

解 説

等倍2枚鏡系の解析*

鈴木 章義

キヤノン(株)半導体機器開発部 〒211 川崎市中原区今井上町 53

(1985年6月13日受理)

Analysis of Two-Mirror Unit Magnification System

Akiyoshi SUZUKI

Semiconductor Equipment Development Division, Canon Inc.,
53, Imaikami-chou, Nakahara-ku, Kawasaki 211

1. 緒 言

IC産業発展の歴史は、微細加工技術発展の歴史でもある。とくに光学的手法を用いたパターン転写の技術は、微細加工の中核をなすものである。ICの創成期より1970年代の後半まで、微細パターンの転写はコントラクト/プロキシミティ法と呼ばれる方法が中心であった¹⁾。しかしながらこの方法は、マスクとウェハーの接触に伴うパターン欠陥の創成という問題を不可避的にもっている。

これに対して登場してきたのが、非接触型の露光方法であるミラー走査法^{1,2)}や、ステッパーと呼ばれるレンズ縮小法である。とくにミラー走査法の投影光学系³⁾はその構成のユニークさで非常に特徴的であり、収差論的に面白い性質をもっている。しかし、従来この系はたんに定性的にしか議論をされず⁴⁾、一体どのような性質をもっているのか、またどのような限界をもっているかが明らかとされていなかった。

本解説ではミラー系の特殊性を活用して、等倍の2枚鏡系が定量的にほぼ完全に解析できることを示す^{5,6)}。また、その解析のなかから二つの特殊解^{3,7)}を導き出し、両者を比較してみるとこととする。導出の過程でたどるのは光学設計の最適化の手法そのものであり、また、どのような限界の中で最適化が行なわれるかを知ることもで

きる。その意味で本解析は、光学系の設計過程を定量的に示すことのできる非常に珍しい例であるといえよう。

2. 等倍2枚鏡系の定性的説明

図1に2枚鏡系の光路図を示す。この光学系は軸外の点Aから点Bに至る結像が最適化され、その最適化された像高近傍しか用いないというところが通常の光学系とまったく異なっている。したがって収差は点Aを通って光軸を中心とする円環上の領域がよい。実際にはAの位置にマスク、Bの位置にウェハーが置かれ、収差のよい円環領域に照明光が当てられる。等倍結像なので図2に示すようにマスクとウェハーは同期して等速で走査すればよく、その結果、画面全体が転写される。いわば一種の複写機的な露光方法と考えられる。

2枚鏡系の構成で特徴的のは、この光学系が軸外のdiffraction limitedな光学系であるにもかかわらず、たった二つのパワー要素しかもっていないことである。ステッパー用のレンズがたとえば1/10×で14枚もの枚数を必要とする⁸⁾ことに比べ、これは非常に驚くべきことといえる。以下、具体的にこの系の性質を考察してみる。

図1に戻ると、光学系のNAは $\sin\varphi$ で表わされている。凹面鏡(半径R)と凸面鏡(半径r)の距離Lは、補正像高までの距離OAをhとしたとき、

$$L = R - R/(2 \cos \theta) \quad (1)$$

ただし

$$\sin \theta = h/R \quad (2)$$

* 本稿は昭和59年度光学論文賞受賞論文の内容を中心としてまとめたものである。

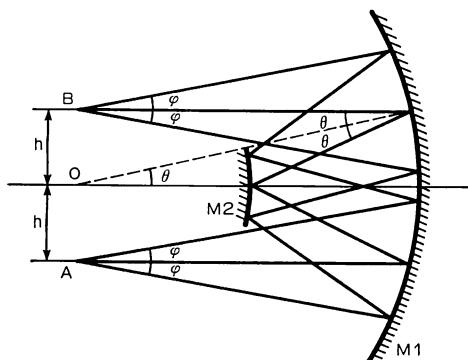


図1 等倍2枚鏡系の光路図

である。この距離は光軸に平行に高さ h で凹面鏡に入射する光線が、反射後光軸をよぎる条件にはかならない。凸面鏡は全系の瞳に相当するので、この光線が補正像高での主光線となる。

