

一种宽波段减反的新型苞状蛾眼结构模拟研究

兰俊^{1,2}, 陈劲松^{1,2}, 肖志刚³, 赵立新^{1,2}, 胡松^{1,2}, 杨勇^{1,2*}¹中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 四川 成都 610209;²中国科学院大学, 北京 100049;³乐山师范学院, 四川 乐山 614000

摘要 基于传统抛物面蛾眼结构(PSMS)的优良减反性能,设计出一种具有抛物线中心截面的新型苞状蛾眼结构(BSMS)。采用时域有限差分法(FDTD),通过对比 PSMS 在不同底面直径和高度下的平均反射率,确定了最佳底面直径为 200 nm;在此基础上分析了 PSMS、BSMS 及圆锥形蛾眼结构(CSMS)在不同高度下的反射率大小和截面电场强度分布,并通过等效介质理论对 BSMS 的减反性能进行进一步理论分析。结果表明:在 300~1200 nm 波段和 300~1000 nm 高度范围内,BSMS 的平均反射率均低于 PSMS 及 CSMS;当底面直径为 200 nm、高度为 800 nm 时,BSMS 的平均反射率低至 0.19%,减反效果约为 PSMS 的 3.5 倍,约为 CSMS 的 3.8 倍,具有优异且平稳的抗反射性能,为减反结构的进一步设计和优化提供了参考。

关键词 材料;苞状蛾眼结构;时域有限差分法;减反射;太阳能电池

中图分类号 TK511

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1416001

Simulation of Broadband Anti-Reflective and Bud-Shaped Moth-Eye Structure

Lan Jun^{1,2}, Chen Jinsong^{1,2}, Xiao Zhigang³, Zhao Lixin^{1,2}, Hu Song^{1,2}, Yang Yong^{1,2*}¹ State Key Laboratory of Optical Technologies for Micro-Fabrication, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610209, China;² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ Leshan Normal University, Leshan, Sichuan 614000, China

Abstract A new bud-shaped moth-eye structure (BSMS) with a parabolic center section was designed based on the excellent anti-reflection performance of the traditional parabola-shaped moth-eye structure (PSMS). With the finite-difference time-domain (FDTD) method, we determine the best bottom diameter to be 200 nm by comparing the average reflectance of PSMSs with different bottom diameters and heights. On this basis, the reflectance and cross-sectional electric field intensity distribution of PSMS, BSMS, and a cone-shaped moth-eye structure (CSMS) at different heights were analyzed. Furthermore, the anti-reflection performance of BSMS was assessed with the equivalent medium theory. The results show that the average reflectance of BSMS is lower than that of both PSMS and CSMS in the wavelength range of 300–1200 nm and the height range of 300–1000 nm; when the bottom diameter is 200 nm and the height is 800 nm, the average reflectance of BSMS is as low as 0.19%, and its anti-reflection effect is about 3.5 times that of PSMS and 3.8 times that of CSMS. BSMS demonstrating excellent and stable anti-reflection performance provides a reference for the further design and optimization of anti-reflection structures.

Key words materials; bud-shaped moth-eye structure; finite-difference time-domain; anti-reflection; solar cell

OCIS codes 160.6030; 350.6050; 310.6628

收稿日期: 2020-12-31; 修回日期: 2021-01-04; 录用日期: 2021-03-08

基金项目: 国家自然科学基金(61975211)、四川省科技厅重大科技专项(2020ZDZX0018)

通信作者: yangyong@ioe.ac.cn

1 引言

硅基太阳能电池以其效率高、成本低、无毒、稳定性好等优势占据了光伏市场的主导地位^[1]。根据菲涅耳反射定律,未经处理的硅基太阳能电池表面反射率可达 30%,这源于硅表面与空气界面处的折射率突变,是限制太阳能电池光电转换效率的主要因素^[2]。传统的基于干涉相消原理的单层减反膜只能作用于特定波长附近的入射光^[3],而多层减反膜又存在涂层材料选择困难和不同材料之间的热匹配问题^[4],为了获得低反射率,通常将薄膜涂层与太阳能电池表面微米级织构结合,但这类表面织构的特征尺寸大于太阳能电池的工作波长,抗反射能力有限且不适用于薄型太阳能电池。受夜蛾复眼的启发,Bernhard 等^[5]提出了蛾眼纳米阵列结构,该结构可等效为折射率渐变的连续介质层,消除了空气与硅表面的折射率差,在全向宽波段范围内具有优异的减反效果。近年来,有关圆柱形^[6-7]、圆锥形^[8-9]、抛物面^[10-12]等不同形貌的亚波长蛾眼减反结构得到了广泛研究,这类结构可以通过光刻等微纳加工工艺在光伏电池硅片表面加工成形,相比工业化制绒工艺形成的微米级表面织构,其捕光性能提高且可用于超薄太阳能电池。

