

Deep UV 마이크로 리소그래피용 Stepper를 위한 4구면 반사경계

조영민 · 이상수
한국과학기술원 물리학과

박성찬
금성사 가전연구소

(1991년 10월 19일 받음)

엑시머 레이저빔($\lambda \leq 0.248 \mu\text{m}$)을 사용하는 micro-lithography를 위해 축소배율 5×를 갖는 4개의 구면으로 구성된 반사경계를 설계하였다. 먼저 초기광학계로서 Seidel 3차 수차 내에서 구면수차, 코마, 상면만곡, 왜곡수차가 제거된 4구면경계를 해석적으로 구하였다. 이 초기광학계의 성능 향상을 위해 컴퓨터를 이용한 최적화 기법을 사용하였고 그 결과 KrF 엑시머 레이저 광에 대해 N.A. 0.15와 image field diameter 3.3 mm 이내에서 회절 한계까지 제거된 수차 성능을 얻었다.

I. 서 론

Lithography에 사용되는 광학계는 고집적도의 DRAM을 위해 광학계의 높은 분해능, 긴 초점심도(DOF : depth of focus), 넓은 시계(field), 모든 수차 보정 등 엄격한 조건을 요구하고 있다. 특히 DRAM의 해상력을 높이기 위해 lithography 광원의 단파장화에 의한 광학계의 분해능과 초점심도의 향상에 관심이 모아지고 있고 축소 배율 광학계가 선호되고 있다.^[1]

Hg-i선($\lambda = 0.365 \mu\text{m}$) 보다 짧은 파장을 갖는 KrF excimer 레이저 광($\lambda = 0.248 \mu\text{m}$), ArF excimer 레이저 광($\lambda = 0.193 \mu\text{m}$) 등을 광원으로 사용할 경우 렌즈계에는 광원의 단파장화에 의해 사용 가능한 광학매질에 제한이 따르고 광원의 선폭에 기인한 색수차를 제거하는 데 큰 어려움이 있는 반면 반사광학계는 이를 근본적으로 피할 수 있다. 대표적인 lithography용 반사광학계인 Offner 1:1 공심 2 반사경계^[2,3]는 Seidel 3차 수차가 모두 제거되었고 폭 1~4 mm의 ring field를 갖지만 축소배율을 갖지 못하였다. 4반사광학계는 Seidel 3차 수차를 해석적으로 다룰 수 있을 만큼 비교적 간단하면서도 수차보정에 필요한 설계면수의 수가 충분하여 2개 수차, 3개 수차, 4개 수차가 보정된 4반사경계 등^[4-9]이 많이 연구되었으나 대부분이 망원경용이다. 본 4구면경계의 성능을 기존의 망원경용 4구면경계들과 UV 결상용 4반사경계에 비교하면 표 1, 표 2와 같다. 표 1, 2의 4 반사경계는 모두 Seidel 3차 수차이론에 입각하여 해석

Table 1. Telescopic 4-Spherical Mirror Systems (unit: cm)

	TS-I ^[7] ($f' = 1$)	TS-II ^[8] ($f' = 1$)			TS-III ^[9]
		AST	FC	DIS	
$f/\#$	2	2	2	2	4.0~8.0
Half Field Angle	1°	1°	1°	1°	1°
LSA	1×10^{-4}	6×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-4}	
OSC	2×10^{-4}	1×10^{-4}	2×10^{-4}	5×10^{-4}	ZOOMING
ΔT	-2×10^{-3}	-6×10^{-5}	2×10^{-4}	-2×10^{-4}	$f' = 66.67$
ΔS	-1×10^{-3}	-2×10^{-4}	-2×10^{-4}	1×10^{-4}	~ 133.33
Distortion	$5 \times 10^{-2}\%$	$3 \times 10^{-1}\%$	$3 \times 10^{-2}\%$	$4 \times 10^{-7}\%$	

Table 2. Camera-imaging 4-Mirror Systems for UV Lithography (unit: cm)

	CS-I ^[10]		CS-II ^[11]		CS-III
	Spheric ($f' = -10$)	Aspheric ($f' = -20$)	Spheric ($f' = -1$)	Spheric ($f' = -10$)	
N.A.	0.15	0.25	0.2	0.15	
Image field Diameter	0.35	1.0	0.052	0.33	
TSA	1×10^{-4}	4×10^{-5}	5×10^{-5}	3×10^{-5}	
OSC	1×10^{-4}	2×10^{-4}	2×10^{-5}	5×10^{-6}	
ΔT	2×10^{-5}	-4×10^{-3}	2×10^{-4}	-6×10^{-4}	
ΔS	5×10^{-6}	-2×10^{-3}	2×10^{-4}	6×10^{-4}	
Distortion	$3 \times 10^{-2}\%$	$2 \times 10^{-3}\%$	$2 \times 10^{-3}\%$	$4 \times 10^{-4}\%$	

