

仿生蛾眼抗反射结构成像系统研制

董亭亭¹, 张国伟¹, 郭 劫¹, 吴锦双², 张为国³, 付跃刚²

(1. 华中光电技术研究所-武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

2. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

3. 中国科学院重庆绿色智能技术研究院, 重庆 400700)

摘要: 仿生蛾眼是一种具有抗反增透效果的微纳米结构, 该结构采用化学沉银方法制作了随机分布的双面仿生蛾眼抗反射纳米结构透镜, 平均透射率在 97% 以上。分析了相同参数组合条件下周期蛾眼结构和随机蛾眼结构的透射率情况, 得出在设计波段内, 随机蛾眼结构透射率优于周期结构的结论。采用蛾眼透镜进行相关参数的计算, 利用 CODE V 平台设计了一款全蛾眼成像镜头。该蛾眼系统焦距为 25.5 mm, F 数为 5, 视场角 13°, 光谱范围 400~700 nm。经过成像对比试验显示, 蛾眼镜头相比常规镀膜镜头而言, 对鬼像、边缘眩光等杂散光具有很好的抑制作用。

关键词: 蛾眼抗反射结构; 微纳加工; 光学设计; 杂散光抑制

中图分类号: TB17; TN256 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0118004

Development of imaging system with bionic moth-eye anti-reflection structure

Dong Tingting¹, Zhang Guowei¹, Guo Jie¹, Wu Jinshuang², Zhang Weiguo³, Fu Yuegang²

(1. Huazhong Institute of Electro-Optics-Wuhan National Lab for Optoelectronics, Wuhan 430074, China;

2. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

3. Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400700, China)

Abstract: Bionic moth-eye is a kind of micro-nano structure with anti-reflection ability. Random distributed double-sided bionic moth-eye antireflective nanoscale lens was manufactured by chemical precipitation silver method, with an average transmittance of over 97%. It could be concluded that the transmittance of random moth-eye structure was better than that of period structure at the design wavelengths by analyzing the transmittance of both period and random moth-eye structures under the conditions of the same parameter combinations. The moth-eye lens was used to calculate the related parameters, and a whole moth-eye imaging lens was designed by using CODE V platform. This moth-eye optical system has an effective focal length of 25.5 mm, an F-number of 5, a field of view of 13°, a spectral range of 400-700 nm. Compared with conventional coating lens, the moth-eye lens has a good inhibition effect on the ghosts, edge glare and other stray light by performing the imaging contrast test.

Key words: moth-eye anti-reflective structure; micro-nano fabrication; optical design; stray light suppression

收稿日期: 2018-08-13; 修订日期: 2018-09-17

基金项目: 海军装备部十三五预研资助项目

作者简介: 董亭亭(1986-), 女, 工程师, 博士, 主要从事光学设计和微纳光学设计与制作方面的研究。

Email: dong_tingting_good@126.com

0 引言

杂散光是光学系统中非正常传输光的总称,产生于漏光、透镜光学表面的残余反射和镜筒内壁等非光学表面的残余反射,尤其针对大曲率半径的透镜来说,因为在大大入射角的情况下,光束会在透镜的外围产生较强的反射光,这些反射光可能是鬼像、光源杂散光或者其他不需要的,这些光通过 CCD 或者 CMOS 探测器成像以后会形成画面灰雾效果,使像面阴暗对比度下降,影响像的清晰度和色彩还原效果,甚至直接掩盖系统的真实成像,即使镀膜透镜也会有这种效果,因此研究一种大视场范围内抑制鬼像等杂散光的抗反射微纳结构很有必要^[1-3]。