蛾眼结构的减反性能与结构参数及形状密切相关^[13-15]。王翔等^[16]通过时域有限差分(FDTD)数值分析方法证明了截面渐变纳米阵列结构减反性能优于等截面纳米阵列结构;Song 等^[17]利用干涉光刻技术成功制备了抛物面蛾眼结构,该结构在宽波段内的减反效果优于圆锥形蛾眼结构;为解决蛾眼结构高低反射频带交替出现的问题^[15],Yang 等^[18]将

两种高度不同的余弦截面结构混合形成复合蛾眼结构,其相比均匀蛾眼结构的减反性能有所提高;Liu 等^[19]提出了采用四次多项式描述蛾眼结构形状的优化方法,并利用严格耦合波分析法(RCWA)证实了优化结构的减反优势。为进一步提高蛾眼结构的减反性能,本文结合传统抛物面蛾眼结构(PSMS)设计思想,设计了新型苞状蛾眼结构(BSMS),并结合等效介质理论,利用时域有限差分法,证明了 BSMS 在 300~1200 nm 波段范围内,尤其是在 780~1200 nm 波段内相比 PSMS 及圆锥形蛾眼结构(CSMS)具有更为优异的抗反射能力。

2 模型与仿真

利用计算机辅助制图软件 SolidWorks 建立了 3D 仿真模型,图 1(a)~(c)所示分别为 PSMS、CSMS 和 BSMS 的 3D 模型图,结构上半部分为硅纳米阵列,下半部分为硅平板,其材料均为单晶硅。以 BSMS 为例,虚线框内为模拟计算时所选取的结构单元,模拟过程参数设置如图 1(d)所示,图中 X、Y 方向的边界条件均设置为周期性边界(periodic BC),Z 方向的边界条件设置为完美匹配层(PML BC)。具有归一化强度和 X 轴偏振的平面波光源(300~1200 nm)垂直入射结构,结构上下方设有监视器(monitor),用以观察反射波和透射波的电磁场分布、坡印廷矢量以及光功率等。三种阵列结构均呈四方密排,高度 l 处的横截面半径 $r(l)$ 或边长 $a(l)$ 的函数表达式为

$$\text{PSMS}; r(l) = \frac{S}{2} \sqrt{1 - \frac{l}{L}}, \quad (1)$$

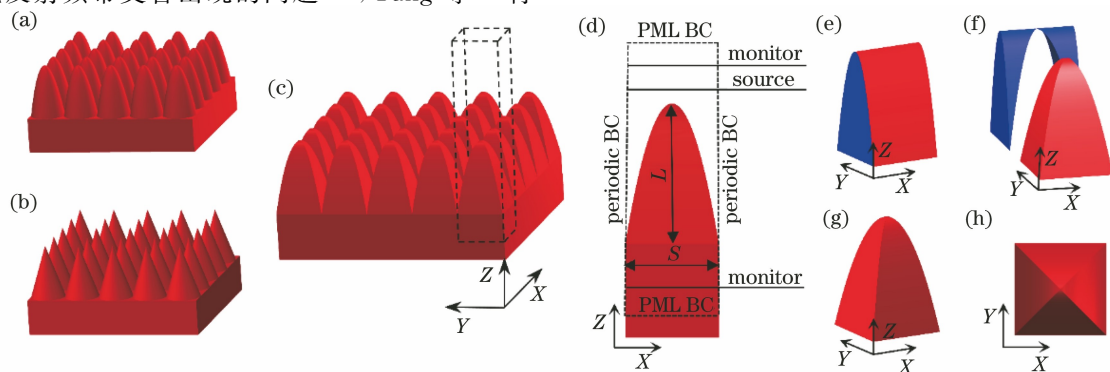


图 1 三维仿真模型示意图及参数设置。(a) PSMS 的 3D 模型;(b) CSMS 的 3D 模型;(c) BSMS 的 3D 模型;

