

反射表面微变形的改进型龙虾眼透镜

赵 玄, 欧阳名钊, 付跃刚, 赵雨石, 张 贺, 崔启胤, 刘雪元

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 龙虾眼透镜作为一种特殊的透射式反射聚焦元件, 在 X 射线等高能领域具有重要的应用价值, 并在可见光、红外波段具有潜在的应用前景。为提高龙虾眼透镜的成像质量, 从理论方面分析了变周期闪耀光栅的衍射干涉因子以及衍射场情况, 利用变周期闪耀光栅对龙虾眼通道内壁进行微整形, 并且对经过微整形之后的一维龙虾眼结构进行了聚焦光场分布计算。通过与之前结构的仿真对比, 结果表明: 焦距为 100 mm 时, 有效半口径为 95 mm 的现有结构在焦面处的弥散斑直径由 10 mm 减小至 1 mm, 光能集中度由 75% 增大至 89.62%, 并且在不同入射高度下焦平面处的光斑直径以及光能集中度均有提高。

关键词: X 射线; 变周期光栅; 龙虾眼; 光能集中度; 衍射效率

中图分类号: TH743 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0310002

Improved lobster eye lens based on micro-deformation of reflective wall

Zhao Xuan, Ouyang Mingzhao, Fu Yuegang, Zhao Yushi, Zhang He, Cui Qinyin, Liu Xueyuan

(School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: As a special transfective focusing element, the lobster eye lens has important application value in the field of high energy such as X-ray, and in the visible light, infrared band has potential applications. Focused on improving the imaging quality of the lobster eye lens, the diffraction interference factor and the diffraction field of the variable periodic glare grating were discussed theoretically. The inner wall of the lobster eye channel was micro-formed by the variable periodic blazed gratings, and simulating the structure of one-dimensional lobster eye had been micro-formed. The simulation results show that the focal length is 100 mm, effective semi aperture 95 mm bores the existing structure in coke. The dispersion spot diameter at focal plane is reduced from 10 mm to 1 mm, the energy concentration increases from 75% to 89.62%, and the spot diameter and the concentration of light energy at the focal plane at different incident altitudes are both increased.

Key words: X-ray; variable period grating; lobster eye; light energy concentration; diffraction efficiency

收稿日期: 2017-10-16; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61705018)

作者简介: 赵玄(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光学仿生及光机结构方面的研究。Email: zhxlxy0814@163.com

导师简介: 付跃刚(1972-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光学设计方面的研究。Email: Fuyg@cust.edu.cn

通讯作者: 欧阳名钊(1983-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光学系统设计分析方面的研究。Email: oymz68@163.com

0 引言

X 射线探测器可分为准直型与聚焦型两种,但是准直型元件由于本身没有聚光功能,空间噪声背景大,限制了其在空间探测方面的发展。聚焦型具有背景噪声小、灵敏度高等特点,是未来发展的主要趋势。龙虾眼透镜是基于掠入射反射 X 射线的聚焦光学元件,与其他的 X 射线聚焦原件(KB 型光学系统、Wolter 型光学系统)相比具有更小的离轴像差和更强的光敏感度,而且结构轻便更加适用于空间探测^[1]。该结构具有可扩展光谱性,可用于红外波段解决红外材料受限的问题^[2]。但是由于其本身结构缺陷导致了几何弥散斑直径较大、光能集中度较低等问题。文中将龙虾眼结构与变周期闪耀光栅^[3-5]相结合,在可见光波段对改进后结构进行了一维方向的模拟仿真,为原有龙虾眼结构提供了一种新思路。

