

타원편광 조명에 의한 초점심도 향상에 관한 연구

박정보 · 김기호 · 이성득
 서울대학교 물리교육과

(1998년 1월 21일 받음, 1998년 5월 4일 수정본받음)

광학적 분해능의 한계에 도달한 크기를 갖는 패턴의 분해능과 초점심도를 향상시키기 위해서 여러 가지 결상 방법들이 시도되고 있다. 일반적으로 선형 편광에서는 패턴 방향에 따라 TM mode 와 TE mode 사이에 contrast gap이 존재한다. 하지만, 기존의 연구에서 이러한 contrast gap을 해결해 줄 수 있는 방법으로 타원편광 조명법이 제안되었다. 본 연구에서는 서로 방향이 수직인 패턴이 함께 있는 임의의 마스크에 타원편광을 포함한 여러 편광 조건을 적용해 봄으로써, 초점심도를 향상시킬 수 있는 최적의 편광 조명 상태를 찾아보았다. 각 편광 조건에 따른 초점심도는, 허용 가능한 노광량(Exposure Dose)과 Critical Dimension(CD)의 오차 범위에 대한 ED- Tree(Exposure-Defocus Tree)를 통해 구하였다. 그 결과, 광학계의 조건에 따라 타원편광 조명이 초점심도를 향상시키는 효과가 있음을 알 수 있었다.

I. 서 론

대용량의 DRAM에 사용되는 패턴의 크기가 점점 작아지면서 이미 광학적인 분해능의 한계에 거의 도달해 있다. 따라서 이미 광학적 한계에 도달한 광원을 사용하면서 패턴의 분해능을 향상시키기 위해서는 시스템 자체의 NA가 커질 수밖에 없다. 그런데, 광학계의 NA가 커질수록, 광학계의 렌즈를 통과하는 빛의 벡터적 회절 효과도 커지게 되므로, 기존의 스칼라 계산 방법^[1,2]에 의한 시뮬레이션 결과로는 정확한 결상 계산을 유도할 수 없게 되었다. 이에 따라 이미 기존의 많은 연구를 통해 벡터 회절효과^[3-7]에 의한 선형 편광의 여러 효과들이 제시되었으며, 패턴의 방향과 수평한 TE-mode 편광이 패턴의 방향과 수직인 TM-mode 편광보다 더 좋은 Contrast를 보이는 것이 알려져 있다. 그러나, 이러한 선형 편광의 경우에 있어서는 패턴의 방향에 따라, Contrast가 차이나는 Contrast gap이 존재하게 되며, 특히, 선폭과 광학계의 부분간섭성(Partial Coherence factor : σ)이 작을수록, 광학계의 NA가 클수록 또한 위상변이 마스크나 사입사 조명과 같은 방법을 함께 사용할 경우 이 Contrast gap이 더욱 커지게 되는 결점이 발생한다.

위와 같은 선형편광이 가지는 Contrast gap을 줄일 수 있도록 하는 새로운 조명 방법으로 기존의 연구에서 타원편광 조명법(Elliptical Polarization Illumination; EPI)이 Line & Space 패턴에 대한 여러 시뮬레이션 결과들을 통해 제안되었다.^[8]

본 연구에서는 방향이 엇갈려 있는 패턴 각 방향의 Critical Dimension Line에 대하여 허용될 수 있는 노광량과 CD에 대한 오차범위에서 구현 가능한 초점심도를 타원편광을 포함한 여러 편광 조건에 대하여 구해 보았다.

II. 타원편광 조명법의 이론적 배경^[8]

물체면에 방향 단위 벡터(directional unit vector)인 (t_x, t_y) 방향으로 입사한 빛이 마스크를 통과하면서 (r_x, r_y) 방향으로 회절된 후, 투사 렌즈계를 통과하여 출사동에서 (s_x, s_y) 방향으로 가우시안 상점(gaussian image point)을 향해 진행하여 (x, y) 의 좌표계를 갖는 상면에 결상되는 모양은 아래 [그림 1]과 같다.

