≪연구논문≫ The Journal of Optical Society of Korea (Korean Edition) Volume 4, Number 3, September 1993

모든 3차 수차를 제거하여 얻은 극자외선 Lithography용 4-반사경 Holosymmetric System(배율=1)

조영민 · 이상수
한국과학기술원 물리학과

(1993년 8월 12일 받음)

극자외선 파장을 사용하는 micro-lithography를 위해 등배율을 갖는 4-반사경 holosymmetric system을 설계하였다. Holosymmetric system에서는 모든 차수의 코마와 왜곡수차가 영이 된다. 이 원리를 4-구면경계에 적용하여 등배율을 갖고 5개의 3차 수차가 모두 제거된 4-구면 반사경 holosymmetric system에 대해 유일한 해를 완전히 해석적인 표현으로 구하였다. 이 4-구면경계에 남아있는 고차 수차들을 보정하기위해 holosymmetric 성질을 유지하면서 비구면을 채용하였고 그결과 개구수 0.33과 image field diameter 7.6 mm 이내에서 극자외선 파장 0.248 μm(KrF 엑시머 레이저 빔)에 대해 거의 회절한계의 수차성능을 갖는 비구면 4-반사경 holosymmetric system를 얻었다.

I. 서 론

1959년 Dyson은 회절격자 선의 상을 투사시키는 광학계를 위해 등배율 catadioptric 광학계를 제안하였다.[1] 이 광학계는 하나의 오목 구면경과 하나의 평면-볼록 렌즈로 구성되어 있는데 렌즈의 볼록 구면은 구면경과 공심을 이루고 있다. 이 광학계에는 5개의 모든 3차 수차와 일부 고차 수차들이 제거되었고 고차의 비점수차와 색수차가 남아있다. Dyson의 catadioptric 광학계는 Wynne-Dyson 1 : 1 광학계[2,3]와 Markle-Dyson 광학계[4,5]로 발전하여 최근의 lithography에 응용되었다.

1975년에 Offner가 annular field 개념을 사용한 등배율 투사광학계를 위해 공심 2-구면경계를 제시하였다.[6] 이 반사경계 역시 처음에는 5개의 모든 3차 수차와 일부 고차 수차들이 제거되었지만 annular field 사용을 위해 3차 비점수차를 새로이 생성시켜 5차 비점수차와 상쇄되도록 하였다. 공심성(concentricity)과 annular ring field 개념은 축소배율(1/4)의 4-구면경계[7]에도 적용되었는데, 이 광학계를 UV optical lithography용으로 사용하기위해서는 수 개의 렌즈군을 추가하여 모든 3차 수차를 제거하여야 했다.

위 광학계들 이외에도 micro-lithography를 위해 많은 광학계들이 설계·연구되었는데 그중 렌즈계와 catadioptric 광학계는 극자외선 이하의 짧은 파장에 대해서 광학매질 선택의 제한, 색수차 문제, 렌즈에 의한 빛의 흡수 등의 문제점이 있으므로, 본 연구실에서는 이 문제를 근본적으로 피할 수 있는 반사경계에 대해 지속적으로 연구하여 왔다. 본 연구실에서는 지금까지 2개의 3차 수차, 3개의 3차 수차들이 제거된 망원경용 4-반사경계[8-10]에 이어서 KrF excimer 레이저 선을 사용하는 lithography 투영광학계를 위해 4개의 축소배율(1/5) 4-반사 광학계[11-14]를 연구 보고하였다. 이 4-반사경계에 대한 연구들[8-14]은 1차 광학적 설계, 3차 수차 해석 그리고 유한광선추적을 통한 최적화로 이루어지는 해석적인 설계방법에 의해 이루어졌다. 4개의 축소배율 4-반사경계[11-14]에서는 각각 4개의 3차 수차들을 제거한 초기 구면경계를 얻은 후 최적화 과정을 통해 성능을 향상시켰다. 이들 중 2개의 광학계는 비구면화를 통하여 큰 개구수에 대해 성능을 향상시켰다. 이 비구면경계 중 하나는 3차 수차 해석을 통해 3차 구면수차, 코마, 비점수차, 상면만곡수차를 제거한 4-구면경계를 초기광학계로 하여 최적화 과정을 거쳐 개구수 0.25와 상 지름 10 mm를 얻었다.[11] 이 과정에서 왜곡수차를 보정하기 위하여 비구면을 도입하였다. 다른 하나는 3차 코마, 비점수차, 상면만곡수차, 왜곡수차을 제거한 4-구면경계로부터 출발하고 비구면을 사용하여 구면수차를 보정함으로써 개구수 0.38과 상 지름 5.2 mm를 달성하였다.[12] 나머지 두 4-반사경계는 구면에 대해 최적화된 광학계

