

# 부분간섭성조명과 Central Obscuration이 고려된 5

## 반사광학계의 설계와 성능평가

이 동 회\*

대우전자 중앙제2연구소 AMA개발팀

서울 중구 남대문로 5가 541번지

이 상 수

한국과학기술원 물리학과

대전시 유성구 구성동

부분간섭성조명과 central obscuration의 Optical Transfer Function( OTF )에의 영향을 조사해보고, 이의 programing 기법을 소개하며, 모든 3차 수차와 5차 구면수차가 제거된 5반사광학계에 적용하여 축소배율( M = +1/5 )을 갖는 리소그래피용 광학계로서의 가능성을 알아보았다. 이렇게 하여 얻어진 광학계는 central obscuration이 약 31%이고 광원을 ArF excimer 레이저( 파장 0.193 $\mu$ m )로 하는 nearly inchoerent illumination(  $\sigma = 1.0$  )인 경우 NA가 0.45이며 분해능이 50% MTF 기준치와 초점심도 0.8  $\mu$ m에 대해 약 600 cycles/mm 정도인 성능을 갖는 시스템이 되었다.

### I. 서 론

반도체 집적회로의 집적도가 증가함에 따라, 보다 미세한 회로 패턴을 가공하는 리소그래피기술이 요구되고 있다. 1990년 이후 최소선폭 0.8 $\mu$ m인 4 Mbit DRAM( dynamic random access memory )의 제조에는 고압수은등 g-line( 파장 0.436 $\mu$ m )을 광원으로 하는 축소투영노광장치( stepper )가 사용되고 있다. 16 MDRAM은 필요한 최소선폭이 0.5 $\mu$ m 인데 이는 거의 g-line의 파장과 같은 정도이다. 보통의 노광방법으로는 광원의 파장이하의 패턴은 분해할 수 없기 때문에 16 MDRAM에서는 고압수은등 i-line( 파장 0.365 $\mu$ m )이 사용되어서 양산 시제품이 만들어지고 있다. 64 MDRAM과 256 MDRAM에서는 필요한 최소선폭이 각각 0.3 $\mu$ m, 0.2 $\mu$ m이기 때문에 KrF 엑시머레이저( 파장 0.248 $\mu$ m ), ArF 엑시머레이저( 파장 0.193 $\mu$ m ) 또는 soft-X선이 노광용광원으로 연구 검토되고 있다. i-line까지의 stepper용 결상광학계로서는 1/5배의 축소배율을 갖는 굴절광학계가 주종이되고 있지만 엑시머레이저 특히 0.193  $\mu$ m의 파장에 대해서는 굴절광학계 뿐만아니라 반사광학계 또는 반사굴절혼합형 등이 연구되고 있다.<sup>[1,2]</sup> 리소그래피 stepper용 광학계에서는 특히 조명광의

간섭성 정도에 따라 분해능이 다르게 나타나는데 이에 대해서 본 연구에서는 상호투과계수( transmissio cross-coefficient )를 통하여 조사해보고, 반사광학계의 특징인 central obscuration을 고려한 광학계 성능 평가에 대하여서도 5 반사광학계에 적용하여보았다.

### II. 부분간섭성조명의 OTF에의 영향

마스크(reticle)투과광은 결상렌즈에 의해 Fourier 변환되어 exit pupil면에 변환상을 형성한다. 이 변환상의 역Fourier변환함으로서 wafer에서의 상( image )을 얻게된다. 이 때 Fourier변환상의 고주파수성분은 유효광원 및 stop의 유한한 크기때문에 결상에 기여하지 않는다. 이상의 내용을 수식으로 표현하면, wafer의 상의 광강도분포  $I(\vec{v})$ 는 아래와 같이 쓸 수있다.<sup>[2,3,4]</sup>

$$I(\vec{v}) = \int \int T(\vec{f}_1, \vec{f}_2) 'a(\vec{f}_1)' 'a^*(\vec{f}_2) \times \exp[ -2 \pi i(\vec{f}_1 - \vec{f}_2) \cdot \vec{v} ] d\vec{f}_1 d\vec{f}_2 \quad \text{----- ( 1 )}$$

여기서  $'a(\vec{f}_1)$ 는 마스크(reticle)의 진폭투과함수  $a(\vec{u}_1)$ 의 Fourier변환을 나타내고,  $T(\vec{f}_1, \vec{f}_2)$ 는 상호투과계수( transmission cross-coefficient )라 하는데 유효광원의 강도분포  $S(\vec{s})$  및 pupil function  $P(\vec{f})$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$T(\vec{f}_1, \vec{f}_2) = \int S(\vec{s})P(\vec{s} + \vec{f}_1)P^*(\vec{s} + \vec{f}_2) \times \exp[ \Pi i \{ (\vec{s} + \vec{f}_1)^2 - (\vec{s} + \vec{f}_2)^2 \} \delta ] d\vec{s} \quad (2)$$

여기서 wafer상의 좌표  $\vec{v}$ , 공간주파수  $\vec{f}_1, \vec{f}_2$ , defocus  $\delta$ 는 규격화( normalization )되어있는데 실제 좌표  $\vec{V}$ , 실제 공간주파수  $\vec{F}_1, \vec{F}_2$ , 및 실제 defocus  $\Delta$ 는 식(2-23)에 의해 다음과 같다.

$$\vec{V} = \vec{v} \times \frac{\lambda}{NA}, \quad \vec{F} = \vec{f} \times \frac{NA}{\lambda}, \quad \Delta = \delta \times \frac{\lambda}{NA^2} \quad (3)$$

여기서  $\lambda$ 는 광원의 파장을, NA는 결상렌즈의 개구수를 나타낸다.

