

Deep UV 마이크로 리소그라피를 위한 새로운 4-반사경 광학계에 관한 수학적 해석

김종태 · 이상수

한국과학기술원 물리학과

(1993년 1월 13일 받음)

축소배율(5 \times)을 갖고, Seidel 1차 수차중 4개의 비축수차인 코마(coma), 비점수차(astigmatism), 상면 만곡(field curvature) 그리고 왜곡수차(distortion)가 제거된 마이크로 리소그라피를 위한 4-구면 반사경 광학계를 해석적으로 구하였다. 이때, $t = d_1 + d_2 + d_3 < 0$, (d_i 는 반사거울 c_i 와 c_{i+1} 사이의 거리)이고, 축상 수차인 구면수차와 잔류고차수차는 반사거울 c_3 와 c_4 를 비구면화 하므로서 제거하였다. 이렇게 설계된 4-반사경 광학계의 N.A.는 0.4로서 Rayleigh 분해능은 0.38 μm 이다.

I. 서 론

반도체 제작 기술은 다양한 공정을 거쳐 제조되고 있지만, 그 핵심 기술은 미세가공이라 불리우는 노광, 식각, 접합형성, 박막형성을 중심으로 한 일련의 공정들이다. 그중 중요성이 증대되고 있는 미세가공 기술은 패턴 미세화의 열쇠를 쥐고 있는 lithography용 광학계에 관심이 모아지게 되었다. Lithography용 광학계에 널리 사용되는 광원은 Hg-g line(436 nm), Hg-i line(365 nm), 그리고 deep UV용 광원으로서는 KrF(248 nm), ArF(193 nm) excimer laser 등이 있는데 이러한 광원들이 렌즈로 구성된 광학계에 사용되었을 때 공통적으로 갖는 문제점은 광학매질(optical materials)의 제한과 광학계의 색수차이다. Hg-lines 및 KrF, ArF excimer laser 광원에 대한 optical materials은 fused silica(SiO₂), LiF, CaF₂와 같은 halide crystal 등이 있지만,^[1] 이것들은 다양한 굴절률을 갖지 못한다는 점 이외에도 매질의 흡수가 커서 상면에 도달하는 광량이 적다는 단점이 있다.^[2,3] 렌즈를 이용한 광학계가 이러한 문제점이 파생되는 것과는 달리 반사광학계는 광범위한 파장에 대해서도 광학계의 성능이 일정하게 유지되며, 작은 수의 surface만으로도 광학계를 구성할 수 있는 장점이 있다.^[4,5] 반사 광학계로 구성된 stepper로는 널리 이용되고 있는 것은 Perkin Elmer Microalign series가 있는데^[6] 이 stepper들은 Offner 1:1 공심 2반사경계^[7,8]의 조합으로 이루어져 있으며, 사용 가능한 field폭은 1~4 mm로서 작다.^[9,11] 따라서

scan and repeat 과정을 통해서 웨이퍼 위에 마스크 무늬를 형성한다. 축소배율(5 \times)을 갖는 lithography용 반사 광학계는 축 대칭 4-반사경 광학계^[12,13]와 3-공심 반사경계^[14] 등이 보고되고 있다. Catadioptric 광학계로서 널리 알려진 것은 Wynne-Dyson 1:1 광학계^[15-17]와 이를 개량하여 설계한 Half-Field Dyson system^[18]이 보고되고 있다.

본 논문에서는 submicron lithography에서 분해능을 향상시키고, DOF(depth of focus)를 향상시키기 위하여 단파장화 하여도 광학 매질의 제한을 피할 수 있고, 가시광선에서도 alignment와 test가 가능한 장점을 갖는 축소배율(5 \times), 축대칭 4-구면 반사경계의 해를 Seidel 제 1차 수차 이론에 의해 해석적인 방법으로 구하고, 설계변수에 따른 광학계의 구조적 특성, vignetting 등에 대하여 연구하였다. 또한 비구면화에 따른 축상수차인 구면수차 보정 효과를 살펴 보았으며, 결과적으로 KrF excimer laser 파장(248 nm)에 대하여 설계한 4-반사 광학계의 N.A.와 시계각은 각각 0.4, 2.6°이고, 초점거리 $f' = -10 \text{ cm}$ 에서 image field diameter 4.4 mm 이내로 모든 수차들이 회절 한계 이내로 보정되었다. 따라서 sub-micron lithography에 필요한 제반적인 조건을 만족시키는 비구면화된 4-반사경 광학계를 얻었다. 이 광학계는 $t = d_1 + d_2 + d_3$ (d_i : 반사거울 c_i 와 c_{i+1} 사이의 거리)가 양수 ($t > 0$)인 경우^[13] 보다 일반적으로 물체에서 상까지의 거리가 작아 광학계 구성이 용이하고, 전체 system의 크기를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있는 $t < 0$ 이 특징이다.

