

모든 3차 수차와 5차 구면수차를 제거하여 얻은 극자외선 리소그래피용 5-반사광학계

이동희 · 공홍진 · 이상수

한국과학기술원 물리학과

(1993년 10월 29일 받음)

축소배율($M=+1/5$)을 갖는 극자외선(deep ultra-violet) 리소그래피용 5-반사광학계를 설계하였다. 먼저 모든 3차 수차와 5차 구면수차를 영으로 하는 수치적인 해를 구면에 대해서 구하였다. 다음 비교적 크게 나타나는 잔류 수차(구면수차, 코마)의 제거를 위하여 마지막 두 반사경에 대하여 비구면화를 optimization방법에 의해 이행하였다. 이렇게 하여 얻은 광학계는 광원을 KrF 엑시머 레이저(파장 $0.248 \mu\text{m}$)로 하는 nearly incoherent illumination($\sigma=1$)인 경우, NA는 0.45, 분해능은 50% MTF 기준치에서 depth of focus $1.0 \mu\text{m}$ 에 대해 약 500 cycles/mm의 성능을 갖는 시스템이 되었다.

I. 서 론

보다 높은 분해능을 얻기 위해서, 리소그래피 광학계에서는, 보다 큰 개구수(NA)를 가지며 보다 짧은 파장의 광원을 사용할 수 있는 시스템으로의 발전이 계속되고 있다.^[1-3] 그렇지만 굴절광학계에서는 이러한 발전방향을 따를 수 없는 몇 가지 제약이 있다. 특히 광원으로서의 엑시머 레이저에 의한 $0.248 \mu\text{m}$ (KrF) 또는 $0.193 \mu\text{m}$ (ArF)의 파장에서는 광굴절 매질의 광흡수, 광분산에 의한 광투과율 감소, 색수차 등이 중요한 문제가 된다. 이러한 문제는 반사광학계에서는 쉽게 극복되어질 수 있다.

Dyson series는 한개의 굴절렌즈와 한개의 반사경으로 구성되는데 렌즈의 한면과 반사경의 반사면이 공심 광학계를 구성한다. 이들은 공심 광학계의 특성 때문에 모든 3차 수차와 그밖의 고차 수차 일부를 제거할 수 있어서 상당히 큰 NA(0.5~0.7)를 가질 수 있다. 그렇지만 단점으로는 공심광학계의 특징인 고정배율($M=-1$)이어서 축소배율을 갖는 설계가 불가능한 것과 색수차의 존재 등이 있다.^[4,5] 그런데 1975년 순수한 반사광학계로서 Offner는 공심 2-구면반사경계를 발표하였는데 3번의 반사에 의해 결상이되고 모든 3차수차가 제거된 시스템이다.^[6] 그러나 단점으로는 역시 고정배율($M=-1$)이라는 데 있다. 한편 축소배율을 가질 수 있는 순수한 반사광학계로서는 본 연구실에서 많은 연구가 있었다.^[7-10] 축

소배율($M=-1/5$)을 가지면서 Cassegrainian inverse Cassegrainian 형상으로 구성되는 4-반사광학계들이 발표되었는데 이들은 수차식 표현에서 Gaussian bracket을 이용했고 5개의 3차수차 중에서 4개만을 영으로 하는 수치적인 해에서 출발하여 보다 큰 NA를 가지도록 최적화 기법에 의해서 비구면화 되어졌다. 그렇지만 이들의 NA는 0.25~0.38 정도로 비교적 작다.

본 연구에서는 이러한 작은 NA를 극복하기 위해서 5-반사광학계를 제안한다. 반사면의 증가에 의한 늘어난 설계변수에 의해 모든 3차수차와 5차구면수차를 제거한 수치적인 해를 얻을 수 있었는데, 4-반사광학계에서와 마찬가지로 두 설계변수는 자유변수로 유지할 수 있었다. 이 두 자유변수(그림 1(a)의 d_0, d_1)로 수치적인 해의 영역을 d_0-d_1 평면에 나타낼 수 있었다. 이 해의 영역에서, 두번째 반사경에 의한 첫번째 반사경에 의한 central obscuration이 가장 작으면서 시스템을 구성하는 반사경중 가장 큰것이 상대적으로 작게 되는, 한개의 수치적인 해를 선택하여 잔류 구면수차와 코마를 보정하기 위해 마지막 두 반사경을 비구면화하여 최종적인 5-반사광학계로 선택하였다. 이렇게 하여 결정된 축소배율 $M=+1/5$ 를 갖는 5-반사광학계는 NA: 0.45, object field diameter: 26 mm, depth of focus: $1.0 \mu\text{m}$ 이내에서 $0.248 \mu\text{m}$ (KrF 엑시머 레이저 빔)의 nearly incoherent illumination($\sigma=1$)^[11,12] 광원에 대해 MTF 50%의 기준^[13]에서 분해능 약 500 cycles/mm을 갖게 되었다. 여기서 σ 는

projection system에서 effective source의 반경과 projection lens의 입사동의 반경의 비로 정의된다.^[11,12]

