

宽光谱广角蛾眼抗反射超表面结构设计分析

林鹤^{1,2}, 付跃刚^{1,2*}, 欧阳名钊^{1,2}, 赵宇^{1,2}, 朱启凡^{1,2}, 吴锦双^{1,2}

¹长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;

²长春理工大学先进光学设计与制造技术吉林省高校重点实验室, 吉林 长春 130022

摘要 本研究采用严格耦合波分析法设计具有宽带广角抗反射特性的 ZnS MS 材料的蛾眼亚波长周期微纳结构。基于严格耦合波理论, 控制周期尺寸小于入射波长与材料折射率的比值, 实现高级次衍射波为倏逝波, 以提高蛾眼结构宽带抗反射效率。采用时域有限差分法分析蛾眼结构周期、底端直径、结构高度和顶端直径对光谱透过率的影响, 并对 4 种结构参数进行优化。此外, 还选取可见光、近红外和中红外三个特征波长进行宽角度入射的电场分析。研究表明: 在短波范围内, 蛾眼宽角度抗反射性能取决于结构表面的减反射和前向散射的能力; 而在长波范围内, 蛾眼结构被视为 ZnS MS 平面膜层, 其光谱特性主要受 Fabry-Perot 干涉影响。该研究为不同波段宽角度蛾眼结构设计提供了理论依据和设计方法。

关键词 光学设计; 亚波长结构; 蛾眼超表面结构; 时域有限差分法; 光学窗口

中图分类号 O485; TN305

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0113002

Design and Analysis of Moth-Eye Antireflective Metasurface Structure with Broadband and Wide-Angle

Lin He^{1,2}, Fu Yuegang^{1,2*}, Ouyang Mingzhao^{1,2}, Zhao Yu^{1,2}, Zhu Qifan¹, Wu Jinshuang¹

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Measurement and Optical Information Transmission Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

²Key Laboratory of Advanced Optical System Design and Manufacturing Technology of the Universities of Jilin Province, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract A bionic moth-eye sub-wavelength periodic micro-nanostructure of ZnS MS material, with broadband and wide-angle antireflection properties is designed by the rigorous coupled-wave analysis method. According to the rigorous coupled wave theory, a suitable control of periodic size, smaller than the ratio between the incident wavelength and the refractive index of materials, makes the high-order diffracted wave as an evanescent wave, and thus the broadband antireflection efficiency of this moth-eye structure is enhanced. The finite difference time domain algorithm is used to investigate the effects of moth-eye structural period, bottom diameter, structural height and top diameter on spectral transmissivity. Moreover, four structural parameters are optimized. In addition, three characteristic wavelengths in the visible, near-infrared and middle-infrared regime are selected for the electric field analysis under a wide-angle incidence. The research results show that in the short-wavelength range, the moth-eye wide-angle anti-reflection performance is determined by the anti-reflection and forward-scattering ability of this structural surface, while in the long-wavelength range, the moth-eye structure is regarded as a ZnS MS plane film, and its spectral properties are mainly affected by the Fabry-Perot interference. This study provides a theoretical basis and a design method for the design of moth-eye wide-angle structures under different wavelengths.

Key words optical design; sub-wavelength structure; moth-eye metasurface structure; finite difference time domain method; optical window

OCIS codes 220.4610; 050.6624; 310.6628; 260.2065; 350.6830

收稿日期: 2018-07-30; 修回日期: 2018-08-27; 录用日期: 2018-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(51505078)、吉林省自然科学基金项目(20150101038JC)

* E-mail: fuyg@cust.edu.cn

1 引 言

自然界中的光子微结构,例如飞蛾、蝴蝶^[1-3]、植物^[4-5]等可以通过有效地操纵光进行伪装、物种内通信、热调节和许多其他生物过程。模拟这些优化的光子结构原型在光电子器件的设计和和功能研究方面起着重要作用^[6]。随着湿法蚀刻^[7]、低压沉积^[8]、干涉光刻^[9]和纳米压印^[10]等微纳加工制造技术和理论研究的快速发展,具有特殊性能的仿生微纳结构受到广泛关注,并被应用到各个领域当中^[11-14]。其中,具有抗反射特性的蛾眼结构被广泛应用到太阳能电池领域。Leem等^[15]通过掠角沉积技术,在玻璃表面利用纳米金颗粒掩模刻蚀出蛾眼抗反射结构,在300~1800 nm光谱范围内,单面蛾眼结构平均透过率达到95.9%,有效地将太阳能电池光电转换效率提升了1.4%。另一方面,具有抗反射特性的蛾眼结构被应用到探测器、显示屏以及光学窗口等领域。Li等^[16]应用聚苯乙烯(PS)球自组装制作出200 nm周期阵列的蛾眼结构,在可见光波段透过率达到96%以上;Tan等^[17]采用压印工艺在柔性基板上制备出蛾眼纳米结构薄硬涂层,在可见光波段,平均反射率小于0.23%。

