

극자외선 영역에서 곡면 DOEs에 관한 연구

최성을[†] · 이용우 · 권명희

인천대학교 자연과학대학 물리학과
Ⓣ 402-749 인천광역시 남구 도화동 177번지

김용후

한국과학기술원
Ⓣ 305-701 대전광역시 유성구 구성동 373-1번지

(2005년 3월 15일 받음, 2005년 7월 13일 수정본 받음)

본 연구에서는 여러 형태의 회절광학요소의 field performance를 조사하였다. Zemax 프로그램을 이용하여 다섯 개의 회절광학요소, 즉 투과형 평면 DOE, 투과형 곡면 DOE, 반사형 포물면 DOE, 반사형 평면 DOE, 그리고 반사형 곡면 DOE를 설계하였다. 그리고 이들 회절광학요소에 극자외선 파장인 13 nm와 가시광선 파장인 632.8 nm를 적용시켰다. 이들 DOEs에 사입사 조명시의 회절 한계 하에서의 시야각의 크기 및 파장에 따른 특성, 그리고 주된 수차의 형태를 상호분석 비교하였다. 회절한계 하에서 투과 및 반사 형태 모두에서 곡면 DOEs의 시야각이 평면 DOEs의 시야각보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있었다. 또한 사입사 경우에 평면 DOEs와 포물면경의 주된 수차는 코마이머, 곡면 DOEs의 주된 수차는 비점수차와 상면만곡의 혼합된 형태로 나타남을 알 수 있었다. 측정을 통하여 얻은 시야각의 크기와 수차의 종류가 이론적인 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 극자외선영역에서 평면형 DOEs에 비해 곡면형 DOEs의 field angle의 증가율이 가시광선에서보다 더 효과적임을 알 수 있었다.

주제어 : Curved-DOEs, EUV, Diffraction limited field angle, Oblique incidence.

I. 서 론

지난 40년 동안 기존의 광학요소를 대체할 회절광학요소(diffractive optical elements, DOEs)에서는 디자인적인 향상,^[1] 효과적인 기록매질과 가공기술^[2], 그리고 다양한 응용에의 적용^[3] 등의 획기적인 발전이 있었다. 이러한 회절광학요소의 응용 분야로는 beam shaping,^[4] 광학 데이터 처리,^[5,6] optical interconnection^[7] 등을 들 수 있다. 현재의 반도체 DRAM이나 디지털 상 처리 등과 같은 광전자 산업에서는 집적회로를 위한 점차적으로 높은 픽셀 밀도를 요구한다. 1G DRAM 칩을 위해서는 0.10-0.18 μm 의 선폭이 요구되며, 이는 MTF(modulation transfer function)곡선의 값 0.4에서 5,000-3,000 cycles mm^{-1} 에 해당되는 분해능으로, 광학계에서 이와 같은 분해능을 얻기 위해서는 ArF 레이저 파장(193 nm)보다 짧은 파장을 사용하여야만 한다. 왜냐하면 원형 개구(circular aperture)에 대한 회절한계하의 Rayleigh 분해능($\epsilon_R = k_1 \lambda / NA$)은 주어진 NA에 대해서는 파장에 비례하기 때문이다. 또한 분해능과 더불어 고려해야 할 사항으로는 초점심도(depth of focus, $DOF = k_2 \lambda / NA^2$)이다. DOF 역시 파장에 비례하므로 파장 13 nm에서의 DOF는 193 nm(ArF laser)에서보다 약 1/15 정도로 줄어든다. 그리고 극자외선(extreme ultraviolet, EUV) microlithography에서의 DOF는 0.5 μm 보다 큰 것을 요

구한다.^[8]

DOF 값이 주어지면, 위의 ϵ_R 과 DOF로부터 레일리 분해능 $\epsilon_R = \sqrt{(DOF)(k_1^2/k_2)}\sqrt{\lambda}$ 을 얻을 수 있으며, 주어진 DOF인 경우 파장이 짧을수록 우리가 원하는 작은 선폭을 얻을 수 있기 때문에 가능하면 짧은 파장의 광원을 필요로 한다.

Soft X-ray lithography를 위한 충분한 flux를 제공할 수 있는 source로는 synchrotron bend magnets and undulators, free-electron lasers, laser-produced plasmas, 그리고 tokamaks 등을 들 수 있다. 이 중에서 masks에서 요구되는 빔의 균일성과 결맞음 성을 만족시키기 위한 특정한 condenser system을 위해서 laser-produced plasmas source가 현재 가장 많이 사용되고 있다.

Lawrence Livermore National Laboratory에서는 평판 target (Au 또는 Sn 등)에 짧은 펄스 레이저(laser-diode-pumped Nd:YLF laser, $\lambda = 1.053 \mu\text{m}$)를 약 $3 \times 10^{11} \text{ W/m}^2$ 의 intensity로 입사시킬 때 파장이 약 13nm인 극자외선을 발생시키며, 이 파장은 극자외선 lithography에 주로 응용되고 있다.^[9-14]

이 파장에서의 빛은 공기 중에서 많은 흡수가 일어나므로 source target에서 wafer까지 진공으로 밀봉된 system이 요구될 뿐만 아니라, 물질에 의한 흡수가 매우 심각하므로 반드시 반사형의 시스템을 고려하여야 한다. 최근에 개발된 고반사인 다층 양자 우물 계인 Si-Mo system^[15]은 이런 문제점을 해결한 경우로 볼 수 있다. 광축에 대해 비대칭인 off-set three mirror system,^[16,17] four mirror system,^[18] 또는 five

[†]E-mail: schoi@incheon.ac.kr

mirror system^[19]인 경우, 원천적으로 1 nm 정도의 off-axis 수차를 제거하는데 어려운 문제를 낳고 있다.

일반적으로 평면 DOE는 수직 입사 시보다 사입사 조명 (oblique incidence beam)시에 보다 많은 수차를 유발하고 시야각에 제한을 받게 된다. 따라서 이런 문제점을 해결하기 위해서 구면 위에 광학회절요소를 설계하고 이의 성능 향상을 위한 연구 논문들이 발표되었다.^[11,20,21] 특히 위상이동 점 회절 간섭계에서 다층코팅의 마스크를 테스트하기 위해서 사입사 조명을 반사형 DOE에 적용하는 경우가 많다.^[22]

본 연구에서는 다양한 형태의 회절광학요소의 field performance와 수차를 극자외선 파장인 13 nm에 대해서 적용시키고, 파장에 따른 비고를 위해서 가시광선 파장인 632.8 nm를 도입하였다. 본 연구에서 설계하고 특성을 평가한 여러 형태의 회절광학요소로는 투과형 평면 DOE, 투과형 곡면 DOE, 포물면경, 반사형 평면 DOE, 그리고 반사형 곡면 DOE 등이며, Zemax 광학 모델링 프로그램을 사용하였다.

