

圆锥形仿生蛾眼抗反射微纳结构的研制

郭旭东¹,董亭亭²,付跃刚¹,陈 驰²,温春超¹

(1. 长春理工大学 光电工程学院,吉林 长春 130022;
2. 华中光电技术研究所-武汉光电国家实验室,湖北 武汉 430223)

摘 要: 采用时域有限差分(FDTD)法对中红外波段(3~5 μm)硅基底的圆锥形仿生蛾眼微纳结构进行了仿真模拟。通过对微纳结构占空比、周期和刻蚀深度等参数的分析,获得了具有良好抗反射特性的微纳结构的组合参数。为了更好地指导实际加工,对不同参数进行了公差分析。制作中应用二元曝光技术和反应离子刻蚀技术在硅基底上制备得到该圆锥形仿生蛾眼微结构,并且使用热场发射扫描电子显微镜得到了该微结构的表面形貌图。采用红外成像光谱仪对单面微结构的测试结果表明,仿生蛾眼微结构的反射率在中红外波段约为 5%。

关键词: 蛾眼; 抗反射微纳结构; 反射率; 时域有限差分法; 反应离子刻蚀

中图分类号: O485; TN305 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0910002

Development of bionic moth-eye anti-reflective conical micro-nano structure

Guo Xudong¹, Dong Tingting², Fu Yuegang¹, Chen Chi², Wen Chunchao¹

(1. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Huazhong Institute of Electro-Optics-Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430223, China)

Abstract: The finite difference time domain (FDTD) method was adopted for simulation of the conical bionic moth-eye micro-nano structure on silicon substrate in middle infrared band(3–5 μm). A parameter-optimized combination of the micro-nano structure which was of low reflection was obtained by analyzing the parameters of the micro-nano structure, such as fill factor, period and etching depth. In order to guide the actual processing better, tolerance analysis of different parameters was carried out. The binary exposure and reactive ion etching technology were applied to fabricate the conical bionic moth-eye micro structure on silicon substrate in processing. The surface topography of the micro structure was acquired by thermal field emission scanning electron microscopy. The test of the silicon wafer with single-sided micro structure polishing by the infrared imaging spectrometer demonstrates that the reflectivity of the bionic moth-eye micro structure vibrates approximately 5% in middle infrared band.

Key words: moth-eye; anti-reflection micro-nano structure; reflectivity;

finite difference time domain (FDTD) method; reactive ion etching

收稿日期:2017-01-05; 修订日期:2017-02-10

基金项目:吉林省自然科学基金(140101JC010015467)

作者简介:郭旭东(1995-),男,本科生,主要从事仿生光学方面的研究。Email:xu_dong_guo@163.com

导师简介:付跃刚(1972-),男,教授,博士生导师,博士,主要从事仿生光学与光学测量技术方面的研究。Email:fuyg@cust.edu.cn

0 引言

在透射光学系统中,反射不仅减弱了透射光的强度,而且有可能使得图像质量降低。对于一个包含多个光学元件的系统,反射所累加的效果会带来很大的误差。薄膜技术^[1-2]被越来越多地用来减少反射。然而它也有一定的局限,比如对温度敏感、应用波段较窄、以及入射角度的变化对抗反射效率影响明显等^[3]。蛾眼结构能够很好地克服薄膜技术的缺陷,并且达到很好的抗反射效果。这种结构特性是 Bernhard 等人^[4]在 20 世纪 70 年代首先发现的,蛾眼的复眼由周期排列的纳米结构组成,微纳结构的折射率从上到下可以等效认为是渐变变化的,因而使得光在每一层相当于在折射率相同的同一介质传播,减少了反射的损失。蛾眼结构的尺寸很小,传统的标量衍射理论已不再适用,必须采用矢量衍射理论来分析。时域有限差分(FDTD)法由 K.S.Yee 于 1966 年提出,通过对麦克斯韦方程进行差分处理,较精确地给出了电磁波在介质中的传播情况^[5]。多年来,各国研究者设计和制造了不同的蛾眼结构,包括圆柱形^[6-7]、圆孔形^[8]和随机结构^[9],应用于不同的领域,比如红外辐射传感器^[10]、太阳能^[11-12]和 LED^[13-15]等。圆柱形和圆孔形虽然具有较好的抗反增透特性,但是其工作波段较窄,不能应用于宽波段。文中研究的圆锥形微纳结构沿深度方向上是渐变的,因此等效折射率也在上下表面间渐变变化,具有宽波段抗反射的特性优势。