目前,微纳米结构能够实现抗反射效果的波谱范围仍然有限,而宽谱段抗反射微纳结构器件作为检测仪器及光学系统中的核心元件,在实际应用中发挥着不可替代的作用^[18-19],尤其是在军备光学窗口应用方面。随着技术的发展,宽谱段、宽角度、适应能力强等要求已经成为硬性指标^[20]。

本文采用严格耦合波分析(RCWA)法,通过优化蛾眼结构尺寸参数,控制高级次衍射波为倏逝波,实现蛾眼结构在宽光谱广角范围内的抗反射性能。采用时域有限差分法(FDTD)对ZnS MS材料的仿生蛾眼微纳结构的初始参数进行优化设计,并在宽光谱广角范围对蛾眼结构的周期、底端直径、结构高度和顶端直径进行参数优化,分析各个参数对蛾眼结构透过率的影响。同时,基于电场分布的计算,讨论在可见光、近红外和中红外特征波长下,影响宽角度入射蛾眼结构透过率的因素,为仿真设计提供理论基础。理论分析与仿真相结合,优化设计出的最优蛾眼抗反射微纳结构具有可实际加工性,满足光学元器件的使用要求。

2 理论模型与仿真方法

2.1 理论模型

蛾眼抗反射结构的理论模型示意图如图1(a)所示,蛾眼结构单元呈周期性结构排列。本课题组以前的工作^[21-23]表明,蛾眼结构可以有效地提高光子传输效率,并且可见光和红外波段的材料吸收特性几乎不变。蛾眼结构单元几何参数如图1(b)所示。一般情况下,蛾眼中心的形心位置被放置在相应的单元中心。该蛾眼结构单元的数学表达式为

$$Z(x, y) = (D - \sqrt{x^2 + y^2}) \cdot \frac{H}{D - d},$$

$$d < \sqrt{x^2 + y^2} < D, \quad (1)$$

式中: (x, y) 为结构单元内坐标点; D 为底端直径; H 为结构高度; d 为顶端直径; θ 为入射光线与法线的夹角; Z 轴垂直于结构平面。

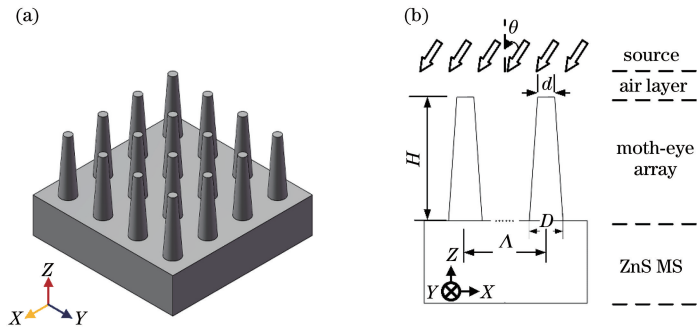


图1 蛾眼结构理论模型。(a)三维结构模型;(b)仿真模型示意图

Fig. 1 Theoretical model of moth-eye structure. (a) Three-dimensional structural model; (b) schematic of simulation model

2.2 仿真方法

采用FDTD对该结构的光谱特性进行计算。在计算反射率、透射率、吸收和电场分布时,利用平面波源,工作波段为0.41~5 μm。在正入射情况

下,将周期边界条件应用于X和Y方向,将完美匹配层(PML)边界条件应用于Z方向^[24-25]。斜入射情况下,为了模拟入射光周期中的相位差,采用布洛赫(Bloch)边界条件代替X和Y方向的周期边界条

件。鉴于对蛾眼抗反射结构光谱特性仿真的可靠性,分别对多个结构参数进行 8 到 12 次模拟,并取平均值为最终结果。分别采用积分反射率、透射率和吸收的方法,定量评价蛾眼结构的光学特性,积分公式分别为^[26]

$$R_{\text{int}} = \left[\int_{\lambda} I(\lambda) R(\lambda) d\lambda \right] / \left[\int_{\lambda} I(\lambda) d\lambda \right], \quad (2)$$

$$T_{\text{int}} = \left[\int_{\lambda} I(\lambda) T(\lambda) d\lambda \right] / \left[\int_{\lambda} I(\lambda) d\lambda \right], \quad (3)$$

$$A_{\text{int}} = \left[\int_{\lambda} I(\lambda) A(\lambda) d\lambda \right] / \left[\int_{\lambda} I(\lambda) d\lambda \right], \quad (4)$$

