

半導体露光装置用投影光学系の瞳結像

—— 理論と設計 ——

公家 大裕^{***}・渋谷 真人^{****}・中楯 末三^{*}

^{*}東京工芸大学工学研究科光工学専攻 〒243-0297 厚木市飯山 1583

^{**}現所属：(株)エコー光学機器事業部 〒243-0211 厚木市三田 3000

Pupil Imaging of Projection Lens for Semiconductor Exposure Equipment: Theory and Design

Tomohiro KUGE^{***}, Masato SHIBUYA^{****} and Suezou NAKADATE^{*}

^{*}Faculty of Engineering, Tokyo Polytechnic University, 1583 Iiyama, Atsugi 243-0297

^{**}Optical Instrument and Department, Echo Corporation, 3000 Sanda, Atsugi 243-0211

As the semiconductor industry's historic productivity curve places the higher and higher demands on exposure tools to fabricate fine device patterns, variable stop in projection lens is essential for getting high resolution to achieve such critical dimension features. Now it is about time to reconsider the required pupil imaging conditions that has been developed based on the theoretical viewpoint. We found that some required conditions proposed in the previous publications don't have to be so stringent. We re-investigated some aspects of the conditions and derived a revised set of necessary conditions for the projection lens. We also report our redesigned projection lens system based upon our derived conditions. We concluded that the telecentricity and distortion of pupil imaging are not necessarily required.

Key words: stepper, double telecentric lens, pupil imaging, Fourier transform lens, Petzval sum

1. はじめに

昨今の強い半導体集積回路の微細化への要求に対し、半導体製造露光装置用投影光学系（以下ステッパー投影レンズとよぶ）の NA（開口数）可変性が今後ますます重要になると考えられる。パターン形状に合わせて最適な NA とするからであり、瞳結像（絞り結像）を正しく理解することが必要である。すでに瞳結像の重要性が指摘され、ステッパー投影レンズの成立条件について収差論に基づく先駆的な研究がなされている^{1,2)}。しかしながら、実際のステッパーレンズなどから予想されるように、そこで導かれた条件は十分条件ではあるが、いくつかの点では厳しい条件となっており、必ずしも必要条件ではないと思われる。

そこで瞳結像について理論の見直しを行い、理想的な投影レンズ成立の必要十分条件を理論的に導き、さらにこの理論に基づいて理想的な投影レンズを設計し、理論の正当性を確認した³⁾。また、像野内の NA の均一性およびテレセントリック性を実用上問題ない程度許容し、実際のステ

ッパー投影レンズに準ずる大きさ、像野、NA をもつ投影レンズの設計解の探索も行った。

2. 理 論

2.1 理想的なステッパー投影レンズの基本構成と成立条件
物体結像、瞳結像ともに無収差な両側テレセントリック光学系の成立条件について、順を追って議論する。

(1) まず両側テレセントリックが要求されるので、全体を前、後群に分け、前群レンズの後側焦点位置と後群レンズの前側焦点位置が一致し、そこに絞りを置く必要がある。Fig. 1 にその関係を示す。近軸結像倍率 β_0 は

$$|\beta_0| = \frac{f_2}{f_1} \quad (1)$$

となる。

(2) ステッパーはレチクル上のパターンをウェハー上に縮小転写する光学系であるから、レチクルからウェハーまでは無収差でなければならない。したがって、物体結像は

^{***}E-mail: shibuya@photo.t-kougei.ac.jp

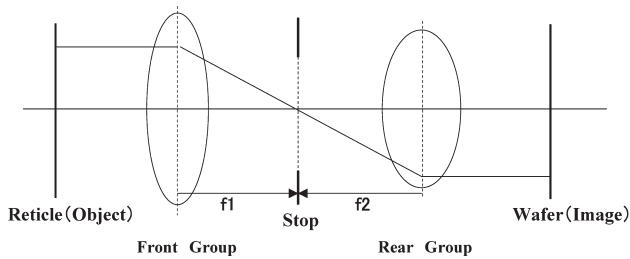


Fig. 1 The condition to be telecentric in the paraxial region.

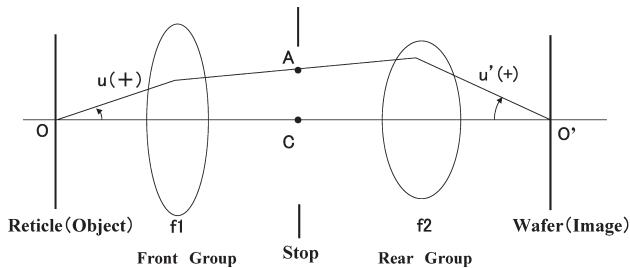


Fig. 2 Spherical aberration does not exist and the sine condition is satisfied for object imaging.

球面収差がなく，Fig. 2 を参照して，光軸上物点からのすべての光線について，

$$\overline{OCO'} = \overline{OAO'} \quad (2)$$

となる．さらに正弦条件を満足しなければならず，

$$|\beta_0| = \frac{\sin u}{\sin u'} = \frac{NA}{NA'} \quad (3)$$

が成り立つ．図中 u は軸上物点からの光線の物界での傾角， u' は像界での傾角である．

ただし，このときに前群レンズによってできるレチクル像が無限遠にある必要はない．したがって，物体は前群レンズの前側焦点位置に必ずしもある必要はなく，このとき像は後群レンズの後側焦点位置にはない．したがって，絞り面でテレセントリックである必要はない．従来理論では，物体が前群レンズの前側焦点位置にあることを条件としていた．

(3) 像高にかかわらず解像力が一定であるためには，物体結像の NA は像野内で一様でなければならない．そのためには，物体側テレセントリックであるので，物体面（レチクル面）から最大 NA に相当する傾きで前群レンズに入射した平行光束は，絞り面上でスチグマチックに結像する必要がある．もしもこれが満たされなければ，Fig. 3 において点線のような光線が存在し，NA が一定でなくなるからである．さらに絞り可変であるためには，瞳結像が絞り全面にわたって，像面湾曲を含めてスチグマチックであることが要求される．これは後群レンズについても同様である．

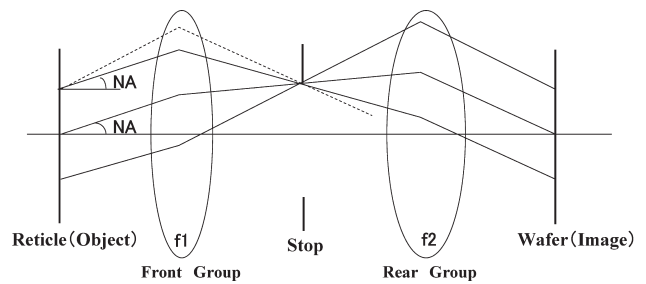


Fig. 3 The condition that the numerical aperture is constant with respect to the image height.

