

패턴 분해능 및 초점심도 향상에 대한 사입사 조명(Off-Axis Illumination)의 효과에 관한 연구

박정보 · 이성목

서울대학교 물리교육과

(1999년 8월 25일 받음, 1999년 12월 3일 수정본 받음)

본 연구에서는 파장 $0.248 \mu\text{m}$ 의 KrF Eximer Laser를 광원으로 하고 NA가 0.65인 광학계를 사용하는 리소그래피 시스템에서, 환형(annular) 조명과 4구(quadrupole) 조명의 조건들을 바꾸어가며 구현하고자 하는 패턴의 분해능과 초점심도 향상에 어떠한 영향을 주는지 알아보았다. 그 결과, 환형 조명에서는 원형 마스크와 광학적 근접효과를 보정하기 위해 보조 패턴을 삽입한 마스크의 경우, 최적의 분해능과 초점심도를 보이는 조명 조건이 다를 수 있었다. 또한, 사구 조명의 경우에는 일반적으로 사용되는 45° 위치의 X자형 배치를 주요 패턴의 방향에 따라 적절히 바꾸어 주면 분해능과 초점심도를 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

광학적 리소그래피(Optical Lithography) 방법의 분해능 한계에 도달한 극소 패턴의 구현을 위해 이미 많은 연구들이 진행 중에 있다. 그 중에서 사입사 조명(Off Axis Illumination; OAI)을 사용할 경우, 패턴의 분해능을 향상시킬 수 있음이 여러 논문들^[1-4]에서 밝혀져 있으며 최근에는 이러한 OAI방법에 대한 심화된 고찰^[5-7]이 진행되고 있다.

주로 사용되는 OAI 방법에는 환형(annular) 조명, 2구(dipole) 조명, 4구(quadrupole) 조명 등이 있지만, 보통 2구 조명의 경우는 조명의 위치와 패턴의 방향에 따라 분해능의 차이가 심하기 때문에 일반적으로는 환형 조명이나 4구 조명이 많이 쓰이고 있다.

광학적 리소그래피 방법을 통해 패턴을 구현할 때, 패턴의 크기가 광학적 분해능의 한계에 도달한 경우, 빛의 회절현상에 의한 광학적 근접효과(Optical Proximity Effect)가 발생하게 된다. 따라서, 이를 보정하여 원하는 CD(Critical Dimension)를 만족하는 패턴을 얻기 위해서 원래의 패턴에 보조패턴을 첨가하는 것이 보통이다. 또한, 광학적 분해능을 향상시키기 위해 노광 장비의 구경수(Numerical Aperture; NA)를 크게한 시스템에 대한 연구가 최근에 주로 연구되고 있다. 그러나, 이런 경우 분해능은 향상되지만, 더불어 초점심도(Depth of Focus; DOF)도 짧아지는 문제가 있다.

본 연구에서는 파장 $0.248 \mu\text{m}$ 의 KrF Eximer Laser를 광원으로 하고 NA가 0.65인 광학계를 사용하는 리소그래피 시스템에서, 대표적인 OAI 방법인 환형 조명과 4구 조명의 조건들을 바꾸어가며 구현하고자 하는 패턴의 분해능과 DOF 향상에 어떠한 영향을 주는지 알아보려고 하였다.

본 연구에 적용된 광학계의 조건이 high NA 시스템에 가깝기 때문에, DOF 향상에 연구의 주안점을 두었다. 연구에 적용한 구현할 패턴의 형태는, 일반적으로 DRAM에서 축전기

(capacitor)의 전극으로 쓰이는 storage node(혹은 island) 패턴이다. 또한, 광학적 근접효과 보정(Optical Proximity Correction; OPC)에 따라 원형의 마스크 패턴을 변형한 경우에 대하여 OAI를 적용하였을 때, 최적의 결상 조건에 변화가 없는지 확인하기 위해 serif형 보조패턴을 첨가한 마스크 패턴에 대해서도 동일한 연구를 수행하였다.

각 경우에 대한 OAI의 효과는, 결상 시뮬레이션을 통해 상을 계산하고 이를 E-D Tree(Exposure Dose-Defocus Tree)^[8]에 적용하여 DOF를 구함으로써 확인하였다.

II. 부분 간섭성 조명에서의 결상 이론

일반적으로 마스크를 지나는 광선은 서로 보강 또는 상쇄 간섭을 일으키는데, 어떤 특정의 각으로 회절된 광선만이 보강 간섭을 일으켜 회절 패턴이 만들어진다. 마스크 패턴이 일정한 선폭의; 1차원 격자모양이고, 완전 간섭성의 빛이 수직으로 입사한다면 보강 간섭이 일어나는 각은 다음과 같다.

$$\sin(\delta) = \frac{n\lambda}{P} \quad (1)$$

여기서 δ 는 회절각이고 n 은 $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ 인 정수이다. λ 는 광원의 파장이고 P 는 격자의 주기이다. 이 식은 마스크 패턴의 공간 주파수 $1/P$ 와 회절각의 관계를 보여준다.

마스크 패턴에서 나오는 빛은 그림 1(a)처럼 회절하여 -1차, 0차, +1차 등으로 나뉘어진다.

마스크와 결상렌즈 사이의 거리는 충분히 멀기 때문에 프라운호퍼 회절의 경우로 광리소그래피에 적용할 수 있다. 회절 패턴은 마스크 패턴의 Fourier 변환이 된다. 같은 선폭의 격자에 대한 회절 패턴은 공간 주파수 $\pm n/P$ 만큼의 차이에서 Delta 함수로 나타나는데, 1차원 격자의 경우 단지 0차와 홀수 차에서만 값을 가진다(그림 1(b)참조).