들로서 하나는 3차 구면수차, 코마, 비점수차, 왜곡수차를 제거한 4-구면경계로부터 출발하였고[13] 다른 하나는 3차 구면수차, 코마, 상면만곡수차, 왜곡수차를 제거한 4-구면경계로부터 출발하였다.[14] 이 두 4-구면경계는 작은 개구수를 갖는다.

본 연구에서는 4-반사경계의 수차 성능을 더 향상시켜 고분해능의 lithography용 stepper에 적합한 광학계를 얻기위해 4-반사경계에서 등배율을 갖고 5개의 모든 3차 수차(구면수차, 코마, 비점수차, 상면만곡수차, 왜곡수차)가 제거될 수 있는 조건을 해석적으로 연구하였다. 4-구면 반사경계에서 전반 2-구면경계와 후반 2-구면경계가 대칭적인 배치를 갖도록 하여 모든 차수의 코마와 왜곡수차가 제거된 holosymmetric system을 구성하였고 3차 수차 해석을 통해 3차 수차가 모두 제거된 등배율의 4-구면 반사경 holosymmetric system에 대한 유일한 완전해(a unique exact solution)를 얻었다. 잔류 고차 수차들을 보정하기위해 holosymmetric 성질을 유지하면서 비구면을 채용하였다. 이 반사경계는 기존의 4반사경계들[11,12]보다 광학계 크기가 작으므로 광학계 구현이 용이하다.

II. 모든 3차 수차가 제거된 등배율 4-구면경 holosymmetric system에 대한 완전해

등배율을 갖는 가장 간단한 광학계는 holosymmetric system이다. Holosymmetric system은 완전히 대칭적인 광학계로서 물체면(object plane)와 상면(image plane)을 포함한 광학계의 한 반쪽이 나머지 절반과 동일하다. 대칭 원리(symmetry principle)에 의해 holosymmetric system의 전반부와 후반부의 코마와 왜곡수차는 서로 크기는 같고 부호가 정반대이므로 전체 광학계에는 이 수차들이 전혀 없다. 즉 Seidel 수차 중 모든 차수의 코마와 왜곡수차가 모두 영이다.[15]

유한물체점을 갖는 4-반사경계의 전형적인 형태가 그림 1에 나타나 있다. 구면경의 곡률(c_i)과 구면경 사이의 거리들(d_i)에대해 다음 조건을 만족할 때 4-구면경계는 holosymmetric system이 된다.

$$d_0=d_4,\ d_1=d_3,\ c_1=-c_4,\ c_2=-c_3 \qquad (1)$$

이 4-구면경 holosymmetric system에는 두 가지 물리적 경우가 있다. 하나는 배율 $M=-1$을 갖고 광학계의 중앙에 조리개(stop)가 있는 non-relay 광학계이며, 다른 하나는 배율 $M=+1$을 갖고 전반 2-구면경계의 제 1 초점에 조리개(stop)가 있는 relay 광학계이다. 두 경우 모두

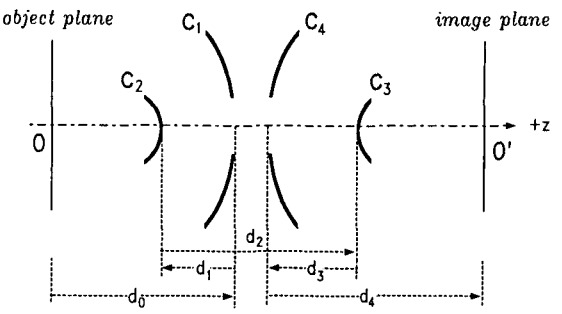
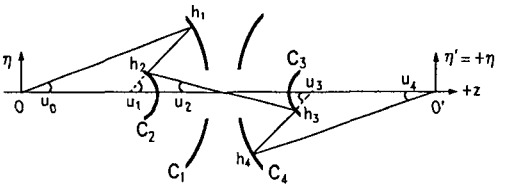
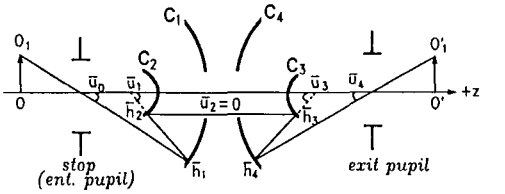


그림 1. Typical configuration of the four-spherical mirror system with Cassegrainian-inverse Cassegrainian type.



