

文章编号: 0253-2239(2010)09-2568-05

超高斯相位型光瞳滤波器轴向超分辨性能

何毅 张雨东 李国俊 王炯 罗先刚

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209)

摘要 研究了超高斯相位型光瞳滤波器的轴向超分辨性能。通过数值模拟,使用新的参数 T, ω 讨论确定了三区二元相位型光瞳滤波器的超分辨区域。将超高斯相位型与二元相位型滤波器对比,分析相同参数下两种光瞳滤波器的轴向超分辨能力,进而讨论超高斯相位型滤波器的轴向超分辨性能随其阶数的变化关系。超高斯型滤波器与相位型相比,超分辨能力略有降低,但其旁瓣能量也有所降低,因此能量利用率有所提高。

关键词 成像系统;超分辨;光瞳;滤波器;超高斯

中图分类号 O539 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2568

Axial Super-Resolution Effects of Super-Gaussian Phase Filters

He Yi Zhang Yudong Li Guojun Wang Jiong Luo Xiangang

(State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

Abstract Axial super-resolution effects of super-Gaussian phase filters are studied in detail. New parameters (T, W) are used to determine the super-resolution region of three zones annular binary phase filter through numerical simulations. Axial super-resolution effect difference between super-Gaussian phase filter and annular binary phase filter is discussed on condition of the same parameters. The axial super-resolution response of super-Gaussian phase filters with it's index is also studied. Compared to annular binary phase filters, the super-resolution of super-Gaussian phase filters has a slight decline. Whereas it's side-lobes also has a little decrease, energy utilization rate increases.

Key words imaging system; super-resolution; pupil; filter; super-Gaussian

1 引 言

1952年, Toraldo将超分辨天线的概念引入光学领域,首次提出光瞳超分辨的概念^[1],指出在系统的出瞳处加一块超分辨光瞳滤波器,可以在花费较小、对系统做很小改动的条件下,有效地提高系统的空间分辨率。1988年 C. S. Chung等研究了非均匀振幅型光瞳滤波器,指出其可以用于对系统点扩散函数(PSF)进行改造,以得到切趾、超分辨的效果^[2]。切趾型光瞳滤波器主要用于对激光进行光束匀滑^[3],或用于减小成像系统的像差^[4,5]。但光瞳滤波器最广泛的应用是产生超分辨效应^[6],不同的超分辨光瞳滤波器有不同的应用领域,如共焦扫描显微镜^[7~9]和光刻^[10]等。

超分辨光瞳滤波器主要分为振幅型、相位型和复振幅型等几种类型。在早期的研究中,主要以振幅型为主^[1,11],振幅型光瞳滤波器具有结构简单,容错性好等优点,比较容易在光学系统中实现。然而能量利用率较低的缺点,大大限制了这类滤波器在成像系统中的应用。20世纪90年代以来,纷纷把目光转向相位型滤波器^[12~14],与振幅型滤波器相比,相位型滤波器具有能量利用率高等诸多优点^[12]。然而,使用相位型滤波器的光学系统的点扩展函数(PSF)旁瓣能量一般较高,会降低系统的成像质量,为了克服这个缺点,近年来逐渐关注复振幅型超分辨光瞳滤波器^[15]。超高斯型光瞳滤波器是复振幅型光瞳滤波器的一种,目前对其的研究还较

收稿日期: 2009-11-02; 收到修改稿日期: 2009-12-25

作者简介: 何毅(1983—),男,硕士研究生,主要从事光学超分辨技术方面的研究。E-mail: heyi982@yahoo.com.cn

导师简介: 罗先刚(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事微纳光学方面的研究。

E-mail: lxx@ioe.ac.cn(通信联系人)

