

# 亚波长浮雕光栅的衍射和抗反射及增透研究

刘 影<sup>1</sup> 崔 杰<sup>2</sup> 姚国政<sup>1</sup> 叶志成<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>装甲兵工程学院基础部, 北京 100072

<sup>2</sup>上海交通大学电子工程系, 上海 200240

**摘要** 研究了亚波长光栅的衍射对抗反射和增强透射性能的影响。理论分析表明, 如果要达到抗反射和增强透射的双重效果, 需要避免衍射引起的横向波导损耗, 光栅周期要足够小; 而如果只需要达到抗反射效果, 可利用光栅衍射形成横向波导共振降低反射效率, 此时光栅周期不需要很小。利用严格耦合波理论对周期、占空比及凹槽深度等结构参数进行优化。采用激光干涉光刻法制作了周期为 290 nm 的一维浮雕光栅, 并测试其透射及反射光谱, 结果表明这种结构在大角度范围内对可见光波段有明显的抗反射效果, 但是只有波长在非衍射区才具有透射增强效果, 而在衍射区透射降低。该研究实验和理论分析相一致, 研究结果为根据应用要求合理选择光栅周期、降低制备工艺提供了清晰的物理图像和参考。

**关键词** 光栅; 亚波长光栅; 衍射; 抗反射; 增透; 波导共振

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0205001

## Study on Diffraction, Anti-reflection and Transmission Enhancement of Subwavelength Relief Gratings

Liu Ying<sup>1</sup> Chui Jie<sup>2</sup> Yao Guozheng<sup>1</sup> Ye Zhicheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Foundation Department of Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China

<sup>2</sup>Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

**Abstract** The influence of diffraction of subwavelength relief grating on antireflection and transmission performance is investigated. Theoretical analysis shows that, for achieving both effects of antireflection and transmission enhancement, the period of grating must be small enough to eliminate the lateral waveguide loss caused by diffraction. In order to achieve antireflection effect only, the lateral waveguide caused by grating diffraction can be full used to reduce the reflectivity. Small grating period is not required at this point. The effects of period, duty cycle and groove depth of one dimensional relief gratings on reflectivity are investigated with the method of rigorous coupled-wave theory. A one-dimensional relief grating with period of 290 nm is fabricated by two-beam interference method. Experimental results show that it has significant antireflection effect in the whole visible light wave band and wide angular range, but this effect is only reflected in the non-diffraction region. The fabrication difficulty can be reduced greatly by choosing a reasonable grating periods according to the applications, which plays a positive role in using subwavelength gratings more economically.

**Key words** gratings; subwavelength grating; diffraction; antireflection; transmission enhancement; waveguide resonance

**OCIS codes** 050.8824; 050.1940; 310.1210; 310.2790

## 1 引 言

周期小于工作波长的光栅称为亚波长光栅<sup>[1]</sup>, 与周期大于工作波长的光栅不同, 其光子的行为不能用简单的标量衍射来描述。在该尺度下, 光子表现出与偏振、波长等相关参数的矢量特性。利用亚波长光栅的衍射效应破坏全反射, 可提高发光二极管光提取效率<sup>[2-4]</sup>; 利用衍射效应增加光程提高太阳能电池的光电转换效率<sup>[5-8]</sup>; 利用二维亚波长光栅构造增反膜, 可制作角度不敏感的反射式滤光片<sup>[9]</sup>; 利用亚波长仿蛾眼微结

收稿日期: 2015-09-05; 收到修改稿日期: 2015-10-05

基金项目: 国家自然科学基金(61370047, 61007025)

作者简介: 刘 影(1978—), 女, 博士, 讲师, 主要从事亚波长微结构方面的研究。E-mail: yingziah@126.com

\*通信联系人。E-mail: yzhch@sjtu.edu.cn

构可以减小材料的等效折射率,提高光学透过率<sup>[10-11]</sup>。另外,亚波长金属光栅的特殊偏振特性<sup>[12]</sup>使其具有双折射效果,可用于制成光束分束器<sup>[13]</sup>、光栅反射镜<sup>[14]</sup>和相位延滞器等<sup>[15-16]</sup>器件。