(a) marginal ray tracing



(b) principal ray tracing

그림 2. The paths of marginal ray and principal ray in the holosymmetric four-spherical mirror system with magnification $M=+1$. The stop lies at the first focal plane of the front two-mirror system.

코마와 왜곡수차에 대한 3차 수차가 영이됨을 쉽게 증명할 수 있다. 또 두 경우중 relay 4-구면경계($M=+1$)에 대해서만 모든 3차 수차들이 제거되는 해석적인 해가 존재함을 알 수 있었다.

4-구면경 holosymmetric relay system($M=+1$)의 주변광선 추적과 주광선 추적을 그림 2에 나타내었다. 각 면간 매질(공기)의 굴절률 $n_0=1$, $n_1=-1$, $n_2=1$, $n_3=-1$, $n_4=1$에 대해 주변광선의 근축입사고(h_i)와 근축각(u_i)을 Gauss 괄호[ ][16,17]를 사용하여 표현하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&h_3=-h_2=-u_2[d_2/2],\\
&h_4=-h_1=-u_2[d_2/2,\ -2c_2,\ -d_1],\\
&n_3u_3=n_1u_1=u_2[d_2/2,\ -2c_2],\\
&n_4u_4=n_0u_0=u_2[d_2/2,\ -2c_2,\ -d_1,\ 2c_1].
\end{aligned}
\tag{2}
$$

식 (2)에 의해 주변광선의 굴절불변량(A_i)은 다음과 같이 표현 된다.

$$
\begin{aligned}
&A_3=A_2=-u_2[d_2/2,\ -c_2],\\
&A_4=A_1=\ -u_2[d_2/2,\ -2c_2,\ -d_1,\ c_1].
\end{aligned}
\tag{3}
$$

조리개가 전반 2-구면경계의 제 1 초점에 있으므로 주광선은 후반 2-구면경계에 평행하게 입사하여 후반 2-구면경계의 제 2 초점을 지나게된다. 따라서 주광선의 입사고($\overline{h_i}$)와 근축각($\overline{u_i}$)을 Gauss 괄호를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$
\begin{aligned}
&\overline{h}_3=\overline{h}_2,\\
&\overline{h}_4=\overline{h}_1=\overline{h}_3[2c_2,\ d_1],\\
&\overline{u}_2=0,\\
&n_3\overline{u}_3=-n_1\overline{u}_1=\overline{h}_3[2c_2],\\
&n_4\overline{u}_4=-n_0\overline{u}_0=\overline{h}_3[2c_2,\ d_1,\ -2c_1].
\end{aligned}
\tag{4}
$$

식 (4)로부터 주광선의 굴절 불변량(B_i)는 다음과 같이 표현된다.

$$
\begin{aligned}
&B_4=-B_1=-\overline{h}_3[2c_2,\ d_1,\ -c_1],\\
&B_3=-B_2=\overline{h}_3[c_2]
\end{aligned}
\tag{5}
$$

따라서, 식 (1), (2), (3), (5)로부터 구면수차(S_I), 코마(S_{II}), 비점수차(S_{III}), 상면만곡수차(S_{IV}) 그리고 왜곡수차(S_V)에 대한 5개의 3차 수차계수[18,19]를 구하면 다음과 같이 4개의 독립 설계 변수들 d_1, d_2, c_1, c_2의 Gauss 괄호들로 표현된다.

$$
\begin{aligned}
S_I=4u_2^4(&c_2[d_2/2]^2[d_2/2,\ -c_1]^2-c_1[d_2/2,\ -2c_1,\ -d_1]^2\\
&[d_2/2,\ -2c_1,\ -d_1,\ c_1]^2),
\end{aligned}
\tag{6}
$$

$$
S_{II}=0,
\tag{7}
$$

$$
\begin{aligned}
S_{III}=4u_2^2\overline{h}_3^2(&c_2[d_2/2]^2[c_1]^2-c_1[d_2/2,\ -2c_1,\ -d_1]^2\\
&[2c_1,\ d_1,\ -c_1]^2),
\end{aligned}
\tag{8}
$$

