

Amplitude Filter와 Phase Filter가 결합된 광학계의 결상특성*

박성종 · 이종진 · 정창섭

전남대학교 자연과학대학 물리학과

(1993년 3월 8일 받음)

Amplitude filter와 phase filter가 결합된 CFAP(Combined Filter of Amplitude and Phase)의 결상 특성을 조사하기 위해 Bessel beam을 도입하였다. 이 논문에서는 무수차계와 수차를 포함하는 광학계에 대한 PSF와 encircled energy(E), transmission ratio(TR), gain(G)을 Bessel beam의 node수에 따라 계산하였다. 이 결과 Bessel beam은 amplitude filter와 다른 PSF 특성을 보였으며, 또한 구면수차가 포함된 경우 compensating effect가 크게 나타났다. 특히 Bessel beam의 central spot의 size가 Airy disk 반경보다 적게 나타나므로, 고집적 반도체 소자 제작에 이용가능하리라 생각된다.

I. 서 론

Amplitude filter를 이용한 불균일한 진폭이 광학계에 미치는 영향에 대해서 일찌기 Hokins^[1]를 비롯한 많은 사람들에 의해서 연구되어 왔다. 이러한 amplitude filter를 이용한 연구는 O'Neiel^[2] 등에 의해서 연구된 annular aperture 유형과 Mino와 Okano^[3] 등에 의해서 연구된 shaded aperture 유형으로 크게 나눌 수 있으며, 본 연구실에 의하여 Gaussian 진폭 변화와 같은 shaded aperture와 annular aperture가 central obstruction을 갖는 광학계의 결상특성을 연구 보고한 바 있다.^[4,5,6]

이러한 amplitude filter를 이용한 광학계는 광학계 자체의 흡수 또는 반사에 의해 transmission ratio(TR)가 떨어짐에 따라, 광학계 자체의 energy 손실이 거의 없는 phase filter를 이용하여 광학계의 결상능력을 향상 시키고자 하는 연구가 Honor^[7]를 비롯한 많은 사람들이 1980년대 중반부터 활발히 연구 중에 있으며, 역시 본 연구진에 의해서 phase filter를 이용한 광학계의 결상 능력 향상에 관한 연구가 이루어지고 있다.^[8]

본 연구에서는 최근의 반도체 소자가 고집적화됨에 따라 한계분해능 이상의 superresolution을 갖는 광학계가 요구됨에 따라, 지금까지의 amplitude filter 또는 phase filter만을 이용한 광학계의 결상능력 향상에서, 두

개의 filter가 결합된 CFAP(Combined Filter of Amplitude and Phase)를 고려하여, CFAP가 광학계에 미치는 영향에 대하여 조사하고자 한다.

II. 이 론

1. PSF(Point Spread Function)

광학계에 의해서 형성된 물공간(object)의 point source의 회절상을 광학계의 Point Spread Function(PSF)이라 하며, 상면 위의 임의의 점에서 complex amplitude는

$$F(\xi', \eta') = \frac{1}{F_0} \iint_A f(x', y') \exp\{2\pi i \left(\frac{x' \xi' - y' \eta'}{\lambda R'} \right)\} dx' dy' \quad (1)$$

와 같이 동함수 $f(x', y')$ 의 Fourier 변환으로 주어지고, (x', y') 과 (ξ', η') 은 각각 동과 상면에서의 좌표이다. 본 논문에서는 상 평가 뿐만아니라 몇 가지 다른 광학계산도 비교적 용이하게 만드는 Hopkins canonical 좌표계^[4]와 극좌표를 사용하였으며, 초평면과 축상의 PSF는 각각

$$F(\rho', \phi') = \frac{1}{F_0} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(r, \phi) [\exp\{2\pi i \rho' r \cos(\phi - \phi')\}] r dr d\phi \quad (2)$$

*본 연구의 일부는 1993년도 전남대학교 학술 연구비에 의해서 수행되었음.

$$F(\phi', W_{20}) = \frac{1}{F_0} \int_0^1 \int_0^{2\pi} f(r, \phi) \{ \exp(2\pi i p' r \cos \phi) \} r dr d\phi \quad (3)$$