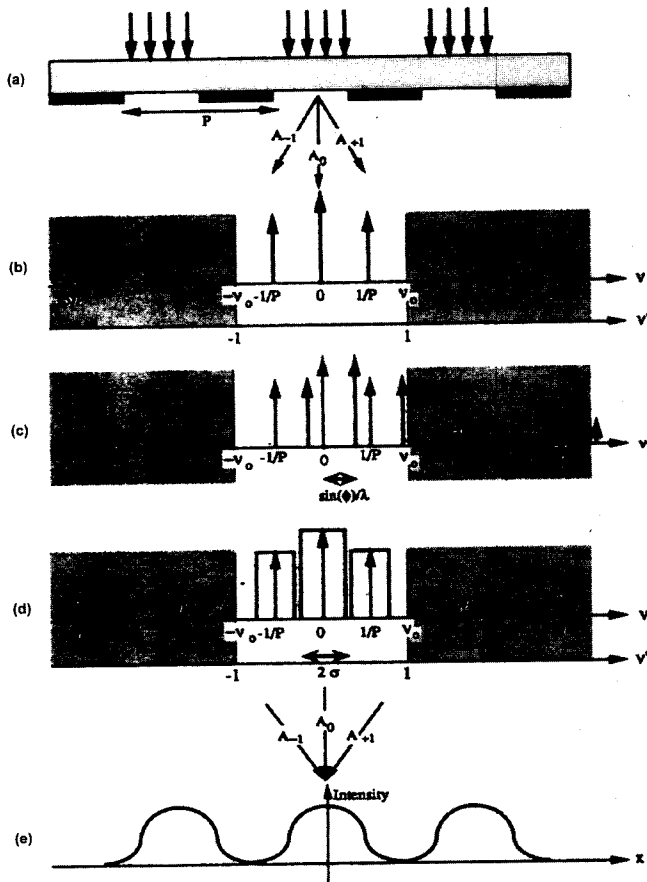


그림 1. 부분 간섭 조명에 의한 결상^[9].

이러한 회절 패턴의 일부분만이 결상렌즈에 의해 상으로 재구성된다. 결상렌즈에 들어가는 가장 큰 공간 주파수를 렌즈의 cut-off 주파수라 하고 $v_0 = 1/P_0 = NA_0/\lambda$ 로 주어진다. 공간 주파수 축은 대체로 이 값에 대해 규격화한다. 1보다 작은 모든 주파수 v' 은 렌즈를 지나지만, 1보다 큰 주파수는 결상에 기여하지 못한다. 즉 격자의 주기에 의해 cut-off 주파수 내에 들어가는 차수가 결정된다.

부분 간섭성 광원은 간섭광을 만들며 각기 다른 입사각 ϕ 로 마스크를 지나 결상렌즈에 회절 패턴을 만드는 유한한 개수의 간섭성 점광원으로 취급할 수 있으므로 각각의 광도를 더하게 된다. 만일 기울어진 광선이 마스크에 입사한다면, 그 빛의 회절 패턴은 Fourier 영역에서 그 모양이 변하는 것이 아니라, 그 위치만 옮기게 된다. 그리고 광선의 입사각이 ϕ 라고 할 때 그 이동 거리는 $\sin\phi/\lambda$ 가 된다.

또한 부분 간섭성 조명은 유한 개수의 완전 간섭성 광원들로 생각할 수 있고 각각은 완전 간섭성 광원에 의한 패턴을 형성하지만, 회절 격자에 각기 다른 각 ϕ 에서 입사하므로, 그림 1(c)에서처럼 약간씩 이동된 형태를 나타내게 되고 그것의 조합은 그림 1(d)와 같다. 유효 광원의 반경을 NA_c 로 정의하면, 그림 1(d)에 있는 각 패턴 밴드의 폭은 $2\sin\phi_{\max}/\lambda = 2NA_c/\lambda = (2NA_c/NA_0)v_0$ 이다. 여기서 $NA_c/NA_0 = \sigma$ 라 하고 이 값을 간섭도(Degree of Coherence, DOC)라 한다. DOC

값이 클수록 유효 광원 속의 점광원의 수가 커지는 것과 같아서 간섭성은 작아진다.

일반적인 상황에서 부분 간섭 광학 결상 과정은 식 (2)와 같은 비선형 적분 방정식에 의해 표현될 수 있다.^[10] (이러한 결상식은 Hopkins 방정식이라고도 한다.)

$$I(x, y) = |g(x, y)|^2 = |T(f)|^2(x, y) = \int_{R^4} f(\xi_1, \xi_2) J_0(\xi_1, \xi_2, \eta_1, \eta_2) f^*(\eta_1, \eta_2) \times K(x, y, \xi_1, \xi_2) K^*(x, y, \eta_1, \eta_2) d\xi_1 d\xi_2 d\eta_1 d\eta_2 \quad (2)$$

$I(\cdot)$: 상면에서의 intensity

$g(\cdot)$: 상면에서의 amplitude

$f(\cdot)$: 물체(마스크)

$K(\cdot)$: 투사 광학계의 나타내는 coherent point spread function

$J_0(\cdot)$: 조명의 간섭성을 나타내는 mutual intensity function

OAI를 사용한 결상 계산은 위의 식 (2)에서 $J_0(\cdot)$ 함수를 변형하여 해결하는데, 이 함수의 공간 주파수 영역으로 Fourier 변환한 형태는 환형 조명과 4구 조명의 경우 각각 다음과 같다.

· 환형 조명 :

$$J_0(f, g) = \begin{cases} \frac{1}{\pi(\sigma_{out}^2 - \sigma_{in}^2)} \left(\frac{\lambda}{NA}\right)^2, & \sigma_{in}^2 \left(\frac{NA}{\lambda}\right)^2 < f^2 + g^2 < \sigma_{out}^2 \left(\frac{NA}{\lambda}\right)^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

· 4구 조명 :

$$J_0(f, g) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sigma_p^2} \left(\frac{\lambda}{NA}\right)^2, & (f - \xi)^2 + (g - \eta)^2 < \sigma_p^2 \left(\frac{NA}{\lambda}\right)^2 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, f, g 는 공간주파수의 좌표, $\sigma_{in}, \sigma_{out}, \sigma_p$ 는 조명계의 간섭성으로 각각 환형 조명의 내부 및 외부 원의 반지름, 사구조명의 각 네 구의 반지름을 나타낸다. ξ, η 는 사구조명의 경우 각 구들이 위치하는 중심의 좌표이다. 그리고, λ 는 광원의 파장, NA 는 광학계의 구경수에 해당한다.

OAI 방법은 광원의 상이 입사동의 중앙이 아닌 곳에 생길도록 입사광선을 기울이는 방법이다. 따라서, 마스크를 지나면서 회절된 0차 회절광이 결상 렌즈계의 광축에 대해 θ 의 각을 갖도록 입사광을 기울이면 0차광과 ψ 의 각을 갖는 ± 1 차의 공간 주파수 중 하나는 결상 렌즈계의 차단 주파수(cut-off frequency)에 의해 차단된다. 따라서 보통의 조명법은 3개의 공간 주파수, 즉 0차와 ± 1 차로 이루어지는 3광 결상법(three-beams imaging)임에 비해 OAI는 0차광과 ± 1 차광 중 하나의 광으로 이루어지는 2광 결상법(two-beams imaging)이다. θ 만큼 기울어진 입사광은 공간 주파수들을 $\sin\theta/\lambda$ 만큼 이동시킨다. 따라서, OAI를 사용하면 결상 렌즈계의 차단 주파수가 $NA_0/\lambda + \sin\theta/\lambda$ 만큼 커지는 효과가 생기므로 분해능의 향상 효과가 있다.

