

硒化锌衬底表面仿生宽带增透微结构的设计及制作

费亮^{1,2}, 崔云², 万冬云¹, 陈鹏^{2,3}, 徐姣^{2,3}

¹上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444;

²中国科学院上海光学精密机械研究所中科院强激光材料重点实验室, 上海 201800;

³中国科学院大学, 北京 100049

摘要 采用时域有限差分法研究了硒化锌基底的抛物线型周期阵列仿生微结构的光学性质, 重点分析了微结构阵列的周期、高度、占空比和形状轮廓等对反射率的影响, 得到了有较好增透效果的结构参数。根据模拟参数进行两次干涉曝光制备掩模, 采用反应离子刻蚀技术制备周期阵列微结构。通过场发射扫描电子显微镜对微结构的表面形貌进行表征, 并采用傅里叶变换红外光谱仪在中红外波段分别对双面抛光、单面微结构的硒化锌片进行透过率测试。结果表明: 单面微结构样品在 2~5 μm 范围内的整体平均透过率比双面抛光硒化锌基片提高了 10%, 在 2.3 μm 处的最大透过率为 82%。

关键词 衍射; 增透微结构; 时域有限差分法; 干涉曝光

中图分类号 TN213; O485

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0105004

Design and Fabrication of Bionic Broadband Antireflective Microstructure on Zinc Selenide

Fei Liang^{1,2}, Cui Yun², Wan Dongyun¹, Chen Peng^{2,3}, Xu Jiao^{2,3}

¹School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;

²Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

³University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The optical properties of parabolic cone array microstructure of zinc selenide are researched by finite-difference time-domain method. The effects of microstructure parameters, such as period, height, filling factor, and profile shape on the reflectivity are discussed. Structural parameters corresponding to good antireflection effect are obtained. The parabolic cone period microstructure is prepared by twice interference lithography and reactive ion etching technology according to the simulated results. The surface morphology is analyzed by field emission scanning electron microscopy, and the transmittances of the zinc selenide with double-sides polished and single-side microstructures are respectively measured with the utilization of the Fourier transform infrared spectrometer. The measured results illustrate that the average transmittance of samples with single-sided microstructure is 10% higher than that of double-sided polished zinc selenide at 2-5 μm wavelengths, and the transmittance reaches a maximum value of 82% at 2.3 μm .

Key words diffraction; antireflective microstructure; finite-difference time-domain; interferometric lithography

OCIS codes 050.6624; 120.4610; 300.6340

1 引 言

硒化锌(ZnSe)是一种应用于红外波段的光学材料,可制成红外窗口、整流罩、透镜等光学元件,同

时可以作为中红外固体激光器中激光晶体的基质材料,在激光雷达、大气遥感测控、红外探测成像、光谱学和国防军事等领域具有重要的应用价值和前景,已成为国内外关注和广泛研究的热点^[1-4]。ZnSe 材

收稿日期: 2017-07-21; **收到修改稿日期:** 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(61405225)

作者简介: 费亮(1993—),男,硕士研究生,主要从事红外微结构方面的研究。E-mail: liangf@shu.edu.cn

导师简介: 崔云(1978—),女,博士,高级工程师,主要从事红外薄膜元件的研制及激光材料的检测分析方面的研究。

E-mail: cuiyun@siom.ac.cn(通信联系人)

料在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的折射率较大,表面反射率较高。为提高其透过率,传统的解决方式是在材料表面镀增透膜。但对材料进行镀膜的同时,也会引入杂质、缺陷和水吸收,从而对薄膜的光学性能产生不良影响^[5]。薄膜与基底物理性能的不匹配会造成膜基附着力差、不稳定等问题^[6]。此外,多层膜的激光损伤阈值限制了大功率激光器的使用^[7]。在材料表面制备仿生蛾眼型微结构可以有效避免以上问题,与多层反射膜相比,蛾眼型结构可以等效为一个折射率从空气到介质的渐变薄膜系统,具有宽角度宽光谱增透特性^[8-10]。