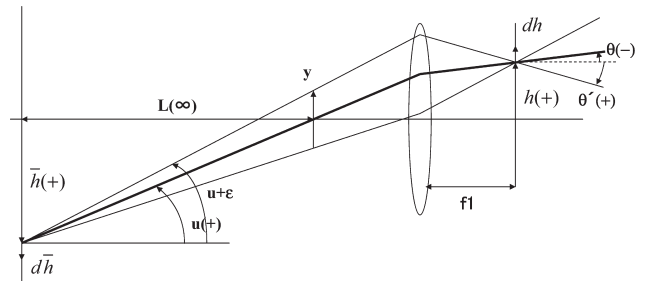


Fig. 4 The aplanatic condition for the off-axis object point when the stop is in front of lens.

(4) 光学系全系での光線追跡を考えてみると，絞り面において，レチクル側からの光線（光束）とウェハー側からの光線はつながる必要がある．(2) 項の議論より，物体結像の球面収差がないことから，瞳結像における主光線（レチクル光軸上物点からウェハー光軸上像点に向かう光線）は絞り面上で問題なくつながっている．よって，絞り面上での開口数が両側からの光束で一致していれば，すべての光線がつながることになる．

スチグマチックのときは，軸外でアプラナチック条件が成り立つことになる．そこで，軸外のアプラナチック条件をまず議論する．Fig. 4 には，前群のレンズに対して無限遠方の物面（レチクル-ウェハー間結像における入射瞳に相当）が絞り面上に結像し，そのときにレチクルが絞りとなっている様子を示している．ここで，絞り面での開口数 \overline{NA} は主光線の方向余弦とマージナル光線（瞳の周辺を通過する端光線）の方向余弦の差なので，

$$NA = \sin \theta' - \sin \theta \quad (4)$$

である．微小物体の結像倍率の比が方向余弦の差の比に一致することがアプラナチック条件であり，物体高さを \bar{h} ，絞り面での高さを h とすると，

$$\{\sin(u + \varepsilon) - \sin u\} \cdot d\bar{h} = \overline{NA} \cdot dh \quad (5)$$

と表される．ここで ε は，物体からレチクルをみたときの見かけの視角であり，レチクルの高さを y ，物体からレ

チクルまでの距離は無限であるが、数式の扱い上仮に L とすると、

$$\varepsilon = \frac{y \cos u}{L / \cos u} \quad (6)$$

である。また、

$$\bar{h} = L \tan u \quad (7)$$

である。この式を微分して、

$$d\bar{h} = L \frac{du}{\cos^2 u} \quad (8)$$

となる。式 (5), (6), (8) および ε が無限に小さいので、 $\sin(u + \varepsilon) - \sin u = \varepsilon \cdot \cos u$ より

$$y \cdot d(\sin u) = \overline{NA} \cdot dh \quad (9)$$

と軸外のアプラナチック条件が表される。

前群および後群の瞳結像の射影関係（絞り面での射影関係）が適当な関数 g_1, g_2 によって、次のように表されると考えてみる。

$$h = g_1 (f_1 \sin u) = g_2 (f_2 \sin u') \quad (10)$$

物体結像が正弦条件を満足するため、式 (1), (3) より $f_1 \sin u = f_2 \sin u'$ となり、

$$g_1 = g_2 \quad (11)$$

が要求される。Fig. 5 に示すように、物体高を y 、像高を y' として、式 (9) の軸外アプラナチック条件を改めて書き下すと、前群については

$$y \cdot d(\sin u) = \overline{NA} \cdot d\{g_1 (f_1 \sin u)\} \quad (12)$$

後群については

$$y' \cdot d(\sin u') = \overline{NA}' \cdot d\{g_2 (f_2 \sin u')\} \quad (13)$$

となる。 $g_1 = g_2$ なので、

$$\begin{aligned} \overline{NA} &= \frac{y \cdot d(\sin u)}{d\{g_1 (f_1 \sin u)\}} = \frac{y \cdot d(\sin u)}{g_1' (f_1 \sin u) f_1 \cdot d(\sin u)} \\ &= \frac{y}{g_1' (f_1 \sin u) f_1} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \overline{NA}' &= \frac{y' \cdot d(\sin u')}{d\{g_2 (f_2 \sin u')\}} = \frac{y' \cdot d(\sin u')}{g_2' (f_2 \sin u') f_2 \cdot d(\sin u')} \\ &= \frac{y'}{g_2' (f_2 \sin u') f_2} = \frac{1}{g_1' (f_1 \sin u) f_1} \cdot \frac{y'}{f_1} = \overline{NA} \end{aligned} \quad (15)$$

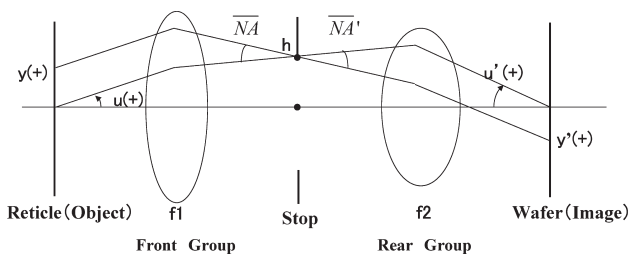


Fig. 5 The numerical aperture of the front group at the stop coincides with that of the rear group.

となり、絞り面上で両群の NA が一致し、絞り結像の主光線だけでなくすべての光線が一致することになる。ただし、式 (15) において、物体結像の歪曲収差がないことを仮定している。すなわち、 $g_1 = g_2$ であれば、絞り面での射影関係が $h = f_1 \sin u$ でなくてもよいことになる。従来理論では、この射影関係 $h = f_1 \sin u$ を要求していた。 $h = f_1 \sin u$ を満足していないと、絞り径と物体結像の NA が比例しなくなるが、それを考慮して絞り径を可動にすることはまったく問題ない。

(5) 両側テレセントリックであり、また (3) 項の議論より瞳結像がスチグマチックでなければならないので、前後群ともに球面収差がなく、正弦条件を満足する必要がある。 Fig. 6 のような関係を満足している。 y を物体高、 y' を像高、 α, α' を物体結像の主光線が絞り面上でなす傾角とすると、前群の瞳結像の正弦条件は

$$y = f_1 \sin \alpha \quad (16)$$

と、後群の瞳結像の正弦条件は

$$y' = f_2 \sin \alpha' \quad (17)$$

と表される。また、(4) 項の議論より、絞り面での前後群の開口数が一致しなければならないので、

$$\alpha' = \alpha \quad (18)$$

となる。式 (16), (17), (18) から、

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{f_2}{f_1} = \beta_0 \quad (19)$$