龙虾眼成像是基于掠入射反射成像原理。当光线进入到小眼通道时,经过内壁的反射而将光线折转至焦点位置,每一个微通道就相当于一个角反射器。现有的龙虾眼结构分为 Schmidt 型与 Angle 型两种^[6]。Schmidt 型结构是在原龙虾眼的基础上,由一维结构为基础正交叠加而成,并且每一个一维结构都是由多个平面反射基片堆叠,该结构便于在反射镜表面镀膜使其更加适用于高能段成像。与 Schmidt 型结构相比,Angle 型结构更加接近于真实的龙虾眼。它是由多个微通道均匀排列在球面之上,每个微通道的轴线反向延长之后都通过球面圆心。当每个微通道足够小,整体结构的分辨率可以达到角秒级,结构更加轻便。但是 Angle 型结构制作方式复杂,难以获得较好的表面粗糙度。文中选择使用 Schmidt 结构的改进型龙虾眼结构^[7],该装置以 Schmidt 结构为基础,将其前端设计成球形表面,外形结构与 Angle 型相接近,有利于提高系统的成像质量^[8-15]。

1 龙虾眼透镜聚焦弥散斑分析

1.1 龙虾眼成像机理

图 1 为 Schmidt 改进型结构。龙虾眼光学系统的每个反射侧壁按照半径为 R 的球面排列,其反向延长线都通过球心 O ,原理如图 2 所示。

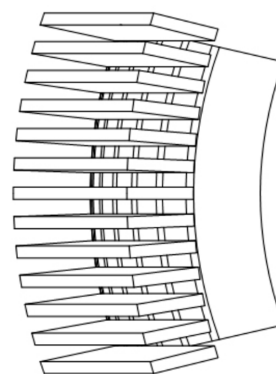


图 1 Schmidt 改进型结构

Fig.1 Improved Schmidt structure

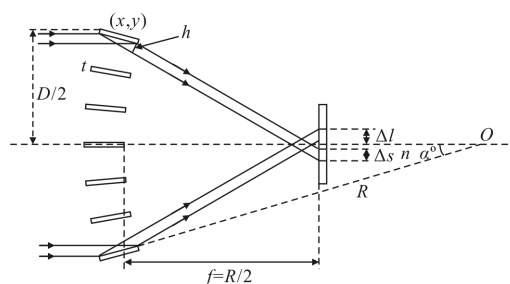


图 2 龙虾眼光路图

Fig.2 Light path of lobster eye

根据龙虾眼光学系统的物象关系表达式^[2]:

$$\frac{1}{l_s} - \frac{1}{l_f} = \frac{1}{f} \quad (1)$$

式中: l_s 为物距; l_f 为像距; 平行光入射时, 物距 l_s 趋向于 ∞ , 可得焦距 $f=r/2$, 此时光线汇聚于龙虾眼焦平面上。在实际设计过程中, 微通道板的长度不能为零, 导致在单一通道内不是所有的光线会聚在一点处, 所以在像面处产生一个直径为 Δs 的投影宽度。 Δs 的表达式如下:

$$\Delta s = \frac{h}{\cos 2n\alpha} = \frac{t \cdot \sin n\alpha}{\cos 2n\alpha} \quad (2)$$

式中: t 为微通道深度; α 为发生反射微通道板锥顶角; n 为通道序号。系统整体的几何弥散斑是由投影宽度与边缘光线位置 Δl 共同决定的, Δl 的表达式如下:

$$\Delta l = \tan 2n\alpha \left(\cos n\alpha (R+t) - \frac{R}{2} \right) - \sin n\alpha (R+t) \quad (3)$$

随着微通道板长度以及入射角度的增加, 弥散斑的直径增长趋势逐渐变大, 如图 3 所示。当 $t=20 \text{ mm}$ 时, 其弥散斑直径随着锥顶角 α 逐渐变化, 弥散斑直径在 $1\sim 4 \text{ mm}$ 之间变化。可知弥散斑的存