II. 이 론

비광축 입사에 대한 Fresnel zone plate에 대한 연구는 Young^[11]에 의해 연구되었다. 그림 1과 같이 평면파가 입사각 α 로 평면 Fresnel zone plate에 입사하는 경우를 고려하고, n 번째 영역(zone)의 반경을 r_n 이라고 하자.

그림 1에서 주변광선(marginal ray)과 광축광선(axial rays)의 광 경로차(OPD)는 다음과 같이 주어진다.^[20]

$$OPD = S_1 + S_2 - d \approx \frac{r_n^2}{2f} - \frac{r_n^4}{8f^3} + \left[\frac{r_n^3 \alpha}{2f^2} - \frac{r_n^2 \alpha^2}{2f} - \frac{r_n^2 \alpha^2}{4f} \right] \quad (1)$$

우변의 처음 두 항은 $\frac{\lambda}{2}$ 과 같으며, 괄호 속의 나머지 항들은 Seidel 수차의 계수와 형태가 같다. 따라서 각각의 항들은 코마($W_{131} = \frac{\alpha r_n^3}{2f^2 \lambda}$), 비점수차($W_{222} = \frac{\alpha^2 r_n^2}{2f \lambda}$), 그리고

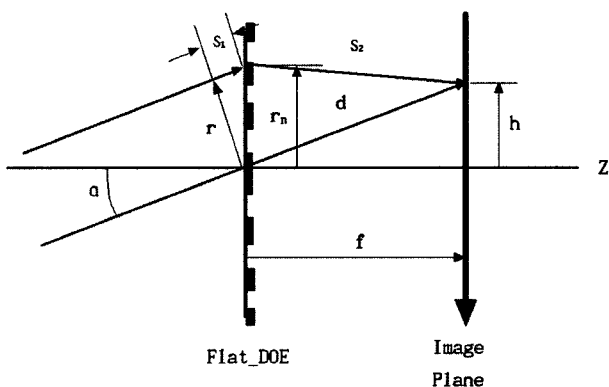


그림 1. 사 입사(입사각 α)시의 투과형 평면 DOE의 모식도.

상면만곡($W_{220} = \frac{\alpha^2 r_n^2}{4f \lambda}$)으로 취급되어 질 수 있으며, 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$(W_{131} + W_{222} + W_{220})\lambda = \frac{r_n^3 \alpha}{2f^2} - \frac{r_n^2 \alpha^2}{2f} - \frac{r_n^2 \alpha^2}{4f} \quad (2)$$

코마를 나타내는 우변의 첫 번째 항은 각 α 가 매우 작은 경우에 주된 수차가 된다. 따라서 시야각이 매우 작은 경우에는 코마 항만이 남게 되어 다음 식 (3)과 같이 주어진다.

$$W_{131}\lambda = \frac{r_n^3 \alpha}{2f^2} \quad (3)$$

곡면 위의 수정된 DOE에 관한 연구는 이미 Milster 등^[20]에 의하여 소개되어 있다. 초점거리 f 인 홀로그램을 곡률반경 f 인 구면 위에 설치함으로써, 모든 시야각으로부터 들어오는 시준 광원의 상에서 코마가 제거된 상을 얻을 수 있었다. 그림 2는 사입사 조명시의 투과형 곡면 DOE의 모식도를 나타낸다.

그림 2에서 주변광선(marginal ray)과 광축광선(axial rays)의 광 경로차(OPD)는 다음과 같이 주어진다.

$$OPD = S_1 + S_2 + S_3 - d \approx \frac{r_n^2}{2f} - \frac{r_n^4}{8f^3} - \left[\frac{r_n^2 \alpha^2}{2f} + \frac{r_n^2 \alpha^2}{4f} \right] \quad (4)$$

이 식은 앞의 식 (1)에서 코마 항이 빠진 것 외에는 같음을 알 수 있다.

투과형 곡면 DOE의 광축 밖 OPD 수차는 다음 식 (5)와 같다.

$$(W_{222} + W_{220})\lambda = -\frac{r_n^2 \alpha^2}{2f} - \frac{r_n^2 \alpha^2}{4f} \quad (5)$$

위의 식 우변 항은 각각 비점수차와 상면만곡을 나타내며, 이들은 1차원에서는 구별이 되지 않는다. 따라서 여기서는 단순히 두 항을 합친 혼합된 형태의 투과형 곡면 DOE의 OPD 수차는 다음과 같다.

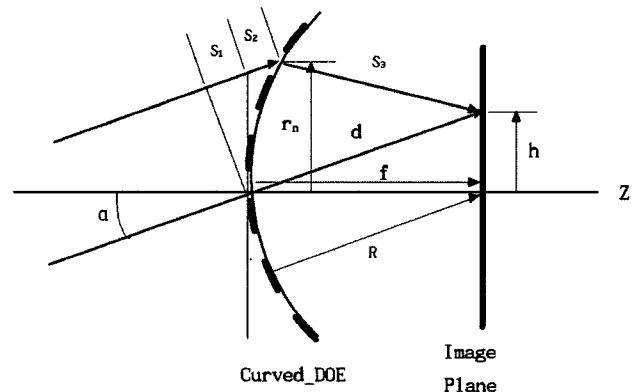


그림 2. 사 입사(입사각 α)시의 투과형 곡면 DOE의 모식도.

$$(W_{222} + W_{220})\lambda = -\frac{3\alpha^2 r_n^2}{4f} \quad (6)$$

만일 회절 한계 하에서 수차를 고려한다면 각 OPD 수차는 최대 $\lambda/4$ 가 되어야한다.