적으로 초기광학계를 구하였다. 표 1의 4구면경계들은 모두 망원경용으로 IR 영역의 파장 $\lambda=10.6 \mu\text{m}$ 에 대해 회절한계까지 수차가 보정되어 있다. TS-I^[7]는 전반 2구면경계가 무초점계이면서 구면수차, 코마가 보정된 4구면경계이고, TS-II^[8]의 광학계들은 각각 3개의 수차가 보정된 relay 광학계들로서 AST는 비점수차, 구면수차, 코마, FC는 상면만곡수차, 구면수차, 코마 그리고 DIS는 왜곡수차, 구면수차, 코마가 보정된 4구면경계이다. TS-III^[9]는 연속적으로 구면수차와 코마가 보정되는 줌(zoom) 4구면경계로서 줌비율이 2배이다. 표 2의 광학계들은 모두 축소 배율 5×의 lithography용 4반사광학계로서 각기 다르게 Seidel 3차 수차내에서 4개의 수차를 제거하였다. CS-I^[10]는 Seidel 3차 수차내에서 구면수차, 코마, 비점수차, 상면만곡수차가 제거되고 telecentric 조건을 만족하는 4구면경계($f'=-10 \text{ cm}$)와 그것을 비구면화시킨 4반사경계($f'=-20 \text{ cm}$)를 나타내고 CS-II^[11]는 3차 수차 중 구면수차, 코마, 비점수차, 왜곡수차가 제거된 4구면경계이다. CS-III가 본 논문의 광학계로서 3차 수차 중 구면수차, 코마, 상면만곡수차, 왜곡수차가 제거된 4구면경계이다.

Seidel 수차 이론에 입각하여 광학계 수차를 해석적으로 다루면 Seidel 3차 수차라 불리는 구면수차, 코마, 비점수차, Petzval 상면만곡수차, 왜곡수차들이 있는데 이 5가지 수차들이 광학계의 결상능력을 좌우하는 기본적인 수차들이다. 그리고 lithography에서는 mask pattern을 wafer에 높은 분해능을 갖고 정확한 님음꼴로 결상시키는 것이 목적이므로 본 논문에서는 그 목적에 맞는 초기 광학계 설계를 위해 Seidel 3차 수차 중에서 분해능을 결정하는 구면수차와 코마가 제거되고(aplanat), 정확한 님음꼴 결상에 오차를 주는 상면만곡수차와 왜곡수차가 제거된(flat field, distortion free) 축소배율의 4구면 반사경계를 해석적으로 연구하였다.

본 논문에서 'distortion free, flat field, aplanat'라 함은 Seidel 3차 수차내에서 왜곡수차, 상면만곡수차, 구면수차, 코마가 제거됨을 의미한다.

II. 일정배율을 갖는 Distortion Free, Flat Field, Aplanat 4구면 반사경계의 해법

광학계의 Seidel 3차 수차계수는 광축상의 물점을 출발하여 광학계의 조리개(stop)의 가장자리 끝을 지나서 주변광선(marginal ray)과 비축상의 물점을 출발하여 조리개의 중심을 지나서 주광선(principal ray)의 근축광선 추적치들을 통해 광학계 구성변수들인 광학면의

곡률 c , 광학면 사이 거리 d , 매질의 굴절률 n 로 표현할 수 있다. 본 논문에서 다물 광학계에 대한 기호 및 부호에 대해서는 참고문헌^[12]의 정의를 따르기로 한다.

4구면경계를 수차특성이 좋은 Cassegrainian-inverse Cassegrainian의 조합으로 간주하면 후반 2구면경계가 전반 2구면경계에서 나온 광을 받는 형태이므로, 광학계를 통과하는 광량을 효과적으로 조절하고 가장 간단한 수차 계수 표현식이 얻어질 수 있도록 조리개의 위치를 제 3기울면에 두었다(그림 1 참조). 광축상 물점에서 광축과 각 u_0 로 주변광선이 나오고 주광선이 조리개에서 광축과 각 β 를 이룬다면 4반사경계의 Seidel 3차 수차 계수들인 구면수차 S_I , 코마 S_{II} , 비점수차 S_{III} , Petzval Sum S_{IV} , 왜곡수차 S_V 와 배율 M 은 다음과 같이 Gauss 괄호^[13]로 표현된다.

