

## 연X-선 투사 리소그라피를 위한 등배율 포물면 2-반사경 Holosymmetric System

조 영 민

한국항공우주연구소 우주사업단

이 상 수

한국과학기술원 물리학과

(1995년 3월 30일 받음)

파장 13 nm의 연 X-선을 사용하여 초고밀도 반도체 칩을 제작할 수 있는 고분해능의 투사 결상용 2-반사경계(배율=1)를 설계하였다. 등배율(1:1)의 광학계는 holosymmetric system(전반부와 후반부가 중앙에 대해 완전히 대칭인 광학계)으로 구성하였을 때 코마와 애곡수차가 완전히 제거되는 이점을 갖는다. 2-반사경 holosymmetric system에서 추가적으로 구면수차를 제거하기 위해 두 반사경을 동일한 포물면으로 만들고 두 반사경 사이 거리를 조절하여 비점수차와 Petzval 합이 상쇄되게 함으로써 상면만곡수차를 보정하였다. 이렇게 구한 aplanat flat-field 포물면 2-반사경 holosymmetric system은 크기가 작고 광축회전대칭의 간단한 구조를 가지며 중앙부 차폐가 아주 작다는 특징을 갖고 있다. 이 반사경계에 대해 잔류 수차, spot diagrams, 회절효과가 고려된 MTF의 분석 등을 통해 연 X-선 리소그라피용 투사 광학계로서의 성능이 조사된 결과, 0.25  $\mu\text{m}$  및 0.18  $\mu\text{m}$ 의 해상도가 얻어지는 상(또는 물체)의 최대 크기가 각각 4.0 mm, 2.5 mm로 구해졌고 초점심도는 각각 2.5  $\mu\text{m}$ , 2.4  $\mu\text{m}$ 로 얻어졌다. 그러므로 이 반사경계는 256Mega DRAM 및 1Giga DRAM의 반도체 칩 제작의 연구에 응용될 수 있다.

### I. 서 론

리소그라피에서는 고집적도의 DRAM을 위해 투사 결상광학계에 대해 높은 분해능, 긴 초점심도(DOF), 넓은 시계(field), 모든 수차 보정 등의 엄격한 조건을 요구하고 있다. 특히 고집적도의 핵심인 해상력 한계 극복에 큰 관심이 모아지고 있다. 광학계의 분해능 향상을 위해서는 개구수(NA) 증대와 짧은 파장의 사용 등의 2가지 방법이 있는데 적절한 초점심도를 유지하면서 분해능을 향상시키기 위해서는 짧은 파장의 광원을 사용하는 것이 유리하다. 따라서 차세대 lithography 광원은 현재 널리 사용되는 Hg-g( $\lambda=0.436 \mu\text{m}$ ) 및 Hg-i( $\lambda=0.365 \mu\text{m}$ )에서 KrF 또는 ArF 액시머 레이저의 극자외선( $\lambda=0.248 \mu\text{m}$ ,  $0.193 \mu\text{m}$ ), XUV(연 X-선), 전자빔, 이온빔 등으로 바뀔 전망이며, 근래에는 lithography용 극자외선과 XUV(연 X-선) 광원의 사용에 대한 관심이 증대되고 있다. 특히, 수 nm 정도의 짧은 파장을 갖는 연 X-선은 극자외선보다 훨씬 높은 분해능의 실현을 가능하게 하므로, 연 X-선(13 nm) 리소그라피는 1 Giga DRAM 이상의 차세대 리소

그라피 기술의 바탕으로 주목받고 있다.

X-선 리소그라피에 대한 연구는 초기에 근접 X-선 리소그라피(proximity X-ray lithography)에 국한되었지만, 연 X-선 파장 영역에서 고반사율의 다층박막(quatum well) 기술이 발전함에 따라 X-선 투사 리소그라피(X-ray projection lithography)에 대한 연구가 근래 활발히 이루어지고 있다. X-선 투사 리소그라피는 근접 X-선 리소그라피(proximity X-ray lithography)가 갖고 있는 반그림자 현상(Penumbra effect), 패턴 이동(pattern shift) 현상 등의 해상도 저해 요인과 마스크와 웨이퍼 사이의 미소 면위에 기인한 문제점을 탈피할 수 있는 장점을 갖고 있다. 광원으로는 싱크로트론 방사광 또는 레이저 플라즈마 X-선이 사용되며, 연 X-선 중에서 최대 반사율의 다층 박막 제작이 가능한 파장이 선택되는 데 13 nm 파장 근처에서 Mo/Si 다층 박막으로 수직 입사 반사율이 약 60%까지 얻어지고 있다. 연 X-선 투사 리소그라피 기술 중에서 높은 X-선 반사율의 확보와 더불어 최소한의 반사경 매수로 큰 면적 노광을 가능하게 하는 반사 광학계의 설계가 중요한 기술과제 중의 하나이다.<sup>[1]</sup>

구면경 2배로 된 축소배율 1/20, 개구수 0.08의 Schatzschild형 광학계로 14 nm 파장에서  $20 \times 50 \mu\text{m}^2$  영역에서 0.1  $\mu\text{m}$  이하의 패턴 형성이 가능하다는 것이 AT & T에서의 실험<sup>[2]</sup>으로 입증된 후 X-선 노광 투사 광학계는 급진전을 보여 1Giga DRAM급의 분해능과 대면적 노광이 가능한 반사광학계에 대해 많은 연구가 보고되었다. 그 중 축소 X-선 투사광학계로 scanning field를 갖는 NTT의 2-반사경계(파장 13 nm)<sup>[3,4]</sup>, Nikon<sup>[5]</sup>과 日立(파장 13 nm)<sup>[6]</sup>의 4-반사경계등이 있고, non-scanning square field를 갖는 AT & T Bell 연구소의 4-반사경계(파장 13 nm)<sup>[7]</sup>와 Los Alamos 국립연구소(LLNL)의 4 반사 2-반사경계(파장 10 nm)<sup>[8]</sup> 등이 있다. 이 들은 모두 비구면을 이용하고 있으며, LLNL만 광축에 대한 회전대칭을 갖는 광학계로 구성되어 있고 나머지는 비축물점 사용하는 비회전 대칭 광학계이다.

한편, 모든 차수의 구면수차와 코마가 영인 aplanatism 조건에 대한 미분방정식을 푸는 해석적인 설계 기법에 의해 설계된 연 X-선 리소그라피용 3-반사경계<sup>[9]</sup>도 보고되었는데 이 반사경계는 반사면의 형태가 일반 비구면 방정식으로 주어지는 것이 아니라 반사면의 각 점의 위치 좌표가 수치 자료로 결정되는 비구면으로 이루어져 있다.

등배율 연X-선 투사 광학계로서 2개 반사경에서 3번 반사를 갖는 Offner 1:1 ring field 광학계<sup>[10]</sup>와 광축회전대칭 4-반사경 holosymmetric system<sup>[11,12]</sup>이 보고되었다. Offner 반사경계는 파장 42 nm에서 0.2  $\mu\text{m}$ 의 분해능을 가지며 2 mm  $\times$  0.25 mm의 작은 image field로 인해 scanning lithography가 불가피하다. 4-반사경 holosymmetric system은 모든 3차 수차를 제거하여 얻어졌으며 파장 13 nm에서 0.15  $\mu\text{m}$ 의 분해능이 상지름 5.2 mm 이내에서 얻어지고 있다.

이상과 같이 연X-선 투사 리소그라피 반사경계는 주로 2~4배의 반사경으로 구성되는데 본 연구에서는 반사경 매수를 2배로 최소화시켜 X-선의 낮은 반사율에 의한 상면에서 광세기의 저하가 발생하는 것을 막고자 하였고, 일반적으로 2배의 적은 반사경 매수로 고분해능을 이루기 위해서는 수차보정시 비구면 채용이 불가피한데 본 연구에서는 최소의 비구면화 시도를 위해 일반 비구면이 아닌 포물면만을 사용하여 실제 제작이 용이하도록 설계하고자 하였다. 그리고 포물면 2-반사경계가 광축회전대칭 구조를 가지며 비주사형 결상(non-scanning field)이 이루어지도록하여 광학계 정렬이 용이하도록 하였다. 광축회전대칭의 포물면 2-반사경계로 256 Mega DRAM 및 1 Giga DRAM의 고분해능 실현이 가능한 등배율(1:1) 연X-선 투사 리소그라피용 반사경계를 구현하기 위해

등배율 holosymmetric system에서 코마와 왜곡수차가 완전히 제거되는 대칭성 원리<sup>[13]</sup>를 이용하고 2-반사경계에 대한 3차 수차를 해석적으로 취급하는 해석적인 설계 방법을 적용하였다.