II. 모든 3차 수차와 5차 구면 수차가 제거된 5-구면 반사광학계에 대한 수차식의 해석

그림 1(a)은 5-반사광학계를 나타낸다. 여기서 조리개(aperture stop)은 4번째 반사경에 있고 주광선(principal ray)은 이 조리개에서 광축과 각 β 를 이룬다. 우리는 축소배율 $M = +1/5$ 를 가지며 모든 3차수차($S_i, i = I, II, III, IV, V$)와 5차 구면수차(T_i)^[14-16]가 제거된 수치적인 해를 원한다. 따라서 배율 조건과 수차계수식에 의한 필요한 연립방정식은 Gaussian 괄호($[]$)^[17,18]를 사용하여 설계변수 c_i, d_{i-1} ($i = 1, 2, 3, 4, 5$)로 표현하면 다음과 같다. 수차계수식은 Y. Matsui의 표현^[14]을 사용하였다.

수차계수식의 해석적인 표현은 H.A. Buchdahl^[16]에 의해서도 유도되어 있지만 Y. Matsui의 표현이 좀 더 간결하다.

$$S_I = 2u_0^4 \sum_{i=1}^5 (-1)^i c_i g^2_{2i-1} a_i^2 = \sum_{i=1}^5 I_i = 0, \tag{1}$$

$$S_{II} = 2u_0^3 \beta \sum_{i=1}^5 (-1)^i c_i g^2_{2i-1} a_i b_i = \sum_{i=1}^5 J_i = 0, \tag{2}$$

$$S_{III} = 2u_0^2 \beta^2 \sum_{i=1}^5 (-1)^i c_i g^2_{2i-1} b_i^2 = 0, \tag{3}$$

$$S_{IV} = 2u_0^2 \beta^2 \sum_{i=1}^5 (-1)^i [c_i g^2_{2i-1} b_i^2 - c_i g_i^2] = 0, \tag{4}$$

$$S_V = 2u_0 \beta^3 \sum_{i=1}^5 (-1)^i [c_i g^2_{2i-1} b_i^3/a_i - c_i g_i^2 b_i/a_i] = 0, \tag{5}$$

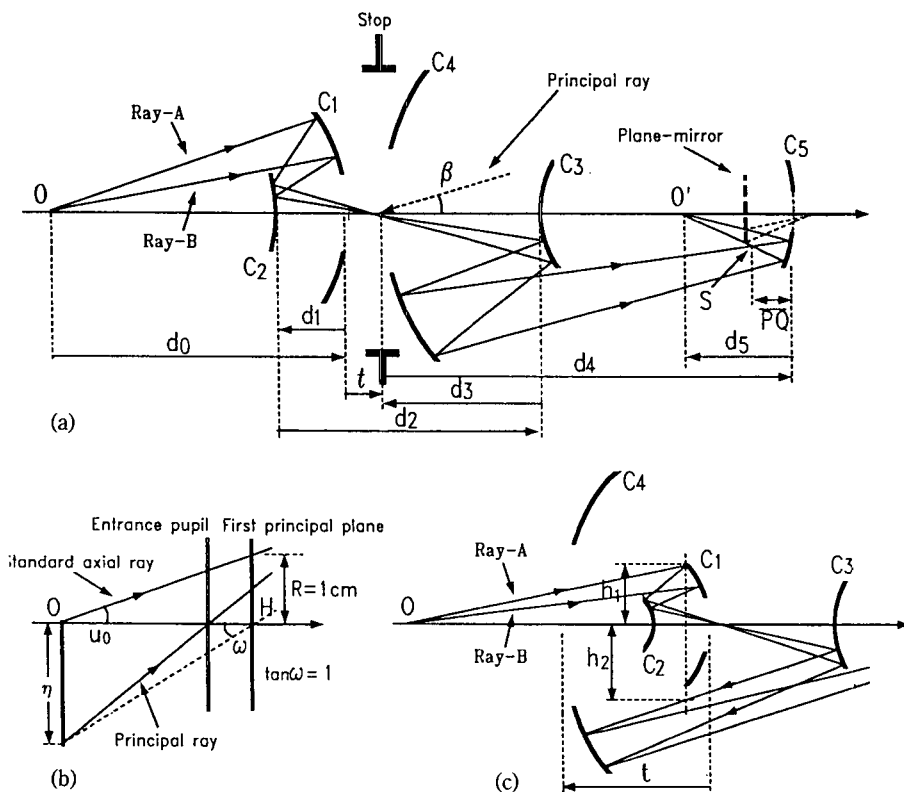


그림 1. (a) Typical configuration of a five spherical mirror system with the stop at the vertex of the fourth mirror surface. (b) Required conditions of the initial marginal ray and the initial principal ray for the calculation of coefficients of aberrations.^[14,15] (c) In case of $t < 0$, the relation between h_1 and h_2 . (Ray-A, Ray-B: the rays from the axial object point through the full margin of the entrance pupil and through the 0.7 margin of the entrance pupil, respectively).