$$S_I = -2u_0^4(c_1G_1^2a_1^2 - c_2G_2^2a_2^2 + c_3G_3^2a_3^2 - c_4G_4^2a_4^2) \quad (1)$$

$$S_{II} = -2u_0^3\beta(c_1G_1^2a_1b_1 - c_2G_2^2a_2b_2 + c_3G_3^2a_3b_3 - c_4G_4^2a_4b_4) \quad (2)$$

$$S_{III} = -2u_0^2\beta^2(c_1G_1^2b_1^2 - c_2G_2^2b_2^2 + c_3G_3^2b_3^2 - c_4G_4^2b_4^2) \quad (3)$$

$$S_{IV} = 2u_0^2\beta^2G_5^2(c_1 - c_2 + c_3 - c_4) \quad (4)$$

$$S_V = 2u_0\beta^3\{G_5^2(c_1b_1/a_1 - c_2b_2/a_2 + c_3b_3/a_3 - c_4b_4/a_4) - (c_1G_1^2b_1^3/a_1 - c_2G_2^2b_2^3/a_2 + c_3G_3^2b_3^3/a_3 - c_4G_4^2b_4^3/a_4)\} \quad (5)$$

$$M \equiv 1/m = 1/G_5 \quad (6)$$

여기서 G_i, a_i, b_i 들은 다음과 같은 Gauss 괄호들로 정의된다.

$$G_1 \equiv [d_0]$$

$$G_2 \equiv [d_0, 2c_1]$$

$$G_3 \equiv [d_0, 2c_1, -d_1]$$

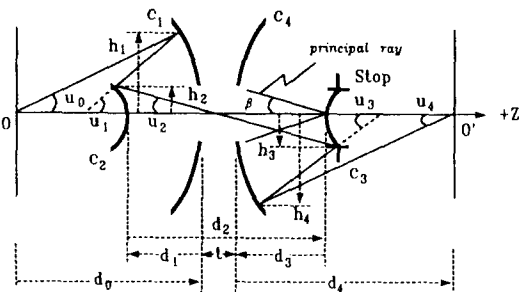


Fig. 1. Typical configuration and paraxial ray tracing of the four-spherical mirror system with Cassegrainian-inverse Cassegrainian type.

$$G_4 \equiv [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2]$$

$$G_5 \equiv [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2]$$

$$G_6 \equiv [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3]$$

$$G_7 \equiv [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3]$$

$$G_8 \equiv [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4]$$

$$a_1 \equiv [d_0, c_1]$$

$$a_2 \equiv [d_0, 2c_1, -d_1, -c_2]$$

$$a_3 \equiv [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, c_3]$$

$$a_4 \equiv [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -c_4]$$

$$b_1 \equiv [c_1, -d_1, -2c_2, d_2]$$

$$b_2 \equiv [-c_2, d_2]$$

$$b_3 \equiv 1$$

$$b_4 \equiv [-d_3, -c_4]$$

한편, 자외광선과 구결광선 둘다 고려하여 상공간에서 실제 spot의 크기가 최소가 되는 점을 포함하는 면(surface containing disc of least confusion)의 면곡을 나타내는 상면만곡계수 $F.C.$ 는 $F.C. = 2S_{III} + S_{IV}$ 로 표현되며^[14] 근축광선 추적치로 표시하면 다음과 같다.

$$F.C. = -2u_0^2 \beta^2 \{ (2c_1 G_4^2 b_1^2 - 2c_2 G_5^2 b_2^2 + 2c_3 G_6^2 b_3^2 - 2c_4 G_7^2 b_4^2) - G_5^2 (c_1 - c_2 + c_3 - c_4) \} \quad (7)$$

그러므로 4구면경계가 Seidel 3차 수차 내에서 일정배율 M 을 갖는 distortion free, flat field, aplanat 조건을 만족하려면 식 (1), (2), (7), (5)로 주어진 구면수차, 코마, 상면만곡수차, 왜곡수차에 대한 Seidel 3차 수차계수가 모두 영 즉,

$$S_I = S_{II} = F.C. = S_V = 0$$

이고 식 (6)을 만족시키면 되므로 조건식은 모두 5개이다. Gauss 팔호의 성질을 이용하고 식들의 독립성을 유지시키면서 위 5개의 조건식들을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$XV + W_1 X^2 / Y - Y^2 = 0 \quad (8)$$

$$X(VY + 2W_1 X) / Y - 1/16 G_5^2 (m - G_6)^2 (m + G_6)^2 = 0 \quad (9)$$

$$G_5 (m - G_4) G_6^2 + (8Y_1 + G_5 (m^2 - G_4^2)) G_6$$

$$+ G_5 G_4^3 - m^3 G_5 - 8X_1 = 0 \quad (10)$$

$$c_4 = (VY + 2W_1 X) / (G_5^2 Y) \quad (11)$$

$$d_3 = (G_5 c_4 + 1/2(m - G_6)) / (G_5 c_4) \quad (12)$$

단, $X \equiv X_1 + c_3 G_5^2 a_3^2$, $X_1 \equiv c_1 G_1^2 a_1^2 - c_2 G_2^2 a_2^2$

