

准相位型光子筛设计

唐 燕 胡 松 朱江平 何 渝

(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 提出了一种准相位型光子筛。该准相位型光子筛通过改变暗环上小孔直径与带宽的比值,对焦点处的相位分布进行调制,使通过亮环和暗环上小孔的光波在焦点处发生相长干涉,生成聚焦光斑。该准相位型光子筛无需对基底进行特殊处理,即可完成相位型光子筛的制作,降低了加工难度。和普通振幅型光子筛相比,在相同最小加工尺寸条件下,准相位型光子筛具有较大的数值孔径,可降低聚焦光斑尺寸。并且,和多区光子筛相比,在同样的最小加工尺寸及数值孔径的条件下,准相位型光子筛光斑尺寸及质量均优于对方。为大数值孔径光子筛设计提供了一种新的设计方法。

关键词 衍射;光子筛;相位;聚焦特性

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.1022007

Design of Quasi-Phase Photon Sieve

Tang Yan Hu Song Zhu Jiangping He Yu

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

Abstract A design of quasi-phase photon sieve is proposed. The pinholes of the quasi-phase photon sieve distributed in black and white plate zones have different ratios of diameter to zone width to obtain π phase shift, so that all of them have positive contribution to the field value at the desired focal point. The quasi-phase photon sieve does not need to process the rest and reduce the technology difficult of traditional phase photon sieve. Compared with the traditional photon sieve, the quasi-phase one with the same specific minimum feature size has bigger numerical aperture and smaller focal spot size. Furthermore, compared with the multi-region photon sieve, with the same specific minimum feature size and numerical aperture, the quasi-phase photon sieve has smaller focal spot size and better focus characteristics. The quasi-phase photon sieve provides a new way for the design of photon sieve with high numerical aperture.

Key words diffraction; photon sieve; phase; focus characteristics

OCIS codes 050.1940; 050.1970; 050.5080

1 引言

2001年 Kipp 等^[1]在《自然》杂志上提出了光子筛的概念。光子筛作为一种新型衍射元件,以大量随机分布的小孔代替传统波带片上的亮环,不但具有传统衍射元件具有的体积小、重量轻、可完成极短波长聚焦等特性,而且和传统波带片相比,能够在相同的最小加工尺寸条件下,获得更高的分辨力以及图像对比度,可广泛用于高分辨力成像、纳米光刻、极大天文望远镜等多个研究领域。

国内外研究人员针对光子筛结构设计进行了大量的研究,进一步提高了光子筛的分辨力,扩展了其

应用范围。Chen 等^[2]提出了超大面积多区域光子筛设计,通过设置多个区域,提高光子筛的数值孔径。Andersen^[3]提出了 antihole photon sieve 的概念。Xie 等^[4,5]研究了不同窗口以及波导效应对光子筛聚焦特性的影响,报道了对变趾硬 X 射线光子筛成像分辨力的研究成果。Liu 等^[6]设计出了分形光子筛,该结构的光子筛具有较大的焦深及较小的色差,有望在自适用光学中得到广泛应用。蒋文波等^[7]对基于矢量衍射理论的振幅型光子筛设计进行了研究。Kallane 等^[8]研究了反射式光子筛的聚焦特性。程冠晓等^[9]报道了变趾光子筛在显微术中的应用。魏来等^[10,11]

收稿日期: 2012-03-31; **收到修改稿日期:** 2012-05-25

基金项目: 国家自然科学基金(61076099,60906049)资助课题。

作者简介: 唐 燕(1982—),女,博士,助理研究员,主要从事微电子专用设备关键技术方面的研究。

E-mail: ty0513@163.com

对光子筛在软 X 射线光谱仪中的应用进行了研究。

衍射效率低是困扰光子筛应用的主要问题,而目前针对光子筛的结构设计的研究大多局限于振幅型光子筛,对相位型光子筛的研究较少。侯昌伦等^[12]提出了二元光子筛设计。Jiang 等^[13]对相位型光子筛设计进行了研究,然而,这种相位型光子筛需要在基底上加工出具有 π 相位差的小槽或者凸台,给光子筛加工带来了巨大的难度。