(d)模拟单元参数设置;(e)拉伸;(f)切除;(g) BSMS 结构单元;(h) BSMS 单元的俯视图

Fig. 1 Schematics of three-dimensional simulation models and their parameter setting. (a) Three-dimensional model of PSMS; (b) three-dimensional model of CSMS; (c) three-dimensional model of BSMS; (d) parameters setting of unit cell; (e) stretch; (f) excision; (g) unit cell of BSMS; (h) top view of BSMS cell

$$\text{CSMS: } r(l) = \frac{S}{2} \left(1 - \frac{l}{L} \right), \quad (2)$$

$$\text{BSMS: } a(l) = S \sqrt{1 - \frac{l}{L}}, \quad (3)$$

式中： L 为蛾眼结构的总高度； S 为阵列结构底面直径或边长。

BSMS 建模过程如图 1(e)、(f) 所示，与传统 PSMS 通过抛物面旋转成形不同，BSMS 是由抛物面拉伸后切除成形的。首先将抛物面沿 X 轴拉伸形成曲面体，再利用抛物线沿 Y 轴方向切除曲面体，最终形成如图 1(g) 所示的与花苞形貌相似的苞状结构，其俯视图如图 1(h) 所示。

3 模拟结果与分析

3.1 PSMS 参数优化

通过优化结构尺寸参数，可以实现硅阵列结构的减反收益最大化，同时能在一定程度上减小太阳能电池的厚度。为证明 BSMS 的减反优势，本文首先对传统 PSMS 参数进行优化，研究 PSMS 抗反射性能与结构尺寸参数 L 、 S 的相关关系。在较大范围内对 PSMS 的 L 及 S 进行扫描， L 的扫描范围为 100~1000 nm， S 的扫描范围为 100~600 nm。定义 300~1200 nm 波段内的平均反射率为

$$\bar{R} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad (4)$$

式中： $R(\lambda)$ 为 PSMS 在波长 λ 时的反射率值； λ_2 为 1200 nm； λ_1 为 300 nm。

由图 2 可知，在 S 为 100~600 nm 范围内，固定 S 不变，PSMS 的平均反射率总体上随 L 的增大而不断减小。这是因为 S 相同时，结构的横纵比越大，PSMS 等效折射率的改变越趋于缓慢^[17]。除

此以外，随着 L 不断增大，等值线由紧密变得稀疏，即结构高度达到一定值后，反射率的降低速度变缓。需要指出的是，该阵列结构在制作过程中容易坍塌^[20]，加工难度大幅增加，带来的减反效益相当有限^[9]。固定 L 不变，PSMS 的平均反射率总体上随着 S 的增加呈先减小后增大的趋势^[15]。这是因为当结构周期过大时，将发生除零级衍射以外的高阶次衍射，结构的反射光加强。当 $S = 200$ nm 时，PSMS 能以更低的高度达到相同的减反效果，具有良好的减反效益。200 nm 这一尺寸与飞蛾眼角膜阵列结构的周期一致，同时也是硅阵列亚波长减反结构底面直径的典型尺寸^[21-22]，故将 $S = 200$ nm 确定为最佳底面直径尺寸。为体现 BSMS 相比传统 PSMS 的减反优势，本文将在 $S = 200$ nm 的基础上对比不同阵列结构的抗反射能力。

