

# 大口径光子筛的小孔环带衍射模型设计

周润<sup>1,2\*</sup>, 张新<sup>1\*\*</sup>, 王仁浩<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>火箭军装备部驻哈尔滨地区军事代表室, 黑龙江 哈尔滨 150000

**摘要** 提出一种大口径光子筛的优化设计方案, 将同一菲涅耳环带上的所有小孔看作一个整体, 在非近轴小孔远场衍射模型的基础上通过近似和变换推导出单一小孔环带的光场公式。重点讨论小孔环带衍射模型所需要满足的内部结构条件。数据计算表明, 小孔环带衍射模型计算所得的光子筛焦平面光场分布与传统的远场小孔衍射模型计算所得结果基本一致, 并且使用小孔环带衍射模型所设计的大口径光子筛在焦平面上的聚焦特性较好, 计算效率得到极大的提高。这种新的设计方法将有助于完善光子筛衍射理论, 为大口径光子筛的优化设计提供了一种全新的形式。

**关键词** 光栅; 衍射光学元件; 成像光学系统; 光学系统设计

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1005003

## Design of Large-Aperture Photon Sieve Using Pinhole Ring Diffraction Model

Zhou Run<sup>1,2\*</sup>, Zhang Xin<sup>1\*\*</sup>, Wang Renhao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology,

Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China;

<sup>3</sup>Military Office of Rocket Armaments Department in Harbin District, Harbin, Heilongjiang 150000, China

**Abstract** We propose an improved design solution of large-aperture photon sieve. All the pinholes in one Fresnel ring are regarded as a whole, and the diffraction field formula is deduced after approximation and transformation based on the nonparaxial far-field pinhole diffraction model. The main work of this paper focuses on the internal condition of pinhole ring diffraction model. According to calculation, the diffraction field calculated by the pinhole ring model is basically consistent with that calculated by the traditional far-field pinhole model, the large photon sieve designed by the new method focuses well on the focal plane, and the computational efficiency is greatly improved. This method could benefit the flexibility of design and fabricating the larger aperture photon sieve.

**Key words** gratings; diffractive optical element; imaging optical system; optical system design

**OCIS codes** 050.1965; 050.1940; 230.1950

## 1 引 言

光子筛于 2001 年由德国 Kiel University 的科研小组为提高软 X 射线的聚焦能力而提出<sup>[1]</sup>, 它是一种用大量小孔代替菲涅耳波带片中的透明环带而成的新型衍射光学元件。光子筛具有质量轻、体积小、光谱范围宽、支撑结构简单等优点, 在航空航天、

天文观测、极紫外光刻、物理和生命科学等领域具有良好的应用前景。自光子筛概念被正式提出之后, 国内外许多科研工作者对此课题进行了大量的研究, 主要针对光子筛相关理论研究<sup>[2-3]</sup>、焦深与色散问题<sup>[4-5]</sup>、多波长特性<sup>[6]</sup>以及光子筛切趾窗口函数<sup>[7]</sup>等方面<sup>[8-10]</sup>。Andersen 等<sup>[11-12]</sup>设计并制作了一个直径为 10 cm、工作波长为 532 nm 的大口径光子

收稿日期: 2019-04-19; 修回日期: 2019-05-30; 录用日期: 2019-07-05

基金项目: 高分辨率对地观测重大专项(民用部分)(30-Y20A02-9003-17/18)

\* E-mail: zhourun2020@sina.com; \*\* E-mail: optlab@ciomp.ac.cn

筛,同时进行光子筛对分辨率板的成像测试实验,证实光子筛可以应用于望远镜中。Gao 等<sup>[13]</sup> 分析了大口径光子筛的成像特性。目前,光子筛的研究主要存在 2 方面的问题:短波长、大数值孔径光子筛的小孔过于微小导致其工艺难以实现;大口径光子筛计算效率低导致其优化设计困难。本文主要对大口径光子筛的计算效率进行研究,通过改善大口径光子筛衍射场计算模型以减少大口径光子筛的设计难度。以远场光子筛小孔衍射模型为基础,验证了小孔环带衍射模型指导大口径光子筛设计的准确度。