또한, OAI는 공간 주파수의 -1차 항과 +1차 항과의 제2차 화과 결상이 없기 때문에 완전 초점(best focus) 상태에서는

contrast가 저하되는 반면, 탈초점에 보다 민감한 제2조화파 성분이 없기 때문에 DOF가 증가될 것이 기대된다.

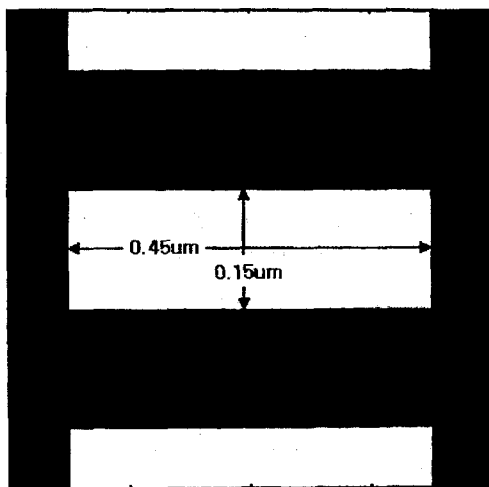
계산된 상을 분석하기 위해 쓰이는 분해능과 DOF의 일반적인 정의는 다음과 같다.

$$\text{분해능} = k_1 \frac{\lambda}{NA}$$

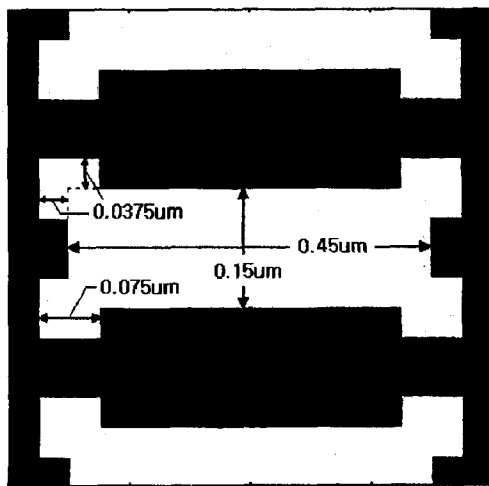
$$\text{초점심도} = k_2 \frac{\lambda}{NA^2} \quad (5)$$

여기서, k_1 과 k_2 는 각각 실제 공정 과정에서 결정되는 변수이다.

만약 결상 광학계의 구경수(NA)가 커지면, 앞서 언급한 바와 같이 분해 가능한 패턴의 크기는 작아지지만 DOF도 함께 작아지게 된다. 최근에는 광학적 분해능의 한계에 다다른 작은 패턴을 구현하기 위해 광학계의 NA가 점차 커지는 추세이기 때문에 필요한 분해능을 만족하면서도 DOF를 향상시키는 것이 중요하다.



(a) 원형 마스크



(b) 보조패턴 마스크

그림 2. 마스크 패턴의 모양. (a) 원형, (b) serif형 보조패턴을 포함한 경우.

III. 시뮬레이션의 조건

연구의 대상이 된 기본 패턴은 $0.15 \mu\text{m} \times 0.45 \mu\text{m}$ 의 CD를 갖는 storage node 패턴으로 원래의 모양과 serif형 보조패턴을 포함한 모양은 그림 2와 같다.

이 논문에서, 결상 계산을 위해 가정된 광학 시스템은, 앞서 언급한 바와 같이, 파장 $0.248 \mu\text{m}$ 의 KrF Eximer Laser를 광원으로 하고 NA가 0.65인 광학계를 사용하는 리소그래피 시스템이다. 패턴 구현에서의 분해능과 DOF의 향상에 대한 OAI의 효과를 알아보기 위해 다음 그림과 같은 몇 가지 조명 상황을 고려하였다.

그림 3의 (a)와 같은 환형 조명의 경우는 σ_{out} 을 0.6에서 0.8까지 0.05간격으로 변형시키고, 이때 각각의 σ_{out} 에 대하여 σ_{in} 을 0.3부터 ($\sigma_{out} - 0.05$)까지 변화시켰다. 그림 3의 (b)-(d)에서 나타난 사구 조명의 경우도 사구의 외접원의 반지름에 해당하는 σ_c 를 환형 조명의 경우와 마찬가지로 0.6에서 0.8까지 0.05간격으로 변형시키면서 각 구의 반지름(σ_p)을 0.1, 0.15, 0.2로 바꾸어 가면서 상의 모양을 확인하였다. 앞의 그림에서와 같이 일반적으로 사용되는 45° 위치(그림 3의 (c)) 뿐만 아니라, 각 구의 위치를 점선으로 표현된 환형의 띠 안에서 변화시키면서 패턴의 모양 변화에 따라 변화하는 최적의 조명 조건을 확인하고자 하였다.

계산된 상으로 DOF를 구하기 위해서는 E-D Tree(Exposure dose-Defocus Tree)를 이용하였다. E-D Tree에 적용하기 위해서 기본적으로 CD변화는 $\pm 10\%$ 로 제한하고 노광량(Exposure Dose)의 허용 변화량도 10%로 제한하여, 초점에서 벗어남에 따라 계산되는 상의 광도 분포를 분석하였다.

