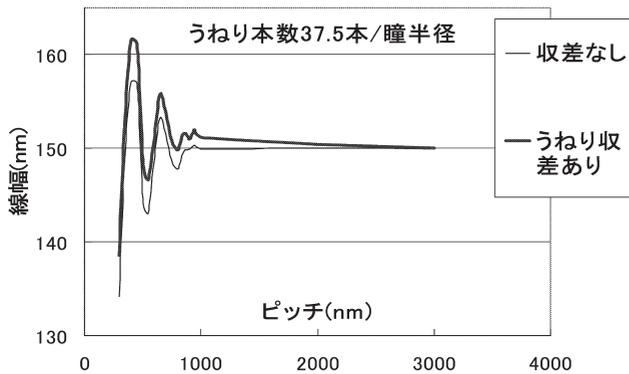


図11 コヒーレンスカーブ(干渉特性曲線)。NA=0.75, $\sigma=0.2$, $\lambda=193$ nm, 輪帯状の正弦波うねり収差で、うねり収差P-V=1/10, 無収差とうねり本数37.5本/瞳半径。150 nmラインパターンの線幅変化を空間像強度分布で求めた。隣り合うパターンのピッチが3000 nmのときの線幅が150 nmとなる強度を閾値としている。

でなければならない¹²⁾。

収差が回折広がり比べて大きければ幾何光学は十分によい近似になるという記述がみられるが、波面の細かな変動はないということが暗黙に仮定されている。

2.2 収差形状が依存する領域と収差のRMSが影響する領域

ステッパーの光学系では、図10に示すように、有限な大きさのインコヒーレント光源による部分コヒーレント照明が用いられている。照明の開口数 NA_s と投影レンズの物体側開口数 NA の比をコヒーレンスファクターとよび記号 σ で表す。

$$\sigma \equiv \frac{NA_s}{NA} = \frac{\sin \theta_s}{\sin \theta} \quad (8)$$

光源上の各点は、互いにインコヒーレントに物体を照明する。物体を透過した直接光(0次光)と回折光による干渉

像の足し合わせとして像は形成される。このとき、波面収差があると、各0次光に対する回折光の相対位相差が変化する。微細な波面収差があるときには、この位相差がランダムに分布すると予想される。大雑把に考えて、光源の開口数に相当する投影レンズ開口内にうねりが10周期くらいあれば、ランダムになるであろう。半径内のうねりの本数を M 本とすれば、

$$2M\sigma \geq 10 \quad (9)$$

となる。

回転対称な正弦波状のうねりを波面収差として与えて、150 nmのラインパターン線幅(遮光パターンであり、ポジ型レジストならば残し線パターンとなる)がどのようになるかを空間像シミュレーションした結果が、図11と図12である⁵⁾。うねりの大きさをP-Vで $\lambda/10$ とし、光学系は $\lambda=193$ nm (ArF), $NA=0.75$, $\sigma=0.2$ である⁵⁾。図12では、 M を2.5本から37.5本まで変えた。横軸は隣り合うラインパターンのピッチであり、このような表示はコヒーレンスカーブ(干渉特性曲線)とよばれている。無収差でも線幅変動があるのは回折の影響であり、エアリーディスクの回折パターンと同様のものである。なお、各うねり本数それぞれについて、パターン間隔3000 nmのときに設計線幅150 nmとなるような空間像の強度を基準とした。パターンは ∞ に続くとしている。

図11からわかるように、細かなうねり収差があると、ピッチの狭いほうで線幅が太くなっている。逆にパターンピッチの狭いところを基準にとれば、ピッチが大きくなったときにパターンが細くなっている。ピッチが大きくなるということは、光を透過する部分が大きくなることであり、ローカルフレアの現象と一致する。また、図12から

⁵⁾実際のステッパーでは σ はもっと大きな値であるが、式(9)からわかるように、小さな σ のほうが厳しい評価となるので0.2とした。

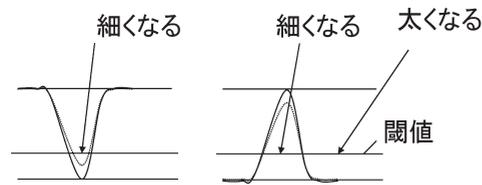


図13 収差によって線幅が細くなる定性的説明.

