

光子筛-透镜组合的折衍混合消色差系统设计

何 渝^{1,2} 赵立新¹ 唐 燕¹ 陈铭勇¹ 朱江平^{1,2}

(¹中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209)

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 光子筛作为一种衍射光学元件, 具有较大的色散, 不适用于宽光谱成像。光子筛的焦距随着入射波长的增大而减小, 而正的折射透镜焦距随着入射波长的增大而增大。应用了折衍混合方法进行光子筛消色差的设计。该设计利用二者相反的色散特性, 在光子筛的一侧紧密放置一平凸透镜, 从而实现光子筛的消色差设计。并针对可见光光谱进行了设计, 分析表明该方法能够实现消色差, 且具有一定校正二级光谱的能力, 消色差波长与中心波长处焦距相对误差为 0.33%, 成像光谱带宽为 20 nm。与普通单个光子筛相比, 该方法有效拓宽了光子筛的成像光谱范围。与使用波带片的折衍混合系统相比, 聚焦光斑更小。

关键词 几何光学; 光子筛; 色差; 折衍混合

中图分类号 TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.1216001

Hybrid Refractive-Diffractive Achromatic System Design with Photon Sieve-Lens Combination

He Yu^{1,2} Zhao Lixin¹ Tang Yan¹ Chen Mingyong¹ Zhu Jiangping^{1,2}

(¹Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Photon sieve is a diffractive optical element with large chromatic aberration, which is not suitable for imaging in wide spectral. The focal length of photon sieve decreases when the incident wavelength increases, while the focal length of positive refractive lens increases when the incident wavelength increases. The design applying the method of hybrid refractive-diffractive into the photon sieve achromatic is proposed. These opposite dispersive characteristics are used in this method. A plano-convex lens is placed close to side of a photon sieve in order to achieve achromatic design. Then the achromatic system is designed in the visible spectrum. The analysis shows that the system is achromatic and has a certain ability of secondary spectrum correction. The relative error between focal lengths of achromatic wavelength and centre wavelength is 0.33%. The imaging spectral bandwidth is 20 nm. Compared with ordinary single photon sieve, the design broadens the imaging spectrum range. Compared with the hybrid refractive-diffractive system using zone plate, a smaller focusing spot can be achieved.

Key words geometric optics; photon sieve; chromatic aberration; hybrid refractive-diffractive

OCIS codes 260.1960; 220.2740; 330.1690

1 引言

光子筛由 Kipp 等^[1]于 2001 年首次提出, 其采用微纳透光小孔代替波带片中的透光环带, 和传统

的波带片相比, 该设计更为灵活。光子筛可以用直径大于对应波带片环带宽度的小孔来代替, 放宽了现有最小加工尺寸的限制, 在相同最小加工尺寸的

收稿日期: 2012-06-15; 收到修改稿日期: 2012-08-06

基金项目: 国家自然科学基金(61076099)资助课题。

作者简介: 何 渝(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事光学系统设计和衍射光学等方面的研究。

E-mail: heyufrog@sina.com

导师简介: 赵立新(1971—), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事从事微电子专用设备和生物芯片检测设备等方面的研究。

E-mail: lxzh999@sina.com

情况下,光子筛能够实现更高的分辨率;并且光子筛上随机分布的小孔,能有效地抑制旁瓣效应和高阶衍射,改善成像质量。由于光子筛显著的特点,其在轻型天文望远镜、纳米光刻技术和激光雷达成像技术中应用前景较好。其中,Andersend等^[2]提出光子筛在超大口径天文望远镜中的应用。受昆虫复眼的启发,Holloway等^[3]将具有不同分辨率的光子筛集成在同一表面上,制作成全景视觉器件,可增强武器的视觉性能。在光刻应用方面,基于光子筛良好的聚焦特性,Menon等^[4]使用高数值孔径的光子筛作为聚焦元件替代波带片用于无掩模直写阵列光刻系统,实现了200 nm光刻分辨率。同时,国内学者也正在进行光子筛X射线显微成像技术^[5]、光子筛激光直写技术等光子筛应用研究。