式中: λ 为入射波长; $I(\lambda)$ 为太阳能标准测试 AM1.5 条件下的太阳辐照度; $R(\lambda)$, $T(\lambda)$ 和 $A(\lambda)$ 分别为光谱反射率、透射率和吸收率, $R(\lambda)$, $T(\lambda)$ 和 $A(\lambda)$ 可以表示为

$$R(\lambda) = \int_{S_r} \text{Re}(\mathbf{P}_r) dS / (2W_{\text{source}}), \quad (5)$$

$$T(\lambda) = \int_{S_t} \text{Re}(\mathbf{P}_t) dS / (2W_{\text{source}}), \quad (6)$$

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda) - T(\lambda), \quad (7)$$

式中: $\text{Re}(\mathbf{P}_r)$ 和 $\text{Re}(\mathbf{P}_t)$ 分别为坡印廷矢量平均反射率和平均透射率的实部; S_r 和 S_t 分别为反射率和透射率测量监视器的表面积; W_{source} 为平面波能量。

基于 ZnS MS 材料设计的蛾眼结构,解决了膜层中多种材料不匹配的问题。由于自由空间和 ZnS MS 基底之间折射率渐变可反映抗反射特性,所以圆台型微纳结构的几何参数对抗反射的效率有很大的影响。为了模拟不同参数对抗反射性能的影响,在仿真过程中采用控制变量的方法,形成从一个到多个变量的仿真模式,来综合评价蛾眼性能。

3 分析与讨论

基于 RCWA 分析方法,正入射条件下第 i 级衍射波为倏逝波需要满足的条件为

$$\Delta < i\lambda/n_i, \quad (8)$$

斜入射条件下第 i 级衍射波为倏逝波需要满足的条件为

$$\Delta < -i\lambda/(n_g + n_i \sin \theta), \quad (9)$$

式中: Δ 为蛾眼结构周期; n_i , n_g 分别为基底折射率与入射介质折射率; i 为衍射级次。结合 RCWA 分析结果,首先对正入射($\theta=0^\circ$)条件下工作波段为 $0.41 \sim 5 \mu\text{m}$ 的蛾眼结构参数进行优化设计。图 2 为不同结构周期 Δ 、不同结构高度 H 、不同底端直径 D 和顶端直径 d 情况下,入射波长与透过率的关

系曲线图。考虑到实际加工限制等因素,选定初始结构周期变化范围为 $1000 \sim 2000 \text{ nm}$,底端直径、结构高度和顶端直径固定(分别为 $400, 1000, 50 \text{ nm}$)。如图 2(a) 所示,随着周期的不断增加,蛾眼结构的透过率不断降低,并且在可见光和近红外波段峰值变化越来越明显。正如(8)式所示,当周期大于波长与材料折射率的比值时,高级次衍射效应将会影响蛾眼结构的光能传输,进而影响抗反射性能。图 2(b) 为蛾眼结构底端直径变化对宽带透过率的影响。底端直径变化范围为 $400 \sim 1000 \text{ nm}$,周期、结构高度和顶端直径固定(分别为 $1000, 1000, 50 \text{ nm}$)。可以看到,随着底端直径的增大,蛾眼结构的抗反射性能不断增加,当蛾眼结构的底端直径接近周期时,宽带抗反射性能达到最大,平均透过率也随之提高近 2.7%,尤其是在中红外波段,底端直径为 1000 nm 时的平均透过率较 400 nm 提高近 4%。这主要是因为周期不变的情况下,底端直径的增加改变了蛾眼结构单元的占空比,使折射率梯度分布更加均匀,光能透过率提高。

蛾眼结构高度变化对宽带透过率的影响如图 2(c) 所示。结构高度变化范围为 $1000 \sim 1500 \text{ nm}$,周期、底端直径和顶端直径固定(分别为 $1000, 400, 50 \text{ nm}$)。蛾眼结构高度的抗反射作用机理与底端直径相同,是通过改变梯度折射率来提高抗反射性能。从仿真曲线可以看出,随着蛾眼结构高度的增加,透过率不断增大。这是因为结构高度的增加,使蛾眼结构梯度折射率的纵向变化间隔(Δn)逐渐减小。根据分层介质理论,梯度折射率的变化间隔越小,介质层受菲涅耳反射的影响越小,越有利于宽带抗反射性能的实现。图 2(d) 为蛾眼结构顶端直径变化对宽带透过率的影响。顶端直径变化范围为 $50 \sim 400 \text{ nm}$,周期、底端直径和结构高度固定(分别为 $1000, 400, 1000 \text{ nm}$)。从仿真曲线可以看出,顶端直径的变化主要影响可见光和部分近红外谱段的透过率。随着顶端直径的增加,蛾眼结构的透过率不断降低,当其数值等于底端直径时,蛾眼结构的形貌呈圆柱形,从透过率数值可以看出,圆台型蛾眼形貌的抗反射性能明显优于圆柱形型蛾眼形貌的抗反射性能。

