

文章编号: 0253-2239(2004)01-1-4

## 三区复振幅光瞳滤波器\*

肖繁荣 袁景和 王桂英 徐至展

(中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 利用光瞳滤波器来改变光在焦斑处的分布,是实现光学超分辨的有效途径。由于受到制作上的影响,现有的光瞳滤波器大都是纯相位型或者纯振幅型的。与纯相位或者纯振幅型光瞳滤波器相比较,复振幅型光瞳滤波器能够实现更好的滤波效果。不过由于制作上的困难,影响了复振幅的光瞳滤波器在实际中的应用。为此给出了一种相对容易实现的复振幅型光瞳滤波器,通过计算表明:在横向具有相同的第一零点比和斯特雷尔比下,该复振幅型光瞳滤波器的旁斑强度比优于纯相位型光瞳滤波器 50%,并且有效地降低了纯相位型光瞳滤波器的轴向加宽。

**关键词:** 信息光学;光瞳滤波器;第一零点比;斯特雷尔比;旁斑强度比;分辨力

中图分类号: O439 文献标识码: A

### Three-Zone Complex Pupil Filter

Xiao Fanrong Yuan Jinghe Wang Guiying Xu Zhizhan

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

(Received 25 December 2002; revised 20 February 2003)

**Abstract:** It is an alternative means of changing the distribution of light beam at the focusing spot and realizing optical superresolution by the pupil filter. For the difficulty of fabrication, the current pupil filters are always phase-only pupil filter or amplitude-only pupil filter. Compared with them, complex pupil filter is more powerful in superresolution. Because of fabrication difficulty, practical application of complex pupil filter is limited. A new way to realize a class of complex pupil filter is proposed. Three-zone complex pupil filter is analyzed by numerical computation. The result shows that  $M$  of this complex pupil filter is decreased 50% than phase-only pupil filter with the same  $G$  and strehl ratio  $S$ , the axial deterioration of phase-only pupil filter is also improved.

**Key words:** information optics; optical pupil filter; ratio of the first zero points; Strehl ratio; ratio of the sidelobe intensity; resolution

## 1 引 言

如何提高光学成像系统的分辨力,一直是人们关心的问题。受光学衍射极限的限制,即便是在非常理想的情况下,普通光学系统的分辨力也只能达到  $0.2 \mu\text{m}$ 。虽然现在已经发展了许多不同的方法<sup>[1~3]</sup>来提高这个极限,但是单就远场成像的情况而言,在成像系统中加入光瞳滤波器来提高系统的分辨力仍是

不错的选择。光瞳滤波器的概念最早是由 Toraldo di Francia<sup>[4]</sup>提出的,随后光瞳滤波器的设计和制作大都是纯振幅型或者纯相位型的<sup>[5~10]</sup>。振幅型光瞳滤波器结构简单,并且能够很好地抑制旁斑的影响,但是其主斑强度会显著衰减。与振幅型光瞳滤波器相比,在相同的超分辨条件下,相位型光瞳滤波器有更高的中心主斑强度,但是后者的旁斑强度要比振幅型光瞳滤波器大。复振幅型光瞳滤波器介于两者之间,因此能够实现在中心强度和第一零点比相同的条件下,主要降低旁斑强度的影响。不过复振幅光瞳滤波器在制作上的困难影响了复振幅型光瞳滤波器的应用,本文给出了一种相对容易实现的复振幅型光瞳滤波器,通过计算表明:在横向具有相同的第一零点比和斯特

\*国家自然科学基金(60078025)、国家科技部重大基础研究基金、上海市科学技术发展基金(01DJ GK018)资助课题。

E-mail: frxiao@siom.ac.cn

收稿日期:2002-12-25;收到修改稿日期:2003-02-20

雷尔比的条件下,该复振幅型光瞳滤波器的旁斑强度比优于纯相位型光瞳滤波器 50%,并且有效地降低了纯相位型光瞳滤波器的轴向加宽。

## 2 基本理论

根据 Sales 等<sup>[5,6]</sup>给出的  $N$  区相位型光瞳滤波器理论,我们可以给出  $N$  区复振幅型光瞳滤波器在焦平面上的振幅分布为

$$U(v) = \prod_{j=1}^N t_j \exp(i\phi_j) \times \left[ \frac{a_j^2}{a_j} \frac{2J_1(a_j v)}{a_j v} - a_{j-1}^2 \frac{2J_1(a_{j-1} v)}{a_{j-1} v} \right], \quad (1)$$