飞蛾复眼结构是由 20 世纪 70 年代 Bernhard 首次发现的,蛾眼微纳结构小于可见光波长,使得光波无法辨认出该微结构,可等效看作材料表面的折射率沿深度方向呈连续变化,减小了折射率急剧变化所带来的反射效应^[4-5]。随着微纳加工工艺的提高,现有多种制作蛾眼微纳结构的方法:如电子束光刻、激光直写技术及自组装等。虽然电子束光刻分辨率在纳米级,但是存在工作效率低且光刻面积小等缺点;激光直写灰度掩膜法可以进行大面积直写,根据文中蛾眼结构设计的最小特征尺寸约 100 nm,即存在加工时间长、价格高等问题;而自组装方法是通过自组装或旋涂等方式进行纳米小球的排列,可控性差,不适宜大幅面样品制作。综合以上方法,文中采用化学沉银方法,该方法是以银离子作为掩膜,高温退火以后再进行干法刻蚀来实现的,具有成本低、利于大面积制作的优点。通过随机分布的双面蛾眼抗反射微纳结构透镜的制作,用来进行蛾眼成像镜头的研制。试验结果表明,与普通镀膜镜头相比可以明显看出蛾眼镜头具有很好的抑制鬼像等杂散光的效果。

1 随机分布蛾眼透镜制作及测试

蛾眼成像系统应用的透镜双面均采用蛾眼抗反射微纳结构制作而成,并进行了设计波段内高度不同、结构大小不同的随机分布与周期分布的蛾眼结构的透射率对比仿真研究。最后采用化学沉银方法进行了随机分布的蛾眼结构镜片的研制及测试,较

好地达到了所需透射率的蛾眼结构要求。

1.1 随机分布与周期蛾眼微纳结构的透射率特性分析

以相同的模拟单元和相同的平均结构大小、平均密度和平均高度进行仿真,其中平均密度是指所有结构的底面积之和与仿真单元面积之比^[6-7]。图 1 是随机分布与周期性蛾眼结构透射率曲线的对比图。透射率曲线图表明,随机分布相比周期性蛾眼结构,其平均透射率可有效地升高近 0.8%。表明在设计波段内随机阵列蛾眼结构比周期蛾眼结构具有更好的抗反增透特性。

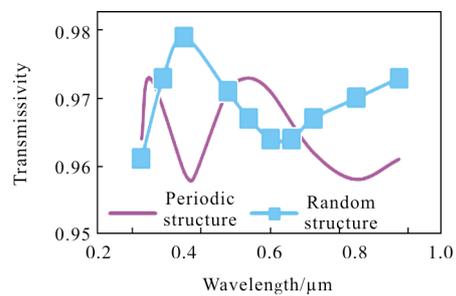


图 1 随机结构与周期结构透射率对比图

Fig.1 Contrast diagram of the transmissivity of random and periodic structure

1.2 蛾眼结构的制作流程

首先,金属银粒子掩膜的制备包括银粒子的制备方法和化学反应中所需的溶液配比及银粒子的退火处理等问题。其次,对于干法刻蚀工艺,采用 ICP 或 RIE 刻蚀工艺对石英基底上制作出随机纳米蛾眼减反结构,并对其进行了光学特性的分析。再次,形貌表征方面,采用扫描电镜进行蛾眼微纳结构的形貌表征验证。最后,测试方面,采用紫外可见分光光度计进行相应结构透射率的测量验证。

整个制作及测试随机纳米蛾眼工艺流程如图 2 所示。第一个面制作蛾眼结构以后,制作第二个面之前,先把第一个制作的蛾眼面应用磁控溅射镀膜

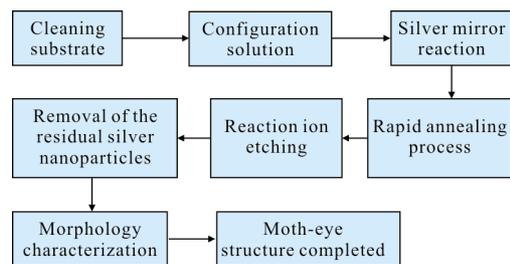


图 2 工艺流程图

Fig.2 Process flow diagram

机进行掩膜的镀制,镀制膜层为铬(Cr)膜,厚度为300 nm,这就起到了保护第一个面蛾眼结构的效果,同时不影响第二个面的制作。同理,重复第一面蛾眼制作,将保护层 Cr 膜用去铬液进行清洗,最后呈现的是双面蛾眼结构和基底材料一致,无任何材料附着在透镜表面。