## II. Aplanatic Flat-Field 포물면 2-반사경 Holosymmetric System(배율 = 1)의 해석적 설계

등배율(1:1)의 광학계는 holosymmetric system으로 구성하였을 때 수차 성능이 우수하다. Holosymmetric system은 완전히 대칭적인 광학계로서 물체면(object plane)과 상면(image plane)을 포함한 전체 광학계의 한 반쪽이 나머지 절반과 동일하다. 대칭성 원리(symmetry principle)<sup>[13]</sup>에 의해 holosymmetric system 전반부와 후반부의 코마, 왜곡수차(그리고 굴절광학계에서 횡색수차(latral color aberration))는 각각 서로 크기는 같고 부호가 서로 정반대이므로 전체 광학계에는 이 수차들이 전혀 없다. 즉 Seidel 수차중 모든 차수의 코마, 왜곡수차 그리고 횡색수차가 모두 영이다.

2-구면 반사경계는 제 1반사면과 제 2반사면의 광률  $c_1, c_2$  그리고 물체 면에서 제 1반사면까지 거리  $d_0$ 와 제 1반사면에서 제 2반사면까지의 거리  $d_1$ 으로 주어지는 총 4개의 설계 변수를 갖고 있다. 2-구면경계가 다음과 같이 중앙에 대해 대칭적으로 구성될 때 등배율(1:1)을 갖는 holosymmetric system이 된다. 즉,

$$c_1 = -c_2, \quad d_0 = d_2. \quad (1)$$

2-구면경 holosymmetric system에는 두 가지 물리적 경우가 있다. 하나는 배율  $M = +1$ 을 갖고 제 1반사면의 제 1 초점면에 조리개(stop)가 있으며 광학계 중앙에 중간 상을 갖는 relay 광학계이고, 다른 하나는  $M = -1$ 을 갖고 광학계의 중앙면에 조리개(stop)가 있는 non-relay 광학계이다. 본 연구에서는 두 경우중 중간 상을 갖지 않는 non-relay 2-구면경계( $M = -1$ )에 대해서 연구를 수행하였다.

2-구면경 non-relay holosymmetric system( $M = -1$ )의 배치를 주변광선 추적 및 주광선 추적과 더불어 그림 1에 나타내었다. 광학계가 반사면으로 구성되어 있고 각 반사면 사이의 매질은 공기(진공)이므로 광장에 대한 분산은 무시할 수 있고 각 면간 매질(공기)의 굴절률은  $n_0 = 1, n_1 = -1, n_2 = 1$ 이다. 각 면의 굴절능  $K_i$ 를 2-구면경 holosymmetric system에 대하여 구하면 식 (1)에 의해 다음과 같다.

$$K_2 = K_1 = c_1(n_1 - n_0) = -2c_1. \quad (2)$$

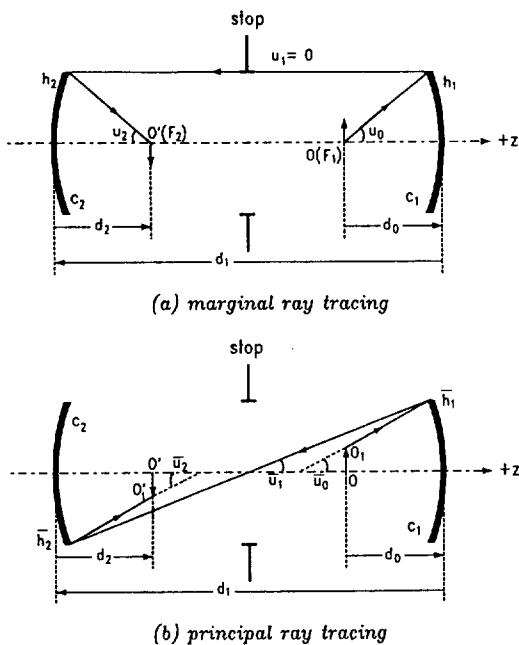


그림 1. Typical configuration of the holosymmetric two-spherical mirror system with magnification of  $M = -1$ . The object( $O(F_1)$ ) is at the focal plane( $F_1$ ) of the first mirror and the image( $O'(F_2)$ ) is at the focal plane( $F_2$ ) of the second mirror.

식 (1), (2)에 의하여, 주변광선의 근축입사고( $h_i$ )와 근축각( $u_i$ )을 주어진  $u_0$ (물체 공간 개구수:  $n_0 u_0$ )에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_2 &= h_1 = -u_0 d_0, \\ u_2 &= -u_0, \\ u_1 &= -u_0(2c_1 d_0 + 1) = 0. \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)로부터  $\Delta\left(\frac{u}{n}\right)_i = \frac{u_i}{n_i} - \frac{u_{i-1}}{n_{i-1}}$  과  $\Delta\left(\frac{1}{n}\right)_i = \frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i-1}}$  의 굴절전후 변화량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta\left(\frac{u}{n}\right)_2 &= \Delta\left(\frac{u}{n}\right)_1 = -u_0, \\ \Delta\left(\frac{1}{n}\right)_2 &= -\Delta\left(\frac{1}{n}\right)_1 = 2 \end{aligned} \quad (4)$$

그리고 주변광선의 근축 굴절불변량은  $A_i = n_i(c_i h_i - u_i)$  이므로 다음과 같이 표현 된다.

$$A_2 = -A_1 = u_0(d_0 c_1 + 1) \quad (5)$$

조리개가 2-구면경계의 정 중앙에 있으므로 조리개의 중심을 지나는 주광선의 근축입사고( $h_i$ )와 근축각( $u_i$ )을 주어진  $u_1$ 에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_2 &= -h_1 = -u_1 \frac{d_1}{2} \\ u_2 &= u_0 = u_1(d_1 c_1 - 1) \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)으로부터 각 면에서의 주광선의 근축 굴절 불변량  $B_i = n_i(c_i h_i - u_i)$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$B_2 = B_1 = u_1 \left( -\frac{d_1}{2} c_1 + 1 \right) \quad (7)$$

따라서, 식 (1)~(7)으로부터 Lagrange 불변량  $H$ 는

$$\begin{aligned} H &= B_1 h_1 - A_1 h_1 = -u_0 u_1 \left( -d_0 d_1 c_1 + d_0 - \frac{d_1}{2} \right) \\ &= u_0 u_1 \frac{1}{2c_1} \end{aligned} \quad (8)$$

이고, 식 (1)~(8)의 관계식으로부터 구면수차( $S_I$ ), 코마( $S_H$ ), 비점수차( $S_M$ ), Petzval상면만곡수차( $S_{IV}$ ), 왜곡수차( $S_V$ )에 대한 5개의 3차 수차계수를 구하면 다음과 같이 2개의 독립 설계 변수  $c_1$ ,  $d_1$ 들만의 함수로 표현된다.

$$S_I = \sum_{i=1}^2 A_i^2 h_i \Delta\left(\frac{u}{n}\right)_i = -\frac{1}{4} u_0^4 \frac{1}{c_1} \quad (9)$$

$$S_H = \sum_{i=1}^2 A_i B_i h_i \Delta\left(\frac{u}{n}\right)_i = 0 \quad (10)$$

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^2 B_i^2 h_i \Delta\left(\frac{u}{n}\right)_i = -u_0^2 u_1^2 \frac{1}{c_1} \left( 1 - \frac{d_1 c_1}{2} \right)^2 \quad (11)$$

$$S_V = -H^2 \sum_{i=1}^2 c_i \Delta\left(\frac{1}{n}\right)_i = u_0^2 u_1^2 \frac{1}{c_1} \quad (12)$$

$$S_M = \sum_{i=1}^2 \frac{B_i}{A_i} \left[ -H^2 c_i \Delta\left(\frac{1}{n}\right)_i + B_i^2 h_i \Delta\left(\frac{u}{n}\right)_i \right] = 0 \quad (13)$$