基于宽带抗反射结构的优化设计方法,对宽角度蛾眼结构抗反射性能进行对比分析。图 3 为 $0.41 \sim 5 \mu\text{m}$ 工作波段内蛾眼结构宽角度透过率与各变化参数的关系曲线图。图 3(a) 为宽角度入射时周期变化对蛾眼结构光学性能的影响。当周期

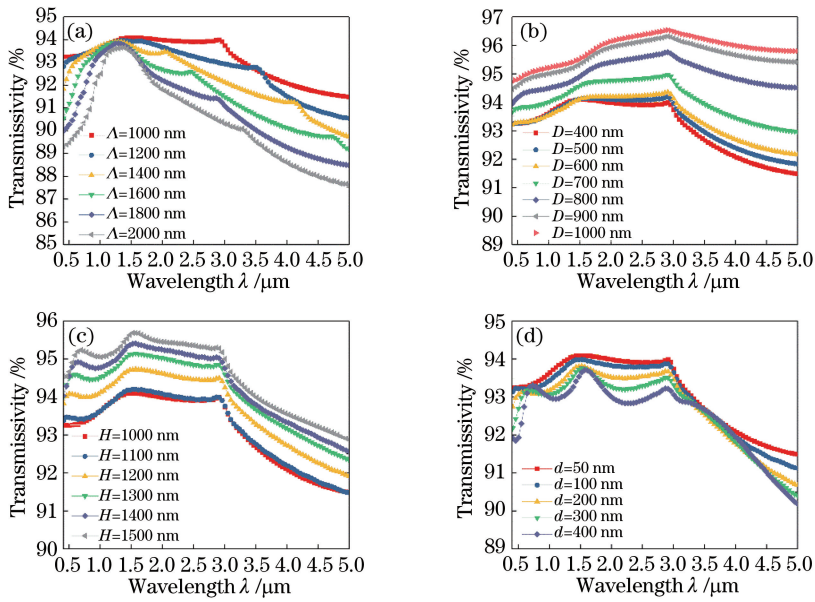


图 2 宽光谱透过率与蛾眼结构参数关系曲线图。(a)周期变化;(b)底端直径变化;(c)结构高度变化;(d)顶端直径变化
Fig. 2 Relationship between broadband transmissivity and moth-eye structural parameters. (a) Varying period;
(b) varying bottom diameter; (c) varying height; (d) varying top diameter

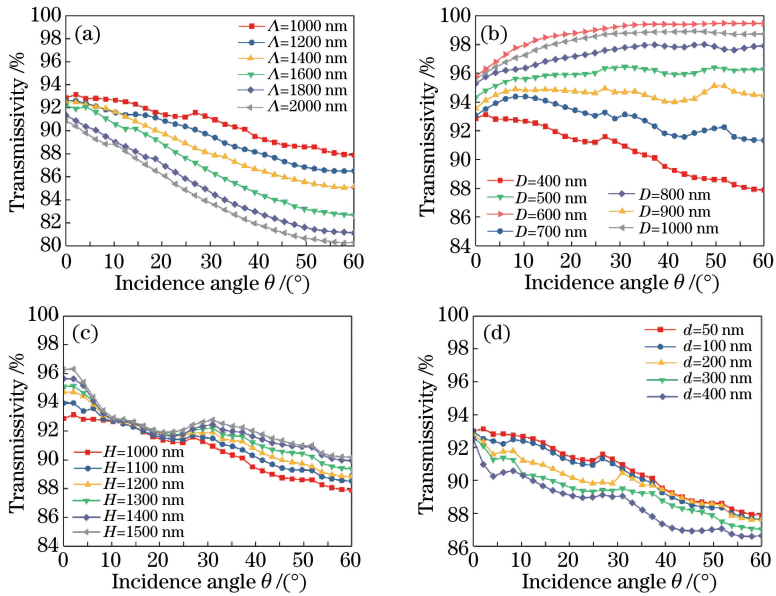


图 3 宽角度透过率与蛾眼结构参数的关系曲线图。(a)周期变化 ($D=400\text{ nm}, H=1000\text{ nm}, d=50\text{ nm}$);(b)底端直径
($\Lambda=1000\text{ nm}, H=1000\text{ nm}, d=50\text{ nm}$);(c)结构高度变化($\Lambda=1000\text{ nm}, D=400\text{ nm}, d=50\text{ nm}$);(d)顶端直径变化
($\Lambda=1000\text{ nm}, D=400\text{ nm}, H=1000\text{ nm}$)