近年来,中红外波段仿生蛾眼型微结构的增透性能被相继报道。Hobbs 等^[11]在 ZnSe 基底上单面制备了表面微结构,其在 $1.9\sim 3.4\ \mu\text{m}$ 波长范围内的平均透过率从 68.5% 升至 81.3%,但他们未报道该结构在更宽光谱范围内的透过率是否得以提高;后来他们发现^[12],相比于减反膜,在 $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ 基底上制备的表面微结构能有效消除 $2.9\ \mu\text{m}$ 波段附近的水吸收,设计的增透波段范围仅覆盖掺 Cr^{2+} 激光器中的发射带。Sanghera 等^[13]采用直接印压法在红外玻璃光纤表面制备的微结构使其在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段的平均透过率超过 92%,但直接印压法是否对 ZnSe 材料同样有效尚未见报道;Zollars 等^[14]在 ZnSe 基底两面制备了随机型微结构,处理后的样品在 $3\sim 14\ \mu\text{m}$ 波段范围内的透过率超过 80%,宽角度减反射范围达 65° ,但透过率的提高效果不明显。尚鹏等^[15]设计了在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 具有较好增透效果的圆柱形 ZnSe 亚波长微结构,重点分析讨论了圆柱形方向偏差及整体面形轮廓偏差对抗反射特性的影响,模拟结果表明:圆锥形 ZnSe 微结构的透射性能相比圆柱形最优微结构的透射性能有较大提高,但并未进行实验验证。高永锋等^[16]在硅基太阳能电池表面设计了抛物锥减反射微结构,理论上可以在可见光到近红外波段降低表面反射率。董亭亭等^[17]在锗衬底表面设计并制备了圆柱形抗反射微结构,但实验结果与设计相差较大。本课题组设计了一种抛物锥仿生蛾眼型增透微结构,采用两次干涉曝光制备掩模,结合反应离子束刻蚀方法在 ZnSe 基底单面制备增透微结构,该结构在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段范围内实现了较好的增透效果。

2 微结构的设计与模拟

Stavenga 等^[18]认为抛物线锥微结构比圆锥和高斯钟形渐变微结构具有更好的减反射性能,抛物

锥体周期阵列结构示意图如图 1 所示。模拟分析的微结构模型采用抛物锥体结构,并按一定的周期正交排列,周期为 Λ ,抛物锥体底面直径为 d ,结构高度为 H 。描述电磁场传播特性的数学模型主要有等效介质理论(EMT)^[19]、时域有限差分法(FDTD)^[20]、传递矩阵法(TMM)^[21]、严格耦合波法(RCWA)^[22]和有限元法(FEM)^[23]等。当周期结构的尺寸远小于入射波长时,周期结构的光栅可以等效为均匀介质。当光入射到具有周期结构的表面时,在周期结构上发生的衍射满足光栅方程^[24]:

$$n_s \sin \theta_T = \frac{m\lambda_0}{\Lambda} + n_i \sin \theta_i, \quad (1)$$

式中 n_s 为基底材料的折射率, θ_T 为透射区域第 m 级衍射光的衍射角, m 为衍射级次, λ_0 为入射波长, Λ 为表面结构的周期, n_i 为空气的折射率, θ_i 为入射角度。当透射空间只有零级衍射波时,能表现出良好的增透效果,此时表面结构的周期与入射波长之间需满足:

$$\frac{\Lambda}{\lambda_0} < \frac{1}{\max(n_s, n_i) + n_i \sin \theta_i}. \quad (2)$$