少,已有的研究主要关注其造成的系统焦面轴向平移^[16]和对其 PSF 的对称特性进行讨论^[17]。

在现有的共焦扫描等三维光学成像系统中,由于杂散光等因素的影响,轴向分辨率通常远低于横向分辨率。为了提高系统的轴向分辨能力,人们提出了各种办法,包括使用光瞳滤波器、共焦与光学相干断层扫描技术(OCT)相结合^[18~20]、非线性生物荧光成像^[21]等方法。本文主要关注使用光瞳滤波器提高成像系统轴向分辨率的方法。讨论了超高斯相位型滤波器的轴向超分辨能力,将超高斯相位型和三区二元相位型滤波器的轴向超分辨性能进行了对比分析,并讨论了其轴向超分辨性能随其阶数的变化关系。超高斯函数是矩形函数的近似,在目前的工艺水平下,实际制作过程中所得到的器件通常具有一定的超高斯形状特征,对比分析这两种滤波器超分辨性能的优劣,对滤波器的实际应用具有一定的指导意义。

2 原 理

根据 Born^[22]和 McCutchen^[23]的理论,在单色光照明情况下,一般成像系统焦点附近的归一化振幅分布可表示为

$$U(v, u) = 2 \int_0^1 P(\rho) \exp(-j u \rho^2 / 2) J_0(v \rho) \rho d\rho, \quad (1)$$

式中 ρ 为归一化半径, $P(\rho)$ 为系统的光瞳函数, $J_0(v\rho)$ 是零阶贝塞尔函数, v 和 u 分别对应于接收面上的横向坐标 r 与轴向坐标 z 。分别令 $u=0$ 和 $v=0$, 则系统焦点附近横向(焦面)和轴向的点扩展函数分别为

$$U(v, u=0) = 2 \int_0^1 P(\rho) J_0(v \rho) \rho d\rho$$

$$U(v=0, u) = 2 \int_0^1 P(\rho) \exp(-j u \rho^2 / 2) \rho d\rho, \quad (2)$$

在此只考虑轴向分布,为简化计算,令 $t=\rho^2$, 则轴向 PSF 可表示为

$$U(v=0, u) = \int_0^1 Q(t) \exp(-j u t / 2) dt, \quad (3)$$

式中 $Q(t)=P(\rho)$ 是光瞳函数。

根据超分辨理论,光瞳滤波器的超分辨性能通常用 PSF 的三个特征参量 G, S 和 M 来表示^[12], 其中 G 表示系统的超分辨能力,定义为超分辨点扩展函数主瓣宽度与艾里斑主瓣宽度之比; S 表示系统

的能量利用率(施特尔特比),定义为超分辨衍射斑主瓣中心最大强度与艾里斑主瓣中心最大强度之比; M 给出 PSF 的最高旁瓣能量,定义为超分辨衍射斑最大旁瓣强度与中心主瓣最大强度之比。

根据标量衍射理论,使用计算机编程模拟平行光通过光瞳 $P(\rho)$ 在透镜后焦面聚焦的衍射过程,得到焦点附近 PSF 横向和轴向强度分布。直接对所得的分布计算得出超分辨参数 G, M, S 的值。

3 超分辨区域的确定

对于一个特定的光瞳滤波器,只有当其光瞳函数 $P(\rho)$ 满足一定条件时,才会显示出超分辨特性。由于相位型滤波器结构比较简单,易于讨论,先以相位型滤波器为例确定其超分辨区域。超高斯型与相位型滤波器结构相近,这个超分辨区域也同样适用于超高斯型滤波器。

图 1 为三区相位型光瞳滤波器结构示意图,中间相位环与周围空白部分相位差为 π 。经过归一化,整个滤波器半径为 1, ρ_1, ρ_2 是相位环内外半径,为方便讨论,引入两个与 $t=\rho^2$ 有关的参量 T, ω , 其中 $\omega=t_2-t_1=\rho_2^2-\rho_1^2$ 表示相位环宽度, $T=(t_2+t_1)/2=(\rho_2^2+\rho_1^2)/2$ 表示相位环中心半径。为找出具有超分辨效果的光瞳结构,通过计算得到系统轴向 PSF 随 ω, T 的变化关系。