其中  $a_j$  为第  $j$  区对应的径向坐标(已被出射光瞳半径  $R$  归一化),  $a_0 = 0, a_N = 1$ ;  $\phi_j$  表示第  $j$  个区域的相位;  $t_j$  为第  $j$  区对应的振幅透过率;  $J_1(v)$  为一阶贝塞尔函数。 $v$  对应像面上的径向坐标  $r$ ,其表达式如下:

$$v = kr \sin \theta, \quad (2)$$

其中  $k = 2/\lambda$ ,  $\sin \theta$  代表数值孔径。

同样,我们可以推出加入  $N$  区复振幅型光瞳滤波器后在纵向的振幅分布:

$$U(u) = \prod_{j=1}^N t_j \exp(i\phi_j) \exp\left[\frac{-iu(a_{j-1}^2 - a_j^2)}{4}\right] \times \frac{1}{u} \sin\left[\frac{(a_j^2 - a_{j-1}^2)u}{4}\right], \quad (3)$$

其中  $u$  对应以焦点为原点的轴上坐标  $z$ ,其表达式如下:

$$u = kz \sin^2 \theta. \quad (4)$$

## 3 三区复振幅光瞳滤波器

根据超分辨的理论<sup>[5]</sup>,对于多区相位型光瞳滤波器,相邻两区的相位差为  $\pi$  时,超分辨效果最好。在此基础上,我们在中心区加上对振幅的衰减。如图 1 所示,中心区域半径为  $a_1$ ,振幅透过率为  $t$ ,相位偏移为  $0$ ;中间区域半径  $a_2$ ,振幅透过率为  $1$ ,相位偏移为  $\pi$ ;外围区域半径为  $1$ ,振幅透过率为  $1$ ,相位偏移为  $0$ 。

该类型的复振幅光瞳滤波器对于每个区域来说,都是纯相位或者纯振幅的,因此很大程度上降低了制作的难度。

利用(1)式,我们可以知道该三区复振幅光瞳滤波器在焦平面上的振幅分布:

$$U(v) = (1+t) a_1^2 \frac{2J_1(a_1 v)}{a_1 v} - 2a_2^2 \frac{2J_1(a_2 v)}{a_2 v} + \frac{2J_1(v)}{v}, \quad (5)$$

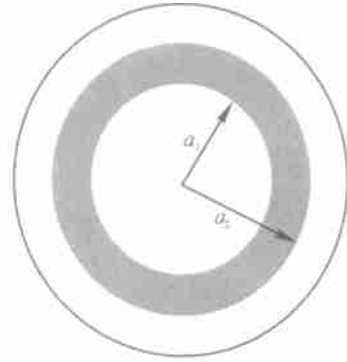


Fig. 1 Three-zone complex pupil filter

式中符号的意义同(1)式。焦面上光强分布  $I(v) = |U(v)|^2$ 。

为分析光瞳滤波器的超分辨性能,引入三个特征量<sup>[5]</sup>:1) 第一零点比  $G$ :有滤波器和没有滤波器时的第一零点处强度最大值之比。2) 斯特雷尔(Strehl)比  $S$ :有滤波器和没有滤波器时的原点处的强度最大值之比。3)  $M$ :旁瓣强度最大值与主瓣强度最大值之比。很明显,要想获得好的超分辨效果, $G$ 和 $M$ 越小越好,而 $S$ 则越大越好,但是实际中,小的第一零点比总是伴随着大的旁斑强度比和小的斯特雷尔比。

由(5)式我们可以计算出加入该光瞳滤波器后横向的斯特雷尔比为

$$S = [(1+t)a_1^2 - 2a_2^2 + 1]^2, \quad (6)$$

可以看出上式中  $S$  的值与光瞳滤波器第一、二区的半径以及第一区的透过率有关。在计算中,我们给定  $S = 0.2$  的值,然后计算了  $G$ 和 $M$ 的值随分区半径以及透过率的变化情况。图 2、图 3 分别是复振幅光瞳滤波器横向的第一零点比和旁斑强度比随  $a_1$  和  $t$  的变化 [ $a_2$  的值由(6)式决定] 的情况,图中灰度为零的区域表示无法满足斯特雷尔比  $S = 0.2$  的区域。