が導かれ、物体結像に歪曲がないことがわかる。

2.2 収差論による考察

三次収差では、前後群の収差係数の和が全体の収差係数になる。また、物体の収差係数と瞳の収差係数の間には決まった関係が成り立つ。これらのよく知られている関係と瞳結像が $f \sin u$ でないこと、物体（レチクル）が前群の前側焦点位置にないので絞り面でテレセントリックでないこと、が矛盾しないかどうかを検討した。 Fig. 7 には、代表して球面収差の記号を書いてある。下付きの添え字 1 は前群を、2 は後群を意味し、肩の添え字 s は瞳結像を意味

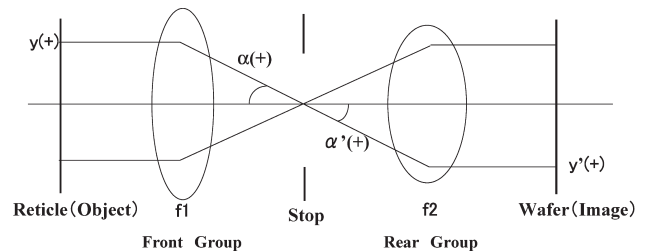


Fig. 6 Spherical aberration does not exist and the sine condition is satisfied both for pupil imaging of front group and that of rear group.

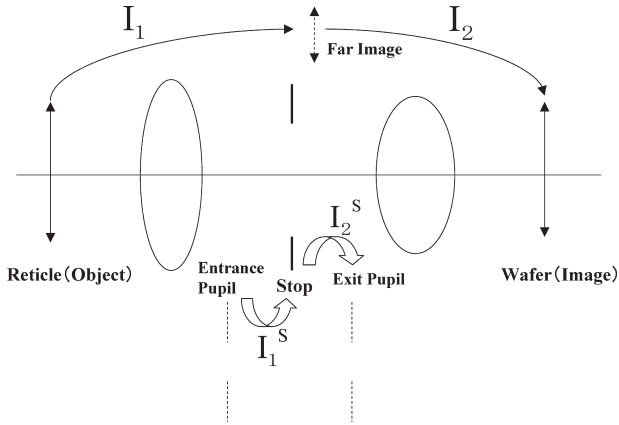


Fig. 7 The 3rd order object and pupil aberrations both for rear and front groups.

する。レチクルから遠方像への結像収差 I_1 ，遠方像からウェハーまでの結像収差 I_2 ，無限遠の入射瞳から絞りに結像収差 I_1^s ，絞りに無限遠の射出瞳への結像収差 I_2^s である。レチクルからウェハーまでの物体結像が無収差，入射瞳から射出瞳までがスタグマチックであることから，

$$I=0, II=0, III=0, IV=0, V=0 \quad (20)$$

$$I^s=0, II^s=0, III^s=0, IV^s=0, V^s \neq 0 \quad (21)$$

となる。ここで，

I：球面収差，II：コマ収差，III：非点収差，

IV：サジタル像面湾曲，V：歪曲

である。 V^s は，光軸物点からの光線の傾き角 θ としたときの物空間と像空間での $\sin u$ の比と $\tan u$ の比の相違に相当する量を生ずる。瞳と物体結像の収差係数の間には，決まった関係がある⁴⁾。

$$V^s - II = \left(\frac{\alpha'}{N'} \right)^2 - \left(\frac{\alpha}{N} \right)^2$$

$$III^s - III = IV^s - IV = \frac{\alpha' \overline{\alpha'}}{N'^2} - \frac{\alpha \overline{\alpha}}{N^2} \quad (22)$$

$$II^s - V = \left(\frac{\overline{\alpha'}}{N'} \right)^2 - \left(\frac{\overline{\alpha}}{N} \right)^2$$

ここで， α は近軸物体光線の換算傾角， $\overline{\alpha}$ は近軸主光線の換算傾角， N は物界の屈折率を表し，肩にダッシュのついていないものは物界に，ついていないものは像界に属する量である。ステッパ投影レンズは両側テレセントリックであるので， $\overline{\alpha}$ ， $\overline{\alpha'}$ ともに 0 である。また，縮小光学系であるから， $|\alpha| \neq |\alpha'|$ である。これと式 (22) から，

$$V^s - II \neq 0$$

$$III^s - III = 0, IV^s - IV = 0 \quad (23)$$

$$II^s - V = 0$$

となる。三次収差係数は前後群の足し算になること，および式 (20)，(21) より，

$$0 = I = I_1 + I_2$$

$$0 = II = II_1 + II_2$$

$$0 = III = III_1 + III_2 \quad (24)$$

$$0 = IV = IV_1 + IV_2$$

$$0 = V = V_1 + V_2$$

$$0 = I^s = I_1^s + I_2^s$$

$$0 = II^s = II_1^s + II_2^s$$

$$0 = III^s = III_1^s + III_2^s \quad (25)$$

$$0 = IV^s = IV_1^s + IV_2^s$$

$$0 \neq V^s = V_1^s + V_2^s$$

となる。前後群の瞳結像がスタグマチックであることから，前後群の瞳の収差係数は，

$$I_1^s = I_2^s = II_1^s = II_2^s = III_1^s = III_2^s = IV_1^s$$

$$= IV_2^s = 0, V_1^s \text{ と } V_2^s \text{ は特別な制限なし} \quad (26)$$

となる。物体結像の前後群の収差係数は

$$I_1, I_2, II_1, II_2, III_1, III_2, IV_1, IV_2, V_1, V_2$$

…特に制限はなし (27)

となる。前後群おのおのについて瞳と物体の収差係数間の関係は，前群については $\overline{\alpha} = 0, \alpha \neq 0, \overline{\alpha'} \neq 0, \alpha' \neq 0$ ，後群については $\overline{\alpha} \neq 0, \alpha \neq 0, \overline{\alpha'} \neq 0, \alpha' \neq 0$ より，式 (22) から

$$V_1^s - II_1 \neq 0, III_1^s - III_1 = IV_1^s - IV_1 \neq 0, II_1^s - V_1 \neq 0$$

$$V_2^s - II_2 \neq 0, III_2^s - III_2 = IV_2^s - IV_2 \neq 0, II_2^s - V_2 \neq 0 \quad (28)$$