当光栅周期远小于入射光波长时,亚波长光栅层可近似地等效为一层折射率介于入射层和衬底之间的均匀薄膜<sup>[17]</sup>。若要实现可见光波段的透射增强,光栅的周期需要小于 200 nm<sup>[18]</sup>。这个尺度的微结构一般采用电子束刻蚀的方法实现<sup>[19]</sup>,但该仪器造价昂贵且不易实现大面积产业化生产。除了被用于提高透明材料的抗反射和增透效果外,亚波长光栅在吸收型的硅、金属和有机材料的利用抗反射增强吸收方面也有着十分广泛的应用。这时,对光栅周期大小的要求往往被认为和增透效应时一致,即光栅周期远小于入射波长。但很多研究却表明由于衍射效应,在比较大的周期下也得到了抗反射的效果<sup>[7,20]</sup>,因此研究衍射对抗反射和增强透射的影响是十分必要的。

本文采用双光束干涉光刻法在玻璃衬底上制作亚波长一维浮雕光栅。利用严格耦合波理论分析这种光栅的周期、凹槽深度和占空比对反射效率的影响,给出优化后的结构参数。对周期为 290 nm,凹槽深度为 120 nm,占空比为 0.4 的光栅反射、透射和衍射效率进行模拟计算。根据计算参数,制作了周期为 290 nm 的一维浮雕光栅,并对该光栅的反射、透射效率进行了测量,与没有制作光栅的玻璃的反射和透射效率进行了对比。

## 2 优化设计和模拟仿真

### 2.1 光栅结构参数的优化设计

利用双光束干涉光刻法在玻璃基底上制作一维矩形浮雕光栅。光栅微结构理论模型如图 1 所示,光栅介质为光刻胶,折射率为 1.68,基底为玻璃,折射率为 1.51。

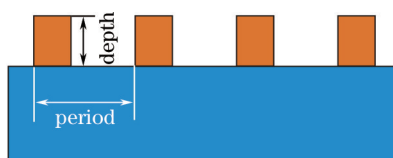


图 1 一维光栅结构示意图

Fig.1 Diagram of one-dimensional grating structure

严格耦合波分析方法的求解过程在文献中都有描述<sup>[21]</sup>,这里不再赘述。亚波长光栅的反射效率由光栅周期、凹槽深度、占空比、工作波长及入射角度等参数决定。对光垂直入射时,占空比为 0.3 的光栅反射率与光栅周期、凹槽深度及工作波长间的关系进行了计算分析。计算结果如图 2(a)~(c)所示,图中蓝紫色区域为反射率

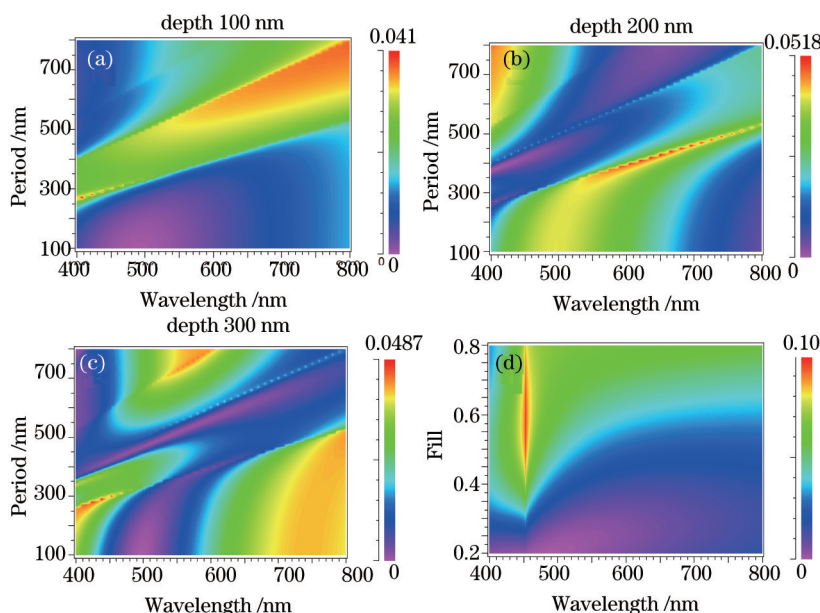


图 2 (a)~(c)为反射率与光栅周期、凹槽深度及工作光波长之间的关系图;(d)为占空比与反射率的关系图

Fig.2 (a)~(c) diagrams of relationships between reflectivity and period, depth, and wavelength;  
(d) diagram of relationship between duty cycle and reflectivity