이때, 벡터효과를 고려한 경우의 상면에서 빛의 intensity 분포는 다음과 같다.

$$I(x, y) = \sum_{k=x, y, z} \iiint TCC_k(f', g', f'', g'') \times F(f', g') F^*(f'', g'') \times e^{i \frac{2\pi}{\lambda} \{(f'-f'')x + (g'-g'')y\}} df' dg' df'' dg'' \quad (1)$$

여기서 $(f' - g')$, $(f'' - g'')$ 는 NA/λ 로 규격화된 공간 주파수이며, $F(f', g')$ 는 마스크 투과 함수의 푸리에 변환을 나타내며, F^* 는 F 의 공액 복소수(conjugate)이다. 또한 $TCC_k(f', g', f'', g'')$ 는 벡터 TCC(vector transmission cross coefficient)의 k번째 성분을 나타내며 아래 식(2)와 같이 주어진다.

$$TCC_k(f', g', f'', g'') = \iint \Pi(f, g) K_k(f+f'', g+g'') \times K_k^*(f+f'', g+g'') df dg \quad (2)$$

이 식을 일반적인 부분 간섭 조명에 의한 결상 계산에 쓰이는 스칼라 TCC과 비교하면 계산 방법을 거의 동일하게 수행할

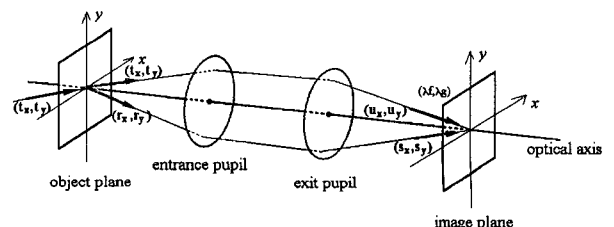


그림 1. 회절 광선의 방향 성분 정의.

*본 연구는 '96년도 교육부 반도체분야 학술연구조성비(ISRC 96-E-1522)에 의하여 연구되었음

수 있음을 알 수 있다

위 식(2)에서, $\Gamma(f, g)$ 는 입사동에 생기는 조명계의 유효 광원을 나타내는 값으로서 원형 조명일 경우 다음과 같은 값을 갖는다.

$$\Gamma(f, g) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sigma^2} & f^2 + g^2 < \sigma^2 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

또한 $\vec{K}(f, g)$ 는 벡터 회절 이론에서 새로이 정의되는 벡터 전달 함수(vector transfer function)이며 다음과 같이 정의된다.

$$K_k(f, g) = \begin{cases} C \Psi_k(f, g) e^{i\frac{2\pi}{\lambda} \Phi(f, g)} & f^2 + g^2 \leq 1 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

여기서 C는 물체면과 상면 사이에 광 에너지가 보존되기 위한 값으로서 아래 식(5)과 같이 계산되며, $\Phi(x, y)$ 는 투사 렌즈계의 탈초점(defocus)을 포함한 파면 수차 함수이다.

$$C = \{1 - \lambda^2(1 + M^2)(f^2 + g^2) + \lambda^4(f^2 + g^2)^2\}^{-\frac{1}{2}} \quad (5)$$

또한, 식(4)에서 편광 분포 함수(polarization distribution function)를 나타내는 $\Psi_k(f, g)$ 는 [그림 2]와 같이 입사광의 편광 성분이 광학계를 통과하여 출사동에서 $(\lambda f, \lambda g)$ 방향으로 향하는 회절광의 \mathbf{k} ($\mathbf{k} = x, y, z$) 방향 성분에 기여하는 양을 나타내는 값으로 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 이때, 선형편광, 원 편광, 타원편광의 3 가지 편광 상태는 입사동에 입사하는 편광의 x, y 방향 성분에 의해 결정되므로 x, y 성분의 크기비(amplitude ratio)와 위상차(phase difference)에 의해 모든 편광 상태를 표현할 수 있다.(식 (8) 참조)