1 圆锥形微纳结构的设计与分析

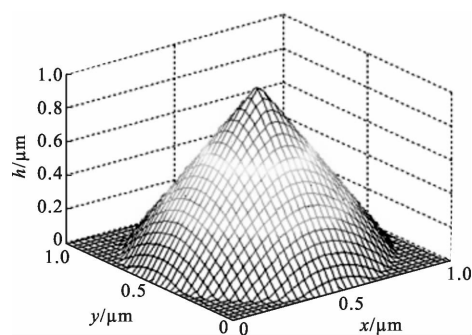
单一周期圆锥形抗反射微纳结构的表达式为^[16]:

$$Z(x, y) = \left(1 - \frac{r(x, y)}{\Lambda/2}\right) h \quad (1)$$

式中:任一点 (x, y) 到顶点 (x_0, y_0) 的距离 $r(x, y)$ 可以表示为:

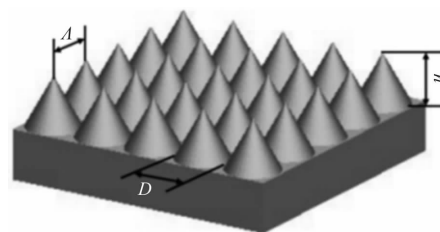
$$r(x, y) = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2} \quad (2)$$

顶点位于单一圆锥体的中心, Z 轴垂直于介质表面, h 表示底面到顶点的高度, Λ 表示结构周期, D 表示微纳结构底面直径。占空比(f)为微纳结构底面直径(D)与微纳结构周期(Λ)的比值。当 $r(x, y) < \Lambda/2$,则有 $Z > 0$;当 $r(x, y) > \Lambda/2$, $Z = 0$ 或者根据实际加工会略小于 0,允许轻微凹陷。图 1 为圆锥形蛾眼微纳结构阵列的示意图。



(a) 归一化的单周期

(a) Normalized single cycle



(b) FDTD Solutions 中的圆锥形阵列三维图

(b) 3D diagram of conical array in FDTD Solutions

图 1 圆锥形蛾眼微纳结构的示意图

Fig.1 Diagram of conical moth-eye micro-nano structure

使用 MATLAB 和 FDTD Solutions 软件对影响微纳结构反射率的占空比、周期和刻蚀深度等参数进行仿真分析,得到在中红外波段具有较好抗反射特性的微纳结构参数为: $f=1, \Lambda=3 \mu\text{m}, d=3 \mu\text{m}$ 。

2 圆锥形微纳结构阵列参数分析

由于微纳结构的尺度很小,需要应用矢量衍射的方法分析,各级次衍射光的波矢 k 可表示为^[6]:

$$k_{xi} = k_0 [n_i \sin\theta - i(\lambda_0/\Lambda)] \quad (3)$$

$$k_{l,mi} = \begin{cases} k_0 [n_l^2 - (k_{xi}/k_0)^2]^{1/2} & n_l k_0 > k_{xi} \\ -jk_0 [(k_{xi}/k_0)^2 - n_l^2]^{1/2} & n_l k_0 < k_{xi} \end{cases} \quad l=1, 2 \quad (4)$$