1.3 蛾眼结构的刻蚀参数分析

采用 ME-3A 型 RIE 对退火后的银粒熔石英透镜进行刻蚀参数的研究。工艺参数也是影响蛾眼结构刻蚀形状因素之一^[8]。

当工作气压固定为 2.5 Pa,射频功率为 100 W。 SF_6 气体比 CHF_3 的刻蚀速率要快,由于蛾眼结构的刻蚀深度为 200 nm 左右,这就要求刻蚀速率不能太快,所以需要混入 CHF_3 气体作为辅助气体来进行辅助作用,两者的混合速率显得尤为重要。因此,经过多次实验得到气体流量比 $CHF_3:Sf_6=40\text{ sccm}:6\text{ sccm}$ 时,刻蚀蛾眼结构的形貌最为理想。当工作气压 2.5 Pa、气体流量比 $CHF_3:Sf_6=40\text{ sccm}:6\text{ sccm}$ 时呈非线性关系。即随着射频功率 RE 增加,气体源离子浓度、分子活性增大,刻蚀速率也随之增大。但并不是 RE 越大越好,随着 RE 进一步提升,结构侧壁、衬底粗糙度将会变大。当 RE 为 100 W、气体流量比 $CHF_3:Sf_6=40\text{ sccm}:6\text{ sccm}$ 时,由实验可知,当工作气压为 3.5 Pa 时达到最佳刻蚀速率,说明该点是低气压和高气压的分界线,各向异性和各向同性刻蚀达到了最佳的平衡状态。

实验显示,参数 RE、工作气压 P 及气体流量 Q 的最优配比对刻蚀速率有较大影响,刻蚀速率过快将导致刻蚀不均匀,表面粗糙;而刻蚀速率慢时,为达到设计深度只能增加刻蚀时间,将产生杂质堆积、面型粗糙等问题,根据上述原因确定了最佳工艺参数组合,即气体流量 $Q(SF_6):Q(CHF_3)=6\text{ sccm}:40\text{ sccm}$,RE 为 100 W,P 为 2.5 Pa,融石英基底温度为 20 °C,不同密度的银粒样片对应不同的刻蚀时间,最后形成大致趋于设计的蛾眼纳米结构。

1.4 热场扫描电镜(SEM)形貌表征

由于采用化学沉银方法和 RIE 制作的蛾眼抗反射微纳结构的特征尺寸在纳米结构范围内,采用热场扫描电镜来进行蛾眼微纳结构的表征最为直观有效。图 3(a)、(b)分别为放大 10 000×、30 000×,样

品台倾斜 30°角进行的形貌观测,该结构达到了预期设计效果。

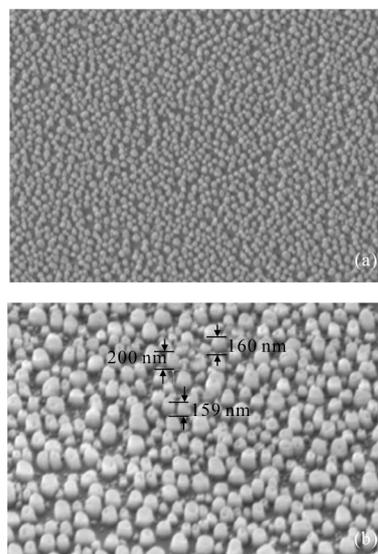


图 3 蛾眼微结构扫描电镜图

Fig.3 SEM of moth-eye microstructure

1.5 紫外/可见分光光度计透射率测量

经过紫外/可见分光光度计 (Lambda 35,Perkin Elmer)测试以后,发现在 300~800 nm 可见光波段,反射率最小的是退火温度 200 °C 时,结构平均直径约为 130 nm,结构平均高度约为 150 nm,抗反射效果在实验中所有退火温度范围内较为理想,可见光波段透镜平均透过率达到 97.7%,如图 4 所示。但是没有达到理想情况,经分析可能有以下几点原因:(1) 设计结构较为理想,但是实际制作过程中制作的微结构大小和形状与设计有一定误差;(2) 刻蚀深度不一致,导致反射率的差异;(3) 在理论计算过程中是将折射率固定为 1.56,而实际过程中折射率会随着波长变化有一定差异。但是银粒子作为掩模不耐刻蚀,因此刻蚀深度不能过深,无法达到红外波