과 같이 표현된다. 여기서 (r, ϕ) 와 (ϕ', ϕ') 는 각각 출사 동과 상면에서의 극좌표를 나타내며 동함수는 아래와 같다.

$$f(r, \phi) = T(r, \phi) \exp[i2\pi W(r, \phi)] \quad (4)$$

2. Encircled Energy

실험실에서 측정되는 실질적인 양은 intensity(I)이며, 이것은 식 (2)의 제곱꼴로 다음과 같이 표현된다.

$$I(\phi', \phi') = |F(\phi', \phi')|^2 \quad (5)$$

상면에서의 encircled energy는 식 (5)을 상공간 적분함으로써

$$E(\phi', \phi') = \frac{1}{E_0} \int_0^{\phi'} \int_0^{2\pi} I(\phi', \phi') p' dp' d\phi' \quad (6)$$

과 같이 표현되며, E_0 는 상면에서의 total energy를 나타내며, 이것은 encircled energy의 규격화 상수로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} |F(\phi', \phi')|^2 p' dp' d\phi' \quad (7)$$

여기서 식 (7)은 Parseval's theorem^[9]에 의하여

$$E_0 = \int_0^{2\pi} \int_0^1 |f(r, \phi)|^2 r dr d\phi \quad (8)$$

으로 표현된다.

3 광학적 인자

광학계 자체의 흡수 또는 반사에 의한 energy를 표현하는 transmission ratio(TR)^[9]는 다음과 같이 정의된다.

$$TR = \frac{\text{상면에서의 에너지}}{\text{입사 빔의 에너지}}$$

$$TR = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^1 |f(r, \phi)|^2 r dr d\phi}{\int_0^{2\pi} \int_0^1 |f_c(r, \phi)|^2 r dr d\phi} \quad (9)$$

여기서 $f_c(r, \phi)$ 는 clear aperture의 동함수이며 식 (9)을 계산하면

$$= 2 \int_0^1 |T(r)|^2 r dr \quad (10)$$

같이 표현된다.

한계분해능 이상의 superresolution을 표현하는 gain $(G)^{[9]}$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$G = \frac{R_c}{R_0} \quad (11)$$

여기서 R_0 는 central spot의 size이며, R_c 는 Airy disk 반경이다.

III. 동의 형태

본 연구에서는 CFAP을 고려하기 위하여 최근에 diffraction free beam^[10]으로 관심이 되고 있는 Bessel beam $[J_0(ar)]$ 을 택하였다. CFAP의 동(瞳)의 형태는 이러한 Bessel beam의 node수에 따라 다음과 같으며

$$\begin{aligned} T_1(r, \phi) &= J_0(\alpha_1 r) & \alpha_1 &= 5.520 \\ T_2(r, \phi) &= J_0(\alpha_2 r) & \alpha_2 &= 8.650 \\ T_3(r, \phi) &= J_0(\alpha_3 r) & \alpha_3 &= 11.790 \\ T_c(r, \phi) &= J_0(\alpha_c r) & \alpha_c &= 0 \end{aligned} \quad (12)$$

이러한 동의 형태는 그림 1과 같이 주어진다.

IV. 결과 및 수치분석

1. 정확도 검토

본 연구에서는 식 (2)을 계산하기 위해 FORTRAN을 이용한 가우스구적법으로 컴퓨터 프로그램을 작성하여 하였다. 이 프로그램의 정확도를 검증 하기 위해 $T(r, \phi) = J_0(ar)$ 과 $W(r, \phi) = 0$ 인 경우를 식 (4)에 대입하여 풀면 보면

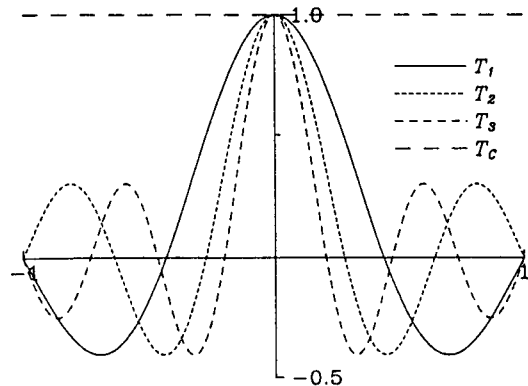


그림 1. The type of pupil for clear aperture(T_c) and Bessel beams(T_1, T_2, T_3).