식 (9)~(13)에서 보듯이 배율  $M = -1$ 을 갖는 2-구면 holosymmetric non-relay system의 코마와 왜곡수차의 3차 수차계수( $S_H$ ,  $S_V$ )는 완전히 영임이 증명된다. 상면만곡에는 상을 맷는 광선의 종류에 따라 Petzval 상면만곡, 자오상면만곡(curvature of tangential image surface), 구결상면만곡(curvature of sagittal image surface), DLC면만곡(curvature of image surface containing disc of least confusion) 등이 있다. DLC면은 자오광선과 구결광선을 모두 고려하여 상공간에서 실제 spot의 크

기가 최소가 되는 상점을 포함하는 면이므로 일반적으로 DLC면만곡을 광학계의 상면만곡으로서 취급한다.<sup>[14]</sup> DLC면만곡의 수차 계수는  $FC=2S_{III}+S_{IV}$ 로 표현되므로 2-구면경 holosymmetric system에 대해 다음과 같다.

$$FC=2S_{III}+S_{IV}=-2u_0^2\bar{u}_1^{-2}\frac{1}{c_1}\left[\left(1-\frac{d_1c_1}{2}\right)^2-\frac{1}{2}\right] \quad (14)$$

식 (14)으로부터 두 반사경사이의 거리가  $d_1=(2\pm\sqrt{2})/c_1$  으로 주어질 때  $FC=0$ 이 되고 상면만곡수차는 제거된다. 따라서 코마, 상면만곡수차, 왜곡수차가 제거된 등배율 2-구면경 holosymmetric system의 해를, 광학계의 크기를 결정하는데 쓰이는 scaling factorotr  $c_1$ 에 대해, 다음과 같이 완전해의 꼴로 얻는다.

$$d_0=d_2=-\frac{1}{2c_1}, d_1=\frac{(2\pm\sqrt{2})}{c_1}, c_1=-c_2, \text{ 단, } c_1<0 \quad (15)$$

식 (15)의 해는 3개의 비축 수차가 제거되었지만 구면수차가 남아있어 고분해능의 수차 성능을 얻기 어렵다.

구면수차를 제거하기 위해 2-구면경 holosymmetric system의 배치도인 그림 1을 잘 살펴볼 필요가 있다. 구면수차는 광축상의 한 물체점에서 나온광선들이 한개의 축상 상점에 모이지 않음으로써 생기는 수차로서 일반적으로 주변광선이 제일 큰 수차 값을 야기시킨다. 2-구면경 holosymmetric system에서 축상 물체점은 제 1반사면의 초점, 축상 상점은 제 2반사면의 초점에 놓여 있으므로 Gauss 광학적으로 고려하면 주변광선은 제 1반사면과 제 2반사면 사이에서 광축에 평행하게 진행하지 않고 구면수차를 유발시키는데 이것은 반사면이 구면이기 때문이다. 한 점에서 나온 광선들 모두가 정확히 평행하게 반사되려면 반사면은 포물면이 되고 광선들의 출발점은 그 포물면의 초점이 되어야함은 잘 알려진 바이다. 그러므로 제 1반사면과 제 2반사면에

포물면을 도입하고 물체면을 제 1반사면의 초평면에 두고 상면을 제 2반사면의 초평면에 두면, 주변광선은 제 1반사면과 제 2반사면 사이에서 광축에 완전히 평행하게 진행하고 축상의 한 물체점에서 출발한 모든 광선들은 오차 없이 정확하게 축상의 한점에 모이게 되므로 구면수차가 완전히 0(즉 모든 차수의 구면수차가 제거됨)이 된다. 이때 도입하는 포물면의 방정식은

$$z=\frac{cy^2}{1+\sqrt{1-(1+k)c^2y^2}} \quad (16)$$

단,  $y$ 는 주변 광선의 입사고,  $c$ 는 각 반사면의 곡률에서 원주 계수(conic constant)  $k$ 가  $k=-1$ 일 때 얻어진다.

한편, 포물면의 사용으로 Petzval 상면만곡을 제외한 비축수차들의 변화가 수반되는데 포물면 도입이 holosymmetric system의 특성을 그대로 유지하면서 이루어지므로 코마와 왜곡수차는 여전히 모든 차수에 대해 0이 되며 단지 비접수차( $S_{III}$ )와 DLC면만곡수차( $FC=2S_{III}+S_{IV}$ )가 달라지게된다. 2-구면경계와 마찬가지로 두 포물면 반사경 사이의 거리  $d_1$ 을 조절하여, 물체면(제 1반사면의 초평면)과 제 2반사면이 일치하고 상면(제 2반사면의 초평면)이 제 1반사면에 놓일 때 3차 상면만곡수차( $FC$ )를 제거할 수 있었다. 그러므로 포물면의 도입과 거리  $d_1$ 의 재조정으로 구면수차, 코마, 상면만곡수차, 왜곡수차가 제거된 등배율(1:1)의 aplanatic flat-field distortion-free 포물면 2-반사경 holosymmetric system을 얻을 수 있었고, 상공간의 telecentricity 조건을 만족시키도록 조리개를 2-반사경계의 중앙에서 제 1반사면으로 이동시켜 표 1의 설계자료를 얻었다. 수차론<sup>[14]</sup>에 의하면 3차 구면수차와 코마가 제거된 경우 조리개 이동에 의한 3차 구면수차, 코마, 비접수차, 상면만곡수차의 변화는 발생하지 않고 잔류 비접수차와 상면만곡수차에 의한 왜곡수차의 변화만이 생기므로 본 2-반사경계에서 조리개를 이동시키더라도 aplanatic flat-field 조건은 그대로 성립한다.

표 1. The design data of the aplanatic flat-field holosymmetric paraboloidal 2-mirror system using soft X-ray wavelength of 13 nm. The system has the focal length of  $f=-60$  cm and the stop lies at the first mirror.

	Mirror No.			
	Object	Stop	I	II
Distance(cm)	60.000000	0.000000	-60.000000	
Radius of Curvature(cm)			-120.000000	120.000000
conic constant			-1.000000	-1.000000

표 2. Diameters of clear apertures and holes of the mirrors for 256 M DRAM( $0.25 \mu\text{m}$ ) pattern imaging in the 2-mirror system of Table 1(unit: cm)

Mirror No.	Stop	I	II
Clear Aperture	4.9000	4.9000	5.4000
Hole Diameter	0.0000	0.6000	0.6000

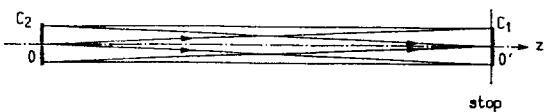


그림 2. Configuration of the holosymmetric two-mirror system ( $M = -1$ ) with NA of 0.04 and image diameter of 4.0 mm for 256 M DRAM. TCL ( $O-O'$ ) is 60.0000 cm and the largest clear aperture diameter is 5.4000 cm.