となる。

式 (23)～(28) は矛盾しない。式 (26)，(28) より， $III_1, III_2, IV_1, IV_2, V_1, V_2$ は 0 でなくなるが式 (27) と矛盾しないし，式 (24) が成り立つような値であればよい。このように，三次収差の関係式は，2章1節の結論と矛盾を示さないことがわかる。

3. 設 計

3.1 理想的な投影レンズの設計

光学設計ソフト code-V™ を使用し，上記条件を満たす，瞳，物体結像がともに無収差な投影光学系の解を探った (設計例 1)。波長 $\lambda = 248.3 \text{ nm}$ の KrF エキシマレーザー用，倍率 $\beta = -1/4$ 倍， $NA = 0.5$ ，物体 (レチクル) 高 30 mm の投影光学系のレンズデータを Table 1 に，その光路図を Fig. 8 に示す。Fig. 9 はこの光学系の物体結像の縦収差とディストーションを表し，Fig. 10 にこの光学系の物体結像のスポットダイヤグラムを示す。Table 1 のレンズデータにおいて，曲率半径と面間隔の単位はミリメートルである。40 面から像面までの面間隔は近軸像距離を表

Table 1 Lens data of example-1.

Surface No	Surface curvature	Distance between surfaces	Index
Object (reticle)	infinite	54.2627833	1
1	186.614482	28.7905815	1.508376
2	-293.349204	5.7297323	1
3	-226.449030	20.4597920	1.508376
4	267.508809	103.7453937	1
5	286.831696	17.6955293	1.508376
6	-462.450940	132.3559853	1
7	125.061911	16.4819857	1.508376
8	96.272538	20.3828684	1
9	-103.412998	21.4993702	1.508376
10	147.746617	8.9022781	1
11	182.777428	27.1707617	1.508376
12	-196.820948	34.6894234	1
13	1805.733137	15.0000000	1.508376
14	352.445328	32.6034506	1
15	-141.482329	15.9823141	1.508376
16	-610.880304	24.1653959	1
17	-160.778920	31.9494648	1.508376
18	-165.095776	6.0729948	1
19	-1913.857695	23.7255397	1.508376
20	-323.260805	8.1271151	1
21	1098.787963	37.0554808	1.508376
22	-282.652428	0.1000000	1
23	384.365734	26.4501090	1.508376
24 (aspherical)	-2858.935868	10.0000000	1
Stop	infinite	51.7198163	1
25	-1192.313769	15.0000000	1.508376
26	254.533254	55.8318605	1
27	-141.432701	15.0000000	1.508376
28	1551.896622	4.0381970	1
29	20017.960279	51.5508959	1.508376
30	-196.299265	0.1000000	1
31	882.373802	43.2758686	1.508376
32	-393.814828	0.1000000	1
33	344.795353	42.4906636	1.508376
34	-1352.180356	0.1000000	1
35	195.810407	34.9549300	1.508376
36	447.088389	1.4372042	1
37	141.803312	65.0000000	1.508376
38	83.229258	49.6939652	1
39	296.337537	65.0000000	1.508376
40	868.413129	31.3080394	1
Paraxial image (wafer)	infinite	0.0002125	1
Best focus	infinite		1

し、像面の間隔の欄は近軸像面から最良像面までのデフォーカス量を示している。屈折率は波長 248.3 nm における石英の屈折率を表す。第 24 面は非球面であり、非球面の形状は、

$$z(y) = \frac{y^2/r}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)y^2/r^2}} + Ay^4 + By^6 + Cy^8 \quad (29)$$

と表される。ここで、 y ：光軸からの高さ、 z ：面頂点からレンズ表面までの光軸方向の距離、 r ：頂点曲率半径、 κ ：コーニック定数、 A, B, C ：非球面係数である。 $\kappa =$

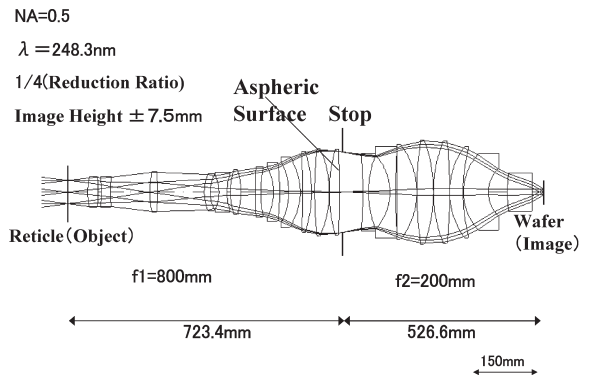


Fig. 8 Designed example-1.

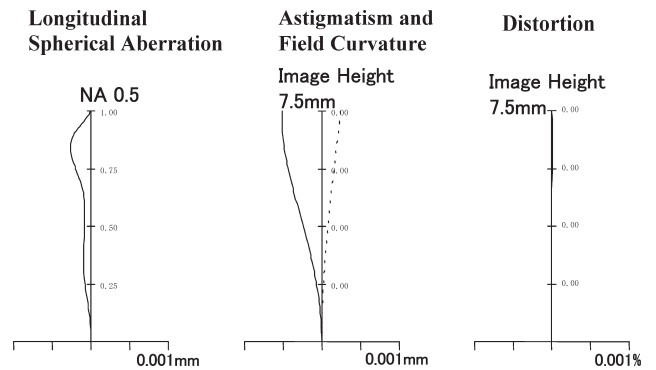


Fig. 9 Lateral aberrations and distortion for the example-1.

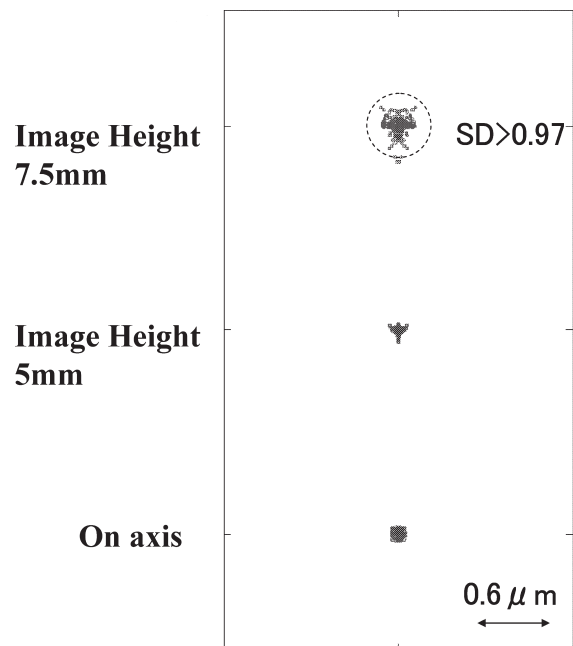


Fig.10 Spot-diaphragm of the object imaging for the example-1.