이상에서 보면 wafer상의 광강도는 유효광원의 강도분포 S, exit pupil function P, 및 마스크( reticle )의 진폭투과함수  $a(\vec{u}_i)$  ( $i=1,2$ )의 물리량으로 결정된다. 식(2)의 상호투과계수를 defocus  $\delta=0$ 인 경우에 완전간섭성조명( $\sigma=0$ )과 비간섭성조명( $\sigma=\infty$ )에 대해서 조사를 해보자.  $\sigma=0$ 이면 유효광원은  $\delta$ 함수로 주어지기 때문에 식(2)는 아래와 같다.

$$T(\vec{f}_1, \vec{f}_2) = \int \delta(\vec{s})P(\vec{s} + \vec{f}_1)P^*(\vec{s} + \vec{f}_2)d\vec{s} \quad (4)$$

이 식의 적분은  $\delta$ 함수의 성질에 의해  $\vec{s}=0$ 인 경우

$$T(\vec{f}_1, \vec{f}_2) = P(\vec{f}_1)P^*(\vec{f}_2) \quad (5)$$

로 되고, 여기서  $\vec{f}_1 = \vec{f}, \vec{f}_2 = 0$ 로 두면

$$T(\vec{f}, 0) = P(\vec{f})P^*(0) \quad (6)$$

로 된다. 이상적인 렌즈의 경우 윗식은 pupil내에서는 1이 되기 때문에 그림 1에서의  $\sigma=0$ 인 경우와 같은 모습의 OTF를 얻게 된다. 비간섭성조명인 경우의 유효광원은 공간주파수 공간 어디에서나 uniform한 값을 가지기 때문에

$$S(\vec{s}) = 1, \quad \vec{s} : \text{everywhere} \quad (7)$$

라 들 수 있다. 따라서 식(2)는

$$T(\vec{f}_1, \vec{f}_2) = \int P(\vec{s} + \vec{f}_1)P^*(\vec{s} + \vec{f}_2)d\vec{s} \quad (8)$$

여기서  $\vec{f}_1 = \vec{f}, \vec{f}_2 = 0, \vec{s} = \vec{f} + \vec{r}$ 라 두면

$$T(\vec{f}, 0) = \int P(\vec{f} + \vec{r})P^*(\vec{f})d\vec{r} \quad (9)$$

로 된다. 이는 일반적인( 비간섭성조명 ) OTF식과 일치한다. 즉 pupil function의 autocorrelation function으로 OTF가 주어지는 것으로 그림1의  $\sigma=1.0$ 인 경우로 된다. 이리하여 상호투과계수의 최저차인  $T(\vec{f}, 0)$ 은 간섭성조명 및 비간섭성조명의 양극단에서 각각의 OTF에 일치되는 것을 확인하였다. 마찬가지로 이들의 중간단계인 부분 간섭성조명인 경우에서의  $T(\vec{f}, 0)$ 도 공간주파수 특성을 나타낼 것이라는 것을 유추할 수 있다. 진폭투과함수  $a(\vec{u})$ 를 공간주파수가  $f_0$ 인 1차원적인 정현파( sinusoidal wave )로 두면

$$a(\vec{u}) = a(u_x, u_y) = 1 + \beta \cos(2\pi f_0 u_x) \quad (10)$$

$$'a(\vec{f}) = 'a(f_x, f_y) = \{ \delta(f_x) + (\frac{\beta}{2}) [ \delta(f_x - f_0) + \delta(f_x + f_0) ] \} \times \delta(f_y) \quad (11)$$

이 되고, defocus가 영인 경우 wafer상의 광강도 분포는 식(1), 식(2)에 의해 아래와 같이 된다.

$$I(v_x) = T(0, 0) + (\frac{\beta^2}{2})T(f_0, f_0) + \beta [ T(f_0, 0) + T(0, f_0) ] \times \cos(2\pi f_0 v_x) + (\frac{\beta^2}{2})T(f_0, -f_0) \times \cos(4\pi f_0 v_x) \quad (12)$$

여기서 제1항과 제2항은 광강도분포의 background 성분이고, 제3항은 기본주파수 성분, 제4항은 배주파수 성분을 나타낸다. 상의 contrast는 주로 제1항과 제3항에 의해서 결정된다. 제4항도 상의 contrast결정에 기여하게되나 본 논문에서는 기본 주파수 성분에 대한 평가만을 취급하고자 하기 때문에 이의 역할을 무시하기로 한다. 사실 비간섭성 조명에서는 광강도가 정현파형태로 존재하여 이의 공간주파수의 광학계에 의한 투과 특성으로 OTF를 정의하고 있다. 그러나 부분간섭성 조명에서는 진폭이 정현파형태로 존재하기 때문에 광강도의 분포는 항상 기본주파수와 배주파수 성분을 포함하고 있다. 이에 본 논문에서는 비간섭성 조명에서의 투과특성과의 비교 검토를 위해 부분간섭성 조명인 경우 기본주파수 성