식 (4)와 (6)에서 시야각과 파장 사이의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$W_{131}\lambda = \frac{\alpha r_n^3}{2f^2} = \frac{\lambda}{4} \quad (7)$$

$$(W_{222} + W_{220})\lambda = \frac{3\alpha^2 r_n^2}{4f} = \frac{\lambda}{4} \quad (8)$$

식 (7)과 (8)로부터 투과형 평면 DOE와 투과형 곡면 DOE의 회절한계 시야각(α)은 각각 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\alpha = \frac{f}{2 r_n^3} \lambda \quad (9)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{f}{3}} \frac{1}{r_n} \sqrt{\lambda} \quad (10)$$

식 (9)로부터 투과형 평면 DOE에서는 시야각(α)은 파장(λ)와 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 그러나 식 (10)으로부터 투과형 곡면 DOE에서는 시야각(α)이 파장의 제곱근($\sqrt{\lambda}$)에 비례한다는 것을 알 수 있다. 또한 회절 한계 하의 투과형 곡면 DOE의 광축 밖의 시야각(α_c)과 투과형 평면 DOE의 광축 밖의 시야각(α_f)의 비율을 C 라고 정의하면 C 는 식 (11)과 같이 주어진다.

$$C = \frac{\alpha_c}{\alpha_f} \propto \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (11)$$

여기서 α_c 와 α_f 는 각각 투과형 곡면과 평면 DOE에서의 회절한계 시야각이다. 또한 두 시야각의 비율 C 를 극자외선 파장과 가시광선 파장에서의 비율 값을 각각 C_{EUV} 와 $C_{visible}$ 라고 하자. 이들 간의 비율을 Q 라고 정의하면 Q 는 식 (12)과 같이 주어진다.

$$Q = \frac{C_{EUV}}{C_{visible}} = \sqrt{\frac{\lambda_{visible}}{\lambda_{EUV}}} \quad (12)$$

이 식은 곡면과 평면의 시야각의 비율은 파장의 제곱근에 반비례하므로, 두 개의 서로 다른 파장을 사용할 경우 이들의 비율은 두 파장의 비율의 제곱근에 반비례함을 보여준다.

III. 여러 광학회절요소의 설계

본 연구에서는 여러 형태의 DOE의 field performance를 알아보기 위해서 두 특정 파장 즉 극자외선으로는 13 nm와 가시광선으로는 632.8 nm의 파장을 적용하였으며, 설계하고 특성을 평가한 여러 형태의 회절광학요소로는 투과형 평면 DOE, 투과형 곡면 DOE, 포물면경, 반사형 평면 DOE, 그리

고 반사형 곡면 DOE 등이며, Zemax 광학 모델링 프로그램을 사용하였다.

3.1. 투과형 평면 DOE와 투과형 곡면 DOE

Zemax 광학 모델링 프로그램은 회절광학요소(DOE)를 설계하는데 홀로그래픽 광학요소 (HOE)를 사용할 수 있도록 되어있다. 이 프로그램에서 DOE를 설계 제작하기 위해서는 이상적인 두 점으로부터 나오는 파가 특정한 모양의 표면에서 간섭을 일으켜 형성된 간섭무늬가 바로 우리가 원하는 DOE가 된다. 이렇게 만들어진 DOE를 다시 특정한 광학계에 삽입시키고 회절 한계 OPD를 분석하였다. 두 점 모델은 개념적으로 홀로그래픽을 형성하는 과정과 같다. Zemax 프로그램에서 홀로그래픽을 형성하기 위해서는 "hologram 1"이라는 표면 형태를 선택하였다. 참조파의 좌표계를 (x_1, y_1, z_1), 물체파의 좌표계를 (x_2, y_2, z_2)로 둔다.

투과형 평면 DOE의 설계에서는 참조파의 점광원(z_1)을 -1,000,000 mm (대략 $-\infty$)와 물체파의 점광원(z_2)을 +1 mm에 두고 그 사이에 평면 홀로그래픽 필름을 $z=0$ 에 두었다. 투과형 평면 DOE의 형성과 재생에는 극자외선 파장인 13 nm와 가시광선 파장인 632.8 nm의 광원이 각각 독립적으로 사용되었다. 회절 차수(m)는 +1을 선택하였다. 이 DOE의 직경은 1 mm, 이 시스템의 NA는 0.5를 택하였다.

투과형 곡면 DOE의 설계에서는 참조파의 점광원(z_1)을 -1,000,000 mm (대략 $-\infty$)와 물체파의 점광원(z_2)을 +1 mm에 두고 그 사이에 반경 R=1 mm인 곡면 홀로그래픽 필름을 $z=0$ 에 두었다. 회절 차수(m)는 -1을 선택하였다. 나머지의 설계 과정은 위의 투과형 평면 DOE의 설계와 동일한 조건으로 실시하였다.

3.2. 반사 포물면 DOE의 설계

반사 포물면 DOE는 conic 상수 $k=-1$, 반경 $R=2$ mm, 면에서 상까지의 거리 $T=-1$ mm, 그리고 개구의 반경 $m=0.5$ mm로 설정하여 설계하였다.

3.3. 반사형 평면 DOE와 반사형 곡면 DOE

반사형 평면 DOE의 설계에서는 참조파의 점광원(z_1)을 -1,000,000 mm (대략 $-\infty$)와 물체파의 점광원(z_2)을 -1 mm에 두고, 평면의 곡률반경 R은 무한대로 하고 개구의 반경 $m=0.5$ mm로 하였다. 이렇게 만든 홀로그래픽의 바로 뒤에 평면경을 붙이고 상면은 $z=-1$ mm에 위치하도록 하였다. 회절 차수(m)는 +1을 선택하였다. 반사형 평면 DOE의 형성과 재생에는 극자외선 파장인 13 nm와 가시광선 파장인 632.8 nm의 광원이 각각 독립적으로 사용되었다.

반사형 곡면 DOE의 설계에서는 참조파의 점광원(z_1)을 -1,000,000 mm (대략 $-\infty$)와 물체파의 점광원(z_2)을 -1 mm에 두고, 평면의 곡률반경 R을 -1 mm로 하고 개구의 반경 $m=0.5$ mm로 하였다. 이렇게 만든 홀로그래픽의 바로 뒤에 곡률반경 R이 -1 mm인 구면경을 붙이고 상면은 $z=-1$ mm에 위

치하도록 하였다. 회절 차수(m)는 -1을 선택하였다. 이 반사형 곡면 DOE의 형성과 재생에서도 위의 경우와 마찬가지로 같은 파장의 광원이 도입되었다.

IV. 결 과

본 연구의 결과인 파장에 따른 여러 형태의 DOE의 회절 한계 하에서의 시야각과 주된 수차 그리고 곡면과 평면 DOE의 시야각의 비율을 표 1에 요약하였다.