较低的区域,对应的光栅凹槽深度分别为 100、200、300 nm。由计算结果可知,为使反射效率最小,当光栅周期增大时,凹槽的深度需要相应增大。如果光栅周期选择小于 300 nm,则凹槽深度在 100 nm 附近较为合适,该参数的光栅用双光束干涉光刻法比较容易实现。图 2(d)为周期 300 nm,凹槽深度 120 nm 时,占空比对反射效率的影响。可以看出,在该参数下,占空比选择小于 0.3 时,反射率较低。

### 2.2 衍射对抗反射和增透射影响的模拟分析

Bouffaron 等<sup>[22]</sup>的研究表明,当入射光波长满足(1)式时,将只在基底中存在透射衍射级。

$$\frac{\lambda}{n_s + n_i \sin \theta_i} \leq d \leq \frac{\lambda}{n_i + n_i \sin \theta_i}, \quad (1)$$

式中  $n_s$  为光栅介质的折射率,这里为光刻胶的折射率; $n_i$  为空气的折射率; $\theta_i$  为入射角。为了给出衍射对光栅的透射和反射的影响,选择周期在(1)式确定范围内的一维浮雕光栅进行分析。根据 2.1 节的分析结果,考虑到制备工艺的限制,实验中选择的光栅优化结构参数为:光栅周期为 290 nm,凹槽深度为 120 nm,占空比为 0.4。光栅模型如图 3 所示,光栅凹槽底部到玻璃衬底表面的光刻胶层厚度为 70 nm。在可见光(400~760 nm)范围内,斜入射到该光栅的光(I)只可能存在负一级透射/反射衍射。负一级透射衍射光中,满足全反射条件的光将沿玻璃以导波的形式传播,并从玻璃侧面透出。OR 是零级反射光,-1R 是负一级反射衍射光,OT 是零级透射光,-1T 是负一级透射光。

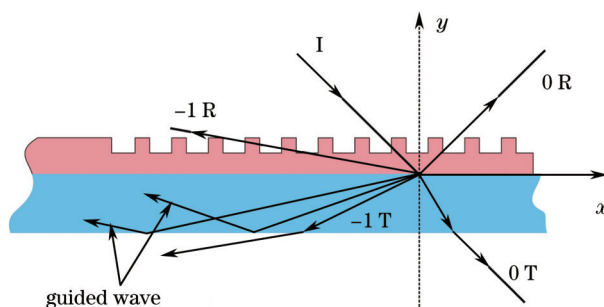


图 3 周期为 290 nm 的一维浮雕光栅示意图

Fig.3 Diagram of one-dimensional relief grating with a period of 290 nm

图 4 为以  $0^\circ \sim 60^\circ$ , 角度间隔为  $10^\circ$ , 斜入射到该光栅时的透射效率模拟图,并与在这些角度下入射的未制作光栅结构的基片的透射效率进行了对比。整体上,可以清楚地看到光谱曲线在某一个波长处出现明显的拐点,拐点左侧的短波长区域光栅透射效率相比于基片的透射效率降低,右侧的长波长区域透射效率提高。利用光栅方程计算可知该拐点就是衍射消失(瑞利反常<sup>[23]</sup>)的临界波长。例如,当以  $30^\circ$  入射时,衍射临界波长为 582.9 nm,入射光波长大于 582.9 nm 的区域透射效率明显提高。但在小于 582.9 nm 的波长区域,透射效率反而下降。随着入射角度的增大,能够提高透射效率的区域变窄,图中在“-▲-”线右侧为  $0^\circ \sim 60^\circ$  入射时可提高透射效率的范围。