式中: k_{xi} 沿微纳结构界面的切线方向; k 在反射区和透射区沿界面法向方向的分量分别用 $k_{1,mi}$ 和 $k_{2,mi}$ 表示。当 $k_{l,mi}$ 为虚数时,第 i 级衍射波倏逝。当入射光波正入射($\theta=0^\circ$)时,若满足 $n_l < k_{xi}/k_0 = -i(\lambda_0/\Lambda)$,则第 i 级衍射波发生倏逝,即有

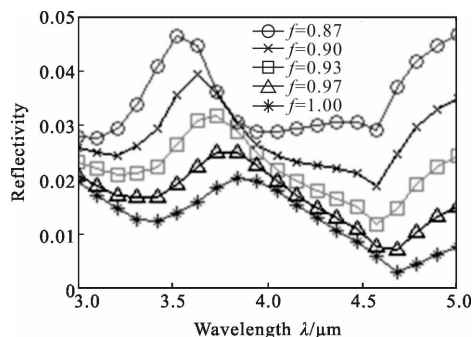
$$\Lambda < -i \frac{\lambda_0}{n_l} \quad (5)$$

综合上式,假设入射光从一种介质(折射率为 n_1)入射到仿生蛾眼周期微纳结构(基底折射率为 n_2)时,在反射区和透射区仅存在零级衍射需要分别满足周

期 $\Lambda < \lambda_0/n_1$ 和 $\Lambda < \lambda/n_2$ 。

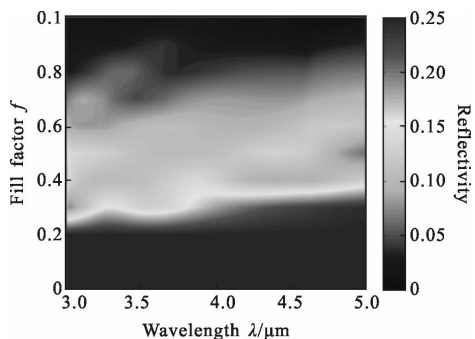
2.1 占空比对反射率的影响

当制备一定刻蚀深度的圆锥形微纳结构时,底面直径可能存在误差,对应的微纳结构的占空比(f)会发生变化,从而会对其抗反射特性造成影响。首先假定仿生蛾眼微结构的周期 $\Lambda=3 \mu\text{m}$,深度 $d=3 \mu\text{m}$ 。通过模拟分析,研究了占空比对反射率和透射率的影响,如图 2 所示。图 2(a)为选定五个占空比时微纳结构



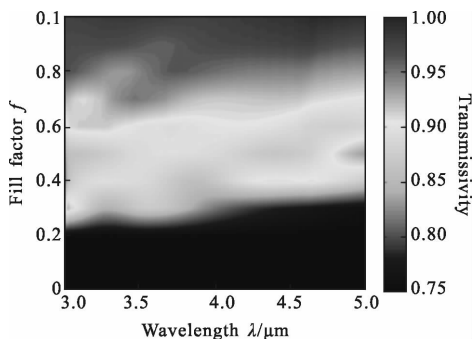
(a) 五个选定的占空比与反射率的关系

(a) Relationship between five chosen fill factors and reflectivity



(b) 占空比与反射率的关系

(b) Relationship between fill factor and reflectivity



(c) 占空比与透射率的关系

(c) Relationship between fill factor and transmissivity

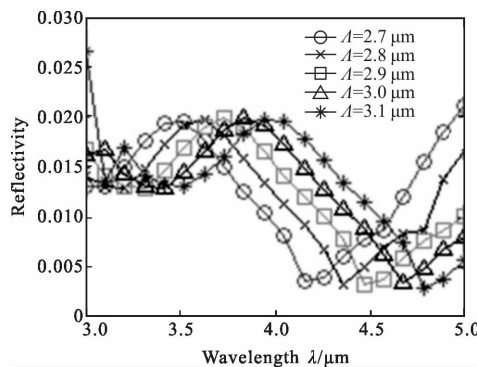
图 2 占空比与反射率和透射率的关系

Fig.2 Relationship between fill factor and reflectivity, transmissivity, respectively