本文提出一种准相位型光子筛,利用传统平面微细结构加工技术,通过改变奇偶环带上小孔直径与对应波带带宽之间的比值,使得奇偶环带上小孔的衍射光场在焦点处发生相长干涉,提高光子筛的衍射效率。该准相位型光子筛无需对基底进行特殊处理,在不增加光子筛加工难度的情况下提高了其衍射效率。并且,由于改变了小孔直径与波带带宽的比值,该准相位型光子筛和传统振幅型光子筛相比,在同样最小加工尺寸的条件下,将具有较大的数值孔径,可有效降低聚焦光斑尺寸。

2 理论分析

光子筛作为一种衍射光学元件,其成像的基本原理是各环带上的小孔在 $Z=0$ 的平面上发生衍射,并在 $Z>0$ 的空间内发生相干叠加,在焦点处发生相长干涉生成聚焦光斑。光子筛每个小孔在焦点处的光场分布由振幅和相位两部分组成,奇偶环带上的小孔由于中心位置不同,具有 π 相位差。为了使得奇偶环带上的小孔在焦点处的光场发生相长干涉,只能通过改变相位或振幅的手段对衍射光场进行调制。传统相位型光子筛通过对基底进行加工,改变光子筛初始相位,获得 π 相位差,而对基底的加工无疑增加了光子筛的制作难度。本文提出的准相位型光子筛通过改变振幅对光子筛小孔焦点处的光强进行调制,在不增加制作难度的情况下,实现奇偶环带上小孔的相长干涉,提高光子筛的衍射效率。

单个小孔在焦点处的光场分布由振幅和相位两部分组成,可以表示为

$$U_n(0,0) = A_n(0,0)\exp[jkB_n(0,0)]. \quad (1)$$

光子筛上每个小孔的衍射场分布与其中心位置和小孔直径有密切的关系。当小孔中心位于亮环上时,其位置可以表示为

$$r_n^2 = 2nf\lambda + n^2\lambda^2, \quad (2)$$

式中 n 为亮环序号, $n = 1, 2, 3, \dots$, λ 为入射光波长, $f^{-1} = p^{-1} + q^{-1}$, p, q 分别为点光源距光子筛的距离以及焦距,当入射光为平面波时, $p = \infty$ 。此时,小

孔衍射场表达式中

$$\begin{cases} B_n(0,0) = n\lambda \\ \exp[jkB_n(0,0)] = 1 \end{cases} \quad (3)$$

当光子筛上小孔位于暗环上时,其中心位置可以表示为

$$r_n^2 = 2(n+0.5)f\lambda + (n+0.5)^2\lambda^2. \quad (4)$$

此时,小孔衍射场表达式中

$$\begin{cases} B_n(0,0) = (n+0.5)\lambda \\ \exp[jkB_n(0,0)] = -1 \end{cases} \quad (5)$$

根据光子筛成像特性^[14,15],单个小孔在焦点处的衍射场振幅可以表示为

$$A_n(0,0) \propto \frac{d_n}{\omega_n} J_1\left(\frac{\pi}{2} \frac{d_n}{\omega_n}\right), \quad (6)$$

式中 ω_n 为小孔中心所处环带带宽, $\omega_n = \lambda f / 2r_n$, J_1 为一阶贝塞尔函数。由(6)式可以看到,衍射场振幅与小孔直径和对应波带带宽之比满足贝塞尔函数关系,通过改变小孔直径与波带片带宽之比,可以获得不同的振幅分布。