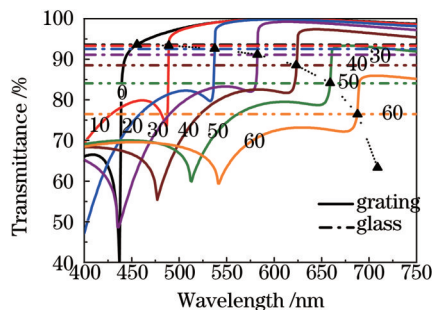


图 4  $0^\circ \sim 60^\circ$  入射时的 0 级透射效率模拟图,其中实线为光栅的透射效率,虚线为表面覆盖光刻胶层的玻璃的透射效率

Fig.4 Simulation of 0 order transmitted diffraction efficiency with incidence angle ranged from  $10^\circ$  to  $60^\circ$ , where the real lines denote the transmittance and the dash dot lines are transmittance of glass covered by photoresist

为阐述衍射对于透射和反射的影响,图 5 为模拟以  $30^\circ$  斜入射的 TE 光的透射、反射和衍射效率的结果图。可以看出,波长小于 437.9 nm 的区域存在负一级反射和透射衍射,波长小于 582.9 nm 且大于 437.9 nm 的区域仅存在负一级透射衍射,波长大于 582.9 nm 的区域不存在衍射。衍射使得一部分的光能从其他角度

出射,透射和反射效率降低。衍射区反射效率的降低不意味着透射效率的提高,而对于非衍射区,由于不具有衍射分光,因此反射和透射是互补关系。尽管由于衍射的存在,造成短波区域透射效率降低,但在整个可见光波段仍存在明显的抗反射现象。

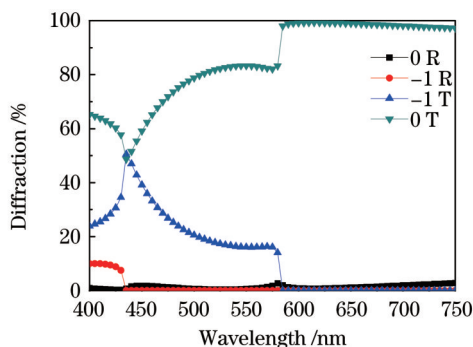


图5 TE光30°角入射时样品反射、透射衍射效率模拟图

Fig.5 Simulated diagram of reflective and transmitted diffraction efficiency when TE polarized light incident on the sample at 30°

为验证该光栅在大角度范围都具有抗反射性能,图6模拟了以20°~60°斜入射的TE偏振光分别在光栅上表面和的玻璃上表面的反射效率,其中实线为光栅上表面反射效率,虚线为玻璃上表面反射效率。与玻璃的反射效率相比,除了由于波导共振造成的反射尖峰外,光栅的反射效率整体下降。随着入射角的增大,在短波长区域抗反射效果反而更加明显,衍射提高了抗反射效果。

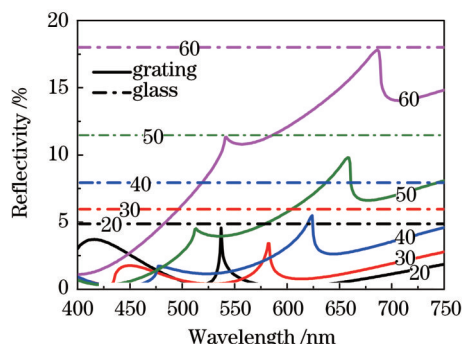


图6 20°~60°角入射时光栅和玻璃上表面0级反射衍射效率模拟图,其中实线表示光栅,点划线表示玻璃

Fig.6 Simulated diagram of 0 order reflective diffraction efficiency with incidence angle from 20° to 60°, where the real line denotes the grating and the dot line denotes the glass

### 3 实 验

采用双光束激光干涉光刻法,在涂有光刻胶的玻璃上制作周期为290 nm的一维浮雕光栅。光栅周期由(2)式给出

$$2d \sin \theta = \lambda, \quad (2)$$

式中  $d$  为光栅周期,  $\theta$  为两束光的夹角,  $\lambda$  为入射光波长。采用457.9 nm波长的固体激光器作为光源,经计算生成周期为290 nm一维光栅的两束光夹角为52.14°。制备样品的实验光路如图7(a)所示,其中L为透镜,M为反射镜,A为可绕中心旋转的平台,H为涂有光刻胶的玻璃基片,光刻胶(ARP 3500-6, Allresisit Co.)的厚度约为200 nm。激光经空间滤波器SF和透镜L扩束为准直的平行光,采用洛埃镜法将平行光分为两束并使之在空间叠加。将基片H放置在两束光的叠加区域,曝光时间为30 s。显影液为浓度0.35%的NaOH溶液,显影时间为10 s。经曝光显影处理后,在光刻胶薄膜上形成浮雕光栅。图7(b)为实验制作的一维光栅的原子力显微镜(AFM)图;图7(c)为该光栅的侧面轮廓图,光栅凹槽深度约为120 nm,占空比约为0.4。