は、半径内のうねり本数 M が 25 と 37.5 では同じような線幅変化を示しており、式 (9) から予想される

$$M \geq \frac{10}{2\sigma} = 25 \quad (10)$$

と一致する。

完全に一方に周期的なうねりがあるときは、ランダム性は生じないかもしれないが、このシミュレーションでは輪帯状うねり収差とし、一方、パターンは一次元方向への繰り返しパターンであるため、異なる周期のうねりが並存している状況である。そのために、ランダム性が十分反映されていると思われる。また、白い部分が多いと収差によって線幅が狭くなることは、図13に示すような定性的な説明ができるであろう。左図のように、白いところに黒の遮光パターンがあるときには、収差によって遮光部の像がだれてくるので、遮光部の線幅が狭くなる。逆に右図のように、黒のところから白の透過部がある場合には、透過部の像がだれてくるので白の線幅が狭くなるが、黒の部分からみれば太ることになる。白黒の繰り返しパターンはこの両方の影響を同じように受けるので、大きな線幅変化は生じないが、黒の完全な孤立パターンでは細くなると定性的に考えることができる。いずれにしても、ランダムと考えられる領域では、うねりの大きさだけで線幅変化が予測されることとなる。

ランダムと考えられる領域の波面収差をランダム収差、ランダムと考えることはできず、評価や製造上の補正において収差形状まで考えなければならない領域を形状収差とよぶことができる。

式 (9) の意味は、次のように解釈することもできる。照明の開口数で決まるレチクル面上のコヒーレンス領域の大きさ r_c は、

$$r_c \cong 10 \left(0.61 \frac{\lambda}{NA_s} \right) = 10 \left(0.61 \frac{\lambda}{NA \cdot \sigma} \right) \quad (11)$$

とおおよそ考えられる。 NA_s は照明の開口数、 NA は投影レンズのレチクル側開口数である。一方、絞面上の微細な波面収差によって回折された光線の像面上での位置 x

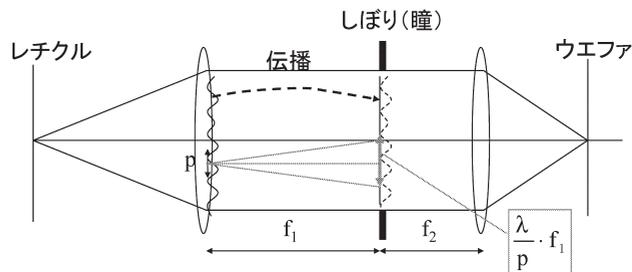


図14 非伝達収差の概念の説明.

をレチクル上で換算する。絞り径 D のなかに $2M$ 本格子がある回折格子と考え、レチクルと絞り間のレンズ焦点距離を f_1 とすると、一次回折光の位置として、

$$x \cong \frac{\lambda}{D/2M} f_1 = \frac{\lambda}{(f_1 \cdot 2NA)/2M} f_1 = \frac{M\lambda}{NA} \quad (12)$$

となる。式 (11)、(12) より、微細うねり収差で回折される方向がコヒーレンス領域の外になる条件を考えると、

$$\frac{M\sigma}{0.61} \geq 10 \quad (13)$$

と式 (10) と同じになる。コヒーレンス領域の外にいく光は、そこにあるパターンからの光と干渉しないので、強度の足し算、すなわちいわゆるフレアとして作用することになる。

ただし、コヒーレンス領域内の2点からの回折光はコヒーレンス領域外に広がっても干渉するので、より正確な予測をするためには、ランダム収差としてコヒーレンスを考慮したシミュレーションをする必要があると考える。なお、ランダム収差としてのシミュレーションには、収差がアイソプラナチックであること*6が暗黙に仮定されている。これについては後でふれるが、いま考えている領域では問題ない。