2枚鏡系がICの焼付装置として登場したとき、系は同心系で構成されていた⁹⁾。この系の性質を理解するにはプロトタイプである同心系で説明をすると容易である。それらをまとめると以下のようになる。

- a. 反射光学素子のみなので色収差がない。
- b. 同心、等倍系で軸上物点が点Oにあるため、球面収差がない。

c. 対称結像系なので非対称性収差であるコマおよびディストーションがない。

d. 同心系なのでサジタル光束は理想結像する。

e. L を(1)の条件とすれば、像高 h で非点収差は0となる¹⁰⁾。

f. けられのない結像を行なうため、近似的に

$$\sin \theta > \sin \varphi. \quad (3)$$

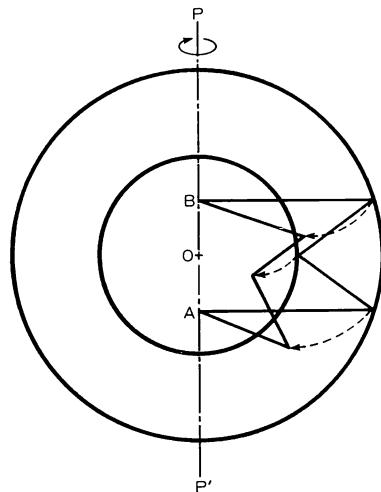


図3 同心系のサジタル光線の結像

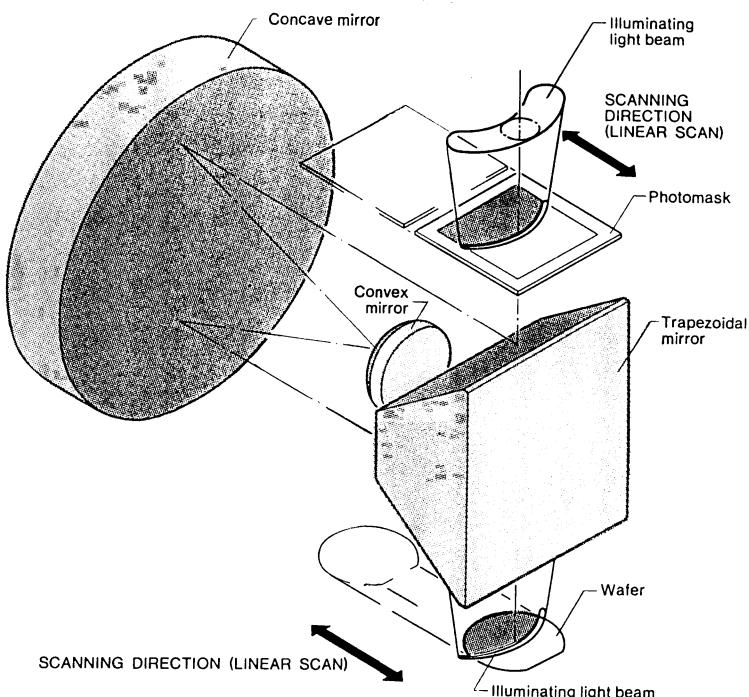


図2 走査露光法

種々の収差がほとんど補正されてしまい、メリジオナル結像のみを考えればよいことが明らかとなつたわけである¹¹⁾。ここで補足的にd項について図3を用いて説明を加える。図は二つの同心球を示しているが、ここで点AおよびBと二つの球の中心Oを通る軸PP'を考える。いま、ある平面内で点Aから点Bに行くM型の光線を求めたとする。軸PP'に関する回転対称性を考えると、点Aから発生するサジタル方向の光線はすべて点Bを通ることが理解されるよう。

メリジオナルの結像を考えるには図3で軸PP'の代りに、O点をとおり紙面に垂直な軸の回りの回転について考えてやればよい。簡単な計算を要するが、e項に示したように、テレセントリックな条件が近軸的に非点収差を補正するための必須条件となっていることがわかる。