$$F(\psi', \phi') = \left[\frac{\{aJ_0(2\pi ip')J_1(a) - 2\pi ip'J_1(2\pi ip')J_0(a)\}}{\{a^2 - (2\pi ip')^2\}} \right] / F_0 \quad (13)$$

과 같이 표현되며, 식 (13)을 $T_1(r, \phi)$, $T_2(r, \phi)$, $T_3(r, \phi)$ 각 경우에 적용하여 계산한 값과 컴퓨터 프로그램에 의해서 계산된 값은 소수점 네째자리까지 일치하는 좋은 정확도를 얻을 수 있었다.

2. 상면 PSF 및 encircled energy

그림 2는 무수차계의 상면 PSF값으로 Bessel beam의 node 수가 증가함에 따라 side lobe들이 apodisation 되어감을 나타내고 있으며, 이들의 central spot의 size가 T_c 에서 central spot의 size로 표현되는 Airy disk 반경보다 훨씬 적음을 보이고 있다. 또한 Bessel beam의 node수가 증가할지라도 central spot의 size가 동일한 값을 가짐을 알 수 있고, 식 (11)에 의해서 계산된 G 의 값이 Bessel beam의 node수에 관계없이 1.605임을 알 수 있어 gain이 1보다 크게 나타나는 superresolution 현상이 Bessel beam에 있음을 알 수 있다. 그러나 그림 3에서는 central spot의 energy가 Bessel beam의 node

수가 증가할수록 떨어짐을 보이며 특히 clear aperture인 경우 보다 훨씬 낮은 energy 값을 가짐을 보여 주고 있다.

3. 축상 PSF

3.1 무수차인 경우

그림 4에서는 amplitude filter가 Gaussian 상점에서 하나의 maximum을 갖는 것과 달리^[5] Bessel beam은 두개의 maximum을 갖음을 알 수 있으며, node 수가 증가함에 따라 두 maximum 사이의 거리가 증가함을 알 수 있다.

3.2 구면수차가 포함된 경우

그림 5와 6은 구면수차가 각각 1λ 와 3λ 포함된 경우 축상 PSF값으로, 무수차계의 축상 maxima보다 오히려 크게 나타나는 compensating effect를 나타내고 있다. Bessel beam의 node 수가 증가함에 따라 축상 maximum의 defocus 정도가 증가하며, 구면수차가 증가할수록 defocus 정도는 커지며, intensity는 떨어짐을 알 수 있다.

3.3 코마가 포함된 경우

그림 7와 8은 코마수차가 각각 1λ 와 3λ 포함된 경우

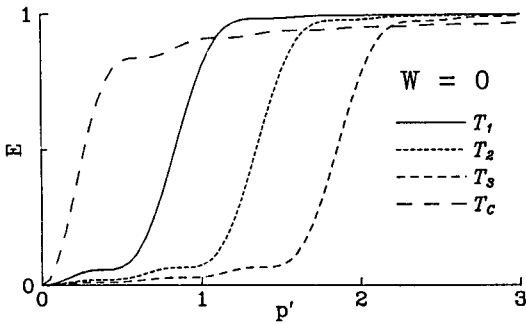


그림 2. PSF of clear aperture(T_c) for Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W=0$ in image plane.

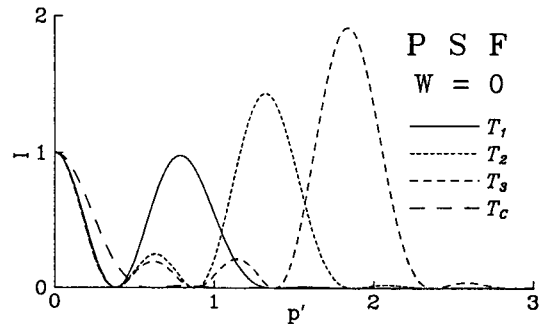


그림 3. Encircled energy of clear aperture(T_c) for Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W=0$ in image plane.