光子筛是一种衍射光学元件,因而对波长变化敏感,普通光子筛并不适用于宽光谱成像。Chung等^[6,7]分别设计了双波长和多波长光子筛,将传统的光子筛分成几个子区域,每个子区域对应一个波长成像,每个子区域的结构单独设计。与普通的光子筛相比,多波长光子筛具有较大的波长响应范围,对波长的敏感程度降低。但是,由于区域的划分,使得光能利用率更低。同时,不同区域的设计不同,小孔中心位置和小孔直径不同,给多波长光子筛的制作带来工艺上的问题。而利用衍射结构特殊色散性质的折衍混合光学系统设计已经得到了广泛的应用^[10,11]。本文将折衍混合的方法用于光子筛的消色差设计中,采用光子筛与单折射透镜的组合实现较宽光谱范围成像。该方法只需使用普通光子筛,不额外增加加工工艺难度和降低光能利用率。由于光子筛良好的聚焦性能,光子筛-透镜组合的分辨率优于采用传统衍射元件波带片的折衍混合系统,有望用于高分辨显微镜、轻质望远镜和聚焦扫描系统等领域。

2 理论分析

2.1 折衍混合消色差设计方法

光子筛是采用微纳透光小孔代替波带片中的透光环带,光子筛的总环带数由下式给出:

$$N \approx \frac{D^2}{4\lambda f_{ps}}, \quad (1)$$

式中 f_{ps} 为光子筛焦距, λ 为照明波长, N 为总环带数, D 为光子筛口径。在光子筛设计完成后,即 N 和 D 确定, λ 与 f_{ps} 近似成反比。

假设光子筛的设计中心波长为 λ_d , 消色差波长

为 λ_F 和 λ_C ($\lambda_F < \lambda_d < \lambda_C$), 应用衍射光学元件的色散特性^[8], 可以得出光子筛在任意波长 λ_i 的等效折射率:

$$n_i = 1 + \frac{R_0 \lambda_i}{f_d \lambda_d}, \quad (2)$$

式中 R_0 为常数。光子筛的等效阿贝数为

$$V_{ps} = \frac{\lambda_d}{\lambda_F - \lambda_C}. \quad (3)$$

可以看出,光子筛的色散只与入射光波长有关,而折射透镜的色散与玻璃材料有关。例如在可见光谱区,光子筛的等效阿贝数为-3.4524,玻璃材料ZF4的阿贝数为28.3239(成都光明玻璃库),可见,光子筛与玻璃材料的阿贝数符号相反,且绝对值小于玻璃材料。

正是由于光子筛与普通折射透镜具有相反的色散特性,有利于通过折衍混合的设计方法达到消色差的目的。光子筛是一种膜层结构的衍射光学元件,可以将其密接在平凸透镜的一侧,构成折衍混合消色差系统,原理如图1所示。

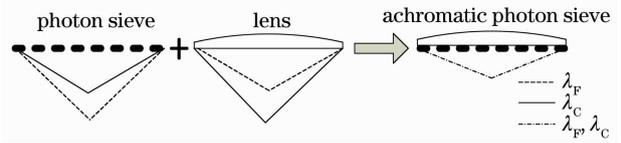


图1 光子筛消色差原理

Fig. 1 Principle of achromatic photon sieve

光子筛与折射透镜组成的消色差系统焦距需满足以下关系:

$$\frac{1}{f_{ps,d}} + \frac{1}{f_{len,d}} = \frac{1}{f_{ach}}, \quad (4)$$

$$\frac{1}{f_{ps,F}} + \frac{1}{f_{ps,C}} = \frac{1}{f_{len,F}} + \frac{1}{f_{len,C}}, \quad (5)$$

式中 $f_{ps,F}$ 、 $f_{ps,d}$ 和 $f_{ps,C}$ 分别为照明波长为 λ_F 、 λ_d 和 λ_C 时光子筛对应的焦距, f_{ach} 为光子筛-透镜组合总的焦距, $f_{len,F}$ 、 $f_{len,d}$ 和 $f_{len,C}$ 为照明波长为 λ_F 、 λ_d 和 λ_C 时折射透镜对应的焦距。

联立(4)式和(5)式可以求得:

$$f_{ps,d} = f_{ach} \left(\frac{V_{ps} - V_{len}}{V_{ps}} \right), \quad (6)$$

$$f_{len,d} = f_{ach} \left(\frac{V_{len} - V_{ps}}{V_{len}} \right). \quad (7)$$

根据(6)式和(7)式分配光子筛和折射透镜的焦距,然后分别确定光子筛和折射透镜的结构参数。

2.2 成像特性分析

光子筛的衍射场是由所有微纳小孔的衍射场叠加而成,与一般的衍射光学元件成像不尽相同,因此

有必要对光子筛构成的折衍混合系统进行成像特性分析。根据光子筛衍射成像模型,光子筛轴上的复振幅为^[9]:

$$E_n(0,0) = 2N_f A_n \exp\left[jk\left(L_n + \frac{r_n^2}{2q}\right)\right] \text{Jinc}\left(\frac{ka_n R_n}{q}\right), \quad (8)$$