$$\begin{aligned} \Psi_x(f, g) &= \frac{-gS_{com} + fP_{com}\sqrt{1-\lambda^2(f^2+g^2)}}{\sqrt{f^2+g^2}} \\ \Psi_y(f, g) &= \frac{fS_{com} + gP_{com}\sqrt{1-\lambda^2(f^2+g^2)}}{\sqrt{f^2+g^2}} \\ \Psi_z(f, g) &= \lambda P_{com}\sqrt{f^2+g^2} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)의 편광 분포 함수에서 광학계의 좌표계와 광선 진행 경로를 [그림 2]와 같이 정의하고 광축과 상점(image point)을 향하는 광선이 이루는 자오 평면(meridional plane)을 정의하면, 자오 평면과 수직인 성분을 나타내는 'S_{com}'과 평행한 성분을 나타내는 'P_{com}'은 마스크에 입사하는 x, y 성분의 편광식인 식(8)로 나타내면 아래의 식(7)과 같이 표현된다.

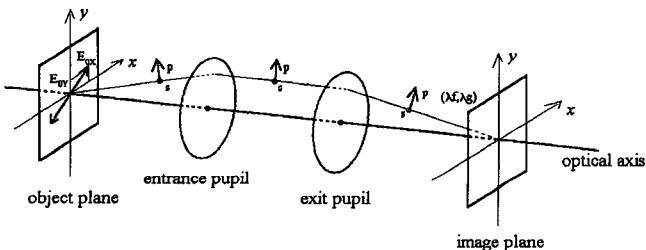


그림 2. 편광 분포 함수 성분.

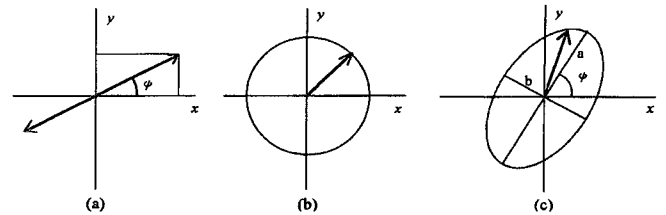


그림 3. (a) 선형편광 (b) 원형편광 (c) 타원편광
 Ψ : 편광각, χ : 타원비(the ratio of ellipticity), $\tan\chi = b/a$

$$S_{com} = \frac{fE_{oy}e^{i\delta} - gE_{ox}}{\sqrt{f^2+g^2}} \quad (7)$$

$$P_{com} = \frac{fE_{ox} - gE_{oy}e^{i\delta}}{\sqrt{f^2+g^2}}$$

$$E_x(z, t) = E_{ox} e^{i(\tau + \delta)} \quad (8)$$

$$E_y(z, t) = E_{oy} e^{i(\tau + \delta)}$$

여기서, $\tau = \omega t - kz$ 이다.

만약 식(8)에서 주어진 각 방향의 위상차를 $\delta = \delta_x - \delta_y$ 로 나타내면 선형편광, 원형편광, 타원편광의 3가지 편광 상태([그림 3])는 아래와 같은 경우가 된다.

1) 선형편광(linear polarization) : $E_{ox} = E_{oy}$, $\delta = 0$

2) 원형편광(circular polarization) : $E_{ox} = E_{oy}$, $\delta = \frac{\pi}{2}$

3) 타원편광(elliptical polarization) : 타원비(the ratio of ellipticity)를 χ 라고 하고($\tan\chi = b/a$), 편광각(angle of polarization)이 ϕ 로 주어지면 편광 성분비($\tan\alpha = E_{ox}/E_{oy}$)와 위상차 δ 는 아래 식(9)으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tan 2\phi &= \frac{2E_{ox}E_{oy}}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2} \cos \delta \\ \Rightarrow \tan 2\phi &= (\tan 2\alpha) \cos \delta, \quad 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \sin 2\chi &= \frac{2E_{ox}E_{oy}}{E_{ox}^2 - E_{oy}^2} \sin \delta \\ \Rightarrow \sin 2\chi &= (\sin 2\alpha) \sin \delta, \quad -\frac{\pi}{4} \leq \chi \leq \frac{\pi}{4} \end{aligned}$$