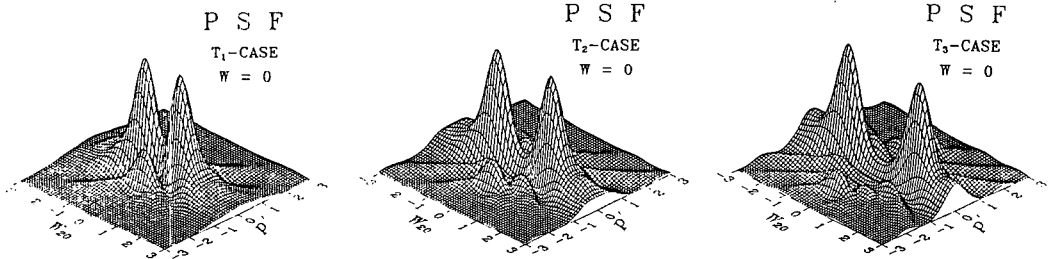


그림 4. The axial intensity distributions of Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W=0$.

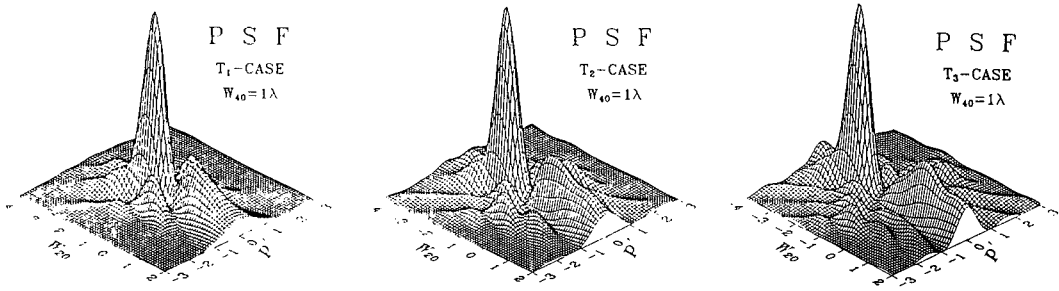


그림 5. The axial intensity distributions of Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W_{40}=1\lambda$.

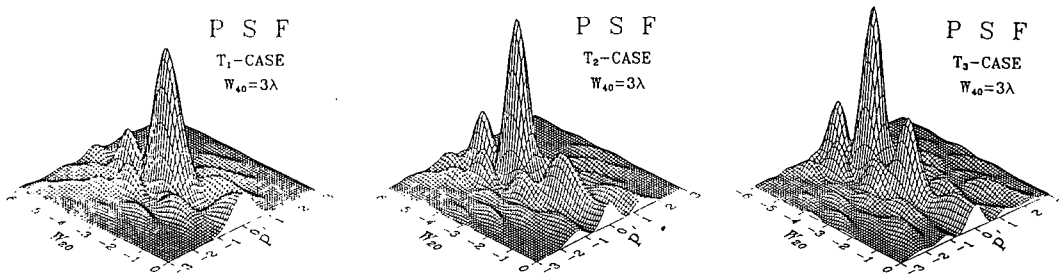


그림 6. The axial intensity distributions of Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W_{40}=3\lambda$.

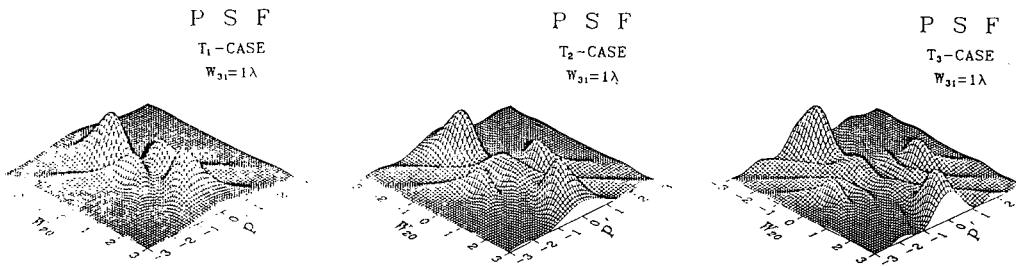


그림 7. The axial intensity distributions of Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W_{31}=1\lambda$ in the tangential case.