II. Coma, astigmatism, field curvature, distortion 수차가 제거된 4구면 반사경 광학계의 해

일반적으로 모든 광학계는 매질의 굴절률 n_i , 각면의 곡률 c_i 및 각 면간의 거리변수 d_i 로 표시할 수 있다. 유한물체점을 갖는 Cassegrainian-inverse Cassegrainian 4구면 반사경 광학계의 조리개가 제 3면에 있다고 가정하고, Seidel 제 1차 수차계수인 구면수차(S_I), 코마(S_{II}), 비점수차(S_{III}), 상면만곡(S_{IV}), 왜곡수차 (S_V)와 배율 및 초점거리를 Gauss 팔호(Gaussian bracket)^[19]를 이용하여 표현하면 다음과 같다(그림 1 참조).

$$S_I = -2u_o^3(X - c_4g_7^2a_4^2) \quad (1)$$

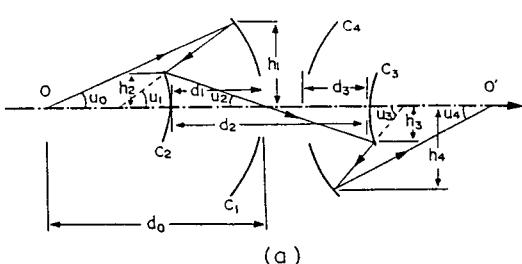
$$S_{II} = -2\beta u_o^3(Y - c_4g_7^2a_4b_4) \quad (2)$$

$$S_{III} = -2\beta^2 u_o^2(Z - c_4g_7^2b_4^2) \quad (3)$$

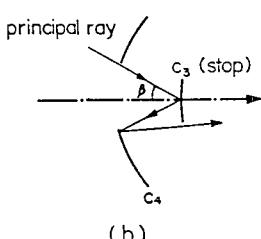
$$S_{IV} = -2H^2(c_1 - c_2 + c_3 - c_4) \quad (4)$$

$$S_V = 2\beta^3 u_o [W - \frac{c_4b_4}{a_4}(g_5^2 - b_4^2g_7^2)] \quad (5)$$

$$M = \frac{1}{m} = \frac{1}{[d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4]} \quad (6)$$



(a)



(b)

그림 1. (a) Typical configuration of the four-spherical-mirror system with Cassegrainian-inverse Cassegrainian type and (b) the path of principal ray on the stop.

$$f' = \frac{-1}{[2c_1, d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4]} \quad (7)$$

여기서 X, Y, Z, W 는 각각

$$X = c_1a_1^2g_1^2 - c_2a_2^2g_2^2 + c_3a_3^2g_3^2$$

$$Y = c_1a_1b_1g_1^2 - c_1a_2b_2g_2^2 + c_3a_3b_3g_3^2$$

$$Z = c_1b_1^2g_1^2 - c_2b_2^2g_2^2 + c_3b_3^2g_3^2$$

$$W = \frac{c_1b_1}{a_1}(g_5^2 - b_1^2g_7^2) - \frac{c_2b_2}{a_2}(g_5^2 - b_2^2g_7^2)$$

이고

$$g_1 = [d_o],$$

$$g_3 = [d_o, 2c_1, -d_1],$$

$$g_5 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2],$$

$$g_7 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3],$$

$$a_1 = [d_o, c_1],$$

$$a_2 = [d_o, 2c_1, -d_1, -c_2],$$

$$a_3 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, c_3],$$

$$a_4 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -c_4],$$

$$b_1 = [c_1, -d_1, -2c_2, d_2],$$

$$b_2 = [-c_2, d_2],$$

$$b_3 = 1,$$

$$b_4 = [-d_3, -c_4]$$

이다. 식에서 $c_i (i=1,2,3,4)$ 는 곡률을 $d_i (i=0,1,2,3,4)$ 는 면과 면 사이의 거리이고, $u_i (i=0,1,2,3,4)$ 는 근축각을 나타낸 것이다. 또한 H는 Lagrange invariant 양으로서 $\beta u_o g_5$ 에 해당되는 양이고 X, Y, Z, W 는 d_3, c_4 에 무관한 함수이다. 따라서 일정한 배율을 갖고, 코마, 비점수차, 상면만곡수차 및 왜곡수차가 zero이 되기 위해서는 식 (2), (3), (4)와 (5)의 계수가 동시에 zero이 되어야 한다. 즉 다음식을 만족해야 한다.

$$Y = c_4a_4^2g_7^2 \quad (8)$$

$$Z = c_4b_4^2g_7^2 \quad (9)$$

$$c_1 - c_2 + c_3 - c_4 = 0 \quad (10)$$

$$W = (g_5^2 - b_4^2g_7^2) \frac{c_4b_4}{a_4} \quad (11)$$

$$m = 2c_4d_3g_6 - 2c_4g_5 + g_6 \quad (12)$$

여기서 $g_6 = [d_o, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3]^\top$ 이고, 식 (10)에서 Petzval sum이 zero가 되기 위해서는 다음과 같은 식이 성립해야 한다. 즉,

$$\begin{aligned} c_4 &= c_1 - c_2 + c_3 \\ &\equiv c + c_3 \\ \text{단, } c &= c_1 - c_2 \text{ 이다.} \end{aligned} \quad (13)$$