3. 像面特性の解析

3.1 基本解析式の導出

定性的な考察で説明できたことを定量化するため、図4に示すような座標系を考える。中心Oは凹面鏡の曲率中心と一致しており、Oを中心とした微小回転角 $d\alpha$ を解析のパラメーターとして設定する。凸面鏡は系の瞳位

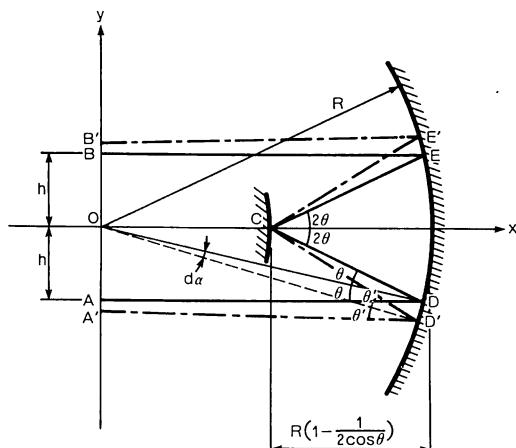


図4 2枚鏡解析の座標系

表1 等倍2枚鏡系の構成

No.	曲率半径	間 隔	屈折率
1	$-R$	$-R\left(1-\frac{1}{2\cos\theta}\right)$	-1
2	$\frac{R}{2\cos\theta(1-k)}$	$R\left(1-\frac{1}{2\cos\theta}\right)$	1
3	$-R$		-1

置となっているので、その中心Cを通過するのが主光線である。定性的な解析より、同心系の場合の性質が判明しているので、本解析では基本系として同心系を採用し、最適化のパラメータとして凸面鏡の半径に k という値を導入する。その結果、この解析で取り扱う光学系の構成データは表1のようになる。

定性的説明の項からわかるように、2枚鏡系ではまず像面の特性が最も問題となる。像面を解析するためには種々の手法が考えられるが、ここでは計算機内で行なわれている光線ト雷斯の計算をそのまま解析的に行なっていくこととした¹²⁾。詳細は文献に譲る⁵⁾が、複雑な繰返し計算の結果、サジタル像点の位置 x_s とメリジオナル像点の位置 x_m は次の式で表わされる。

$$\left. \begin{aligned} x_s &= R \frac{\cos 2\theta}{\cos \theta} k - 2R \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot k \, d\alpha \\ x_m &= R \frac{\cos 2\theta}{\cos \theta} k + R \frac{2 \cos 2\theta}{\cos \theta} \tan^2 \theta \cdot k^2 - 4R \sin^3 \theta \, d\alpha \\ &\quad - 2R \cos \theta (\sin 2\theta + 4 \tan^3 \theta \cdot \sin^2 \theta) k \, d\alpha \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

また、B点における両像面の傾きは

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_s}{dy} &= -2 \tan 2\theta \cdot k \\ \frac{dx_m}{dy} &= -\frac{4 \sin^3 \theta}{\cos \theta \cdot \cos 2\theta} - \left(2 \tan 2\theta + 8 \frac{\tan^3 \theta \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} \right) k \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