$$
S_{IV}=4H^2(c_1-c_2),
\tag{9}
$$

$$
S_V=0.
\tag{10}
$$

여기서, H는 Lagrange 불변량이다. 식 (6)~(10)에서 보듯이 배율 $M=+1$을 갖는 4-구면경 holosymmetric relay system의 코마와 왜곡수차의 3차 수차계수(S_{II}와 S_V)는 완전히 영이다. 그러므로 모든 3차 수차가 제거된 광학계를 얻기 위해서는 나머지 3차 수차들인 구면수차(S_I), 비점수차(S_{III}) 그리고 상면만곡수차(S_{IV})에 대한 계수들이 동시에 영이되는 해를 구하면 된다. 즉, 식(6), (8), (9)에서 $S_I=S_{III}=S_{IV}=0$의 방정식을 풀어야한다. c_1을 광학계의 scaling을 위한 규격화 인수로 취하면 3개의 독립변수 d_1, d_2, c_2에 대해 3개의 방정식을 갖게되므로 남는 자유 설계변수는 하나도 없게 된다. 약간의 대수 계산으로부터 위 고차 대수방정식들에 대해 다음의 완전해가 유일하게 물리적으로 광학계 구성이 가능하였다.

$$
d_1=\frac{-1+\sqrt{5}}{2c_1}d_2=-d_1,\ c_2=c_1,\quad \text{단, } c_1<0
\tag{11}
$$

이 광학계에서 물체로부터 첫번째 구면경까지의 물체거리는

$$
d_0=-\frac{3+\sqrt{5}}{4c_1}
\tag{12}
$$

이다. 본 해는 3차 수차내에서 어떤 수치적 근사도 없이 완전히 해석적인 연구에 의해서만 얻어진 완전해로서 5개의 3차 수차를 모두 영으로 한다.

III. 유한수차에 대한 수차해석

앞 절의 완전해에서 첫번째 구면경의 곡률반경을 $r_1=1/c_1=-49.442674$ cm로 정하여 초점거리 $f=-10$ cm의 실용적인 크기를 갖는 모든 3차 수차가 제거된 4-구면경 holosymmetric system을 표 1과 같이 구성하였다. 이 완전해는 Cassegrainian-inverse Cassegrainian 형의 4-구면경 광학계로 구현된다.

전혀 최적화를 시키지 않은 이 4-구면경 holosymmetric system에 대한 잔류 유한광선수차를 개구수 0.15와 반시계각 1.1°에 대해 그림 3에 나타내었다. 코마(OSC), 비점수차, 상면만곡수차, 왜곡수차 등의 비축수차들은 그림 3의 (b), (c), (d)에서 보듯이 잘 보정이 되어 있으나 기대와는 달리 구면수차(그림 3. (a))는 6 μm 정도의 큰 값을 갖고 있어 고분해능을 얻기가 어렵다. 이처럼 큰 유한 구면수차는 개구수 0.15에 대해서 5차 이상의 고차 구면 수차가 많이 남아 있다는 것을 의미한다. 이 잔류 고차 구면수차를 보정하기 위하여 광학계의 holosymmetric 성질(식 (1))을 그대로 유지시키면서 먼저 구면경만을 사용하여 최적화시켰다. 그 결과 개구수 0.15와 반시계각 1.1°내에서 극자외선 파장 0.248 μm(KrF excimer laser 선)에 대해 회절한계의 성능을 갖는 4-구면경 holosym-

표 1. The design data of the holosymmetric four-spherical mirror system with all zero third order aberrations. The system has the practical size of $f'=-10$ cm and the stop lies at the first focal point of the front two-mirror system.

	Mirror No.					
	Object	Stop	I	II	III	IV
Radius of Curvature(cm)			−49.442674	−49.442674	49.442674	49.442674
Distance(cm)	19.999999	44.721358	−30.557280	30.557280	−30.557280	