## 2 大口径光子筛小孔环带衍射模型

传统光子筛衍射光场计算方法是将每个单独的小孔衍射光场线性叠加,而大口径光子筛的衍射小

孔数量非常巨大,因此计算非常耗时。针对大口径光子筛,如果将同一环带上所有的小孔作为一个整体(简称“小孔环带”),并且若能推导出小孔环带在焦面上的光场计算公式,那么整个光场的计算只需要按小孔环带数进行逐一叠加,计算的复杂度也将二维缩减到一维。这一想法由本课题组成员 Liu 等<sup>[14]</sup> 在其发表的论文中提出,称为大口径光子筛的小孔环带衍射模型(简称“小孔环带模型”)。

图 1 为平面波垂直照明光子筛原理图,其中  $xoy$  平面为光子筛的小孔阵列,  $XOY$  平面为光子筛成像的焦面。在实际使用中,大口径光子筛衍射元件多用于光学望远系统,因此物距  $p$  可以设为无穷大,并且由于光子筛衍射元件的视场非常小,入射到光子筛的光波近似为垂直入射的平面波。

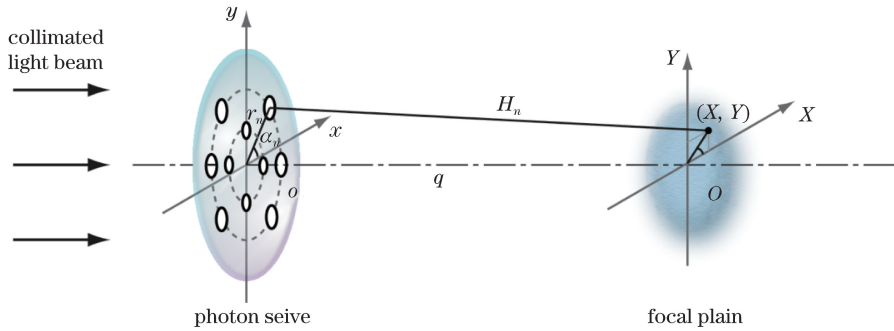


图 1 平面波垂直照明光子筛原理图

Fig. 1 Schematic of a general photon sieve with collimated incident light beam

在非近轴远场近似条件下,光子筛第  $n$  个小孔在  $XOY$  平面上的光场分布<sup>[3]</sup> 可以表示为

$$\dot{U}_n(X, Y) = \frac{kA_n q a_n^2}{H_n^2} \exp[jk(H_n + L_n)] \text{Jinc}\left(\frac{ka_n}{H_n} \rho\right), \quad (1)$$

式中,  $(X, Y)$  为光子筛焦平面视场点的坐标,  $\text{Jinc}(\xi) = J_1(\xi)/(\xi)$ ,  $J_1$  为第一类贝塞尔函数,  $k$  为波数,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  为入射光波长,  $A_n$  为衍射小孔入射波的振幅,  $q$  为光子筛平面到焦面的距离,  $a_n$  为衍射小孔半径,  $L_n$  为到达光子筛的光程函数  $L$  在第  $n$  个小孔处的取值,  $H_n$  为从小孔到焦平面坐标点的长度。若用  $g_n$  和  $h_n$  分别表示光程  $L$  在  $x$  和  $y$  方向上的偏导, 即  $g_n = \partial L / \partial x |_{x_n, y_n}$ ,  $h_n = \partial L / \partial y |_{x_n, y_n}$ , 则 Jinc 函数中的距离量  $\rho$  可表示为  $\rho = [(X - x_n - g_n H_n)^2 + (Y - y_n - h_n H_n)^2]^{1/2}$ ,  $x_n$  和  $y_n$  分别为光子筛平面上第  $n$  个小孔圆心的横、纵坐标。(1)式所表征的衍射光场是环带模型推导的基础,称为非近轴远场光子筛小孔衍射模型(下文简