在导致整体光斑直径较大,进而使整体系统的光能集中度降低。

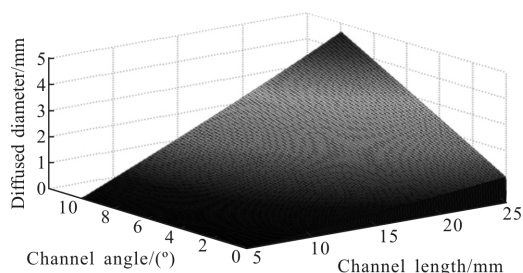


图 3 弥散斑直径

Fig.3 Diameter of diffuse spots

1.2 微整形结构设计及衍射分析

每个微通道板的深度导致了在成像焦面上存在一个投影长度而产生的弥散斑。文中给出了一种利用变周期闪耀光栅对反射侧壁进行微整形的方法。表面锯齿形闪耀光栅与矩形光栅相比,其衍射效率更高,用途也更加广泛。平行光入射时,通过改变表面的周期以及闪耀角来实现聚焦的作用;发散光入射时,该光栅起到了准直透镜的作用。文中采用锯齿形闪耀光栅,如图 4 所示。对微通道表面进行微处理的过程中,首先确定在可见光波段下龙虾眼结构的基本参数。基于龙虾眼单次反射的条件下,基本参数如表 1 所示。

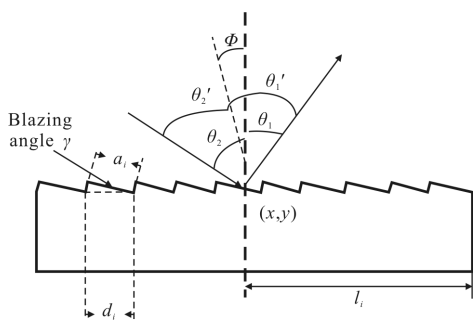


图 4 变周期闪耀光栅参数

Fig.4 Parameters of variable periodic blaze grating

表 1 龙虾眼系统参数

Tab.1 Parameters of lobster eye system

Parameter	Specification
Radius/mm	200
Wavelength/mm	632.8
Focal length/mm	100
Cone angle/(°)	0.1
Channel depth/mm	20
Effective semi aperture/mm	95

根据变周期闪耀光栅方程:

$$d_i = \frac{m\lambda}{\sin\theta_1 + \sin\theta_2} \quad (4)$$

式中: m 表示衍射级次; d 表示光栅周期; θ_1 表示入射角; θ_2 表示衍射角。得知入射角及衍射角后,可通过公式(4)求得单缝的光栅周期。

根据图 2 及图 4,当入射光线入射到角度为 $n\alpha$ 的基片时,入射点坐标 (x, y) 分别为:

$$\begin{cases} x = -(R+l_i)\cos n\alpha \\ y = (R+l_i)\sin n\alpha \end{cases} \quad (5)$$

由此推算出在每个接触点处的衍射角 θ_2 为:

$$\begin{cases} s = \sqrt{(R/2-x)^2 + y^2} \\ c = \sin n\alpha \cdot R/2 \\ \theta_2 = \arccos(c/s) \end{cases} \quad (6)$$

闪耀角 γ 的计算方法为:

$$2\gamma = \theta_1 - \theta_2 \quad (7)$$

经过上述计算后,得到锥顶角分别为 10° 、 20° 、 30° 时的周期及闪耀角变化范围,如表 2 所示。

表 2 光栅参数

Tab.2 Grating parameters

Cone angle/(°)	Variable period/ μm	Variable blaze angle
10	96-192.8	40"-1'
20	24.9-49.4	1'11"-2'31"
30	9-12.6	5'-3'21"

因为利用的是光栅结构,所以必须从光的衍射去分析在聚焦处的光场情况。依据建立的模型和标量衍射原理,单个闪耀面的衍射属于夫琅禾费衍射。假设内壁为全反射并且不考虑表面粗糙度带来的影响,利用夫琅禾费衍射公式以及标量计算方法可以方便、快捷地求出经过闪耀表面之后像点处的光强值,避免了利用矢量方法计算的复杂性。

假设入射光在 $X-Y$ 方向具有均匀光强,研究衍射强度分布的规律仅需对平行于 $X-Y$ 平面内的任意截面进行分析。通过公式(5)与公式(6)可以得到相对于光栅平面法线的入射角 θ_1 和衍射角 θ_2 ; 在此基础上得到单个缝的衍射场振幅为:

$$E = A' \int \sum_0^{n-1} d_n \exp(ik(\sin\theta_1 + \sin\theta_2) \cdot \cos\gamma \cdot \xi) d\xi \quad (8)$$