분만을 취급하였다. 이상에서 광각도 분포의 기본 공간주파수 특성을 나타내는  $T(f, 0) + T(0, f)$  를 OTF라 하자. 정규화시켜 다시 정의하면 아래와 같다.

$$OTF = \frac{T(f, 0) + T(0, f)}{2 \times T(0, 0)} \quad \text{or} \quad \frac{\text{Re}[T(f, 0)]}{T(0, 0)}$$

----- (13)

1차원적인 진폭투과함수에 대해서 defocus가 영인 경우 상호투과계수는

$$T(f_1, f_2) = \int S(\vec{s}) P(\vec{s} + f_1) P^*(\vec{s} + f_2) d\vec{s}$$

----- (14)

와 같이 되어, 유효광원과 pupil function의 변형은 상호투과계수와 광각도분포에 영향을 주게된다. 유효광원은 광의 강도분포가 균일하게 분포하면 coherence factor  $\sigma$ 에 따라 다음과 같이 표현가능하다.

$$S(\vec{s}) = S(s_x, s_y) = \begin{cases} 1, & s_x^2 + s_y^2 \leq \sigma \\ 0, & s_x^2 + s_y^2 > \sigma \end{cases}$$

----- (15)

pupil function은 무수차 광학계의 광축방향에 대해선 아래와 같은 표현이 가능하다.

$$P(\vec{f}) = P(f_x, f_y) = \begin{cases} 1, & f_x^2 + f_y^2 \leq 1 \\ 0, & f_x^2 + f_y^2 > 1 \end{cases}$$

----- (16)

따라서 식(14)에의한 상호투과계수의 계산은 그림 2와 같이 공간주파수 좌표상의 원점에 존재하는 유효광원 S와 점  $(f_1, 0)$ 과  $(f_2, 0)$ 을 중심으로 존재하는 pupil function P1, P2의 공통부분을 취하면 된다. 이렇게 하여 구한 coherence factor에 대한 공간주파수 특성함수 OTF의 그래프가 그림 1에 나와 있다.

### III. 부분간섭성조명과 central obscuration의 OTF에의 영향

본 논문에서의 5-반사광학계에서는 central obscuration이 있기 때문에 pupil function에 대해 무수차 광학계인 경우 아래와같은 표현이 가능하게 된다.

$$P(\vec{f}) = P(f_x, f_y) = \begin{cases} 0, & 0 < f_x^2 + f_y^2 < \text{vig} \\ 1, & \text{vig} \leq f_x^2 + f_y^2 \leq 1 \\ 0, & 1 < f_x^2 + f_y^2 \end{cases}$$

----- (17)

여기서 vig는 exit pupil상에서의 central obscuration과 exit pupil의 반경의 비이다. 무수차 광학계의 비축상 pupil function은 비대칭적인 함수이기 때문에 상호투과계수의 계산이 쉽지 않지만, 실제적인 ray-tracing에의한 pupil function의 추정에 의해 계산하기도 한다. central obscuration이 고려되면 먼저 pupil function의 형태가 annular형태가 된다. 상호투과계수의 계산이 5개의 원들의 조합으로 나타나기 때문에 상당히 복잡하게 된다. 그렇지만 공간주파수 공간을 그물눈(mesh)모양으로 나누어 5개의 원들의 공통부분의 그물눈을 count함으로써 공통부분의 면적을 계산할 수 있게된다. 이렇게 하여 계산된  $T(f, 0)$ 에의한 OTF가 그림 3에  $\sigma=1.0$ 인 경우에 대해서 나타나있다. 여기서 central obscuration이 25% 즉 vig=0.5일 때는 central obscuration이 없을 때보다 50% OTF기준치에 대해 분해능이 반정도로 줄어들음을 알 수 있다.

### IV. 5 반사광학계의 수치 해석적인 해법

수치계수는 광축상의 object를 출발하여 광학계의 entrance pupil의 가장자리를 지나는 주변광선(marginal ray)과 비축상의 object를 출발하여 entrance pupil의 중심을 지나는 주광선(principal ray)을 이용하여 전개할 수 있는데, 여기에는 주변광선이 광학 면을 지날 때 정의되는 근축 입사고  $h_i$ , 근축각  $u_i$ , 굴절률변량  $A_i$ , 그리고 주광선이 광학면을 지날때 정의되는 근축 입사고  $h^p_i$ , 근축각  $u^p_i$ , 굴절률변량  $B_i$  등이 있다. 모든 3차 수차계수와 5차 구면수차 계수<sup>(5)</sup>를 이들에 의해 전개하면 아래와 같다.

$$\text{구면수차 } S_I = \sum_{i=1}^k A_i^2 h_i \Delta\left(\frac{u}{n}\right)_i = \sum_{i=1}^k I_i$$