令 $x = d_n/\omega_n$, 函数 $J_1\left(\frac{\pi}{2}x\right)$ 如图 1 所示。为保

证光子筛衍射效率,振幅 $A_n(0,0)$ 通常取为极大值,从图 1 中可以看到,当 $d_n/\omega_n \approx 1.5, 5.5, 9.5, \dots$ 时, $A_n(0,0)$ 为正极大,而 $d_n/\omega_n \approx 3.5, 7.5, \dots$ 时, $A_n(0,0)$ 为负极大。

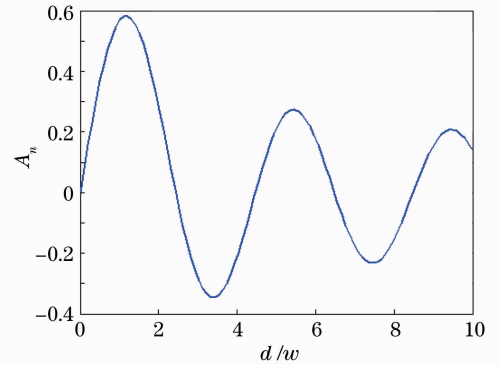


图 1 焦点处小孔衍射场振幅与孔径关系示意图
Fig. 1 Relation between the amplitude and pinhole diameter on the focal point

由(1)式可以看到,光子筛上小孔在焦点处的光场分布为振幅因子 $A_n(0,0)$ 与相位因子 $B_n(0,0)$ 项之积,当 $A_n(0,0)$ 取不同符号时,相当于在相位因子 $B_n(0,0)$ 中添加了 π 的相位差。因此,可以通过改变小孔直径与波带带宽的比值实现相位调制。根据这一原理,通过改变中心亮环或暗环上的小孔直径与波带带宽之比,可以使其衍射场在焦点处具有相同的相位值,从而产生相长干涉,生成高质量聚焦光

斑。这里将这种通过改变小孔直径与波带带宽比值实现相位调制的光子筛称为准相位型光子筛。

准相位型光子筛设计过程如下：

在亮环区,小孔直径与波带片带宽的比值为 1.5,小孔中心位置 r_n ,小孔直径 d_n ,小孔数量 S_n 分别为

$$\begin{cases} r_n^2 = 2nf\lambda + n^2\lambda^2 \\ d_n = 1.5 \times \frac{f\lambda}{2r_n} \\ S_n = \frac{2\pi r_n d_n}{d_n^2} \end{cases}, \quad (7)$$

式中 f 为光子筛焦距, λ 为入射光波长。 $n = 1, 4, 7, \dots, k-3, k$ 。 k 为亮环上小孔达到最小加工尺寸时对应的波带序数。

在暗环区,小孔直径与波带片带宽的比值为 3.5,小孔中心位置 r_m ,小孔直径 d_m ,小孔数量 S_m 分别为

$$\begin{cases} r_m^2 = 2(m+0.5)f\lambda + (m+0.5)^2\lambda^2 \\ d_m = 3.5 \times \frac{f\lambda}{2r_m} \\ S_m = \frac{4\pi r_m d_m}{d_m^2} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 $m = 2, 5, 8, \dots, k-2, k+1, k+4, \dots$ 。

由于在暗环上,小孔直径与波带带宽之比为 3.5,单个小孔光强利用率小于比值为 1.5 的小孔,为了提高光强利用率,暗环上小孔的数量为相邻亮环上小孔数量的 2 倍。

3 模拟仿真

模拟仿真中,入射光为平面波,波长为 632.8 nm,焦距为 5 mm,最小加工尺寸为 2.5×10^{-3} mm。准相位型光子筛结构中亮环上的小孔直径与带宽比为 1.5,暗环上的小孔直径与带宽比为 3.5。亮环上的小孔中心距光子筛中心的距离分别为:0.0795,0.1591,0.2105, \dots ,0.9479 mm。暗环上的小孔中心距光子筛中心的距离分别为:0.1258,0.1866,0.2319, \dots ,0.9529,0.9595,0.9661, \dots ,2.2153 mm。准相位型光子筛、普通光子筛及文献[2]所提出的多区域光子筛结构分别如图 2(a)~(c)所示。