1:1 HOLOSYMMETRIC 2-MIRROR SYSTEM FOR SXPL

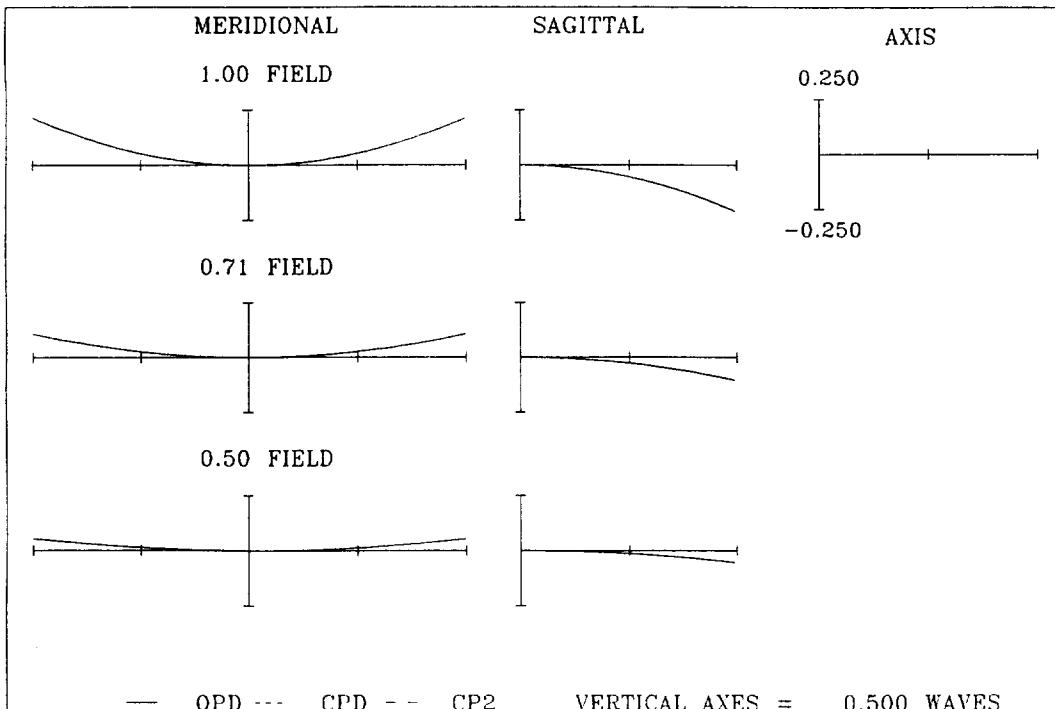


그림 3. Wavefront aberrations from finite ray fan trace in the holosymmetric two-mirror system given by Table 1 and 2. Optical path differences (OPD) with respect to principal rays are plotted.

### III. 연X-선 리소그라피용 포물면 2-반사경 Holosymmetric System(배율=1)에 대한 성능 평가

앞 절에서 구한 포물면 2-반사경 holosymmetric system은 일반 비구면이 아닌 포물면의 사용만으로도 모든 차수의 구면수차, 코마, 왜곡수차와 3차 상면만곡수차가 제거되었다. 모든 차수의 구면수차와 코마의 완전 제거로 인해 고분해능의 수차성능이 축상 근처에서 얻어지지만 비점수차 및 Petzval 상면만곡 수차의 잔류 때문에 상의 크기에 제한이 따르게 된다. 본 연구에서는 표 1의 포물면 2-반사경계로 256 Mega DRAM급의 해상도가 얻

어지는 최대의 상 크기와 1Giga DRAM급의 해상도가 얻어지는 최대의 상 크기를 조사하여 한 개의 포물면 2-반사경계에서 개구수와 상의 크기를 적절히 조절함으로써 다음과 같이 256 Mega DRAM과 1 Giga DRAM의 해상도를 갖는 상을 각각 얻을 수 있도록 설계하였다.

#### 1. 256 Mega DRAM을 위한 포물면 2-반사경 Holosymmetric System(배율=1)

표 2에 256 Mega DRAM을 위한 포물면 2-반사경계의 clear aperture와 hole diameter가 제시되었다. 표 1의 설계자료와 표 2의 clear aperture로 주어지는 2-반사경

계의 기하학적 배치가 2개의 주변광선(marginal ray) 추적과 함께 그림 2에 그려져 있다. 이 반사경계는 물체에서 상까지의 전체 길이가 60 cm이)고 물체와 상이 반사경을 가리는 것에 의해 지름비 0.12의 조그마한 중앙부 차폐를 가지므로 광축상에서 1.3%의 광량 차단이 있다.

본 논문의 2-반사경계에 대해 파면수차 특성을 조사하기 위해 표 1과 2의 반사경계에서 개구수 0.04와 상자름 4.0 mm에 대한 Finite Ray Fan 추적 결과를 주광선에 대한 광로정차(Optical Path Difference: OPD)로 그림 3에 나타내었다. 구면수차가 완전히 제거되었음이 그림 3의 AXIS에 나타나있고, 3개의 비축상점(0.5, 0.71, 1.00 field)에 대한 자오(Meridional) 및 구결(Sagittal) 파면 모양은 구면수차와 코마가 제거되고 비점수차가 남아있는 flat-field의 전형적인 파면모양을 그대로 나타내고 있다. 즉, 포물면 사용과 holosymmetric system의 대칭성 원리 덕분으로 aplanat flat-field( $S_t = S_h = FC = 0$ ) 조건이 만족되고 있음을 알 수 있다.

표 1의 포물면경계는 개구수 0.04와 상자름 4.0 mm에 대해 회절한계 성능을 만족시킬 만큼 충분히 작은 잔류 유한 광선 수차를 갖고 있음을 그림 4에서 알 수 있다. 그림 4는 Gauss 상면에서의 수차 값을 나타내며, 포물면의 사용과 holosymmetric system의 대칭성 원리 덕분으로 획구면수차(TSA)와 코마(OSC)가 완전히 제거되었다. 그림 4의 (a), (b)에 제시된 구면수차와 OSC의 값 ( $10^{-14} \text{ cm 이하}$ )은 배정도 실수에 대해 유효수자 15~16 개를 갖는 컴퓨터의 수치계산 오차한계에 의해 주어진 값이다. 그림 4(c)와 같이 자오상면만곡과 구결상면만곡이 대칭적으로 그려지므로 상면만곡수차( $\Delta t + \Delta s$ )가 충분히 보정되어 있으나, 보정되지 않은 비점수차( $\Delta t - \Delta s$ )가 전체 수차 성능을 좌우하고 결과적으로 상의 크기를 지름 4.0 mm로 제한하고 있다. Holosymmetric system의 대칭성 원리 덕분으로 제거되었던 왜곡수차는 조리개의 위치 이동으로 조금 증가하였으나 상높이 2.0 mm의 최대 시계에서 약  $2.8 \times 10^{-4}\%$  즉, 5.6 nm로(그림 4(d)) 아주

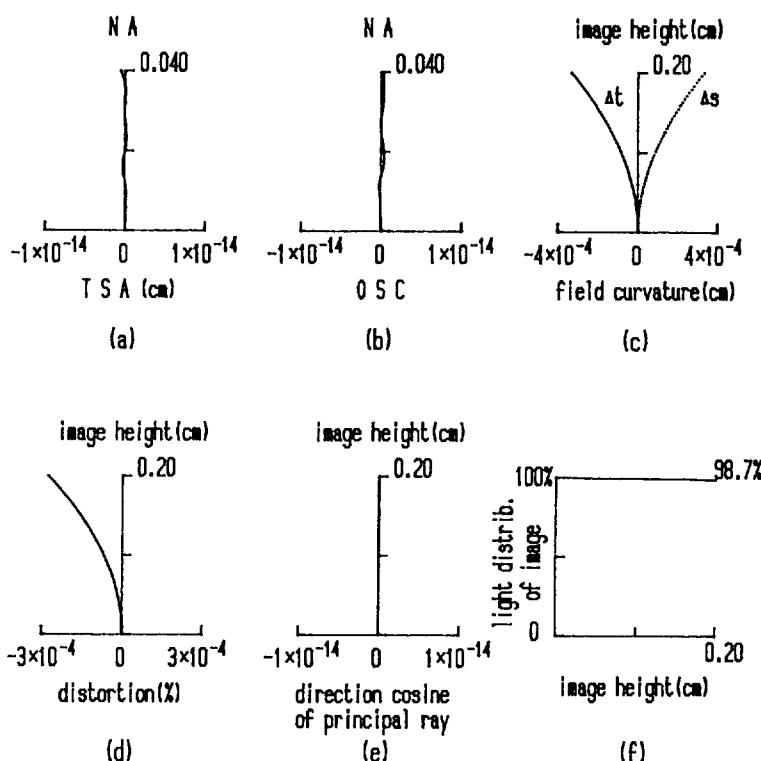


그림 4. (a), (b), (c), (d) are the residual finite ray aberrations of the holosymmetric two-mirror system for 256 M DRAM, and (e) direction cosine of principle ray in image space, (f) relative distribution of light in the image plane (TSA: transverse spherical aberration, OSC: offence against the sine condition  $\Delta t$ : tangential ray aberration,  $\Delta s$ : sagittal ray aberration).