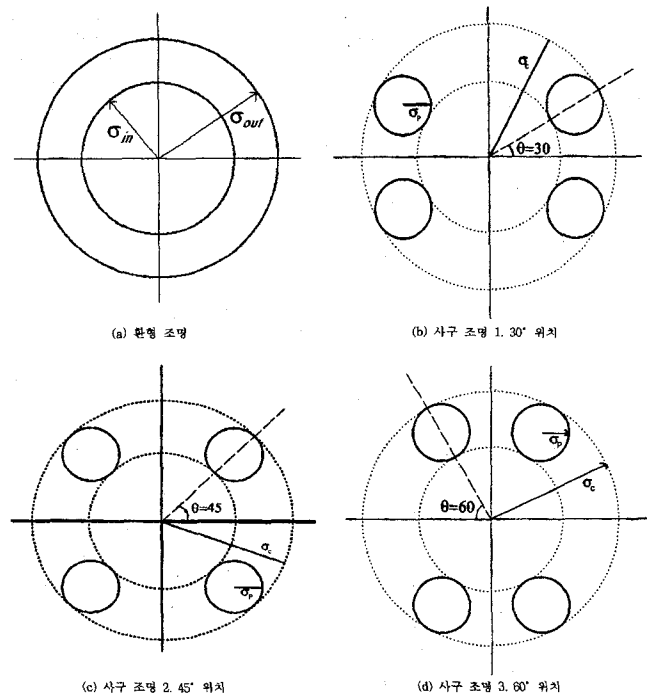


그림 3. 환형 조명과 사구 조명의 형태.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

계산에 적용된 원형의 마스크와 OPE를 해결하기 위해 serif 형 보조 패턴을 첨가한 마스크의 경우에 대하여, 각 OAI의 조건 변화에 따른 DOF를 계산하면 다음과 같다.

4.1. 환형 조명(Annular Illumination)

환형 조명은 조명의 모양 자체가 회전 대칭형이기 때문에, 일반 조명과 비교하여 패턴 모양의 변화에 일정한 영향을 줄 것이 기대된다.

조명의 조건을 바꾸어 가며 DOF를 계산한 결과는 다음 표 1과 같다. 수차(aberration)가 없는 광학계를 가정한 경우에는 +탈초점과 -탈초점 간의 image profile이 대칭이기 때문에, 표 1에서는 +탈초점에 대한 경우만 계산된 결과를 보여준다. 따라서, 실제 공정 상에 적용될 DOF는 표에 기재된 값을 두 배한 것이 된다.

σ_{out} 의 크기를 변화시키면서 σ_{out} 과 σ_{in} 의 차이($\Delta\sigma = \sigma_{out} - \sigma_{in}$)에 따라 계산된 DOF를 그래프로 그려보면 그림 4와 같다. 계산 결과를 볼 때 보조 패턴이 없는 마스크의 경우는 대략적으로 0.7-0.8사이의 σ_{out} 에서 0.05-0.15의 $\Delta\sigma$ (σ_{out} 이 0.8의 경우엔 0.2)일 때 상대적으로 큰 DOF를 가지며, 보조 패턴이 첨가된 마스크의 경우엔 0.7 이상의 σ_{out} 에서 $\Delta\sigma$ 가 0.2보다 작을 때 고르게 DOF가 커지는 것을 확인 할 수 있었다.

최대의 DOF를 갖는 조건은 보조 패턴이 없는 마스크의 경우는 $\sigma_{out} / \sigma_{in}$ 이 0.75/0.7일 때인 것에 비해, 보조 패턴이 있는 마스크의 경우엔 0.8/0.75이다. 이것은 보조 패턴을 첨가함에 따라 마스크 패턴의 공간 주파수 주기에 변화가 생겨 광학

계에 의한 차단 주파수가 변함에 의해 발생한 것으로 보인다. 따라서, 광학적 근접 효과를 보정하기 위해 원래의 마스크 패턴의 모양을 바꾸어야 할 경우에는 최적의 상을 구현하기 위한 조명 조건을 새로이 고찰해야할 필요성이 제기된다.

전반적인 계산 결과를 볼 때, 대체적으로 광학적 근접효과를 보정하기 위해 보조 패턴을 첨가한 마스크의 경우, 보다 큰 DOF를 보이는 경향을 확인할 수 있다. 그런데, 특정 조명 조건($\sigma_{out} / \sigma_{in}$: 0.70/0.65, 0.75/0.60-0.70, 0.80/0.60-0.65)에서는 원형의 마스크에서 보조 패턴을 첨가한 마스크의 경우보다 DOF가 더 큰 것으로 나타났다. 하지만, 이 경우 분해능과 관련하여 cut-off intensity를 비교해 볼 때 보조 패턴의 경우가 cut-off intensity가 훨씬 크기 때문에 노광량을 줄일 수 있으므로, 실제 공정상의 작업 처리량을 향상시킬 수 있다는 것을 쉽게 알 수 있다. 가장 큰 DOF를 갖는 경우에 대한 E-D Tree를 그린 결과는 그림 5와 같다.

이를 확인하기 위해, E-D Tree에 나타나는 작업창(Process Window; 그림의 사각형 실선)의 범위로 결정된 노광량의 중심 값을 통해 규격화된 intensity를 구해 보았다. 그림 5의 E-D Tree를 통해서 쉽게 유추할 수 있듯이, 계산된 초점심도를 확보하기 위해서는, 이 작업창이 규정된 노광량으로 공정이 진행되어야 하므로, 이 때의 노광량 정보를 확인하여 intensity를 계산하면, 쉽게 cut-off intensity에 대한 예상 값을 찾을 수 있다. 계산된 결과를 그래프로 그리면 그림 6과 같은데 여기서는 σ_{out} 이 0.7 이상인 경우에 대해서만 살펴보았다.

그래프를 살펴보면, 보조 패턴의 유무와 관계없이, 광학적 리소그래피에서 일반적으로 최저 cut-off normalized intensity로 잡는 0.3보다는 모두 낮은 값을 보이고 있어 패턴 구현에 어

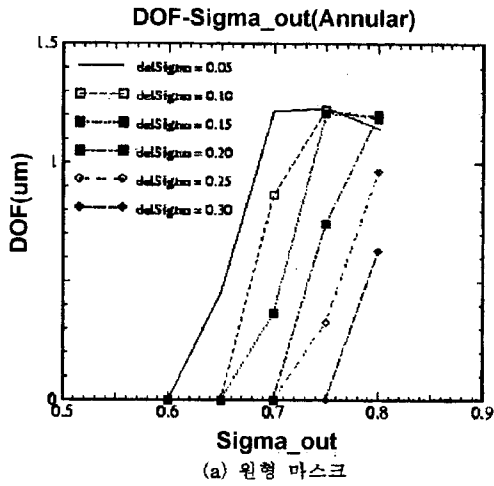
표 1. 환형 조명에서의 DOF 계산 결과

σ_{out}	σ_{in}	DOF (μm)	σ_{out}	σ_{in}	DOF (μm)
0.60	0.30	0.000	0.75	0.30	0.000
	0.35	0.000		0.35	0.000
	0.40	0.000		0.40	0.000
	0.45	0.000		0.45	0.000
	0.50	0.000		0.50	0.163
	0.55	0.000		0.55	0.372
0.65	0.30	0.000	0.80	0.60	0.604
	0.35	0.000		0.65	0.612
	0.40	0.000		0.70	0.615
	0.45	0.000		0.30	0.000
	0.50	0.000		0.35	0.000
	0.55	0.000		0.40	0.000
0.70	0.60	0.224	0.45	0.131	
	0.30	0.000	0.50	0.313	
	0.35	0.000	0.55	0.481	
	0.40	0.000	0.60	0.601	
	0.45	0.000	0.65	0.598	
	0.50	0.000	0.70	0.593	
	0.55	0.181	0.75	0.572	
	0.60	0.431			
	0.65	0.608			