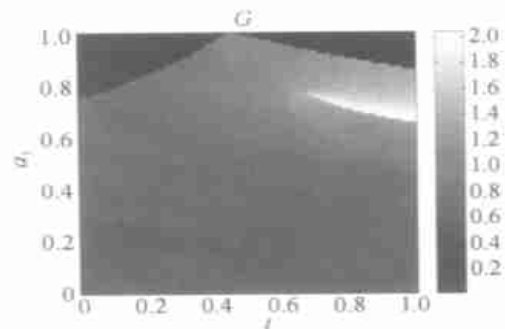


Fig. 2 The change of  $G$  with  $a_1$  and  $t$

不难发现,第一零点比  $G$  随  $t$  减小而减小,同样随  $a_1$  的减小而减小。另外, $G$  随  $a_1$  的变化趋势受到  $t$  值的影响,在  $t$  值较小时  $G$  随  $a_1$  的变化较平缓,而  $t$  值较大时的变化要剧烈的多。但  $M$  在不同  $t$  值时随

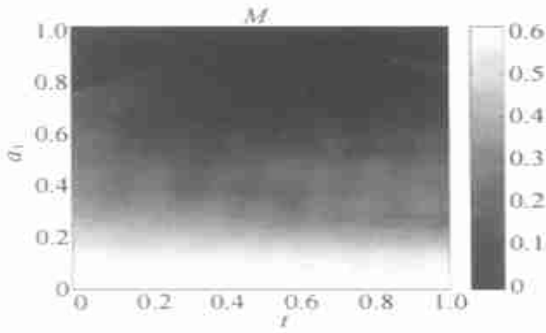


Fig. 3 The change of  $M$  with  $a_1$  and  $t$

$a_1$  的变化都比较平缓(图 4)。这一点也体现了复振幅光瞳滤波器可以在显著减小  $G$  值的同时只是稍微提高  $M$  值。 $G$  随  $t$  的变化也有同样的影响(图 5)。

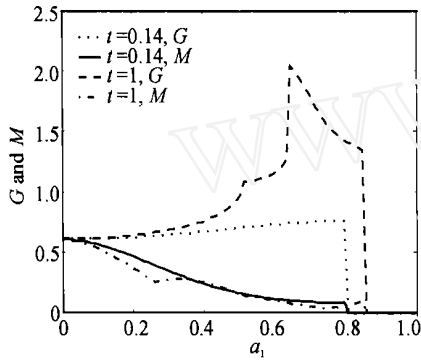


Fig. 4  $G$  and  $M$  changed with  $a_1$

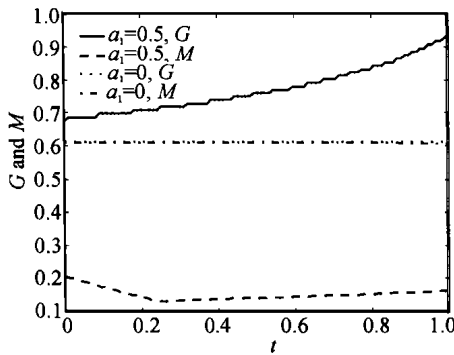


Fig. 5  $G$  and  $M$  changed with  $t$

### 4 数值计算结果

单透镜聚焦时,焦面上的光强分布为艾里斑,它的第一零点值为 3.84,旁斑强度比为 1.75%。在图 4、图 5 中容易看出  $G$  值在  $a_1$  为零时最小,此时相当于相位差为  $\pi$  的两区相位型光瞳滤波器,这一点也说明了本文所给出的三区复振幅光瞳滤波器的主要作用是在相同  $G$  值下,减小旁斑的影响。图 5 中  $a_1 = 0$  时所对应的两条直线说明此时  $t$  不再有影响效应,这一点也进一步验证我们的计算结果。

在  $S = 0.2$  的情况下,如果选取  $G = 0.6979$ ,通

过简单的计算我们可以从图 3 中找出相应  $M$  值最小的点:  $a_1 = 0.49, t = 0.14$ 。此时  $M = 16.53\%$ 。图 6 是在该参量值条件下复振幅光瞳滤波器在焦面上的光强分布。图中实线是无光瞳滤波器时的光强分布,短划线是加入上面参量的复振幅光瞳滤波器后焦面上的光强分布,点线是和复振幅光瞳滤波器具有相同  $S$  和  $G$  值时,纯相位型光瞳滤波器在焦面上的光强分布。纯相位型光瞳滤波器的第一区半径为 0.326,第二区的半径由  $t = 0$  时的(6)式决定,相应的  $M$  值为 27.76%。也就是说在相同的第一零点比和斯特雷尔比下,复振幅型光瞳滤波器的旁斑强度比是纯相位型光瞳滤波器的 50%,因此复振幅型光瞳滤波器可以实现更好的超分辨率效果。