结构的周期、高度、底部占空比及形状是影响结构衍射特性的主要因素,使用 FDTD 对这些因素进行理论模拟分析,选择最优结构参数,以获得较好的增透效果。

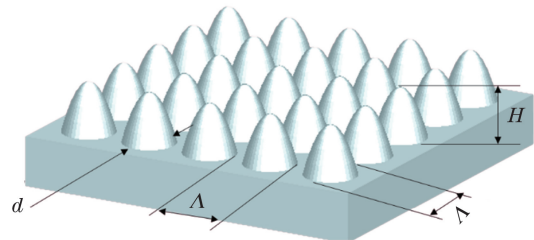


图 1 抛物锥体周期阵列结构示意图

Fig. 1 Schematic of parabolic cone array structure

2.1 周期对结构衍射特性的影响

由(2)式可知,当光线从空气中垂直入射到抛物锥微结构时,入射角 θ_i 为零,在透过区域仅存在零级衍射的条件为微结构的周期 $\Lambda < \lambda_0/n_s$ 。ZnSe 材料在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 红外波段的折射率约为 2.42,取 $\lambda_0 = 2\ \mu\text{m}$,对应微结构周期应小于 826 nm。由光栅方程可计算得到波长和结构周期对结构衍射性能的影响。微结构周期与反射率的关系如图 2(a) 所示,其中抛物线型结构的底部直径与结构周期的比值 $d/\Lambda = 1$,结构高度为 1000 nm。在 $2\sim 5\ \mu\text{m}$ 波段,表面反射率随结构周期的增大而减小,微结构周期与零级透过率的关系如图 2(b) 所示。当周期

大于 λ_0/n_s 后,出现更高级次的衍射,对应图 2(b)中白色虚线的左侧,此时透射区域零级透过率下降,在周期小于 λ_0/n_s 的区域,高级次衍射被抑制,只存在零级透过。微结构周期与总透过率的关系如图 2(c)所示,在不考虑材料吸收的情况下,透过区

域的总透过率 R 和反射率 T 之和能满足 $R+T=1$ 。由此可知, $\Lambda < \lambda_0/n_s$ 区域微结构的反射率越低,透过率越大,所以微结构周期的设计值越大越好,但不能超过 λ_0/n_s 这一临界值,故取周期 $\Lambda = 800 \text{ nm}$ 。

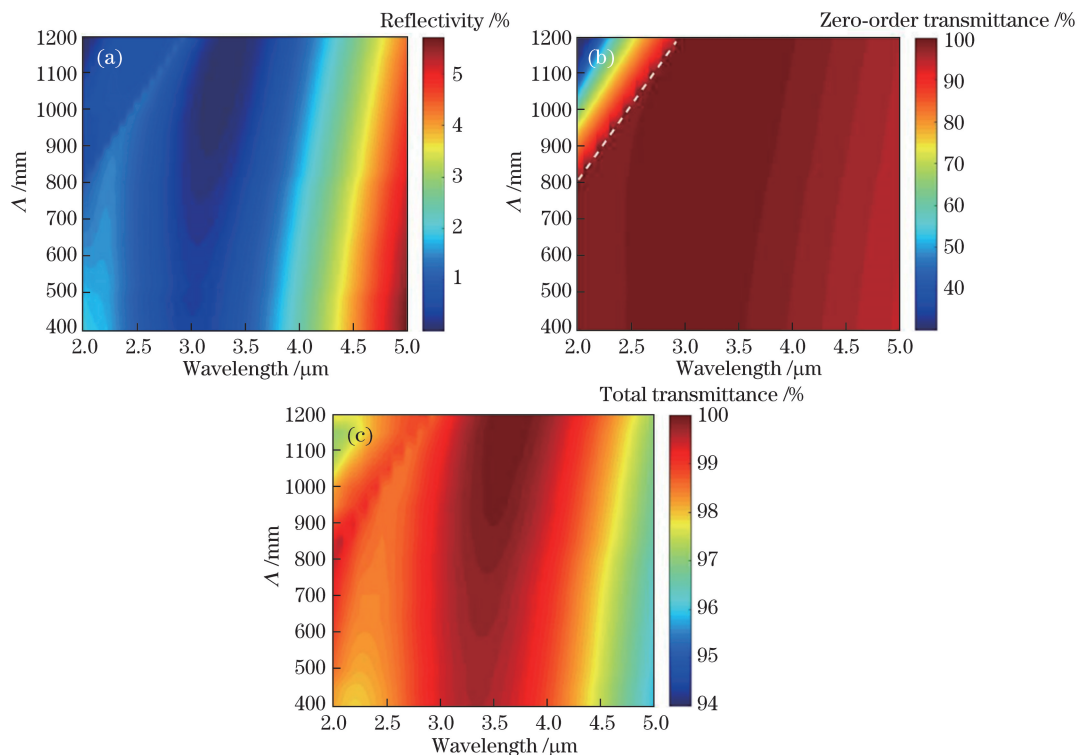


图 2 微结构周期与结构参数的关系。(a) 反射率; (b) 零级透过率; (c) 总透过率

Fig. 2 Relationship between microstructure period and structure parameters. (a) Reflectivity; (b) zero-order transmittance; (c) total transmittance