2.3 収差が保存されない領域

さらに周期が細くなったときに、どのような現象が生じるかを考えてみる。ランダム収差を検討する際に、収差を瞳面での波面収差にすべて帰結させて考えているが、この考え方は常には適用できない。簡単のため、投影光学系を図14に示すようなモデルで考える。ここで、レチクル側レンズ表面にピッチ p の微細なうねりがあったとすると、絞り面までこの波面形状が伝達されるには、このピッチの大きさの開口による回折による、絞り面上での広がりがもとのピッチより十分小さいことが必要である。式では

$$p \geq f_1 \frac{\lambda}{p} \quad (14)$$

と表される。これよりも細かな波面収差は、波面としての

*6 点像振幅分布より十分大きな物点移動に対して収差が不変であること。

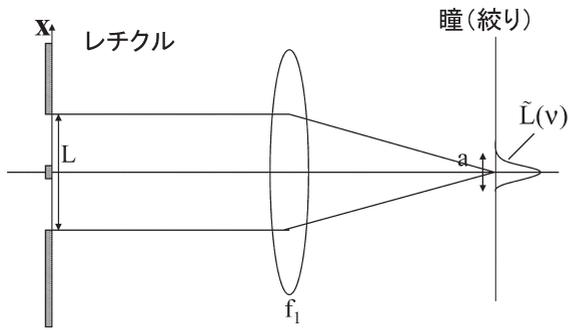


図15 レチクル開口部の大きさと、回折波の瞳面での集光の大きさ。

形状が保存されないで伝達することになる。このような領域の波面収差を非保存収差とよぶことにする。ここで、収差形状は乱れるが、波面形状がなまる（平坦化する）わけではないと考えられる。物体の1点から出た波面のレンズ透過直後のうねりをもった波面を考え、これを平面波展開してみると、各平面波は光学系を伝達するので、波面形状を周波数分解したときのパワースペクトルは絞り面まで保存されるからである¹³⁾。

式(14)が等号のときに、フレアの広がりかどのくらいになるかを見積もってみる。ステッパー投影レンズの縮小倍率は4分の1、大雑把に全長は1m、両側テレセントリックなので、レチクル側のレンズの焦点距離 $f_1=400$ mm、ウェハ側側のレンズの焦点距離 $f_2=100$ mmとおくと、

$$\frac{\lambda}{P}f_2 = \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda f_1}}f_2 = 70 \mu\text{m} \quad (15)$$

となり、実際に測定されているローカルフレアサイズと一致する。この一致は偶然かもしれないが、非保存収差になるとフレアの性質が異なることが、以下のように説明できる。

ローカルフレアの観測では、着目しているパターン $g(x)$ とまわりの開口 $L(x)$ の重ね合わさったパターン(透過率の積)の結像をみている。図15に示すように、光軸に平行に進んできた平面波でレチクルを照射した場合には、絞り面(瞳面)には $g(x)$ と $L(x)$ の積のフーリエ変換がつくられるが、それはフーリエ変換の性質から、おのおののフーリエ変換 $\tilde{g}(v)$ 、 $\tilde{L}(v)$ のコンボリューション \otimes である。

$$g(x) \cdot L(x) \quad (\text{フーリエ変換}) \Rightarrow \tilde{g}(v) \otimes \tilde{L}(v) \quad (16)$$

ここで、 $\tilde{L}(v)$ の瞳面での広がり a はレチクル上の開口の大きさ L によってきまり、大雑把に

$$a \approx \frac{\lambda}{L/f_1} \quad (17)$$

となる。 L が大きくなり、 a が瞳面上でのうねりのピッチ P よりも小さくなると、それ以上 L を大きくしてもコンボリューションの結果は変化しなくなり、結像状態は変わらない。収差が保存される、うねり本数37.5本/瞳半径の場合に、実際に開口幅を変化させてシミュレーションしてみると、式(17)の a が $p/2$ に等しくなる L のところでCD変化が生じなくなることがわかる¹⁴⁾。ここでさらに、レンズ透過後に、うねりのピッチ p によって瞳面上に

$$a_p = \frac{\lambda}{p}f_1 \quad (18)$$

の大きさに広がる効果を考える。収差が非保存の場合には式(14)より a_p の値は p よりも大きくなるので、 L をいくら大きくしても結像状態は十分には安定せず、フレアの減少が明白に観測されないことになる。すなわち、ローカルフレアとは性質が異なることになる。

ここで、アイソプラナチック条件を考えてみる。アイソプラナチックということは開口幅 L 内のどこの場所についても同じ波面収差ということで、図14、15を参照して、うねりのピッチ p が開口幅 L よりも大きくなくてはならない。式(15)のフレアの広がりをレチクル面上で換算したものを L_F として、この条件は

$$p \geq L_F = \frac{\lambda}{p}f_2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_2}\right) = \frac{\lambda}{p}f_1 \quad (19)$$