$$Y \equiv Y_1 + c_3 G_5^2 a_3, Y_1 \equiv c_1 G_1^2 a_1 b_1 - c_2 G_2^2 a_2 b_2$$

$$V \equiv V_1 + c_3 G_5^2, V_1 \equiv 2c_1 G_1^2 b_1^2 - 2c_2 G_2^2 b_2^2 - G_5^2 (c_1 - c_2)$$

$$W_1 \equiv G_5^2 (c_1 b_1 / a_1 - c_2 b_2 / a_2) - (c_1 G_1^2 b_1^3 / a_1 - c_2 G_2^2 b_2^3 / a_2)$$

위 수차계수 표현식에서 X, Y, V 는 각각 설계변수 $d_0, c_1, d_1, c_2, d_2, c_3$ (c_3 이하의 변수들)만을 갖고 있고 X_1, Y_1, V_1, W_1 는 각각 d_0, c_1, d_1, c_2, d_2 (d_2 이하의 변수들)로만 구성되어 있다. 위 5개 식들은 8개 변수(c, d)가 복잡하게 얽혀있는 고차의(6차 이상) 연립 대수방정식이므로 완전히 해석적으로 다루어 colsed form으로 풀 수 없고 수치적인 방법에 의존해야 한다. 8개 설계변수들 중 d_0, d_1, c_1 을 자유도 3에 해당하는 설계 매개변수들로 취하여 d_0, d_1, c_1 의 값들을 임의로 정한 후 식 (8), (9), (10), (11), (12)을 만족하도록 c_2, d_2, c_3, d_3, c_4 를 결정하면 4구면 반사경계는 일정 배율 M 을 갖고 distortion free, flat field, aplanat 조건을 만족한다. 즉, c_2, d_2 를 최적화 변수로 하고 식 (8), (9)을 오차함수(error functin)으로 한 최적화 기법을 이용하여 c_2, d_2 를 구하는데 이 때 $G_6 = 2G_5 c_3 + G_4$ 이므로 c_3 에 대해 식 (10)을 이용하여야 한다. 그 다음 식 (10), (11), (12)에서 차례로 c_3, c_4, d_3 를 구하여 본 광학계에 대한 수치적인 해들을 얻는다.

III. 축소배율 5×를 갖는 Distortion Free, Flat Field, Aplanat 4구면 반사경계들에 대한 물리적 해석

구현 가능한 물리적인 해를 얻기 위해 다음과 같은 기준을 갖고 일정한 배율 M 을 갖는 distortion free, flat field, aplanat 4구면 반사경계가 존재하는 범위를 조사하였다. 즉, 광학계의 축소배율은 5×로 정하였고(즉, $M=1/5$) $c_1 = -1$ 로 정하여 광학계의 크기를 규격화하였다. 적절한 해 영역으로 d_0 값을 $0.5 < d_0 < 8$ 사이에서 0.05 간격으로 정하였고, d_1 값을 $-0.5 < d_1 < -0.18$ 범위에서 0.001 간격으로 정하였다. 물리적 조건으로 $d_2 > |d_1|, d_3 < 0, d_4 > |d_3|, t = d_1 + d_2 + d_3 < 0, |h_4| > 2|h_1|$ 광축 상 물체점에 대해 광학계 총 광투과량이 50% 이상 등을 고려하였다.