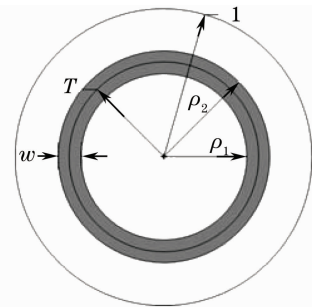


图 1 三区相位型光瞳滤波器结构

Fig. 1 Structure of three-zone phase pupil filter

图 2 为相位型滤波器 $T=0.5$ 时系统 PSF 随 ω 的变化关系,图 2(a) 为轴向 PSF 与 ω 的关系,图 2(b) 为横向 PSF 与 ω 的关系,虚线为艾里斑,实线为滤波器 PSF。如图 2(a) 所示,随 ω 的增加其轴向 PSF 从超分辨逐渐变为双焦点再变为切趾。 ω 较小时具有超分辨效果,随着 ω 的逐渐增大,主瓣宽度 G_A 越来越小,超分辨能力越来越强。但此时旁瓣能量 M_A 也越来越高, $\omega > 0.21$ 后旁瓣能量 M_A 变得高于 S , 此时的系统不再适合用于成像。当 ω 增大到 0.5 时, $S=0$, 主瓣消失,只剩下两个能量

很高的第一旁瓣,此时系统 PSF 具有双焦点的特点。随着 w 的继续增大,PSF 中心能量不断增大,旁瓣逐渐变小,当中心能量增大到接近第一旁瓣能量后,PSF 呈现出切趾效应。随着 w 增大到 1,相位环逐渐布满整个光瞳区域,其 PSF 逐渐接近艾里斑。整个变化过程中横向 PSF 的分辨能力 G_T 和旁瓣能量 M_T 变化很小,变化最大的是 S ,其变化与轴向 PSF 一致,先从接近艾里斑的最大值变小,直至主瓣消失,随后逐渐增大,最后接近艾里斑。

由以上的讨论,可以看到只有 w 较小时滤波器才具有轴向超分辨效果,取一个常用的 w 值来讨论轴向、横向 PSF 与其环带中心半径的关系。取环带宽度 $w=0.12$,计算结果如图 3 所示。不同 T 值计算所得的轴向 PSF 关于 $T=0.5$ 呈对称分布, T 取值较大或较小时,PSF 具有切趾效应。随着 T 逐渐

向 $T=0.5$ 靠近,主瓣宽度 G_A 逐渐变窄,旁瓣能量逐渐升高,当 G_A 变得小于艾里斑主瓣时,PSF 呈现出超分辨效果。 $T=0.5$ 时, G_A 达到最小值,超分辨效果最强,此时的 M_A 也达到最大值。横向 PSF 则随 T 的增大从具有超分辨效果逐渐变至具有切趾效果, T 较小时具有超分辨效果,当 T 增加到 0.5 附近时超分辨效果消失,随 T 的进一步增加横向 PSF 变为具有切趾的效果。在整个变化过程中,由于 w 一直保持不变,且其值较小,受到相位环衍射的入射光比例较小, S 的值变化很小,一直稳定在一个固定值附近。

经过以上讨论,可以看出只有当 w, T 处于一定的范围内时滤波器才具有超分辨效应。考虑到旁瓣对系统成像质量的影响,只取主瓣能量高于旁瓣能量的情况,通过计算, $0 < w \leq 0.21, 0.3 \leq T \leq 0.7$ 。