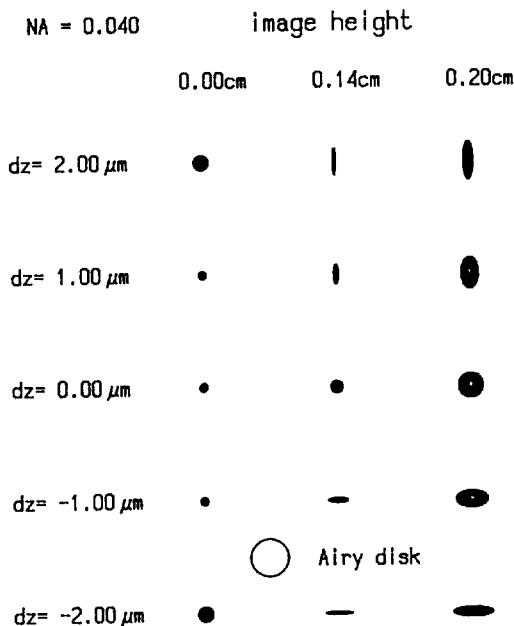


그림 5. Spot diagrams of the holosymmetric two-mirror system for 256 M DRAM at three half fields and five defocused image positions. The circle shows the size of the Airy disk (radius =  $0.20\text{ }\mu\text{m}$ ) for  $NA$  of 0.04 at soft X-ray wavelength of  $13\text{ nm}$ .

작은 값을 갖고 있어 투사 리소그래피의 요구를 충분히 만족시킨다. 조리개의 이동으로 상공간에서 주광선의 방향여현 값은 완전히 0이되어 주광선이 상면에 완전히 수직으로 입사하고 따라서 상공간의 telecentricity 조건을 완벽하게 만족하고 있다(그림 4(e)). 상면의 조도 균일도를 나타내는 상대적 통과 광량(축상 광량을 100%로 함)은 0.7 field에서 99.1%, 1.0 field에서 98.7%이므로 투사 리소그래피에서 필요로하는 조도 균일도를 만족시키고 있다(그림 4(f)). 이 때 사용한 광선수는 각 시계에 대해 692개이다. 3개의 상 높이( $0.0$ ,  $0.7$ ,  $1.0$  field)와 5개의 상면 위치에 대한 spot diagrams이 반경  $0.20\text{ }\mu\text{m}$ 의 원과 함께 그림 5에 나타나 있는데 이 원은 연 X선 광장  $13\text{ nm}$ 의 빛이 0.04의 개구수를 갖는 원형개구(circular aperture)에 의해 회절되어 생긴 Airy disk를 나타낸다. 그림 5에서 보듯이 5개의 모든 상면에서 3개의 시계에 대해 15개의 모든 spot들이 반경  $0.20\text{ }\mu\text{m}$ 의 Airy disk 안으로 들어간다. Gauss 상면의 축상 상점은 구면수차의 완전한 제거로 spot이 한 점으로 나타나는데 그림에서는 잉크가 번져 실제보다 큰 모양을 보이고 있다.

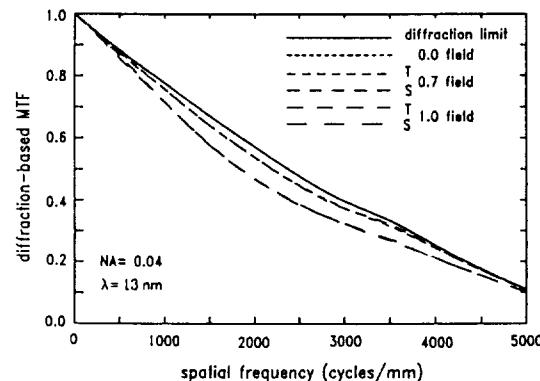


그림 6. MTF of the holosymmetric two-mirror system for 256 M DRAM at the Gaussian image position. The diffraction limit MTF curves are plotted for the 0.0 field.

Gauss 상면에서 spot들의 크기가 가장 작고, Gauss 상면에서 물체면과 반대쪽으로 이동된 상면들에서 ( $dz > 0$ ) spot의 모양이 세로로 길쭉하며 0.7 field에 대해  $dz = 2.0\text{ }\mu\text{m}$  근처에서 구결상점이 형성되고 ( $\Delta S \sim 2.0\text{ }\mu\text{m}$ ), 물체 쪽으로 이동된 상면들에서 ( $dz < 0$ ) spot 모양이 가로로 퍼지며 0.7 field에 대해  $dz = -2.0\text{ }\mu\text{m}$  근처에서 자오상점에 근사하는 것 ( $\Delta t \sim -2.0\text{ }\mu\text{m}$ )을 볼 수 있다. 각 시계에 대해 구결상점과 자오상점의 위치가 Gauss 상면을 중심으로 대칭적으로 얻어질 수 있는 spot 모양의 변화가 상면의 위치 이동에 따라 나타나므로 그림 4(c) 수차도와 일치하며 상면만곡수차가 잘 보정되어 있음을 알 수 있다. 이상의 수차도와 spot diagrams으로부터 표 1, 2의 반사경계는 개구수 0.04와 상지름 4.0 mm에 대해 광장  $13\text{ nm}$ 에서 회절한계까지 수차가 보정되어 있음을 알 수 있다.

광장  $13\text{ nm}$ 에서 회절효과가 고려된 MTF 곡선을 Gauss 상면에서 3개의 시계에 대해 회절한계 곡선(무수차 경우)과 더불어 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 회절한계 곡선은 개구수 0.04에서 광축상점(0.0 field)에 대한 것이다. 광축상(0.0 field)의 MTF 곡선은 회절한계 곡선과 일치함을 볼 수 있고 비축 상점(0.7, 1.0 field)의 MTF 곡선들은 이 회절한계 곡선보다 약간 밀으로 쳐져 있다. 이것은 축상 상점에 대해 구면수차가 완전히 제거되었지만, 비축 상점들에 대해 잔류 비점수차로 인해 MTF 곡선의 저하가 초래되기 때문이며, 결국 비점수차가 주어진 분해능에 대해 상의 크기를 제한하고 있는 것을 의미한다. 각 비축 상점에 대해 자오MTF곡선(tangential MTF curve)과 구결MTF곡선(sagittal MTF cu-

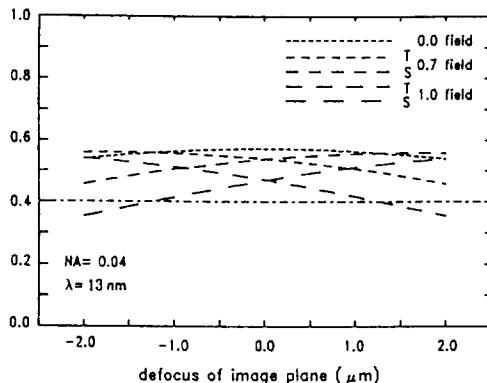


그림 7. Through-focus MTF of the holosymmetric two-mirror system for 256 M DRAM at the spatial frequency of 2000 cycles/mm.

rve)이 일치하는 것을 볼 수 있는데 이것은 상면만곡수가 보정되어 있기 때문이다. 그림 7에 공간주파수 2000 cycles/mm에서 상면의 위치 이동에 대한 MTF 값은 나타내는 through-focus MTF 곡선이 3개 시계에 대해서 제시되어 있다. 그림 4(c)의 상면만곡 수차도와 마찬가지로 각각의 시계에 대해 자오MTF곡선들과 구결MTF 곡선들이 Gauss 상면에 대해 대칭적으로 그려지고 있는데 이것 역시 상면만곡수차의 보정 때문이다. 각각의 시계에서 자오MTF곡선들의 최대점들은 Gauss 상면으로부터 자오상면만곡( $\Delta t$ ) 만큼 이동되어 있고 구결MTF곡선들의 최대점들은 Gauss 상면으로부터 구결상면만곡( $\Delta s$ ) 만큼 이동되어 있으며, 잔류 비점수차로 인해 시계가 커질수록 그 이동 폭도 커져 Gauss 상면에서 MTF곡선의 하락과 초점심도의 저하가 발생하고 결국 상지름이 4.0 mm로 제한되고 있다. 공간주파수 2000 cycles/mm일 때 Gauss 상면 위치에서 최대 0.57의 축상(0.0 field) MTF값이 얻어지고 모든 시계에 대해 초점심도 2.5 μm이내에서 0.4 이상의 MTF 값이 얻어진다.