이상과 같이 주어진 영역에서 물리적으로 타당한 조

건들을 만족하는 축소배율 5×을 갖는 distortion free, flat field, aplanat 4구면 반사광학계가 존재하는 범위를 매개변수 d_0, d_1 에 대하여 그림 2의 (a)에 나타내었다. 실제로 그림 2(a)에 나타난 모든 4구면 반사광학계는 그림 4와 같은 Cassegrainian-inverse Cassegrainian형 반사광학계이다. 그림 2(b)는 각각의 d_0 값에 대해 1면과 4면 사이의 거리 t ($t=d_1+d_2+d_3$)와 거리변수 d_1 과의 관계를 나타내고 있으며 t 값이 작아질수록 광학계 길이가 짧아지므로 vignetting 현상이 줄어든다. 그림 2(c)와 (d)는 각각 비점수차와 Petzval sum이 d_1 에 따라 변화하는 경향을 각각의 d_0 값에 대해 나타내고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 본 4구면경계는 매개변수 d_0, d_1 의 모든 값에 대해서도 비점수차 및 Petzval sum이 제거되지 않았다. 그림 2의 (e)는 1면의 입사각에 대한 4면의 입사각의 비 $|h_4/h_1|$ 를 나타낸 것이다. 광학계를 구성하는 광학면 중에서 다른면에 비하여 어느 한 면의 광선 입사각이 지나치게 높으면 광학계는 대개 고차 구면수차의 영향을 크게 받는다. 그림 2(f)에서 RTR(ratio of transmitted ray)은 광축상 물체에서 출발하여 상점에 도달한 광선수(광량)를 I_m , 일정 반시계각의 비축 물점에서 나와 상면에 도달한 광선수를 I_{off} 라 할 때 $RTR \equiv I_{off}/I_m$ 로 정의된다. RTR은 비축 물점 vignetting을 나타낼 뿐만 아니라 lithography에서 특히 중요시되는 상면 조도 분포의 균일성(illumination uniformity)에 직접적으로 관계한다. 여기서 RTR 값은 최대 반시계각 1.5°의 비축물점에 대한 것이고 각각의 d_0 값에 대해서 RTR은 거의 같은 값을 갖으므로 특성이 뚜렷하고 중간 값인 $d_0=4.1$ 에 대해서만 나타내었다.

IV. 규격화된 4구면 반사경계의 최적화 및 수차해석

그림 2에 나타난 것을 종합해 보면 d_0 값에 따라 $|h_4/h_1|$ 의 차이가 크지 않고 d_0 값이 작은 영역의 해가 잔류 비점수차와 Petzval sum 및 t 값을 최소로 하므로 이 영역에서 해를 선정하여 최적화 과정에 대한 초기 광학계로 정하였다. 컴퓨터를 이용한 유한광선 추적을 통해 이 초기 광학계를 KrF excimer 레이저 파장(0.248 μm)에 대해 회절한계 이하의 수차들을 갖도록 최적화시켜 얻은 4구면경계의 설계자료를 표 3에 나타내었다. 표 4는 각 반사면에서의 clear aperture와 1면과 4면에서의 hole diameter를 나타내고 있다. 2면과 3면의 clear aperture는 1면과 4면의 중앙부를 가리는 막 역할도 한다. 표 3에 주어진 광학계는 초점거리 $f' = -1 \text{ cm}$ 에 대해 규격화

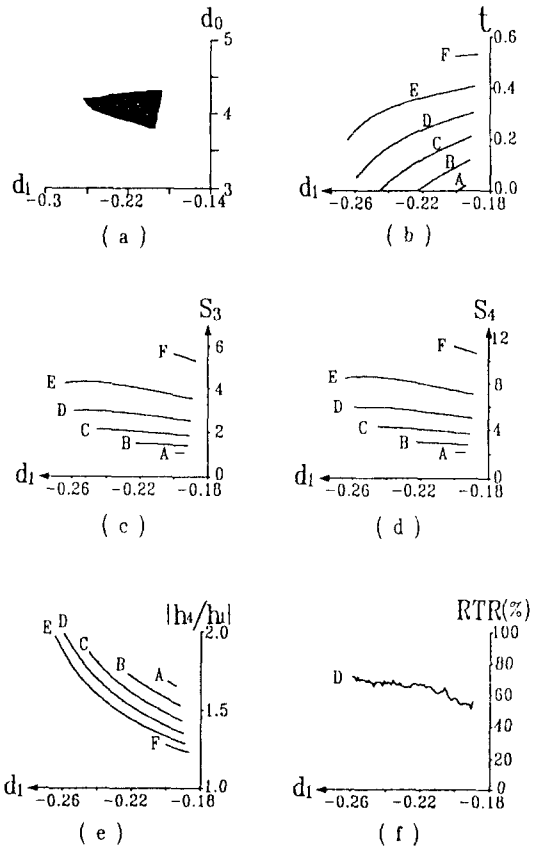


Fig. 2. Physical analyses of the distortion free, flat field, aplanat four-spherical-mirror system with $c_1 = -1$. (a) Domain where the useful system exist. (b) Behaviors of t ($t=d_1+d_2+d_3$), (c) Variations of S_3 ($= -S_{3m}/2u_0^2\beta^2$), (d) Variations of S_4 ($= +S_{4m}/2u_0^2\beta^2$), (e) Behaviors of $|h_4/h_1|$, (f) Behaviors of RTR (ratio of transmitted ray); as functions of d_1 for given d_0 's (A: $d_0=3.8$, B: $d_0=3.9$, C: $d_0=4.0$, D: $d_0=4.1$, E: $d_0=4.2$, F: $d_0=4.3$).