(4)および(5)式が、2枚鏡系の像面特性を考える際の基本式となる。

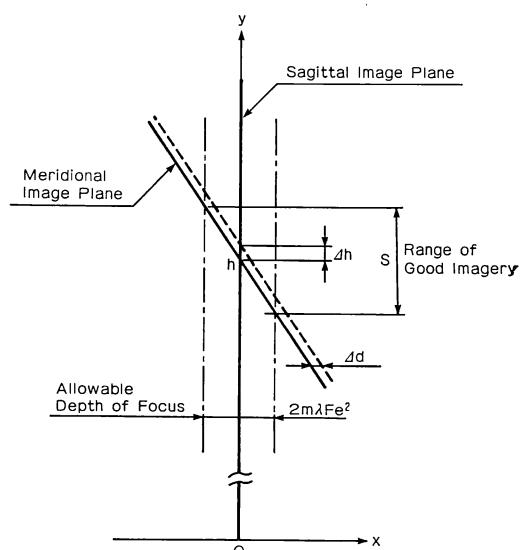


図5 同心系の像面特性

3.2 同心系¹³⁾

$k=0$ は同心系の場合であり、Offner が最初に導き出した系である³⁾。このとき、像面は

$$\left. \begin{aligned} x_s &= 0 \\ x_m &= -4R \sin^3 \theta \cdot d\alpha \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_s}{dy} &= 0 \\ \frac{dx_m}{dy} &= -\frac{4 \sin^3 \theta}{\cos \theta \cos 2\theta} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(6)式および(7)式でサジタル像面が 0 であることは、サジタル結像の無収差性の証明である。一方、メリジオナルであるが、 $d\alpha=0$ が B 点の結像に対応するので、B で $x_m=0$ 、すなわち非点収差が 0 となることがわかる。したがって像面の挙動は図 5 に示すようなものとなる。これより、同心系で問題となるのは、メリジオナル像面の傾きであることが容易に理解されよう。

定性的説明の f 項で述べたように、結像光束のけられをなくするには(3)式の条件が必要であった。 $\sin \varphi$ は NA を示すので、 F_e を有効 F 数として

$$\sin \theta = p \sin \varphi = \frac{p}{2F_e} \quad (8)$$

と置く。(3)より $p > 1$ であるが、後述のように p はなるべく 1 に近いことが望ましい。ここでは系の性質を理解する上で容易な $p=1$ を imaginary limit、また、実用上の観点から $p=1.05$ を practical limit と呼ぶこととする。(8)式より、

$$\frac{dx_m}{dy} = -\frac{1}{2\sqrt{1-\frac{p^2}{4F_e^2}} \left(1-\frac{p^2}{2F_e^2}\right)} \frac{p^3}{F_e^3} \quad (9)$$

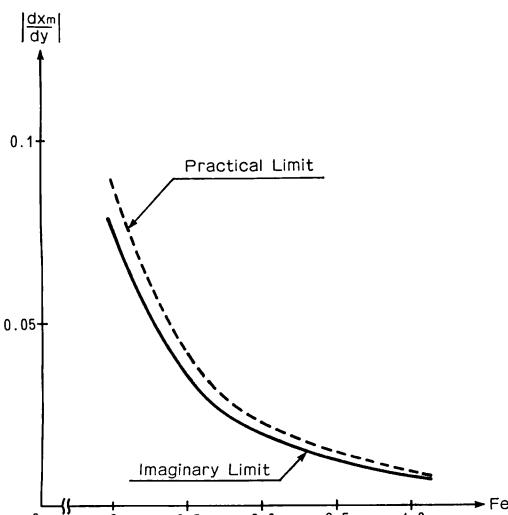


図 6 同心系のメリジオナル像面の傾き

F_e が実際には 3 以上の値で使われていることを考慮すれば、メリジオナル像面の傾きは、ほぼ F_e の 3 乗に反比例することがわかる。 φ についても(9)式より、像面の傾きの値を大きくしないためになるべく小さい値であることが望ましい。有効 F 数と像面の傾きの関係を図 6 に示す。

一方、この光学系は最初に述べたように B 点近傍の収差のよい領域のみが使用される。その良像域の幅を S とすると、図 5 から明らかなように、 S はメリジオナル像面の傾きによって定まる。許容しうる defocus 量を $\pm m\lambda F_e^2$ とすると S は

$$S = \frac{4m}{p^3} \lambda F_e^5 \sqrt{1 - \frac{p^2}{4F_e^2}} \left(1 - \frac{p^2}{2F_e^2}\right) \quad (10)$$