图8(a)为样品在白光照射下的透射衍射照片,光栅区域面积约为3.3 cm×1.8 cm。当透射衍射光衍射角小于玻璃-空气的全反射角时,衍射光将从玻璃下表面透出,在图中拍摄角度下可观察到蓝绿色的衍射光。另外,当衍射角大于全反射角时,形成衬底波导光,在玻璃衬底边缘可以清楚地看到其侧面明显出光,这是透射



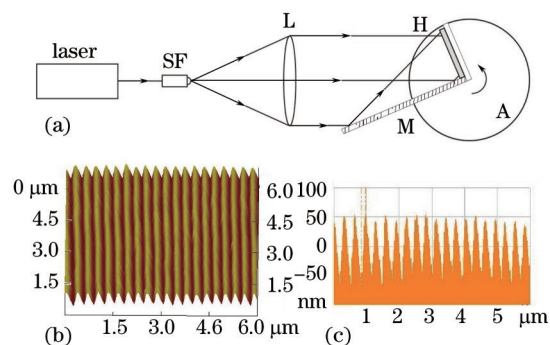


图 7 (a) 双光束曝光实验光路示意图; (b) 为一维光栅的 AFM 顶视图; 图(c)一维光栅的 AFM 侧面轮廓图。

Fig.7 (a) Experimental optical path of interference exposure; (b) AFM image of the grating by top view;

(c) AFM image of the grating profile by side view

效率降低的主要原因。为观察该光栅结构是否具有抗反射效果,将该样品覆盖在印有“SJTU”字母的黑白纸片上,让白光从样品上方照射,并从反射角进行观察,效果照片如图 8(b)所示。由于玻璃的反光,没有制作光栅的区域呈现白色而无法看清下面的字母。而在制作了光栅的区域,削弱了反射光的干扰,从而可以清楚地看到下面的“SJTU”字母,抗反射效应产生了类似“增透”的效果。

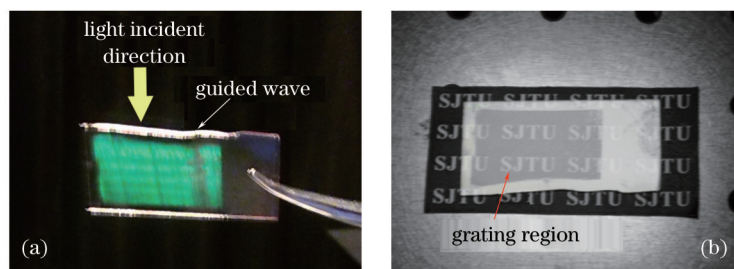


图 8 (a) 样品透射衍射照片,光栅区域尺寸约为 3.3 cm × 1.8 cm; (b) 抗反射演示照片

Fig.8 (a) Transmission diffraction image of the sample, the size of grating is about 3.3 cm × 1.8 cm; (b) image of anti-reflective

为进一步验证制作的光栅在宽波段、大角度范围内的抗反射性能,测量光栅的 TE 光透射效率和反射效率。图 9(a)为该光栅的透射效率与表面涂有光刻胶的玻璃基片的透射效率的光谱测试曲线,光刻胶在蓝光波段有强烈的吸收。图 9(b)为去除玻璃下表面反射影响后的反射效率光谱测试曲线,以及在相同角度下玻璃上表面反射效率测试曲线。其中,实线代表光栅,虚线代表玻璃。测试结果显示,当光以 0°~60°入射时,可增加透射效率的波长区域与模拟结果基本吻合。在衍射区域,光栅的透射效率小于未制作光栅的透射效率,但其反射效率与玻璃的反射效率相比整体上仍然有明显下降,与模拟结果一致。