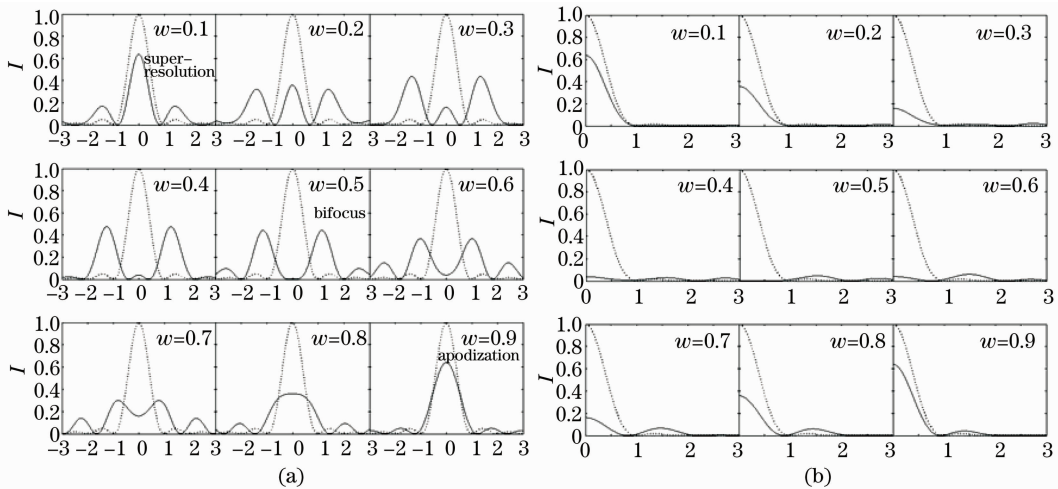


图 2 相位型滤波器(a)轴向 PSF,(b)横向 PSF 与 w 关系($T=0.5$)

Fig. 2 Relationship between (a) axial PSF, (b) transverse PSF of phase pupil filter and w ($T=0.5$)

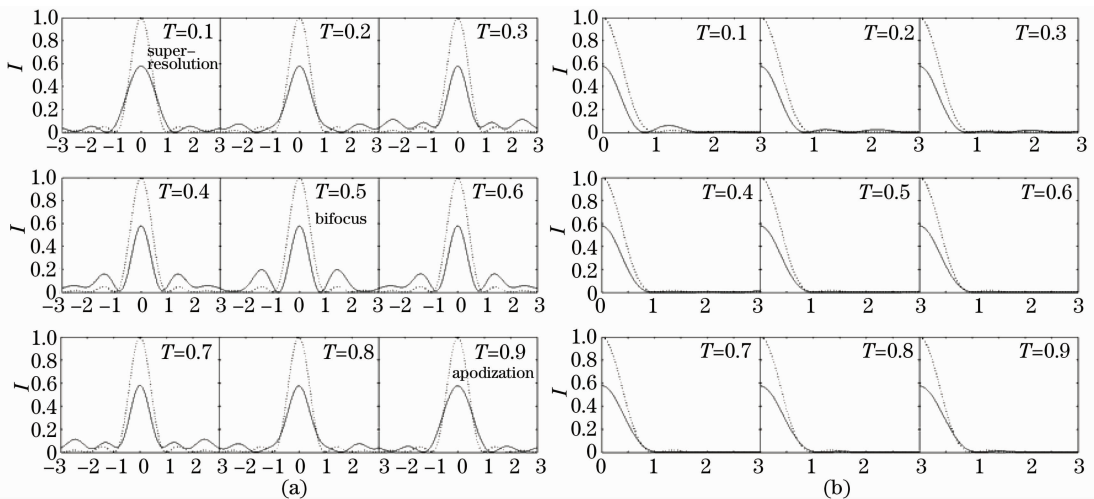


图 3 相位型滤波器(a)轴向 PSF,(b)横向 PSF 与 T 关系($w=0.12$)

Fig. 3 Relationship between (a) axial PSF, (b) transverse PSF of phase pupil filter and T ($w=0.12$)

4 超高斯型滤波器的轴向超分辨能力

超高斯函数

$$f(\rho) = A \exp \left[- \left(\frac{\rho - T}{\omega/2} \right)^n \right], \quad (4)$$

是矩形函数的近似, A, T, ω, n 分别代表其模、中心坐标、半高宽、阶数。为了对超高斯型滤波器的超分辨性能有更深入的了解, 指导其在实际成像系统中的运用, 对相同中心位置 T , 相同半高宽 ω 的 4 阶超高斯型和相位型滤波器的轴向超分辨参数 G_A, M_A, S 进行了对比分析。同时还研究了超高斯滤波器轴向超分辨性能随其阶数 n 的变化关系, 得出滤波器从相位型变化到高斯型时其轴向超分辨性能的变化过程。