解得:

$$E = E_0 a_n \frac{\sin \frac{\pi a_n (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\lambda}}{\frac{\pi a_n (\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\lambda}} = E_0 a_n \frac{\sin u_n}{u_n} \quad (9)$$

单个衍射光波的向量复数表达式为:

$$A_n = E_0 a_n \frac{\sin u_n}{u_n} \exp(i\omega t - kr + i\delta_n) \quad (10)$$

式中: ω 为圆频率; t 为时间; r 为初相位; $\delta_n =$

$\frac{2\pi(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)}{\lambda} \sum_{n=0}^{N-1} d_n$ 。那么经过各个缝相干光之间的

干涉之后,其合成向量 P 的表达式为:

$$P = E_0 a_n e^{i(\omega t - kr)} \sum_{n=0}^{N-1} d_n \frac{\sin u_n}{u_n} e^{i\delta_n} \quad (11)$$

仅分析光栅衍射光强的分布规律,并且不考虑振幅与光程反比的关系,可将光栅衍射光强 I 用合成光向量 P 的平方,最后得到其干涉衍射因子 F 为:

$$F = \left(\sum_{n=0}^{N-1} d_n \frac{\sin u_n}{u_n} \cos \delta_n \right)^2 + \left(\sum_{n=0}^{N-1} d_n \frac{\sin u_n}{u_n} \sin \delta_n \right)^2 \quad (12)$$

2 仿真模拟

2.1 不同入射高度衍射光场

利用上述模型,在波长为 632.8 nm 时,分别对入射高度为 33、50、68、95 mm 的单个基片进行了闪耀光栅的光场分布情况以及整体龙虾眼结构的模拟,如图 5 所示。

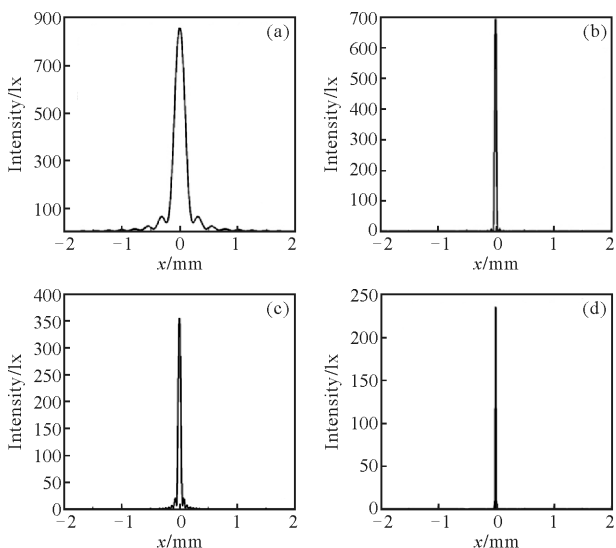


图 5 不同入射高度光场分布

Fig.5 Optical field distribution in the different incident altitudes

图 5(a)~(d)分别表示入射高度为 33、50、68、95 mm 时单个基片的衍射场分布。 x 为观察屏的横向坐标,表示光斑在观察屏上的位置。从图可得:在微整形结构基础上,当通光入射高度为 33 mm 时其弥散斑直径约为 0.6 mm,远远小于无微整形结构的弥散斑直径。随着入射角度的逐渐增大,通过衍射得到的弥散斑直径逐渐减小,在 4 个入射高度之下的光能集中度分别为 90.94%、89.9%、95.63%、96.36%,能量的集中度逐渐增大,其衍射场峰值光强逐渐降低。

2.2 视场分析

对现有龙虾眼结构进行轴外光成像分析。由于在设计表面闪耀光栅时所用光栅方程与入射角 θ_1 有直接联系,当轴外光入射时,入射角相对于光栅设计入射值发生偏差,其聚焦位置发生偏移,此时光栅对光线的调制作用降低,并不能使每一单缝的-1 级衍射光调制到理想位置,如图 6 所示。