또한 광학계가 일정한 배율을 갖는다는 조건을 이용하기 위하여 식 (13)을 식 (12)에 대입하여 정리하면

$$d_3 = \frac{m - g_6 + 2c_4g_5}{2c_4g_6} \quad (14)$$

가 된다. 식 (8), (9)과 (11)을 서로 연립하여 다시 간단하게 표현하면

$$b_4Y = a_4Z \quad (15)$$

$$WY = c_4g_5^2Z - Z^2 \quad (16)$$

이 되고, 식 (15)을 계산을 통하여 c_3 이하의 변수 (d_0, c_1, d_1, c_2, d_2)로 정리하면 다음과 같은 식의 방정식을 구할 수 있다.

$$q_1c_3^2 + q_1c_3 + q_3 = 0 \quad (17)$$

단,

$$\begin{aligned} q_1 &= (g_4 + 2cg_5)g_5^3 - (mg_5 + 4Z_1)g_5^2 \\ q_1 &= 2(2Y_1 + c^2g_5^2)g_5^2 - 2(m + 2g_4)g_5Z_1, \\ q_3 &= (g_4 + m + 2cg_5)Y_1 - (m - g_4)g_4Z_1 \text{ 이고,} \\ Y_1 &= c_1a_1b_1g_1^2 - c_2a_2b_2g_3^2, \\ Z_1 &= c_1b_1^2g_1^2 - c_2b_2^2g_3^2 \text{ 이다.} \end{aligned}$$

여기서 q_i 는 d_0, c_1, d_1, c_2, d_2 만의 함수이다. 또한 식 (16)을 계산을 통하여 c_3 이하의 변수 (d_0, c_1, d_1, c_2, d_2)로 정리하면 다음과 같은 식의 방정식을 구할 수 있다.

$$s_1c_3^2 + s_2c_3 + s_3 = 0 \quad (18)$$

단,

$$\begin{aligned} s_1 &= Wg_5^3, \\ s_2 &= (Wg_4 - cg_5^2 + Z_1)g_5^2, \\ s_3 &= WY_1 + Z_1^2 - cg_5^2Z_1 \text{ 이고,} \end{aligned}$$

s_i 는 d_0, c_1, d_1, c_2, d_2 의 함수이다. 마지막으로 식 (8)을 c_3 이하의 변수 (d_0, c_1, d_1, c_2, d_2)로 정리하면 다음과 같은 식의 방정식을 구할 수 있다.

$$w_1c_3^3 + w_2c_3^2 + w_3c_3 + w_4 = 0 \quad (19)$$

단, $w_1 = 32g_5^2(2Z_1 + mg_5 - g_4g_5)$,

$$w_2 = 16(4cg_5^2Z_1 + 4g_5^3g_4c + 4g_4g_5Z_1 + g_4^2g_5^2 + g_5^2r_2 - r_1^2)/16,$$

$$w_3 = 64cg_4g_5Z_1 + 16g_4^2g_5^2c + 16g_4^2Z_1 - 2r_1r_2,$$

$$\begin{aligned} w_4 &= 16cg_4^2Z_1 - r_1^2, \\ r_1 &= 6g_4g_5 + 4cg_5^2 - 2mg_5, \\ r_2 &= g_4^2 - m^2 + g_4g_5c - 2mg_5c \text{ 이다.} \end{aligned}$$

그리고 식 (17)과 (18)을 연립하여 c_3 에 대하여 풀면 다음과 같다.

$$c_3 = \frac{q_1s_3 - q_3s_1}{q_2s_1 - q_1s_2} \quad (20)$$

여기서 $q_i, s_i (i=1,2,3)$ 은 설계변수 d_0, c_1, d_1, c_2, d_2 만의 함수이다. 따라서 일정한 배율 $M (= 1/m)$ 을 갖고, coma, astigmatism, field curvature 그리고 distortion 수차가 제거된 4-구면 반사광학계는 식 (13), (14), (17), (18), (19)을 동시에 만족한다. 초기 광학계를 구성하기 위해서 결정해야 할 8개의 설계변수들 중에서 d_0, c_1, d_1 은 임의로 정한 후 식 (13), (14), (17), (18), (19)을 만족하도록 나머지 5개의 설계변수 c_2, d_2, c_3, d_3, c_4 를 결정하면 초기 4-구면 반사광학계는 일정한 배율 $M (= 1/m)$ 을 갖고, coma, astigmatism, field curvature 그리고 distortion 수차가 제거된 4-구면 반사광학계를 설계할 수 있다.