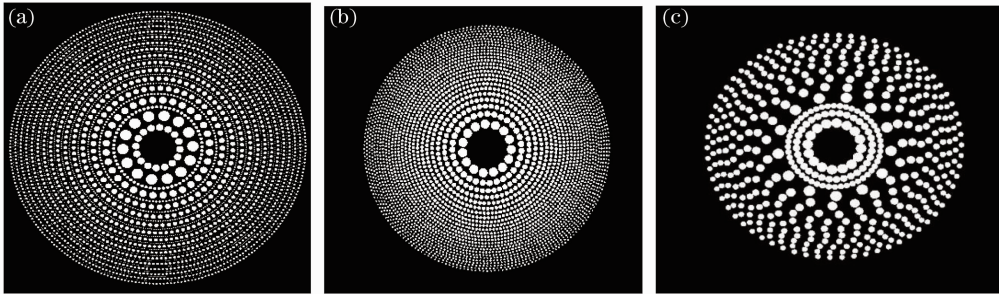


图 2 光子筛结构示意图。(a)准相位型光子筛;(b)普通光子筛;(c)多区域光子筛

Fig. 2 Structure of the photon sieves. (a) Quasi-phase photon sieve; (b) common photon sieve; (c) multi-region photon sieve

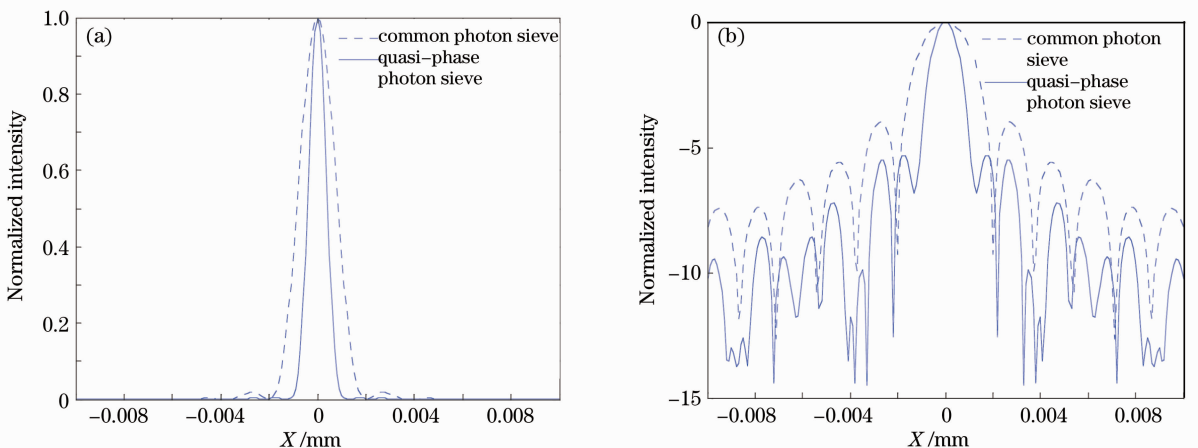


图 3 相同最小加工尺寸条件下,准相位光子筛与普通光子筛归一化光强分布

Fig. 3 Normalized intensity of the quasi-phase photon sieve and common photon sieve with the same specific minimum feature size

在相同最小加工尺寸下,所提出的准相位型光子筛与普通光子筛归一化光强分布如图3所示。图3(a)表示了光斑归一化光强分布,而图3(b)是光强归一化对数分布。从图3中可以看到,准相位型光子筛由于暗环上的相位调制,在增大数值孔径、减小光斑尺寸的同时,较好地抑制了旁瓣效应,提高了聚焦光斑质量。