图 6(a)表示整体龙虾眼结构在 0.5°轴外光时,其弥散斑直径以及光强分布;图 6(b)和(c)分别表示入射高度为 95 mm 及 68 mm 时,单片结构对 0.5°轴外光的光强分布,纵轴表示光强(单位:lx)。在微整形结构基础上,其弥散斑直径约为 2 mm,且其弥散斑向左平移了约 0.5 mm,仍然小于无微整形结构产生的弥散斑直径。

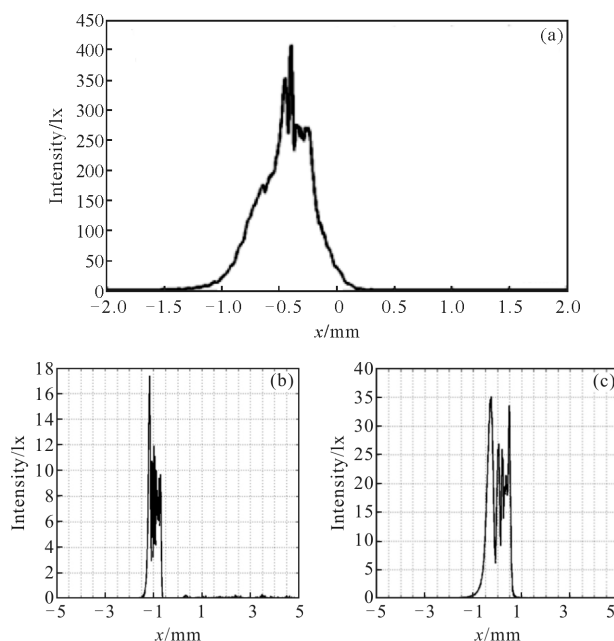


图 6 轴外 0.5°平行光聚焦

Fig.6 Parallel light focus of off axis 0.5°

2.3 衍射效率及整体一维结构仿真分析

上文中讨论了龙虾眼光学系统表面在加入光栅

结构后,光能的集中度得到明显提高,每个光栅的衍射效率对整个系统的总效率起着重要作用。光栅衍射效率 η 定义为某一级的衍射光束能量与单色入射光束能量的比值,也就是某级的衍射光能量与所有的光束能量之和之比:

$$\eta = \frac{E_m}{\sum_{m=0}^n E_m} \quad (12)$$

光栅的某一级衍射光能量主要指的是该级主极大和其两侧相邻的两个零级之间的范围之内,即二倍半角宽度之内。当入射高度为 95 mm 时,其对应微通道内入射角为 60° ,根据之前的设计指标主要利用该光栅的-1 级衍射光,如图 7 所示。

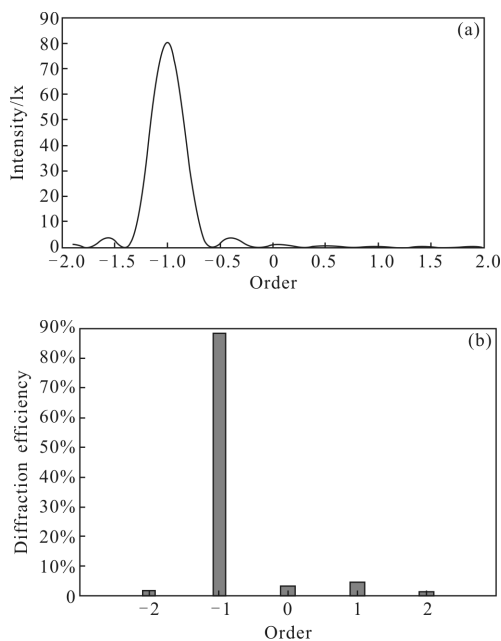


图 7 衍射效率

Fig.7 Diffraction efficiency

图 7(a)、(b)分别表示光栅的各级衍射光束能量及各个级次效率分布。由图可以得到在-1 级时,衍射光强度最大,此时计算得到-1 级的衍射效率为 87.95%,验证了所设计光栅的高衍射效率。

根据龙虾眼结构参数、表面变周期闪耀光栅的结构参数及所得到的衍射效率的仿真情况,利用 Matlab 软件对整体结构的光场进行模拟仿真,分别得到当表面有微结构与无微结构时的场分布情况,即一维系统整体的光学效率分布,如图 8 所示。通过以上对比可以得出在没有表面微结构时,虽然在中心