图 4 为纯相位型滤波器与超高斯型滤波器分辨能力对比图。其中相位型滤波器相位环宽度、中心半径与超高斯函数半高宽、中心半径始终保持相等, 超高斯函数阶数 $n=4$, 图 4(a)~(c) 三幅图分别表示两种滤波器主瓣宽度 G 、最高旁瓣能量 M, S 随宽度 ω 的变化关系。可以看到, 在超分辨区域范围内, 随着 ω 的增长, 二者的 G, M, S 三个超分辨参量变化趋势始终是一致的。在轴向方向上, 主瓣宽度 G_A 均逐渐变窄, 超分辨能力逐渐增强, 同时旁瓣能

量 M_A 也随之逐渐增大, S 逐渐降低。但相位型的变化速度比超高斯型快, 表明相位型滤波器各超分辨参数对 ω 变化比超高斯型滤波器敏感。 ω 很小时, 二者超分辨性能差别很小, 随着 ω 的增大二者的差别也逐渐增大。总的来说, 相同 T, ω 的超高斯型滤波器分辨率 G_A 比纯相位型的较低, 同时旁瓣能量 M_A 也较低, 能量利用率 S 较高。在某些成像系统中要求其 PSF 具有较低的旁瓣和较高的施特尔特比, 此时可使用超高斯滤波器, 牺牲一定的分辨率以降低旁瓣能量和提高能量利用率。在横向上 G_T 和 M_T 的变化范围与轴向相比都很小, 二者 G_T 均随 ω 的增加而增大, 相位型滤波器增大得相对快些, 但在整个超分辨区域增幅不超过 20%, 对于大部分成像系统横向分辨率均很高, 20% 的增幅不会造成很大的影响; M_T 则随 ω 的增加变化很小, 始终维持在一个很低的值。

为了研究滤波器结构从纯相位到高斯函数变化时各超分辨参数的变化情况, 还应分析超高斯滤波器的超分辨性能随其阶数的变化关系。图 5 是中心位置 $T=0.5$ 、半高宽 $\omega=0.12$ 的不同阶数超高斯滤

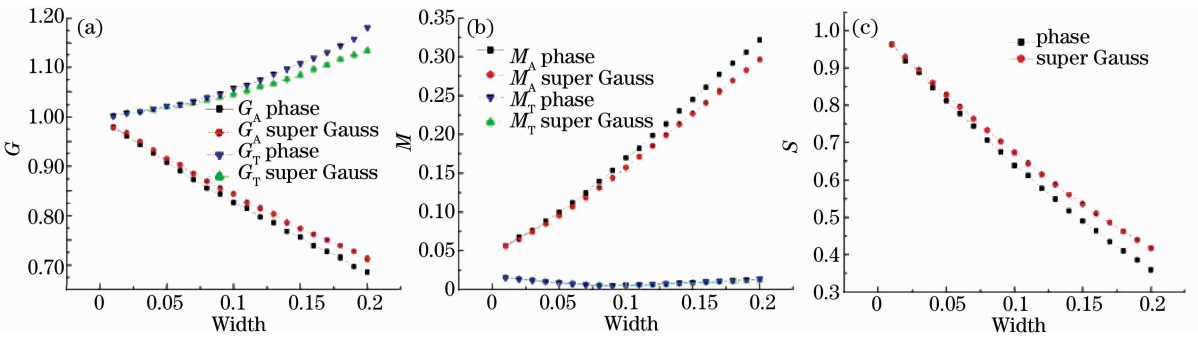


图 4 相同 T, ω 的纯相位、超高斯滤波器比较。(a) G 与 ω 的关系; (b) M 与 ω 的关系; (c) S 与 ω 的关系
Fig. 4 Comparison of pure phase filter and super-Gauss phase filter with the same T and ω . (a) relationship between G and ω ; (b) relationship between M and ω ; (c) relationship between S and ω