$$T_i = \sum_{i=1}^5 (T_i + 6I_i \sum_{k=1}^{i-1} V_k - 6J_i \sum_{k=1}^{i-1} I_k) = 0, \quad (6)$$

$$M = 1/g_{10} = 1/5, \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned} V_i &= -2(-1)^i u_0^2 c_i g_{2i} - a_i (1 + u_0 \beta a_i e_i), \\ T_i &= -6u_0^6 c_i^2 g_{2i-1}^2 [2a_i + 2g_{2i-2} - (-1)^i c_i g_{2i-1}], \\ u_0 &= -\frac{[2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4, d_4, 2c_5]}{g_{10} + 1} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\beta = \frac{1}{g_7 u_0}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} g_0 &= [] = 1, \\ g_1 &= [d_0], \\ g_2 &= [d_0, 2c_1], \\ g_3 &= [d_0, 2c_1, -d_1], \\ g_4 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2], \\ g_5 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2], \\ g_6 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3], \\ g_7 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3], \\ g_8 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4], \\ g_9 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4, d_4], \\ g_{10} &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4, d_4, 2c_5], \\ a_1 &= [d_0, c_1], \\ a_2 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -c_2], \\ a_3 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, c_3], \\ a_4 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -c_4], \\ a_5 &= [d_0, 2c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3, -2c_4, d_4, c_5], \\ b_1 &= [c_1, -d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3], \\ b_2 &= [-c_2, d_2, 2c_3, -d_3], \\ b_3 &= [c_3, -d_3], \\ b_4 &= 1, \\ b_5 &= [d_4, c_5], \\ e_1 &= [-d_1, -2c_2, d_2, 2c_3, -d_3], \\ e_2 &= [d_2, 2c_3, -d_3], \\ e_3 &= [-d_3], \\ e_4 &= 0, \\ e_5 &= [-d_4], \end{aligned}$$

여기서 c_i 는 각 반사경의 곡률(curvature)이고 d_i 는 각 반사경 사이의 거리이다(그림 1(a)). 식 (8)의 u_0 는 광축 상의 물체점(object point)에서 제 1 주요면(principal

plane)에서의 높이가 1(즉 그림 1(b)에서 $R=1\text{ cm}$)이 되도록 진행되는 초기 근축광선(initial paraxial ray)의 초기 근축각이고, 식 (9)의 β 는 주광선(principal ray)이 제 1 주요면에서 보는 object half-field angle의 tangent값이 1이 되도록 하는 object point에서 출발할 때 조리개 위치에서 광축과 이루는 각도이다. 이러한 u_0 , β 에서의 제한조건은 특히 5차수차식의 계산에서는 반드시 필요하다.^[14,15] 이 때 Helmholtz-Lagrange invariant는 -1이다. Petzval sum이 영인 조건인 식 (4)를 다시 적어보면,

$$c_5 = -c_1 + c_2 - c_3 + c_4, \quad (10)$$

이고, 식 (7)을 정리하면

$$d_4 = \frac{M^{-1} - 2c_5 g_7 - g_8}{2c_5 g_8} \quad (11)$$

이 된다. 따라서 원하는 5-구면 반사경계는 식(1), (2), (3), (5), (6), (10), (11)을 연립하여 풀면 구할 수가 있다.

III. 5-구면 반사광학계의 수치적인 해에 대한 해법 및 해의 영역

5-구면 반사광학계는 10개의 설계변수를 가진다. 전장의 연립방정식 7개에 의해 3개의 자유변수만 남겨질 수 있으나 전체 시스템의 scaling을 위해 $c_1 = -1$ 로 두면 결국 자유변수는 2개로 둘 수 있다. 이 두 자유변수를 d_0, d_1 로 하여 본 논문을 진행시키고자 한다. c_1 의 부호가 마이너스인 것은 5-구면 반사경계의 전반부 두 반사경이 Cassegrainian계 또는 Gregorian계임을 나타낸다. d_0-d_1 좌표계에서 수치적인 해의 영역을 나타내기 위해서는 전장에 주어진 연립방정식을 순차적으로 주어지는 d_0, d_1 에 대하여 optimization기법^[19]으로 프로그래밍 되어진 컴퓨터 계산에 의해 연립으로 풀어야 한다. 7개의 연립방정식을 푸는데 필요한 알고리즘은 그림 2에 나와있다. 이 때 주어진 d_0, d_1 에서 해가 존재하면 d_0-d_1 좌표계에 해의 영역으로 기록되어지게 된다. 그러나 실용적인 5-구면 반사경계이기 위해서는 다음의 여러가지 조건들이 부과되어야 한다. 즉 $d_1 < 0, d_3 < 0, d_2 > 0, d_4 > |d_3|, \text{vig}_1 < 7, \text{vig}_2 < 0.7$. 여기서 vig_1 은 2번째 반사경에 의한 1번째 반사경에서의, vig_2 는 3번째 반사경에 의한 4번째 반사경에서의, central obscuration을 나타내고 있는데, object의 광축상으로부터의 광선 중 $(\text{vig}_i)^2 \times 100\%$ ($i=1, 2$) 만큼의 광선이 막힘을 뜻한다. 또한 그림 1(a)와 같이