称“小孔模型”)。

由平面波垂直入射光子筛的条件可得  $L_n = g_n = h_n = 0$ , 并且可设  $A_n = 1.0$ 。为便于引入小孔环带进行衍射光场计算,采用极坐标  $(R, \phi)$  和  $(r_n, \alpha_n)$  分别代替  $(X, Y)$  和  $(x_n, y_n)$  作为坐标变量,二者之间的关系为  $X = R \cos \phi$ ,  $Y = R \sin \phi$ ,  $x_n = r_n \cos \alpha_n$  和  $y_n = r_n \sin \alpha_n$ ,  $R$  为焦面衍射光场上点  $(X, Y)$  到焦面中心  $O$  的距离,  $\phi$  为点  $(X, Y)$  与焦面中心的连线和  $X$  轴的夹角,  $r_n$  为第  $n$  个小孔圆心到光子筛中心  $o$  的距离,  $\alpha_n$  是小孔与光子筛中心的连线和  $x$  轴的夹角。在通常情况下,光子筛聚焦后焦斑的半径  $R_{\max}$  非常小,即  $R \leq R_{\max} \ll r_n$ 。因此, Jinc 函数内的变量  $\rho$  近似为

$$\rho = [(R \cos \phi - r_n \cos \alpha_n)^2 + (R \sin \phi - r_n \sin \alpha_n)^2]^{1/2} \approx r_n. \quad (2)$$

将上述所有的近似关系代入到(1)式中,并根据线性叠加原理,可计算出第  $m$  个环带上所有小孔在焦平面上的衍射光场的总和:

$$\hat{U}_m(R, \phi) = \sum_{n=1}^{N_m} \frac{kA_n q a_n^2}{H_n^2} \exp(jkH_n) \times \text{Jinc}\left(\frac{ka_n r_n}{H_n}\right), \quad (3)$$

式中,  $N_m$  为第  $m$  个环带上分布的小孔数量。

在极坐标下,  $H_n$  的表达式为

$$H_n = [q^2 + R^2 + r_n^2 - 2Rr_n \cos(f + a_n)]^{1/2}, \quad (4)$$

式中,  $f$  为光子筛的焦距。令  $H_0 = (q^2 + R^2 + r_n^2)^{1/2}$ , 考虑到光子筛聚焦后焦斑的半径非常小, 即  $R \leq R_{\max} \ll H_0$ , 将  $H_n$  二项式展开并忽略高次项后可表示为

$$H_n \approx H_0 - \frac{Rr_n \cos(\phi + \alpha_n)}{H_0}. \quad (5)$$

使用(5)式替代(3)式指数项  $\exp(jkH_n)$  中的  $H_n$ , 使用  $H_0$  替代(3)式中另外两个  $H_n$ 。设第  $m$  个环带为一个关于光轴轴对称的结构, 即  $U_m(R, \phi)$  是与角度  $\phi$  无关的一个函数, 可取  $\phi = 0$ 。同一环带上的所有小孔的参数相同, 即  $a_n = \bar{a}_m, r_n = \bar{r}_m, A_n = \bar{A}_m, n = 1, \dots, N_m$ , 其中,  $\bar{a}_m$  是根据菲涅耳环带宽度按照一定比例获取的小孔半径,  $\bar{r}_m$  是第  $m$  个菲涅耳环带中心到光子筛中心的半径,  $\bar{A}_m$  为入射到环带上的光场振幅, 通常情况下可取  $\bar{A}_m = 1.0$ 。简化后可将只与环带相关而与小孔无关的量从求和中提出, 得到小孔环带  $m$  的光场分布:

$$\hat{U}_m(R) = \frac{k\bar{A}_m q \bar{a}_m^2}{H_0^2} \text{Jinc}\left(\frac{k\bar{a}_m \bar{r}_m}{H_0}\right) \exp(jkH_0) \times \sum_{n=1}^{N_m} \exp\left(-jk \frac{R\bar{r}_m \cos \alpha_n}{H_0}\right). \quad (6)$$