되었으며 N.A.가 0.25이고, 반시계각이 1.5°로서 최적상면에서 field diameter가 0.495 mm.으로 아주 작다. 그림 3(a)~(d)는 표 3의 규격화된 4구면 반사광학계에 대한 유한광선수차 특성을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 N.A.가 0.25, 반시계각이 1.5° 이내에서 비점수차를 제외하고 횡구면수차(TSA), 코마(OSC), 상면만곡수차 그리고 왜곡수차는 충분히 보정되어 있다. 그림 3의 (e)는 상공간에서 주광선의 방향여현(L'_p, M'_p, N'_p) 중에서 y 축 방향여현(M'_p)을 나타낸 것인데 시계각에 따라 선형적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다. 그림 3(f)는 앞서

Table 3. Design data of the normalized four-spherical mirror system with stop at third mirror surface ($f' = -1$ cm)

	Mirror No.					
	Object	Ent. Pupil	I	II	III	IV
Curvature			-0.488603	-0.257129	0.231635	0.407466
Distance	4.705553	3.409482	-0.468181	2.034338	-1.543092	

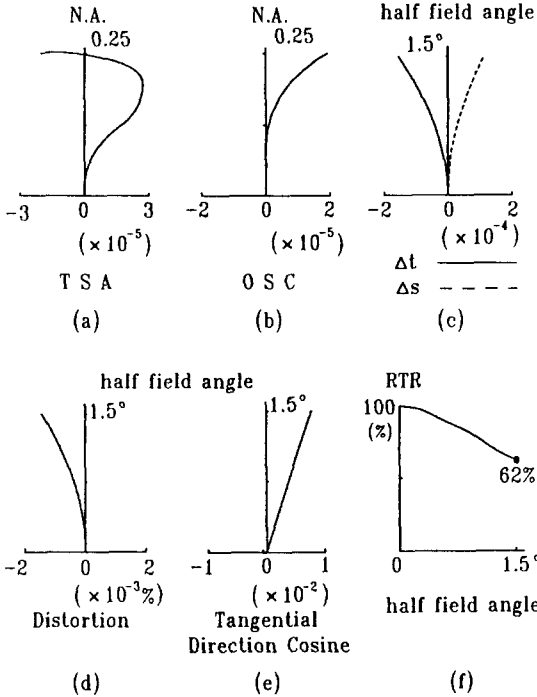


Fig. 3. (a), (b), (c), (d) are the residual finite ray aberrations of the normalized four-spherical mirror system ($f' = -1$ cm), (e) tangential direction cosine of principal ray in image space and (f) RTR:ratio of transmitted ray.

언급했듯이 비축 물점의 축상 물점에 대한 상대적 광투과도를 나타내는 RTR 값을 반시계각 변화에 따라 나타낸 것으로 반시계각이 증가함에 따라 RTR 값은 상당히 떨어져 1.5°에서 62%의 값을 갖는다.

V. Scale-up된 4구면 반사경계의 최적화 및 수차해석

표 3의 광학계는 image field diameter 0.495 mm의 circular field를 갖고 있는데 10 mm 이상의 circular field를 갖고 있는 기존의 lithography용 렌즈계들 또는

Table 4. Clear apertures and hole diameters of the mirrors for the four-spherical mirror system given by Table 3 (in cm)

	Mirror No.				
	Ent. Pupil	I	II	III	IV
Clear aperture	0.471	0.808	0.490	0.426	1.385
Hole diameter	0.000	0.555	0.000	0.000	0.951

폭 1 mm 이상의 ring field를 갖고 있는 기존의 반사경계들에 비하여 시계의 크기(field size)가 너무 작으므로 lithography에 사용하기 위해서는 본 광학계의 시계 즉 상면의 크기를 키워야 한다. 시계의 크기를 키우기 위해 위 규격화된 광학계를 초점거리 $f' = -10$ cm로 scale-up 하였다. 그러나 이 과정에서 모든 광선수차들도 같은 비율로 증가하므로 N.A.와 시계각을 각각 0.15, 1°로 줄여서 표 3의 광학계를 다시 최적화시켰다. 그 결과 표 5의 광학계는 최적 상면에서 표 3보다 약 6배 큰 diameter 3.3 mm의 circular image field를 갖는다. 표 5의 광학계의 형태가 축상 물체점의 광선추적과 함께 그림 4에 나타나 있다.