OPD의 그래프로부터 입사동의 가장자리에서의 OPD의 최대값이 $\lambda/4$ 가 되도록 입사각을 바꾸어가면서 회절한계하의 시야각의 범위를 측정하였으며, transverse ray fan plot이나 spot diagram으로부터 나타나는 형태를 통하여 각각의 DOE를 통하여 생겨나는 주된 수차의 종류를 쉽게 알아볼 수 있었다.

4.1. 투과형 평면 DOE의 field performance

그림 3은 사입사 조명 시 극자외선에서의 투과형 평면 DOE의 field performance를 나타낸다. 그림 3(a)은 입사각을 변화시키면서 최대 OPD 값이 회절한계인 $\lambda/4$ 와 일치하는 각을 얻은 것이다. 회절한계에서 얻어진 시야각은 가시광선에서는 0.17° , 극자외선에서는 0.0035° 이다. 식 (9)으로부터 평면 DOE의 시야각은 파장에 비례한다는 것으로부터 파장의 비($632.8/13=48.7$)와 측정된 두 시야각의 비($0.17/0.0035=48.6$)는 거의 일치한다고 볼 수 있다.

그림 3(b)은 transverse ray fan 수차이며, 왼쪽 그래프는 입사각이 0.0035° 에서 입사동의 y축 방향인 p_y 에 따른 y축 방향의 수차 ϵ_y 를 나타낸 것으로 포물선의 형태를 보이는데, 이런 형태는 일반적으로 코마수차인 경우에 나타난다. 그러

나 입사동의 x축 방향인 p_x 에 따른 x축 방향의 수차 ϵ_x 는 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

또한 그림 3(c)의 spot diagram으로부터 사입사 조명 시에는 주된 수차는 파장에 상관없이 코마임을 알 수 있다. 그림에서 중앙의 원은 회절한계를 나타내는 Rayleigh circle이다.

4.2. 투과형 곡면 DOE의 field performance

그림 4는 사입사 조명 시 극자외선에서의 투과형 곡면 DOE의 field performance를 보여준다. 그림 4(a)는 입사각을 변화시키면서 최대 OPD 값이 회절한계인 $\lambda/4$ 와 일치하는 각을 얻은 것이다. 회절한계에서 얻어진 시야각은 가시광선에서는 1.66° , 극자외선에서는 0.23° 이다. 식 (10)으로부터 곡면 DOE의 시야각은 파장의 제곱근에 비례한다는 것으로부터 파장의 비($\sqrt{632.8/13}=6.98$)와 측정된 두 시야각의 비($1.66/0.23=7.22$)는 거의 일치한다고 볼 수 있다.

그림 4(b)의 왼쪽 그래프는 입사각이 0.23° 에서 입사동의 y축 방향인 p_y 에 따른 y축 방향의 수차 ϵ_y 를 나타낸 것으로 직선 형태를 보이는데, 이런 형태는 일반적으로 비점수차나 상면만곡인 경우에 나타난다. 여기서는 앞의 투과형 평면 DOE와는 달리 입사동의 x축 방향인 p_x 에 따른 x축 방향의 수차 ϵ_x 가 일부 ϵ_y 와 같은 형태로 약간 생겨남을 볼 수 있다.

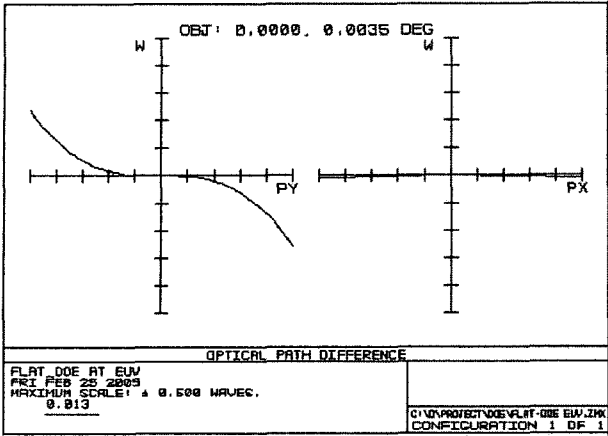
또한 그림 4(c)의 spot diagram으로부터 사입사 조명 시에는 주된 수차는 타원형으로 파장에 상관없이 비점수차와 상면만곡임을 알 수 있다.

4.3. 포물면경의 field performance

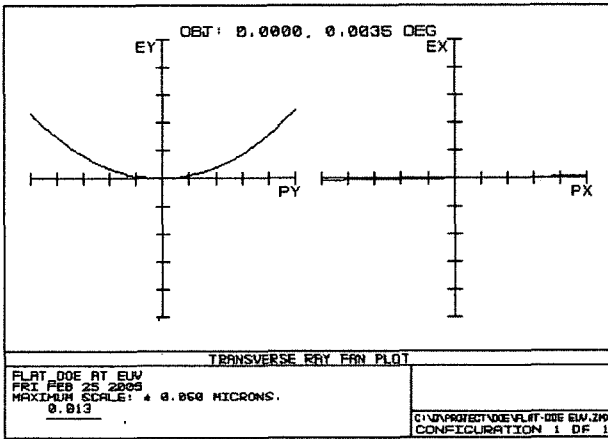
이 경우 회절 한계 내에서의 가시광선 파장에서의 시야각은 0.35° , 극자외선 파장에서의 시야각은 0.007° 를 얻을 수

표 1. 여러 형태의 DOE에 대한 시야각과 주된 수차.