的反射率变化曲线,反射率极小值点随占空比增加而向右移动,但对应的波长变化不大;图 2(b)为占空比与反射率的关系,可以看出占空比越大,反射率越低;图 2(c)表示占空比对透射率的影响,可以看出微结构的占空比越大,其透射率越高。综合分析,在制备圆锥形仿生蛾眼结构过程中应该尽量增大其占空比。

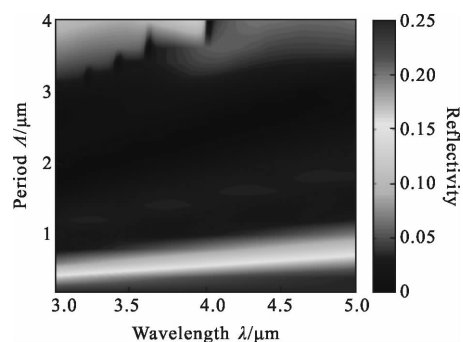
2.2 阵列周期对反射率的影响

由上文分析可知,占空比越大,微纳结构反射率越低,因此选定一定周期范围内占空比为 1 的微纳结构,代表相应周期可以达到的最低反射率,微纳结构周期(Λ)与反射率和透射率的关系如图 3 所示。图 3(a)为选定的几个周期与反射率的关系曲线,可知反射率的极大值和极小值点随周期的增加而向右移动,如果需要在特定的波段达到最低的反射率,可以选择相应的周期,同时随周期的增加反射率曲线整体向右平移;图 3(b)为周期与反射率的关系,可以看出反射率随周期增大而逐渐降低。图 3(c)表示周期与透射率的关系,可以看出透射率较高的区域带随周期增加逐渐右移。为了使微纳结构在整个波段达到较好的抗反射效果,可选择 $\Lambda=3 \mu\text{m}$ 。



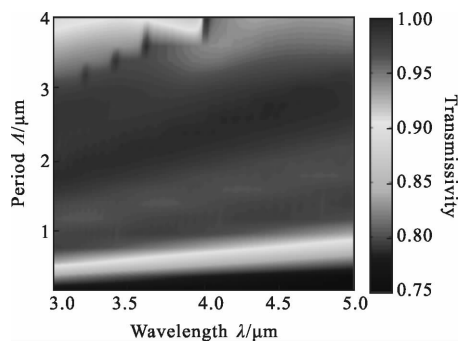
(a) 五个选定的周期与反射率的关系

(a) Relationship between five chosen periods and reflectivity



(b) 周期与反射率的关系

(b) Relationship between period and reflectivity

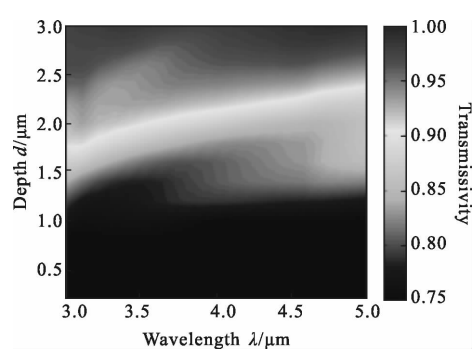


(c) 周期与透射率的关系

(c) Relationship between period and transmissivity

图 3 周期与反射率和透射率的关系

Fig.3 Relationship between period and reflectivity, transmissivity, respectively



(c) 刻蚀深度与透射率的关系

(c) Relationship between etching depth and transmissivity

图 4 刻蚀深度与反射率和透射率的关系

Fig.4 Relationship between etching depth and reflectivity, transmissivity respectively