式中 $N_f = \frac{\pi a_n^2}{\lambda q}$, A_n 为实振幅常数, j 为虚数单位, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, L_n 为相位延迟, $r_n^2 = x_n^2 + y_n^2$, x_n, y_n 为小孔中心坐标, q 为像面到光子筛的距离, a_n 为小孔半径, $R = \sqrt{(x_n + g_n q)^2 + (y_n + h_n q)^2}$, $g_n = \left(\frac{\partial L}{\partial x}\right)|_{x_n, y_n}$, $h_n = \left(\frac{\partial L}{\partial y}\right)|_{x_n, y_n}$, $\text{Jinc}(\cdot) = \frac{J_1(\cdot)}{(\cdot)}$, $J_1(\cdot)$ 是一阶贝塞尔函数。

在折射透镜口径范围内的透镜透过率函数为

$$t(x,y) = \exp\left(-jk \frac{x^2 + y^2}{f_{\text{len}}}\right). \quad (9)$$

如图2所示,折射透镜紧靠光子筛,假设入射光为平行光,入射光首先透过折射透镜,然后经光子筛衍射成像。

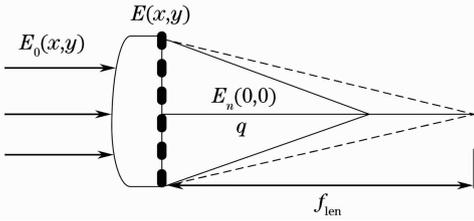


图2 成像模型

Fig. 2 Imaging model

入射平行光复振幅为 $E_0(x,y)$, 根据透镜的透过率函数, 可以得出透镜后表面处的复振幅为

$$E(x,y) = E_0(x,y)t(x,y) = E_0(x,y) \exp\left(-jk \frac{x^2 + y^2}{2f_{\text{len}}}\right). \quad (10)$$

由(10)式, 平行光经透镜相位调制成为会聚球面波入射到光子筛表面, 由于小孔尺寸很小, 单个小孔上的相位延迟近似相同, 忽略振幅常数 $E_0(x,y)$, 光子筛单孔入射光的相位延迟 $L_n(x_n, y_n) = -\frac{r_n^2}{2f_{\text{len}}}$, $g_n = -\frac{x_n}{f_{\text{len}}}$, $h_n = -\frac{y_n}{f_{\text{len}}}$, 代入(10)式得

$$E_n(0,0) = 2N_f A_n \exp\left[jk\left(\frac{r_n^2}{2q}\right)\right] \text{Jinc}\left(\frac{ka_n R_n}{q}\right), \quad (11)$$

式中 $q' = (q^{-1} - f_{\text{len}}^{-1})^{-1}$ 。根据上式即可计算折衍混合系统中光子筛单孔沿光轴方向的复振幅分布, 所

有小孔复振幅线性叠加就得到整个光子筛的复振幅分布, 最后计算出沿光轴方向的光强分布。

3 设计与仿真

设计参数: 系统总焦距 $f_{\text{ach}} = 60 \text{ mm}$; 口径 $D = 20 \text{ mm}$; 波长 $\lambda_F = 486.1 \text{ nm}$, $\lambda_d = 587.6 \text{ nm}$, $\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$ 。折射透镜玻璃材料采用 ZF4 ($n_d = 1.728251$, $V_d = 28.3239$), 根据(6)式和(7)式分别求得光子筛焦距 $f_{\text{ps}} = 552.2471 \text{ mm}$, 透镜焦距 $f_{\text{len}} = 67.3134 \text{ mm}$ 。对于中心波长, 根据 Kipp 等^[1]提出的模型, 计算得光子筛总环带数为 308, 小孔均匀分布, 最小孔直径为 $24.85 \mu\text{m}$; 折射透镜凸面的曲率半径为 49.0211 mm , 透镜厚度为 3 mm 。这样, 系统的参数就完全确定了。