実際に使用される F_e の範囲から考えれば、 S は F_e の 5 乗に比例することができる。

このように F_e に関して解像可能線幅がたんに比例の関係でしかないのに、像面が 3 乗、良像域が 5 乗という効率率をもっているということは、 F_e の選択が系の性格を定めるきわめて重要なパラメータになっていることを意味している。

3.3 最適化¹⁴⁾

同心系はこのようにメリジオナルの特性がすべてを決定してしまうアンバランスな系である。そこで元の(4)(5)式に戻り、 k という最適化パラメータについて考えてみる。(4)より、 k による像高 h での非点隔差の発生量は

$$\Delta AS_h = x_m - x_s = R^2 \frac{\cos 2\theta}{\cos \theta} \tan^2 \theta \cdot k^2 \quad (11)$$

非点隔差の発生量は k^2 に比例する非常に小さな量であることがわかる。

一方、像面の傾きであるが、これについても面白い挙動が見いだされる。通常この系は $\theta < 15^\circ$ の範囲で使われるが、その領域では

$$2 \tan 2\theta \gg 8 \frac{\tan^3 \theta \sin^2 \theta}{\cos 2\theta} \quad (12)$$

(12)式の結果、(5)式のメリジオナルの最終項を無視すると、 k による像面の傾きの変化は両像面とも同一量であり、したがって交角は一定に保たれることが証明される。逆に交角一定という条件が 2 枚鏡系の限界を定めており、系の最適化は両像面の傾きの絶対値が等しくなることによって達成されることがわかる。(5)式より最適解となる k は

$$k_i = -\frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{2(\sin^4 \theta + \cos^4 \theta)} \quad (13)$$

表1より凸面鏡の半径 r は $R/2\cos\theta(1-k)$ である。ここで次の量を計算する。

$$\cos\theta(1-k)-1$$

$$=\frac{(1-\cos\theta)^2(3\cos^3\theta+2\cos^2\theta-2\cos\theta-2)}{2(\sin^4\theta+\cos^4\theta)} \quad (14)$$

前述したように $\theta < 15^\circ$ の範囲では $1 \approx \cos\theta$, したがって

$$r=R/2 \quad (15)$$

が θ のいかんにかかわらず最適解となる。このとき、

$$k_a=1-\frac{1}{\cos\theta} \quad (16)$$

ここで最適解の場合の近軸パラメータをまとめて置く。系を対称配置に構成すると、物像点の x 座標 x_a , B 点での非点隔差 ΔAS_a , および両像面の交点 $h+\Delta h_a$ は

$$x_a=-\frac{\cos 2\theta(1-\cos\theta)(2\cos\theta-1)h}{2\cos^4\theta\sin\theta} \quad (17)$$