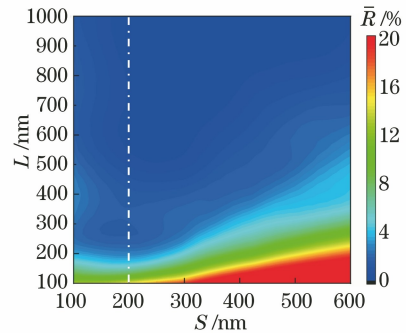


图 2 PSMS 的平均反射率等值线图

Fig. 2 Average reflectance contour plot of PSMS

3.2 BSMS 的减反优势

图 3 所示是 PSMS、CSMS 及 BSMS 三种阵列结构在 S 固定为 200 nm、 L 为 100~1000 nm 时的反射率 (R) 等值线图。由图 3 可知，在 300~1200 nm 波段范围内，阵列结构的抗反射性能总体上呈现随 L 的增加而增强的趋势，可见光波段相比红外波段的减反效果更为稳定。当 $L < 400$ nm 时，

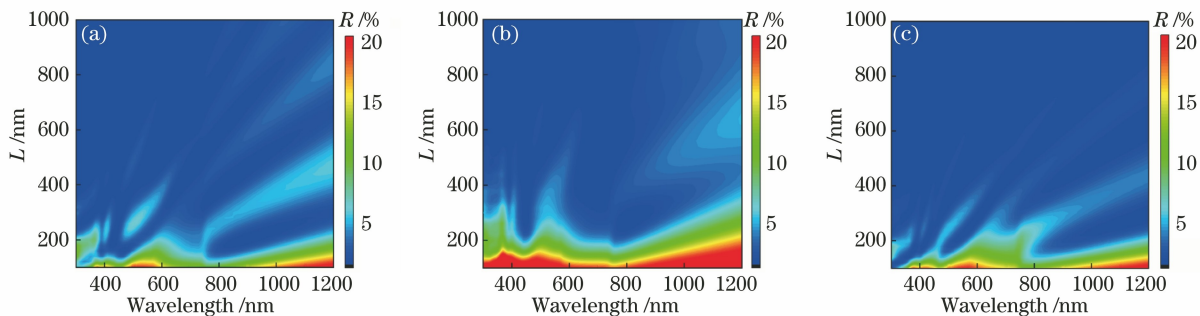


图 3 在 $S = 200$ nm 时，不同蛾眼结构的反射率等值线图。(a) PSMS；(b) CSMS；(c) BSMS

Fig. 3 Reflectance contour plots of different moth-eye structures when S is fixed at 200 nm.

(a) PSMS；(b) CSMS；(c) BSMS

三种阵列结构的反射率以 $R > 0\%$ 为主,且相比 PSMS 和 BSMS,CSMS 所占高反射($R > 15\%$)区域的面积最大,减反效果呈明显劣势;当 $L > 600\text{ nm}$ 时,三种阵列结构的反射率等值线图以低反射区域为主,其 $R < 5\%$ 。

综合上述分析,在 L 为 $400\sim 800\text{ nm}$ 范围内,蛾眼结构具有良好的减反收益。因此,为定量对比不同阵列结构的抗反射能力,本文利用 FDTD 算法对阵列结构在 $300\sim 1200\text{ nm}$ 波长、不同 L ($L = 400, 500, 600, 700, 800\text{ nm}$) 条件下进行仿真分析,得到了不同高度蛾眼结构的反射率曲线图,仿真结果如图 4(a)~(e)所示。由图 4 可见:反射率曲线在近红外波段的峰值波动大于可见光波段,减反性能稳定性差;对比相同结构在不同高度下的平均反射率值可知,除 PSMS 在 $L = 600\text{ nm}$ 时出现平均反射率最小值外,CSMS 与 BSMS 的平均反射率值均随阵列结构高度的增加而减小,减反性能随 L 的增加而增强,与等值线图分析结果一致。

除此以外,对比三种结构在任一固定高度下的平均反射率值可以发现,BSMS 的反射率最大值均低于 PSMS 和 CSMS,反射率曲线相对更稳定,能够在红外波段保持良好的抗反射能力,兼具优异且均

衡的减反效果,解决了长期困扰的红外波段吸收率差的问题^[23]。当 $L = 800\text{ nm}$ 时,BSMS 的平均反射率低至 0.19% ,减反效果约为 PSMS 的 3.5 倍,约为 CSMS 的 3.8 倍;当 $L = 500\text{ nm}$ 时,BSMS 的减反效果与 PSMS、CSMS 在 $L = 800\text{ nm}$ 时的情况相当,极大地降低了对减反结构的高度要求,同时可以保证结构具有更好的刚性;即使在 $L = 600\text{ nm}$,PSMS 取得平均反射率最小值 0.59% 的最优高度情况下,如图 4(c)所示,BSMS 反射率最大值与之相比减小了 46% ,平均抗反射能力提高 44% 。

