

基于纳米金属光栅的透射光谱调制器

沈发付^{1,2} 崔杰¹ 孙楠凌¹ 叶志成¹

¹上海交通大学电子工程系 TFT-LCD 关键材料及技术国家工程实验室, 上海 200240

²昆山龙腾光电有限公司, 江苏 昆山 215300

摘要 纳米金属光栅上的表面等离子体共振(SPR)对临近材料折射率变化敏感,因此通过改变临近材料折射率,可以实现纳米金属光栅透射光谱的颜色调制进而用于显示器件,该调制器具有结构简单、色度和对比度高等特点。通过仿真设计实现了红绿蓝三个子像素的透射彩色显示。实验制备了周期为 520 nm、铝厚度为 50 nm 的双层金属光栅,并通过改变光栅临近材料折射率,实现了空气中为绿色亮态显示、蔗糖溶液中为暗态显示的效果,明暗对比度达到 122。从理论和实验两方面证明了基于金属光栅结构的彩色显示和亮度调节的可行性,为未来电浸润显示器件提供了新的设计方案。

关键词 视觉光学;表面等离子体共振;纳米金属光栅;折射率;透射式显示;电浸润

中图分类号 TN27;TN29

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.043301

Transmission Spectrum Modulator Based on Metallic Nanowire Gratings

Shen Fafu^{1,2} Cui Jie¹ Sun Nanling¹ Ye Zhicheng¹

¹State Engineering Laboratory for TFT-LCD Materials and Technologies, Department of Electronic Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

²InfoVision Optoelectronics Co., Ltd., Kunshan, Jiangsu 215300, China

Abstract Metallic nanowire gratings have great potential to be used in display devices attributing to the unique surface plasmon resonant color shift by changing the refractive index of the ambient media. The modulator has the advantages of simple structure, high chromaticity and contrast, etc. Three pitches of bilayer metallic nanowire gratings with red, green and blue colors are respectively designed by simulation. In the experiment, the gratings with a pitch of 520 nm and an aluminum thickness of 50 nm are fabricated. The switching from bright green color state to dark state is achieved by changing the ambient medium from air to sucrose solution, and the contrast can reach 122. The feasibility of color display and adjustable brightness is verified theoretically and experimentally, which provides a new design scheme for the electro-wetting display devices in the future.

Key words visual optics; surface plasmon resonance; metallic nanowire gratings; refractive index; transmission display; electro-wetting

OCIS codes 330.4060; 330.7321; 330.7326

1 引言

基于反射环境光的电子书由于其超低能耗的优点在便携和节能方面有着巨大的优势^[1]。目前电子书市场中的主流技术是电泳显示技术,譬如亚马逊的 Kindle 电子书。电泳式显示具有双稳态和低能耗等优点,但是该方式响应时间长(秒级)、明暗对比度低(小于 10),故无法用于彩色视频的播放^[2]。具有疏水性材料的电浸润显示技术能够解决电泳式刷新速度慢和无法实现彩色显示的问题^[3]。电浸润显示通过改变外加电压使得水、油和固体介质间的张力发生变化,从而改变油在固体介质上的覆盖面积,使透射光谱发生变化,以达到图像显示以及视频播放的目的^[4]。然而,由于此类显示使用的像素材料是具有吸收性的黑色或彩色染

收稿日期: 2015-11-16; 收到修改稿日期: 2015-11-20; 网络出版日期: 2016-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61370047, 11374212, 61007025, 51235007, 11421064)

作者简介: 沈发付(1982—),男,硕士研究生,主要从事平板显示与照明技术等方面的研究。E-mail: sffzj@sjtu.edu.cn

导师简介: 叶志成(1977—),男,博士,副研究员,主要从事超颖表面光学器件、新型显示、探测器和硅基光波导器件等方面的研究。E-mail: yzhch@sjtu.edu.cn(通信联系人)

料,会产生严重的背光损失,影响显示效率^[6]。因此如何减少损耗成为电浸润显示的研究热点。

金属材料上的表面等离子体共振(SPR)可以激发特殊的光学现象,如增强透射^[6]、提高拉曼散射^[7]等。由于灵敏度高^[8]且对折射率敏感^[9],表面等离子体共振被广泛应用于传感技术中,例如食品安全^[10]和环境监测^[11]。近年来,基于表面等离子体共振的彩色滤光等技术也在显示领域中也得到了很大发展^[12]。针对传统电浸润显示吸收损耗问题以及表面等离子体共振的特点,本文提出了一种基于纳米金属光栅的透射光谱调制方式。双层纳米金属光栅(BMNG)中的表面等离子体共振在显示器件中可以用来作彩色滤光片和偏振片^[13-14],同时具有对临近材料折射率变化敏感的特征^[15]。本文利用表面等离子体共振的波长选择透射功能,设计并制备了基于纳米金属光栅的透射子像素。通过改变同一周期纳米金属光栅临近材料的折射率,实现了共振透射颜色明暗的转换,以验证纳米金属光栅的高效率和全彩色显示的可行性。结合电浸润显示的工作原理,设计了一种基于双层纳米金属光栅的不含吸收性油膜的透射式电浸润显示器件结构。