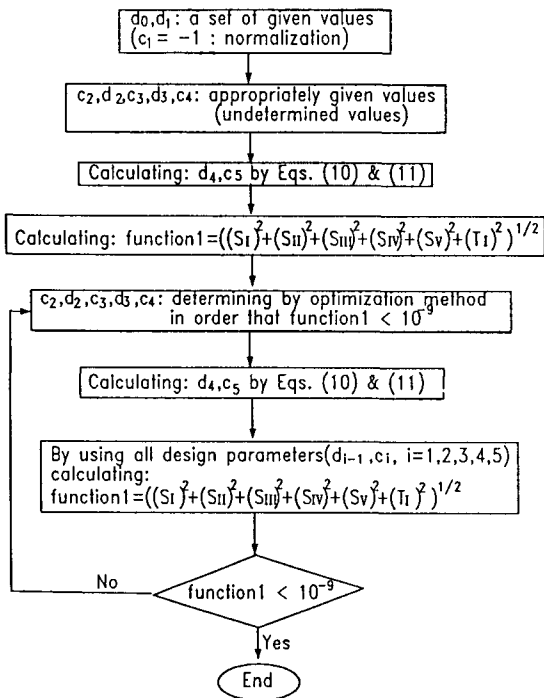


그림 2. Flow chart for solving the simultaneous equations of five spherical mirror systems.

평면 반사경으로 결상변을 c_5 의 오른쪽에 둘 수 있도록 하기 위해 $2 \times \bar{P}\bar{Q} < |d_5|$ 그리고 $\bar{P}\bar{Q} < d_4 + d_3$ 가 되는 조건이 필요하다. 여기서 $\bar{P}\bar{Q}$ 는 그림 1(a)에서 S로부터 c_3 와 c_5 사이에서, 광축상의 object를 출발한 ray가 입사동의 가장자리(full-margin)를 진행하여 이루는 Ray-A와 입사동의 0.7가장자리(0.7 margin)를 진행한 Ray-B가, 만나는 점이다. 더우기 $t (=d_1 + d_2 + d_3)$ 가 음수일 경우 3번째와 4번째 반사경을 지나서 ray들이 1번째 반사경에 의해 막히지 않아야 한다. 따라서 그림 1(c)에서 $h_1 < h_2$ 의 조건이 추가되어야 한다. 여기서 h_1 은 c_1 의 가장자리를 입사하면서 스쳐지나가는 Ray-A의 높이이고, h_2 는 3번째 반사경에서 4번째 반사경을 지나갈 때 h_1 의 높이를 전 위치에서의 Ray-B의 높이를 나타낸다. 이러한 조건에 의하여 얻은 결과는 그림 3에 나타나 있다. 그림 3(a)는 $c_1 = -1$, $NA = 0.4$ 로 했을 때 존재할 수 있는 원하는 5구면 반사경계의 해 영역의 diagram을 나타낸다. 앞의 4개의 반사경은 모두 Cassegrainian inverse Cassegrainian 형태를 나타낸다. 그림 3(b)는 유효초점거리를 -100 mm, NA 를 0.4로 했을 경우의 잔류 횡 구면수차의 contour map을 나타내고 있는데 잔류 수차량은 $2.8 \mu\text{m}$ 에서

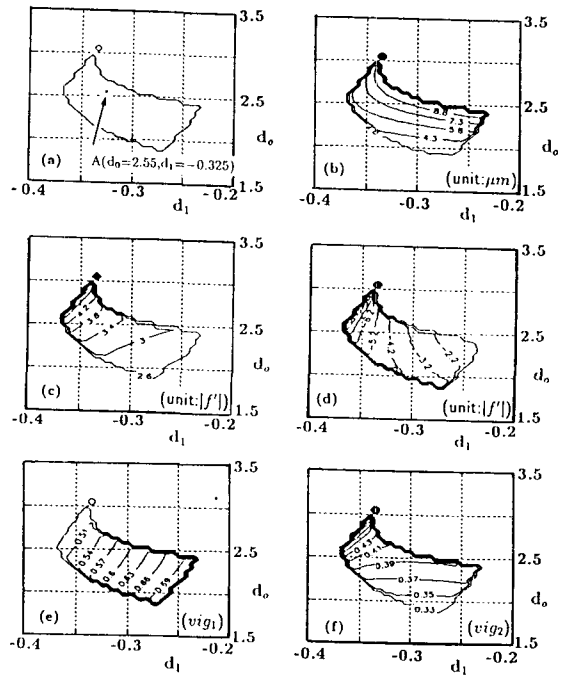


그림 3. Solution domain and various characteristics of the five spherical mirror systems($NA=0.40$) which are free from all third order aberrations and fifth order spherical aberration (y-axis: d_0 , x-axis: d_1). (a) solution domain, (b) contour map of the residual transverse spherical aberration, (c) contour map of size of the largest mirror, (d) contour map of the thickness t from c_1 to c_4 , (e) contour map of vig_1 and (f) contour map of vig_2 .