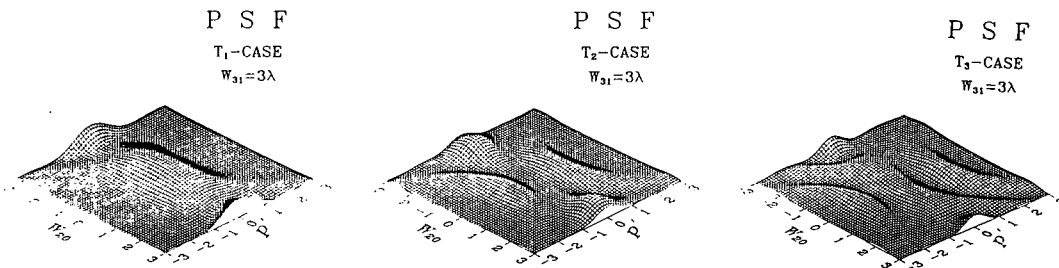


그림 8. The axial intensity distributions of Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W_{31}=3\lambda$ in the tangential case.

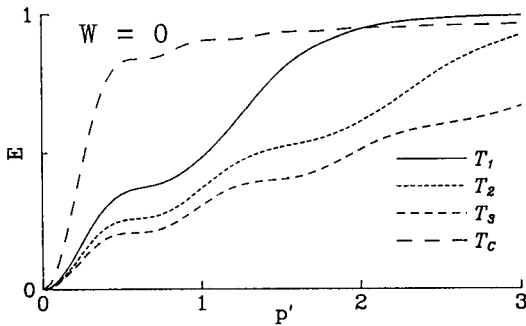


그림 9. Encircled energy of clear aperture(T_c) and Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W=0$ at diffraction focus.

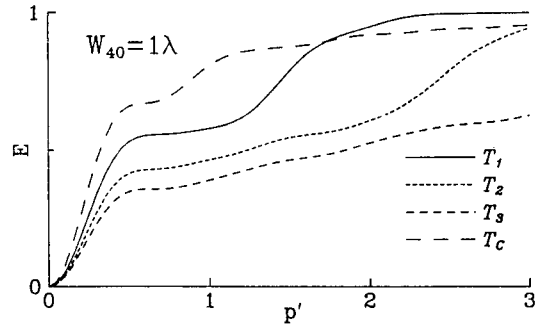


그림 11. Encircled energy of clear aperture(T_c) and Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W_{40}=3\lambda$ at diffraction focus.

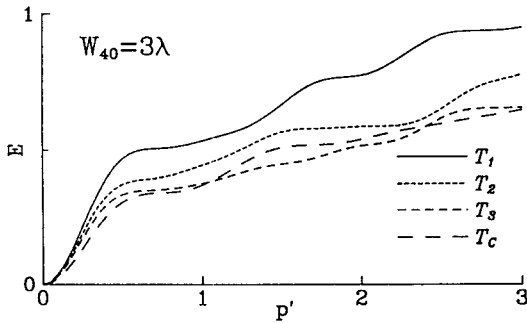


그림 10. Encircled energy of clear aperture(T_c) and Bessel beams(T_1, T_2, T_3) with $W_{40}=1\lambda$ at diffraction focus.

축상 PSF값으로, 무수차계나 구면수차가 포함된 경우보다 훨씬 낮은 intensity값을 나타내고 있으며, 특히 코마수차가 증가할수록 Bessel beam은 많은 영향을 받을 수 있다.

4. Encircled energy

그림 9와 10 그리고 11은 광학계가 각각 무수차, 구면수차가 1λ 그리고 3λ 포함된 경우 diffraction focus에서의 encircled energy를 나타내고 있다. 무수차계일 때는 clear aperture인 경우가 Bessel beam보다 central spot의 energy값이 크게 나타나지만, 구면수차가 3λ 일 때는 오히려 Bessel beam이 clear aperture인 경우보다 central spot의 energy가 크게 나타남을 알 수 있다. 이는 Bessel beam이 수차를 포함한 광학계에서 보다 나은 compensating effect를 갖고 있음을 보여주고 있다.