----- (18)

$$\text{코마 } S_{II} = \sum_{i=1}^k A_i B_i h_i \Delta\left(\frac{u}{n}\right)_i = \sum_{i=1}^k II_i$$

----- (19)

$$\text{비점수차 } S_{III} = \sum_{i=1}^k B_i^2 h_i \Delta\left(\frac{u}{n}\right)_i = \sum_{i=1}^k III_i$$

이동회, 이상수

$$\text{----- (20)}$$

$$\text{Petzval상면만곡 } S_{IV} = H^2 \sum_{i=1}^k P_i \text{ --- (21)}$$

$$\text{왜곡수차 } S_V = \sum_{i=1}^k \frac{B_i}{A_i} [ H^2 P_i + III_i ]$$

$$\text{----- (22)}$$

輪帶구면수차<sup>1)</sup>

$$T_I = \sum_{i=1}^k [ {}^5I_i + 6 I_i \sum_{p=1}^{i-1} V_p - 6 II_i \sum_{p=1}^{i-1} I_p ]$$

$$\text{----- (23)}$$

단,

$${}^5I_i = 3 I_i [ c_i h_i ( c_i h_i - 2u_i ) - A_i \Delta(\frac{u}{n})_i ]$$

$${}^5V_i = A_i^2 h_i \Delta(\frac{u^{pr}}{n})_i - A_i \Delta(\frac{u}{n})_i$$

$$\Delta(\frac{u}{n})_i = \frac{u_i}{n_i} - \frac{u_{i-1}}{n_{i-1}}$$

$$\Delta(\frac{u^{pr}}{n})_i = \frac{u_i^{pr}}{n_i} - \frac{u_{i-1}^{pr}}{n_{i-1}}$$

$$P_i = - c_i \Delta(\frac{1}{n})_i$$

$$A_i = n_i ( c_i h_i - u_i )$$

$$B_i = n_i ( c_i h_i^{pr} - u_i^{pr} )$$

$H$  는 Helmholtz-Lagrange 불변량

$$\text{즉 } H = B_i h_i - A_i h_i^{pr}$$

유한 물체점을 갖는 5-구면 반사경계의 설계변수는 곡률변수(  $c_i$ ;  $i = 1, 2, 3, 4, 5$ )와 거리변수(  $d_i$ ;  $i = 0, 1, 2, 3, 4$ )로 10개가 존재하게 된다.

이들 설계변수들을 관련시켜 주는 관계식으로는 모든 3차 수차계수 방정식 5개와 5차 구면수차계수 방정식 1개와 광학계의 배율등 7개가 존재하게 된다. 따라서 설계변수의 자유도는 3개가 존재하게 되는데 5구면 반사경계가 결정되어지기 위해서는 이 3개의 자유변수가 임의로 정해져서 7개의 구속조건( constraints )에 의해 나머지 7개의 설계변수가 정해

져야 한다. 여기서는 3개의 자유변수를  $d_0, c_1, d_1$  으로 하여 6개의 수차식과 배율조건 즉,

$$S_I = S_{II} = S_{III} = S_{IV} = S_V = 0 \text{ (24)}$$

$$T_I = 0 \text{ ----- (25)}$$

$$M = \frac{1}{5} = \frac{1}{m} \text{ ----- (26)}$$

을 연립방정식으로 해서 이들의 해로써 나머지 설계 변수들을 결정하고자 한다. 또한 자유변수 중  $c_1$  을 -1로 고정함으로서 광학계의 크기를 제1반사면을 기준으로 규격화할 수 있다. 이렇게 함으로써 3개의 자유변수 중  $d_0, d_1$  만을 자유변수로 취급할 수 있다. 이상에서 보면, 식(24), 식(25), 식(26)을 연립으로 성립시키는 해를,  $d_0, d_1$ 의 임의의 값에 대하여 구하고자 하는 것이 일정한 배율 1/5을 갖고 모든 3차수차와 5차 구면수차가 제거된 5-구면 반사경계의 해법이라고 할 수 있겠다. 이상의 5-구면 반사경계의 해법은 그림 4와 같은 흐름도로 요약할 수가 있다. 즉 초기조건에 의하여 일정한 값  $d_0, d_1$  이 주어지면 (이때  $c_1 = -1$ )처음에는  $c_2, d_2,$

$c_3, d_3, c_4$  의 5개의 변수에 임의의 값을 부여 식  $S_{IV}=0, M=1/5$ 에 의해  $c_5, d_4$  를 결정한다. 이렇게 정하여진 모든 설계변수에 의해 수차계수 값( 이때 Petzval상면만곡  $S_{IV}$ 은 이미 zero이다. )

$S_I, S_{II}, S_{III}, S_V, T_I$  의 값을 계산한다. 다음 이들 수차값이 zero가 되도록 damped least square method를 이용한 optimization에 의해 처음에 임의로 주어진 5개 변수를 조정한다. 이렇게 조정된 변수에 의해 다시 식  $S_{IV}=0, M=1/5$ 에 의해  $d_4, c_5$  를 결정하고 조정되어진  $c_2, d_2,$

$c_3, d_3, c_4$ 와 함께 수차계수 값  $S_I, S_{II},$

$S_{III}, S_V, T_I$  를 결정한다. 따라서 이러한 iteration을 모든 수차계수 값들이 거의 zero (  $< 10^{-9}$  )가 될때까지 반복하여 초기 치  $d_0, d_1$ 에 대한 나머지 설계변수가 1/5의 배율을 갖고 모든 3차 수차와 5차 구면수차가 제거된 5-구면 반사경계를 구성하도록 하면 된다.