III. Coma, astigmatism, field curvature, distortion 수차가 제거된 4-구면 반사경계의 수치해석

8개의 설계변수 중 임의의 값 d_0, c_1, d_1 에 대해 식 (13), (14), (17), (18), (19)을 만족하도록 설계변수 c_2, d_2, c_3, d_3, c_4 를 결정하면 4-구면 반사경계는 일정한 배율 $M (= 1/m)$ 을 갖고, coma, astigmatism, field curvature 그리고 distortion 수차가 제거되었다고 말할 수 있다. 따라서 d_0, c_1, d_1 을 자유롭게 정해주어도 되며, 임의의 초기값 c_2, d_2 에 대하여 식 (20)으로부터 c_3 를 구하고, 식 (17), (19)을 동시에 만족하도록 c_2, d_2 를 optimization 기법으로 몇번의 iteration을 통하여 구한 다음, 식 (13), (14), (17)로부터 나머지 설계변수들을 차례로 결정하면 된다. 5개의 연립 방정식을 풀어서 5개의 설계변수를 결정했다 하여도 이것은 수학적인 해에 불과하므로 물리적으로 부적절한 해는 버려야 한다. 본 논문에서는 다음과 같은 제한 조건에 대하여 초기 4-구면 반사광학계의 해의 존재 범위를 조사하였다.

광학계의 배율은 5×이며, 이것은 물체의 크기를 1/5로 축소하여 상면에 결상시키는 광학계로서 식 (6)에서 $M = +1/5$ 즉 $m = +5$ 에 해당된다.

제 1반사면의 광학계의 크기를 $c_1 = -1$ 로 정하여 그 크기로 광학계의 크기를 규격화 하였다.

물점과 제 1면 사이의 거리 d_o 는 $1.5 < d_o < 4.5$ 사이에서 0.05 간격으로 해를 조사하였으며, 제 1반사면의 정점과 제 2반사면의 정점 사이의 거리 d_1 은 $-0.4 < d_1 < -0.15$ 범위에서 0.005 간격으로 조사하였다. 또한 실질적인 광학계가 구성될 수 있는 $d_2 > |d_1|$, $d_3 < 0$ 인 수렴계만 선택하였다.

마지막으로 제 1면과 제 4면 사이의 거리 $t = d_1 + d_2 + d_3$ 가 negative ($t < 0$)인 해만을 선정하였다.

그 결과 일정한 배율 $M (= 1/m)$ 을 갖고, coma, astigmatism, field curvature 그리고 distortion 수차가 제거된 4-구면 반사 광학계가 존재하는 범위를 $c_1 = -1$ 일 때 변수 d_o , d_1 에 대하여 그림 2(a)에 나타내었다. 실제로 그림 2(a)에 나타난 영역은 모두 Cassegrainian-inverse Cassegrainian형 반사광학계이다. 위와 같은 구속조건 하에서 $c_1 = +1$ 인 4-구면 반사경 광학계의 존재범위를 조사해 보았으나 물리적으로 타당한 해는 존재하지 않았다. 그림 2(b)는 해석적으로 보정하지 않은 구면수차가 각각의 d_o 값에 대한 제 1면과 제 2면 사이의 거리변수 d_1 에 대해 어떻게 변화하는지를 도식적으로 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 일정한 배율 $M (= 1/m)$ 을 갖고, coma, astig-

matism, field curvature 그리고 distortion 수차가 제거된 4-구면 반사 광학계는 변수 d_o , d_1 의 모든 값에 대하여 구면수차가 보정되지 못하고 있으며, 같은 $|d_1|$ 값에 대하여 상대적으로 d_o 값이 클수록 구면수차가 작게됨을 알 수 있다. 그럼 2(c)는 4-구면 반사광학계에서 제 1면과 제 4면 사이의 거리 $t (= d_1 + d_2 + d_3)$ 과 거리변수 d_1 과의 관계를 나타내고 있다. 만약 $|t|$ 가 지나치게 커지면 제 4면의 입사고가 상대적으로 커져 반사경의 직경이 커 광학계를 구성하는데 어려움이 따른다. 그럼 2(d)는 축상에서 나오는 광량이 제 2면에 의한 제 1면의 중앙부 광량의 차단을 나타내는 양과(제 1면의 입체각과 제 2면의 입체각의 비) 제 3면에 의한 제 4면의 중앙부 광량의 차단을 나타내는 양과(제 4면의 입체각과 제 3면의 입체각의 비)의 관계를 나타내는 제 1면의 입사고에 대한 제 4면의 입사고의 비($|h_4/h_1|$)를 나타낸 것으로 vignetting의 중요한 척도가 된다. 그림 2에 나타난 결과를 종합하여 하나의 적절한 d_o , d_1 를 결정하면 초기설계 data가 결정된다.