5. Transmission Ratio(TR)

표 1. The values of transmission ratio(TR).

The Type of Pupil		TR
Clear Aperture	Uniform	1
Gaussian Aperture	$\sigma=0.5$.2544459
Shaded Aperture	T_a (단조감소형)	.3333333
	T_b (단조증가형)	.3333333
CFAP(Bessel beam)	$T_1(\alpha=5.520)$.1157816
	$T_2(\alpha=8.650)$.0737492
	$T_3(\alpha=11.790)$.0540513

광학계 자체의 흡수 또는 반사에 의한 energy를 표현하는 transmission ratio(TR)는 식 (10)에 의해 계산되며, clear, Gaussian, shaded aperture의 TR과 CFAP 각 경우의 TR을 표 1에서 비교하였다. 여기서 shaded aperture는 동적 가장자리로 감에 따라 단조감소하는 T_a 경우와 단조증가하는 T_b 경우를 고려했다. clear aperture인 경우 TR은 1로 광학계에 의한 energy 손실이 거의 없으며, amplitude filter의 일종인 Gaussian aperture와 shaded aperture 경우는 clear aperture인 경우보다 더 적은 값을 가짐을 보여주고 있다. CFAP인 Bessel beam의 경우 clear aperture와 amplitude filter인 경우보다 더 낮은 TR을 갖고 있음을 알 수 있으며, node 수가 증가 할 수록 TR이 감소함을 알 수 있다.

V. 결과 및 논의

본 연구에서는 amplitude filter와 phase filter가 결합된 CFAP가 광학계에 미치는 영향에 대해 조사하기 위해 Bessel beam을 택하여 node 수에 따른 결상특성을 조

사하였다. 이러한 Bessel beam은 amplitude filter와 달리 축상 maximum이 defocus되어 나타났으며, 구면수차가 포함된 경우 무수차계의 축상 maximum값 보다 더 크게 나타나는 compensating effect가 있음을 알 수 있었다. 또한 Bessel beam($T_i, i < 1$)은 무수차계에서 가우스 상점의 central spot의 size가 Airy disk 반경보다 적게 나타나는 superresolution 현상이 있으므로 한계 분해능 이상의 superresolution이 요구되는 반도체 고집적 회로에 이용가능 하리라 생각된다.

참 고 문 헌

[1] H. H. Hopkins, Jap. J. Appl. Phys. **4**, Suppl. 1, (1965).
 [2] E. L. O'Neil, J. Opt. Soc. Am., **4**, (1956).
 [3] M. Mino and Y. Okano, Appl. Opt., **10**, (1971).
 [4] 정창섭, 심상현, 새물리, **28**, 233 (1988).
 [5] C. S. Chung and H. H. Hopkins, J. Mod. Opt., **35**, 1485 (1988).
 [6] C. S. Chung and H. H. Hopkins, Appl. Opt., **28**, 1244 (1989).
 [7] J. L. Horner and P. D. Gianino, Appl. Opt., **23**, 812 (1984).
 [8] 한순희, 정창섭, 임기건, 심상현, 김형정, 이종진, 홍경희, 문일권, 새물리 **32**, 312 (1992).
 [9] R. Voivin and A. Boivin, Opt. Act., **27**, 587 (1980).
 [10] J. Durnin, J. Opt. Soc. Am. A, **4**, 651 (1987).

Image Forming Property of the Optical System with Combined Filter of Amplitude and Phase

S. J. Park, J. J. Lee and C. S. Chung

Department of Physics, Chonnam National University, Kwangju 500-757, Korea

(Received: March 8, 1993)

We chose Bessel beam [$J_0(ar)$] in order to investigate image forming property of the optical system with combined filter of amplitude and phase(CFAP). This paper investigated numerically the influence of number of nodes of these beams on the PSF, encircled energy(E), transmission ratio(TR), gain(G) for an aberrated(/aberration-free) optical system. These results showed that the property of PSF differ considerably from the one of the existing amplitude filter and that Bessel beam has super compensating effect for an optical system with spherical aberration. Particularly, the Bessel beam has less the size of central spot than the radius of Airy disk, this result can therefore be applied to the fabrication of semiconductor device.