0, 非球面係数は $A=0.650187E-08$, $B=-0.855195E-13$, $C=-0.706073E-18$ である。Fig. 8 においてレチクルから絞りまでが前群レンズであり、その長さは 723.4 mm で焦

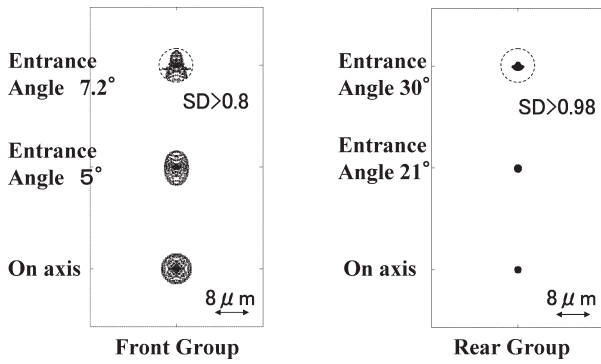


Fig. 11 Spot-diaphragms of the pupil imaging at the stop for rear group and front group of example-1.

点距離 f_1 は 800 mm である。絞りからウェハーまでのレンズ群が後群レンズであり、その長さは 526.6 mm で焦点距離 f_2 は 200 mm である。Fig. 9 の縦収差図をみると、絞りの直前に配置した非球面レンズの効果で高次の球面収差はよく補正されている。ディストーションは絶対値で 2 nm 以下であり問題ない。Fig. 10 のスポットダイヤグラムは最良像位置で見たもので、デフォーカス量は Table 1 の像面の面間隔に記載した値である。最大像高におけるスポットダイヤグラムの上に重ねて描いた円は波長 248.3 nm, $NA=0.5$ におけるエアリーディスクを表す。収差のない理想結像の点像強度分布のピーク値と収差によって低下したピーク値との比、ストレールディフィニション (SD) は以下の式で表される。

$$SD = 1 - 4\pi^2 W_{RMS}^2 \quad (30)$$

W_{RMS} は波長換算した波面収差の RMS で、像野 15 mm (± 7.5 mm) の全域で 25 mλ 以下の像性能が設計上で達成できた。最大像高の 8 割くらいまでは、SD は 0.99 以上 (15 mλ 以下) ある。

Fig. 11 に、レチクル面から前群レンズに平行光束を入射させたとき、ウェハー面から後群レンズに平行光束を入射させたときの絞り面でのスポットダイヤグラムを示す。物体、および像の NA に相当する角度で追跡したものと、その約 7 割、光軸上の 3 点を追跡した。デフォーカスはしていない。物体高 (レチクル高) は 30 mm であるから通す光束の直径は 60 mm, 焦点距離は 800 mm なので、 F ナンバーは 13.3 である。このとき波長 248.3 nm のエアリーディスクの直径は $8 \mu\text{m}$ で、最大入射角のスポットの上にエアリーディスクを重ねて描いてある。SD は 0.8 でやや低いが、SD の評価量の規格として知られるマレシャルの基準が 0.8 なので、前群レンズの瞳結像は大雑把だが回折限界の性能をもっているといつてよい。像高

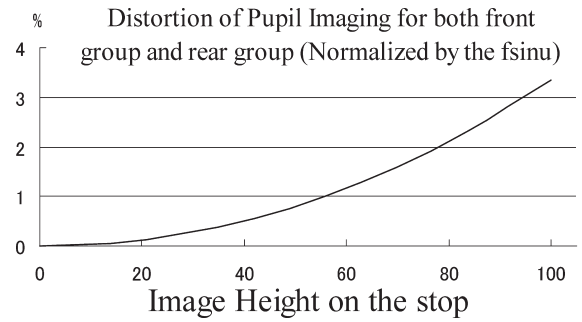


Fig. 12 Distortion of the pupil imaging at the stop for rear group and front group of example-1. It is normalized by the $f \sin u$.

(ウェハー高) は 7.5 mm, 後群レンズの焦点距離は 200 mm なので、 F ナンバーは前群と同じく 13.3 となる。後群 (ウェハー側) レンズをまず設計し、それにあわせて前群レンズを設計したため、Fig. 11 右側のスポットダイヤグラムに示すように収差は非常に小さい。

Fig. 12 に、絞り面での像高を $f \sin u$ を基準にとった瞳結像のディストーションを示す。両方のディストーションはこのグラフ上で完全に一致している。式 (10) で示したとおり、前後群ともに $f \sin u$ の射影関係から、等量のディストーションを発生している。

物体側テレセントリックで追跡したときの物体結像のウェハー面上での主光線の傾きは最大でも 0.05 mrad 以下であり、瞳の球面収差を小さくしたため、多くの特許データのステッパー投影レンズと比較して桁違いにテレセントリック性はよい。

3.2 設計結果の検討

3.2.1 三次収差による確認

理想的なステッパー投影レンズのもつべき三次収差係数の条件を 2 章 2 節で述べた。3 章 1 節に示した設計例 1 の三次収差係数が、この条件と矛盾するかしらないかを数値的に確認する。この設計例では、前群レンズは遠方にレチクルの -0.778 倍の縮小像をつくる。もしレチクルが前群レンズの前側焦点位置にあるなら、前群レンズによるレチクル像は無限遠に無限大の大きさでつくられる。よって、設計例では絞り面でテレセントリックでないことがわかる。その実像 (後群からみると虚像) を後群が 0.321 倍に縮小して、全体として -0.25 倍のレチクル像をウェハー面上につくる。Table 2 には、三次収差係数について、全体の物体結像、前群の物体結像、後群の物体結像、前群の物体結像と後群の物体結像の和、前群の瞳結像、後群の瞳結像を載せてある。2 列目は、前群のレチクルから遠方像までの物体結像の収差係数を表す。3 列目は、前群によってつく

Table 2 3rd order aberration coefficients for the example-1.