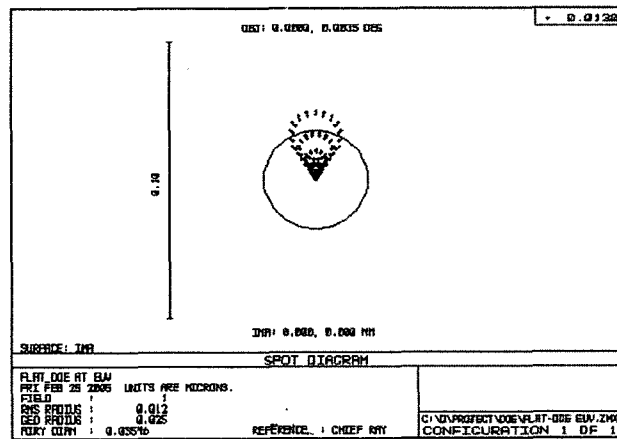
파장(nm)	DOE의 형태	회절 한계하의 시야각($^\circ$)		주된 수차	시야각 비율 (곡면 DOE / 평면 DOE)		비고
		측정값	이론식		측정값	이론식	
632.8	투과형 평면	0.17	0.14	코마	9.8	11.9	
	투과형 곡면	1.66	1.66	비점수차 + 상면만곡			
	반사형 평면	0.17	-	코마	17.6	-	
	반사형 곡면	3.0	-	비점수차 + 상면만곡			
	포물면경	0.35	-	코마	-	-	
13	투과형 평면	0.0035	0.0028	코마	65.7	85.7	
	투과형 곡면	0.23	0.24	비점수차 + 상면만곡			
	반사형 평면	0.0035	-	코마	122.9	-	
	반사형 곡면	0.43	-	비점수차 + 상면만곡			
	포물면경	0.007	-	코마	-	-	



(a) OPD



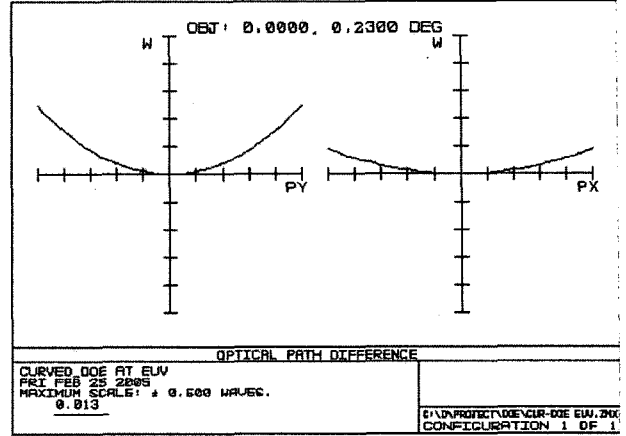
(b) Transverse ray fan plot



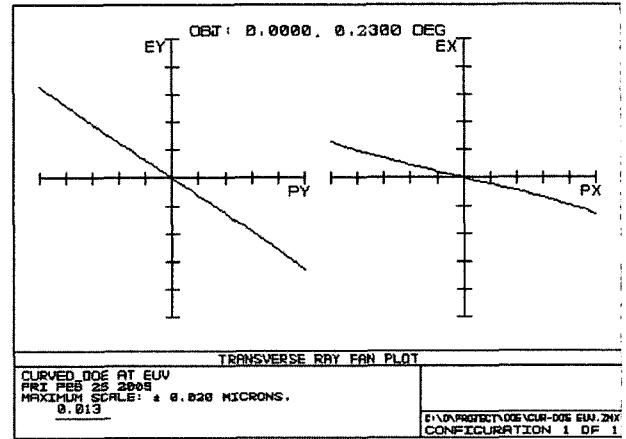
(c) Spot Diagram

그림 3. 극자외선(13 nm)에서 투과형 평면 DOE의 field performance.

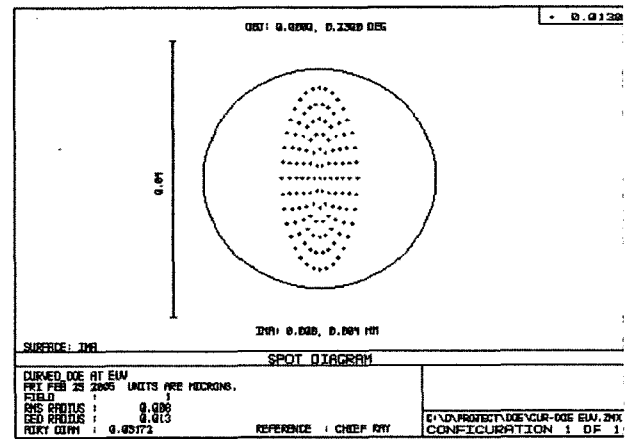
있었다. 투과형 평면 DOE의 시야각과 비교할 때, 포물면경의 시야각은 두 파장 모두에서 거의 두 배로 나타났다. 그림 5(a)의 OPD plot이나 그림 5(b)의 transverse ray fan plot의 형태는 투과형 평면 DOE와 같은 형태로 나타남을 알 수 있다. 또한 그림 5(c)의 spot diagram에서 볼 수 있듯이 주된 수



(a) OPD



(b) Transverse ray fan plot



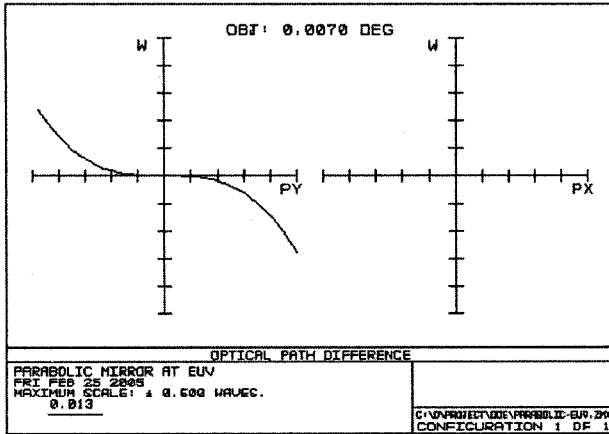
(c) Spot Diagram

그림 4. 극자외선(13 nm)에서 투과형 곡면 DOE의 field performance.

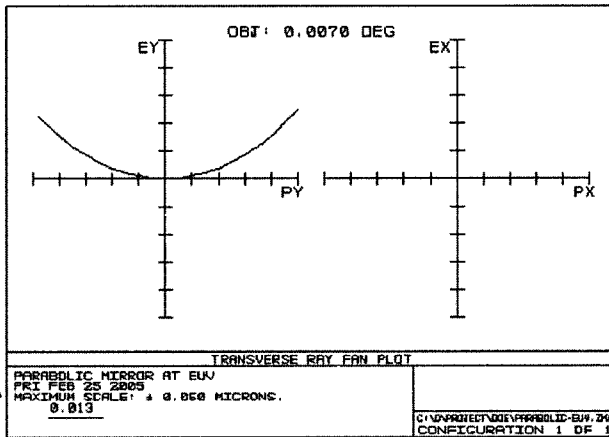
차역시 코마임을 알 수 있다.