$$\Delta AS_a=\frac{2\tan^2\theta(1-\cos\theta)^2h}{\tan 2\theta} \quad (18)$$

$$\Delta h_a=\frac{(1-\cos\theta)^2h}{\tan^2 2\theta \cos^2\theta} \quad (19)$$

(17)～(19)式が系の具体的配置を求めるための結論式と

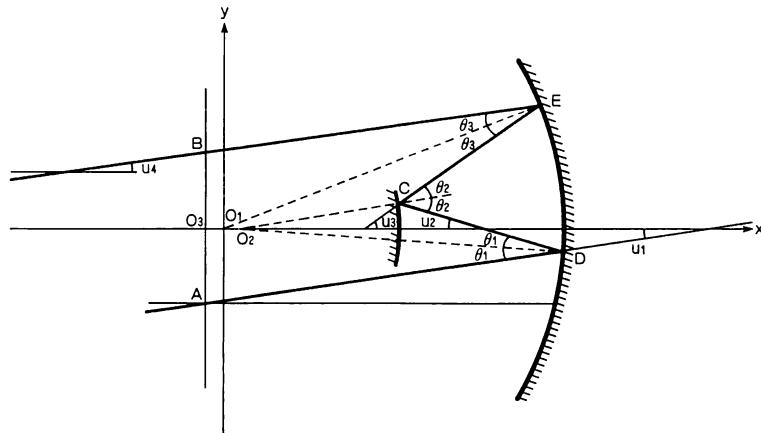
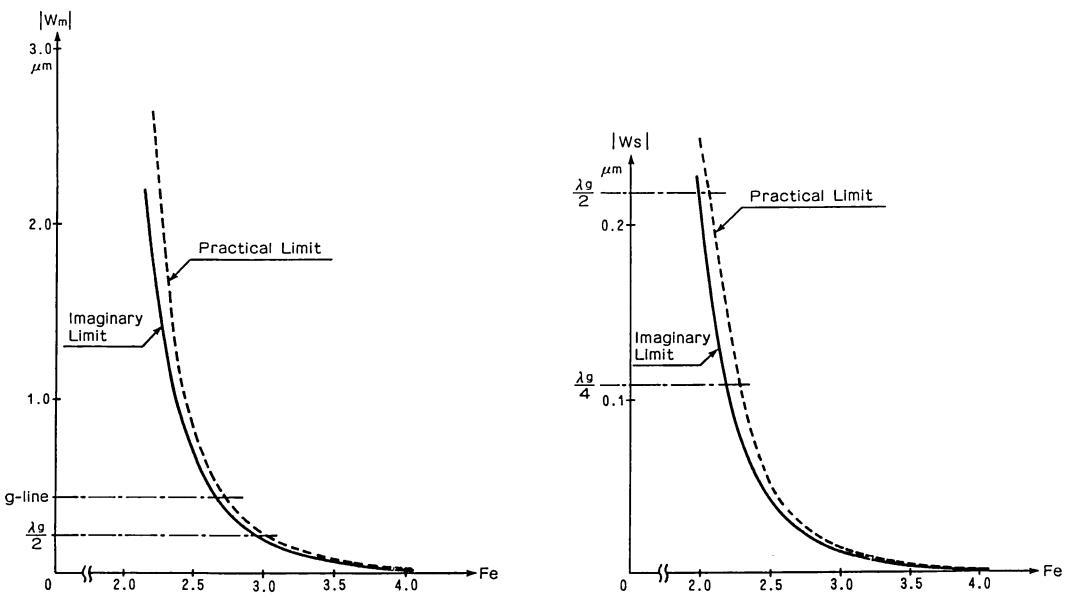


図7 メリジオナル光束の結像解析



(a) 同心系のメリジオナルの波面収差

(b) 最適系のサジタルの波面収差

図8 残留収差 ($h=100$ mm)

なる。

4. メリジオナル結像

図3を用いて説明したように、同心系の場合サジタル光束の結像は理想結像であった。これに対してメリジオナル光束の結像¹¹⁾について調べてみることとする。本光学系の場合は反射の法則と幾何学的な対称性をうまく利用して、計算を行なうことが可能である。

図7に解析に用いたモデルを示す。図中 O_1 と O_2 はそれぞれ凹面鏡、凸面鏡の中心であり、 O_3 は物平面と光軸の交点を示す。非点収差の解析での対称性の計算式より

$$O_1 O_3 = -\frac{\cos 2\theta}{2 \cos \theta} k R \quad (20)$$

計算は A 点を通じて角度 μ_i で出て行く光線の追跡である。反射の法則により、反射を行なう鏡面の中心から反射前後の光線に垂線を下ろしたとき、垂線の長さが等しくなるという原理を用いて計算を行なう。その結果、B 点での横収差 Δt は次の式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta t = & -R \frac{2 \sin^4 \theta}{\cos \theta \cos 2\theta} \left(1 + \frac{\cos 2\theta + \cos^4 \theta}{\sin^2 \theta \cos^2 \theta} k \right) \sin^3 \varphi \\ & - k^2 R \frac{\cos 2\theta}{\cos \theta} \tan^2 \theta \sin \varphi \end{aligned} \quad (21)$$