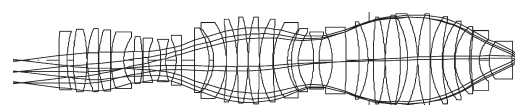
	3rd order aberration coefficient					
	1	2	3	4 (=2+3)	5	6
$NA=0.5, \beta=-1/4,$ $\lambda=248.3 \text{ nm}$ Image heigh (wafer) $\pm 7.5 \text{ mm}$	Object imaging ($\beta=-0.25$ $NA=0.125$)	Object imaging of front group (reticle \rightarrow far image $\beta=-0.77827$ $NA=0.125$)	Object imaging of rear group (far image \rightarrow wafer $\beta=0.321225$ $NA=0.16$)		Object imaging of front group (infinite entrance pupil \rightarrow stop $f_1=800 \text{ mm}$)	Object imaging of front group (infinite exit pupil \rightarrow stop $f_2=200 \text{ mm}$)
I (spherical aberration)	-0.00095	-1.548171	-0.506085	0.00095	-0.019664	-0.000734
II (coma aberration)	0.00060	-1.319292	0.428822	0.00060	0.000274	-0.000903
2III+IV (meridional image curvature)	0.00018	0.211821	0.068578	-0.00018	0.000304	-0.00116
IV (Sagittal image curvature)	-0.000555	0.071485	0.022524	0.000555	-0.006602	-0.006261
V (distortion)	-0.000007	0.016457	-0.005293	-0.000007	2.438893	-14.40068
Airy disac radius	0.000303	0.00118	0.000303	0.000303	0.00403	0.00403

られた遠方像を物体としてウェハーを像面としたときの、後群の物体結像の収差係数を表す。前群の物体結像と後群の物体結像の和の計算は、以下の点に注意して行った。1つは、code-VTMの収差係数はレンズの最大開口数、最大画角の横収差で表示することである。もう1つは、収差論では瞳座標として光線の正弦ではなく正接を用いているが、1, 2, 3列目の係数ではおのおの物体側の開口数を指定して収差を計算しているの、3列目を2列目に加えるときに正弦と正接の換算を行う必要があることである。収差の種類によって瞳座標の次数が異なるので、この換算は収差によって異なる。また、前群の倍率は負であるが、後群の倍率が正であることにも考慮を払った。このような注意のもと、2列目の収差係数を0.321倍したものと3列目の収差係数を適切に補正したものを足し、4列目の全体結像の収差係数を求めた。1列目はレチクルからウェハーまでの全体結像の収差係数を計算したものである。1列目と4列目を比較する。完全に一致しており、物体結像の収差係数について式(24)が成立している。

前後群の各瞳結像の収差係数をみると、前群レンズの瞳の球面収差係数がやや大きく、Fig. 11のスポットダイアグラムを反映している。それゆえ、完全にはテレセントリックでない。コマ収差、非点収差、像面湾曲はなく、絞り面でステグマチックに結像していることがわかる。前後群の各瞳結像はそれぞれかなり大きな歪曲収差係数をもつが、これは射影の基準を $f \tan u$ ととってあるためである。 $f \sin u$ 基準のディストーションはFig. 12に示したとおりである。

3.2.2 既存のタイプとの比較

特許データのなかから、KrF用のステッパー投影レンズ($NA=0.65$, 物体高78 mm, $-1/5$ 倍, 最大NAの6割まで絞り可変なもの)⁵⁾を選び設計例1と比較した。そ



A lens written in a patent

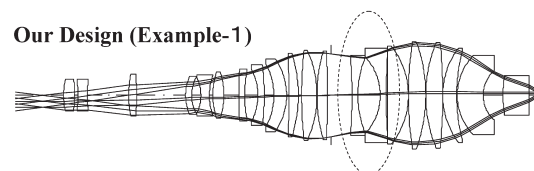


Fig 13 Comparison between the lens type of a patent and that of our designed example-1.

れぞれの光路図を同じスケールで、Fig. 13上段に特許データを、下段に筆者らの設計例(設計例1)を示す。Fig. 13の特許のレンズは一見してわかるように、物体面から第1面までの作動距離以外の空気間隔はほとんどレンズで密に埋められた集積型で、この例では前群の焦点距離 f_1 は1139.7 mm, 後群の焦点距離 f_2 は141.8 mmとなっている。前後群の焦点距離の比が結像倍率に等しくなく、前後群のそれぞれ後側焦点位置と前側焦点位置に絞りを置いていないため、近軸的にテレセントリックな配置になっていない。そのため、絞り面でステグマチックになっておらず、NAを小さく絞ると、画面中心と画面周辺でのNAが一致しなくなる。前後群それぞれの瞳の球面収差は大きい、全系として都合が合うようにしている。光学設計において、各群の焦点距離を固定せずにパラメータとすれば、収差補正の自由度は増す。近軸量を外して積極的に物体結像収差を低減できるとすれば、有効な手法といえる。当然ながら、このような場合、全系で有限焦点距離の光学系になり、この例では $f=785.4 \text{ mm}$ である。

この光学系の前群はマイナスのペッツバル和をもち、

その値は約-0.006である。通常の結像光学系ではペッツバル和がプラスになるが、この光学系の例では大きく補正過剰となっている。実際に光線追跡してこの光学系の前群の瞳結像をみると、後群レンズに向かって強烈に凹に湾曲した像面が観察される。この例では、後群のペッツバル和が前群の値と反対符号でほぼ同じ値となっており、前後群でペッツバル和をコンペーンして全体結像の像面湾曲を補正している。

これに対して、筆者らの設計例は $f_1=800$ mm, $f_2=200$ mm である。2章で述べたように、理想的なステッパー投影レンズでは近軸量をくずしてはならないから f_1 と f_2 の比は結像倍率に等しく、前群の後側焦点と後群の前側焦点は絞り面上にある。さらに、すべての像高で NA を一定にするために像面湾曲を含めて瞳結像がスチグマチックであるという要請があり、前後群ともペッツバル和は 0 に近い値にしてある。Fig. 13 の点線で囲ってあるところが筆者らの設計の特徴的なところで、絞り直後の凹レンズとそれに続く凹面が後群レンズのペッツバル補正に大きく寄与し、さらにレチクルからウェハまでの物体結像の球面収差の補正にも有利に働いている。

3.3 実用的な投影レンズの設計

後群レンズの瞳結像を考えた場合、すぐ予測のつくことだが、理想的なステッパー投影レンズを高 NA で設計しようとするれば、後群においてウェハ面からの大きな入射角の平行光束を絞り面上でスチグマチックに結像するという要請が設計の難度を急激に上げる。特にガラス材料の大きさの制約、機械的な観点からの制約を考えると、絞りはあまり大きくはできない。ウェハ面上での像野を一定に保ち、瞳結像の絞り面での像高を一定とすれば、NA が大きいときには後群の焦点距離 f_2 を非常に小さくしなければならず、瞳結像の F ナンバーもこれに伴って小さくなる。すなわち、大画角かつ大口径比のスチグマチックな後群光学系が必要である。このことが設計を進めるうえで障害となったため、像野に対する NA の変化とテレセントリック性の悪化を実用上問題ない程度許容し、瞳結像への要請を緩くすることで新たな設計を進めた。