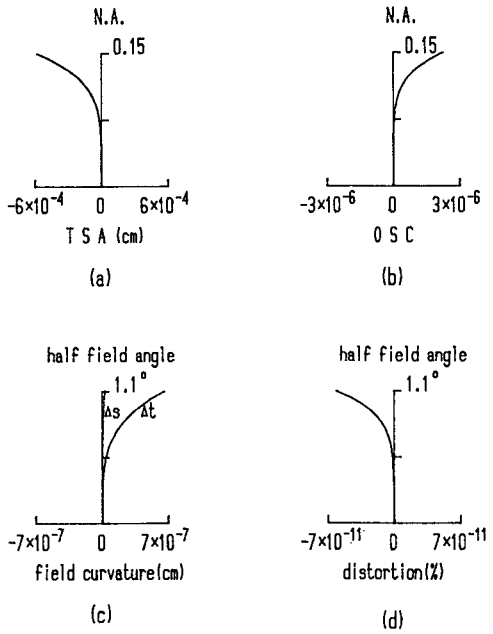


그림 3. The residual finite ray aberrations of the holosymmetric four-spherical mirror system($f'=-10$ cm) with all zero third order aberrations (TSA: transverse spherical aberration, OSC: offense against the sine condition, Δt: tangential ray aberration, Δs: sagittal ray aberration).

metric system을 얻을 수 있었다. 구면경만을 사용한 최적화로는 더 이상의 큰 개구수에 대해 회절한계 성능을 얻을 수 없었는 데 이는 엄격한 대칭성에 의한 설계 변수의 부족과 많은 잔류 고차 구면수차에 기인한다.

IV. 잔류 고차 수차 보정을 위한 반사면의 비구면화

높은 분해능을 갖는 lithography용 광학계는 적절히 짧은 파장의 광원과 큰 개구수를 필요로 하므로 큰 개구수에 대한 고차 수차의 보정은 매우 중요하다. 표 1의 4-구면경계는 모든 3차 수차가 제거되었지만 고차 수차 특히 고차 구면수차가 여전히 남아있어 광학계의 분해능을 제한하고 있다.

일반적으로 비구면은 구면수차 보정에 유리하고, 비구면 도입은 새로운 설계 변수들(비구면 계수)을 준다. 따라서 표 1의 4-구면경계에 비구면을 도입하여 분해능 향상을 이루고자 한다. 비구면 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$z=\frac{cy^2}{1+\sqrt{1-c^2y^2}}+a_4y^4+a_6y^6+a_8y^8+a_{10}y^{10}+\cdots \quad (13)$$

여기서 y는 주변 광선의 입사고, c는 각 반사면의 곡률이며 $a_i(i=4,6,8,10)$는 접구면으로부터의 변형에 대한 비구면 계수이다. 비구면 도입은 감쇄 최소 자승법에 근거한 최적화 기법[20]을 컴퓨터를 이용하여 적용함으로써 이루어졌고 4개의 반사면이 모두 비구면화되었다. 전후반 2-반사경계에 대칭적인 비구면을 도입하여 holosymmetric 성질을 그대로 유지시키면서 최적화를 시도하였다. 극자외선 파장 0.248 μm에 대해 회절한계 성능을 갖는 비구면 4-반사경 holosymmetric system의 설계 자료가 표 2에 나타나있고 반사경의 clear aperture와 hole diameter가 표 3에 제시되어 있다. 표 2의 반사경계의 기하학적 배치가 4개의 축상광선 추적과 함께 그림 4에 그려져 있다. 이 반사경계는 지름비 0.57의 중앙부 차폐로 인해 광축상에서 33%의 광량이 통과하지 못한다. 이 반사경계는 기존의 4-반사경계들보다 TCL(total conjugate length)과 제일 큰 반사경의 clear aperture 등의 광학계 크기가 작으므로 광학계 구현이 용이하다.

비구면 반사경계의 잔류 유한 광선 수차는 회절한계 성능을 만족시킬 만큼 충분히 작다(그림 5). 구면 수차가 그림 5의 (a)에서 보듯이 현저하게 줄어 들었다. 초점거리 $f'=-10$ cm를 갖는 본 광학계의 개구수는 0.33이고 full field angle은 2.2°로서 상지름 7.6 mm에 해당한다. 그림 5 (b)와 (d)에 나타난 OSC(offense against the sine con-

표 2. The design data of the holosymmetric ashperized four-mirror system($f'=-10$ cm) using DUV wavelength of 0.248 μm(KrF excimer laser beam).