$9.6 \mu\text{m}$ 에 이른다. 그림 3(c)는 초점거리의 절대값을 단위로 한 제일 큰 반사경(c_4)의 반경에 대한 contour map을 나타낸다. 이 반경들의 범위는 약 2.6~5.1배이다. 그림 3(d)는 마찬가지로의 단위에 의한 거리 $t (=d_1 + d_2 + d_3)$ 의 contour map을 나타내고 있는데 모두 음수로 -1 에서 -9 배에 이르고 있다. 그림 3(e)는 vig_1 의 contour map을 그림 3(f)는 vig_2 의 contour map을 보여주고 있는데 각각 0.70~0.48, 0.33~0.52 정도의 범위를 가지고 있다. 그림 4는 그림 3(a)의 $A(d_0=2.55, d_1=-0.325)$ 에 위치한 초기해($NA: 0.4, f': -100$ mm, object-field-size: 26 mm)의 잔류 유효광선 수차를 나타내고 있는데, 다음장에서 기술할 최종적인 해는 이 'A'를 초기해로 하여 얻게 될 것이다. 비록 3차와 5차 구면수차가 제거되었지만 아직 7차 이상의 수차에 의한 잔류 구면수차가 $8.6 \mu\text{m}$ 정도로

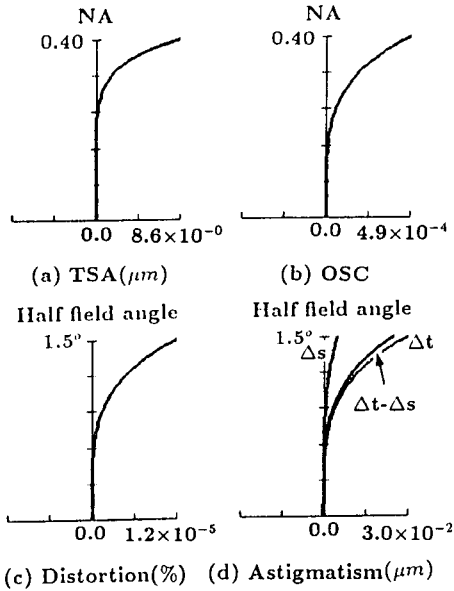


그림 4. (a), (b), (c) and (d) are the residual finite ray aberrations for the five spherical mirror system A in Fig. 3(a) with the focal length of -100 mm and the object-field-size of 26 mm for KrF excimer laser beam(TSA: transverse spherical aberration, OSC: offense against sine condition, Δt : tangential ray aberration, Δs : sagittal ray aberration and astigmatism: $\Delta t - \Delta s$).

남아있다[그림 4(a)]. 또한 잔류 코마도 아직 상당히 남아있다. 그러나 왜곡수차는 full-field에서 0.3 nm 정도 인데 이는 리소그래피 광학에서의 요구를 충분히 만족시킬 정도로 작다.^[20,21] astigmatism도 full-field에서 0.03 μm 정도로 충분히 작다. 이러한 경향은 그림 3(a)의 모든 영역의 해에 대해 공통적인 특징이다. 그러므로 보다 높은 NA를 가지는 5반사광학계를 위해선 잔류구면 수차와 코마의 제거가 필요한데, 이것은 5구면 반사광학계의 마지막 두 반사경을 비구면화함으로써 이룰 수 있다.

IV. 비구면화에 의한 잔류 고차 수차 보정

비구면의 표현은 다음과 같다.

$$z = \frac{cy^2}{1 + \sqrt{1 - c^2y^2}} + a_4y^4 + a_6y^6 + a_8y^8 + a_{10}y^{10} + \dots \quad (12)$$

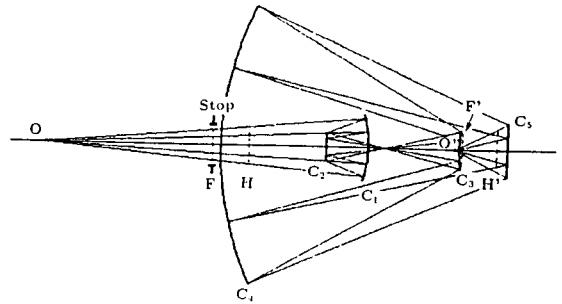


그림 5. Configuration of the aspherized five mirror system (c_4, c_5 are aspherical). The stop of the system lies on the first focal plane. (F, F': 1st and 2nd focal plane, H, H': 1st and 2nd principal plane).