图 4(f)为三种不同蛾眼结构在 $300\sim 1000\text{ nm}$ 高度范围内的平均反射率对比曲线图。可见,在 L 由 300 nm 增至 600 nm 的过程中,三种结构的平均反射率从 2% 附近迅速降低,但随着 L 的继续增加, L 对平均反射率的影响逐渐减弱,三种结构的平均反射率降幅微小。此外,在 L 为 $300\sim 1000\text{ nm}$ 范围内,BSMS 的平均反射率均低于 PSMS 和 CSMS,最大差值分别达到 0.51% 和 0.92% ,BSMS 的平均反射率在 $L = 800\text{ nm}$ 时降至 0.19% 后趋于平稳,实现了超低平均反射率。由此可以推断,BSMS 是一种极具研究价值的新型减反结构。

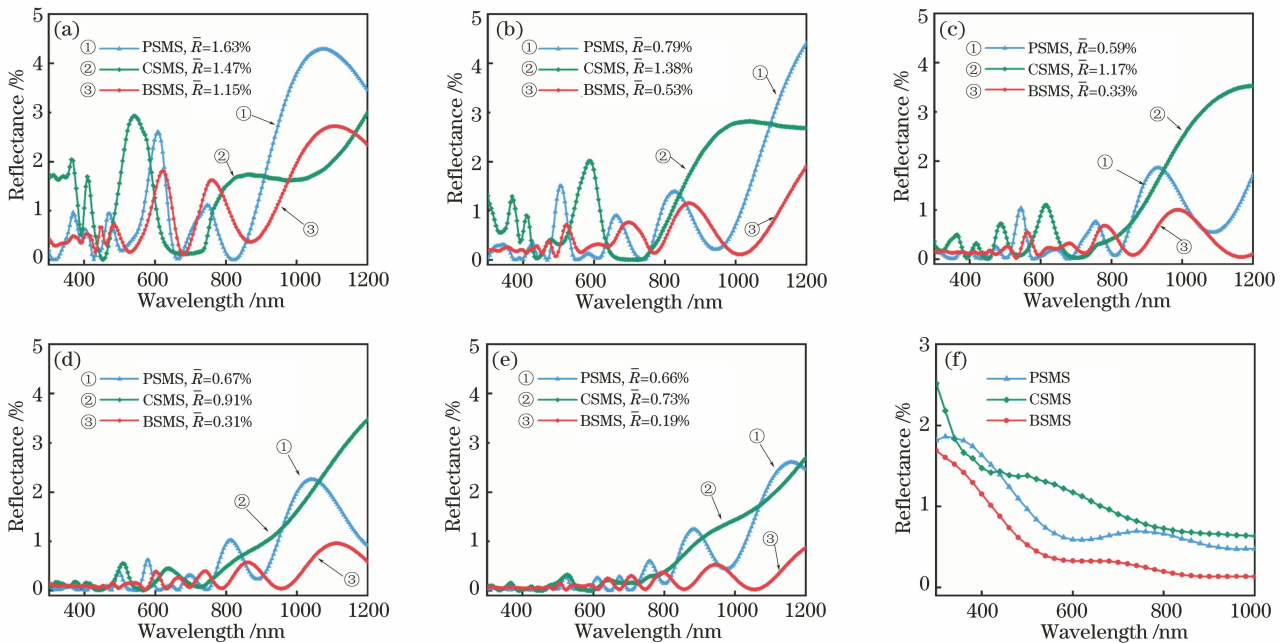


图 4 不同蛾眼结构的反射率曲线图。(a) $L = 400\text{ nm}$; (b) $L = 500\text{ nm}$; (c) $L = 600\text{ nm}$;

(d) $L = 700\text{ nm}$; (e) $L = 800\text{ nm}$; (f) L 为 $300\sim 1000\text{ nm}$ 范围内的平均反射率曲线图