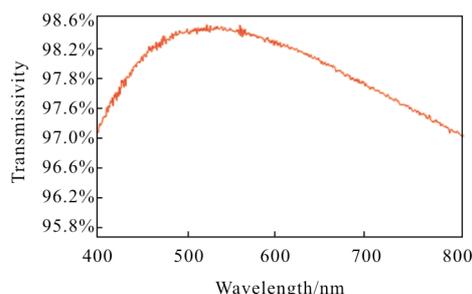


图 4 蛾眼透镜平均透射率曲线

Fig.4 Average transmittance curve of moth-eye lens

段范围。

2 蛾眼成像系统设计

2.1 基本参数

根据蛾眼表面抗反射的特性^[9-10],设计了采用蛾眼表面的抗反射透镜组成的成像系统,该系统选用加拿大 Dalsa C800 型 CCD。光学系统焦距为 25.5 mm,探测器靶面大小 1/3 in(1 in=2.54 cm),像元尺寸为 4.8 μm。根据公式(1)可求得系统视场角 2ω=13°,F 数为 5,总透镜数五片,第一片是 CaF₂ 材料,其余是石英材料。

$$\tan \omega = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2f'} \quad (1)$$

式中:a、b 分别为探测器靶面尺寸的长和宽;ω 为系统半视场;f' 为系统焦距。根据蛾眼镜片的尺寸,经过 Code V 软件的优化设计得到基本光学系统外形图如图 5 示。

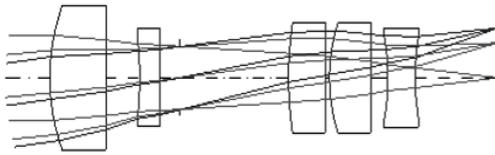


图 5 蛾眼光学系统结构示意图
Fig.5 Layout of moth-eye optical system

2.2 像质评价

调制传递函数(MTF)是最主要的评价像质的方法,如图 6(a)所示,在空间频率为 45 lp/mm 处,全尺寸内的 MTF 值均大于 0.6,因此该蛾眼系统具有良好的成像质量。

系统的畸变曲线如图 6(b)所示,可以看出视场最大畸变为 0.5%,保持在较高的水平,人眼不会察觉,因此满足系统技术要求。

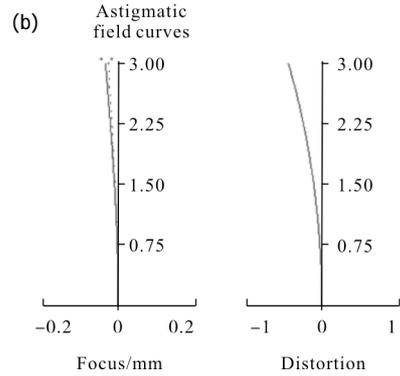
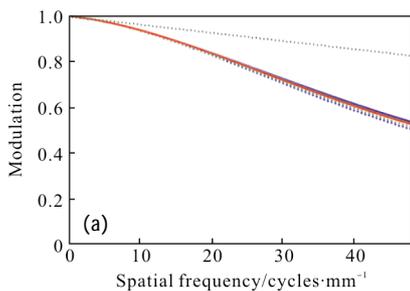


图 6 (a) 光学系统传递函数曲线;(b) 畸变曲线
Fig.6 (a) MTF curves of the optical system,
(b) distortion curves