	Mirror No.					
	Object	Stop	I	II	III	IV
Radius of Curvature(cm)			-49.442674	-49.442674	49.442674	49.442674
Distance(cm)	19.999977	44.721308	-30.557246	30.557246	-30.557246	
$a_4(cm^{-3})$			0.371789×10^{-10}	0.300297×10^{-8}	-0.300297×10^{-8}	-0.371789×10^{-10}
$a_6(cm^{-5})$			-0.451892×10^{-11}	-0.268369×10^{-10}	0.268369×10^{-10}	0.451892×10^{-11}
$a_8(cm^{-7})$			-0.154637×10^{-14}	0.884425×10^{-11}	-0.884425×10^{-11}	0.154637×10^{-14}
$a_{10}(cm^{-9})$			-0.245584×10^{-17}	0.218286×10^{-14}	-0.218286×10^{-14}	0.245584×10^{-17}

표 3. Diameters of clear apertures and holes of the mirrors for the system given by Table 2 (unit : cm).

	Mirror No.				
	Stop	I	II	III	IV
Clear Aperture	13.9835	44.0400	11.9595	11.9595	44.0400
Hole Diameter	0.0000	25.0150	0.0000	0.0000	25.0150

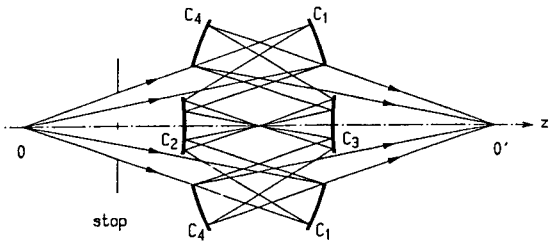


그림 4. Configuration of the aspherized four-mirror system($f'=-10$ cm). This system has N.A. of 0.33, TCL($\overline{OO'}$) 98.8855 cm, and the largest clear aperture diameter 44.0400 cm. The stop lies at the first focal plane of the front two-mirror system.

dition)와 왜곡수차는 코마와 왜곡수차를 전혀 갖지않는 holosymmetric system의 특성을 잘 보여주고있다. 왜곡수차는 최대 시계에서 약 1.1×10^{-8}%, 즉 4.3×10^{-4} nm로(그림 5 (d)) 아주 작은 값을 갖고 있어 lithography 광학의 요구를 충분히 만족한다[21]. 그림 5의 (e)는 전 시계에 걸쳐 광학계를 통과하는 빛의 상대적 광량(축상 광량을 100%로 할 때)을 나타내는 데 반시계각 0.77°에서 93%, 최대시계 1.1°에서 90%이므로 lithography 광학에서 필요로하는 조도 균일에 근접한 값이다. 이 때 사용한 광선 수는 각 시계각에 대해 472개이다. Spot diagrams이 3개의 반 시계각과 5개의 상면 위치에 대해

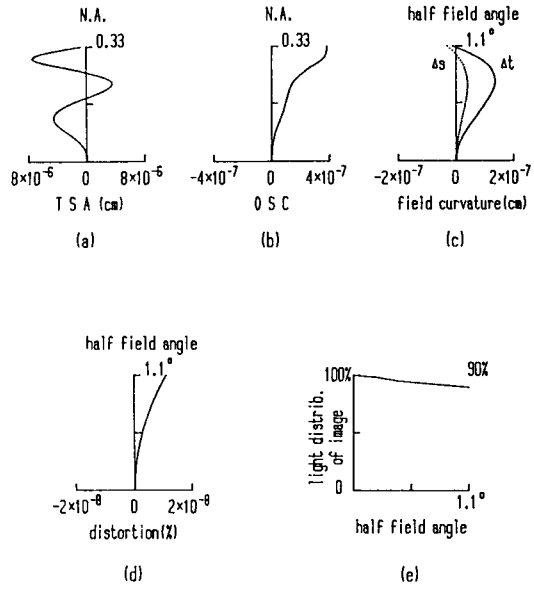


그림 5. (a), (b), (c), (d) are the residual finite ray aberrations of the aspherized four-mirror system ($f'=-10$ cm), and (e) relative distribution of light in the image plane (TSA: transverse spherical aberration, OSC : offence against the sine condition Δt: tangential ray aberration, Δs: sagittal ray aberration).