그러므로 표 1, 2의 2-반사경계는 연X-선 광장 13 nm에서 개구수 0.04에 대해 회절한계의 수차 성능을 가지며, 상지름 4.0 mm와 초점심도 2.5 μm 이내에서 0.25 μm의 해상도를 갖고 있다.

## 2. 1 Giga DRAM을 위한 포물면 2-반사경 Holosymmetric System(배율=1)

표 3에 1 Giga DRAM을 위한 포물면 2-반사경계의 clear aperture와 hole diameter가 제시되었다. 표 1의 설계자료와 표 3의 clear aperture로 주어지는 2-반사경계의 기하학적 배치가 2개의 주변광선(marginal ray)

표 3. Diameters of clear apertures and holes of the mirrors for 1 G DRAM(0.18 μm) pattern imaging in the 2-mirror system of Table 1(unit: cm)

	Mirror No.		
	Stop	I	II
Clear Aperture	6.7000	6.7000	7.1000
Hole Diameter	0.0000	0.6000	0.6000

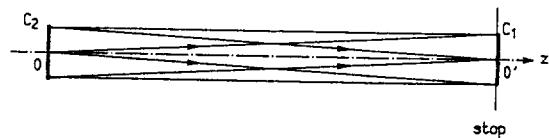


그림 8. Configuration of the holosymmetric two-mirror system( $M = -1$ ) with NA of 0.055 and image diameter of 2.5mm for 1 G DRAM. TCL ( $\overline{O} \overline{O}'$ ) is 60.0000 cm and the largest clear aperture diameter is 7.1000 cm.

추적과 함께 그림 8에 그려져있다. 이 경우 물체와 상이 반사경을 가리는 것에 의해 지름비 0.09의 조그마한 중앙부 차폐를 가지므로 광축상에서 0.7%의 광량 차단이 있다.

표 1의 포물면경계는 1 Giga DRAM을 위해 개구수를 0.055로 올리면 상지름이 2.5 mm로 줄어 들었을 때 회절한계 성능을 만족시킬 만큼 충분히 작은 잔류 유한광선 수차를 갖는다(그림 9). 그림 9는 Gauss 상면에서의 수차 값을 나타내며, 수차 특성은 256 Mega DRAM용 2-반사경계와 비슷하여 포물면과 holosymmetric system의 대칭성 원리 덕분으로 횡구면수차(TSA)와 코마(OSC)가 완전히 제거되었고 상면만곡수차( $\Delta t + \Delta s$ )가 충분히 보정되어 있으나, 보정되지 않은 비점수차( $\Delta t - \Delta s$ )로 인해 상 지름이 2.5 mm로 제한되고 있다. 왜곡수차는 상높이 1.26 mm의 최대 시계에서 약  $1.1 \times 10^{-4}$ % 즉, 1.4 nm(그림 9(d)) 아주 작은 값을 갖고 있어 투사리소그라피의 요구를 충분히 만족시킨다. 상공간에서 주광선의 방향여현 값을 완전히 0이되어 주광선이 상면에 완전히 수직으로 입사하고 따라서 상공간의 telecentricity 조건을 완벽하게 만족하고 있다(그림 9(e)). 상면의 조도 균일도를 나타내는 상대적 광학계 통과 광량(축상 광량을 100%로 함)은 0.7 field에서 99.6%, 1.0 field에서 99.3%이므로 투사 리소그라피에서 필요로하는 조도 균일도를 만족시키고 있다(그림 9(f)). 이때 사용한 광선수는 각 시계에 대해 692개이다. 3개의 상 높이(0.0, 0.7,

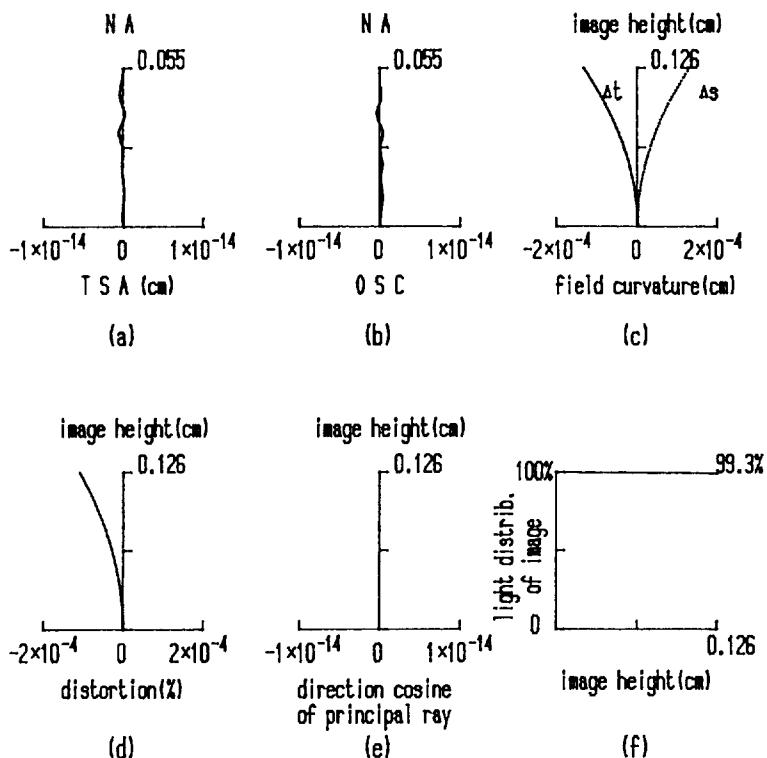


그림 9. (a), (b), (c), (d) are the residual finite ray aberrations of the holosymmetric two-mirror system for 1G DRAM, and (e) direction cosine of principle ray in image space, (f) relative distribution of light in the image plane(TSA: transverse spherical aberration, OSC: offence against the sine condition  $\Delta t$ : tangential ray aberration,  $\Delta s$ : sagittal ray aberration).

1.0 field)와 5개의 상면 위치에 대한 spot diagrams<sup>10)</sup> 반경 0.144 m의 원과 함께 그림 10에 나타나 있는데 이 원은 연X-선 파장 13 nm의 빛이 0.055의 개구수를 갖는 원형개구(circular aperture)에 의해 회절되어 생긴 Airy disk를 나타낸다. 그림 10에서 보듯이 5개의 모든 상면에서 3개의 모든 시계에 대해 15개의 모든 spot들이 반경 0.144 μm의 Airy disk 안으로 들어간다. Gauss 상면의 축상 상점은 구면수차의 완전한 제거로 spot이 한 점으로 나타나는데 그림에서는 잉크가 번져 실제보다 큰 모양을 보이고 있다. 각 시계에 대해 구결상점과 자오상점의 위치가 Gauss 상면을 중심으로 대칭적으로 얻어질 수 있는 spot 모양의 변화가 상면의 위치 이동에 따라 나타나므로 그림 9(c)의 수차도와도 일치하며 상면만곡수차가 잘 보정되어 있음을 알 수 있다. 이상의 수차도와 spot diagrams으로부터 표 1, 3의 반사경계는 개구수 0.055와 상지름 2.5 mm에 대해 파장 13 nm에서 회절한계까지 수차가 보정되어 있음을 알 수 있다.