投影光学系の解像力が 150 nm の場合について考えてみる。ステッパーはウェハ面を動かして（スキャナーではレチクル面も走査して露光する）レチクルのパターンを次々縮小転写する装置であるから、位置合わせが重要になる。位置合わせ精度は、解像線幅の 10 分の 1 必要とするとして 15 nm となる。デフォーカスによるテレセントリックのずれから発生するディストーションをその 10 分の 1 の 1.5 nm 許されるとし、AF (auto focus) の精度を仮に 50

nm とすると、露光装置に必要なテレセントリック性はウェハ面上で 1.5 nm/50 nm で 30 mrad となる。投影光学系に割り振られる必要なテレセントリック性は、さらにその 10 分の 1 程度と考えられる。テレセントリック性を画角の関数として考えたときに、画角に対して低次の項（三次の項）が大半で、高次の項は 1 割程度である。低次の項は照明系の瞳収差で補正できるので、ウェハ面上で 30 mrad が投影光学系に要求されるテレセントリック性となる。

トランジスターの基本性能のばらつきを少なくするためには、線幅精度は概略線幅の 10% といわれている。線幅を変化させる多くの要因があり、各要素には 1% 程度の線幅精度が許されるであろう。投影レンズ開口数のばらつき誤差もそのひとつであり、照明系の開口数が一定のとき、投影レンズの開口数 NA が変化したときの線幅の変化を考えてみる。レチクル面上での照明の開口数を投影レンズの開口数で割った値を σ 値とよぶが、照明の開口数が一定であるということは、 $\sigma \times NA$ が一定ということである。それゆえ、 $\sigma \times NA$ が一定の条件で NA と CD (critical dimension の略で線幅そのものを意味する) の関係を PROLITH™ (光リソグラフィの分野で使われている光学結像性能評価の市販プログラム) で計算し、プロットしたものが Fig. 14 である。150 nm の L/S パターンの空間像を考え、波長 248.3 nm, $NA=0.75$, $\sigma=0.8$ での 150 nm 線幅を与える強度を基準とし、NA が変化したときの線幅を求めたものである。このグラフから、線幅精度 1% を保つには NA の変化が 1% 程度でなければならないことがわかる。そこで、Fig. 15 に示すように、絞りの直径 y として瞳収差 dy が、

$$dy \leq 0.01 y \quad (31)$$

となるように設計を進めた。

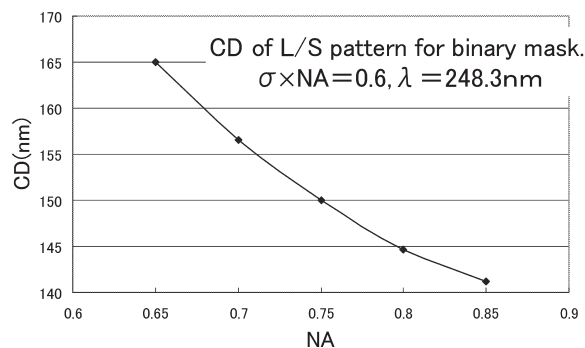


Fig. 14 The relation between NA and CD (critical dimension) for the L/S pattern when $\sigma \times NA$ is constant.

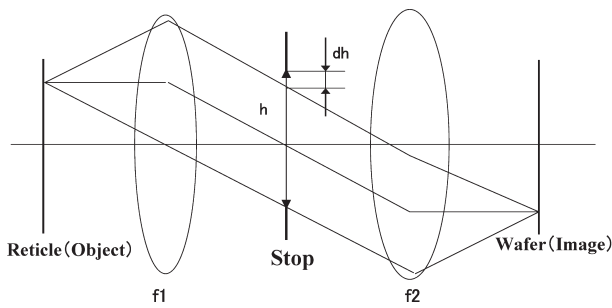


Fig. 15 dh is the pupil lateral aberration at the stop.

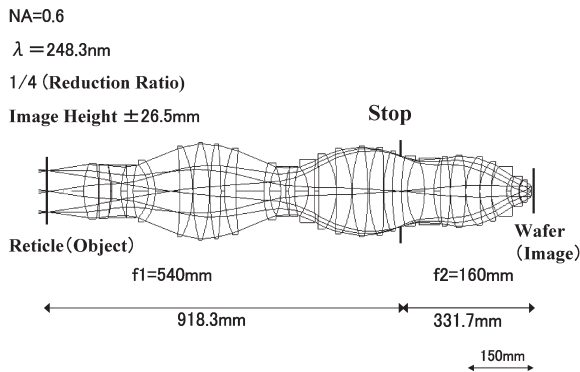


Fig. 16 Designed example-2.

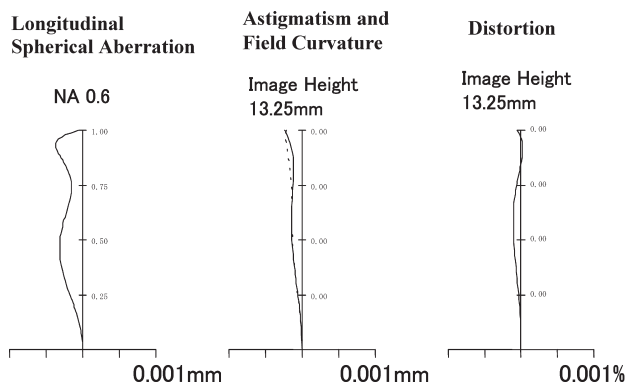


Fig. 17 Lateral aberrations and distortion for the example-2.

上記のテレセントリック性と瞳収差を満足し、設計例1と同じく波長 $\lambda = 248.3 \text{ nm}$ の KrF エキシマレーザー用、縮小倍率 $\beta = -1/4$ 倍とし、NA を 0.6 まで上げ、スキャナー用に準ずる像野 26.5 mm (物体高 53 mm) をもつ光学系の解を探った。この光学系 (設計例 2) のレンズデータを Table 3 に、その光路図を Fig. 16 に示す。Fig. 17 はこの光学系の物体結像の縦収差とディストーションを表し、Fig. 18 の左側にこの光学系の物体結像のスポットダイヤグラムを示す。レンズデータ、収差図、スポットダイヤグラムの見方は設計例 1 と同様である。絞りの後ろ (ウェハー側) に強いパワーの凹レンズを 2 枚配置し、この凹

Table 3 Lens data of example-2.