4.4. 반사형 평면 DOE의 field performance

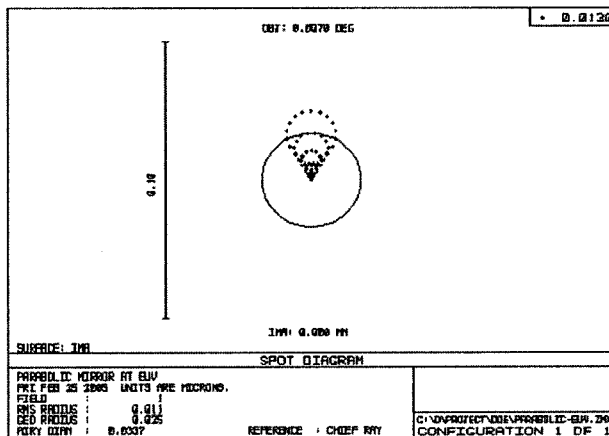
그림 6은 극자외선에서의 반사형 평면 DOE의 field performance를 보여준다. 이것은 앞서 다른 투과형 평면 DOE에서



(a) OPD



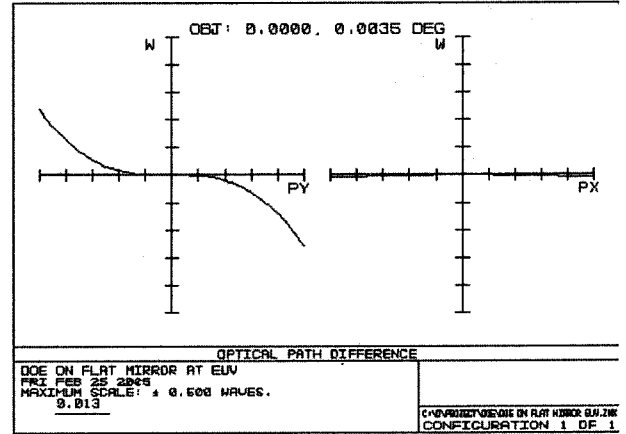
(b) Transverse ray fan plot



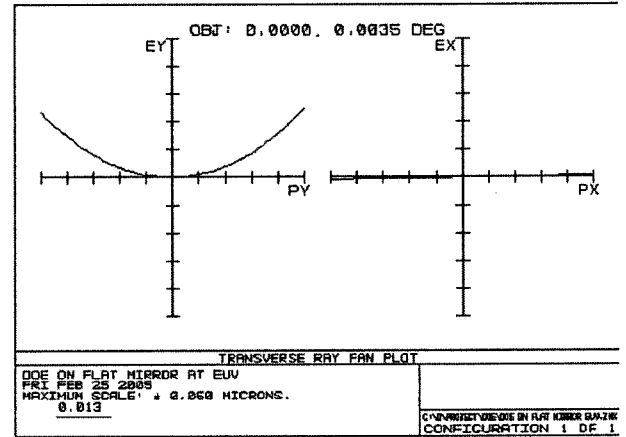
(c) Spot Diagram

그림 5. 극자외선(13 nm)에서 포물면형 DOE의 field performance.

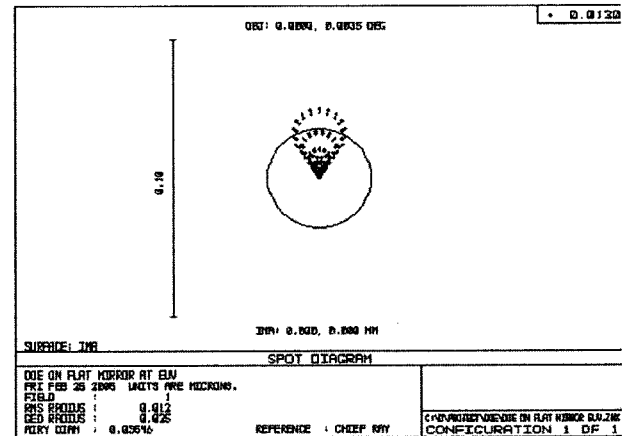
의 그림 3과 완전히 일치하는 것을 볼 수 있다. 따라서 회절 한계에서 측정된 시야각도 가시광선에서는 0.17°, 극자외선에서는 0.0035°로 완전히 일치하며, 주된 수차의 종류 역시 코마로서 같음을 알 수 있다.



(a) OPD



(b) Transverse ray fan plot

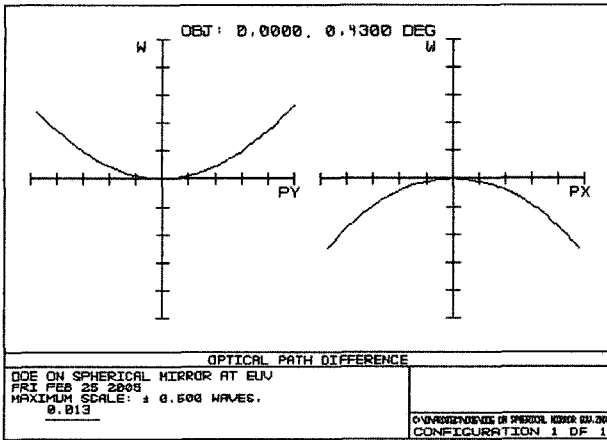


(c) Spot Diagram

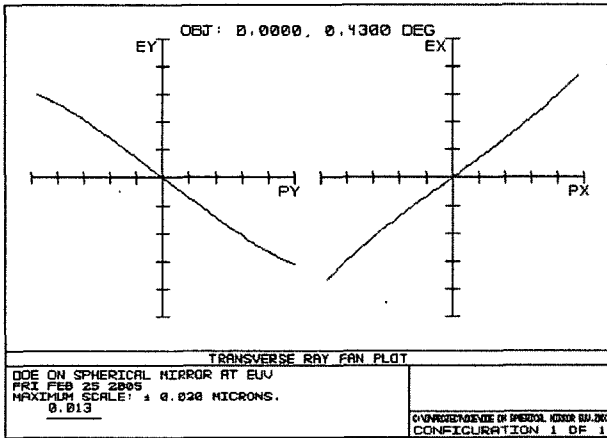
그림 6. 극자외선(13 nm)에서 반사형 평면 DOE의 field performance.