여기서 y 는 주변 광선(marginal ray)의 입사고, c 는 각 반사경의 곡률, a_i ($i=4, 6, 8, 10$)는 접구면으로 부터의 변형을 표현하는 비구면 계수이다. 우리는 4번째와 5번째면에 비구면을 도입하였는데 감쇄 최소 자승법을 이용한 optimization 기법^[19]을 personal-computer로 프로그램하여 적용하였다. optimization과정에서 4번째 반사경의 비구면화는 주로 잔류구면수차를 제거하는데 사용하였는데, 조리개가 위치한 면의 비구면화가 구면수차에 보다 큰 영향을 미친다는 것은 잘 알려진 사실이다. 5번째 반사경의 비구면화는 주로 잔류 코마를 제거하는데 사용하였다. 이 optimization과정에서 defocused spot diagram으로 판단해 볼 때 그림 3(a)의 모든 해는 1.0 μm 이상의 depth of focus, 26 mm의 object-field-size, 0.4 이상의 NA를 갖는 시스템으로 될 수 있었다. 그렇지만 광축상의 object의 시스템 투과 ray들에 대한 비광축상의 object에서의 시스템 투과 ray들의 비(ratio)를 80% 이상으로 하고, 잔류 수차량이 될 수 있으면 작을 것이며, MTF에 영향을 주는 2번째 반사경에 의한 1번째 반사경에서의 obscuration, 즉 vig_1 이 될 수 있는 한 작게되는 시스템을 구하는 것이 보다 좋은 성능을 가지는 시스템을 얻을 수 있는 방법이 된다. 여기서 vig_2 는 그림 3(e), (f)에서 알 수 있듯이 vig_1 보다 작다. 따라서 MTF에의 영향은 고려할 필요가 없다. 이러한 조건을 충족시키는 시스템은 그림 3(a)의 'A'의 해의 비구면화에 의해 얻을 수 있었다. 마지막으로 상 공간의 telecentricity를 만족하기 위해 시스템의 조리개를 제 1 초점면으로 이동하였다. 그림 5에는 이렇게 하여 구한 최종적인 비구면 5 반사광학계를 보여주고 있다. 여기서 두 axial ray(full-

표 1. Initial spherical mirror design data before aspherization of the five spherical mirror system corresponding to the point A in Fig. 3(a), which is free from all third order aberrations and fifth order spherical aberration with the stop at the vertex of fourth mirror surface($f' = -10$ cm).

Object	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Curvature(cm ⁻¹)	-0.0268233	-0.0158376	0.0257922	0.0112483	-0.0035581
Distance(cm)	95.066463	-12.116314	38.715445	-69.316409	83.428293

표 2. Design data of the aspherized five mirror system for KrF excimer laser line($f' = -10$ cm).

Object	Stop	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Curvature(cm ⁻¹)		-0.0268229	-0.0158373	0.0257918	0.0112499	-0.0035539
Distance(cm)	49.999997	45.067936	-12.116501	38.716043	-69.317481	83.429582

Aspherical coefficients

	a_4 (cm ⁻³)	a_6 (cm ⁻⁵)	a_8 (cm ⁻⁷)	a_{10} (cm ⁻⁹)
Fourth surface	9.650611×10^{-12}	$-5.104333 \times 10^{-14}$	$-1.030905 \times 10^{-17}$	$-8.714684 \times 10^{-21}$
Fifth surface	-4.328044×10^{-9}	-1.841122×10^{-9}	7.990434×10^{-12}	$-1.991521 \times 10^{-14}$

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

	Stop	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
Clear aperture	9.04	19.25	8.27	11.27	79.93	15.84
Hole diameter	0.00	8.27	0.00	0.00	19.25	0.00

marginal, 0.55-marginal)의 경로도 함께 보이고 있다. 비구면화 하기 전후의 이 시스템에 대한 data가 표 1, 2에 나타나 있고, 구성 반사경의 clear aperture와 hole diameter의 data가 표 3에 나타나 있다. 그림 6은 잔류 유한광선 수차를 보여주고 있다. NA 0.45에서 구면수차는 0.15 μ m 정도[그림 6(a)]로 상당히 작다. 0.45의 NA는 KrF 엑시머 레이저의 248 nm의 파장에 대해서 0.34 μ m의 Rayleigh 반경에 해당한다. 시계각(field angle)은 3° 정도인데 이는 초점거리 -100 mm에 대해 object-field-diameter가 26 mm 정도에 해당한다. 이 시스템의 왜곡수차량은 full-field에서 약 0.2 nm 정도이다[그림 6(c)]. 상공간에서의 광축에 대한 주광선의 방향 cosine은 1.7×10^{-5} [그림 6(e)]인데 충분히 telecentric하다고 할 수 있다. 그림 6(f)는 전 시계각에 따라 광학계를 투과하는 ray들의 상대적인 광량비(시계각이 0.00인 경우의 광량을 100%로 할 때)를 도시한 것인데 full-field에서 약 86.6% 정도이다. 그림 7은 반시계각(half field angle) 0.0° 1.0° 1.5°인 경우에 대하여 최적상면에서 전후로 0.