Surface No	Surface Curvature	Distance between surfaces	Index
Object (reticle)	infinite	89.121780	1
1	193.217628	38.352332	1.508376
2	-436.026065	0.929881	1
3	2188.354400	29.319234	1.508376
4	-385.010958	3.846904	1
5	-229.332894	23.804811	1.508376
6	173.068777	15.651820	1
7	-805.317148	15.629667	1.508376
8	248.747348	39.716184	1
9	-101.678228	17.240618	1.508376
10	-132.313700	64.069690	1
11	-1177.936323	33.468672	1.508376
12	-259.555392	0.100000	1
13	496.935578	43.260124	1.508376
14	-410.579683	1.307576	1
15	604.609902	28.008795	1.508376
16	-1077.529858	9.496272	1
17	298.758430	29.829945	1.508376
18	1065.603918	71.918655	1
19	233.723638	15.516512	1.508376
20	123.946476	28.070320	1
21	-169.530837	15.000000	1.508376
22	185.362909	8.255215	1
23	1046.232659	15.000000	1.508376
24	231.123299	34.931531	1
25	-98.833369	16.473788	1.508376
26	1963.304694	11.442677	1
27	-1516.318240	44.805421	1.508376
28	-175.119154	0.625647	1
29	-1788.039294	39.275231	1.508376
30	-240.645058	1.397826	1
31	355.093960	39.886955	1.508376
32	-755.026488	3.209440	1
33	305.436963	38.113322	1.508376
34	-2233.026704	0.126737	1
35	297.422040	22.465726	1.508376
36	571.618085	21.219060	1
Stop	infinite	2.383738	1
38	450.660718	15.115247	1.508376
39	165.173021	44.458503	1
40	-245.622921	24.293134	1.508376
41	207.192979	15.470071	1
42	610.983111	26.624438	1.508376
43	-478.766209	0.491967	1
44	289.535990	39.582325	1.508376
45	-478.977371	0.300395	1
46	144.689822	36.148155	1.508376
47	443.996050	0.201463	1
48	114.425311	29.247788	1.508376
49	202.290465	0.209260	1
50	111.519854	39.480072	1.508376
51	53.706371	12.648748	1
52	104.572622	19.303138	1.508376
53	51.360163	1.137275	1
54	41.578652	20.151811	1.508376
55	264.753487	11.864359	1
Paraxial image (wafer)	infinite	-0.000270	1
Best focus	infinite		1

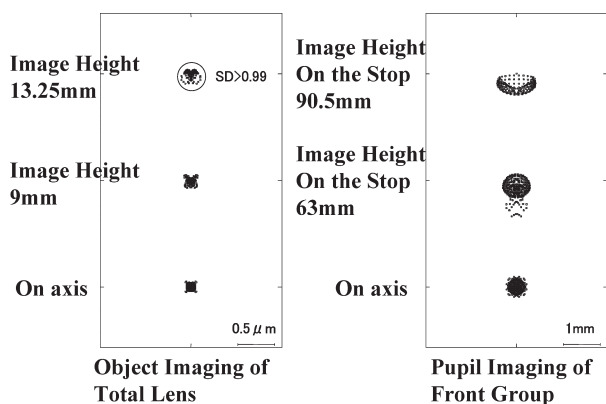


Fig. 18 Spot-diaphragm of the object imaging of example-2 and that of the pupil imaging at the stop for rear group.

レンズの間およびその後続く凸レンズとの間にできる2つの空気レンズを活用して積極的に物体結像の球面収差を補正し、なおかつこの2枚の凹レンズでペッツパール補正も行う既存のタイプにはない独創的な設計となっている。Fig. 16に記載した長さはそれぞれ、レチクルから絞りまでと絞りからウェハーまでの距離を表す。設計例1(Fig. 8)では絞り面と前群と後群の焦点位置が一致していたが、この例では前群と後群の焦点位置は絞りから約7mmほど後群側にずれており、この2つの焦点位置も一致していない。設計例2の物体結像における軸上物体のマージナル光線は絞り面上で高さ90.5mmである。レチクル面から平行光束を入射させたときの絞り面でのスポットダイヤグラムをFig. 18の右側に示す。物体結像のNAが1%以内であるための瞳収差の条件式(31)から横収差が1mm以下である必要があるが、満足されていることがわかる。像高7割においても式(31)が成立している。物体結像のウェハー面での主光線の傾きは、最大で20 mrad弱である。

4. ま と め

理想的なステッパー投影レンズ（両側テレセントリックで無収差な光学系）の成立条件について理論の見直しを行って新理論を導き、収差論での検討も行った。この新理論をもとに、瞳結像、物体結像ともに無収差なステッパー投影レンズの実設計を行い、理論の正当性を確認することができた。また、瞳収差を実用上問題ない程度許容し、実在するステッパー投影レンズの仕様と遜色ないNAと像野をもつ投影光学系を設計することができた。この設計例では瞳の収差を小さく保ちながら、物体結像収差もステッパー投影レンズとして不足のないものである。3章2節2項に示した例以外にも、手もとのステッパー投影レンズの特許データを4例ほど追跡したが、どれも近軸的にテレセントリックな構成になっておらず、瞳収差は絞りの直径の1%を超えている。筆者らの設計（設計例2）では27枚のレンズを使用しているが、特許でみられる投影レンズと比較して特別多いわけではなく、非球面も使用していない。また、ウェハー側レンズ群（絞りの後のレンズ群）に強いパワーの凹レンズが2枚あるという、従来とは異なる特徴的なレンズ構成となっている。NAは最近のレンズに比べて小さいというものの、瞳、物体結像収差ともに無収差なステッパー投影レンズの実設計を行ったこと、瞳の結像に制約を与えても十分収差設計は可能であることを示せた意義は大きく、ステッパー投影レンズの今後の開発に少なからず貢献できると考える。

文 献

- 1) 宮前 博：第15回光学シンポジウム講演予稿集（1990）pp. 19-20
- 2) 宮前 博：第22回光学シンポジウム講演予稿集（1997）pp. 39-40
- 3) 公家大裕，渋谷真人，中楯末三：Optics Japan 2003 予稿集，8pG4（2003）pp. 206-207.
- 4) 松居吉哉：レンズ設計法（共立出版，1972）pp. 77-95.
- 5) 重松幸二：特開平 11-97344（1999）.