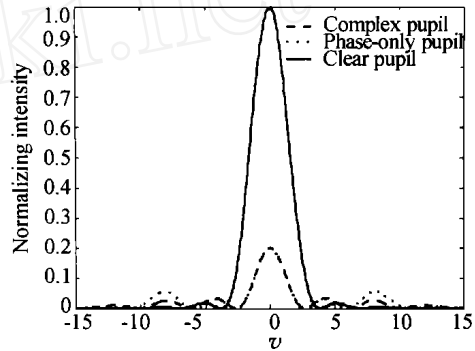


Fig. 6 Lateral pattern of complex pupil filter

在此参量的基础上,我们同时利用(3)式计算了复振幅型光瞳滤波器和纯相位型光瞳滤波器对焦斑纵向分布的影响情况。如图 7 所示,实线是无光瞳滤波器时焦斑沿纵向的光强分布,短划线是加入上述复振幅光瞳滤波器后焦斑沿纵向的光强分布,点线是加入纯相位型光瞳滤波器后焦斑的纵向光强分布。可以看出复振幅型光瞳滤波器有效地降低了由纯相位型光瞳滤波器所引起的纵向加宽,并且比纯相位型光瞳滤波器具有更好的纵向旁斑强度比。

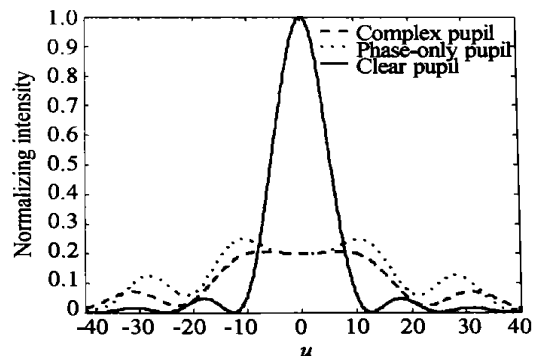


Fig. 7 Axial pattern of complex pupil filter

讨论 本文给出了一种在制作相对简单的复振幅型光瞳滤波器,通过数值计算我们发现该复振幅型光瞳滤波器能够在第一零点比和斯特雷尔比与纯相位型光瞳滤波器相同的情况下,获得低于后者 50% 的旁斑强度比。同时能够获得比后者更好的轴向光截面。

### 参 考 文 献

- 1 White G, Amos W B. Confocal microscopy. *Nature*, 1987, **328**(6126):183 ~ 192
- 2 Denk W, Strickler J H, Webb W W. Two-photon laser scanning fluorescence microscopy. *Science*, 1990, **248**(4951):73 ~ 76
- 3 Guest J R, Stievater T H, Gang Chen *et al.*. Near-field coherent spectroscopy and microscopy of a quantum dot system. *Science*, 2001, **293**(5538):2224 ~ 2228
- 4 Toraldo di Francia G. Super-gain antennas and optical resolving power. *Nuovo Cimento Suppl.*, 1952, **9**:426 ~ 435
- 5 Sales T R M, Morris G M. Diffractive superresolution elements. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1997, **14**(2):1637 ~ 1646
- 6 Sales T R M, Morris G M. Axial superresolution with phase-only pupil filters. *Opt. Commun.*, 1998, **156**(1):227 ~ 230
- 7 Deng Xiaoqiang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Pupil filters improving axial resolution. *Acta Optica Sinica (光学学报)*, 2000, **20**(7):966 ~ 970 (in Chinese)
- 8 Liu Li, Deng Xiaoqiang, Wang Guiying *et al.*. Phase-only pupil filters improving axial resolution. *Acta Physica Sinica (物理学报)*, 2001, **50**(1):49 ~ 52 (in Chinese)
- 9 Deng Xiaoqiang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. 3-D superresolution pupil filter. *Chin. J. Laser (中国激光)*, 2001, **A28**(5):459 ~ 462 (in Chinese)
- 10 Deng Xiaoqiang, Liu Li, Wang Guiying *et al.*. Superresolving phase-only filters in confocal scanning imaging system. *Chin. J. Laser (中国激光)*, 2001, **A28**(9):833 ~ 836 (in Chinese)