Fig. 3 Relationship between wide-angle transmissivity and moth-eye structural parameters. (a) Varying period ($D=400\text{ nm}, H=1000\text{ nm}, d=50\text{ nm}$);
(b) varying bottom diameter ($\Lambda=1000\text{ nm}, H=1000\text{ nm}, d=50\text{ nm}$);
(c) varying height ($\Lambda=1000\text{ nm}, D=400\text{ nm}, d=50\text{ nm}$); (d) varying top diameter ($\Lambda=1000\text{ nm}, D=400\text{ nm}, H=1000\text{ nm}$)

不断增加时,透过率逐渐降低,并随着角度的增大,下降趋势逐渐明显;同时 1000 nm 与 2000 nm 周期结构相比, $0^\circ\sim 60^\circ$ 入射角平均透过率相差近 8%。从透过率曲线也可以看出, $0^\circ\sim 20^\circ$ 入射角范围内,

透过率下降较慢;随着周期的增加, $25^\circ\sim 60^\circ$ 范围内的透过率的下降趋势依次增强,这说明周期较大的蛾眼结构阵列不利于宽角度抗反射性能的实现,而周期较小的蛾眼结构光谱传输的共振性能较强,有

利于宽角度抗反射性能的传输。图 3(b)为底端直径变化对宽角度透过率的影响。从仿真结果可以看出,随底端直径的增大,透过率呈上升趋势,当仿真的底端直径大于 600 nm 时,上升趋势更加明显。从仿真结果可以得到,蛾眼结构底端直径越接近周期尺寸,蛾眼结构的抗反射性能越好。同时,底端直径的容差范围很大,在 800~1000 nm 均可达到良好的宽角度抗反射性能。蛾眼结构高度和顶端直径对宽角度透过率的影响如图 3(c)和 3(d)所示,与周期和底端直径相比,结构高度与顶端直径对宽角度入射蛾眼结构透过率的影响较小,根据仿真结果选取的合适的宽角度抗反射性能的结构高度和顶端直径尺寸为 1500 nm 和 50 nm。

为了进一步了解周期阵列蛾眼结构在可见光、近红外和中红外(0.41~5 μm)三个波长区域抗反射性能的机制,分别选取 727, 1568, 2151 nm 三个特征波长,计算 0°、30°和 60°入射角度情况下周期蛾眼

结构的电场分布,分布图如图 4 所示。为了清楚地反映电场分布情况,选取周期为 1000 nm,底端直径为 800 nm,结构高度为 1500 nm,顶端直径为 200 nm 的蛾眼结构单元进行计算。从图 4(a)可以看出,由于短波长波段的高消光系数,入射光在穿透 ZnS MS 的有源层时会受阻,并且角度越大,这种阻碍越明显,这说明在该波长带上的抗反射性能取决于结构表面的减反射和前向散射的能力。如图 4(b)所示,光穿透蛾眼结构膜层并与布洛赫模式仿真区域耦合。可以看到,在 1568 nm 波长下,蛾眼结构的 ZnS MS 有源层出现明显的电场能量分布,随着角度的增大这种电场能量越低且越分散,与图 4(a)相似,角度的增加阻碍光能传输。如图 4(c)所示,在 ZnS MS 蛾眼的基底区域中的电场分布呈现出明显的干涉条纹。主要原因是当波长远大于结构底端直径时,蛾眼结构表面被视为 ZnS MS 平面膜层,光学光谱特性由 Fabry-Perot 干涉确定。