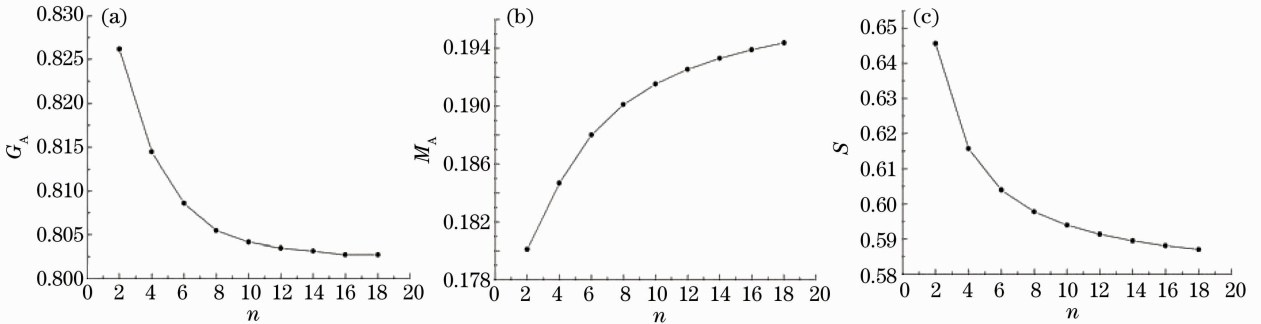


图 5 不同阶数超高斯滤波器 G_A, M_A, S 分布图。(a) G_A 与 n 的关系; (b) M_A 与 n 的关系; (c) S 与 n 的关系
Fig. 5 G_A, M_A, S of Super-Gauss filter with different n . (a) relationship between G_A and n ; (b) relationship between M_A and n ; (c) relationship between S and n

波器的分辨能力示意图。随着阶数 n 的升高,超高斯函数形状不断接近矩形函数,其各超分辨性能也不断接近相位型滤波器,与前面的讨论一致,滤波器轴向分辨率 G_A 逐渐提高, M_A 逐渐降低, S 逐渐升高。阶数 n 比较小时,变化速度很快,当阶数 n 大于 8 后,这种变化变得越来越缓慢。对于各参数,在 n 较小时 G_A 随 n 的变化速度要大于 M_A 和 S , n 较大时则相反, M_A 和 S 要大于 G_A 。因此,在实际运用过程中,若想在超分辨能力降低很小的情况下降低旁瓣能量和提高施特尔比,则需要较高阶数的超高斯滤波器;若对超分辨能力的变化没有很高要求,可以选择较低阶数的超高斯滤波器。

5 结 论

本文从纯相位滤波器出发,讨论并确定了三区相位型光瞳滤波器的轴向超分辨区域,然后将超高斯型与相位型滤波器对比,分析其轴向超分辨性能。超高斯型滤波器与相位型滤波器相比,超分辨能力相近,阶数越大差别越小,总体上,超分辨能力略有降低,但具有更低的旁瓣能量和更高的施特尔比。对于旁瓣能量对成像质量影响较大的系统,特别是对能量利用率要求较高的系统,可以通过牺牲一部分分辨能力的办法来得到更低的旁瓣能量和更高的能量利用率,从而获得更好的成像质量。

参 考 文 献

- 1 G. Toraldo di Francia. Super-gain antennas and optical resolving power [J]. *Nuovo Cimento Suppl.*, 1952, **9**(3): 426~435
- 2 C. S. Chung, H. H. Hopkins. Influence of non-uniform amplitude on PSF[J]. *J. Mod. Opt.*, 1988, **35**(9): 1485~1511
- 3 E. W. S. Hee. Fabrication of apodized apertures for laser beam attenuation[J]. *Opt.*, *Laser Technol.*, 1975, **7**(2): 75~79
- 4 M. J. Yzuel, F. Calvo. A study of the possibility of image optimization by apodization filters in optical systems with residual aberrations[J]. *Opt. Acta*, 1979, **26**(11): 1397~1406
- 5 H. B. Chung, K. H. Hong, S. S. Lee. Effect of aperture modulation on the MTF of a binocular objective having rotationally symmetric aberrations [J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(12): 1812~1814
- 6 I. J. Cox, C. J. R. Sheppard *et al.*. Reappraisal of arrays of concentric annuli as super-resolving filters[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1982, **72**(9): 1287~1291
- 7 Deng Xiaoqiang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. 3-D superresolution pupil filter [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2001, **A28**(5): 459~462
邓小强, 王桂英, 徐至展. 三维超分辨光瞳滤波器[J]. *中国激光*, 2001, **A28**(5): 459~462
- 8 Deng Xiaoqiang, Wang Guiying, Xu Zhizhan. Pupil filters