이상과 같이 구한 수치적인 해( numerical solution

주1) 松居吉哉는 5차구면수차계수를 輪帶구면수차계수라 하였다.

들에 의한 5-구면 반사경계는 전부 thickness가 음의 부호를 갖고 잔류구면수차는 N.A. 0.4 초점길이 -100mm 인 경우에  $2.8\mu\text{m} \sim 9.6\mu\text{m}$ 의 범위를 갖는다. 한 예로써 이들 해의 잔류 수차를 살펴보자. 그림 6는 그림 5에서의 'A' 즉  $d_0 = 2.50$ ,  $d_1 = -0.330$ 인 해의 잔류 유한 광선 수차값들을 나타내고 있는데 N.A.가 0.4, Field size of object가 약 26mm인 경우이다. N.A.가 비교적 크기 때문에 TSA와 OSC(offence against sine condition)<sup>[6,7]</sup>의 잔류량이 Distortion이나 Astigmatism보다 대단히 크다. distortion(%)가 full-field에서  $1.2 \times 10^{-5}\%$ 이므로 distortion량은  $0.0003 \mu\text{m}$  정도로 아주 작으며, astigmatism은 약  $0.03\mu\text{m}$  정도로 무난하다. 이렇게 구면수차와 OSC가 다른 수차량보다 아주 우세한 것은 앞장에서 구한 해들의 공통적인 현상인데 N.A.(numerical aperture)를 높여서 분해능을 개선시키고자 할 때 N.A.의 상승에 가장 민감한 구면수차와 코마의 고차 수차항의 값이 커지기 때문인 것이다. 즉 비록 구면수차인 경우 5차항까지를 zero로 하였으나 7차항 이상이 큰 N.A.에서 영향력이 커지고 코마도 5차항 이상의 영향력이 커진 것이다. 한편 distortion이나 astigmatism은 3차항 정도가 zero이면 object의 field-size가 26mm인 정도는 쉽게 극복할 수 있다고 생각할 수 있다. 즉 7차 이상의 구면수차와 5차 이상의 코마가 광학계 전체 분해능을 저하시키는데 결정적인 역할을 함을 알 수 있었다. 따라서 광학계 전체의 분해능을 좋게 하기 위해서는 이들 고차수차를 최절한계 이내로 제거해야 함이 필수적이다.<sup>[8]</sup> 이러한 작업은 제4 반사면의 비구면화에 의해 구면수차를 보정하고, 상면 바로 앞에 있는 제5 반사면의 비구면화로 코마 등의 나머지 수차를 보정하는 방법으로 진행하였다. 즉 제 4-반사면, 제 5-반사면의 비구면화를 비구면 계수  $a_i$  ( $i = 4, 6, 8, 10$ )를 최적화 변수로 하여 computer를 사용한 최적화(optimization) 기법으로 이행하여 제 4-반사면의 비구면화로는 구면수차를 최소화시켰고 제 5-반사면의 비구면화로는 주로 코마를 최소화시켰다. 물론 최적화를 하는 동안 초점거리( $f' = -10 \text{ cm}$ )와 축소배율( $1/5$ )을 고정하였으며, central obscuration이 50% 이하되도록 하였다. 이 최적화과정에서 defocused spot diagram으로 판단해 볼 때 그림 5의 대부분의 영역의 해는  $1.0\mu\text{m}$ 이상의 depth of focus, 26mm의 object field size, 초점길이 -100mm, 0.4이상의 NA를 갖는 시스템으로 될 수 있었다.