IV. Submicron lithography를 위한 비구면화에 의한 구면수차의 수정 및 수차해석

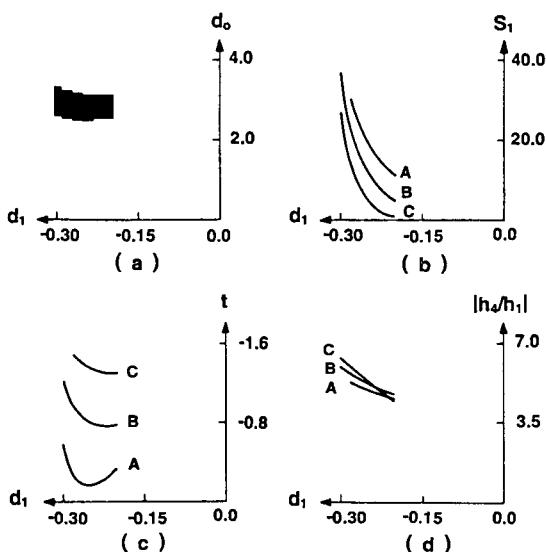


그림 2. Analysis of the four-spherical-mirror system which is free from coma, astigmatism, Petzval sum and distortion with $c_1 = -1$. (a) Region where the useful systems exist, (b) variations of $S_1 (= S_1 / -2u_o^4)$, (c) behavior of $t (= d_1 + d_2 + d_3)$, and (d) behavior of $|h_4/h_1|$ as a function of d_1 for given d_o 's (A: $d_o = 2.65$, B: $d_o = 2.80$, C: $d_o = 2.95$).

초기설계된 광학계는 구면수차와 잔류고차수차가 제거되지 않은 광학계로서 상을 결상하는데 직접적인 영향을 주게되어 결상광학계로서 적절하지 못하다. 구면수차를 제거하기 위해서는 4-구면 반사경을 구성하는데 필요한 8개의 설계변수를 사용한 최적화기법을 이용하여 구면수차를 최소화할 수도 있겠으나 배율 및 다른 수차의 변화에 영향을 주게되어 광학계의 형태 등 여러가지 구속조건을 유지하면서 구면수차를 포함한 모든 수차를 회절한계 이내로 제거한다는 것은 본 논문의 초기 광학계로서는 쉽지 않았다. 또한 렌즈 또는 반사경을 하나 이상 추가하여 구면수차를 제거하는 방법도 있겠으나, 반사경 광학계는 광학면 수가 많아질수록 vignetting이 심해지고 반사광학계에 굴절 광학계를 조합하여 사용하면 반사광학계만의 장점인 분해능을 높이기 위하여 단파장화 함에 따른 광학 매질의 제한과 광학계의 색수차가 문제가 되므로 이런 방법을 피하고, 본 논문에서는 4개의 반사면 중 일부를 비구면화하여 구면수차를 보정하고 submicron lithography용 광학계가 되도록 모든 수차를 회절한계 이내로 제거하여 성능을 향상시키고자 한다.

일반화된 비구면방정식은 다음과 같이 표현된다.^[20]

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - (1 - k)c^2 y^2}}$$

$$+a_4y^4+a_6y^6+a_8y^8+a_{10}y^{10}+\dots \quad (21)$$

여기서 c 는 각 거울면에서의 곡률, y 는 주변 광선의 입사고, k 는 원추계수(conic constant)이며, 곡면의 이심률(eccentricity)과는 $k = -e^2$ 의 관계를 갖는데 k 값에 따른 곡면의 형태는 다음과 같이 분류된다.

- $k > 0$: 장축이 광축에 수직한 면에 있는 타원체면(oblate ellipsoid).
- $-1 < k < 0$: 장축이 광축에 있는 타원체면(prolate ellipsoid).
- $k = -1$: 포물면(paraboloid).
- $k < -1$: 쌍곡면(hyperboloid).
- $k = 0$: 구면(sphere).

또한 $a_i (i=4,6,8,10)$ 은 구면으로부터 변형된 정도를 나타내는 비구면 계수이며, $(x^2+y^2)^{\frac{1}{2}}$ 는 각면에서의 광선의 입사고이다. 비구면화 과정중 축상곡률은 변화가 없으며, 축대칭 광학계에서 6차 이상의 고차 비구면항은 Seidel 제 1차 수차계수에 영향을 주지 않으므로 식 (21)을 약간 변형된 비구면 방정식으로 변환하면 다음과 같다.^[21]

$$z = \frac{c(x^2+y^2)}{2} + \left(\frac{c^3}{8} + G\right)(x^2+y^2)^2 + \dots \quad (22)$$

만약 i 번째 거울면에 비구면을 채용하면 구면만 사용할 경우에 대하여 광학계의 Seidel 제 1차 구면수차, 코마, 비점수차, 상면만곡수차 및 왜곡수차 계수들의 변화량은 다음과 같다.^[21]

$$\begin{aligned} \Delta S_I &= \Sigma 8Gh_i^4 \Delta(n)_i, \\ \Delta S_{II} &= \varepsilon \Delta S_I, \\ \Delta S_{III} &= \varepsilon^2 \Delta S_I, \\ \Delta S_{IV} &= 0, \\ \Delta S_V &= \varepsilon^3 \Delta S_I \end{aligned} \quad (23)$$

단, $\varepsilon = h_i'/h_i$ 이다.

식 (23)를 잘 살펴보면 i 번째 면이 조리개면과 일치하면 조리개면 위에서 $h_i' = 0$ 이므로 조리개면과 일치하는 면에 비구면을 채용하면 구면수차 계수에만 영향을 주고 다른 수차계수에는 영향을 주지 않는다.