为了对准相位型光子筛的聚焦能力做进一步验

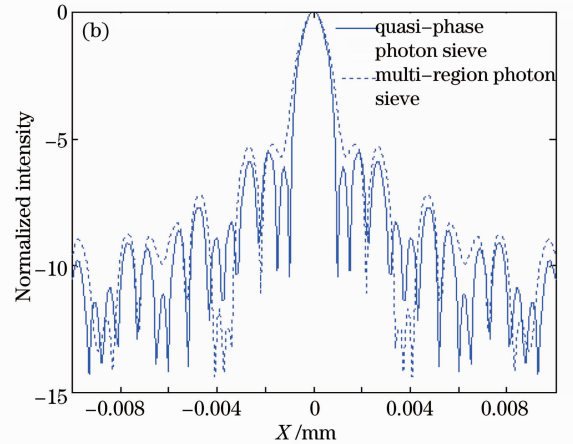
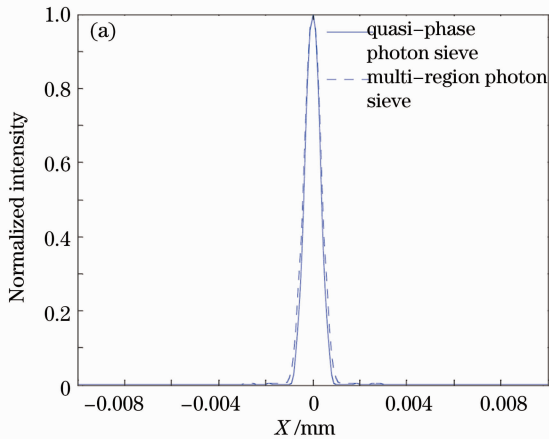


图4 准相位光子筛与多区域光子筛归一化光强分布

Fig. 4 Normalized intensity of the quasi-phase photon sieve and multi-region photon sieve

为了对准相位型光子筛的衍射效率进行验证,对准相位型光子筛与普通光子筛在入射光总能量相同情况下的光斑能量分布进行了模拟分析。假设入射光总能量相同,则入射光振幅与光子筛半径成反比,获得准相位型光子筛与普通光子筛光强分布如图5所示。通过积分得知准相位型光子筛与普通光子筛在径向上的光强积分分别为8.06,5.95。由于入射光强相同,径向上的光强积分体现了两者的衍射效率,由此可以看出,准相位型光子筛的衍射效率比普通光子筛有较大的提高。

所提出的准相位型光子筛,通过改变小孔直径与带宽的比值的方法,对相位进行调制。通过以上的分析可以看到,和传统振幅型光子筛相比,准相位型光子筛在相同的最小加工尺寸的情况下,比普通光子筛具有更高的衍射效率及数值孔径,能够减小聚焦光斑尺寸。并且在同样环带数的条件下,准相位型光子筛和多区域光子筛相比,其光斑尺寸及信噪比均占优势。

4 结 论

提出了一种新型准相位型光子筛,通过改变光子筛上小孔直径与对应环带带宽之间的比值,对通

证,将其聚焦结果与同样采用变小孔直径与波带比例思想设计的多区域型光子筛^[2]进行对比,结果如图4所示。图4(a)是两种光子筛聚焦光斑的归一化光强分布,而图4(b)是光强归一化对数分布。从图4中可以看到,在相同最小加工尺寸的情况下,两者具有相同的环带数,而准相位型光子筛的聚焦光斑尺寸小于多区型光子筛,且光斑旁瓣较小,有更好的信噪比。