- improving axial resolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(7): 968~972
- 邓小强, 王桂英, 徐至展. 改善轴向分辨率的光瞳滤波器[J]. *光学学报*, 2000, **20**(7): 968~972
- 9 M. Gu, C. J. R. Sheppard. Three dimensional imaging in confocal fluorescent microscopy with annular lenses[J]. *J. Mod. Opt.*, 1991, **38**(11): 2247~2263
- 10 H. Fukuda, R. Yamanaka. A new pupil filter for annular illumination in optical lithography[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1992, **31**: 4126~4130
- 11 Ding Hongping, Li Qinghui, Zou Wenyi. Design of 3-Zone Amplitude-Type Superresolution Pupil Filters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(9): 1177~1180
丁洪萍, 李庆辉, 邹文艺. 三区振幅型超分辨光瞳滤波器的设计 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(9): 1177~1180
- 12 T. R. M. Sales, G. M. Morris. Diffractive superresolution elements[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1997, **14**(7): 1637~1646
- 13 H. Liu, Y. Yan, D. Yi *et al.*. Design of three-dimensional superresolution filters and limits of axial superresolution [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42**(8): 1463~1476
- 14 H. Wang, F. Gan. High focal depth with a pure-phase apodizer [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(31): 5658~5662
- 15 Xiao Fanrong, Yuan Jinghe, Wang Guiying *et al.*. Three-zone complex pupil filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(1): 1~4
肖繁荣, 袁景和, 王桂英 等. 三区复振幅光瞳滤波器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(1): 1~4
- 16 S. Ledesma, J. Campos, J. C. Escalera *et al.*. Simple expressions for performance parameters of complex filters, with applications to super-Gaussian phase filters [J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(9): 932~934
- 17 S. Ledesma, J. Campos, J. C. Escalera *et al.*. Symmetry properties with pupil phase filters [J]. *Opt. Express.*, 2004, **12**(11): 2548~2559
- 18 Zhou Lin, Ding Zhihua, Yu Xiaofeng. Axial superresolution in optical coherence tomography through the combination of apodization and coherence gating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1181~1185
周琳, 丁志华, 喻晓峰 等. 利用变迹术和相干门相结合实现 OCT 的轴向超分辨 [J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1181~1185
- 19 Shi Guohua, Ding Zhihua, Dai Yu *et al.*. Ophthalmic imaging by optical coherence tomography [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1429~1431
史国华, 丁志华, 戴云 等. 光纤型光学相干层析技术系统的眼科成像 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1429~1431
- 20 Zhang Yudong, Dai Yu, Shi Guohua *et al.*. Application of one-dimensional wavelet transformation in time domain optical coherence tomography imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(7): 1013~1016
张雨东, 戴云, 史国华 等. 一维小波变换在时域光学相干层析成像中的应用 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(7): 1013~1016
- 21 Mao Zhengle, Wang Chen, Cheng Ya. Superresolution far-field fluorescence bio-imaging: breaking the diffraction barrier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1283~1307
毛峥乐, 王琛, 程亚. 超分辨远场生物荧光成像-突破光学衍射极限 [J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1283~1307
- 22 M. Born, E. Wolf. Principles of Optics [M]. Cambridge University Press, UK, 7th Edition, 1999
- 23 C. W. McCutchen. Generalized aperture and the three-dimensional diffraction image [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1964, **54**(2): 240~244