III. 타원편광 조명법의 결상식에 대한 수치해석⁸⁾

스칼라 회절 이론에 의한 계산에서와 마찬가지로 마스크의 투과 함수 $F(x, y)$ 는 x, y 방향으로 각각 주기가 T_x, T_y 인 주기 함수로 정의한다. 따라서 주기 함수인 마스크 패턴의 푸리에 배열은 아래 식(10)과 같다.

$$F(x, y) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} C_{pq} e^{i2\pi px/T_x} e^{i2\pi qy/T_y} \quad (10)$$

여기서 C_{pq} 는 푸리에 계수로 아래와 같이 계산된다.

$$C_{pq} = \frac{1}{T_x T_y} \int_0^{T_x} \int_0^{T_y} F(x, y) e^{-i2\pi px/T_x} e^{-i2\pi qy/T_y} dx dy \quad (11)$$

식(1)의 마스크 투과 함수 $F(x, y)$ 를 2차원 푸리에 변환식은 다음과 같다.

$$F(f, g) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} C_{pq} \delta\left(f + \frac{p}{T_x}\right) \delta\left(g + \frac{q}{T_y}\right) \quad (12)$$

여기서 δ 는 델타 함수(delta function)를 나타낸다. 식(1)의 $F(f, g)$, $F^*(f, g)$ 를 식(12)의 표현으로 대치하면, 공간상의 광도 분포는 다음과 같다.

$$I(x, y) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} d(m, n) e^{\frac{i2\pi mx}{T_x}} e^{\frac{i2\pi ny}{T_y}} \quad (13)$$

여기서, 상면에서의 광도 스펙트럼에 해당하는 $d(m, n)$ 은 아래의 식(14)와 같이 표현된다.

$$d(m, n) = \sum_{p=-\infty}^{\infty} \sum_{q=-\infty}^{\infty} C_{pq} C^*_{p-m, q-n} \times \sum_{k=x, y, z} TCC_k\left(-\frac{p}{T_x}, -\frac{q}{T_y}, -\frac{p-m}{T_x}, -\frac{q-n}{T_y}\right) \quad (14)$$

따라서 마스크의 투과 함수가 주어지면 식(11)에 의해 푸리에 계수를 구할 수 있으며, 식(14)의 벡터 TCC 적분 계산은 x, y, z 방향에 대해 각각 2차원 수치 적분을 하면 구할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 조건 및 결과

시뮬레이션에 적용된 마스크의 형태와 측정하고자 하는 Critical Dimension(CD) Line은 [그림 4]와 같고, 본 연구에 적용된 시뮬레이션 조건들은 [표 1]에 주어져 있다.

초점심도(Depth of Focus; DOF) 향상에 대한 측정을 위해 본 연구에서는 ED-Tree^[9]를 이용하였다. ED-Tree에 적용된 허용 노광량(Exposure Dose) Error와 CD(Critical Dimension) Error는 모두 10%이다.

시뮬레이션 조건 I 과 II에 따른 초점심도의 결과는 아래

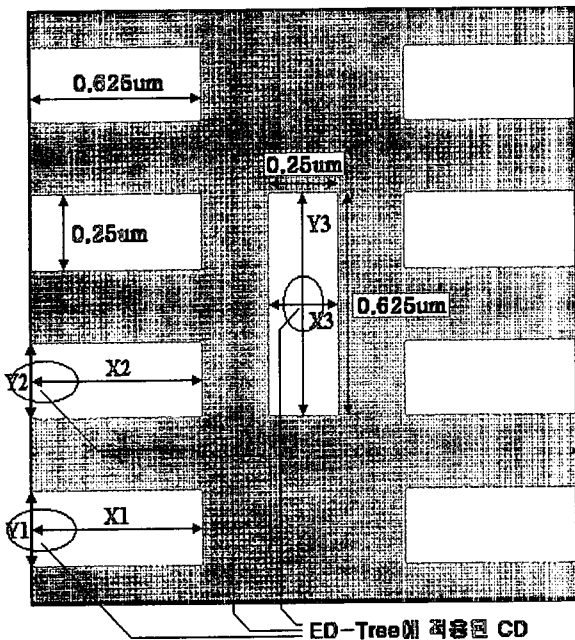


그림 4. 마스크 모양과 CD Line.