4.5. 반사형 곡면 DOE의 field performance

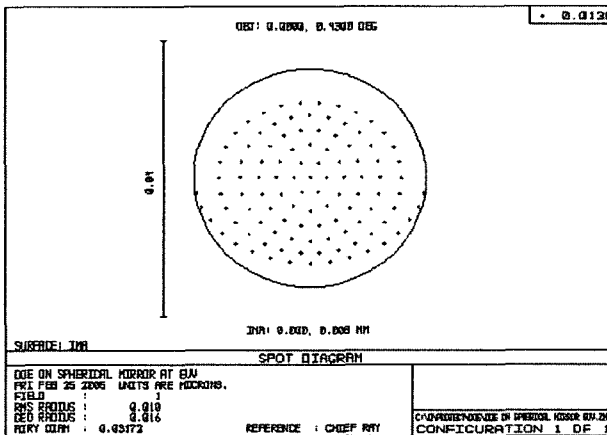
그림 7은 사입사 조명 시 극자외선에서의 반사형 곡면 DOE의 field performance를 나타낸다. 그림 7(a)은 입사각을 변화시키면서 최대 OPD 값이 회절한계인 $\lambda/4$ 와 일치하는 각을 얻은 것이다. 회절한계에서 가시광선의 시야각은 3.0°,



(a) OPD



(b) Transverse ray fan plot



(c) Spot Diagram

그림 7. 극자외선(13 nm)에서 반사형 곡면 DOE의 field performance.

극자외선의 시야각은 0.43°를 얻었으며, 이는 투과형 곡면 DOE의 회절한계 시야각의 약 두 배 정도로 나타났다. OPD plot의 왼쪽 그래프는 입사동의 y축 방향인 p_y 에 따른 OPD가 아래가 볼록한 포물선의 형태로 나타나고, 오른쪽 그래프는 입사동의 x축 방향인 p_x 에 따른 OPD는 위가 볼록한 포

물선의 형태로 나타났다.

식 (10)으로부터 곡면 DOE의 시야각은 파장의 제곱근에 비례한다는 것으로부터 파장의 비($\sqrt{632.8/13}=6.98$)와 측정된 두 시야각의 비($3.0/0.43=6.98$)는 일치함을 볼 수 있다.

그림 7(b)의 왼쪽 그래프는 입사각이 0.43°에서 입사동의 y축 방향인 p_y 에 따른 y축 방향의 수차 ϵ_y 를 나타낸 것으로 (-) 기울기의 직선 형태를 보이며, 입사동의 x축 방향인 p_x 에 따른 x축 방향의 수차 ϵ_x 는 (+) 기울기의 직선 형태를 보임을 알 수 있다. 이런 형태는 일반적으로 비점수차나 상면만곡인 경우에 나타나며, 그림 7(c)의 spot diagram에서 알 수 있듯이 y 방향의 사 입사 조명임에도 불구하고 수차는 원점을 중심으로 방사형태의 비점수차와 상면만곡으로 나타남을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는 여러 형태의 DOE의 field performance를 극자외선 파장인 13 nm와 특성 비교를 위한 다른 파장, 즉 가시광선 파장인 632.8 nm에 대해서 적용시켰다. 본 연구에서 설계하고 조사한 여러 형태의 DOE로는 투과형 평면 DOE, 투과형 곡면 DOE, 반사형 포물면 DOE, 반사형 평면 DOE, 그리고 반사형 곡면 DOE이며 Zemax 광학 모델링 프로그램을 사용하였다.

투과형 및 반사형 평면 DOE의 사 입사 조명에 의해 생겨나는 수차로는 코마, 비점수차, 그리고 상면만곡으로서 각각

$$W_{131} = \frac{a r_n^3}{2f^2 \lambda}, W_{222} = -\frac{a^2 r_n^2}{2f \lambda}, \text{ 그리고 } W_{220} = -\frac{a^2 r_n^2}{4f \lambda} \text{ 등이며,}$$

특히 작은 입사각에서는 코마가 주된 수차로 나타나게 됨을 알 수 있었다. 그러나 투과형 및 반사형 곡면 DOE에서는 코마가 없어지고, 비점수차($W_{222} = -\frac{a^2 r_n^2}{2f \lambda}$)와 상면만곡

($W_{220} = -\frac{a^2 r_n^2}{4f \lambda}$)만이 남게 되며, 특히 1차원에서 취급하면 이들 두 항은 구분이 되지 않으므로 이들이 혼합된 수차, 즉

$$W_{222} + W_{220} = \frac{3a^2 r_n^2}{4f \lambda} \text{ 으로 나타났다.}$$

사 입사 조명 시 회절 한계(Rayleigh 한계)하에서 투과형 및 반사형 DOE에서는 투과형 및 반사형 곡면 DOE의 시야각이 투과형 및 반사형 평면 DOE의 시야각보다 커짐을 알 수 있었으며, 측정된 결과 값은 이론식의 값과 잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 평면 DOE의 경우 시야각은 파장에 비례하나, 곡면 DOE에서는 파장의 제곱근에 비례한다는 앞의 유도된 식 및 측정 결과로부터 두 형태의 DOE 모두 파장이 긴 가시광선에서의 시야각이 파장이 짧은 극자외선보다 크다는 것을 보여주었다.

가시광선 영역에서 투과형 곡면 DOE의 시야각이 투과형 평면 DOE보다 약 9.8배 정도 크게 나타났으며, 반사형 곡면 DOE의 시야각이 반사형 평면 DOE보다 약 17.6배 정도 크게 나타남을 알 수 있었다. 이것은 반사형 곡면 DOE에서의

시야각이 투과형 곡면 DOE에서의 시야각의 약 두 배 정도로 측정되기 때문이며, 반사형 곡면 DOE에 관한 이론 연구는 추후 더 연구해 볼 필요가 있다고 하겠다.

극자외선 영역에서 투과형 곡면 DOE의 시야각이 투과형 평면 DOE보다 약 65.7배 정도 크게 나타났으며, 반사형 곡면 DOE의 시야각이 반사형 평면 DOE보다 약 122.9배 정도 크게 나타남을 알 수 있었다.

포물면경을 사용할 경우 시야각은 투과형(또는 반사형) 평면 DOE의 약 두 배 정도 크다는 것을 알 수 있었다. 이 경우에 나타나는 주된 수차 역시 코마임을 알 수 있었다.