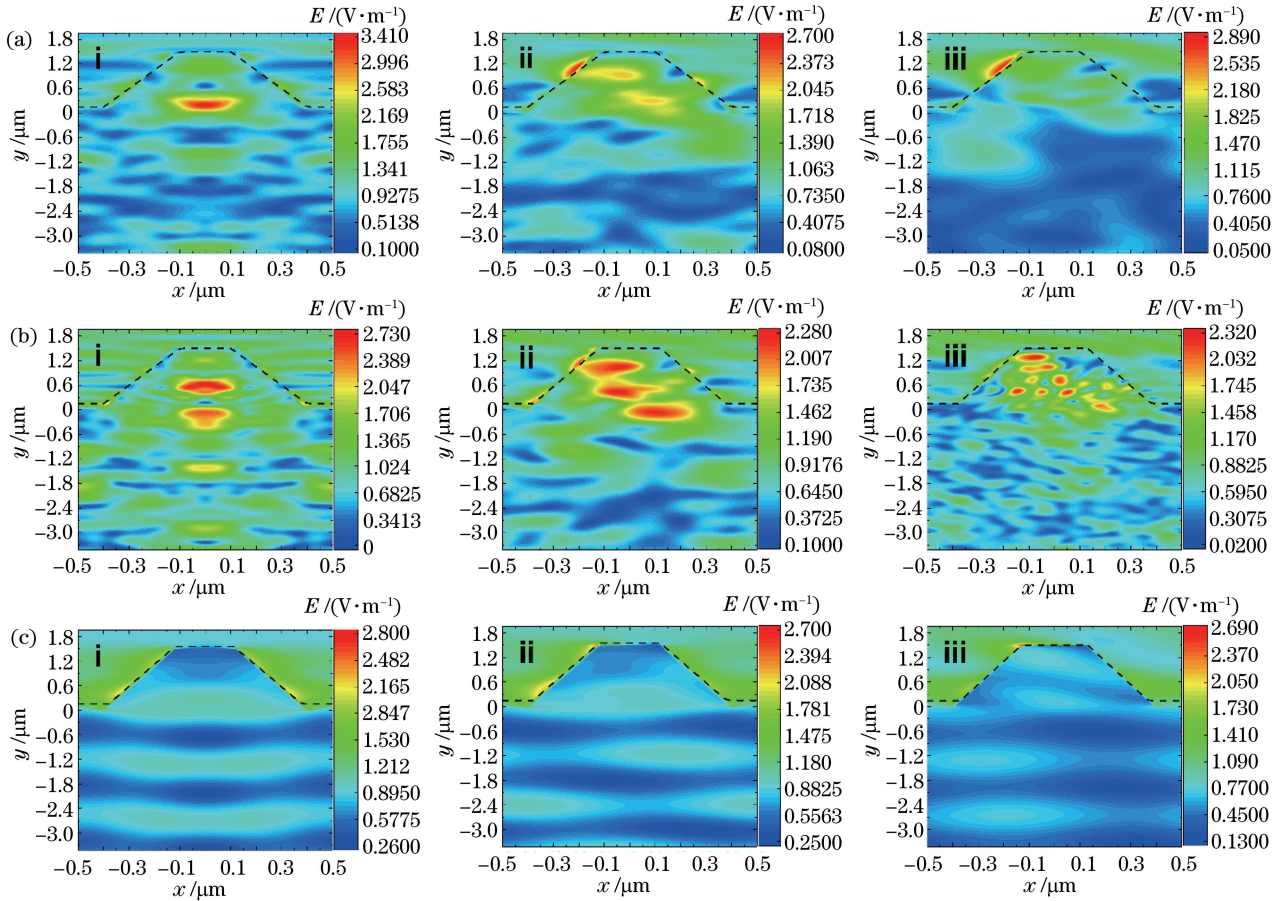


图 4 蛾眼结构在不同波长和入射角度的电场分布。

(a) 0.727 μm (i 0°, ii 30°, iii 60°); (b) 1.568 μm (i 0°, ii 30°, iii 60°); (c) 2.151 μm (i 0°, ii 30°, iii 60°)

Fig. 4 Electric field distributions of moth-eye structure under different wavelengths and incident angles.

(a) 0.727 μm (i 0°, ii 30°, iii 60°); (b) 1.568 μm (i 0°, ii 30°, iii 60°); (c) 2.151 μm (i 0°, ii 30°, iii 60°)

基于仿真优化的理论设计结果,将优化后的 ZnS MS 周期蛾眼结构阵列与平面 ZnS MS 基底进行对比,结果如图 5 所示。从图 5(a)可以很明显地看到,蛾眼结构平均透过率特性与平面基底相比呈现出近 12%~20% 提升,尤其在宽角度入射条件下,优化 ZnS MS 蛾眼结构可以有效抑制光反射,提

高光能透过率。图 5(b)为优化后的蛾眼结构入射角度和波长的透过率光谱图。由图 5(b)可知,在 $0^\circ\sim 60^\circ$ 入射角度和 $0.41\sim 5\ \mu\text{m}$ 波长范围内,所设计的蛾眼结构的透过率均高于 98.5%,峰值透过率可达 99.99%,在整个光谱范围内,平均透过率可达 97% 以上。