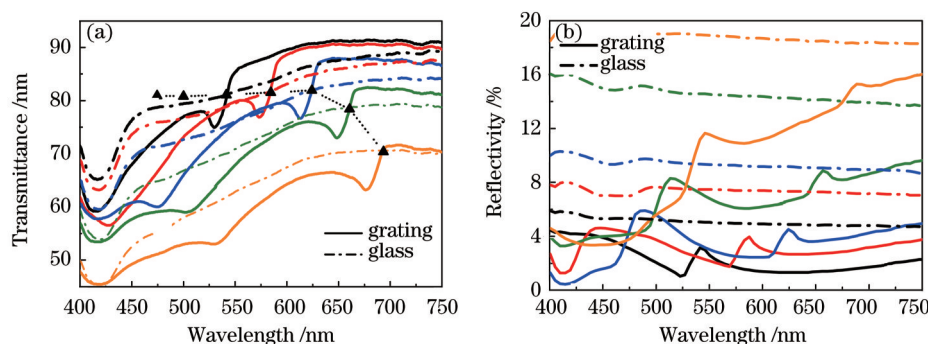


图 9 0 级透射(a)和反射(b)效率测试曲线,实线表示光栅,虚线表示玻璃

Fig.9 (a) Transmittance (a) and reflection (b) efficiency testing curve of 0-order;

the real line denotes the grating and the dot line denotes the glass

#### 4 结 论

研究结果为衍射对亚波长结构的透射、反射和吸收的影响提供了一个清晰的物理图像。当光栅周期  $d$

在(1)式确定范围内时,将只有透射衍射。在衍射区域,光栅衍射导致了薄膜透射和反射效率降低;而在非衍射区,由于没有光栅衍射的分光作用,可以同时达到抗反射和增透效果。通过优化光栅周期、占空比和凹槽深度,可以在可见光波段降低总体反射效率。测试制作周期为 290 nm 的一维亚波长光栅,结果显示该光栅在入射角  $0^\circ\sim 60^\circ$  范围内对 400~760 nm 的可见光有明显的抗反射效果。这个周期的光栅制备工艺相对简单,可利用双光束干涉光刻法实现。在只需要消除反射光影响,如提高太阳能电池的光电转换效率、消除车辆玻璃表面反光、红外伪装/隐身<sup>[24]</sup>等的方面有很好的应用前景。文中仅对光栅结构进行了初步优化,下一步将结合制备工艺误差,分析容差特性,对光栅结构做进一步优化。

