

光子筛成像技术研究进展

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 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 光子筛是一种新型的纳米成像元件,具有高分辨、质量轻、体积小及易复制的优点,对于成像系统轻量化以及极短波谱区成像具有重要意义。根据解决的具体问题对国内外光子筛研究成果进行分类,从成像对比度的增加、衍射效率的提高、宽光谱成像和高数值孔径光子筛设计等方面详细介绍了光子筛的发展现状,并针对这四方面研究内容分析了目前尚需解决的技术问题。这些问题仍然是今后光子筛研究的主要方向。指出光子筛实用化面临的其他客观存在的问题,并展望了光子筛在天文望远镜、显微镜和光刻等领域的应用前景。

关键词 光学器件;光子筛;成像对比度;衍射效率;宽光谱成像;高数值孔径

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.090007

Research Progress of Photon Sieve Imaging Technology

He Yu^{1,2} Zhao Lixin¹ Tang Yan¹ Chen Mingyong¹ Zhu Jiangping^{1,2}¹ Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China)² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Photon sieve is a new nano-imaging device with the advantages of high resolution, light weight, small size and easy to duplicate. It has great significance for the lightweight imaging system and imaging in very short spectral region. The research results of photon sieve are classified based on problems solved. The development status of photon sieve is introduced, including the increase of image contrast, diffraction efficiency, wide spectral imaging, and design of high numerical aperture photon sieve. The technical problems to be solved of these four aspects are analyzed. It is believed that the main directions are also these problems' resolution. Other problems of photon sieve application are also pointed out. The applying prospects in telescope, microscope, lithography and other areas of photon sieve are addressed.

Key words optical devices; photon sieve; imaging contrast; diffraction efficiency; wide spectral imaging; high numerical aperture

OCIS codes 230.0230; 090.1995

1 引言

光子筛由德国科学家 Kipp 等^[1]于 2001 年首次提出,采用微纳透光小孔代替波带片中的透光环带,设计更为灵活。和传统的波带片相比,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情况下,光子筛能够实现更高的分辨力;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,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广阔。为了光子筛尽早实用化,国内外学者进行了深入研究。本文对光子筛的研究现状及存在的问题进行详细介绍。

收稿日期: 2012-04-19; **收到修改稿日期:** 2012-05-17; **网络出版日期:** 2012-06-26

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方面的研究。

E-mail: heyufrog@sina.com

导师简介: 赵立新(1971—),男,副研究员,主要从事微电子技术和生物芯片检测等方面的研究。

E-mail: lxzh999@sina.com

2 光子筛成像技术研究现状

光子筛提出后,研究者建立了光子筛衍射成像模型,并对其应用进行了深入的研究。其中,Andersen等^[2]提出光子筛在超大口径天文望远镜中的应用,并正在进行空基对地监视光子筛望远镜项目的研究工作,拟建立一个基于光子筛(宽 1.524 m,重约 454 g)的近地轨道空基监视望远镜,可看清地面上的文字。受昆虫复眼的启发,研究人员将具有不同分辨力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^[3]。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(NA)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,在曝光光源波长 $\lambda = 400$ nm,光子筛数值孔径为 0.9 的条件下,实现了 200 nm 的光刻分辨力。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。

光子筛成像实用化面临的主要问题有:光子筛成像像面 0 级背景光和 1 级衍射光重叠在一起,对比度低;采用小孔替代透光环带,减少了光源的利用率,衍射效率低;光子筛作为衍射元件,色差明显,成像带宽很窄;光子筛设计中量近似的不精确性。围绕这些问题,人们进行了一系列深入研究,并取得了相应的成果。

2.1 成像对比度的增加

增加光子筛成像的对比度,就必须将 0 级背景光和 1 级衍射光分离。为此,光子筛离轴成像技术得到研究。光子筛成像光路如图 1 所示,离轴光源照射到目标物体上,经光子筛衍射成像把 0 级背景光和 1 级衍射光分离,CCD 只接收有用的 1 级成像光信号,这样就避免了背景噪声的影响,大大提高了成像清晰度^[6]。