假设环带上分布的圆形衍射小孔间距均匀, 可以将第  $m$  个环带均匀分解成  $N_m$  个子扇区, 每个子扇区包含一个完整的衍射小孔, 且其对元件中心的张角可以表示为  $\Delta\alpha = 2\pi/N_m$ 。当环带上包含的衍射小孔数量  $N_m$  大于一定数目, 每个子扇区的张角  $\Delta\alpha$  足够小, (6)式中的求和运算可以近似转化为积分运算:

$$\hat{U}_m(R) = \frac{k\bar{A}_m q \bar{a}_m^2}{H_0^2} \text{Jinc}\left(\frac{k\bar{a}_m \bar{r}_m}{H_0}\right) \exp(jkH_0) \times \frac{N_m}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(-jk \frac{R\bar{r}_m \cos \alpha}{H_0}\right) d\alpha. \quad (7)$$

对(7)式积分后可得到环带衍射光场分布:

$$\hat{U}_m(R) = N_m \frac{k\bar{A}_m q \bar{a}_m^2}{H_0^2} \text{Jinc}\left(\frac{k\bar{a}_m \bar{r}_m}{H_0}\right) \times \exp(jkH_0) \text{J}_0\left(\frac{kR\bar{r}_m}{H_0}\right), \quad (8)$$

$$\text{式中, } \text{J}_0\left(\frac{kR\bar{r}_m}{H_0}\right) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \exp\left(j \frac{kR\bar{r}_m}{H_0} \cos \alpha\right) d\alpha.$$

(8)式是光子筛小孔环带模型第  $m$  个环带上所有小孔衍射光场的最终表达式,  $N_m, \bar{a}_m, \bar{A}_m$  和  $\bar{r}_m$  均为只与小孔环带有关的变量, 其余量均为常量。

### 3 光子筛小孔环带衍射模型的适用范围

为解决大口径光子筛外环小孔数据巨大导致的计算缓慢问题而提出的光子筛小孔环带衍射模型, 用于光学望远系统中平面波入射, 此为衍射模型适用的外部环境。根据第 2 节的理论推导可知, 由(8)式所描述的小孔环带模型只在满足一定内部结构下才能与(1)式描述的小孔模型近似相等。光子筛小孔环带衍射模型成立的内部结构条件为: 小孔菲涅耳数足够小, 光场半径和环带半径之比足够小, 同一环带小孔分布均匀、尺寸相同且环带小孔数足够多。

小孔模型是小孔环带模型的基础。因此, 要确保小孔环带模型成立, 首先需要保证每个衍射孔的结构都足够小, 符合小孔衍射模型。使用小孔的菲涅耳数  $N_f$  来限定这一条件:

$$N_f = \frac{\pi \bar{a}_m^2}{\lambda f} < N_{\max}, \quad (9)$$

式中,  $\lambda$  为入射波长,  $N_{\max}$  为容许的最大菲涅耳数。针对非近轴远场光子筛而言,  $N_{\max}$  可以设为 0.05, 这一结论在文献[3]中可以找到。将光子筛的设计具体化, 小孔的半径可对菲涅耳环带宽度按照一定比例获取得到:

$$\bar{a}_m = \eta \omega_m, \quad (10)$$

式中,  $\omega_m$  为第  $m$  个菲涅耳环带的宽度,  $\eta$  是两者的比值。环带宽度的表达式为

$$\omega_m = \frac{\lambda}{2} (q^2 + \bar{r}_m^2)^{1/2} / \bar{r}_m, \quad (11)$$

对于平面波入射的情况,  $q$  等于光子筛焦距。  $\bar{r}_m$  是第  $m$  个菲涅耳环带中心到光子筛中心的半径, 光子筛的环带半径可表示为

$$\bar{r}_m = (2m\lambda f + m^2 \lambda^2)^{1/2}. \quad (12)$$

综合(9)~(12)式可以得到关于环带数  $m$  的二次不等式:

$$(16N_{\max} \lambda f - \pi \eta^2 \lambda^2) m^2 + (32N_{\max} f^2 - 2\pi \eta^2 \lambda f) m - \pi \eta^2 f^2 \geq 0. \quad (13)$$