$k=0$ は同心の場合であるが、メリジオナル結像は像面特性だけでなく、高次の軸外球面収差の発生という意味でもサジタル結像に劣っていることがわかる。図8に $h=100\text{ mm}$ とした場合のメリジオナル収差の発生量を示す。(8)式を参照すれば、軸外球面収差は h を固定したとき、 F_e の 7 乗に反比例する形で急激に増大することがわかる。しかし $h=100\text{ mm}$ という大きな像高でも、 F_e 3 近傍まで diffraction limited な系を構成しうるのは驚くべきことである。

さて、 k の入った項は同心を崩していくときの効果を示す。(21)式の最終項は非点収差の発生を意味し、結果的に(18)式と対応する。また、 $\sin^2 \varphi$ の項がないのはコマ収差が除去されていることを示す。(21)式で注目されるのは高次の軸外球面収差の発生を小さくする k の値が存在することである。この値を k_m とすると

$$k_m = -\frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{\cos^4 \theta + \cos 2\theta} \quad (22)$$

k_m は(13)式の k_i と式の形が酷似しており、実際(14)で証明したような手順を踏めば

$$k_m \equiv k_i \equiv k_a \quad (23)$$

であることが確かめられる。(23)式は系の最適化を考え

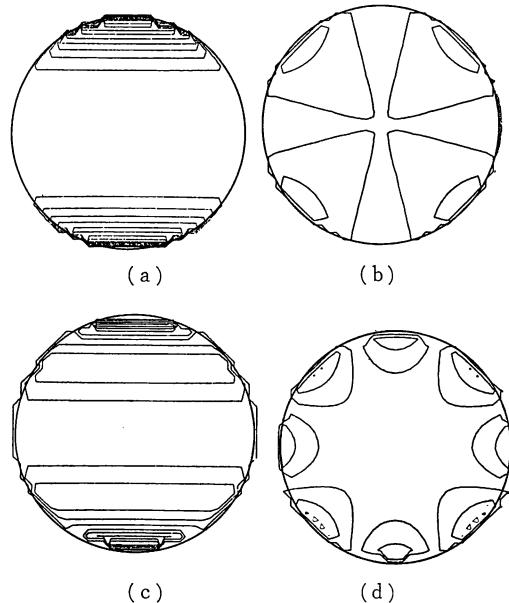


図9 波面収差の分布 ($h=100\text{ mm}$, $F_e=3$)
(a) 同心系の近軸位置 (等高線のピッチ $0.04 \lambda_g$),
(b) 最適系の近軸位置 (等高線のピッチ $0.04 \lambda_g$),
(c) (a)を最適化したときの波面分布 (等高線のピッチを $0.02 \lambda_g$), (d) (b)を最適化したときの波面分布 (等高線のピッチ $0.02 \lambda_g$)

る上できわめて重要な結論である。すなわち、(23)式は像面の傾きのバランスと、メリジオナル結像の高次収差の除去という二重の意味での最適化が $r=R/2$ で達成されることを示唆しているのである。

5. 計算結果

メリジオナル結像の最適化を図った結果、系が同心系から崩れてサジタル光束の結像に収差が発生する。この収差量は光路の投影を行なうことによって容易に解析でき¹⁵⁾、発生量が同心系のメリジオナルの収差より 1 術小さいことが証明できる(図8 b)。したがって $r=R/2$ という最適化はあらゆる意味で問題がない解であるといえる。

実際に本解析に基づいて、 $h=100\text{ mm}$, $F_e=3$ の系について計算した例を図9に示す。図9 a は同心系、図9 b は最適化された系での波面収差分布である。この図からわかるように、解析解と実際のトレースの値は非常によく合致し、解析した次数以上の高次収差の影響は少ない。むしろ注目すべきは波面収差全体での分布の仕方である。最適化された系ではサジタルおよびメリジオナル方向の収差は少ないが、 $\pm 45^\circ$ 方向での収差が顕著となっている。図9 c および d は両者を rms の意味で最適