と表すことができ、式(14)と同じである。非保存収差となるとアイソプラナチックでなくなり、また、アイソプラナチックを前提とした通常のシミュレーションが適用できないことになる。

非保存収差の考え方を絞り面近傍のレンズ面について適用すると、波面うねりがかなり細かくても、マスクの開口幅 L を大きくすれば、収差状況が安定することになる。保存収差領域が広く、ローカルフレアとしての広がりが大きいことになる。なお、式(14)が等号のときのうねり本数は $M = (NA \cdot f_1)/P = NA \sqrt{f_1/\lambda} \sim \sqrt{f_1/\lambda} \sim 10^3$ となる。

3. ま と め

半導体のパターン線幅が狭くなってきており、ローカルフレアという現象をどのように解消するかが、光リソグラフィにかかわるひとつの課題である。ここでは、ローカルフレアを紹介するとともに、微細な波面収差がうねりの空間周波数によってどのように結像性能への影響が変化するかを考察し、それに基づいて分類してみた。幾何光学的な取り扱いが可能な収差、形状収差、ランダム収差、非保

存取差である。ランダム収差の概念は、コヒーレンス領域の考え方とおおよそ同じ結果を得ることもあり、一般に受け入れられていると考える。非保存収差の考え方自身は有益であると考えますが、それと一様フレアとの関係の議論はまだ十分に練られていない。さらに、うねり発生面の場所による影響の変化など、実際のレンズ評価への適用に関しては検討が必要である。

また、形状収差領域は保存収差領域となることから、フイゾー型干渉計による投影レンズの波面収差測定において、投影レンズ絞りが往きの光線と帰りの光線とに対して共役でないことによる影響は大きな問題でないと考えられる。

文 献

- 1) M. Born and E. Wolf: *Principles of Optics*, 7th ed. (Cambridge University Press, Cambridge, 1999) p. 528.
- 2) 石山敏朗：“ステッパー技術の最先端”，光学技術コンタクト，**40**, No. 9 (2002) 5-13.
- 3) T. Matsuyama, T. Ishiyama and Y. Ohmura: “Nikon projection lens update,” Proc. SPIE, **5377** (2004) 730-741.
- 4) C. Krautschik, M. Chandhok, G. Zhang, S. Lee, M. Goldstein, E. Panning, B. Rice, R. Bristol and V. Singh: “Implementing flare compensation for EUV masks through localized mask CD resizing,” Proc. SPIE, **5037** (2003) 58-68.
- 5) M. Shibuya, H. Ezaki, T. Fukui, N. Watanabe and A. Nishikata: “Random aberration and local flare,” Proc. SPIE, **5377** (2004) 1910-1920.
- 6) S. P. Renwick, S. D. Slonaker and T. Ogata: “Size-dependent flare and its effect on imaging,” Proc. SPIE, **5040** (2004) 24-32.
- 7) 浅井 了：“90 nm デバイスに向けた開発の現状と課題”，キヤノンテクニカルコンファレンス (2002).
- 8) J. P. Kirk: “Scattered light in photolithographic lenses,” Proc. SPIE, **2197** (1994) 566-572.
- 9) T. Kanda, Y. Shiode and K. Shinoda: “0.85 NA ArF exposure system and performance,” Proc. SPIE, **5040** (2003) 789-800.
- 10) 鶴田匡夫：第5・光の鉛筆，4章および5章（新技術コミュニケーションズ，2000）.
- 11) E. M. Gullikson: “Scattering from normal incidence EUV optics,” Proc. SPIE, **3331** (1998) 72-80..
- 12) 渋谷真人，青柳公一，小野広起，中橋末三：“レンズ面の微小うねりの光学性能への影響”，光学，**32** (2003) 253-259.
- 13) J. W. Goodman: *Introduction Fourier Optics* (McGraw-Hill Book Company, New York, 1968) p. 54.
- 14) 渡辺暢章，渋谷真人：“ローカルフレアの瞳面での考察”，第65回応用物理学会学術講演会 (2004) 2p-R-16, p. 619.

(2004年10月20日受理)