그림 5에 표 5의 4구면 반사광학계의 유한광선 수차 특성을 나타내었는데 N.A.와 반시계각이 각각 0.15와 1° 이내에서 횡구면수차(TSA), 코마(OSC), 상면만곡수차 그리고 왜곡수차가 충분히 보정되었고 비접수차를 제외 하고 전반적으로 표 3보다 조금 좋은 수차특성을 나타내고 있다. 광학계의 분해능을 좌우하는 횡구면수차는 N.A. 0.15 이내에서 최대 0.21 μ m이고 왜곡수차는 반시계각 1°에서 3.5×10^{-4} 값을 갖는데 이는 3.3 mm의 image field diameter에서 5.8 nm에 해당된다. Microlithography에서는 왜곡수차에 대한 tolerance가 0.1 μ m 이내이므로^[1] 본 광학계는 이 조건을 충분히 만족시키고도 남는다. 그림 5(c)에서 tangential ray aberration Δt 와 sagittal ray aberration Δs 가 상면에서 거의 대칭으로 그려지므로 상면만곡수차도 충분히 보정되었고 시계각이 1°로 줄어 들었으므로 주광선의 y축 방향여현(M_p)도 그림 5(e)에 나타나 있듯이 조금 줄어들었다. 비축



Fig. 4. Configuration of the scaled-up four-spherical mirror system. The stop of the system lies at the third mirror surface ($f' = -10$ cm).

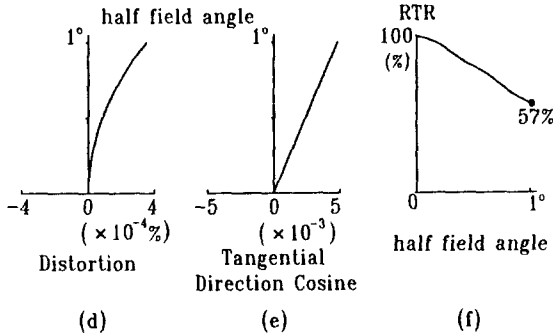
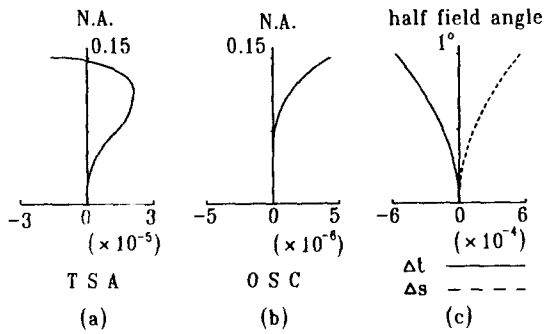


Fig. 5. (a), (b), (c), (d) are the residual finite ray aberrations of the scaled-up four-spherical mirror system ($f' = -10$ cm), (e) tangential direction cosine of principal ray in image space and (f) RTR: ratio of transmitted ray.

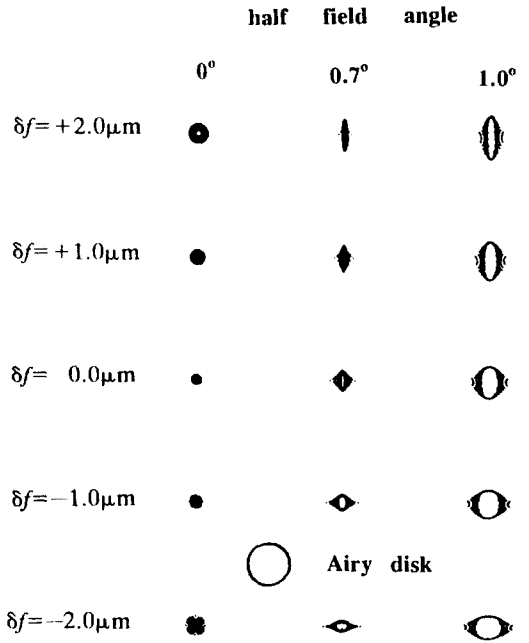


Fig. 6. Spot diagrams of the four-spherical-mirror system scaled-up to $f' = -10$ cm for three field angles at five defocused image positions. The circle shows the Airy disk size (radius $R = 1.0 \mu\text{m}$) for KrF excimer laser beam ($\lambda = 0.248 \mu\text{m}$).

물점의 축상 물점에 대한 상대적 광투과도를 나타내는 RTR 값은 반시계각 1° 에서 57%이다. 그림 6의 spot 그림에서 spot들의 크기는 Airy disk 보다 작으므로 회절한계 조건을 만족시키는데 이 때 파장 $0.248 \mu\text{m}$ 의 KrF 레이저 광선에 대해 Airy disk의 크기는 Rayleigh 기준에 따라 ($R = 0.61\lambda/\text{N.A.}$) 반경 $R = 1.0 \mu\text{m}$ 이다. Airy disk로 주어지는 회절한계 조건을 만족시키는 최적 상면 이동 거리 허용치는 그림 6에 의해 $\pm 2.0 \mu\text{m}$ 이고, Rayleigh 기준($\text{DOF} = \pm 0.5 \lambda/\text{N.A.}^2$)에 의한 DOF는 $\pm 5.5 \mu\text{m}$ 이다.