#### IV. 부분간섭성조명과 central obscuration의 5 반사광학계에의 적용

그림 5의 대부분의 해가 N.A. 0.40 이상 즉 Airy disk  $R_{ArF} = 0.29\mu\text{m}$ 의 최절한계 이내의 분해능을 가지나 실제적인 측면을 고려한 리소그라피용 광학계가 되기위해선 여러가지 제한이 있게 마련이다. 여기서는 광축상의 object의 시스템 투과 ray들에 대한 비광축상의 object에서의 시스템 투과 ray들의 비(ratio)를 80% 이상으로하고, 잔류 수차량이 될 수 있으면 작을 것이며, MTF에 영향을 주는 2번째 반사경에 의한 1번째 반사경에서의 central obscuration, 즉  $v_{ig1}$ 이 될수 있는 한 작게 되도록 하는 제한으로 보다 실용적인 시스템을 구하도록 하였다( 모든 해에서  $v_{ig2} < v_{ig1}$  ). 이러한 조건을 충족시키는 시스템은 그림 5의 'A'의 해의 비구면화에 의해 얻을 수 있었다. 최종적인 해는 상 공간의 telecentricity를 만족하기 위해 시스템의 조리개를 제1 초점면으로 이동하였다. 이것의 비구면화 전의 설계치와 비구면화 후의 설계치를 표 1, 표 2에 나타내었다. 또한 표 3에 비구면화된 5-반사 광학계의 각 면에서의 clear aperture와 hole diameter을 나타내었다. 그림 7은 표 2와 3에 표시한 광학계의 설계 data를 실물 크기를 축소하여 나타내었으며, 두 axial ray( full-marginal, 0.55-marginal )의 경로도 함께 보이고 있다. 이 광학계의 central obscuration이 약 31%(  $v_{ig1} = 0.55$  )로 축상물체에 대해 약 69%의 광 투과도를 갖고, 광학계 전체길이는 약 134cm이고 가장 큰 반사경의 직경은 약 80cm 정도이다. 그림 8은 잔류 유한광선 수차를 보여주고 있다. NA 0.45에서 구면수차는  $0.096 \mu\text{m}$  정도(그림 8(a))로 상당히 작다. 0.45의 NA는 ArF 엑시머 레이저의 '193nm의 파장에 대해서  $0.26\mu\text{m}$ 의 Rayleigh 반경에 해당한다. 시계각(field angle)은  $3^\circ$  정도인데 이는 초점거리 -100mm에 대해 object field diameter가 26mm 정도에 해당한다. 이 시스템의 왜곡수차량은 full-field에서 약  $0.06\text{nm}$ 정도이다(그림 8(c)). 상공간에서의 광축에 대한 주광선의 방향 cosine은  $2 \times 10^{-5}$ (그림 8(e))인데 충분히 telecentric하다고 할 수 있다. 그림 8(f)는 전 시계각에 따라 광학계를 투과하는 ray들의 상대적인 광량비(시계각이  $0.0^\circ$  인 경우의 광량을 100%로 할 때)를 도시한 것인데 full-field에서 약 84.5% 정도이다. 이는 illumination uniformity에 대응되는 양으로서 축상의 물점에서 출발한 광선들이 최종적인 상면에 도달하는 광선의 수를 100으로 하였을 때 각각의 반사계각에 해당하는 비축상의 물점에서 출발한 광선들이

## 이동희, 이상수

상면에 도달하는 광선들의 수를 백분율로 나타낸 것으로서 반시계각  $1.5^\circ$ 에서 약 84.5임을 나타낸다. 그림 9는 반시계각(half field angle)  $0.0^\circ$   $1.0^\circ$   $1.5^\circ$ 인 경우에 대하여 최적상면에서 전후로  $0.20\mu\text{m}$  간격으로 상면을 이동시켰을 경우( 5개의 defocused image position )의 spot diagram을 보여주고 있다. 이것은 대부분의 ray들이  $0.8\mu\text{m}$ 의 depth of focus에 대하여  $0.26\mu\text{m}$ 의 Rayleigh-반경의 원안으로 들어가고 있음을 보여주고 있다. 이 그림에서 원들은 ArF 엑시머 레이저 파장(  $\lambda = 0.193\mu\text{m}$  )에 대한 Airy disk( 반경 :  $0.26\mu\text{m}$  )을 나타낸다. 그림 10은 이 시스템의 최적상면에서의 nearly incoherent illumination(  $\sigma=1.0$  )에 대한 MTF를 나타내고 있다. 여기서 우리는 depth of focus  $0.8\mu\text{m}$ , 50% MTF criterion<sup>[9]</sup>에 대해서 약 600cycles/mm의 분해능을 가짐을 알 수 있다. 특히  $0.0^\circ$  field에서는 최절한계의 성능을 가짐을 알 수 있고 최대의 분해능은 약 850cycles/mm임을 알 수 있다. 그림 11은 부분간섭성조명(  $\sigma = 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$  )의 경우 본 시스템의  $0.0^\circ$  field,  $1.5^\circ$  field의 Gaussian상점에서의 이론적인 MTF를 보여주고 있다. coherence factor(  $\sigma$  )가 증가함에 따라 obscuration이 없을 때는 분해능의 감소가 obscuration이 있을 때보다 현저함을 알 수 있다.

## V. 결론

본 논문에서는 부분간섭성조명과 central obscuration의 MTF에 대한 이론적인 배경을 살펴보고 이를 실제 5반사광학계에 적용해 보았다. MTF에의 영향이 큰 central obscuration이 가장 작은 5반사광학계의 해를 선택하여 비구면화하여 최종적인 해로 선택하고 이의 부분간섭성조명에 의한 MTF에의 영향을 살펴보았다. 이 때 최종적인 해로는 central obscuration이 약 31%이고 광원을 ArF excimer 레이저( 파장  $0.193\mu\text{m}$  )로 하는 nearly incoherent illumination(  $\sigma = 1.0$  )인 경우 NA가 0.45이며 분해능이 50% MTF 기준치와 초점심도  $0.8\mu\text{m}$ 에 대해 약 600 cycles/mm 정도인 성능을 갖는 시스템이 되었다.