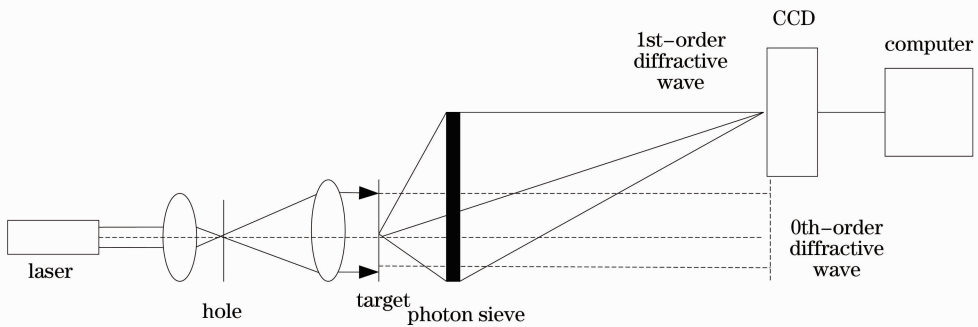


图 1 光子筛离轴成像

Fig. 1 Off-axis imaging of photon sieve

此外,反射型光子筛也能增加成像对比度。在反射型光子筛中,小孔具有高反射率,而周围介质对光具有强吸收性,如图 2 所示。入射光以一定角度照射到光子筛上,经光子筛后将直接反射光(即 0 级背景光)和各级衍射光分开^[7]。实质上,反射型光子筛也是利用离轴成像实现各衍射级次的分离。

虽然离轴成像技术能显著提高成像对比度,但是也不可避免会带来离轴像差。同时,离轴成像在相同小孔尺寸下减小了数值孔径,降低了最大分辨力。

通过加入窗函数调制各环带上的小孔数量,可以提高信噪比,增加成像对比度。在光子筛的设计中,也有人采用优化设计方法调制各环带上小孔数量,优化函数为

$$\min \int_{r=0}^{\infty} [P(r) - \delta(r)]^2 2\pi r dr, \quad (1)$$

式中 $P(r)$ 为光子筛的点扩展函数,是关于光子筛小孔数量的函数; $\delta(r)$ 为理想点扩展函数; r 为焦面极坐标。研究表明,通过优化设计的光子筛能够更好地抑制旁瓣,能在一定程度上提高成像对比度^[8]。

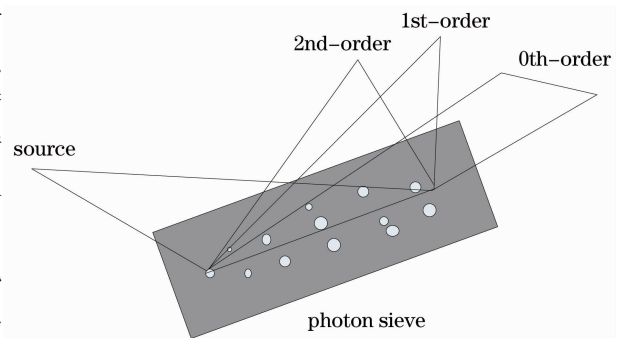


图 2 反射型光子筛

Fig. 2 Reflective photon sieve

2.2 衍射效率的提高

普通的振幅型光子筛的透射率不到 35%，光能利用率很低。为此，人们提出了相位型光子筛^[9~11]和复合型光子筛^[12,13]。

相位型光子筛应用透光小孔取代对应波带片结构的透光环带和不透光环带，通过采用圆槽或者圆柱形结构，让透光环带和不透光环带上的小孔存在 π 的相位延迟，这样光经过小孔对焦点处光场都有正的贡献。与振幅型光子筛相比，相位型光子筛虽不能提高光子筛的聚焦性能，但是大大增加了光能利用率，约为 4 倍。由于目前制作工艺存在一定的不稳定性，刻蚀深度与设计值存在 10% 的偏差，需要进一步完善。

复合型光子筛用波带片环带取代部分光子筛小孔，在提高透射率的同时，也大幅度减少了光子筛的制作数据量，如图 3 所示。复合型光子筛内环由 1 级衍射光子筛组成，外环由 3 级衍射波带环组成，其中内环光子筛实现信噪比的提高，外环透射率比普通光子筛的透光小孔高，同时数据量相对较少，有利于制作大孔径光子筛。这种光子筛已经在光子筛激光直写、轻质成像系统实验中采用。但是，这种光子筛与波带片的结合是以牺牲光子筛的部分优点为代价的，波带环不可避免地影响成像质量，这时就需根据实际需求找到合适的平衡点，从而获得满意的成像效果。

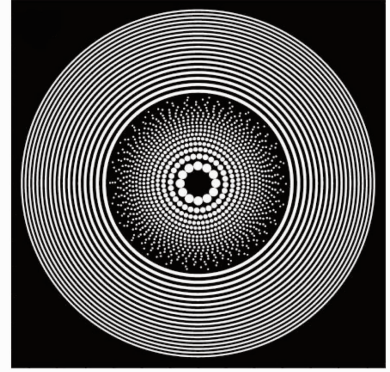


图 3 复合型光子筛

Fig. 3 Composite photon sieve

2.3 宽光谱成像

光子筛是一种衍射光学元件，因而对波长变化敏感，光子筛的入射波长带宽可表示为^[2]