Fig. 4 Reflectance curves of different moth-eye structures. (a) $L = 400\text{ nm}$; (b) $L = 500\text{ nm}$; (c) $L = 600\text{ nm}$;

(d) $L = 700\text{ nm}$; (e) $L = 800\text{ nm}$; (f) curves of average reflectance for L ranging from 300 nm to 1000 nm

为进一步证明 BSMS 在红外波段的减反优势,本课题组根据等效介质理论,计算了蛾眼结构的等

效折射率。等效折射率可以近似表示为^[24]

$$n_{\text{eff}}(l) = \{f(l)n_{\text{si}}^q + [1 - f(l)]n_{\text{air}}^q\}^{1/q}, \quad (5)$$

$$\text{PSMS: } f(l) = \frac{\Pi}{4} \left(1 - \frac{l}{L}\right), \quad (6)$$

$$\text{CSMS: } f(l) = \frac{\Pi}{4} \left(1 - \frac{l}{L}\right)^2, \quad (7)$$

$$\text{BSMS: } f(l) = 1 - \frac{l}{L}, \quad (8)$$

式中: $f(l)$ 为填充因子, 表示蛾眼结构在高度 l 处对应的截面面积与周期的 X 、 Y 界面面积之比; L 为蛾眼结构的总高度; n_{Si} 为硅的折射率, 取 3.5; n_{air} 为空气的折射率, 取 1; q 为常数 $2/3$ 。

根据(5)~(8)式, L 的取值不会影响曲线线型, 仅改变 l 的取值范围。为便于比较, 取 $L=600 \text{ nm}$ 。不同蛾眼结构的等效折射率曲线如图 5 所示。可见: 随着 l 由 0 nm 增至 600 nm, 即从蛾眼结构底面到顶端, PSMS 与 CSMS 的等效折射率均由 2.88 逐渐降至 1; 与 CSMS 相比, PSMS 的等效折射率与高度呈线性变化, 具有更好的光捕获效果^[25], 但由于在硅平板界面处 ($l=0$) PSMS 与 CSMS 均存在空隙, 填充系数不为 1, 因此折射率由 2.88 突增至 3.5, 导致减反效果折损^[26]。相比之下, BSMS 结构在 $l=0 \text{ nm}$ 到 $l=600 \text{ nm}$ 过程中, 等效折射率与高度呈严格的线性变化, 且在硅平板界面处 ($l=0$) 填充系数为 1, 结构的等效折射率与硅平板的折射率相等, 均为 3.5, 具有连续线性等效折射率, 因而能

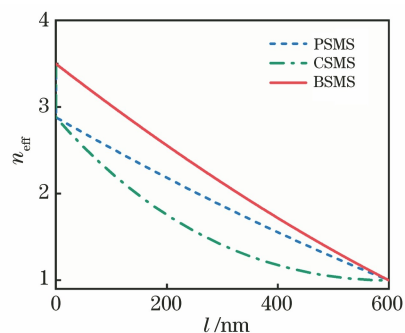


图 5 不同蛾眼结构的等效折射率曲线图

Fig. 5 Effective refractive index curves of different moth-eye structures

够在红外波段保持良好的抗反射能力。

为进一步了解反射光在不同阵列结构表面的反射情况, 研究了当 $S=200 \text{ nm}$ 和 $L=600 \text{ nm}$ 时 (PSMS 最优减反高度), $Y=0$ 截面在 928 nm (PSMS 最大反射率对应的峰值) 波长下的电场强度分布, 如图 6 所示, $|E|$ 为电场强度。图中 4 种结构上方均出现了有规律的干涉条纹, 且平面硅上方的最为明显, 而 BSMS 上方的干涉条纹最为模糊; 同时, 三种不同阵列结构的两侧均出现了反射率较高的区域, 但相比之下, BSMS 高反射区域最少, 反射率更低, 表明其具有更高的抗反射能力。