2 基于纳米金属光栅共振的显示理论

表面等离子体共振是存在于介质与金属界面的一种电磁波激发方式^[16]。双层纳米金属(铝)光栅和其中的表面等离子体共振波示意图如图1所示,图中SPW为表面等离子体波,PR为光刻胶。白色横磁模(TM)偏振光从透明基板一端垂直照射到纳米金属光栅上,通过光栅衍射,在光栅外部的临近材料和铝之间的界面上,横向的表面等离子体共振波被激发。

当双层纳米金属光栅的表面等离子体共振波被激发时,满足以下公式^[17]:

$$k_0 \sin \theta + n \frac{2\pi}{T} = k_{sp} = k_0 \sqrt{\frac{\epsilon_m n_a^2}{\epsilon_m + n_a^2}}, \quad (1)$$

式中 k_0 ($k_0 = 2\pi/\lambda$) 为入射光在真空中的波数; θ 为 TM 偏振光的入射角度,正入射时为 0° ; n_a 为与光栅相接触的临近材料折射率; T 为光栅周期; k_{sp} 为表面等离子体波的波数; ϵ_m 为 Lorentz-Drude 模型下铝的介电常数^[18]; n 为代表衍射级次的正整数。

在双层纳米金属光栅上,表面等离子体共振可以用作彩色滤光片和偏振器。根据(1)式等号左边可知,共振单峰的波长可以由光栅的周期来调节。为了实现不同波长的彩色滤光,可以使用多个周期的光栅。根据(1)式等号右边可知,金属临近介质的折射率变化也会影响共振波长,因此在同一周期下通过调节折射率可以改变共振透射波长,实现亮度的改变。图2是根据(1)式计算出的共振波长随金属临近材料折射率的变化曲线。在 Lorentz-Drude 金属模型下,选择铝作为最上层的金属薄膜,光栅周期分别是 420、520、650 nm。从图2可以看出,随着金属光栅临近材料折射率的增大,共振波长向长波长方向移动。且当光栅临近材料折射率分别大于 1.65、1.42 和 1.21 时,三种周期的共振波长右移至不可见光外(波长大于 800 nm)。

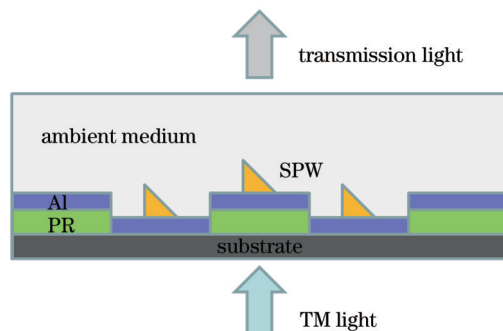


图1 双层纳米铝光栅以及其中的SPR波示意图

Fig.1 Schematic of the bilayer Al nanowire gratings and the SPR waves therein

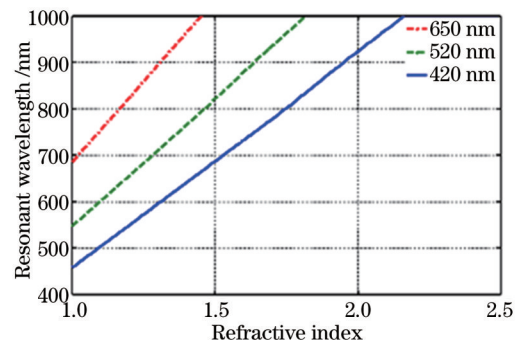


图2 SPR波长随金属临近材料折射率的变化曲线

Fig.2 Calculated curves of SPR wavelength with the ambient refractive index

3 仿真模拟

根据(1)式,金属光栅的透射波峰值主要和光栅周期及光栅临近材料折射率有关。为了研究透射光的光谱特性与双层纳米金属光栅的参数间的关系,采用严格耦合波分析(RSoft, DiffractMODTM)方法。根据实际光栅