## 참 고 문 헌

1. 田邊容由, "ステップ光學系における超解像技術の比較", 光學, 21(6), 415 (1992).
2. 福田宏, 岡崎信次, "超解像光リソグラフィ", 光

學, 19(5), 290 (1990).

3. 牛田一雄, "ステップ-用光學系", 光學, 20(2), 70 (1991).
4. M. Born and E. Wolf, Principles of Optics 6th ed., Pergamon Press Ltd., 1980 (Oxford).
5. 松居吉哉, レンズ設計法, 共立出版株式會社, 1972 (東京).
6. 이상수, 기하광학, 교학연구사, 1985 (서울).
7. M. Herzberger, Modern Geometrical Optics, Interscience Publisher, 1958 (New York).
8. C. A. Mack, Theory and Techniques in Optical Lithography, Chap. 9, 1990.
9. C. Wang and D. L. Shealy, "Differential equation design of finite-conjugate reflective systems", Appl. Opt., 32(7), 1179 (1993).
10. 이동희, DUV Submicron 리소그라피를 위한 5 반사 광학계의 설계와 평가, 한국과학기술원 박사학위 청구논문, 1994 (서울).

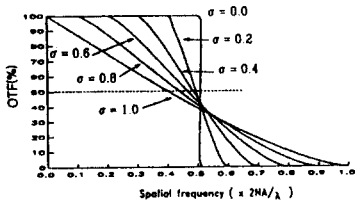


Fig. 1 Theoretical OTF of an optical system with a circular exit pupil, zero aberration and zero central obscuration in cases of the various partial coherent illuminations ( i.e.  $\sigma = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$  and  $1.0$  ).

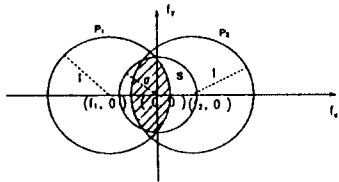


Fig. 2 The effective domain of integration ( shown shaded ) for the calculation of the transmission cross coefficient  $T(f_1, f_2)$  of an optical system with a circular exit pupil of radius 1 and an effective source of radius  $\sigma$ .

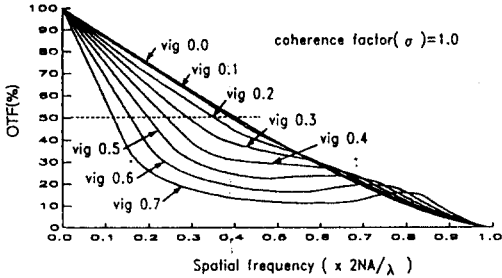


Fig. 3 Theoretical OTF of an optical system with a circular exit pupil and zero aberration according to the various central obscurations (  $\text{vig} = 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6$  and  $0.7$  ) at the coherence factor  $\sigma=1.0$ .

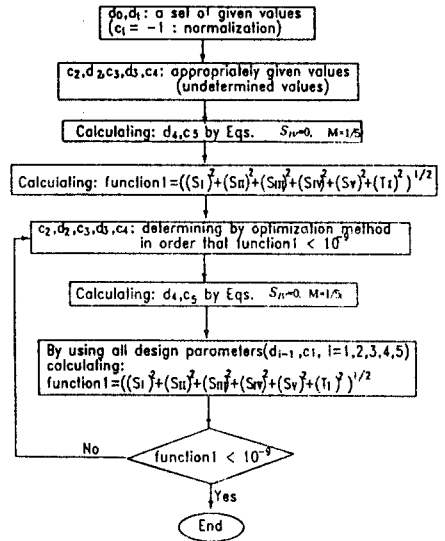


Fig. 4 The flow chart for solving the simultaneous equations of five spherical mirror systems.

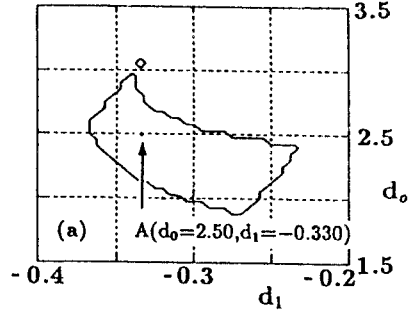


Fig. 5 The solution domain of the five spherical mirror systems (  $\text{NA}=0.4$  ) which are free from all third order aberrations and fifth order spherical aberration.

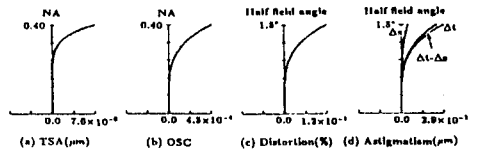


Fig. 6 (a), (b), (c) and (d) are the residual finite ray aberrations for the five spherical mirror system A in Fig. 5 with focal length of  $-100\text{mm}$ .

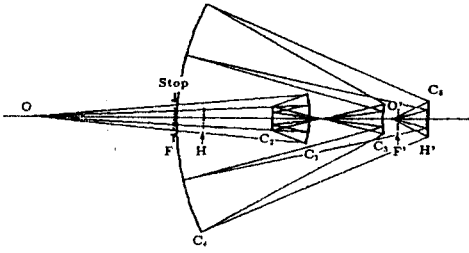


Fig. 7 Configuration of the aspherized five mirror system whose NA is 0.45, the system-length is 138cm and the radius of the largest mirror is 39.8cm. The stop of the system lies on the first focal plane.