2.3 点列图

点列图是利用光线分布在像面上一定范围内的弥散点的密集程度来衡量光学系统的成像质量。从点列图可以更直观、全面地了解系统的球差、彗差以及色差的校正情况,如图 7 所示。系统弥散斑大小如表 1 所示。由于材料和曲率半径的使用限制,弥散斑直径的均方根值均未达到一个像元,但是对蛾眼镜头试验效果影响不大。

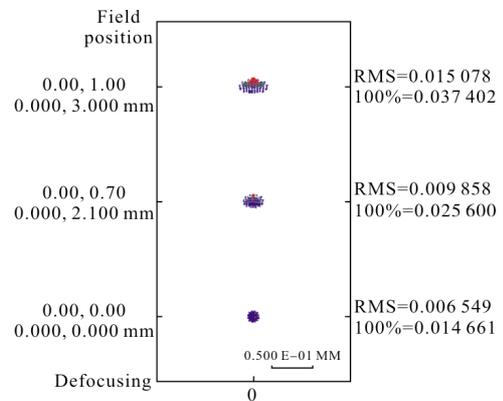


图 7 光学系统点列图
Fig.7 Spot diagram of optical system

表 1 光斑直径的均方根值(单位:μm)
Tab.1 RMS of spot diameter(Unit:μm)

Field of view	Moth-eye
0	6
0.7	9
1	15

3 蛾眼镜头成像试验

为了成像试验效果对比,制作了同蛾眼镜头相同光学结构参数的普通镀膜镜头,透镜表面全部镀制常规可见光增透膜,其单片透镜平均透过率为98.5%。分别对两个镜头(实物如图8所示)测试实际传函和透过率,经测试,整体成像系统透过率达85.5%,传函测试结果如表2所示。



图8 蛾眼镜头(左为普通镜头,右为蛾眼镜头)

Fig.8 Moth-eye lens (Normal lens on the left and moth-eye lens on the right)

表2 两镜头实际测试传函对比表

Tab.2 Comparison of two lens actual test MTF

Field of view	Spatial frequency	Normal lens	Moth-eye lens
0	50	0.38	0.39
0.7	50	0.36	0.39
1	50	0.35	0.36

图9(a)、(b)分别为普通镜头和蛾眼镜头对外景成像,同时侧对中午的太阳。黑色的为窗户框架,普通镜头侧对太阳光时,视场内已经被强太阳光淹没,窗户框架的图像中含有多条杂散光束,背后的建筑物已经无法分辨,而蛾眼镜头几乎无杂散光,黑色窗户框架图像较为均匀,同时仍能看见建筑物,可见蛾眼镜头的抗杂散光效果非常明显。

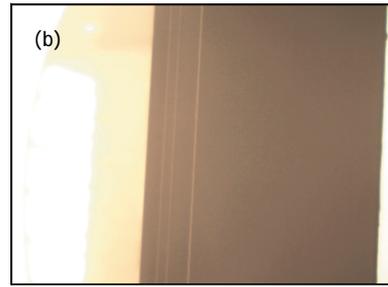


图9 普通镜头(a)和蛾眼镜头(b)对靠近太阳光外景成像
Fig.9 Ordinary lens (a) and moth-eye lens (b) imaging near the sunlight

最后在室内对同一小孔光源成像,小孔大小为5 mm,距离为1 m,成像试验结果如图10所示。

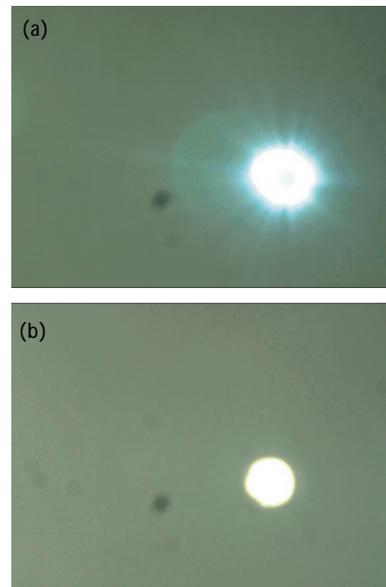


图10 普通镜头(a)和蛾眼镜头(b)对小孔光源成像
Fig.10 Imaging of small hole light source by ordinary lens (a) and moth-eye lens (b)