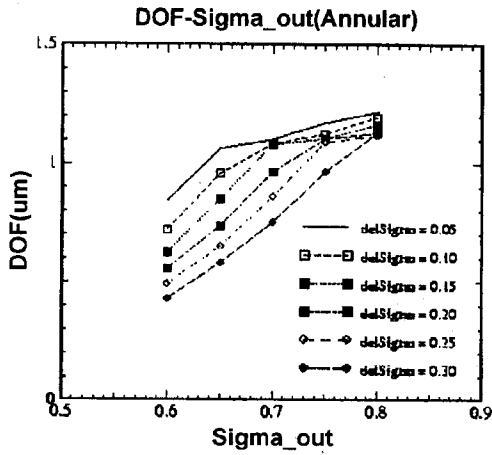
(a) 원형 마스크

σ_{out}	σ_{in}	DOF (μm)	σ_{out}	σ_{in}	DOF (μm)
0.60	0.30	0.215	0.75	0.30	0.350
	0.35	0.245		0.35	0.389
	0.40	0.278		0.40	0.434
	0.45	0.312		0.45	0.482
	0.50	0.360		0.50	0.545
	0.55	0.422		0.55	0.552
0.65	0.60	0.552	0.60	0.552	
	0.30	0.254	0.65	0.562	
	0.35	0.289	0.70	0.586	
	0.40	0.324	0.30	0.402	
	0.45	0.367	0.35	0.438	
	0.50	0.424	0.40	0.485	
0.70	0.55	0.478	0.45	0.531	
	0.60	0.531	0.50	0.565	
	0.30	0.304	0.55	0.59	
	0.35	0.336	0.60	0.564	
	0.40	0.375	0.65	0.581	
	0.45	0.429	0.70	0.597	
	0.50	0.482	0.75	0.608	
	0.55	0.540			
	0.60	0.541			
	0.65	0.550			

(b) serif 형 보조 패턴을 첨가한 마스크

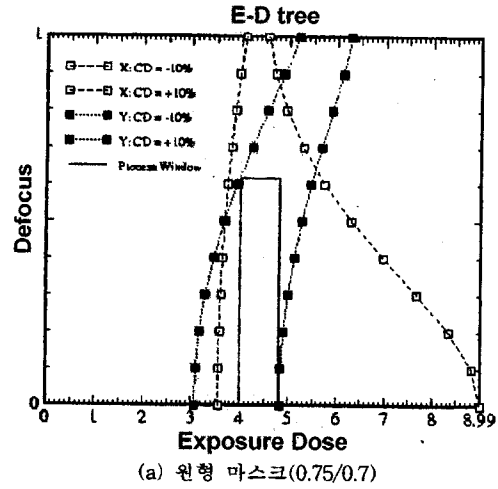


(a) 원형 마스크

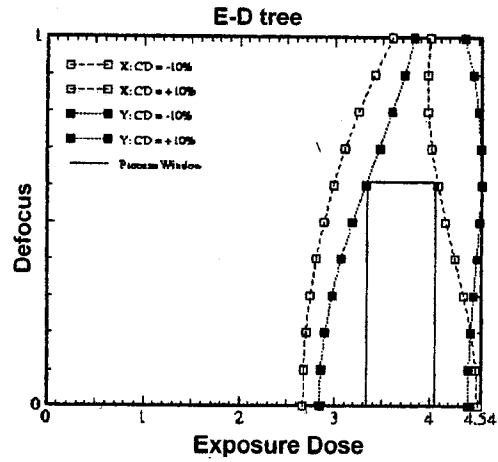


(b) serif형 보조 패턴을 첨가한 마스크

그림 4. 환형 조명에서 $\Delta\sigma(\sigma_{out}-\sigma_{in})$ 와 σ_{out} 에 따른 DOF 변화.



(a) 원형 마스크(0.75/0.7)



(b) 보조 패턴 마스크(0.8/0.75)

그림 5. 최대의 DOF를 보이는 E-D Tree 결과.

려움이 예상되지만 보조 패턴을 사용한 경우가 보다 높은 intensity를 갖는다. 여기서, DOF가 최대가 되는 조명 조건과 가장 높은 intensity 분포를 갖는 조명 조건이 서로 다른 것을 알 수 있는데, 이것은 공정 작업에서 특정한 목적에 따라 DOF와 intensity 분포(분해능) 간의 최적화를 적절히 조절하여 특정 조명 조건이 결정된다.

4.2. 사구 조명(Quadrupole Illumination)

환형 조명의 경우와 마찬가지로 조명 상태의 조건을 바꾸어 가면서, DOF를 계산한 결과는 다음의 표 2와 같다.

실제로 연구에 사용한 마스크 패턴의 모양(그림 2참고)을 보면 알 수 있듯이, 패턴의 주된 방향은 x축 방향이다. 따라서, 주된 패턴 방향과 나란한 쪽에 가까운 30° 위치의 조명 조건(그림 3(b))에서는 DOF가 거의 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다. 보조 패턴을 사용하지 않은 경우는 구(pole)의 반지름(σ_p)이 0.1인 경우를 제외하면 45° 위치의 조명 조건(그림 3(c))일 때가 60° 위치(그림 3(d))의 경우보다 대체로 더 큰 DOF를 보인다. 그러나, 보조 패턴을 사용한 경우에는 항상 60° 위치에 있는 조명 조건이 45° 위치의 경우보다 DOF가 크다.