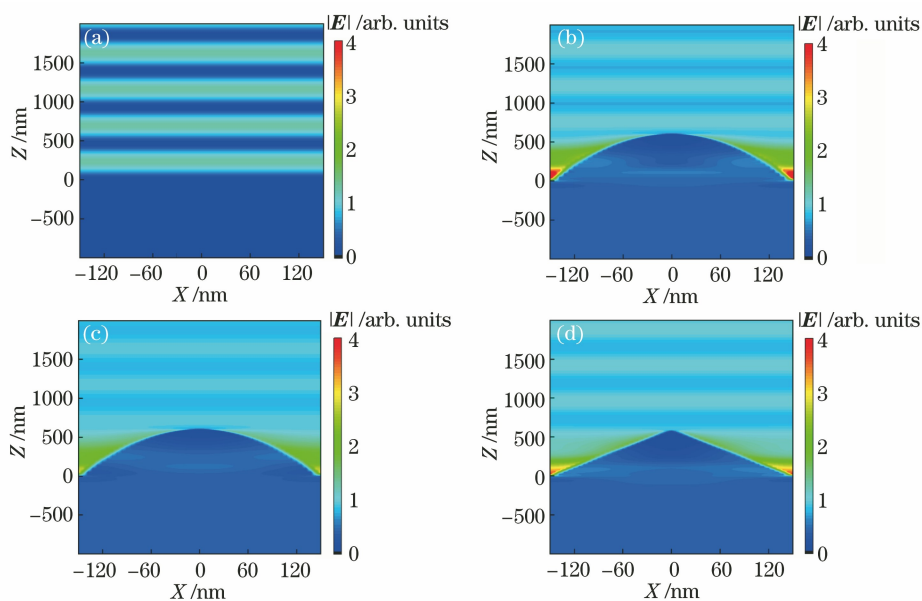


图 6 4 种结构在 $Y=0$ 截面处的电场强度分布。(a) 平板结构; (b) PSMS; (c) BSMS; (d) CSMS

Fig. 6 Electrical field intensity distributions of four structures on $Y=0$. (a) Slab; (b) PSMS; (c) BSMS; (d) CSMS

4 结 论

利用时域有限差分法分析了 PSMS 底面直径

与高度之间的关系, 得出其最佳底面直径 $S=200 \text{ nm}$, 在此基础上对 PSMS、CSMS 和 BSMS 进行减反性能对比以及等效介质理论分析。结果表

明, BSMS 在 300 ~ 1200 nm 宽波段和 300 ~ 1000 nm 高度范围内, 减反效果均明显优于 PSMS 和 CSMS, 能够在传统结构减反效果较差的红外波段保持低反射率, 受波长影响较小, 兼具优异且平稳的抗反射性能, 即使与最佳结构参数的传统 PSMS 的减反效果相比, 其减反效果仍提升了 44%, 降低了对减反结构的高度要求。本文所设计的 BSMS 可用于超薄太阳能电池, 对硅基太阳能电池抗反射表面结构设计和改进具有指导意义, 有利于光电转换效率的进一步提高。