Table 5. Design data of the scaled-up four-spherical mirror system with stop at third mirror surface ($f' = -10$ cm)

	Mirror No.					
	Object	Ent. Pupil	I	II	III	IV
Curvature			-0.049305	-0.025947	0.023374	0.041118
Distance	47.243203	33.824428	-4.528625	20.595786	-15.124912	

Table 6. Clear apertures and hole diameters of the mirrors for the four-spherical mirror system given by Table 5 (in cm)

	Mirror No.				
	Ent. Pupil	I	II	III	IV
Clear aperture	2.84	4.86	2.98	2.54	8.30
Hole diameter	0.00	3.28	0.00	0.00	5.60

VI. 결 론

본 논문에서는 micro-lithography를 위해 4개의 구면경만으로 이루어진 축소배율 $5\times$ 의 반사광학계를 설계하였다. 높은 분해능과 정확한 답은꼴 결상을 위해, Seidel 3차 수차내에서 4구면경계의 distortion free, flat field, aplanat 조건에 대한 해를 해석적으로 구하였다. 이 초기광학계의 성능향상을 위해 computer를 이용한 최적화 기법을 사용하였다. 초점거리 $f' = -1$ cm로 규격화된 4구면경계는 N.A. 0.25와 작은 image field diameter 0.495 mm를 갖고 있다. 초점거리 $f' = -10$ cm로 scale-up된 4구면경계는 3.3 mm의 image field diameter를 갖고 N.A. 0.15와 최적 상면 이동거리 허용치 $4 \mu\text{m}$ 이내에서 KrF excimer 레이저 광원($\lambda = 0.248 \mu\text{m}$)에 대해 회절한계 내로 수차가 보정되어 있다.

본 4구면 반사광학계는 scanning lithography^[5]에 사용될 수 있고 앞으로 분해능, DOF, field size 등 전반적 성능 향상을 위해선 반사면의 비구면화를 시도하는 것이 바람직하다.

감사의 글

본 논문에 대한 공홍진 교수님의 배려와 조언에 감사드리고 김종태씨와 이동희씨의 토의 및 조언에 감사료를 표합니다.

참고문헌

- [1] B. J. Lin, Proc. of SPIE, **922**, 256 (1988).
- [2] A. Offner, Opt. Eng., **14**, 130 (1975).
- [3] M. V. R. K. Murty, Opt. Eng., **14**, 326 (1985).
- [4] D. R. Shafer, Appl. Opt., **17**, 1072 (1978).
- [5] J. M. Sasian, Opt. Eng., **26**, 1197 (1987).
- [6] D. Korsch, Appl. Opt., **13**, 1767 (1974).
- [7] H. B. Chung and S. S. Lee, Opt. Eng., **24**, 317 (1985).
- [8] J. U. Lee and S. S. Lee, Opt. Eng., **27**, 491 (1988).
- [9] S. Y. Rah and S. S. Lee, Opt. Eng., **28**, 1014 (1989).
- [10] S. C. Park and S. S. Lee, Opt. Eng., **30**, 1023 (1991).
- [11] 김종태, 공홍진, 이상수, 한국광학회지 **2**, 127 (1991).
- [12] 이상수, "기하광학", (교학연구사, 서울, 1985).
- [13] M. Herzberger, "Modern Geometrical Optics", (Interscience Pub., New York, 1958).
- [14] W. T. Welford, "Aberrations of the Optical Systems", (Adams Hilger Ltd. Bristol, 1986).
- [15] D. A. Markle, Solid State Technol., **27**, 159 (1984).

Four Spherical Mirror Stepper Optics for Deep UV Micro-Lithography

Young Min Cho and Sang Soo Lee

Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology

Sung Chan Park

GoldStar Co., Ltd. Consumer Electronics Research Laboratory

(Received: October 19, 1991)

For the micro-lithography using a excimer laser beam($\lambda \leq 0.248 \mu\text{m}$), a mirror system consisting of four spherical surfaces with reduction magnification $5\times$ is designed. Initially the aplanat, flat field and the distortion free condition of the system are analytically investigated within Seidel 3rd order aberrations. And the computer-aided optimization technique has been employed for the further improved performance of the system. The final system has N.A. of 0.15 and image field diameter 3.3 mm, and has the diffraction-limited performance for KrF eximer laser beam.