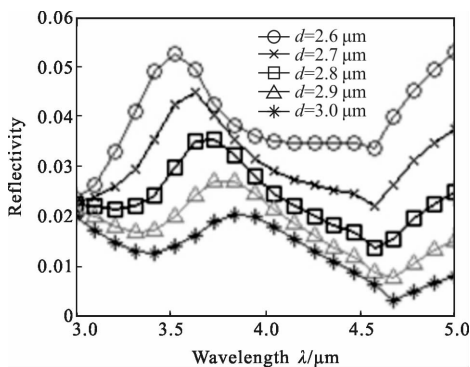
2.3 刻蚀深度对反射率的影响

图 4 为刻蚀深度 d 对反射率和透射率的影响, 仿生蛾眼微结构周期一定 ($\Lambda=3 \mu\text{m}$), 图 4(a) 为选定的几个深度的反射率情况曲线图, 可以看出随着深度增加, 反射率极大值和极小值点向右平移, 曲线趋于平缓; 图 4(b) 为反射率与刻蚀深度的关系, 可以看出刻蚀深度越深, 抗反射性能越好, 主要原因在于随

着该微结构刻蚀深度的增加, 其等效折射率相对于空间尺度会渐变的更加平缓; 图 4(c) 为刻蚀深度与透射率的关系, 成正相关关系。因此, 为了取得较好的抗反射效果, 应当最大程度地增加该微结构的刻蚀深度。

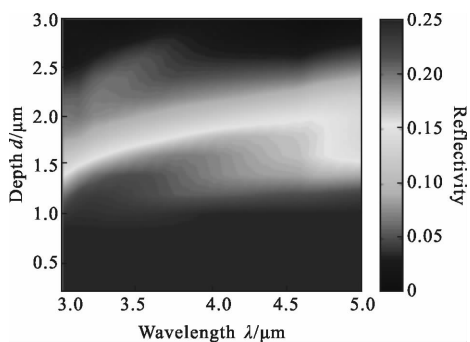
3 公差分析

通过上述分析, 文中选取的具有较好抗反射特性的仿生蛾眼微结构参数为: $f=1, \Lambda=3 \mu\text{m}, d=3 \mu\text{m}$ 。该微结构的结构偏差在实际制备中会不可避免地引入, 所制备的微结构的抗反射特性可能达不到要求。为了表征不同参数对反射率的影响程度, 并且更好地指导实际加工, 需要对不同参数进行公差分析, 如图 5 所示, 其中反射率对应蛾眼微结构的反射率在中红外波段的平均值, 来描述相应结构的抗反射特性。虚线对应反射率为 0.05 的情况, 低于该值, 可以认为抗反射特性良好, 满足加工要求。



(a) 五个选定的刻蚀深度与反射率的关系

(a) Relationship between five chosen etching depths and reflectivity



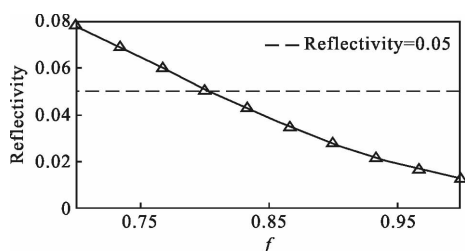
(b) 刻蚀深度与反射率的关系

(b) Relationship between etching depth and reflectivity

图 5(a) 为对占空比进行的公差分析, 当占空比大于 0.8 时, 即该微结构的底面直径大于 $2.4 \mu\text{m}$ 时, 反射率在 0.05 以下, 满足制备要求; 图 5(b) 为对周期进行的公差分析, 当周期大于 $3 \mu\text{m}$ 时, 反射率增加明显, 周期小于 $3.6 \mu\text{m}$ 可以达到制备要求; 图 5(c) 为对刻蚀深度进行的公差分析, 当深度大于 $2.5 \mu\text{m}$ 时, 平均反射率会在 0.05 以下, 刻蚀深度越深越好。