2.2 底面占空比 d/Λ 对反射率的影响

底面占空比 d/Λ 的定义为底面直径与结构周期的比值,不同的占空比表示结构底部与基底界面折射率突变程度的不同。抛物锥底面占空比不同时反射率随波长的变化曲线如图 3 所示,对应的结构高度为 1000 nm ,周期为 800 nm 。由图 3 可以看出,随着抛物锥体底面占空比增加,结构表面在整个波段范围内的反射率明显下降,随着底部占空比从 0.6 增加到最大值 1.0 ,整个波段范围内的平均反射率从 9% 左右降低至 1% 左右,在 $5.0 \mu\text{m}$ 处的反射率从 11% 降低到 4% 。由此可知,当抛物锥体底面直径等于设计周期时,结构表面的反射率最小。

2.3 结构高度对反射率的影响

根据 2.2 节得到的结论,设计抛物锥体的底面直径等于周期,分析光垂直入射时结构高度对表面反射率的影响。由图 4 可见:当高度由 600 nm 增加到 1000 nm 时,结构表面的反射率显著下降,最大

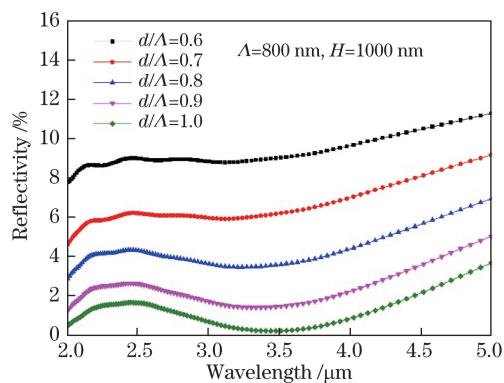


图 3 不同抛物锥体底面占空比时反射率随波长的变化曲线
Fig. 3 Variations of reflectivity with wavelength at different d/Λ values of parabolic cone

反射率从 11% 下降到 4% ;随着结构高度继续增加,反射率虽然总体上呈下降趋势,但降幅不明显,且在短波段范围内的反射率会略有增大。虽然反射率随高度增加而降低,但结构高度越大所需刻蚀时间越长,所需掩模厚度越大,制作难度越大。因此,应在

满足性能要求的前提下选择合适的结构高度,故设计结构高度为 1000 nm。

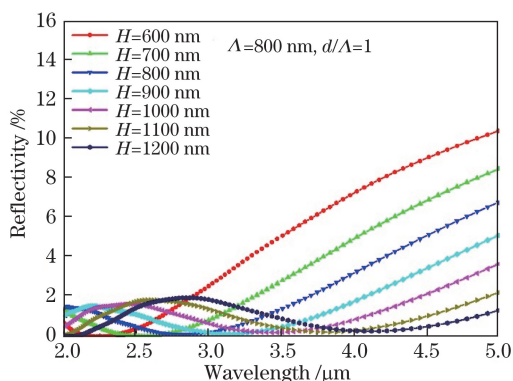


图 4 不同抛物锥体高度时反射率随波长的变化
Fig. 4 Variations of reflectivity with wavelength at different heights of parabolic cone

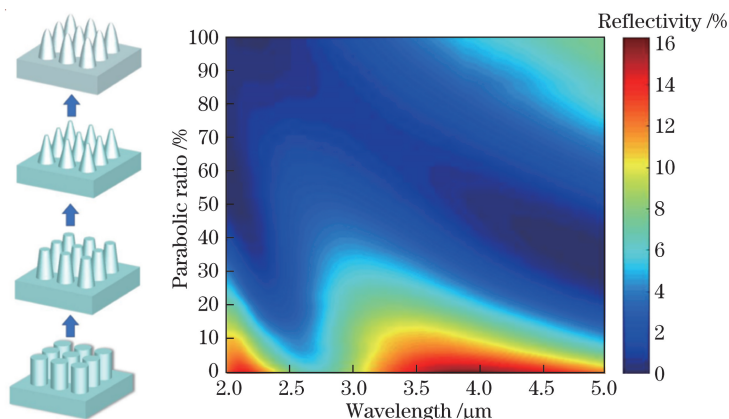


图 5 不同形状的仿生微结构对反射率的影响

Fig. 5 Effect of biomimetic microstructure with different shapes on reflectivity
(the shape of biomimetic microstructure changing from cylindrical rod to paraboloid)