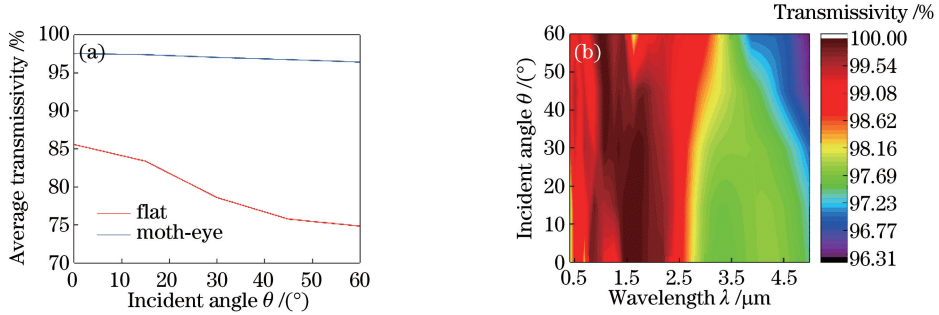


图 5 优化后的周期蛾眼结构阵列光学特性对比。(a)平面 ZnS MS 和优化 ZnS MS 蛾眼结构透过率光谱, (b)优化蛾眼结构角度和波长的透过率分布图($\Lambda=1000\ \text{nm}$ 、 $D=1000\ \text{nm}$ 、 $H=1500\ \text{nm}$ 和 $d=50\ \text{nm}$)

Fig. 5 Optical property comparison of moth-eye and flat structural arrays after optimization. (a) Transmissivity spectra of flat ZnS MS and optimized ZnS MS moth-eye structure; (b) distribution of transmissivity of optimized moth-eye structure versus incident angle and wavelength ($\Lambda=1000\ \text{nm}$ 、 $D=1000\ \text{nm}$ 、 $H=1500\ \text{nm}$ and $d=50\ \text{nm}$)

4 结 论

仿生蛾眼抗反射微纳结构已被广泛应用到显示屏和光学窗口等元器件中。本研究基于严格耦合理论和 FDTD 对工作波段为 $0.41\sim 5\ \mu\text{m}$,入射角度为 $0^\circ\sim 60^\circ$ 的 ZnS MS 材料的圆台型蛾眼结构进行理论计算和设计优化,通过理论计算控制周期尺寸小于入射波长与 ZnS MS 材料折射率的比值,实现高级次衍射波为倏逝波,以提高其在宽谱段广角情况下的光谱透过率。通过对蛾眼结构周期、结构高度、底端直径和顶端直径等参数进行透过率光谱分析可得到:周期较小、底端直径较大的蛾眼结构宽角度抗反射性能较优越,并对其结构高度和顶端直径进行优化,所设计的最佳蛾眼结构平均透过率高于 97%,峰值透过率可达 99.99%。分析不同入射角度和波长的电场分布特性,为实现宽带广角抗反射蛾眼结构的研制提供了设计思路和理论支持。预计下一步工作是根据设计结果,通过等离子体刻蚀等方法对仿生蛾眼抗反射微纳结构进行加工制造。

参 考 文 献

- [1] Siddique R H, Diewald S, Leuthold J, *et al.* Theoretical and experimental analysis of the structural pattern responsible for the iridescence of Morpho butterflies [J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14351-14361.
- [2] Siddique R H, Gomard G, Hölscher H. The role of random nanostructures for the omnidirectional anti-reflection properties of the glasswing butterfly [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 6909.
- [3] Stavenga D G, Leertouwer H L, Meglič A, *et al.* Classical lepidopteran wing scale colouration in the giant butterfly-moth *Paysandisia archon* [J]. *PeerJ*, 2018, 6: e4590.
- [4] Mendoza-Galván A, Muñoz-Pineda E, Ribeiro S J L, *et al.* Mueller matrix spectroscopic ellipsometry study of chiral nanocrystalline cellulose films [J]. *Journal of Optics*, 2018, 20(2): 024001.
- [5] Whitney H M, Reed A, Rands S A, *et al.* Flower iridescence increases object detection in the insect visual system without compromising object identity [J]. *Current Biology*, 2016, 26(6): 802-808.
- [6] Siddique R H, Donie Y J, Gomard G, *et al.* Bioinspired phase-separated disordered nanostructures for thin photovoltaic absorbers [J]. *Science Advances*, 2017, 3(10): e1700232.
- [7] Palanchoke U, Jovanov V, Kurz H, *et al.* Influence of back contact roughness on light trapping and plasmonic losses of randomly textured amorphous silicon thin film solar cells [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(8): 083501.
- [8] Schade M, Fuhrmann B, Bohley C, *et al.* Regular arrays of Al nanoparticles for plasmonic applications [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(8): 083501.