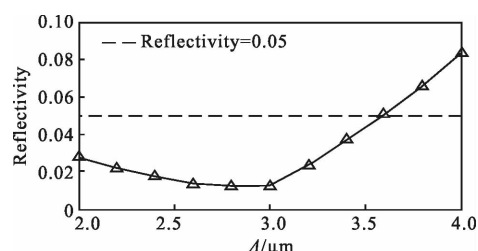
综上所述, 对于所制备的圆锥形蛾眼微结构, 为使其在中红外波段的平均反射率在 0.05 以下, 底面直径应大于 $2.4 \mu\text{m}$, 周期需小于 $3.6 \mu\text{m}$, 刻蚀深度

应大于 $2.5 \mu\text{m}$ 。



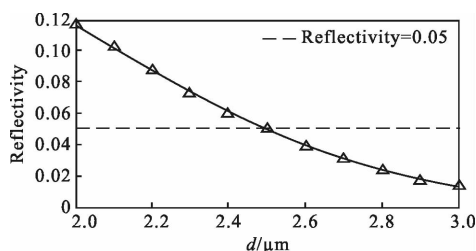
(a) 对占空比的公差分析

(a) Tolerance analysis of fill factor



(b) 对周期的公差分析

(b) Tolerance analysis of period



(c) 对刻蚀深度的公差分析

(c) Tolerance analysis of etching depth

图 5 对不同参数的公差分析

Fig.5 Tolerance analysis for different parameters

4 制作及测试

4.1 实验制作流程

通过干法刻蚀的方法来制备圆锥形抗反射仿生蛾眼微结构。实验选用的材料为本征硅片,其基本参数如表 1 所示。

表 1 Si 材料物理参数

Tab.1 Physical parameters of silicon

Resistance / $\Omega \cdot \text{cm}$	Crystal orientation/($^\circ$)	Diameter/mm	Thickness/ μm
>10 000	<100> ± 0.5	50.8 ± 0.2	440 ± 5

该微结构的具体制备过程如图 6 所示。首先应用磁控溅射的方法在清洗干净的 2in (1in=2.54 cm)本

征硅片上沉积金属 Cr 掩模,之后在 Cr 层上均匀旋涂光刻胶,经过前烘后通过激光直写在光刻胶上曝光,显影、后烘结束后进行反应离子刻蚀的过程,最终得到的圆锥形仿生蛾眼微结构的曲率半径约为 60 nm 。

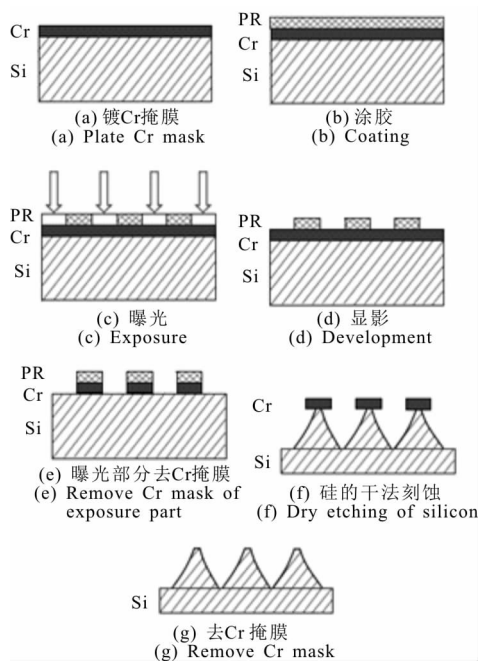


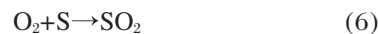
图 6 仿生蛾眼结构制备流程示意图

Fig.6 Diagram of fabrication process of bionic moth-eye structure

制备的圆锥形抗反射仿生蛾眼微结构工作中在红外波段($3 \sim 5 \mu\text{m}$),其设计参数为: $f=1, \Lambda=3 \mu\text{m}, d=3 \mu\text{m}$ 。首先将 SF_6 和 O_2 的混合气体作为刻蚀气体,其流量分别为 20 sccm 和 15 sccm ,刻蚀 5 min 后,再进行流量为 20 sccm 的 SF_6 单独刻蚀。