依然是光能最高的地方但是在底部存在大量的分散能量,其光能集中处的弥散斑直径大约为 10 mm,能量占比约为 75%。在加入微结构之后,其光能集中处的弥散斑直径大约为 1 mm,计算得到大约 89.62%的光能集中在焦点处。

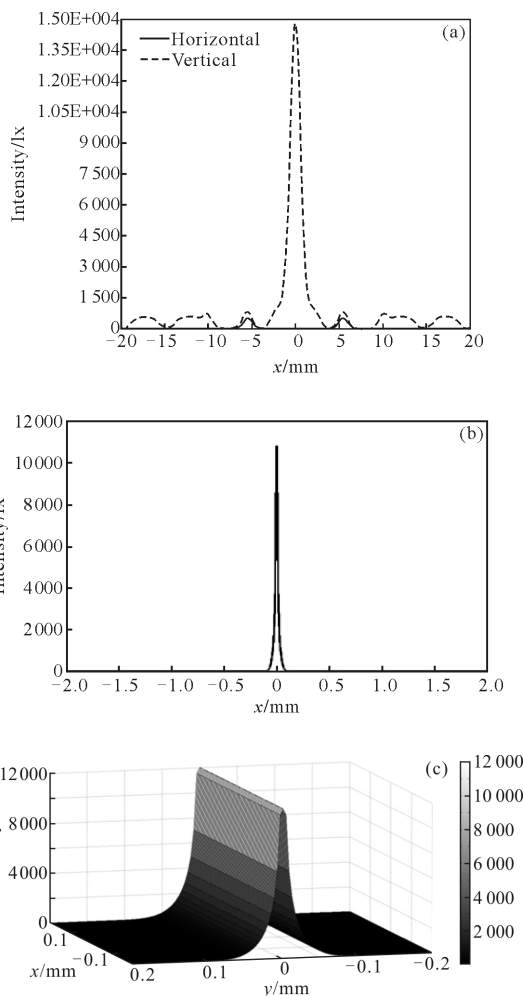


图 8 (a) 表面无微结构时,焦点上的场分布;(b) 表面加入微结构后焦点的场分布;(c) 焦平面强度分布

Fig.8 (a) Optical field distribution of reflective wall in the focal plane without micro-structure; (b) optical field distribution of reflective wall in the focal plane with micro-structure; (c) focal plane intensity distribution

将龙虾眼系统的极限分辨距离定义为能量与最高点能量之比为 $1/e^2$ 的两点之间距离。在无微结构系统中其分辨距离为 1 mm,对应分辨率为 $34'$ 。而加入微结构之后,分辨距离减小至 $50 \mu\text{m}$,其对应分辨率为 $1.7'$,且在选用截止频率较高的探测器时,角分辨率可以进一步提高。通过以上模拟计算,证实了在

表面加入微结构之后光能集中度以及角分辨率得到了显著提高。

3 结论

文中根据现有龙虾眼结构要求减小弥散斑直径、增大光能集中度方面的要求,提出了利用变周期闪耀光栅对反射壁表面进行微整形的方法。然后从理论方面分析了变周期闪耀光栅的衍射干涉因子及衍射场情况,对经过微整形之后的一维龙虾眼结构进行了轴上光与 0.5° 轴外光仿真,并对不同有效口径下焦平面处的光斑直径以及光能集中度进行了分析。通过与无微结构的仿真对比得出:微整形结构在焦面处的弥散斑直径由10 mm减小至0.6 mm,光能集中度由75%增大至89.62%,并且角分辨率得到显著提高;当 0.5° 轴外光入射时,几何弥散斑直径约为2 mm,并且向左平移0.5 mm。证实了在反射壁加入变周期闪耀光栅确实可以提高光能集中度且减小了弥散斑的直径。因为文中主要讨论该结构在可见光范围的成像质量,相较于X波段表面粗糙度对整体效果的影响较小,所以之后会在相关的X波段的文章中详细讨论表面粗糙度对该改进型结构的影响。