制备工艺,仿真中选择梯形结构的金属光栅,如图3所示,其中金属膜的高度 $d=50\text{ nm}$,介质光栅高度 $h=120\text{ nm}$,光栅的占空比 $t/T=0.5$ 。通过仿真计算,得到透射光谱如图4所示,可以看出,光栅周期为420、520、650 nm时,分别在波长460、550、680 nm处产生透射波峰,并且红绿蓝三色的峰值效率达到近20%。因此,通过控制光栅周期及其他光栅参数可以实现红绿蓝三个子像素的颜色显示。

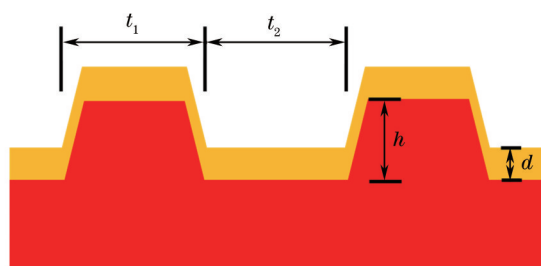


图3 RSoft 仿真软件中梯形光栅结构示意图

Fig.3 Trapezoid grating model in simulation

为了研究光栅临近材料折射率对透射光谱的影响,选择周期为520 nm的光栅作为案例。对于520 nm的双层纳米铝光栅,由图2可知,金属铝临近材料的折射率至少为1.42时才能实现共振波波峰移到不可见光外。选择50%(质量分数)的蔗糖溶液(室温下,折射率为1.42)作为备选材料。图5是当金属光栅临近材料由空气变成50%蔗糖溶液时,透射光谱的变化曲线。从图5可以明显地看出,当与金属铝接触的介质由空气变为蔗糖溶液时,共振单峰出现了明显的右移,几乎达到了非可见光外。因此,理论上可以实现整个显示从亮态到暗态的切换。

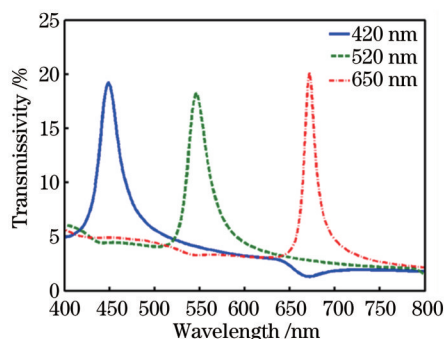


图4 空气中不同光栅周期的仿真透射光谱

Fig.4 Simulated transmission spectra of trapezoid gratings with different pitches in air ambient

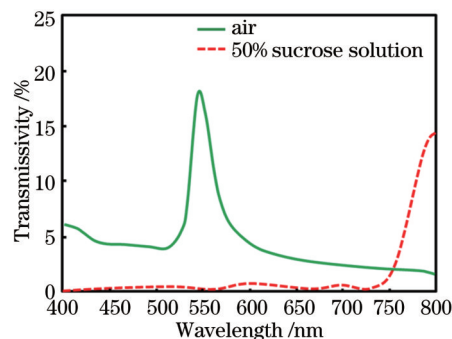


图5 临近材料折射率由空气变成50%蔗糖溶液后520 nm光栅透射光谱的变化

Fig.5 Simulated transmission spectra of the 520 nm gratings with the ambient medium changed from air to 50% sucrose solution

4 双层纳米金属光栅的制备与实验测试

将120 nm厚的光刻胶(ARP-5350, Allresisit)旋涂于透明玻璃基板上,光刻胶折射率约为1.5。用氦-镉激光器(442 nm, KIMMON)对光刻胶进行双光束曝光^[19],如图6所示,可以通过控制激光干涉曝光平台中样品和水平线的角度改变光栅周期。用0.75%(质量分数)的NaOH溶液显影10 s。利用电子束蒸发的方式在光栅上镀上一层50 nm厚的铝膜^[20]。

根据模拟仿真结果,实验中选择周期为520 nm的双层铝光栅作为实验案例进行分析。使用扫描电子显微镜(SEM)^[21]测试光栅的表面形貌,俯视图和横截面图如图7所示。

透射光谱测量系统示意图如图8所示。由LED发出的白色光束经过一个准直透镜,并由格兰-汤普森(Glan-Thompson)棱镜偏振处理后(TM偏振),照射在样品上,该样品被密封在一个比色皿腔室中。然后用一个连接在光谱仪(QE65-PRO, Ocean Optics, 美国)上的光纤探头来收集透射光,并与计算机连接进行光谱数据分析。