在二次项系数明显大于 0 的情况下, 结合  $m$  的实际

取值区间可知,(13)式的较大解为  $m$  的最小值,即不等式的解为

$$m \geq \frac{-16N_{\max}f^2 + \pi\eta^2\lambda f + 4f\sqrt{16N_{\max}^2f^2 - N_{\max}\pi\eta^2\lambda f}}{16N_{\max}\lambda f - \pi\eta^2\lambda^2}. \quad (14)$$

将(14)式根号部分作泰勒展开并忽略式中关于波长  $\lambda$  的二次项,化简之后可得到满足小孔衍射菲涅耳条件的环带数  $m$  的取值范围:

$$m > \frac{\pi\eta^2}{32N_{\max}}. \quad (15)$$

(15)式是(9)式的具体化形式。可知,满足小孔菲涅耳衍射的最小环带数基本只和小孔环带半径之比  $\eta$ 、最大菲涅耳数  $N_{\max}$  相关。

在由小孔模型推算和简化小孔环带模型的过程中,采用了一些近似处理,如(2)式和(5)式,这些近似是建立在  $R_{\max} \ll r_n$  的基础之上,小孔中心的极坐标  $r_n$  等于所在环带的环半径  $\bar{r}_m$ 。经过大量的数据计算和分析之后,保证近似结果有效的最大光场半径  $R_{\max}$  和最小环带半径  $(\bar{r}_m)_{\min}$  之比的取值应小于 0.05,即

$$\sigma = \frac{R_{\max}}{(\bar{r}_m)_{\min}} < 0.05. \quad (16)$$

换句话说,当要分析的衍射光场的最大半径  $R_{\max}$  和比例  $\sigma$  确定后,小孔环带模型可以用来分析环带半径大于  $R_{\max}/\sigma$  的所有环带上小孔的衍射光场。结合(12)式和(16)式同样可列出关于环带数的二次不等式,利用韦达定理解出方程的根并使用泰勒展开化简之后,可得到满足环带半径要求的环带数:

$$m > \frac{R_{\max}^2}{2\lambda f \sigma^2}, \quad (17)$$

(17)式为(16)式的具体化形式。

此外,小孔环带模型还应满足第三个条件,即每个环带上的小孔必须分布均匀,尺寸相同,且环带上的小孔数量  $N_m$  必须足够多以满足从(6)式到(7)式的推导过程中的积分假设。大量数据计算和分析表明,当  $N_m > 100$  时,环带微分到积分的近似运算基本可以等同,计算误差可以控制在容许的范围之内。

以上 3 部分共同组成了保证光子筛小孔模型计算准确度的内部结构条件。可以看出,小孔环带模型并不能用来计算光子筛全部衍射小孔,其处理方法只对满足以上 3 个条件的外环环带小孔生效。为

使该计算模型适用性更强,对于光子筛内环的衍射小孔仍可使用单独的小孔模型进行光场计算,由于数量较少,计算时间较短。根据线性叠加理论,光子筛全小孔衍射光场为光子筛内环区域少量小孔的衍射光场(使用小孔模型计算所得)和外环区域各小孔环带衍射光场(使用小孔环带模型计算所得)之和,用公式表示为

$$U(R, \phi) = \sum_{s=1}^{N_c} \hat{U}_s(R, \phi) + \sum_{t=m_0}^M \hat{U}_t(R), \quad (18)$$

式中,  $N_c$  为光子筛内环区域的小孔数量,  $m_0$  为满足光子筛环带衍射近似条件的最内环小孔环带的序号,  $M$  为光子筛的小孔环带总数,  $\hat{U}_s(R, \phi)$  为内环区域第  $s$  个小孔使用小孔模型计算的光场,  $\hat{U}_t(R)$  为外环区域第  $t$  个环带使用小孔环带模型计算的光场。

#### 4 小孔环带模型设计实例和结果分析

设计一个焦距为 1.2 m、口径为 0.1 m、波长为 632.8 nm 的大口径光子筛,并在 MATLAB 2012a 软件平台下计算其焦平面光场分布。使用的 CPU 为 Intel Core i5-4210H(2.9 GHz)。表 1 为所设计的光子筛的相关参数。