표 1. 시뮬레이션 조건

Simulation Condition I	Simulation Condition II
Conv. illum.	Conv. illum.
$\lambda=248$ nm	$\lambda=248$ nm
$\sigma=0.3$	$\sigma=0.4$
NA=0.65	NA=0.60
M(배율)= $\times 5$	M(배율)= $\times 5$
Pattern L/S=0.25 μ m	Pattern L/S=0.25 μ m

[표 2]에 정리되어 있다.

조명의 여러 편광 상태 중에서 초점심도가 가장 큰 것은 시뮬레이션 조건 I 일 때에는 0° 의 편광각(Ψ)과 0.75의 타원비(χ)를 갖는 타원편광(EPI)이었고, 시뮬레이션 조건 II에서는 선형편광으로 TE-mode일 때였다. 각각의 시뮬레이션 조건들 중에서 가장 좋은 초점심도를 보이는 조명 조건에서의 ED-

표 2. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 조건 I				시뮬레이션 조건 II							
Polar. Type	Type	Ψ	χ	DOF (μ m)	Polar. Type	Type	Ψ	χ	DOF (μ m)		
Scalar				0.598	Scalar				0.487		
Linear	TE			0.594	Linear	TE			0.509		
	TM			0.575		TM				0.451	
Circ.			0.25	0.594	Circ.			0.25	0.504		
			0°	0.50		0.595			0°	0.50	0.497
			0.75	0.596				0.75	0.489		
Elliptic			0.25	0.579	Elliptic			0.25	0.455		
			90°	0.50		0.581			90°	0.50	0.464
			0.75	0.588				0.75	0.469		

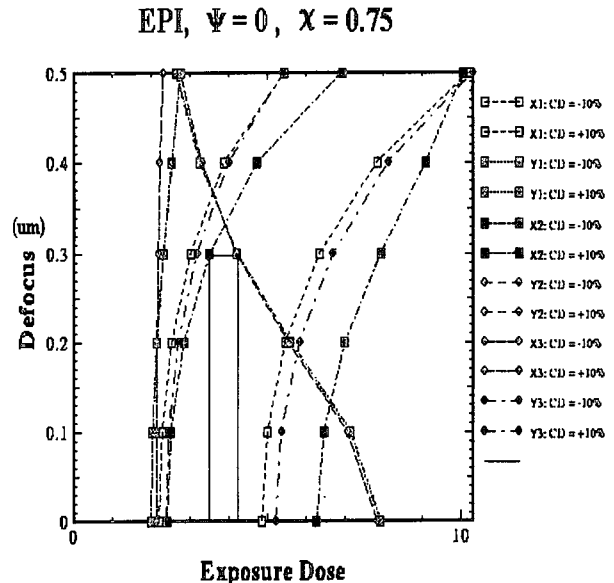


그림 5. Best DOF : EPI, $\Psi=0$, $\chi=0.75$ in condition I DOF=0.298 μ m ($\times 2$)