在设计折衍混合系统基础上, 根据(11)式进行了成像特性分析, 仿真实验主要研究了不同波长光波 ($\lambda_F = 486.1 \text{ nm}$, $\lambda_d = 587.6 \text{ nm}$, $\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$) 入射时沿光轴方向的光强分布情况, 从而确定其实际的焦平面位置。如图3所示, 横坐标为像面到光子筛的距离, 纵坐标为归一化光强。入射光 $\lambda_d = 587.6 \text{ nm}$ 时, $f_{\text{ach}_d} = 60 \text{ mm}$; $\lambda_F = 486.1 \text{ nm}$ 时, $f_{\text{ach}_F} = 59.8 \text{ mm}$; $\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$ 时, $f_{\text{ach}_C} = 59.8 \text{ mm}$ 。由结果可知, 消色差波长之间焦距相等; 消色差波长与中心波长相比, 焦距的相对误差为 0.33% 。

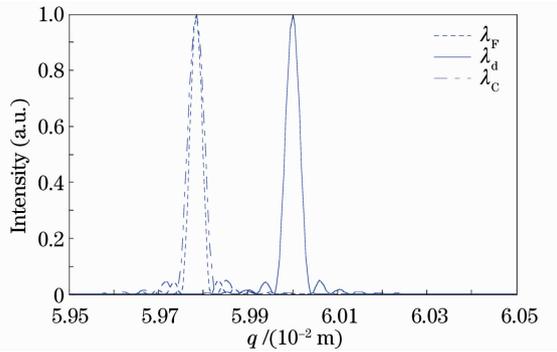


图3 光子筛-透镜组合归一化光强沿光轴分布

Fig. 3 Axial normalized intensity of photon sieve-lens combination

同时, 对只有光子筛聚焦成像时光强沿光轴方向的分布进行了模拟, 为了使单个光子筛与折衍混合系统在中心波长处具有相同的焦距, 入射光波设定为半径 67.3134 mm (即透镜焦距) 的会聚球面波。如图4所示, 入射光 $\lambda_d = 587.6 \text{ nm}$ 时, $f_{\text{ps}_d} = 60 \text{ mm}$; $\lambda_F = 486.1 \text{ nm}$ 时, $f_{\text{ps}_F} = 74.9 \text{ mm}$; $\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$ 时, $f_{\text{ps}_C} = 52.9 \text{ mm}$ 。由结果可知, 只有光子筛成像时, 焦距随着波长的增加而减小, 近似为

反比关系,表明了光子筛严重的色散特性,并且与正折射透镜相反。 $\lambda_F = 486.1 \text{ nm}$ 时,焦距相对误差为24.83%, $\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$ 时,焦距相对误差为11.83%。

通过比较图3和图4,可以得出:光子筛-透镜组合在消色差波长处焦距相同,达到消色差目的;消色差波长与中心波长处的焦距虽然仍然存在误差,但是已经大大减小,具有一定校正二级光谱的能力。同时,与多波长光子筛^[7]相比,在焦平面附近不存在多个聚焦平面,光强分布集中,利用率更高。

为了进一步研究此系统的成像特性,本文模拟了聚焦光斑光强分布。如图5(a)和(b),可以看出对于消色差波长 $\lambda_F = 486.1 \text{ nm}$ 和 $\lambda_C = 656.3 \text{ nm}$,在