在该参数下,反应离子刻蚀系统中离子对硅的刻蚀是各向同性和各向异性刻蚀的混合,因此,尽管有 Cr 掩模的保护,掩模下的硅同样也能被 F 离子刻蚀,形成锥形的硅尖。降低刻蚀的气压,可以提高各向异性刻蚀的比例。

需要注意的是,加入 O_2 是为了使反应室发生下式反应:



这样可以增加 F 离子的浓度,从而提高刻蚀的速率。

4.2 实验结果

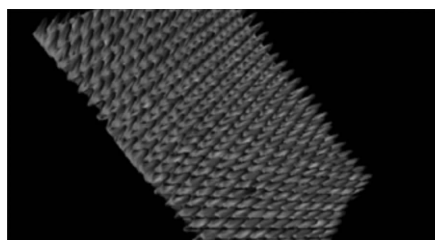
图 7 为所制备的圆锥形抗反射仿生蛾眼微结构的实物图。图 8 为使用 ZYGO New View 7100 型白光干涉仪观察圆锥形抗反射仿生蛾眼微结构表面得

到的形貌特征图。图 8(a)为其三维形貌图,可以看出该微结构呈一致有序排列,较为均匀。图 8(b)为仿生蛾眼微结构的横截面示意图,周期约为 $3.2\ \mu\text{m}$,刻蚀深度为 $3\ \mu\text{m}$,底面直径为 $2.6\ \mu\text{m}$,基本满足上文公差分析的制备要求,因此圆锥形抗反射仿生蛾眼微结构的制作较为理想。



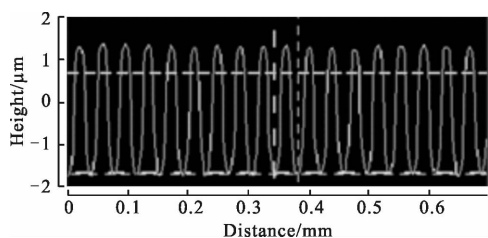
图 7 仿生蛾眼结构元件

Fig.7 Bionic moth-eye structure element



(a) 三维形貌图

(a) Figure of three-dimensional profile



(b) 横截面示意图

(b) Sketch of cross section

图 8 ZYGO 观察仿生蛾眼结构形貌图

Fig.8 Bionic moth-eye structure morphology of ZYGO observation

通过实验制作出圆锥形周期仿生蛾眼微结构样片后,需要对该微结构进行测试,测试结果如图 9 所示。文中采用的是 Spotlight400 型红外成像光谱仪,无微纳结构的本征硅片的反射率约为 58%,相应的单面圆锥形抗反射仿生蛾眼微结构的总体平均反射率约为 5%,抗反射性能良好,满足上文的加工要求,但在 $4.25\ \mu\text{m}$ 波段出现尖峰,可能是由测试误差造成的。

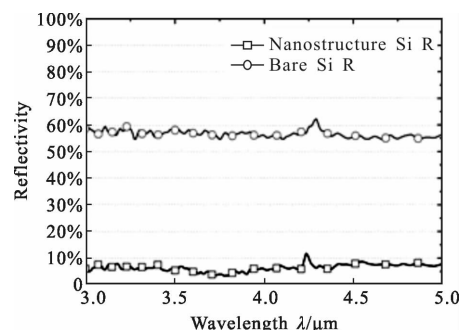


图 9 圆锥形仿生蛾眼微结构与无结构本征硅片的反射率曲线对比图

Fig.9 Comparison of reflectivity curves of conical bionic moth-eye micro structure and non-structure intrinsic silicon wafer