또 주광선의 입사고와 주변광선의 입사고의 비 즉, ε 이 작은 면을 비구면화 하므로서 상대적으로 구면수차 이외의 다른 수차계수의 변화를 적게 할 수 있어 비구면화에 따라 구면수차를 제거할 수 있다. 따라서 본절에서는 이러한 Seidel 제 1차 비구면 수차계수의 특성을 이용

하여 초기 설계한 4-구면 반사경계를 기본으로하여 1단계로서 조리개면과 일치하는 제 3면의 비구면 계수를 최적화 변수로하여 구면수차를 최소가 되도록 computer를 이용하여 최적화기법을 사용하였다. 또한 submicron lithography에 적합하도록 모든 수차를 회절한계 이내로 제거하기 위하여 마지막 반사면의 비구면 계수를 최적화 변수로 사용하였으며, 최적화가 진행되는 동안 초점거리($f' = -10$ cm)와 축소배율(1/5)을 고정하였으며, 축상 광량이 55% 이상 투과하도록 하였다. 또한 위의 과정에서 얻은 4-반사경 광학계는 모든 수차가 회절한계 이내로 제거되었기 때문에 lithography 광학계가 요구하는 적당한 양의 defocus에서도 배율오차 및 상면왜곡이 없기 위해서 광학계가 telecentric condition을 만족하도록 광학계의 제 1초 평면에 조리개를 이동시켰다. 이러한 조리개의 위치 이동에 따른 수차계수의 변화는 광학계의 수차가 모두 제거되었기 때문에 영향을 주지 않는다.^[21] 모든 수차가 회절한계 이내로 보정된 telecentric 4-반사광학계 중 가장 성능이 우수한 광학계의 설계치를 표 1에 나타내었으며, 표 2에 비구면화된 면의 비구면계수를 나타내었다. 또한 표 3에 비구면화된 4-반사경 광학계의 각 면에서의 clear aperture와 hole diameter을 나타내었다. 그림 3은 표 1과 2에 표시한 광학계의 설계 data를 실물 크기를 축소하여 나타내었으며, 그림의 광선은 marginal ray를 computer를 이용하여 유한광선 추적하여 광축에 대칭이 되도록 그렸다. 이 광학계는 축상물체에 대하여 약 65%의 광 투과도를 갖는다. 그림 4의 (a), (b), (c)와 (d)는 4개의 반사면 중 3면과 4면을 식 (21)에 의해 비구면화한 4-반사 광학계의 유한광선 수차를 나타낸 것인데 개구수(numerical aperture)가 커지면 커질수록 고차수차의 영향이 증대됨을 알 수 있고, 큰 개구수를 갖는 광학계를 설계시는 고차수차를 고려하여 광학계를 설계하여야 한다. 결과적으로 본 광학계는 N.A.는 0.4, 시계각은 2.6°(image field diameter=4.4 mm) 이내에서 모든 수차들이 회절한계 이내로 보정되었다. 또한 optical lithography 기술에서 중요시 되고 있는 왜곡수차의 형태는 가장자리로 갈수록 증가하는 barrel-shaped이며, full field에서 최대값 6.0×10^{-6} %를 갖는다. 다시 말해서 광학계 전체 field내에서 1.3\AA 이내로 왜곡수차가 보정되었으며, 이것은 submicron lithography 광학계에서 필요한 tolerance를 충분히 만족시키고 있다. 그림 4의 (e)는 telecentric condition의 척도인 주광선의 tangential direction consin (M_{pr}')를 half field angle에 따라 나타낸 것으로서 만약 $M_{pr}' = 0$

표 1. The design data of the aspherized four-mirror system ($f' = -10.0 \text{ cm}$).

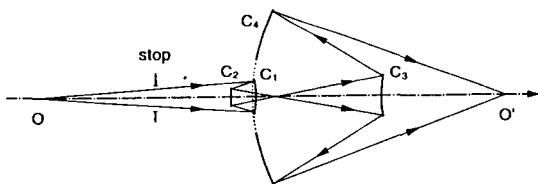
	Mirror No.					
	Object	Stop	I	II	III	IV
Curvature(cm^{-1})			-0.03003024	-0.01951688	0.02302019	0.01251127
Distance(cm)	50.00	39.9092795	-9.9899140	60.0421656	-51.5672376	

표 2. Aspherical coefficients for the mirror No.3 and 4.