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

式中 λ 为中心波长， f 为光子筛焦距， D 为光子筛口径。当 $\lambda = 532.1 \text{ nm}$ ， $f = 715 \text{ mm}$ ， $D = 150 \text{ mm}$ 时， $\Delta\lambda$ 仅为 0.06 nm 。可见，普通光子筛并不适用于宽光谱成像。多波长光子筛和光子筛消色差设计能够有效拓展光子筛的成像光谱范围。

多波长光子筛是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。区域的划分是该种光子筛设计的关键。区域划分如图 4 所示，不同的颜色对应不同的波长区域。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^[14]。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。

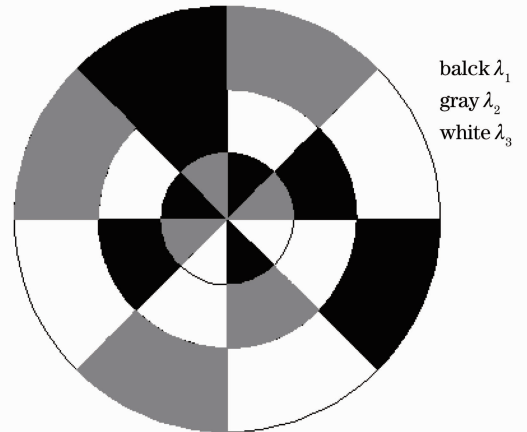


图 4 多波长光子筛区域划分

Fig. 4 Area partition of multi-wavelength photon sieve

在光子筛成像系统中加入其他光学成像元件（衍射面、反射面或者折射透镜），可以达到补偿光子筛色差的目的。美国进行了基于光子筛的近地轨道空基监视望远镜的研制，如图 5 所示，光子筛作为主镜，加入衍射光学元件 (DOE) 补偿光子筛的色差，从而将成像波长带宽扩展到 40 nm ^[2,14]。

2.4 高数值孔径光子筛设计

目前光子筛设计大多是基于光子筛标量衍射模型（傍轴和非傍轴近似），但是当数值孔径增大，小孔特征尺寸与入射波长相近甚至远小于入射波长时，标量近似不再适用。这时光子筛的设计必须基于严格的矢量衍射理论，即^[15]

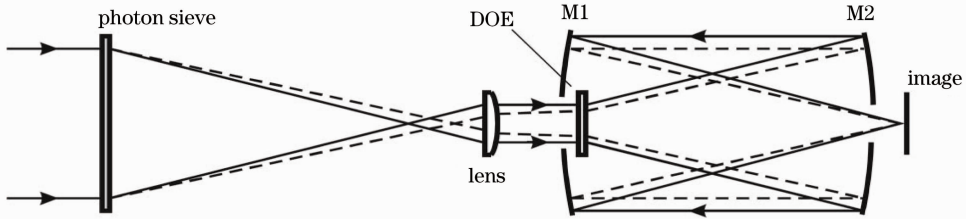


图5 宽光谱光子筛天文望远镜

Fig. 5 Broadband photon sieve telescope

$$U_x(x, y, z) = \int_0^{\infty} \frac{1}{2} dJ_1\left(\frac{1}{2}dk_p\right) J_0(pk_p) \exp(iz\sqrt{k^2 - k_p^2}) dk_p, \quad (3)$$

$$U_y(x, y, z) = 0, \quad (4)$$

$$U_z(x, y, z) = -\frac{ix}{p} \int_0^{\infty} \frac{dk_p}{2\sqrt{k^2 - k_p^2}} \times J_1(dk_p) \times J_1(pk_p) \exp(iz\sqrt{k^2 - k_p^2}) dk_p, \quad (5)$$

式中 U_x 、 U_y 、 U_z 为光场复振幅各分量； d 为小孔直径； J_0 、 J_1 分别为零阶、一阶贝塞尔函数； $k = 2\pi/\lambda$ ， λ 为波长； $k_p = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}$ ， k_x 、 k_y 为 x 、 y 方向的波数； $p = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。与标量衍射理论相比，矢量衍射存在 U_z 分量，并且光场分量的表达式是积分形式，没有严格的数值解，在设计中只能通过优化算法找出最优解，如何选取合适的优化算法在较短的计算时间得出满意的结果有待进一步完善。

同时，时域有限差分法(FDTD)是一种研究光场分布的十分有效的数值分析方法，可以考虑用于研究光子筛成像，不过计算量极其庞大，至今未见有相关研究成果报道。另外，人们也对光子筛的波导效应、方孔光子筛的成像模型和分形光子筛^[16]等做了相应的研究。