5 结论

文中基于时域有限差分法,通过仿真分析了圆锥形仿生蛾眼微纳结构的占空比、周期和刻蚀深度等参数对其反射率的影响,确定了圆锥形抗反射仿生蛾眼结构较为理想的组合参数,并通过采用二元曝光技术和反应离子刻蚀技术,在本征硅片上制作得到了具有较好抗反射性的单面圆锥形仿生蛾眼微结构,基本满足公差分析的制备要求,同时测试结果显示该微结构的反射率在 5%左右波动。但这与设计结果有一定的差距,是因为存在刻蚀误差,优化制作工艺的流程和提高刻蚀的精度可以降低误差。通过制造小周期的仿生蛾眼结构也可以减轻误差的影响,使抗反射特性得到提升。

参考文献:

[1] Wu Jiang, Shen Weidong, Yuan Wenjia, et al. Anti-ultraviolet radiation of antireflection coatings for display plastics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 282-285. (in Chinese)
 武江, 沈伟东, 袁文佳, 等. 抗紫外辐射塑料显示面板的减反射膜[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 282-285.

[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] Boden S A, Bagnall D M. Optimization of moth-eye antireflection schemes for silicon solar cells [J]. *Progress in*

- Photovoltaics: Research and Applications*, 2010, 18: 195–203.
- [4] Bernhard C G, Miller W H. A corneal nipple pattern in insect compound eyes [J]. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1962, 56(3): 385–386.
- [5] Kane Yee. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations in isotropic media [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1966, 14(3): 302–307.
- [6] Dong Tingting, Fu Yuegang, Chen Chi, et al. Study on bionic moth-eye antireflective cylindrical micro-nano structure on germanium substrate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0522004. (in Chinese)
董亭亭, 付跃刚, 陈驰, 等. 锗衬底表面圆柱形仿生蛾眼抗反射微纳结构的研制[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0522004.
- [7] Dong Tingting, Fu Yuegang, Chen Chi, et al. Design and manufacture of columned antireflective periodic microstructures on the surface of Si substrate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0622002. (in Chinese)
董亭亭, 付跃刚, 陈驰, 等. Si 衬底表面圆柱形抗反射周期微结构的设计及制作 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(6): 0622002.
- [8] Kim Yoon-Chang, Do Young Rag. Nanohole-templated organic light-emitting diodes fabricated using laser-interfering lithography: moth-eye lighting [J]. *Optics Express*, 2005, 13(5): 1598–1603.
- [9] 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.
- [10] Glaser T, Ihring A, Morgenroth W, et al. High temperature resistant antireflective moth-eye structures for infrared radiation sensors [J]. *Microsystem Technologies*, 2003, 11: 86–90.
- [11] Kim Byung-Jae, Kim Jihyun. Fabrication of GaAs subwavelength structure (SWS) for solar cell applications[J]. *Optics Express*, 2011, 19(S3): A326–A330.
- [12] Bai Yu, Guo Xiaoyang, Liu Xingyuan. Theoretical study on the improvement of light absorption efficiency of organic solar cells by moth eye structures [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(5): 539–544. (in Chinese)
白昱, 郭晓阳, 刘星元. 利用蛾眼结构提高有机太阳能电池光吸收效率的理论研究 [J]. *发光学报*, 2015, 36(5): 539–544.
- [13] Kondo T, Suzuki A, Teramae F, et al. Enhancement of light extraction efficiency on blue light-emitting diodes by moth-eye structure[C]//SPIE, 2010, 7602: 76021M.
- [14] Rogers D J, Sandana V E, Hosseini Teherani F, et al. Fabrication of nanostructured heterojunction LEDs using self-forming "Moth-Eye" type arrays of n-ZnO nanocones grown on p-Si (111) substrates by pulsed laser deposition[C]//SPIE, 2009, 7217: 721708.
- [15] Naniwae K, Mori M, Kondo T, et al. Introduction of the moth-eye patterned sapphire substrate technology for cost effective high performance LEDs [C]//SPIE, 2013, 8641: 86410G.
- [16] 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.