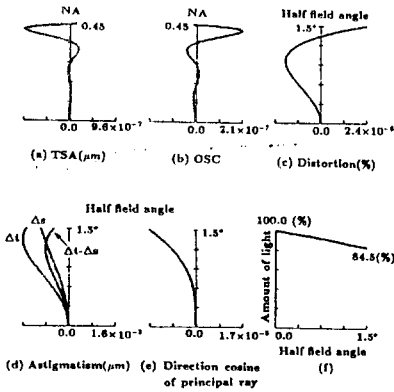


Fig. 8 (a), (b), (c) and (d) are the residual finite ray aberrations of the aspherized five mirror system with focal length of -100mm, object-field-size of 26mm and NA of 0.45 for ArF excimer laser beam, (e) is the direction cosine of principal ray in the image space, and (f) is the relative amount of light passing through the system.

Defocusing $\delta z$	Half field angle		
	0.0°	1.0°	1.5°
- 0.40 $\mu\text{m}$			
- 0.20 $\mu\text{m}$			
0.00 $\mu\text{m}$			
+ 0.20 $\mu\text{m}$			
+ 0.40 $\mu\text{m}$			

0.26  $\mu\text{m}$

Fig. 9 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  $R=0.26\mu\text{m}$ ) for ArF excimer laser beam.

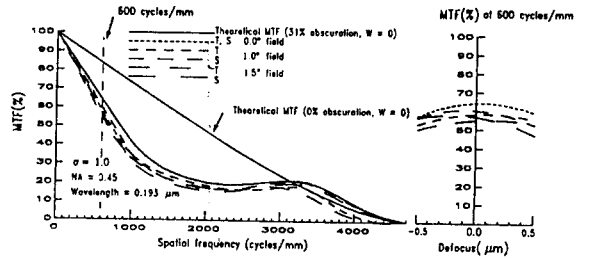


Fig. 10 MTF through frequency (cycles/mm) and through focus of the aspherized five mirror system for three half field angles at the Gaussian image position in case of the coherence factor  $\sigma=1.0$  ( $W$ :residual aberration).

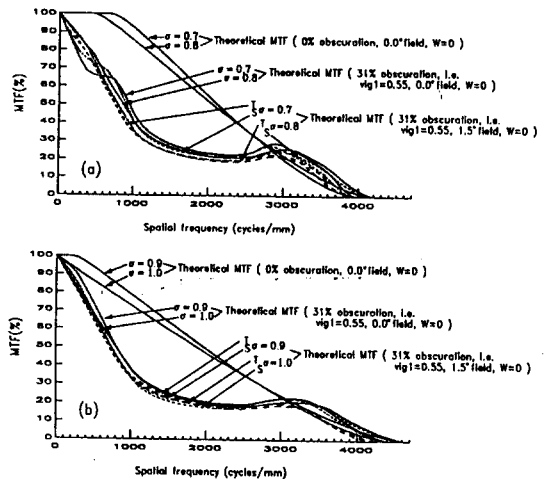


Fig. 11 MTF through frequency (cycles/mm) of the aspherized five mirror system for the 0.0° field and 1.5° field images at the Gaussian image position in cases of the various coherence factors ( i.e.  $\sigma=0.7, 0.8, 0.9$  and  $1.0$  ) ( $W$ :residual aberration, T:tangential MTF, S:sagittal MTF).



Object	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
Curvature(cm <sup>-1</sup> )	-0.0259042	-0.0151021	0.0266295	0.0111224	-0.0047050
Distance(cm)	96.509463	-12.739249	38.029636	-71.023939	86.842304

Table. 1 Initial spherical mirror design data before the aspherization of the five spherical mirror system corresponding to the point A in Fig. 5.

Object	Step	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
Curvature(cm <sup>-1</sup> )		-0.0259038	-0.0151018	0.0266291	0.0111254	-0.0047008
Distance(cm)	50.000000	46.511008	-12.739453	38.030245	-71.025076	86.843604

Aspherical coefficients				
	a <sub>4</sub> (cm <sup>-5</sup> )	a <sub>6</sub> (cm <sup>-7</sup> )	a <sub>8</sub> (cm <sup>-9</sup> )	a <sub>10</sub> (cm <sup>-11</sup> )
Fourth surface	1.623994 × 10 <sup>-11</sup>	-3.660871 × 10 <sup>-14</sup>	-8.247089 × 10 <sup>-16</sup>	-6.803292 × 10 <sup>-21</sup>
Fifth surface	-1.367644 × 10 <sup>-8</sup>	-4.319612 × 10 <sup>-9</sup>	2.892166 × 10 <sup>-11</sup>	-1.092991 × 10 <sup>-13</sup>

Table. 2 The design data of the aspherized five mirror system for ArF excimer laser line ( f'=-100mm).

	Stop	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>
Clear aperture	9.04	17.27	8.29	10.64	79.60	13.07
Hole diameter	0.00	8.29	0.00	0.00	17.27	0.00

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