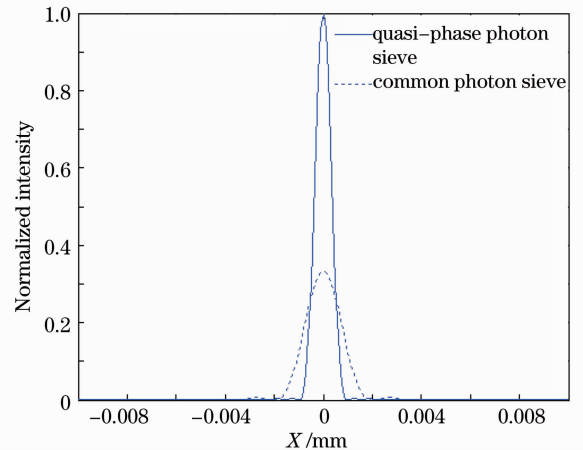


图5 准相位型光子筛与普通光子筛衍射效率对比

Fig. 5 Diffraction efficiency of the quasi-phase photon sieve and common photon sieve

过小孔的光波在焦点处的相位分布进行调制,使奇偶环带上小孔对应的光波在焦点处发生相长干涉。该准相位型光子筛降低了相位型光子筛的设计难度,可实现大数值孔径的光子筛设计。该准相位型光子筛和普通振幅型光子筛相比,在相同最小加工尺寸的情况下,具有较小的光斑及更高的衍射效率。并且,和多区域光子筛相比,在相同环带数的情况

下,准相位型光子筛聚焦光斑尺寸及质量均优于多区域光子筛。该准相位型光子筛设计结构为大数值孔径光子筛的设计提供了一条新的思路,将有效解决高质量、大数值孔径光子筛的设计问题。

参 考 文 献

- 1 L. Kipp, M. Skibowski, R. L. Johnson *et al.*. Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieve[J]. *Nature*, 2001, **414**(6860): 184~188
- 2 Zhifen Chen, Chinhua Wang, Donglin Pu *et al.*. Ultra large multi region photon sieves[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(15): 16279~16288
- 3 Geoff Andersen. Large optical photon sieve[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(22): 2976~2978
- 4 Changqing Xie, Xiaoli Zhu, Jia Jia. Focusing properties of hard X-ray photon sieves: three parameter apodization window and waveguide effect[J]. *Opt. Lett.*, 2009, **34**(19): 3038~3040
- 5 Changqing Xie, Xiaoli Zhu, Hailiang Li. Toward two dimensional nanometer resolution hard X-ray differential interference contrast imaging using modified photon sieves[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(4): 749~751
- 6 Yanjun Liu, Haitao Dai, Xiaowen Sun *et al.*. Electrical switchable phase type fractal zone plates and fractal photon sieves [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(15): 12418~12423
- 7 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设计和分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 428~432
- 8 Matthias Kallane, Jens Buck, Sonke Harm *et al.*. Focusing light with a reflection photon sieve[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(13): 2405~2407
- 9 Cheng Guanxiao, Hu Chao. X-ray Zernik 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
- 10 Wei Lai, Cao Leifeng, Fang Wei *et al.*. Measurement of diffraction properties of photon sieves applied to spectroscopy for soft X-ray[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(2): 387~391
魏 来, 曹磊峰, 范 伟等. 软 X 光谱学光子筛衍射特性的实验表征[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(2): 387~391
- 11 Gao Yulin, Cao Leifeng, Zhou Weimin *et al.*. A soft X-ray spectrograph based on photon sieve[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(6): 1523~1526
高宇林, 曹磊峰, 周维民等. 基于光子筛的软 X 光谱仪[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **23**(6): 1523~1526
- 12 Hou Changlun, Xu Jianfeng, Bai Jian *et al.*. Binary photon sieve [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, **40**(3): 484~486
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
- 13 Wenbo Jiang, Song Hu, Lixin Zhao *et al.*. Design and application of phase photon sieve [J]. *Optik*, 2010, **121**(7): 637~641
- 14 Qing Cao, Jurgen Jahns. Nonparaxial model for the focusing of high numerical aperture photon sieves[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(6): 1005~1012
- 15 Qing Cao, Jurgen Jahns. Focusing analysis of the pinhole photon sieve: individual far field mode[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2002, **19**(12): 2387~2393

栏目编辑: 李文喆