焦平面处,二者的聚焦光斑几乎相同,完全达到消色差设计的目的。

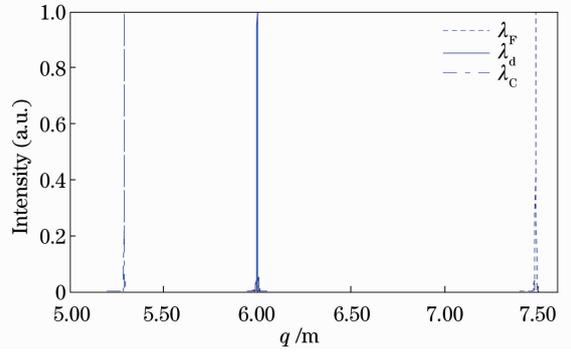


图4 只有光子筛时,归一化光强沿光轴分布

Fig. 4 Axial normalized intensity with photon sieve only

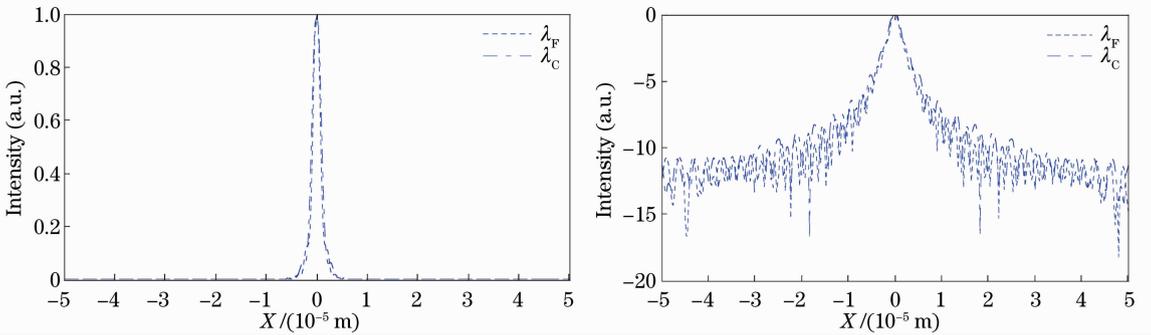


图5 焦面处光强分布。(a)归一化光强分布;(b)归一化光强对数分布

Fig. 5 Intensity distribution at focal plane. (a) Normalized intensity distribution;

(b) normalized intensity logarithmic distribution

为了确定本设计的有效光谱范围,计算了中心波长 $\lambda = 587.6 \text{ nm}$,带宽 $\Delta\lambda$ 分别为 $\pm 5 \text{ nm}$ 和 $\pm 10 \text{ nm}$ 时光子筛-透镜组合归一化光强沿光轴的分布。如图6(a)所示,带宽为 $\pm 5 \text{ nm}$ 时,焦平面处边缘波长的归一化光强约为0.9;如图6(b)所示,带宽为 $\pm 10 \text{ nm}$ 时,焦平面处边缘波长的归一化光强约为0.6。根据瑞利判据可知,成像光谱带宽优于 20 nm 。而单个光子筛的带宽可由下式计算^[2]:

$$\Delta\lambda \approx (2\lambda^2 f)/D^2, \quad (12)$$

式中 λ 为中心波长, f 为光子筛焦距, D 为光子筛口径。计算可得本设计中使用的光子筛的带宽仅为 0.95 nm ,远小于光子筛消色差设计后的带宽。

同时,在中心波长处,分别计算了光子筛-透镜组合和波带片-透镜组合在焦面处的光强分布,如图7(a)和(b)。在相同的加工条件下,即最小特征尺寸相同($24.85 \mu\text{m}$),光子筛-透镜组合的聚焦光斑更小,分辨率更高。

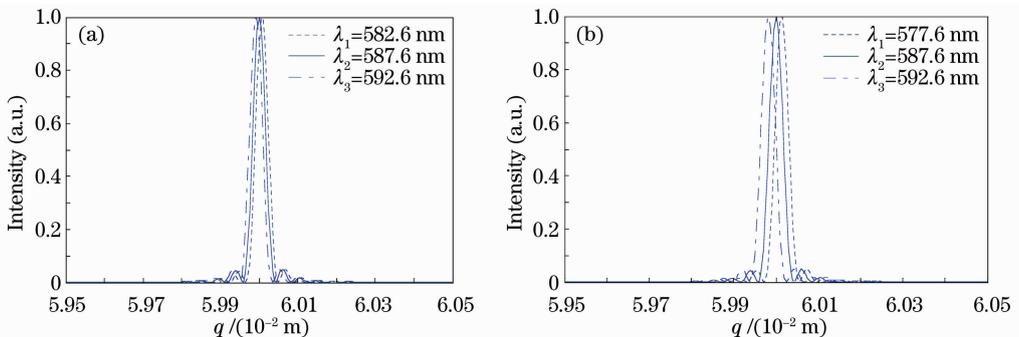


图6 带宽分别为(a) $\pm 5 \text{ nm}$ 和(b) $\pm 10 \text{ nm}$ 时归一化光强沿光轴分布

Fig. 6 Axial normalized intensity with bandwidths of (a) $\pm 5 \text{ nm}$ and (b) $\pm 10 \text{ nm}$, respectively