환형 조명의 경우와 비교하여 볼 때 사구 조명으로 구해진 DOF의 값이 대체로 환형 조명일 때의 DOF에 비해 작게 나타남을 알 수 있다. 그러나, 보조 패턴의 유무와 관계없이 특정한 조명 조건(60° 위치, $\sigma_c:0.8$ 과 $\sigma_p:0.1$)에서 갑자기

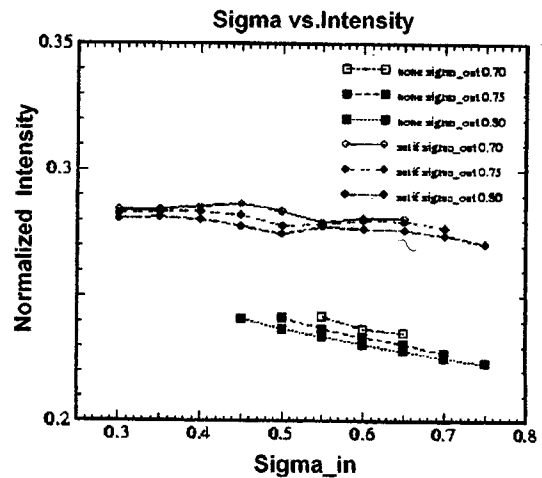


그림 6. 환형 조명 조건에 따른 광도 분포

표 2. 사구 조명에서의 DOF 계산 결과

θ	σ_c	σ_p	DOF(μm)	θ	σ_c	σ_p	DOF(μm)	θ	σ_c	σ_p	DOF(μm)
30	0.60	0.10	0.000	45	0.60	0.10	0.000	60	0.60	0.10	0.000
		0.15	0.000			0.15	0.000			0.15	0.000
		0.20	0.000			0.20	0.000			0.20	0.000
	0.65	0.10	0.000		0.65	0.10	0.223		0.65	0.10	0.000
		0.15	0.000			0.15	0.000			0.15	0.000
		0.20	0.000			0.20	0.000			0.20	0.000
	0.70	0.10	0.000		0.70	0.10	0.277		0.70	0.10	0.288
		0.15	0.000			0.15	0.201			0.15	0.000
		0.20	0.000			0.20	0.000			0.20	0.000
	0.75	0.10	0.000		0.75	0.10	0.343		0.75	0.10	0.448
		0.15	0.000			0.15	0.274			0.15	0.245
		0.20	0.000			0.20	0.152			0.20	0.000
0.80	0.10	0.000	0.80	0.10	0.435	0.80	0.10	0.744			
	0.15	0.052		0.15	0.350		0.15	0.404			
	0.20	0.106		0.20	0.269		0.20	0.225			

(a) 원형 마스크

30	0.60	0.10	0.000	45	0.60	0.10	0.227	60	0.60	0.10	0.238
		0.15	0.000			0.15	0.163			0.15	0.200
		0.20	0.000			0.20	0.004			0.20	0.122
	0.65	0.10	0.000		0.65	0.10	0.289		0.65	0.10	0.294
		0.15	0.000			0.15	0.237			0.15	0.237
		0.20	0.000			0.20	0.183			0.20	0.230
	0.70	0.10	0.000		0.70	0.10	0.333		0.70	0.10	0.344
		0.15	0.000			0.15	0.303			0.15	0.308
		0.20	0.000			0.20	0.252			0.20	0.281
	0.75	0.10	0.000		0.75	0.10	0.411		0.75	0.10	0.467
		0.15	0.000			0.15	0.348			0.15	0.388
		0.20	0.000			0.20	0.315			0.20	0.327
0.80	0.10	0.000	0.80	0.10	0.522	0.80	0.10	0.726			
	0.15	0.005		0.15	0.428		0.15	0.477			
	0.20	0.068		0.20	0.382		0.20	0.393			

(b) serif 형 보조 패턴을 첨가한 마스크

DOF의 값이 커지는 것을 알 수 있다.

이러한 상황을 보다 쉽게 알 수 있도록, 환형 조명의 경우와 마찬가지로 σ_c 와 σ_p 에 따른 DOF 변화를 그래프로 나타내면 그림 7과 같다. 이 그래프에서는 DOF가 거의 확보되지 않는 30° 위치의 조명 조건은 생략하였다. 전체적인 그래프의 형태를 볼 때, 보조 패턴을 사용한 마스크의 경우가 보조 패턴을 사용하지 않은 마스크의 경우보다 조명 조건의 변화에 따른 DOF의 변화가 적은 것을 알 수 있다. 그래프를 통해 보면, 앞서 언급한 바와 같이 60° 위치의 사구 조명의 경우, 0.8의 σ_c 와 0.1의 σ_p 에서 DOF의 향상이 급격히 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 마스크 패턴의 공간 주파수 상의 주기에 따라, 사구 조명의 위치와 조건을 적절히 선택하면 최적의 DOF를 확보할 수 있는 공정 조건을 찾을 수 있음이 분명하게 드러난다.

결과를 살펴볼 때, 환형 조명의 경우와는 달리 두 형태의 마스크에서 DOF의 경향성이 일치하는 것을 확인할 수 있다. 그러나, 사구 조명에서도 환형 조명의 경우와 마찬가지로, 최

대의 DOF를 보이는 것은 조명 조건 $\sigma_c/\sigma_p=0.8/1.0$ 에서 보조 패턴이 없는 마스크이다. 두 형태의 마스크에 대한 최대 DOF의 경우에 대한 E-D Tree를 그려보면 그림 8과 같다.

사구 조명의 경우에서도 E-D Tree를 통해 구성된 작업창의 경계가 나타내는 노광량에 대한 분석을 통해 cut-off normalized intensity를 살펴보는 것이 필요하다. 이를 통해서, 공정 상 패턴 구현이 가능한 적정의 cut-off normalized intensity에서 최대의 DOF를 확보할 수 있는 최적의 조명 조건을 찾을 수 있기 때문이다.

앞서 제시한 것과 마찬가지로 방법으로 사구 조명의 여러 조건에 대한 normalized intensity 분포를 계산한 결과를 그래프로 그리면 다음과 같다.