表 1 大口径光子筛的设计参数

Table 1 Designed parameters of large caliber photon sieve

Parameter	Value
Diameter $D$ /m	0.1
Focal length $f$ /m	1.2
Wavelength $\lambda$ /nm	632.8
Hole radius ratio $\eta$	0.7
Number of rings	1645
Hole radius range / $\mu\text{m}$	5.32-215
Hole duty ratio	0.5
Number of holes	$1.2 \times 10^7$

通常情况下,小孔衍射的菲涅耳条件需要对光子筛上所有环带小孔均成立,即(15)式右边部分数值应小于 1,  $N_{\max}$  取经验值为 0.05。据此可计算出小孔半径和环带半径之比  $\eta < 0.714$ ,为菲涅耳数的要求,本研究取 0.7。设衍射光场的最大半径  $R_{\max} = 0.2$  mm,这足以描述光子筛焦点附近的聚焦特性,使用(17)式计算出满足第 3 节所述条件的最小环带序号  $m_0 = 13$ 。根据小孔环带模型的条件,环带上小孔数量需足够大以保证所做的积分假设,由于环带小孔数量从内环往外逐渐增



多,只要第 13 环上小孔数满足条件则可。计算得出第 13 环理论上紧密排列的最大小孔数为 233,因此环带上最小的孔占空比为  $100/233 \approx 0.43$ ,为保证衍射效率,取 0.5 作为环带小孔占空比的设计值,从而可算出该光子筛上总的小孔数量约为  $1.21 \times 10^7$ 。图 2 为该光子筛最内环的 26 个环带的小孔分布图。

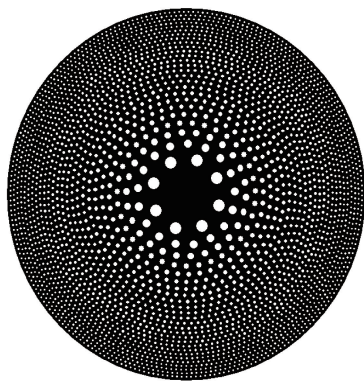


图 2 光子筛中心 26 个环带的小孔分布图

Fig. 2 Central 26 pinhole rings of the photon sieve

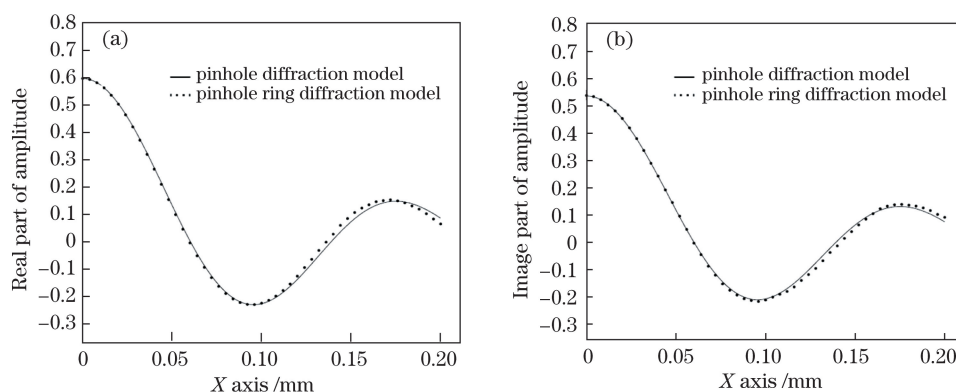


图 3 焦平面上第 13 环带上所有小孔的衍射场。(a)实部衍射场;(b)虚部衍射场

Fig. 3 Comparison of the diffracted fields on the focal plane for the pinholes in the 13th ring zone.