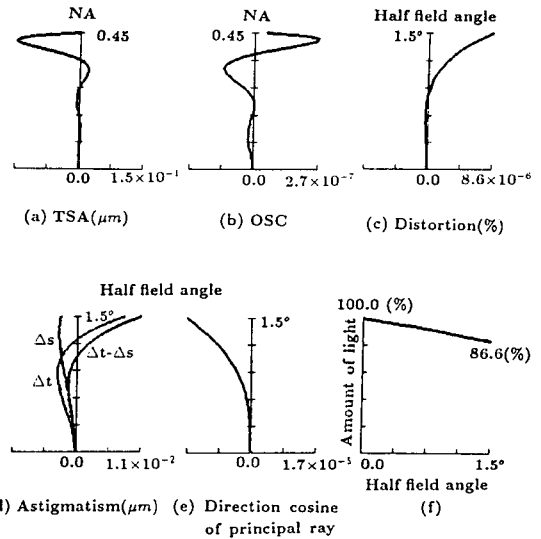


그림 6. (a), (b), (c) and (d) are the residual finite ray aberrations of the aspherized five mirror system with the focal length of -100mm, the object-field-size of 26 mm and NA of 0.45 for KrF excimer laser beam, (e) is the direction cosine of principal ray in the image space, and (f) is the relative amount of light passing through the system. (TSA: transverse spherical aberration, OSC: offence against sine condition, t: tangential ray aberration, s: sagittal ray aberration, and astigmatism: $\Delta t - \Delta s$).

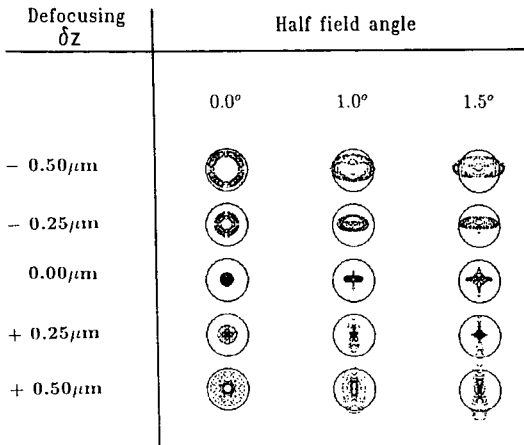


그림 7. Spot diagrams of the aspherized five mirror system for three half field angles at five defocused image positions. The depicted circle is the Airy disk (radius $R=0.34 \mu\text{m}$) for KrF excimer laser beam.

25 μm 간격으로 상면을 이동시켰을 경우(5개의 defocused image position)의 spot diagram을 보여주고 있다. 이것은 대부분의 ray들이 1.0 μm 의 depth of focus에 대하여 0.34 μm 의 Rayleigh-반경의 원안으로 들어가고 있음을 보여주고 있다. 이 그림에서 원들은 KrF 엑시머 레이저 파장($\lambda=0.248 \mu\text{m}$)에 대한 Airy disk(반경: 0.34 μm)을 나타낸다. 그림 8은 이 시스템의 최적상면에서의 nearly incoherent illumination($\sigma=1.0$)에 대한 MTF를

나타내고 있다. 여기서 우리는 depth of focus 1.0 μm , 50% MTF criterion^[13]에 대해서 약 500 cycles/mm의 분해능을 가짐을 알 수 있다. 특히 0.0° field에서는 회절한계의 성능을 가짐을 알 수 있고 최대의 분해능은 약 650 cycles/mm임을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 모든 3차 수차와 5차 구면수차를 영으로 하는 조건에서 배율 +1/5를 갖는 5구면 반사광학계에 대한 해를 구하였다. 이 해들의 d_0-d_1 좌표 평면에서의 2차원적인 분포와 나타나는 여러가지 특성들을 고려하여 하나의 해를 선택할 수 있었고, 유한광선 수차에 대한 최적화 기법에 의한 마지막 두 반사경의 비구면화와 조리개의 제 1 초점면으로의 이동으로 우리는 상공간에서 충분히 telecentricity를 만족하고 최소의 잔류수차와 보다 큰 NA를 갖는 5반사광학계를 얻을 수 있었다. -100 mm의 초점거리와 KrF 엑시머 레이저 파장 0.248 μm 에 대하여 최종 시스템은 0.45의 NA, depth of focus 1.0 μm , image-field-diameter 5.2 mm, nearly incoherent illumination($\sigma=1.0$)과 50% MTF 기준치에 대하여 약 500 cycles/mm의 분해능을 갖게 되었다. 비구면화 전의 선택되어진 5구면 반사광학계의 초기 잔류수차량이 비교적 작기 때문에 우리는 이전에 발표된 4반사경계^[7-10]에서보다 보다 높은 NA와 분해능을 빠르게 얻을 수 있었던 것이다. 그러나 NA가 커짐으로 해서 나타나는 제일 큰 반사경의 크기(약 80 cm)를 감소시킬