결과에서 알 수 있듯이 보조 패턴 첨가 여부를 떠나, 적절히 선택된 사구 조명 조건에서의 intensity 분포가 환형 조명의 경우에 비해 전반적으로 아주 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 주목할 것은 보조 패턴이 있는 경우, 환형 조명의 경우와는 달리 최대의 DOF를 갖는 조명 조건(사구의 위치가

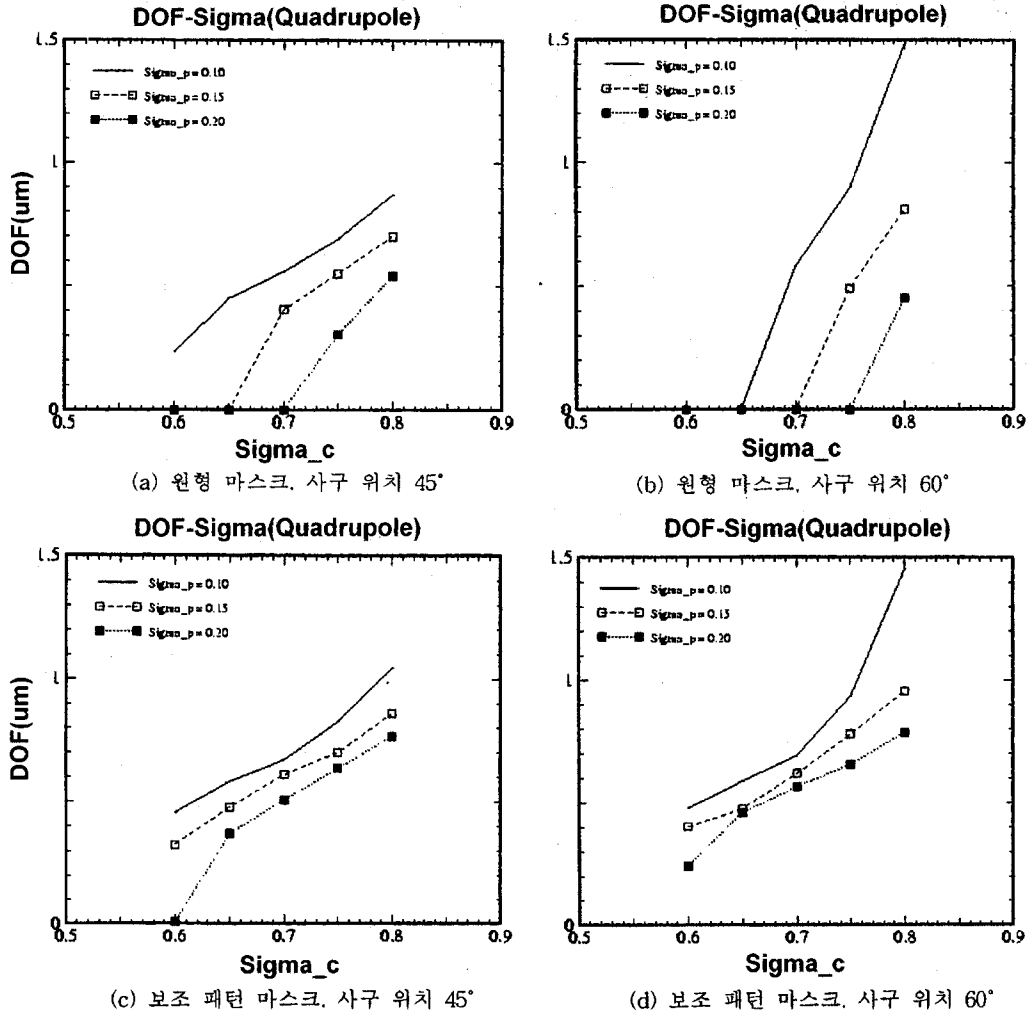


그림 7. 사구 조명에서 σ_c 와 σ_p 에 따른 초점 심도 변화.

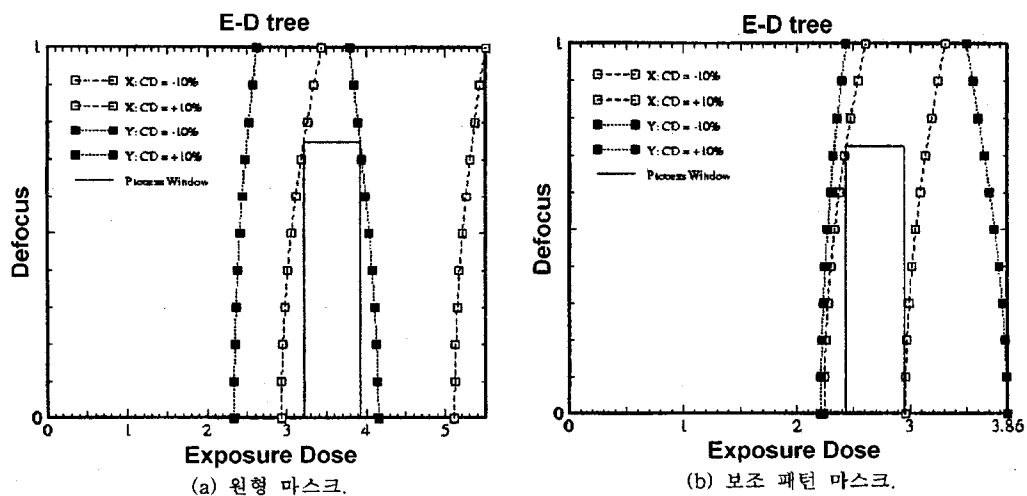


그림 8. 최대의 DOF를 보이는 E-D Tree 결과($\sigma_c/\sigma_p=0.8/1.0$).

60°이고, $\sigma_c/\sigma_p=0.8/1.0$ 일 때, intensity 분포 또한 높게 나타났다는 사실이다.

따라서, DOF와 분해능 향상을 동시에 만족시키기 위한 조

명 조건으로는 패턴의 주된 방향에 따라 조명 위치를 변형시킨 사구 조명이 유리하다는 것을 알 수 있다.

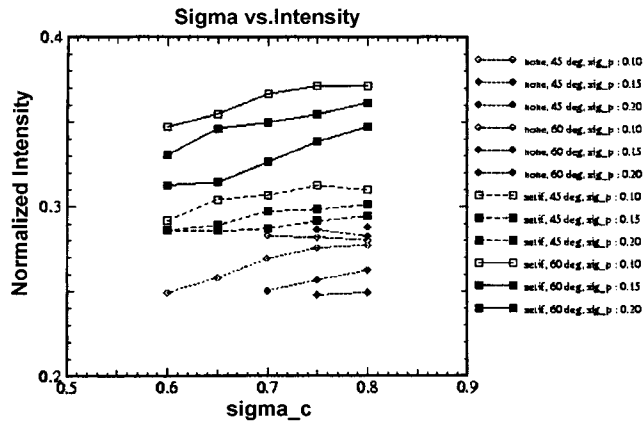


그림 9. 사구 조명 조건에 따른 광도 분포.