3 发展趋势及应用前景展望

在今后的研究中，光子筛的低成像对比度、低衍射效率、窄带宽以及标量近似的不精确性仍将是主要问题。另外，光子筛还有很多特性尚需进一步研究，如焦深的影响因素、像差的表征与补偿方法、光源偏振特性对高数值孔径光子筛成像的影响以及成像的可逆性等问题。在光子筛的实际应用中，这些都必须加以考虑。

虽然光子筛的理论还不成熟，但是它在实际应用中的优势已显露无遗，如光子筛作为主镜的天文望远镜、光子筛阵列激光直写系统和光子筛制作的全景武器视觉系统。根据相应需求，可以选择性地重点关注某一影响因素，比如在激光直写系统中，光子筛是对单一波长聚焦，就不用考虑色差问题，只需重视高数值孔径的实现，适当考虑提高衍射效率。随着光子筛研究的深入、新的制作工艺的使用以及新型光源的应用，光子筛由于其优越的聚焦性能和优良的成像质量，必将在聚焦扫描、显微成像、光刻和轻质天文成像系统中广泛使用。此外，有可能将光子筛集成到基片上形成集成光电处理单元，构成微纳光机电集成系统，有效提高器件性能，降低成本。

4 结 论

根据光子筛实用化面临的主要问题，从成像对比度的增加、衍射效率的提高、宽光谱成像和高数值孔径光子筛设计四方面总结了国内外光子筛研究已取得的成果以及仍然存在的不足之处，并对光子筛良好的应用前景做了展望。通过本文的总结，希望对光子筛的研究现状有比较全面的了解，对光子筛仍待解决问题的研究有一定的启发。

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 Geoff Andersen, Drew Tullson. Broadband antihole photon sieve telescope[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(6): 3706~3708

- 3 Kathy Kincade. Photon sieves enhance weapons vision[J]. *Laser Focus World*, 2004, **40**(2): 34~37
- 4 Rajesh Menon, Dario 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射线相衬成像光子筛[J]. *物理学报*, 2011, **60**(8): 080703
- 6 Gao Zhong, Ma Junxian, Zhou Chongxi *et al.*. Off-axis imaging of photon sieve with large aperture[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(9): 25~29
高仲, 马君显, 周崇喜等. 大口径多孔透镜离轴成像研究[J]. *光电工程*, 2007, **34**(9): 25~29
- 7 Matthias Kalläne, Jens Buck, Sönke Harm *et al.*. Focusing light with a reflection photon sieve[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(13): 2405~2407
- 8 Mosong Cheng, Chenggang Zhou. Optimizing photon sieves to approach Fresnel diffraction limit via pixel-based inverse lithography[J]. *J. Vac. Sci. Technol.*, 2011, **29**(4): 041002
- 9 Wenbo Jiang, Song Hu, Lixin Zhao *et al.*. Phase photon sieves[J]. *J. Computerized and Theoretical Nanoscience*, 2010, **7**(1): 232~236
- 10 Wenbo Jiang, Song Hu, Lixin Zhao *et al.*. Design and application of phase photon sieve[J]. *Optik*, 2010, **121**(7): 637~641
- 11 Hou Changlun, Xu Jianfeng, Bai Jian *et al.*. Binary photon sieve[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 484~486, 505
侯昌伦, 徐建锋, 白剑等. 二元光子筛[J]. *红外与激光工程*, 2011, **40**(3): 484~486, 505
- 12 Pan Yiming, Xie Changqing, Jia Jia. Composite photon sieve and its application in large aperture imaging [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(4): 88~92
潘一鸣, 谢常青, 贾佳. 复合型光子筛及其在大口径成像中的应用 [J]. *光电工程*, 2010, **37**(4): 88~92
- 13 Changqing Xie, Xiaoli Zhu, Hailiang Li *et al.*. Feasibility study of hard-X-ray nanofocusing above 20 keV using compound photon sieves[J]. *Opt. Lett.*, 2010, **35**(23): 4048~4050
- 14 Hsiu-Hsin Chung, Narada M. Bradman, Mark R. Davidson *et al.*. Dual wavelength photon sieves[J]. *Opt. Engng.*, 2008, **47**(11): 119001
- 15 Jiang Wenbo, Hu Song, Zhao Lixin *et al.*. Design and analysis of amplitude photon sieves based on vector diffraction theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 428~432
蒋文波, 胡松, 赵立新等. 基于矢量衍射理论的振幅型光子筛的设计[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 428~432
- 16 Fernando Giménez, Juan A. Monsoriu, Walter D. Furlan *et al.*. Fractal photon sieve[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(25): 11958~11963