## 参 考 文 献

- 1 Bayanheshig, Tang Yuguo, Qi Xiangdong, *et al.*. The complete analytical form and analysis on angular dispersion formula of two-dimensional grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, 53(12): 4181-4188.  
巴音贺希格,唐玉国,齐向东,等. 二维平面光栅角色散公式的完整解析形式及分析[J]. *物理学报*, 2004, 53(12): 4181-4188.
- 2 Y M Song, E S Choi, J S Yu, *et al.*. Light-extraction enhancement of red AlGaInP light-emitting diodes with antireflective subwavelength structures[J]. *Opt Express*, 2009, 17(23): 20991-20997.
- 3 Y Kanamori, M Ishimori, K Hane. High efficient light-emitting diodes with antireflection subwavelength gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2002, 14(8): 1064-1066.
- 4 I Hiroyuki, B Toshihiko. Efficiency enhancement in a light-emitting diode with a two-dimensional surface grating photonic crystal[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 84(4): 457-459.
- 5 K X Wang, Z Yu, V Liu. Absorption enhancement in ultrathin crystalline silicon solar cells with antireflection and light-trapping nanocone gratings[J]. *Nano Lett* 2012, 12(3): 1616-1619.
- 6 Kong Weijing, Cao Kaihua, You Chenglong, *et al.*. Optimization of wide spectrum anti-reflective grating for solar cell[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1205001.  
孔伟金,曹凯华,由成龙,等. 太阳能电池用宽光谱减反射光栅的优化设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(12): 1205001.
- 7 R Y Zhang, B Shao, J R Dong, *et al.*. Absorption enhancement analysis of crystalline Si thin film solar cells based on broadband antireflection nanocone grating[J]. *J Appl Phys*, 2011, 110(11): 113105.
- 8 K Li, H Zhen, Z Huang, *et al.*. Embedded surface relief gratings by a simple method to improve absorption and electrical properties of polymer solar cells[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2012, 4(8): 4393-4397.
- 9 Hong Liang, Yang Chenying, Shen Weidong, *et al.*. Design of incident angle-independent color filter based on subwavelength two-dimensional gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(6): 064204.  
洪 亮,杨陈楹,沈伟东,等. 基于亚波长二维光栅的入射角不敏感颜色滤光片研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(6): 064204.
- 10 K C Park, H J Choi, C H Chang, *et al.*. Nanotextured silica surfaces with robust superhydrophobicity and omnidirectional broadband supertransmissivity[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(5): 3789-3799.
- 11 S Ji, K Song, T B Nguyen, *et al.*. Optimal moth eye nanostructure array on transparent glass towards broadband antireflection[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2013, 5(21): 10731-10737.
- 12 Wang Zhiwen, Chu Jinkui, Wang Qianyin. Transmission analysis of single layer sub-wavelength metal gratings[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(7): 0705002.  
王志文,褚金奎,王倩怡. 单层亚波长金属光栅偏振器透射机理研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(7): 0705002.
- 13 Guo Chucai, Ye Weimin, Yuan Xiaodong, *et al.*. Research on sub-wavelength grating polarizing beam splitter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2690-2695.  
郭楚才,叶卫民,袁晓东,等. 亚波长光栅偏振分束器的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(9): 2690-2695.
- 14 Fang Ming, Gao Jiancun, Tang Xinchun, *et al.*. Generating linearly polarized TEM<sub>00</sub> laser beam with grating mirror as the back-cavity mirror[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0302001.  
方 茗,高健存,唐新春,等. 光栅反射镜作激光器后腔镜输出基横模线偏振光[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0302001.
- 15 Zhao Huajun, Yang Shouliang, Zhang Dong, *et al.*. Design of polarizing beam splitters based on subwavelength metal grating[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(9): 6236-6242.  
赵华君,杨守良,张 东,等. 亚波长金属偏振分束光栅设计[J]. *物理学报*, 2009, 58(9): 6236-6242.
- 16 Ventola, J Tervo, S Siitonen, *et al.*. High efficiency half-wave retardation in diffracted light by coupled waves[J]. *Opt Express*, 2012,

- 20(4): 4681–4689.
- 17 D H Raguin, G M Morris. Analysis of antireflection-structured surfaces with continuous one-dimensional surface profiles[J]. *Appl Opt*, 1993, 32(14): 2582–2598.
- 18 A Gombert, K Rose, A Heinzl, *et al.*. Antireflective submicrometer surface-relief gratings for solar applications[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1998, 54: 333–342.
- 19 Y Kanamori, M Sasaki, K Hane. Broadband antireflection gratings fabricated upon silicon substrates[J]. *Opt Lett*, 1999, 24(20): 1422–1424.
- 20 J Jefferies, R G Sabat. Surface-relief diffraction gratings' optimization for plasmonic enhancements in thin-film solar cells[J]. *Prog Photovolt: Res Appl*, 2014, 22: 648–655.
- 21 M G Moharam, D A Pommet, E B Grann, *et al.*. Stable implementation of the rigorous coupled-wave analysis for surface-relief gratings: enhanced transmittance matrix approach[J]. *J Opt Soc Am A*, 1995, 12(5): 1077–1086.
- 22 R Bouffaron, L Escoubas, J J Simon, *et al.*. Enhanced antireflecting properties of microstructured flat-top pyramids[J]. *J Opt Soc Am A*, 2008, 16(23): 19304–19309.
- 23 M Honkanen, V Kettunen, M Kuittinen, *et al.*. Inverse metal-stripe polarizers[J]. *Appl Phys B*, 1999, 68(1): 81–85.
- 24 L Phan, W G Walkup, D D Ordinario, *et al.*. Reconfigurable infrared camouflage coatings from a cephalopod protein[J]. *Adv Mater*, 2013, 25(39): 5621–5625.

栏目编辑: 刘丰瑞