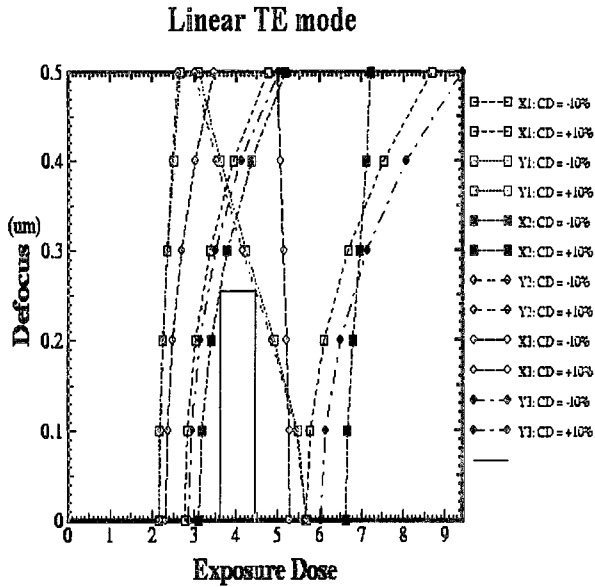


그림 6. Best DOF : Linear TE mode in condition II DOF=0.254 μm (×2).

Tree는 [그림 5]와 [그림 6]으로 제시하였다. 렌즈의 수차를 고려하지 않은 결상의 결과는 -방향과 +방향의 탈초점에 대하여 대칭이므로 제시된 그림의 ED-Tree에서는 +방향의 탈초점에 대해서만 적용한 것이다.

시뮬레이션의 결과로부터 특정한 광학계의 조건에서는 기존에 알려진 선형편광보다는 타원편광의 방법이 초점심도를 향상시키는데 더욱 적합하다는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 조건 1에서 가장 좋은 조명 조건의 경우인 0°의 편광각(Ψ)과 0.75의 타원비(χ)를 갖는 타원편광(EPI)에 대한 초점면과 탈초점 +0.3 μm에서의 Areal Image를 [그림 7]과 [그림 8]로 각각 나타내었다. ED-Tree를 통해 제시된 것과 같이 탈초점 +0.3 μm 정도까지는 CD Line에서 상이 건디어 남을 알 수 있다.

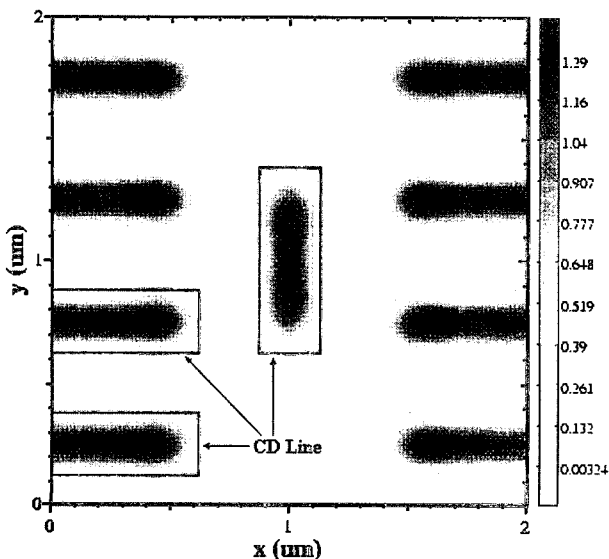


그림 7. 초점면에서의 광도 분포.

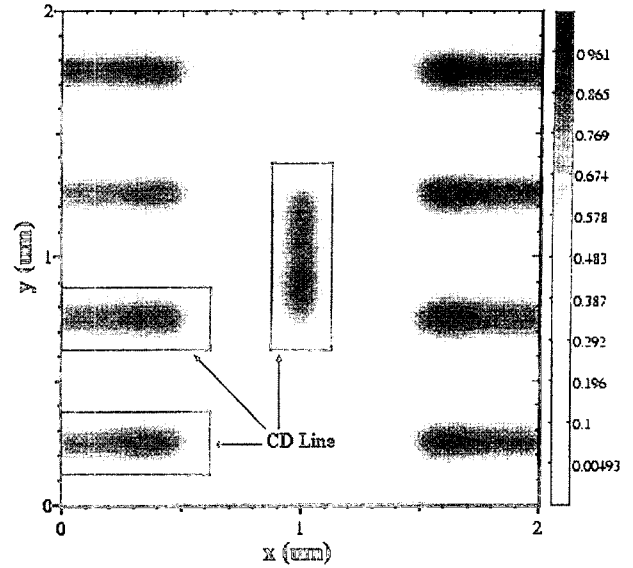


그림 8. 탈초점 0.3 μm에서의 광도 분포.