3 制备流程

制备微结构的工艺流程如图 6 所示,主要分为基片预处理、涂胶、前烘、激光干涉曝光、显影、后烘、刻蚀、去胶。基片预处理:采用丙酮超声清洗 10 min,然后用去离子水冲洗,之后烘干。涂胶:待样品冷却后采用旋涂法进行涂胶,使用 EZ4 SPIN COATER 型匀胶机将正性光刻胶 S1805 均匀地涂在样品片上。前烘:将涂胶后的样片放在 HOT PLATE10 型电热板上在 100 °C 下烘烤 3 min,以坚固胶层。激光干涉曝光:使用波长为 413.1 nm 的 Kr 离子激光器搭建单反射镜曝光系统,采用两束光干涉进行两次曝光,形成二维周期性掩模图案。洛埃镜配置图如图 7(a)所示,掩模图案的周

2.4 形状对反射率的影响

微结构的几何形状是决定衍射效率的重要因素之一。由于抛物锥形状展现出了线性渐变的折射率分布,故而在更宽的波长范围内具有更好的减反射特性。然而,在实际加工中需要精准的制造过程以得到理想的形状。仿生微结构的轮廓形状对反射率的影响如图 5 所示,对应的结构周期为 800 nm,高度为 1000 nm。由图 5 可见,微结构的形状从圆柱形逐渐变为抛物锥形,圆柱形结构在反射曲线上有波纹图案,因为该结构可以等效为单层的减反射膜。当结构形状开始变为锥形时,表面反射率开始减小,并展现出宽带减反射特性。抛物线比例为 60% 的微结构的减反射性能可接近理想抛物线型对应的微结构的减反射性能。

期可以通过调整洛埃镜平台的角度确定,在两次曝光间使样品旋转 90°。显影和后烘:采用氢氧化钠(NaOH)溶液进行显影,将显影后的基片再次放在电热板上烘烤,进行热回流过程,以得到理想的抛物线型掩模图形,制备得到的掩模的原子力显微镜(AFM)图如图 7(b)所示。刻蚀:掩模制作完成后,采用 MRIBE-300M 型反应离子刻蚀系统进行反应离子束刻蚀。采用文献[25]所述方法,以氩气(Ar)和三氟甲烷(CHF₃)作为刻蚀气体,气体体积流量分别为 5,15 mL·min⁻¹,离子源射频功率为 200 W,刻蚀时间为 780 s。去胶:刻蚀完成后用 RIE-300 型氧等离子体灰化机去除残余的光刻胶,再用丙酮溶液对样片进行噪声清洗 20 min,以去除残留物。