(a) Real part of the complex diffracted fields; (b) imaginary part of the complex diffracted fields

在两种模型的计算过程中,13 环以内的部分所使用的计算方法相同,即使用小孔模型进行计算,因此,在对比结果差异时,只需要对比 13 环之外部分的计算结果。图 4(a)为使用小孔环带模型计算的 0.1 m 口径光子筛 13 环之外部分(共 1633 环带)在焦面上的衍射场,为使显示清晰,已对纵坐标数值取对数。图 4(b)为小孔环带模型计算结果相对于小孔模型的相对误差,可以看出两种模型计算结果的一致性非常高,相对误差的均方根(RMS)为  $10^{-9}$  量级。值得提出的是, +X 轴 100 个采样点下使用传统的小孔模型计算花费约 1 h,而使用小孔环带模型计算不足 1 s,可在不损失精度的前提下有效地提

在 MATLAB 平台中分别使用小孔模型和小孔环带模型对上述光子筛的光场进行计算。为更好地说明光场半径和小孔数量对小孔环带模型的影响,首先以处在小孔环带模型适用范围临界点的第 13 环为例进行分析。利用小孔模型和小孔环带模型分别计算第 13 环带的衍射场,其分布如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在焦平面  $X \leq 0.1$  mm 区域内,利用(1)式和(8)式两种方法计算的衍射光场的差异非常小。对于  $0.1 \text{ mm} < X \leq 0.2$  mm 的区域,两种方法计算出的实部的数值有细微的差异,这些细微的差异说明计算精度对  $R/r_n$  数值的依赖性。不过,综合考虑衍射光场的实部和虚部,这两种方法计算出的衍射光场的差异很小,也就是说,在焦平面  $R/r_n \leq 0.05$  的区域,第 2 节中所述的近似推导对计算结构造成的影响可以忽略不计。以上的讨论仅是针对第 13 环带上所有小孔的衍射场,由于光子筛更外环环带的半径  $r_n$  更大,因此  $R/r_n \leq 0.05$  的数值相应也更小,这意味着利用小孔环带模型计算外环环带的衍射光场会有更高的计算精度。

高计算效率。

图 5 为使用小孔环带模型计算的整个光子筛在焦平面上的光场分布,为便于显示,其强度值  $U$  取 10 为底的对数。可以看出:使用小孔环带模型设计的光子筛聚焦特性比较理想,聚焦半径在  $10 \mu\text{m}$  左右,并随着半径增加光场归一化强度迅速衰减至  $10^{-3}$  以下。

## 5 结 论

基于非近轴光子筛小孔远场衍射理论,建立大口径光子筛衍射光场的小孔环带衍射模型。光子筛小孔环带衍射模型成立的 3 个条件为环带上小孔的

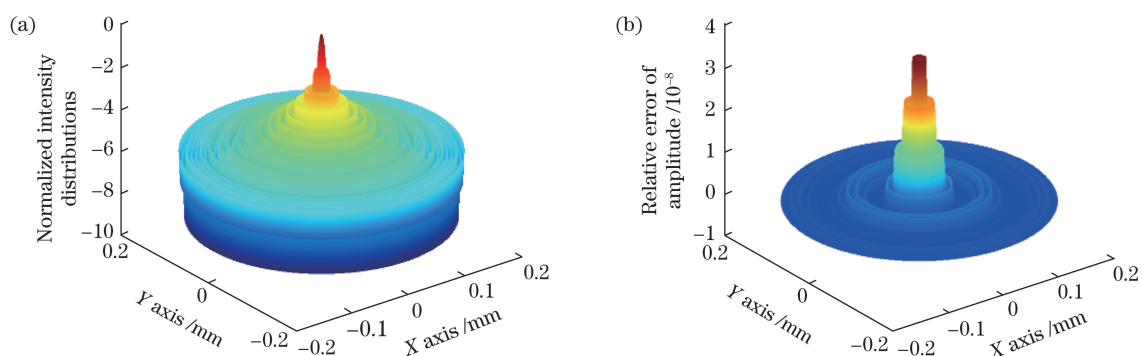


图 4 光子筛外环部分使用小孔环带模型的衍射场计算结果。(a) 使用小孔环带模型计算出的焦平面归一化衍射强度分布(取 10 为底的对数);(b) 小孔环带模型与传统小孔模型计算结果相对误差分布

Fig. 4 Intensity distribution calculated from the outer part of the photon sieve using pinhole ring model. (a) Normalized intensity distribution calculated by the pinhole ring model (the base-10 logarithm); (b) relative error distribution of the field calculated by the pinhole ring model and the traditional pinhole model