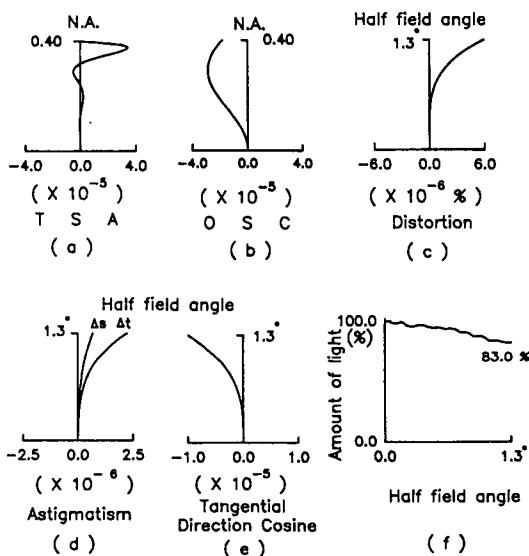
Aspherical coefficients	$a_4(\text{cm}^{-3})$	$a_6(\text{cm}^{-5})$	$a_8(\text{cm}^{-7})$	$a_{10}(\text{cm}^{-9})$
Third surface	$-1.1657125 \times 10^{-6}$	$5.1276500 \times 10^{-10}$	$-4.5072894 \times 10^{-15}$	$7.6794968 \times 10^{-16}$
Fourth surface	$4.6041659 \times 10^{-11}$	$2.6826572 \times 10^{-13}$	$4.0252983 \times 10^{-17}$	$2.2786721 \times 10^{-20}$

표 3. Diameters of clear apertures and central opening of the mirrors for the system given by Table 1 and Table 2 (unit: cm).

	Mirror No.				
	Stop	I	II	III	IV
Clear aperture	8.02	14.30	7.42	18.38	79.36
Hole diameter	0.00	7.44	0.00	0.00	20.82

그림 3. Configuration of the aspherized four-mirror system (c_3, c_4 are aspherical). The stop of the system lies at the first focal plane.

이면 주광선이 상공간에서 완전하게 광축과 평행하게 진행하게 되는데 본광학계는 margin field에서 최대값 $|M_{pr}'| = 1.0 \times 10^{-5}\text{dio}$ 으로 충분히 telecentric 조건을 만족한다고 말할 수 있다. 그림 4의 (f)는 상면에 대한 illumination uniformity에 대응되는 양으로서 축상의 물점에서 출발한 광선들이 최종적인 상면에 도달하는 광선의 수를 100으로 하였을 때 각각의 반시계각에 해당하는 비축상의 물점에서 출발한 광선들이 상면에 도달하는 광선들의 수를 백분율로 나타낸 것으로서 반시계각 1.3° 에서 약 83% 정도이다. 여기서 각각의 비축 물점에서 출발한 광선의 수는 468개이다. 그림 5는 광학계의 성능 평가 방법중 하나인 spot diagram으로서 반시계각 0.0° , 0.9° 와 1.3° 인 경우에 대하여 최적 상면에서 전후로

그림 4. (a), (b), (c), (d) are the residual finite ray aberrations for the aspherized four-mirror system, (e) tangential direction cosine of the principal ray in image space, and (f) relative amount of light in image plane (TSA: transverse spherical aberration, OSC: offense against the sine condition, Δt : tangential ray aberr., Δs : sagittal ray aberr.).

0.2 μm 간격으로 상면을 이동 시켰을 때 각각의 경우에 대한 광학계의 spot의 형태를 나타낸 것이다. 그림속의 원은 KrF excimer laser 파장에 대한 N.A.=0.4일 때 Airy disk(반경 0.38 μm)이다.

V. 결 론

본 논문에서는 Gauss 팔호를 이용하여 1차광학적 양파

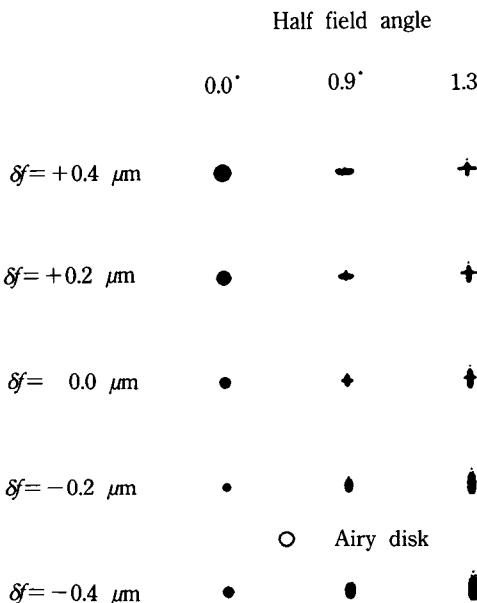


그림 5. Spot diagrams of the asphericized four-mirror system for three half field angles at five defocused image positions. The circle shows the Airy disk (radius $R=0.38 \mu\text{m}$) for KrF excimer laser beam.