- 084309.
- [9] Bai Y F, Fan J, Zou Y G, *et al.* Fabrication of gratings used in 976 nm distributed feedback lasers based on laser interference lithography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(12): 120501.
白云峰, 范杰, 邹永刚, 等. 激光干涉光刻制备 976 nm 分布反馈式激光器光栅[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(12): 120501.
- [10] Yin M Q, Sun H W, Wang H B. Research progress in UV nanoimprint lithography technology [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2017, 54(5): 347-354.
殷敏琪, 孙洪文, 王海滨. 紫外纳米压印技术的研究进展[J]. *微纳电子技术*, 2017, 54(5): 347-354.
- [11] Tian K, Zou Y G, Hai Y N, *et al.* Design of subwavelength anti-reflective grating [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0901004.
田锬, 邹永刚, 海一娜, 等. 亚波长抗反射光栅的设计[J]. *中国激光*, 2016, 43(9): 0901004.
- [12] Liu L, Deng Q Z, Zhou Z P. Subwavelength-grating-assisted broadband polarization-independent directional coupler[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(7): 1648-1651.
- [13] Li H Q, Cui B B, Liu Y, *et al.* Investigation of the chip to photodetector coupler with subwavelength grating on SOI [J]. *Optics & Laser Technology*, 2016, 76: 79-84.
- [14] Liu S R, Wang L, Sun Y J, *et al.* Enhancement of light extraction efficiency of LED by bionic moth-eye structure with frustum of a cone [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0122001.
刘顺瑞, 王丽, 孙艳军, 等. 利用截头圆锥形仿生蛾眼结构提高 LED 光提取效率[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0122001.
- [15] Leem J W, Yu J S, Heo J, *et al.* Nanostructured encapsulation coverglasses with wide-angle broadband antireflection and self-cleaning properties for III-V multi-junction solar cell applications [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 120: 555-560.
- [16] Li Y F, Zhang J H, Zhu S J, *et al.* Biomimetic surfaces for high-performance optics [J]. *Advanced Materials*, 2009, 21(46): 4731-4734.
- [17] Tan G J, Lee J H, Lan Y H, *et al.* Broadband antireflection film with moth-eye-like structure for flexible display applications[J]. *Optica*, 2017, 4(7): 678-683.
- [18] Fan P X, Long J Y, Jiang D F, *et al.* Study on ultrafast laser fabrication of UV-FIR ultra-broad-band antireflection surface micro-nano structures and their properties[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0806005.
范培迅, 龙江游, 江大发, 等. 紫外-远红外超宽谱带高抗反射表面微纳结构的超快激光制备及功能研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0806005.
- [19] Dong T T, Fu Y G, Chen C, *et al.* Study on bionic moth-eye antireflective cylindrical microstructure on germanium substrate[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0522004.
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结构的研制[J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0522004.
- [20] Guan Q, Liao L W. Research of VIS/NIR/MIR multispectral anti-reflective hard window coatings on the sapphire substrate[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*, 2017, 15(6): 66-72.
官庆, 廖林炜. 蓝宝石基底可见光/激光/中红外多光谱窗口薄膜研究[J]. *光学与光电技术*, 2017, 15(6): 66-72.
- [21] Kong X D, Fu Y G, Xia L P, *et al.* Analysis of Ag nanoparticle resist in fabrication of transmission-enhanced subwavelength structures [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2016, 10(4): 046017.
- [22] Kong X D, Fu Y G, Zhang W G, *et al.* Analysis of random antireflective structures fabricated by silver dewetting to enhance transmission [J]. *Journal of Nanophotonics*, 2017, 11(3): 036019.
- [23] Dong T T, Fu Y G, Zhang L, *et al.* The analysis of the effect on the moth-eye antireflection microstructure shape error [C] // 2015 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO), October 5-9, 2015, Changchun, China. New York: IEEE, 2015: 251-254.
- [24] Bett A J, Eisenlohr J, Höhn O, *et al.* Wave optical simulation of the light trapping properties of black silicon surface textures[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): A434-A445.
- [25] Ding H, Lalouat L, Gonzalez-Acevedo B, *et al.* Design rules for net absorption enhancement in pseudo-disordered photonic crystal for thin film solar cells[J]. *Optics Express*, 2016, 24(6): A650-A666.
- [26] Zhang Y T, Xuan Y M. Preparation of structured surfaces for full-spectrum photon management in photovoltaic-thermoelectric systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2017, 169: 47-55.