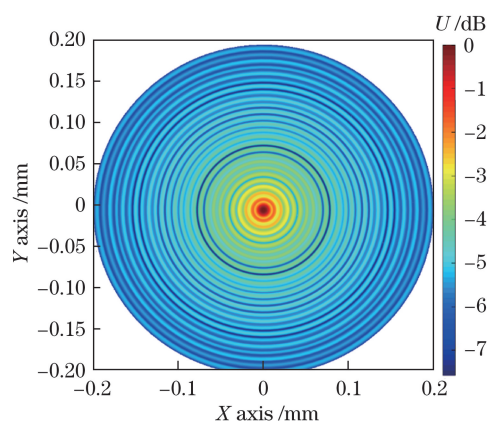


图 5 使用小孔环带模型计算的整个光子筛在焦平面上的归一化光场分布(取 10 为底对数)

Fig. 5 Normalized intensity distribution on the focal plane of the whole photon sieve calculated by the pinhole ring model (the base-10 logarithm)

菲涅耳数足够小;环带半径足够大;每个环带上的小孔的尺寸相同、分布均匀并且小孔的数量足够多。在满足以上 3 个条件的情况下,光子筛同一环带上所有的衍射小孔可以被视为一个整体。最后,根据小孔环带模型及其适用条件设计一个 0.1 m 口径的光子筛,并使用 MATLAB 软件分析小孔模型和小孔环带模型光场计算结果的差异,结果表明小孔环带衍射理论计算结果基本准确,焦平面上光场聚焦特性较好。通过使用小孔环带模型,大口径光子筛所包含的数百万或数十亿的小孔可以简化为几百个或者上千个小孔环带的衍射光场计算,可以准确计算大口径光子筛的衍射光场,提高设计效率。

### 参 考 文 献

- [1] Kipp L, Skibowski M, Johnson R L, *et al.* Sharper

images by focusing soft X-rays with photon sieves[J]. Nature, 2001, 414(6860): 184-188.

- [2] Cao Q, Jahns J. Focusing analysis of the pinhole photonsieve: individual far-field model[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2002, 19(12): 2387-2393.

- [3] Cao Q, Jahns J. Nonparaxial model for the focusing of high-numerical-aperture photon sieves[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2003, 20(6): 1005-1012.

- [4] Giménez F, Monsoriu J A, Furlan W D, *et al.* Fractal photon sieve[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 11958-11963.

- [5] Giménez F, Furlan W D, Monsoriu J A. Lacunar fractal photon sieves[J]. Optics Communications, 2007, 277(1): 1-4.

- [6] Zhou C X, Dong X C, Shi L F, *et al.* Experimental study of a multiwavelength photon sieve designed by random-area-divided approach[J]. Applied Optics, 2009, 48(8): 1619-1623.

- [7] Xie C Q, Zhu X L, Jia J. Focusing properties of hard X-ray photon sieves: three-parameter apodization window and waveguide effect[J]. Optics Letters, 2009, 34(19): 3038-3040.

- [8] Tang Y, Hu S, Zhu J P, *et al.* Design of quasi-phase photon sieve[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1022007.

唐燕, 胡松, 朱江平, 等. 准相位型光子筛设计[J]. 光学学报, 2012, 32(10): 1022007.

- [9] Hou C L, Xu J F, Bai J, *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.

- [10] Jiang W B, Hu S, Zhao L X, *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与分析[J]. *光学学报*, 2010, 30(2): 428-432.
- [11] Andersen G, Tullson D. Broadband antihole photon sieve telescope[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(18): 3706-3708.
- [12] Andersen G. Large optical photonsieve[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(22): 2976-2978.
- [13] Gao Z, Luo X G, Ma J X, *et al.* Imaging properties of photon sieve with a large aperture[J]. *Optics & Laser Technology*, 2008, 40(4): 614-618.
- [14] Liu T, Zhang X, Wang L J, *et al.* Fast and accurate focusing analysis of large photon sieve using pinhole ring diffraction model[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(17): 5327-5331.