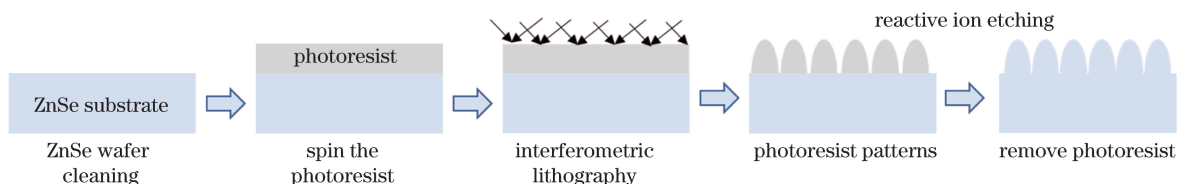


图 6 微结构制备工艺流程图

Fig. 6 Schematic of fabrication procedure of microstructure

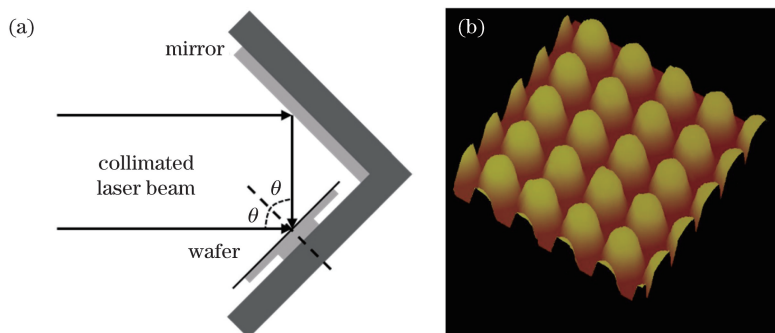


图 7 (a)洛埃镜配置图;(b)掩模的 AFM 图

Fig. 7 (a) Lloyd's mirror configuration; (b) AFM image of mask

4 实验结果与分析

采用 Auriga 场发射扫描电镜观察微结构的形貌特征,微结构扫描电镜图如图 8 所示,采用反应离子束刻蚀技术将掩模图案转移到基底表面,表面微

结构呈方格点阵周期性密集排列,均匀性良好。图 8(b)为样品断面放大图,可见微结构的截面轮廓接近抛物线型,与设计的微结构相似。微结构侧壁存在不规则纹理,说明刻蚀过程对微结构的最终形貌具有一定影响。

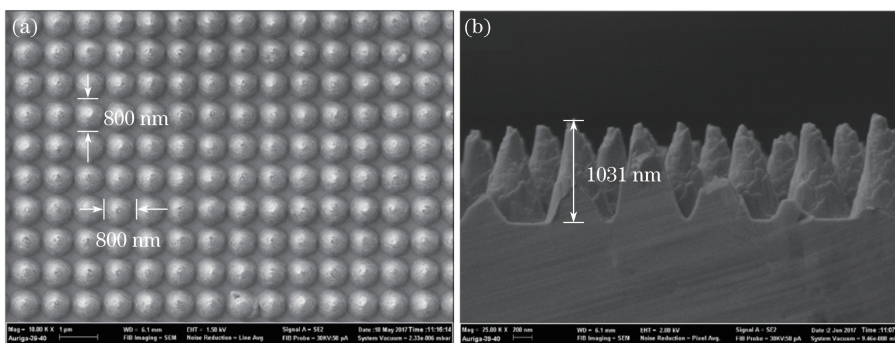


图 8 微结构扫描电镜图。(a)俯视图;(b)断面图

Fig. 8 Scanning electron microscopy images of microstructure. (a) Top view (0°); (b) profile (90°)

使用 Nicolet6700 型傅里叶变换红外光谱仪对制备有微结构的样品进行红外透过率测试,得到 1.5~5.0 μm 波段单面微结构 ZnSe 样品和双面抛光样品的透过率曲线,有无微结构的透过率曲线如图 9(a)所示。将实际制备的单面微结构样品的透过率曲线和在 2~5 μm 波段的理论模拟光谱曲线进行对比,结果如图 9(b)所示。由图 9(a)可以看出,单面微结构 ZnSe 样品在 1.5~2.0 μm 波段内的透过率下降明显,这是因为在 1.5~2.0 μm 波段内,微结构的周期不满足(2)式,透射区域出现了高级次的衍射,存在衍射损失。光垂直入射到空气/ZnSe 界

面的透过率可以用菲涅耳公式计算得到,为 82.7%,但双面抛光的 ZnSe 样品有两个空气/ZnSe 界面,忽略基底材料内部的吸收和散射,考虑内部多次反射,双面抛光 ZnSe 样品在 2~5 μm 波段内的平均透过率为 70.6%,如图 9(b)中的红线所示。如果在 ZnSe 基底的一面镀上理想的减反射层或制备完美的减反射微结构,那么样品的透过率就会增加,没有处理的另一面的反射率可以由 $[(n-1)/(n+1)]^2$ (n 为基底材料的折射率)计算得到,为 17.3%,在这种情况下,样品整体的理论透过率为 82.7%。如图 9(b)中黑线所示,实验制备的单面微结构样品在