Seidel 제 1차 수차계수를 4-구면 반사광학계의 구면수차, 코마, 비점수차, 상면만곡 및 왜곡수차들을 표시하였으며, 이것으로부터 4-구면 반사광학계를 구성하는데 필요한 8개의 설계변수중 5개를 결정하기 위하여 일정한 축소배율(5 \times)을 갖고 5개의 Seidel 제 1차 수차계수중 4개를 이용하여 4-구면 반사경계의 해를 해석적인 방법으로 구하였으며, 각 설계변수에 따른 4-구면 반사광학계의 구조적 특성, vignetting 및 제거되지 않은 잔여수차에 대한 수치해석을 하였다. 또한 잔여수차인 구면수차를 제거하기 위하여 조리개면과 일치하는 세변째 반사면의 비구면 계수를 최적화 변수로 사용하여 구면수차를 제거하였으며, 네번째 반사면을 비구면화하여 submicron lithography용 광학계의 필요조건을 만족할 수 있도록 축소배율(5 \times), 큰 N.A.(numerical aperture), 작은 왜곡수차를 갖도록 하였다. 또한 모든 수차가 제거된 광학계는 조리개의 이동에 수차의 변화가 없으므로 조리개를 광학계의 제 1초평면으로 이동시킴으로서 optical lithography에서 중요시하고 있는 telecentricity를 만족하도록 하였다. 이렇게 설계된 비구면화된 4-반사경 광학계는 N.A.는 0.4, 초점심도는 0.8 μm 그리고 field angle 2.6° 이내에서 회절한계 이내의 성능을 나타내었다.

참 고 문 헌

- [1] A. J. Moses, Optical Materials Properties, IFI/Plenum Data Corporation, 1971 (New York).
- [2] B. J. Lin, "The Path to Subhalf-Micrometer Optical Lithography", SPIE, **922**, 256 (1988).
- [3] K. Kajiyama, *et al.*, "Combination of Narrow Bandwidth Excimer Laser and Monochromatic Reduction Projection Lens", SPIE, **922**, 426 (1988).
- [4] D. R. Shafer, "Four Mirror Unobscured Anastigmatic Telescope with All Spherical Surfaces", Appl. Opt., **17**, 1072 (1978).
- [4] C. G. Wynne, "Two-Mirror Anastigmats", J. Opt. Soc. Am., **59**, 572 (1969).
- [6] J. D. Buckley, "Expanding the Horizons of Optical Projection Lithography", Solid State Technology, Sept., 159 (1984).
- [7] A. Offner, "New Concepts in Projection Mask Aligners", Opt. Eng., **14**, 130 (1975).
- [8] M. V. R. K. Murty, "Offner 1:1 System Some Further Uses", Opt. Eng., **14**, 326 (1985).
- [9] A. Suzuki, "Complete Analysis of a Two Mirror Unit Magnification System: Part 1", Appl. Opt., **22**, 3943 (1983).
- [10] A. Suzuki, "Complete Analysis of a Two Mirror Unit Magnification System: Part 2", Appl. Opt., **22**, 3950 (1983).
- [11] K. Jain and R. T. Kerth, "Excimer Laser Projection Lithography", Appl. Opt., **23**, 648 (1984).
- [12] S. C. Park and S. S. Lee, "Four-Mirror Optical System for UV Submicrometer Lithography", Opt. Eng., **30**, 1023 (1991).
- [13] 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).
- [14] D. Markle, "The Furture and Potential of Optical Scanning Systems", Solid State Technology, Sept., 159 (1984).
- [15] A. C. Stephanakis and D. I. Rubin, "Advances in 1:1 Optical Lithography", SPIE, **772**, 74 (1987).
- [16] F. N. Goodall and R. A. Lawes, "Excimer Laser Photo-Lithography with 1:1 Wynne-Dyson Optics", SPIE, **922**, 410 (1988).
- [17] J. Dyson, "Unit Magnification Optical System Without Seidel Aberrations", J. Opt. Soc. Am., **49**, 713 (1959).
- [18] Half Field Dyson Optical Design, Ultratech Step-

- per (1991).
- [19] M. Herzberger, "Gaussian Optics and Gaussian Bracekets", *J. Opt. Soc. Am.*, **33**, 651 (1943).
- [20] R. Kingslake, *Lens Design Fundamentals*, (Academic Press, New York 1978) Chap. 7.
- [21] W. T. Welford, *Aberrations of the Optical Systems* (Adams Hilger Ltd., Bristol, 1986).

Further Analysis of Optical Aberration of Four-Mirror Optical System for Deep UV Submicron Lithography

Jong Tae Kim and Sang Soo Lee

Department of Physics, Korea Advanced Institute of
Science and Technology, Taejon 305-701, Korea

(Received: January 13, 1993)

A design of four-mirror optical system with reduction magnification $5\times$ for deep UV ($\lambda=248\text{ nm}$ of KrF excimer laser) submicron lithography is presented. Initially by using the paraxial quantities, the domain of solution for $t=d_1+d_2+d_3<0$ (d_i : distance between the mirror c_i and c_{i+1}) is found for the system which is free from the four off-axial Seidel first order aberrations that are coma, astigmatism, field curvature, and distortion. The solution with $d_o=2.95$ (normalized with respect to $c_1=-1$) is chosen and the aspherization is carried out to the spherical mirror surfaces (c_3 and c_4) in order to reduce the axial and residual off-axial higher order aberrations. The numerical aperture of the final system is as large as 0.4, which gives Rayleigh resolution of $0.38\text{ }\mu\text{m}$.