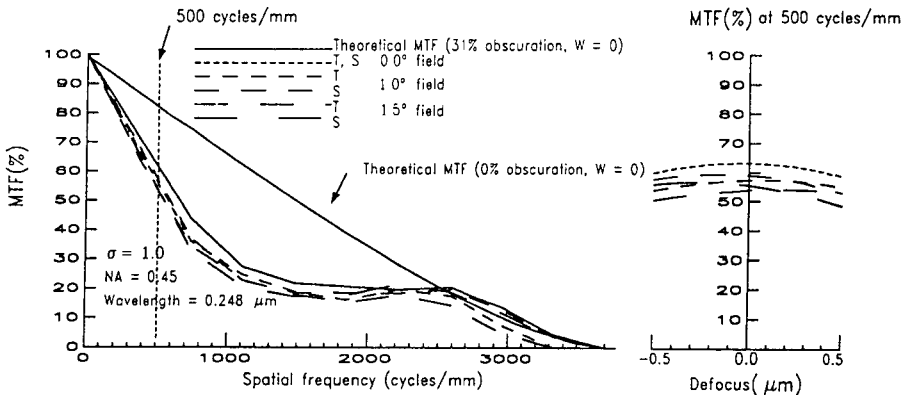


그림 8. MTF through frequency (cycles/mm) and through focus of the aspherized five mirror system for three half field angles at the Gaussian image position in case of the coherence factor $\sigma=1.0$. (W: residual aberration).

수 있는 해의 발견이 앞으로의 과제이다.

감사의 글

금성사 영상미디어 연구소의 박성찬 박사의 nearly incoherent illumination에 대한 자료제공 및 토의에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

[1] H. L. Stover, "Lens specification and distortions", SPIE, **772**, 2(1987).
 [2] G. E. Fuller, "Optical Lithography Status", Solid State Technology, **30**(9), 113(1987).
 [3] S. Okazaki, "Lithographic Technology for Future ULSIs", Solid State Technology, **34**(11), 77(1991).
 [4] J. Dyson, "Unit Magnification Optical System without Seidel Aberrations", J. Opt. Soc. Am., **49**(7), 713(1959).
 [5] R. M. H. Hew, G. Owen, and R. F. W. Pease, "Analytic optimization of Dyson optics", Appl. Opt., **31**(10), 1444(1992).
 [6] A. Offner, "New concepts in projection mask aligners", Opt. Eng. **14**(2), 130(1975).
 [7] S. C. Park and S. S. Lee, "Four-Mirror Optical System for UV Submicrometer Lithography", Opt. Eng., **30**(7), 1023(1991).
 [8] J. T. Kim, H. J. Kong, and S. S. Lee, "Improved four-mirror optical system for deep-ultraviolet submicrometer lithography", Opt. Eng. **32**(3), 536 (1993).
 [9] 김종태, 공홍진, 이상수, "4개의 수차가 보정된 유한

물체점을 갖는 4-구면 반사경계의 설계 및 수차 해석", 한국광학회지, **2**, 127(1991).
 [10] 조영민, 이상수, 박성찬, "Deep UV 마이크로 리소그라피용 Stepper를 위한 4구면 반사경계", 한국광학회지, **2**, 186(1991).
 [11] 田邊容由, "ステッパ光學系における超解像技術の比較", 光學, **21**(6), 415(1992).
 [12] 福田宏, 岡崎信次, "超解像光リソグラフィ", 光學, **19**(5), 290(1990).
 [13] C. Wang and D. L. Shealy, "Differential equation design of finite-conjugate reflective systems", Appl. Opt., **32**(7), 1179(1993).
 [14] 松居吉哉, レンズ設計法 (共立出版株式会社, 東京, 1972) 第 4 章.
 [15] 草川徹, レンズ光學 (東海大學出版會, 東京, 1988) 第 4 章.
 [16] H. A. Buchdahl, *Optical Aberration Coefficients* (Dover Publications Inc., New York, 1968).
 [17] M. Herzberger, *Modern Geometrical Optics* (Interscience Publisher, New York, 1958).
 [18] K. Tanaka, "Paraxial theory in Optical design in terms of Gaussian brackets", *Progress in Optics*, Vol. XXII, E. Wolf ed. (North-Holland, Amsterdam, 1986) pp.63-111.
 [19] R. W. Daniels, *An Introduction to Numerical Methods and Optimization Techniques* (North-Holland, New York, 1978) Chap. 8.
 [20] B. J. Lin, "The Path to Subhalf-Micrometer Optical Lithography", SPIE, **922**, 256(1988).
 [21] R. Hirose, "New g-line Lens for Next Generation", SPIE, **1088**, 178(1989).

Five Mirror System Derived from the Numerical Solutions of All Zero 3rd Order Aberrations and Zero 5th Order Spherical Aberration for DUV Optical Lithography

Dong Hee Lee, Hong Jin Kong and Sang Soo Lee

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

(Received: October 29, 1993)

A five mirror system with a reduction magnification($M = +1/5$) is designed for DUV optical lithography. Initially, numerical solutions of all zero 3rd order aberrations and zero 5th order spherical aberration are obtained for the spherical mirror system. Next, by the optimization method, the aspherization is carried out to the two spherical mirrors to obtain a system that has as less residual aberrations, higher NA and improved MTF as possible. We have finally obtained the system of which NA is 0.45 and the resolution is about 500 cycles/mm at the 50% MTF value criterion and the depth of focus of $1.0 \mu\text{m}$ for the nearly incoherent illumination($\sigma = 1.0$) and the wavelength of 0.248 m(KrF excimer laser line).