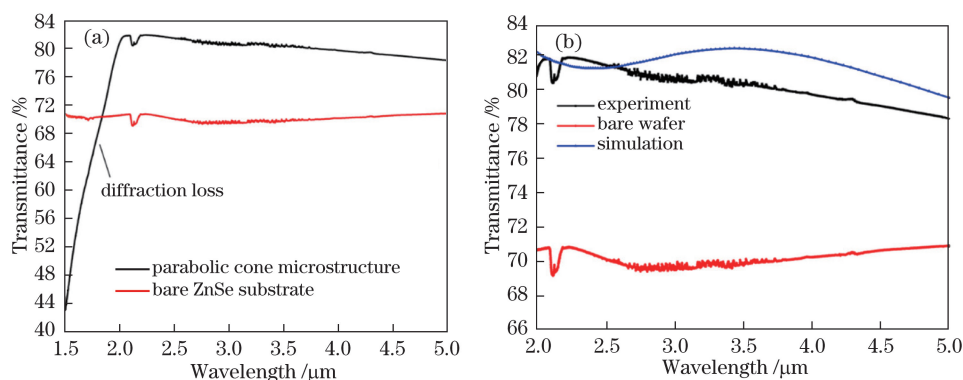


图 9 透过率曲线。(a)有无微结构;(b)模拟与实验结果

Fig. 9 Curves of transmittance. (a) With and without microstructure; (b) simulated and experimental results

2~5 μm 波段内的平均透过率超过了 80.9%，整体透过率提高了 10% 左右，在 2.3 μm 处的最大透过率为 82%，接近单面透过率的理论最大值。同时，根据实验结果和理论分析可以计算出单面制备有微结构样品的表面最大反射率为 5%。

表 1 为实际制备结果与理论设计的各项参数的对比，实验制备微结构的形貌与理论模型基本一致，测得样品在 2~5 μm 波段的平均透过率和理论模拟结果基本吻合，采用红外光谱仪实际测得的透过率曲线和理论模拟曲线大体相同。

表 1 理论设计与实验结果对比

Table 1 Comparison between theoretical design and experimental results

Parameter	Maximum reflectivity /%	Average transmittance /%	Height /nm	Period /nm	Filling factor
Design value	<4	81.8	1000±50	800±20	1.0
Experimental value	<5	80.9	1031	800	1.0

5 结 论

以 FDTD 为理论基础，结合激光干涉曝光技术和反应离子束刻蚀工艺，在 ZnSe 衬底上设计并制备了一种在 2~5 μm 波段范围内具有良好增透效果的抛物锥型仿生微结构。通过构建数学模型模拟分析了周期对该结构衍射的影响，讨论了微结构的高度、底部占空比及形状等对表面反射率的影响，确定了该增透结构的最优参数组合。仿真模拟和实验结果表明，在短波段范围内，微结构周期大于透过区域的零级衍射周期阈值，存在衍射损失，导致透过率下降。实验结果表明，在光垂直入射的情况下，在 ZnSe 基底上单面制备的周期和底部直径同为 800 nm、高度为 1031 nm 的抛物锥型微结构，在 2~5 μm 波段内的平均透过率为 80.9%，最大透过率达 82%，具有良好的宽带增透效果。本研究可为红外材料的宽波段增透提供参考。

参 考 文 献

[1] Karaganov V, Law M, Kaesler M, *et al.* Engineering development of a directed IR countermeasure laser[C]. SPIE, 2004, 5615: 49.

- [2] Qu Y, Kang Z H, Wang T J, *et al.* The detection of carbon monoxide by the second harmonic generation of CO₂ laser[J]. Laser Physics Letters, 2006, 4(3): 238.
- [3] Tang G J, Xie J J, Zhang L M, *et al.* Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. Chinese Optics, 2013, 6(4): 501-512.
谭改娟, 谢冀江, 张来明, 等. 中波红外激光技术最新进展[J]. 中国光学, 2013, 6(4): 501-512.
- [4] Ke C J, Kong X Y, Wang R, *et al.* Research progress on mid-IR Fe:ZnSe laser technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(3): 0305002.
柯常军, 孔心怡, 王然, 等. 中红外 Fe:ZnSe 激光技术最新研究进展[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 0305002.
- [5] Li H, Yi K, Cui Y, *et al.* Substrate effects on the water absorption of infrared SiO₂ film[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(7): 0707001.
李豪, 易葵, 崔云, 等. 不同基底上 SiO₂ 薄膜红外波段的水吸收特性[J]. 中国激光, 2014, 41(7): 0707001.
- [6] Ko Y H, Yu J S. Design of hemi-urchin shaped ZnO nanostructures for broadband and wide-angle antireflection coatings[J]. Optics Express, 2011, 19(1): 297-305.
- [7] Yao J K, Shao J D, He H B, *et al.* Effects of