化したときの波面を示す。同心系の rms は $0.028 \lambda_g$, 最適系では $0.018 \lambda_g$ であり、最適系のほうが倍近く優れた値を示すことがわかる。

6. ま と め

本解説では等倍2枚鏡系の収差が解析的に解明され、最適化できることを示した。その結果、系の性質と限界が明確となり、実際に IC 製造装置に応用され^{16,17)}て多大な成果を収めている。本解説の結果を簡単にまとめると、以下のとくとなる。

1. サジタルおよびメリジオナル像面の交角は θ によって一義的に定まり F_e の 3 乗に反比例する。
2. 残留する波面収差は h/F_e ⁷ に比例する。
3. 系の最適化はあらゆるパラメータに関係なく $r=R/2$ のとき達成される。このとき、最適系での良像域の幅は、同心系の 2 倍となる。
4. 像面の最適化と、波面の最適化が整合よく同一条件で行なわれる。
5. 最適系での波面収差発生量は同心系よりかなり小さく、より大口径化が可能である。

最近では2枚鏡系の改良版として4枚鏡を用いてさらに交角を平坦化しようとする試み¹⁸⁾もなされている。この場合の設計指針も基本的には本解説の手法のなかから汲み取ることができる。

なお、本論文の内容は昭和59年度の光学論文賞の対象となった。関係各位の方、および本論文を出すに際してご助力いただいた皆様に深く感謝の意を表したい。

文 献

- 1) 西田信夫、鈴木章義、永井昌平、中沢喜和雄、本田捷夫、南 正名、田中俊一：“新しい光学技術の IC への応用 [II]”，光学，5 (1976) 15.
- 2) D.A. Markle: “A new projection printer,” Solid State Technol., June (1974) 50.
- 3) A. Offner: “Unit power imaging catoptric anastigmat,” USP 3,748,015 (1973).
- 4) A. Offner: “New concepts in projection mask aligners,” Opt. Eng., 14, 2 (1975) 130.
- 5) A. Suzuki: “Complete analysis of a two-mirror unit magnification system, Part 1,” Appl. Opt., 22 (1983) 3943.
- 6) A. Suzuki: “Complete analysis of a two-mirror unit magnification system, Part II,” Appl. Opt., 22 (1983) 3950.
- 7) 鈴木章義：“反射光学系”，特開昭 52-5544 (1973).
- 8) 鶴田匡夫：“光の鉛筆レンズの性能 1”，O plus E, 5 月号 (1981) 90.
- 9) M.C. King: “Future developments for 1:1 projection photolithography,” IEEE Trans. Electron Devices, ED-26 (1976) 711.
- 10) A.P. Grammatin: “Some properties of concentric optical systems,” Sov. J. Opt. Technol., 38 (1971) 210.
- 11) C.G. Wynne: “A unit power telescope for projection copying,” Optical Instruments and Techniques 1969, ed. J.H. Dickson (Oriel Press, Newcastle upon Tyne, 1970).
- 12) 松居吉哉：レンズ設計法（共立出版、東京、1972）。
- 13) 鈴木章義：“2枚鏡系の収差論(I)”，第41回応用物理学秋季講演予稿集 (1980) p. 43.
- 14) 鈴木章義：“2枚鏡系の収差論(II)”，第42回応用物理学秋季講演予稿集 (1981) p. 96.
- 15) A. Bouwers: Achievements in Optics (Elsevier, New York, 1948).
- 16) A. Suzuki: “Laser scanning autoalignment in projection system,” Proc. SPIE Semiconductor Microlithography VI (1981) p. 35.
- 17) 吉成秀樹、唐沢 保、下田 勇、伴 篁吉：“1対1反射投影式マスクアライナ MPA 「500 FA」”，電子材料, 21, 3月号 (1982).
- 18) A. Offner: “Restricted off-axis field optical system,” USP 4,293,186 (1981).