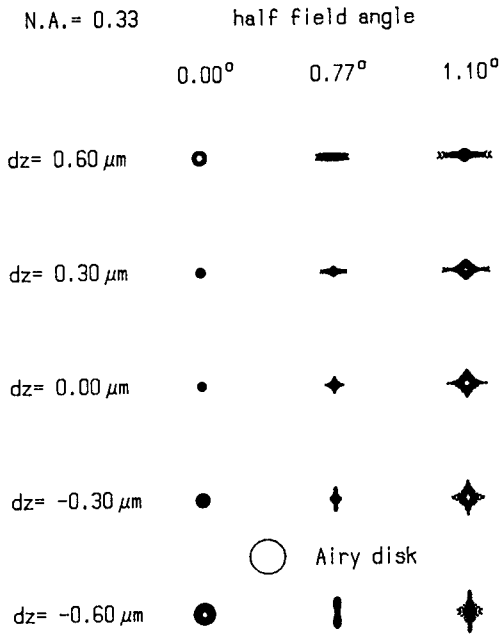


그림 6. Spot diagrams of the aspherized four-mirror system using DUV wavelength of 0.248 μm (KrF excimer laser beam) for three half field angles at five defocused image positions. The circle shows the size of the Airy disk (radius= 0.46 μm) for wavelength of 0.248 μm.

그림 6에 그려져있다. −0.3 μm로 defocus된 상면 위치에서 모든 시계에 대해 spot들이 모두 0.46 μm의 반경의 원 안으로 들어 가는데 이 원은 파장 0.248 μm(KrF 엑시머 레이저 광)에서 0.33의 개구수를 갖는 원형 개구(circular aperture)에 대한 Airy disk를 나타낸다. 파장 0.248 μm에서 회절효과가 고려된 MTF곡선을 3개의 반시계각에 대해 그림 7에 나타내었다. 2번째와 3번째 반사면에의한 중앙부 차폐로 인해 차폐가 없는 경우보다 MTF값이 낮은 공간주파수 영역에서는 떨어지고 높은 공간주파수 영역에서는 올라간다. 반시계각 0.0°(광축상)의 MTF 곡선은 지름비 0.57의 중앙부 차폐를 갖는 개구수 0.33의 회절한계 곡선과 일치하고 다른 시계의 곡선들도 이 회절한계 곡선에 근접해 있다. 공간주파수 380 cycles/mm에서 0.5의 MTF 값을 얻을 수 있는 데 이 주파수는 1.32 μm의 분해능에 해당한다. 그러므로 개구수 0.33와 전 시계각 2.2°에 대해 거의 회절한계의 성능을 얻고 1.32 μm의 분해능과 초점심도 1.2 μm를 얻는다.

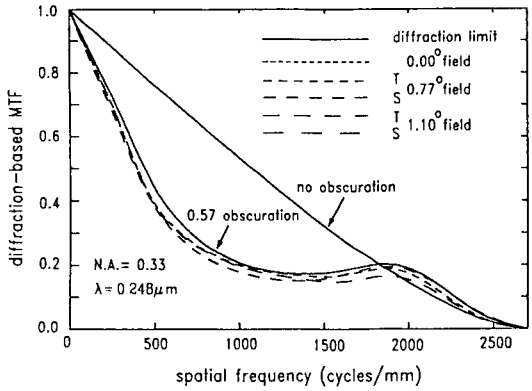


그림 7. MTF of the aspherized four-mirror system with the linear central obscuration ratio of 0.57 for three half field angles of 0.00°, 0.77° and 1.10°. The diffraction limit MTF curves are plotted for the case with 0.57 obscuration and that with no obscuration.

V. 결 론

본 연구에서는 holosymmetric 광학계의 대칭성 원리(코마와 왜곡수차를 전혀 갖지 않는다)를 이용하고 Gauss광학적 설계와 3차 수차 해석으로 이루어진 해석적인 설계방법을 사용하여 5개의 3차 수차가 모두 제거된 등배율의 holosymmetric 4-구면 반사광학계를 구하였다. 이 구면경계는 완전히 해석적인 표현으로 유일하게(unique solution) 얻어졌다. 고차 잔류 수차 보정을 위해 비구면화를 통해 극자외선 lithography를 위한 holosymmetric 4-반사 비구면 광학계를 설계하였다. 이 반사경계는 개구수 0.33과 image field diameter 7.6 mm 이내에서 극자외선 파장 0.248 μm(KrF 엑시머 레이저 광)에 대해 Airy disk 안에 모든 광선이 집중하는 수차 성능을 갖고 광축상에서는 회절한계의 수차성능을 갖는다. MTF 값 0.5에 대한 공간주파수는 380 cycles/mm이다.