참고로, 백터회절을 고려한 편광되지 않은 빛의 경우와 유사한 결과를 보이는 원형편광에 의한 결과와 스칼라 계산에 의한 결과를 비교해 볼 때([표 2]에서 밑줄친 결과), High NA의 시스템에서는 스칼라회절에 의한 계산과 백터회절에 의한 계산이 차이를 보이며, 보다 정확한 시뮬레이션 결과를 얻기 위해서는 백터회절을 이용한 계산을 수행해야 함을 알 수 있다.

V. 요약 및 결론

광학계의 조건에 따라 초점심도를 향상시킬 수 있는 최적의 조명 조건을 여러 가지 편광 상태에 대하여 ED-Tree를 통해 구해 보았다. 일반적으로 선형편광의 경우에는 마스크 상의 패턴 방향에 따라서 contrast gap이 존재하는데, 초점심도에 대해서도 패턴 방향에 대하여 차이가 남을 알 수 있었다. 또한 이러한 contrast gap을 극복할 수 있는 방법으로 제안된 타원편광 조명법이 특정한 광학계 시스템에 따라서는 가장 좋은 초점심도를 보이는 사실을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 본 연구의 결과로부터 여러 가지 방향의 복잡한 패턴들이 존재하는 실제의 마스크 상에서 초점심도를 향상시키는데 있어서 타원편광 조명법이 효과적이라는 사실을 알 수 있다.

이와 더불어, 광학계의 NA가 커질수록 스칼라회절에 의한 결상 계산의 결과와 백터회절에 의한 경우가 차이가 남을 확인할 수 있었다.

참고문헌

- [1] E. C. Kintner, Applied Optics 17(17), 2747 (1978).
- [2] S. Subramanian, Applied Optics, 20(10), 1854 (1981).
- [3] M. S. Yeung, Proc. SPIE 922, 149 (1988).
- [4] C. M. Yuan, IEEE Trans. on ED., 40(9), 1604 (1993).

- [5] B. W. Smith, D. G. Flagello, etc. Proc. SPIE **1927**, 847 (1993).
[6] M. S. Yeung, D. Lee, R. Lee and A. R. Neureuther, Proc. SPIE **1927**, 452 (1993).
[7] Y. Unno, Proc. SPIE **1927**, 879 (1993).
[8] Seong-Ho Jeon, Bae-Doo Cho, Kyeong-Woon Lee, and Sung-Muk Lee. J. Vac. Sci. Technol. B. **14**(6), 4193 Nov/Dec (1996).
[9] Burn J. Lin, Jpn. J. Appl. Phys. **33**, 6756 (1994).

The research for the enhancement of depth of focus by elliptical polarization illumination(EPI)

Jungbo Park, Kiho Kim and Sungmuk Lee
Department of Physics Education, Seoul National University

(Received January 21, 1998, Revised manuscript received May 4, 1998)

To enhance the resolution and the depth of focus of the patterns whose size reaches the optical resolution limits, the various imaging methods are being tried. Generally in the linear polarization illumination methods, the contrast gap exists between TE mode and TM mode according to the pattern direction. However, through the previous research, the elliptical polarization illumination(EPI) method was proposed to overcome this contrast gap. In this research, we investigated the optimal polarization condition to be able to enhance the depth of focus(DOF) for the optional mask which is containing the opposite direction patterns by applying the various polarization conditions including EPI. The DOF according to each polarization condition was obtained by ED-Tree(Exposure-Defocus Tree) for the given exposure dose and CD error boundaries. As the result, we can ascertain the effect of EPI for the enhancement of DOF in some condition of optical system.