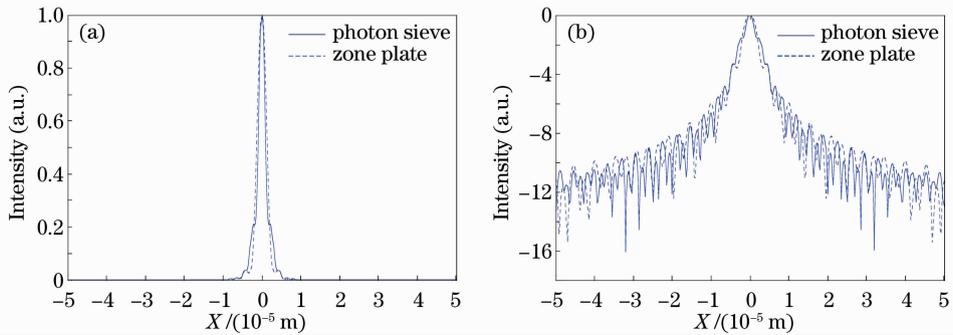


图7 光子筛-透镜组合和波带片-透镜组合焦点处光强分布比较。(a)归一化光强分布;(b)归一化光强对数分布

Fig.7 Comparison of the focal plane intensity distribution of photon sieve-lens combination and zone plate-lens combination. (a) Normalized intensity distribution; (b) normalized intensity logarithmic distribution

由于本方法采用的是单透镜和光子筛的组合,二级光谱校正能力有限。如果采用两块不同材料的透镜组取代单透镜,进行复消色差设计^[12],将进一步拓宽成像光谱范围。折射透镜不可避免地会引入其他像差(如球差、慧差等),但是由于光子筛的像差特性尚无定论,二者之间的像差补偿问题仍需进一步探索。

4 结 论

通过以上研究表明,光子筛色差明显,本文提出的折衍混合消色差方法应用与光子筛具有相反色散特性的折射透镜,能够有效地扩展其成像光谱范围。同时,本方法采用的是普通光子筛,因此不会额外增加光子筛加工工艺难度。并对应用该方法设计的折衍混合系统进行了成像模拟,从模拟结果可以看出,在消色差波长处完全实现了光子筛消色差设计,并且消色差波长与中心波长的焦距之差减小到0.33%,有一定的二级光谱校正能力,有效成像光谱范围从0.95 nm增加到20 nm。该系统保留了光子筛优越的聚焦性能,在相同的最小加工尺寸条件下,比传统折衍混合系统分辨率更高,成像质量更佳。

参 考 文 献

- 1 L. Kipp, M. Skibowski, R. L. Johnson *et al.*. Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves[J]. *Nature*, 2001, **414**(6860): 184~188
- 2 G. Andersen, D. Tullson. Broadband antihole photon sieve telescope[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(6): 3706~3708

- 3 Kincade, Kathy. Photon sieves enhance weapons vision[J]. *Laser Focus World*, 2004, **40**(2): 34~37
- 4 R. Menon, D. Gil. Photon-sieve lithography[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(2): 342~345
- 5 Cheng Guanxiao, Hu Chao. X-ray Zernike apodized photon sieves for phase-contrast microscopy[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(8): 080703
- 程冠晓, 胡超. X射线相称成像光子筛[J]. *物理学报*, 2011, **60**(2): 080703
- 6 H. H. Chung, N. M. Bradman, M. R. Davidson *et al.*. Dual wavelength photon sieves[J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(11): 119001
- 7 C. X. Zhou, X. C. Dong, L. F. Shi *et al.*. Experimental study of a multiwavelength photon sieve designed by random-area-divided approach[J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(8): 1619~1623
- 8 T. Stone, N. George. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. *Appl. Opt.*, 1988, **27**(14): 2960~2971
- 9 Q. Cao, J. Jahns. Focusing analysis of the pinhole photon sieve: individual far field mode[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(12): 2387~2393
- 10 Yu Bin, Peng Xiang, Niu Hanben. Binary optic dual-band infrared imaging spectrometer[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(1): 63~65
- 余斌, 彭翔, 牛憨笨. 二元光学双波段红外成像光谱仪[J]. *光子学报*, 2005, **34**(1): 63~65
- 11 Zhao Qiuling, Wang Zhaoqi, Quan Wei *et al.*. Refractive/diffractive zoom system for measurement of wave aberrations of the human eye with the use of a polychrome Hartmann wave-front sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(3): 342~345
- 赵秋玲, 王肇圻, 全薇等. 用于复色哈特曼人眼波像差测量的折/衍混合调焦系统[J]. *光子学报*, 2004, **33**(3): 342~345
- 12 Zeng Jiyong, Jin Guofan, Wang Mingqiang *et al.*. Hybrid diffractive-refractive apochromatic telescope objectives design using PWC method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(10): 1569~1572
- 曾吉勇, 金国藩, 王民强等. 折衍混合复消色差望远镜设计的PWC方法[J]. *光子学报*, 2006, **35**(10): 1569~1572

栏目编辑: 韩峰