- annealing on laser-induced damage threshold of $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ high reflectors[J]. Applied Surface Science, 2007, 253(22): 8911-8914.
- [8] Clapham P B, Hutley M C. Reduction of lens reflexion by the "Moth Eye" principle[J]. Nature, 1973, 244(5414): 281-282.
- [9] Huang Y F, Chattopadhyay S, Jen Y J, *et al.* Improved broadband and quasi-omnidirectional anti-reflection properties with biomimetic silicon nanostructures[J]. Nature Nanotechnology, 2007, 2(12): 770-774.
- [10] Park H, Shin D, Kang G, *et al.* Broadband optical antireflection enhancement by integrating antireflective nanoislands with silicon nanoconical-frustum arrays[J]. Advanced Materials, 2011, 23(48): 5796-5800.
- [11] Hobbs D S, MacLeod B D, Sabatino E, *et al.* Laser damage resistant anti-reflection microstructures for mid-infrared metal-ion doped ZnSe gain media[C]. SPIE, 2012, 8530: 85300P.
- [12] McDaniel S, Hobbs D, MacLeod B, *et al.* Cr:ZnSe laser incorporating anti-reflection microstructures exhibiting low-loss, damage-resistant lasing at near quantum limit efficiency[J]. Optical Materials Express, 2014, 4(11): 2225-2232.
- [13] Sanghera J, Florea C, Busse L, *et al.* Reduced Fresnel losses in chalcogenide fibers by using anti-reflective surface structures on fiber end faces[J]. Optics Express, 2010, 18(25): 26760-26768.
- [14] Zollars B, Savoy S, Xue Q Z, *et al.* Performance measurements of infrared windows with surface structures providing broadband, wide-angle, antireflective properties[C]. SPIE, 2013, 8708: 87080Q.
- [15] Shang P, Xiong S M. Design and error analysis of sub-wavelength antireflective micro-structure on surface of ZnSe substrate[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(1): 0116004.
尚鹏, 熊胜明. ZnSe 衬底表面亚波长增透结构的设计及误差分析[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0116004.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Stavenga D G, Foletti S, Palasantzas G, *et al.* Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies[J]. Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 2006, 273(1587): 661-667.
- [19] Lalanne P, Lemercier-Lalanne D. On the effective medium theory of subwavelength periodic structures[J]. Journal of Modern Optics, 1996, 43(10): 2063-2085.
- [20] Yang Z Y, Zhu D Q, Zhao M, *et al.* The study of a nano-porous optical film with the finite difference time domain method[J]. Journal of Optics A, 2004, 6(6): 564-568.
- [21] Katsidis C C, Siapkias D I. General transfer-matrix method for optical multilayer systems with coherent, partially coherent, and incoherent interference[J]. Applied Optics, 2002, 41(19): 3978-3987.
- [22] Moharam M G, Gaylord T K, Grann E B, *et al.* Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings[J]. Journal of the Optical Society of America A, 1995, 12(5): 1068-1076.
- [23] Isabella O, Solntsev S, Caratelli D, *et al.* 3-D optical modeling of thin-film silicon solar cells on diffraction gratings[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2013, 21(1): 94-108.
- [24] Raguin D H, Morris G M. Antireflection structured surfaces for the infrared spectral region[J]. Applied Optics, 1993, 32(7): 1154-1167.
- [25] Kurisu K, Hirai T, Ushiro T, *et al.* Beam-splitting ZnSe diffractive optical element[C]. SPIE, 2003, 4830: 313-318.