参考文献:

- [1] Hu Huijun, Song Juan, Li Wenbin, et al. Research on angel lobster eye focusing optical system applied to soft X-ray imaging detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(4): 29–35. (in Chinese)
胡慧君, 宋娟, 李文彬, 等. 应用于软X射线成像探测的Angel型龙虾眼光学系统研究 [J]. *光子学报*, 2017, 46(4): 29–35.
- [2] Fu Yuegang, Zhang Fangjun, Ouyang Mingzhao, et al. Development of lobster eye optical system and the application in IR [J]. *Infrared Technology*, 2014, 36(11): 857–862. (in Chinese)
付跃刚, 张方军, 欧阳名钊, 等. 仿生龙虾眼光学系统的发展及其在红外波段的应用 [J]. *红外技术*, 2014, 36(11): 857–862.
- [3] Sun Yunan, Qin Bingkun, Chen Mingche, et al. Reflective variable periodic glare grating analysis [J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1991, 11(4): 68–73. (in Chinese)
孙雨南, 秦秉坤, 陈明彻, 等. 反射式闪耀变周期光栅分析 [J]. *北京理工大学学报*, 1991, 11(4): 68–73.
- [4] Li Bingshi, Wu Zhong. General formula of diffraction intensity distribution of variable periodic grating and its application [J]. *Sensor World*, 2004, 10(5): 19–22. (in Chinese)
李秉实, 吴忠. 变栅距光栅衍射强度分布的一般公式及其应用 [J]. *传感器世界*, 2004, 10(5): 19–22.
- [5] Wang Donghui, Liu Lin, Li Bingshi, et al. Calculation of relative diffraction efficiency of the varied line-space blazed grating [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(1): 69–72. (in Chinese)
王东辉, 刘林, 李秉实, 等. 变栅距闪耀光栅相对衍射效率的计算方法 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(1): 69–72.
- [6] Yang Xiajun, Mu Baozhong, Yi Shengzhen, et al. Study on lobster eye X-ray optical system based on parallel Schmidt geometry [J]. *Optical Instruments*, 2012, 34(5): 34–39. (in Chinese)
杨夏军, 穆宝忠, 伊圣振, 等. 平行式Schmidt型龙虾眼射线光学系统研究 [J]. *光学仪器*, 2012, 34(5): 34–39.
- [7] Ouyang Mingzhao, Zhu Wanbin, Fu Yuegang, et al. Improved lobster eye lens based on Schmidt geometry [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3610–3614. (in Chinese)
欧阳名钊, 朱万彬, 付跃刚, 等. Schmidt结构的改进型龙虾眼光学透镜研究 [J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(12): 3610–3614.
- [8] Putkunz C T, Peele A G. Detailed simulation of a lobster-eye telescope [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 14156–14165.
- [9] Barbour S, Erwin D A. Comparison of focal properties of square-channel and meridional lobster-eye lenses [J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2014, 31(12): 2584–2592.
- [10] Chapman H N, Nugent K A, Wilkins S W. X-ray focusing using square channel-capillary arrays [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1991, 62(6): 1542–1561.
- [11] Vogt K. The optical system of the crayfish eye [J]. *Journal of Comparative Physiology*, 1980, 135(1): 1–19.
- [12] Angel J R P. Lobster eyes as X-ray telescopes [J]. *Astrophysical Journal*, 1979, 233(1): 364–373.
- [13] Huang C C, Wu X, Liu H, et al. Optics: large-field-of-view wide-spectrum artificial reflecting superposition compound eyes (small 15/2014) [J]. *Small*, 2014, 10(15): 3050–3057.
- [14] Priedhorsky W C, Peele A G, Nugent K A. An X-ray all-sky monitor with extraordinary sensitivity [J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1996, 279(3): 733–750.
- [15] Hudec R, Švédá, L, Pina L, et al. Lobster eye telescopes as X-ray all-sky monitors [J]. *Chinese Journal of Astronomy & Astrophysics Supplement*, 2008, 8(1): 381–385.