参 考 文 献

- [1] Liu X J, Da Y, Sun B Q, et al. The effects of nano/micro-scale hierarchical structures on the performance of silicon/organic heterojunction solar cells[J]. *Solar Energy*, 2019, 182: 1-8.
- [2] Tommila J, Aho A, Tukiainen A, et al. Moth-eye antireflection coating fabricated by nanoimprint lithography on 1 eV dilute nitride solar cell [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2013, 21(5): 1158-1162.
- [3] Chattopadhyay S, Huang Y F, Jen Y J, et al. Antireflecting and photonic nanostructures[J]. *Materials Science and Engineering R*, 2010, 69(1/2/3): 1-35.
- [4] Li Y F, Zhang J H, Yang B. Antireflective surfaces based on biomimetic nanopillared arrays [J]. *Nano Today*, 2010, 5(2): 117-127.
- [5] Bernhard C G, Miller W H. A corneal nipple pattern in insect compound eyes [J]. *Acta Physiologica Scandinavica*, 1962, 56: 385-386.
- [6] Garnett E, Yang P. Light trapping in silicon nanowire solar cells[J]. *Nano Letters*, 2010, 10(3): 1082-1087.
- [7] Pi D, Shan Z H, Wu X K. Nanostructured antireflection micro-optics in the optical fiber communication band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0622002.
皮顿, 单子豪, 吴兴坤. 光纤通信波段微光学件的抗反射纳米结构 [J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0622002.
- [8] Pan F, Zhang W, Zhang D. Simulation of antireflection and light-trapping property of bio-inspired silicon structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 0516002.
潘峰, 张旺, 张荻. 仿生纳米硅结构减反射及陷光性能模拟研究 [J]. *光学学报*, 2016, 36(5): 0516002.
- [9] 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.
- [10] Hui S M, Hua Y Q, Li Z B. Simulation of antireflection properties of uniform and hybrid moth-eye structures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(4): 0416003.
惠爽谋, 花银群, 李志宝. 均匀与混合蛾眼结构减反射性能的模拟 [J]. *光学学报*, 2019, 39(4): 0416003.
- [11] Gao Y F, Zhao Q H, Xu X F, et al. Research on reflection properties of silicon based solar cells with parabolic cone array structure [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(8): 0808004.
高永锋, 赵琼华, 许孝芳, 等. 光伏电池表面抛物锥阵列微结构的反射特性研究 [J]. *中国激光*, 2015, 42(8): 0808004.
- [12] Zhang H Y, Cui Y, Sun Y, et al. Fabrication of environmentally adaptive mid-infrared broadband antireflection components [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(3): 0301006.
张晗宇, 崔云, 孙勇, 等. 环境适应性中红外宽带减反射元件的研制 [J]. *中国激光*, 2020, 47(3): 0301006.
- [13] Zhang C, Yi P, Peng L, et al. Optimization and continuous fabrication of moth-eye nanostructure array on flexible polyethylene terephthalate substrate towards broadband antireflection [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2901-2907.
- [14] Cai J G, Qi L M. Recent advances in antireflective surfaces based on nanostructure arrays [J]. *Materials Horizons*, 2015, 2(1): 37-53.
- [15] Boden S A, Bagnall D M. Tunable reflection minima of nanostructured antireflective surfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(13): 133108.
- [16] Wang X, Yu Y Q, Chu J R. Simulation and research on reflection properties of two-dimension micro/nano structure surface by FDTD method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(2): 159-165.
王翔, 余彦清, 褚家如. 二维微纳米结构表面反射特性的时域有限差分法模拟研究 [J]. *光子学报*, 2012, 41(2): 159-165.
- [17] Song Y M, Jang S J, Yu J S, et al. Bioinspired parabola subwavelength structures for improved broadband antireflection [J]. *Small*, 2010, 6(9): 984-987.
- [18] Yang L Y, Feng Q, Ng B, et al. Hybrid moth-eye structures for enhanced broadband antireflection characteristics [J]. *Applied Physics Express*, 2010, 3(10): 102602.

- [19] Liu X G, Wang Y F. Shape optimization of a moth-eye structure for omnidirectional and broadband antireflection [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2019, 58(6): 060904.
- [20] Jung J Y, Guo Z Y, Jee S W, et al. A strong antireflective solar cell prepared by tapering silicon nanowires [J]. *Optics Express*, 2010, 18 (103): A286-A292.
- [21] Savin H, Repo P, von Gastrow G, et al. Black silicon solar cells with interdigitated back-contacts achieve 22.1% efficiency [J]. *Nature Nanotechnology*, 2015, 10(7): 624-628.
- [22] Dewan R, Fischer S, Meyer-Rochow V B, et al. Studying nanostructured nipple arrays of moth eye facets helps to design better thin film solar cells[J]. *Bioinspiration & Biomimetics*, 2012, 7(1): 016003.
- [23] Wang B, Leu P W. Enhanced absorption in silicon nanocone arrays for photovoltaics [J]. *Nanotechnology*, 2012, 23(19): 194003.
- [24] Stavenga D G, Foletti S, Palasantzas G, et al. Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies [J]. *Proceedings Biological Sciences*, 2006, 273 (1587): 661-667.
- [25] Xu H, Lu N, Qi D, et al. Biomimetic antireflective Si nanopillar arrays[J]. *Small*, 2008, 4(11): 1972-1975.
- [26] Garg V, Mote R G, Fu J. Rapid prototyping of highly ordered subwavelength silicon nanostructures with enhanced light trapping[J]. *Optical Materials*, 2019, 94: 75-85.