V. 결 론

지금까지, storage node 패턴을 갖는 마스크와 광학적 근접 효과를 보정하기 위해 serif형 보조 패턴을 첨가한 마스크에서 분해능과 DOF의 향상에 있어 환형 조명 및 사구 조명의 효과를 알아보았다.

두 종류의 패턴에 대하여 구현하고자 하는 CD line의 ± 10% 변화에 따른 탈초점과 노광량의 상관 관계를 ED-Tree로 알아보고, 이를 통해 DOF를 구하였다. 그리고, 계산된 DOF에 따른 ED-Tree 상의 작업장이 제한하는 노광량을 통해서 cut-off normalized intensity를 계산하여, 구현하고자 하는 CD(Critical Dimension) line에 대한 분해능 향상의 측면을 고찰하였다.

그 결과, 환형 조명의 경우엔 마스크 상의 보조 패턴 유무에 따라 최적의 DOF를 갖는 조명 조건이 서로 다름을 알 수 있었다. 이와 더불어, 보조 패턴의 유무에 따라 각각의 경우 모두 가장 큰 DOF를 갖는 조명 조건과 가장 높은 cut-off normalized intensity를 갖는 조명 조건 사이에 차이가 있었다.

참고로, 환형 조명을 사용할 경우, 본 연구에 적용된 패턴 크기에서는, 일반적인 리소그래피 시뮬레이션에서 전통적으로 기준을 삼는 최소 cut-off normalized intensity 값인 0.3보다 작은 값을 보여 패턴 구현에 어려움이 예상됨을 알 수 있었다.

그러나, 특정 목적에 따라 환형 조명을 사용하는 광학 시스템을 이용할 경우, 원형 패턴에 OPC를 적용하여 보조 패턴 등을 삽입하거나 제거하게 되면 최적의 조명 조건이 바뀌게 되므로 최적의 패턴 형태를 구현하려면, 마스크 자체의 OPC 뿐만 아니라, 조명 조건에 대한 최적화가 필요함을 알 수 있다.

이와는 대조적으로, 사구 조명의 경우에는 마스크 상의 보조 패턴 유무에 관계없이 각 사구(quadrupole)의 위치가 x축과 60°를 이루고, σ_c / σ_p 가 0.8/1.0인 조명 조건에서 DOF가 급격히 향상되었다. 그리고, 가장 큰 DOF를 갖는 조명 조건과 가장 높은 cut-off normalized intensity를 갖는 조명 조건이 대체로 일치하였다. 또한, 계산된 normalized intensity 분포의

형태가 0.3보다 크거나 그 근처에 존재함으로 해서, 분해능 향상과 그에 따른 contrast 증가 또한 확연하게 나타날 것으로 예상할 수 있다.

특히, 사구 조명의 경우에는 주된 패턴 방향과 수직에 가까운 형태로 사구(quadrupole)를 위치시키고, 각 사구의 반지름과 위치를 적절히 조절하게 되면 급격한 DOF 향상과 더불어 cut-off intensity도 커져 분해능과 관련하여 CD line 구현이 보다 수월해 질 수 있음을 밝혔다.

따라서, 여러 방향의 패턴이 함께 존재하는 실제 마스크에서, 보다 주된 방향의 패턴 형태가 존재하게 된다면 본 연구에서 제시한 것과 같이, 사구 조명의 위치를 변형시킴으로써 최적의 공정 조건을 찾을 수 있을 것이다.

또한, 이와 비슷하게 다원편광 조명을 포함하여 백터 회절 효과를 고려하였을 때, 서로 다른 방향으로 존재하는 패턴에 대하여 DOF를 향상시킬 수 있다는 기존의 연구^[11] 등과 연관시키면 보다 좋은 실제 공정 조건들을 찾을 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 '97년도 교육부 반도체분야 학술연구조성비(ISRC 97-E-1413)에 의하여 연구되었습니다. 본 연구의 결과 data를 분석하는데 도움을 준 서울대 물리교육과 광학실험실의 이재봉 군에게 감사를 드립니다.

참고문헌

- [1] K. Tounai, H. Tanabe, H. Nozue, and K. Kasama, Proc. SPIE **1674**, 753 (1992).
- [2] S. Asai, I. Hanyu, and K. Hikosaka, J. Vac. Sci. Technol. B **10**(6), 3023 (1992).
- [3] T. Horiuchi, Y. Takeuchi, E. Tamechika, Y. Mimura, S. Matsuo and K. Harada, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 2779 (1994).
- [4] Tohru Ogawa, Masaya Uematsu, Koichi Takeuchi and Tatsuji Oda, J. Vac. Sci. Technol. B **15**(5), Sep/Oct, 1825 (1997).
- [5] Xiaolan Chen and S. R. J. Brueck, J. Vac. Sci. Technol. B **17**(3), 921 May/June (1999).
- [6] C. J. R. Sheppard and Z. Hegedus, J. Opt. Soc. Am. A **15**(3), 622 (1998).
- [7] B. W. Smith, L. Zavyalova, J. S. Petersen, Proc. SPIE **3334**, 384 (1998).
- [8] Burn J. Lin, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 6756 (1994).
- [9] K. Ronse, M. Op de Beeck, etc., J. Vac. Sci. Technol. B **12**(2), Mar/Apr, 589 (1994).
- [10] Y. C. Pati, A. A. Ghazanfarian, and R. F. Pease, IEEE, Trans. on Semi. Manuf. **10**(1), Feb., **62**, (1997).
- [11] 박정보, 김기호, 이성복, 한국광학회지, **9**(3), 146 (1998).

**The study on the effects of off-axis illumination for
enhancing the pattern resolution and depth of focus**

Jungbo Park and Sungmuk Lee

Department of Physics Education, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received August 25, 1999, Revised manuscript received December 3, 1999)

In this paper, we have studied on the effects of annular and quadrupole illuminations by changing their conditions for enhancing the pattern resolution and depth of focus (DOF) in the optical lithography system using KrF Eximer laser (0.248 μm) and 0.65 NA. As a result, it is revealed that each illumination condition to optimize the resolution and the DOF for the mask containing the assistance pattern is different under the annular illumination. And in case of quadrupole illumination, we could ascertain that the resolution and the DOF would be enhanced through changing the arrangement of each pole from the conventional X type (45 degrees) to some proper type according to the main pattern direction.