또한 같은 파장에서, 곡면 DOE와 평면 DOE의 시야각의 비율은 파장의 제곱근에 반비례하므로, 곡면 DOE를 사용할 경우, 파장이 짧은 극자외선 파장을 사용할 경우가 가시광선을 사용할 경우보다 약 12.8배(이론식에서는 7배 정도) 커진 것으로부터 훨씬 효율적임을 알 수 있었다. 따라서 극자외선을 사용할 경우에는 곡면 DOE의 시야각이 커지는 정도가 가시광선의 경우보다 훨씬 크므로 반드시 곡면 DOE를 사용하여야 함을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2001년도 인천대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참고문헌

- [1] H. P. Herzig and R. Dandliker, "Holographic optical elements for use with semiconductor lasers," in *International Trends in Optics*, J. W. Goodman, Ed., Academic Press, San Diego, 1991.
- [2] B. J. Chang, "Dichromated gelatin holograms and their applications," *Opt. Eng.*, vol. 19, pp. 642-648, 1980.
- [3] D. H. Close, "Holographic optical elements," *Opt. Eng.*, vol. 14, pp. 408-419, 1975.
- [4] F. Wyrowsky and O. Bryngdahl, "Iterative Fourier Transform algorithm applied to computer holography," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. A7, pp. 961-969, 1988.
- [5] J. L. Horner and J. R. Leger, "Pattern recognition with binary phase-only filters," *Appl. Opt.*, vol. 24, pp. 609-611, 1985.
- [6] G. E. Sommargren and L. G. Seppala, "Condenser Optics, Partial coherence and imaging for soft X-ray projection lithography," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 34, pp. 6938-6944, 1993.
- [7] S. J. Walker and J. Jahns, "Optical clock distribution using integrated free-space optics," *Opt. Commun.*, vol. 90, pp. 359-371, 1992.
- [8] Andrew M. Hawryluk and Natale M. Ceglie, "Wavelength considerations in soft X-ray projection lithography," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 34, pp. 7062-7067, 1993.
- [9] L. A. Hackel and R. J. Beach, "Laser driver for soft X-ray lithography," *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 6914-6919, 1993.
- [10] R. L. Kauffman, D. W. Phillion, and R. Spitzer, "X-ray production at 13 nm from laser-produced plasmas for projection X-ray lithography applications," *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 6897-6900, 1993.
- [11] M. Young, "Zone plates and their aberrations," *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 62, no. 8, pp. 972-976, 1972.
- [12] A. M. Hawryluk and L. G. Seppala, "Soft X-ray projection lithography using an X-ray reduction camera," *J. Vac. Sci. Tech.*, vol. B6, pp. 2162-2166, 1988.
- [13] H. Kinoshita, K. Kurihara, Y. Ishii, and Y. Torri, "Soft X-ray reduction lithography using multi-layer mirrors," *J. Vac. Sci. Tech.*, vol. B7, pp. 1648-1651, 1989.
- [14] O. R. Wood II, W. T. Silfvast, and T. E. Jewell, "Short-wavelength annular-field optical system for imaging tenth-micron features," *J. Vac. Sci. Tech.*, vol. B7, pp. 1613-1615, 1989.
- [15] D. M. Tennant, L. A. Fetter, L. R. Harriott, A. A. MacDowell, P. P. Mulgrew, J. Z. Pastalan, W. K. Waskiewicz, K. L. Windt, and O. R. Wood II, "Mask technologies for soft X-ray microlithography at 13 nm," *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 34, pp. 7007-7011, 1993.
- [16] Cheng Wang and David L. Shealy, "Differential equation design finite-conjugate reflective systems," *Appl. Opt.*, vol. 32, pp. 1179, 1993.
- [17] Tanys E. Jewell, J. Michael Rodgers and Kevin K. Thompson, "Reflective systems design study for soft X-ray projection lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B 8, no. 6, pp. 1519-1523, 1990.
- [18] Young Min Cho and Sang Soo Lee, "Holosymmetric 4 mirror optical system(mag.=+1) for soft X-ray projection lithography," *J. National Academy of Science, Korea*, vol. 33, pp. 1, 1994.
- [19] Dong Hee Lee, Hong Jin Kong and Sang Soo Lee, "Five mirror system derived from the numerical solutions of all zero 3rd-order aberrations and zero 5th-order spherical aberration for deep-ultraviolet optical lithography," *Kogaku J. Optical Society of Japan*, vol. 23, pp. 198-206, 1994.
- [20] T. D. Milster, R. M. Trusty, M. S. Wang, F. F. Froehlich, and J. K. Erwin, "Micro-optic lens for data storage," in *Optical Data Storage*, James J. Burke, Thomas A. Shull, Nobutake Imamura, Eds., *Proc. SPIE*, vol. 1499, pp. 286-292, 1991.
- [21] R. M. Trusty, "Micro-Fresnel Lens on a Spherical Shell Substrate," Thesis, 1990.
- [22] Edita Tejnil, K. A. Goldberg, S. Lee, H. Meddecki, P. J. Batson, P. E. Denham, A. A. MacDowell, J. Bokor, and D. Attwood, "At-wavelength interferometry for extreme ultraviolet lithography," *J. Vac. Sci. Technol.*, vol. B15, no. 6, pp. 2455-2461, 1997.

Studies on Curved Diffractive Optical Elements in EUV

Sung-Eul Choi[†], Yong-Woo Lee and Myung-Hoi Kwon

*Department of Physics, College of Natural Sciences, University of Incheon,
177 Dohwa-dong, Nam-gu, Incheon 402-749, KOREA*

[†]*E-mail: schoi@incheon.ac.kr*

Yong-Hoo Kim

Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon 305-701, Korea

(Received March 15, 2005, Revised manuscript July 13, 2005)

Field performance of several different types of diffractive optical elements(DOEs) has been carried out. Using Zemax model, we have designed five different types of DOEs, such as transmissive flat-DOE, transmissive curved-DOE, reflective flat-DOE, reflective curved-DOE and parabolic mirror. We have applied two different wavelengths, i.e., 13 nm(EUV) and 632.8 nm(visible) to above DOEs. Off-axis dominate aberrations and the diffraction limiting (Rayleigh limit) field angles have been investigated and compared at both wavelengths for each DOE. At diffraction limit, field angle of curved-DOEs was much greater than that of flat-DOEs for both transmission and reflective types. We also showed that dominated off-axis aberration of flat-DOEs was coma, but that of curved-DOEs was mixture of astigmatism and curvature of field. The measured field angle and expected OPD aberrations were well coincided with theoretical ones. Increasing the ratio of field angle with wavelength was more effective in curved-DOEs than flat-DOEs.

OCIS Codes : 050.1970, 080.2740, 260.7200.