파장 13 nm에서 회절효과가 고려된 MTF 곡선을 Gauss 상면에서 3개의 시계에 대해 회절한계 곡선(무수차 경우)과 더불어 그림 11에 나타내었다. 그림 11의 회절한계 곡선은 개구수 0.055에서 광축상점(0.0 field)에 대한 것이다. 광축상(0.0 field)의 MTF 곡선은 회절한계 곡선과 일치함을 볼 수 있고 비축 상점(0.7, 1.0 field)의 MTF 곡선들은 이 회절한계 곡선보다 약간 밑으로 치여 있다. 이것은 축상 상점에 대해 구면수차가 완전히 제거되었지만 잔류 비점수차로 인해 비축 상점들에 대해 MTF 곡선의 저하가 초래되기 때문이며 결국 비점수차가 주어진 분해능에 대해 상의 크기를 제한하고 있는 것을 의미한다. 각 비축 상점에 대해 자오MTF곡선(tangential MTF curve)과 구결MTF곡선(sagittal MTF curve)<sup>11)</sup> 일치하는 것을 볼 수 있는데 이것은 상면만곡수차가 보정되어 있기 때문이다. 그림 12에 공간주파수 2800 cycles/mm에서 상면의 위치 이동에 대한 MTF 값을 나타내는 through-focus MTF 곡선이 3개 시계에 대해

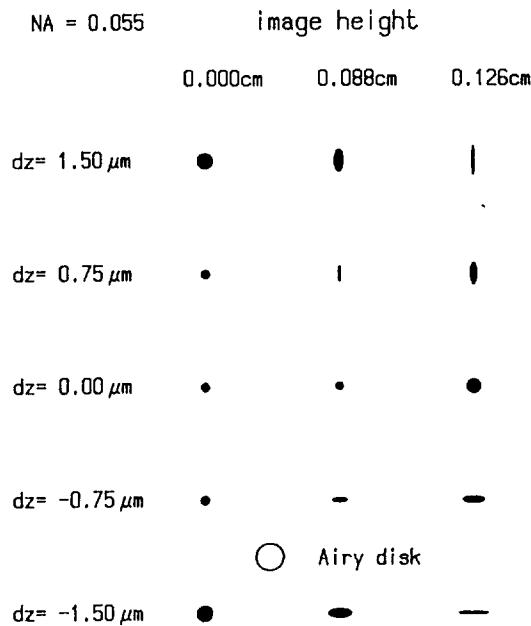


그림 10. Spot diagrams of the holosymmetric two-mirror system for 1G DRAM at three half fields and five defocused image positions. The circle shows the size of the Airy disk (radius = 0.144  $\mu\text{m}$ ) for NA of 0.055 at soft X-ray wavelength of 13 nm.

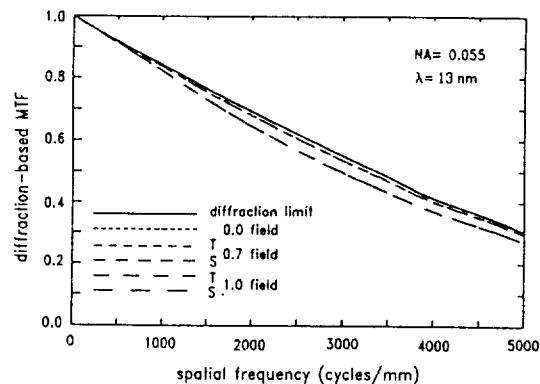


그림 11. MTF of the holosymmetric two-mirror system for 1G DRAM at the Gaussian image position. The diffraction limit MTF curves are plotted for the 0.0 field.

제시되어 있다. 그림 9(c)의 상면만곡 수차도와 마찬가지로 각각의 시계에 대해 자오MTF곡선들과 구결MTF곡선들이 Gauss 상면에 대해 대칭적으로 그려지고 있

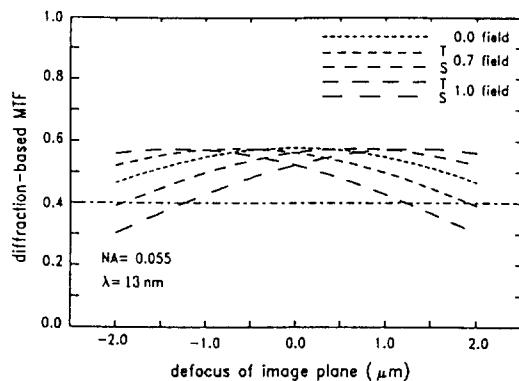


그림 12. Through-focus MTF of the holosymmetric two-mirror system for 1G DRAM at the spatial frequency of 2800 cycles/mm.

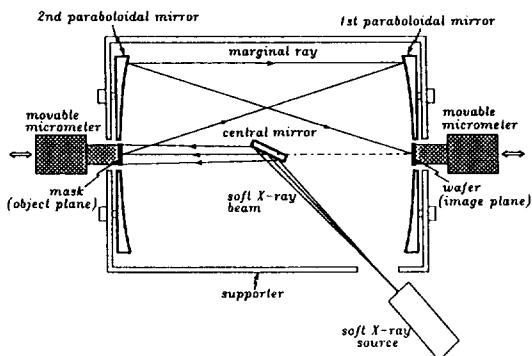


그림 13. Schematic opto-mechanical design for two paraboloidal mirrors, mask(object plane), wafer (image plane), illumination system, movable micrometer, and holding units in the holosymmetric 2-mirror system

는데 이것 역시 상면만곡수차의 보정 때문이다. 각각의 시계에서 자오MTF곡선들의 최대점들은 Gauss 상면으로부터 자오상면만곡( $\Delta t$ ) 만큼 이동되어 있고 구결MTF곡선들의 최대점들은 Gauss 상면으로부터 구결상면만곡( $\Delta s$ ) 만큼 이동되어 있으며, 잔류 비점수차로 인해 시계가 커질수록 그 이동 폭도 커져 Gauss 상면에서 MTF곡선의 하락과 초점심도의 저하가 발생하여 상거리(이) 2.5 mm로 제한되고 있다. 공간주파수 2800 cycles /mm일 때 Gauss 상면 위치에서 최대 0.58의 축상(0.0 field) MTF값이 얻어지고 모든 시계에 대해 초점심도 2.4  $\mu\text{m}$  이내에서 0.4 이상의 MTF 값이 얻어진다. 그러므로 표 1, 3의 2-반사경에는 연X-선 파장 13 nm에서 개구수 0.055에 대해 회절한계의 수차 성능을

가지며, 상자를 2.5 mm와 초점심도 2.4  $\mu\text{m}$  이내에서 0.18  $\mu\text{m}$ 의 해상도를 갖고 있다.

#### IV. 포물면 2-반사경 Holosymmetric System (배율=1)에 대한 광기계 설계

본 포물면 2-반사경에 대한 개략적 광기계 설계를 그림 13에 제시하였다. 중앙부에 구멍이 뚫린 2개의 포물면경이 각각 지지대 양쪽에 부착되게 한다. 포물면경 중앙부 구멍 크기는 표 2 또는 표 3에 제시된 hole diameter 값으로 주어진다. 두 포물면경과 지지대 사이에 조정나사를 두어 광학계 정렬 조정이 가능하게 할 수도 있다. 마스크(물체면)와 웨이퍼(상면)를 각각 마이크로미터의 끝에 부착시키고 각각을 두 개의 포물면경의 중앙구멍에 삽입시켜 마스크와 웨이퍼가 반사경의 포물면 정점(vertex)에 놓이도록 마이크로미터의 조절나사로 정밀하게 조정한다. 두 마이크로미터는 각각 전체적으로 움직일 수 있게하여 마스크와 웨이퍼를 바꿀 경우 포물면경 구멍에서 마이크로미터 전체를 빼내고 마이크로미터 끝에 있는 마스크와 웨이퍼를 교체시킬 수 있도록 한다.

마스크 조명을 위해서 2개의 포물면경 사이의 정중앙 위치에 반사경 하나를 두고 연X-선 광원에서 나온 X-선 빔이 이 중앙반사경에 반사되어 마스크를 조명하도록 한다. 이때 중앙반사경은 광축과 어떤 일정한 각을 이루게 하고 평면 또는 곡면이되게 할 수 있으며, 중앙반사경의 각도 및 면의 형태는 최적 조명이 이루어지도록 광학계 정렬이 허락하는 범위 내에서 정해져야 할 것이다. 중앙반사경의 크기는 그것의 광축에 대한 수직성분 길이가 포물면경의 중앙 구멍 크기의 절반이되게 하여 광학계의 중앙 차폐가 포물면경의 가운데 구멍 크기에 의해 결정되도록 한다. 중앙반사경은 마스크 조명 역할 이외에 마스크에서 반사된 빔이 직접 웨이퍼로 가는 것을 막아 웨이퍼 보호의 역할도 겸한다. 조명계에 대한 설계 및 조명이 결상에 미치는 효과는 앞으로 수행해야 할 중요한 연구 내용이다.