앞으로 holosymmetric system의 엄격한 대칭성에서 벗어나, 전후반 2-반사경계가 비대칭적이고 모든 3차 수차가 제거된 등배율 4-구면경 non-holosymmetric system를 연구함으로써 보다 향상된 분해능을 갖는 광학계를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

금성사 영상미디어 연구소의 박성찬 박사 그리고 한국과학기술원의 김종태 박사와 이 동희씨의 토의 및 조언에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

[1] J. Dyson, "Unit magnification optical system without Seidel aberrations", J. Opt. Soc. Am. **49**, 713 (1959).

[2] A. C. Stephanakis and D. I. Rubin, "Advances in 1 : 1 Optical Lithography", SPIE, **772**, 74 (1987).

[3] F. N. Goodall and R. A. Lawes, "Excimer Laser Photo-Lithography with 1 : 1 Wynne-Dyson Optics", SPIE, **922**, 410 (1988).

[4] A. Grenville, et al., "Markle-Dyson optics for 0.25 μm lithography and beyond", J. Vac. Sci. Technol. B **9**, 3108 (1991).

[5] R. M. H. New, G. Owen, and R. F. W. Pease, "Analytical optimization of Dyson optics", Appl. Opt. **31**, 1444 (1992).

[6] A. Offner, "New Concepts in Projection Mask Aligners", Opt. Eng. **14**, 130 (1975).

[7] D. R. Shafer et al., "Optical relay system with magnificatiom", U.S. Patent 4,747,678, May 31, 1988.

[8] H. B. Chung and S. S. Lee, "Aplanatic four spherical mirror system", Opt. Eng. **24**, 317 (1985).

[9] J. U. Lee and S. S. Lee, "All-spherical four-mirror telescopes corrected for three Seidel aberrations", Opt. Eng. **26**, 491 (1988).

[10] S. Y. Rah and S. S. Lee, "Four-spherical-mirror zoom telescope continuesly satisfying the aplanatic condition", Opt. Eng. **28**, 1014 (1989).

[11] S. C. Park and S. S. Lee, "Four-Mirror Optical System for UV Submicrometer Lithography", Opt. Eng., **30**, 1023 (1991).

[12] J. T. Kim, H. J. Kong, and S. S. Lee, "Improved four-mirror optical system for deep-ultraviolet submicrometer lithography", Opt. Eng. **32**, 536 (1993).

[13] 김종태, 공홍진, 이상수, "4개의 수차가 보정된 유한 물체점을 갖는 4-구면 반사경계의 설계 및 수차 해석", 한국광학회지, **2**, 127 (1991).

[14] 조영민, 이상수, 박성찬, "Deep UV 마이크로 리소그라피용 Stepper를 위한 4구면 반사경계", 한국광학회지, **2**, 186 (1991).

[15] R. Kingslake, *Lens Design Fundamentals* (Academic Press, 1978, New York), Chap. 7.

[16] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics* (Interscience Publisher, 1958, New York).

[17] K. Tanaka, "Paraxial theory in Optical design in terms of Gaussian brackets", in *Progress in Optics,* Vol. **XXII**, E. Wolf ed., (North-Holland, 1986, Amsterdam).

[18] W. T. Welford, *Aberrations of the Optical Systems* (Adams Hilger Ltd., 1986, Bristol).

[19] 이상수, **기하광학**, 교학연구사, 1985 (서울).

[20] T. H. Jamieson, *Optimization Techniques in Lens Design,* (American Elsevier Publishing company, Inc., 1971, New York).

[21] B. J. Lin, "The Path to Subhalf-Micrometer Optical Lithography ", SPIE, **922**, 256 (1988).

Holosymmetric 4-Mirror Optical System(Unit Maginification) for Deep Ultraviolet Lithography Obtained from the Exact Solution of All Zero Third Order Aberrations

Young Min Cho and Sang Soo Lee
Department of Physics, Korea Advanced Institute of Science and Technology
Taejon 305-701, Korea

(Received: August 12, 1993)

A holosymmetric four-mirror system with unit magnification is designed for use in the micro-lithography using a deep ultraviolet wavelength of 0.248 μm(KrF excimer laser line). In the holosymmetric system all orders of coma and distortion are zero. By applying this principle to the 4-spherical mirror system, we have obtained only one exact solution for the unit magnification holosymmetric four-spherical mirror system with all zero third order aberrations. For correction of the residual higher order aberrations of the system, aspherization is introduced keeping the holosymmetric properties. We have obtained near diffraction-limited performance for the wavelength of 0.248 μm within N.A. of 0.33 and image field diameter of 7.6 mm.