从图10可以看出,普通镜头对小孔光源成像时,小孔的边缘光束向四周发散,产生边缘眩光,不能分辨出细节,同时在视场中心还出现了一个圆形的杂散光光斑,而蛾眼镜头成像的小孔光源边缘锐利,无任何其余杂散光影响。

4 结论

蛾眼透镜的掩模采用化学沉银方法制作,其透射率可达97.7%以上,符合蛾眼透镜设计要求。并且分析了随机结构相比于周期蛾眼结构透射率的优势。而后,采用反应离子刻蚀机进行了蛾眼结构

制作。最后基于加拿大 Dalsa C800 型 CCD(探测器靶面大小 1/3 in, 像元尺寸 4.8 μm)设计了一种蛾眼成像系统,该系统由五片蛾眼透镜组成,其焦距为 25.5 mm,视场角 13°,光谱范围 400~700 nm,系统整体透过率达 85%以上。综合蛾眼镜头与普通镜头试验对比,蛾眼镜头对鬼像等杂散光具有很好的抑制效果。在红外光学系统中,蛾眼红外透镜对冷反射等同样具有抑制效果,这对将来在特殊环境中应用的光电产品而言具有非常广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] Guo Xudong, Dong Tingting, Fu Yuegang, et al. Development of bionic moth-eye anti-reflective conical micro-nano structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(9): 0910002. (in Chinese)
郭旭东, 董亭亭, 付跃刚, 等. 圆锥形仿生蛾眼抗反射微纳结构的研制[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(9): 0910002.
- [2] Sun Xipeng, Xiao Zhibin, Du Yongchao. Design of broadband antireflection coating for new gallium arsenide solar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(4): 0431002. (in Chinese)
孙希鹏, 肖志斌, 杜永超. 新型砷化镓太阳电池的宽带减反射膜设计[J]. *光学学报*, 2016, 36(4): 0431002.
- [3] Raut H K. Robust and durable polyhedral oligomeric silsesquioxane-based antireflective nanostructures with broadband quasi-omnidirectional properties [J]. *Energy Environ*, 2013, 10(6): 1929-1937.
- [4] Bernhard C G. Structural and functional adaptation in a visual system[J]. *Endeavour*, 1967, 2(6): 79-84.
- [5] Leem J W. Nanostructured encapsulation coverglasses with wide-angle broadband antireflection and self-cleaning properties for III-V multi-junction solar cell applications [J]. *Solar Energy Mater Solar Cells*, 2014: 120(10): 555-560.
- [6] Kong Xiangdong, Fu Yuegang, Xia Liangping, et al. Analysis of Ag nanoparticle resist in fabrication of transmission-enhanced subwavelength structures [J]. *Nanophotonics*, 2016, 10(4): 046017.
- [7] Dong Xiaoxuan, Shen Su, Chen Linsen. Fabrication of moth-eye antireflection nanostructure through a silver mirror reaction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(7): 0722001. (in Chinese)
董晓轩, 申溯, 陈林森. 银镜反应制备纳米蛾眼减反结构法[J]. *光子学报*, 2014, 43(7): 0722001.
- [8] Dong Tingting. Research on the optical mechanism of bionic moth-eye antireflection micro-nano structure [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2016: 61. (in Chinese)
董亭亭. 仿生蛾眼抗反射微纳结构光学机理研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2016: 61.
- [9] Takeharu Okuno. Development of a subwavelength structure coating (SWC) and its application to imaging lenses[C]//SPIE, 2010, 7652: 765203.
- [10] Tadanaga K, Katata N, Minami T. Super-water-repellent Al_2O_3 coating films with high transparency[J]. *J Am Ceram Soc*, 1997, 80(4): 1040-1042.