#### V. 결 론

파장 13 nm의 연X-선을 사용하여 등배율(1:1)의 투사 리소그라피용 포물면 2-반사경 holosymmetric system를 광설계하고, 회절이론으로 평가하였다. 본 포물면 2-반사경계는 개구수와 상의 크기를 가변시켜 256 Mega DRAM 및 1 Giga DRAM의 해상도를 갖는 상을 각각

얻을 수 있도록 설계되었다.

등배율(1:1)의 광학계는 holosymmetric system으로 구성하였을 때 코마와 왜곡수차가 완전히 제거되는 이점을 갖는다. 2-반사경 holosymmetric system에서 추가적으로 구면수차를 제거하기 위해 두 반사경을 동일한 포물면으로 만들고 두 반사경 사이 거리를 조절하여 상면만곡수차를 보정하여 aplanat flat-field 포물면 2-반사경계(Gregorian type)를 구하였다. 이 포물면 2-반사경계는 설계변수 부족으로 인해 보정하지 못한 잔류 비점수차에 의해 전체 수차 성능이 좌우되고 결과적으로 상의 크기에 제한이 따르게 되었다. 포물면 2-반사경 holosymmetric system에 대해 0.25  $\mu\text{m}$  및 0.18  $\mu\text{m}$ 의 해상도가 얻어지는 최대의 상 크기를 조사하여, 한 개의 포물면 2-반사경계에서 개구수와 상의 크기를 가변시켜 256 Mega DRAM 및 1 Giga DRAM의 해상도를 갖는 상을 각각 얻을 수 있도록 설계하였다. 포물면 2-반사경계는 연X-선 파장 13 nm에서 개구수 0.04와 상자름 4.0  $\mu\text{m}$ 에 대해 회절한계 성능이 얻어지며, 상공간에서 telecentricity 조건을 만족하고, 완전 비간섭성 조명의 경우 공간주파수 2000 cycles/mm에서 초점심도 2.5  $\mu\text{m}$ 에 대해 0.4 이상의 MTF 값이 얻어졌다. 이는 해상도 0.25  $\mu\text{m}$  실현을 가능하게 하므로 256 Mega DRAM 제작이 가능하다. 개구수를 0.055로 올리고 상 자름을 2.5 mm로 줄이면 완전 비간섭성 조명의 경우 공간주파수 2800 cycles/mm에서 초점심도 2.4  $\mu\text{m}$ 에 대해 0.4이상의 MTF 값이 얻어지므로 해상도 0.18  $\mu\text{m}$ 의 1 Giga DRAM의 제작을 기대할 수 있다.

일반적으로 광축회전대칭 반사경계는 구조적으로 큰 중앙부 차폐를 갖고 그로인해 광량손실 및 회절MTF 저하가 따르는 데 반해 본 2-반사경계는 광축회전대칭의 반사경 2매로 구성된 간단한 구조를 가지면서도 중앙부 차폐가 작다는 특징을 갖고 있다. 아울러 본 2-반사경계는 광학계 길이 60 cm와 반사경 직경 7.1 cm로 전체 크기도 작을 뿐만아니라 일반 비구면이 아닌 포물면으로 반사경이 설계되어 있어 연X-선 투사 리소그라피 광학계로의 구현이 용이하리라 기대한다. 게다가 본 2-반사경계로 상 자름 2.5  $\mu\text{m}$  이내에서 1 Giga DRAM의 해상도까지 결상이 가능하므로 차세대 반도체 칩 제작을 위한 연구용 XUV 투사 리소그라피 장비를 제작하는데 적합할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

이 연구(1994/7-1995/3)를 지원하여 준 포항제철의

산업과학기술연구소와 포항공대 물리학과 김동언교수께  
깊은 감사를 드립니다. 그리고 한국과학기술원 물리학  
과의 남창희 교수의 도움에도 감사합니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 木下博雄, “縮小投影露光X線リソグラフィー”, 應用物理, **62**(7), 691(1993).
- [2] T. E. Jewell, M. M. Becker, J. E. Bjorkholm, J. Boker, L. Eichner, R. R. Freeman, W. M. Mansfield, A. A. MacDowell, M. L. O'Malley, E. L. Raab, W. T. Silfvast, L. H. Szeto, D. M. Tennant, W. K. Waskiewicz, D. L. White, D. L. Windt and O. R. Wood II, “20:1 Projection Soft X-ray Lithography Using Tri-level Resist”, Symposium on Microlithography (SPIE, 1990) pp. 90-98.
- [3] K. Kurihara, H. Kinoshita, T. Mizota., T. Haga, and Y. Torii, “Two-mirror Telecentric Optics for Soft X-ray Reduction Lithography”, J. Vac. Sci & Technol. **B9**(6), 3189(1991).
- [4] H. Kinoshita, Proc. SPIE 1724, 576(1992).
- [5] 児玉賢一, “X線縮小投影露光裝置”, 光學 **20**(8), 482 (1991).
- [6] M. Itou, T. Terasawa and S. Moriyama, “Throughput Estimate of an X-Ray Projection Lithography System”, OSA Proc. Soft X-Ray Projection Lithography, Monterey, 1991, Vol. 12, p. 18.
- [7] T. E. Jewell, J. M. Rodgers and K. P. Thompson, “Reflective Systems Design Study for Soft X-Ray Projection Lithography”, J. Vac. Sci. & Technol. **B8**(6), 1519(1990).
- [8] V. K. Viswanathan and B. E. Newnam, “Development of Reflective Optical Systems for XUV Projection Lithography”, OSA Proc. Soft X-Ray Projection Lithography, Monterey, 1991, Vol. 12, p. 30.
- [9] C. Wang and D. L. Shealy, “Differential Equation Design of Finite-conjugate Reflective Systems”, Appl. Opt., **32**(7), 1179(1993).
- [10] A. A. MacDowell, J. E. Bjorkholm, J. Bokor, L. Eichner, R. R. Freeman, W. M. Mansfield, J. Pastalan, L. H. Szeto, D. M. Tennant, O. R. Wood II, T. E. Jewell, W. K. Waskiewicz, D. L. White, D. L. Windt, W. T. Silfvast, and F. Zernike, “Soft x-ray Projection Lithography Using a 1:1 Ring Field Optical System”, J. Vac. Sci. & Technol. **B9**(6), 3193(1991).
- [11] 조영민, 이상수, “모든 3차 수차를 제거하여 얻은 극자외선 Lithography용 4-반사경 Holosymmetric System(배율=1)”, 한국광학회지, **4**(3), 252(1993).
- [12] 조영민, 이상수, “연X-선 투사 리소그라피용 등배율 4-반사경 Holosymmetric System”, 대한민국 학술원 논문집, 자연과학편 제33집, 11-27(1994).
- [13] R. Kingslake, *Lens Design Fundamentals*, Chap. 10, p203-205, (Academic Press, 1978 New York).
- [14] W. T. Welford, *Aberrations of the Optical Systems*, (Adams Hilger Ltd., 1986 Bristol).

## Paraboloidal 2-mirror Holosymmetric System with Unit Magnification for soft X-ray Projection Lithography

Young Min Cho

*Space Division, Korea Aerospace Research Institute Taejon 305-600, Korea*

Sang Soo Lee

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

(Received: March 30, 1995)

A design of unit magnification 2-mirror system with high resolution is presented. It is for soft X-ray(wavelength of 13 nm) projection imaging and suitable for preparation of high density semiconductor chip. In general, a holosymmetric system with unit magnification has the advantage that both coma and distortion are completely eliminated. In our holosymmetric 2-mirror system, spherical aberration is additionally removed by using two identical paraboloidal mirror surfaces and field curvature aberration is also corrected by balancing Petzval sum and astigmatism which depends on the distance between two mirrors, so that the system is a aplanatic flat-field paraboloidal 2-mirror holosymmetric system. This 2-mirror system is small in size, and has a simple configuration with rotational symmetry about optical axis, and has also small central obscuration. Residual finite aberrations, spot diagrams, and diffraction-based MTF's are analyzed for the check of performances as soft X-ray lithography projection system. As a result, the image sizes for the resolutions of  $0.25 \mu\text{m}$  and  $0.18 \mu\text{m}$  are 4.0 mm, 2.5 mm respectively, and depths of focus for those are  $2.5 \mu\text{m}$ ,  $2.4 \mu\text{m}$  respectively. This system should be useful in the fabrication of 256 Mega DRAM or 1 Giga DRAM.