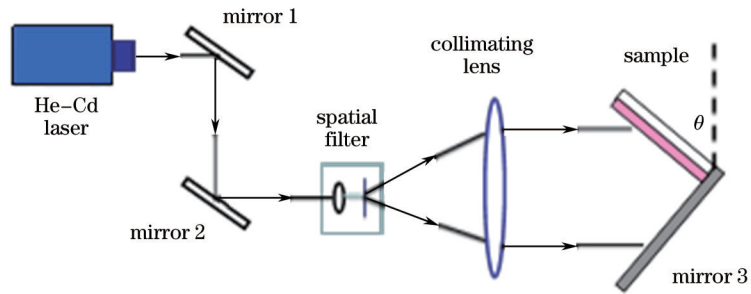


图6 双光束激光干涉曝光光路图

Fig.6 Optical path of dual-beam laser interference exposure

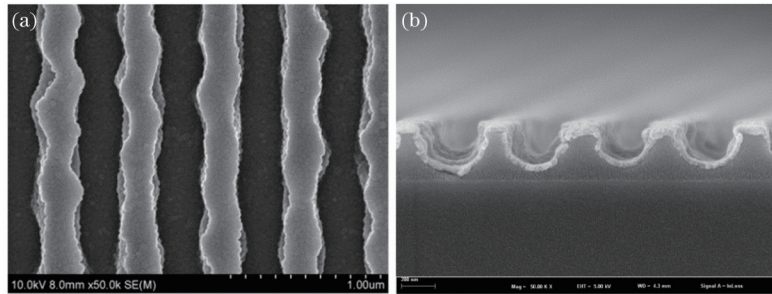


图7 520 nm 光栅 SEM 图像。(a) 俯视图; (b) 截面图

Fig.7 SEM images of the Al gratings with pitch of 520 nm. (a) Top view; (b) cross-sectional view

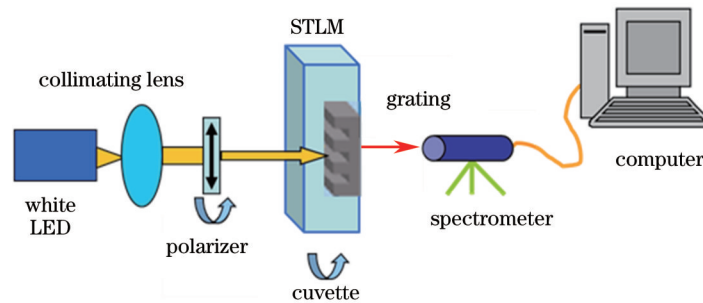


图8 测量系统示意图

Fig.8 Schematic of the measurement system

测试中,周期为 520 nm 的金属光栅在空气中的透射谱线如图 9 中实线所示。从图 9 可以看出,透射率与模拟数据比较吻合。由于表面等离子体的共振作用,透射光谱在波长 542 nm 处产生了一个峰值,效率约为 3.8%,透射光显示为绿色(曲线上方绿色小图为在实验中拍摄的透射颜色照片)。由于金属光栅的法布里-珀罗腔共振,绿色光谱在 400 nm 附近还产生了一个小的峰值,透射率小于 2%。人眼对蓝紫色区域不敏感,因此这个峰值对实际显示效果影响不大。后续工作中可以通过优化金属光栅的厚度和占空比来抑制旁瓣峰值。受到比色皿的吸收、反射等影响,整个透射率与图 4 相比偏低,另外金属材料对光的吸收损耗也会影

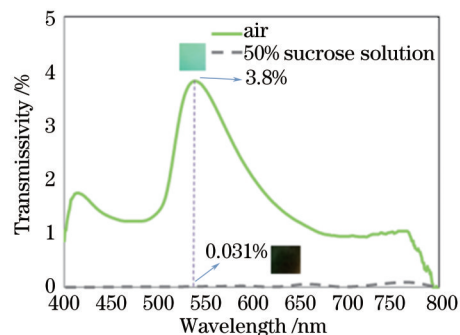


图9 临近折射材料由空气变为50%蔗糖溶液时周期520 nm 铝光栅的透射光谱变化

Fig.9 Transmission spectra of the 520 nm gratings with ambient medium changed from air to 50% sucrose solution

响透射率。

当金属光栅的临近材料由空气变成50%蔗糖溶液(室温下,折射率为1.42)时,透射光谱如图9中虚线所示。由于金属光栅临近材料的折射率变大,表面等离子体共振波峰移动到可见光谱外,使得整个可见光区域的透射率仅为0.031%左右。由于样品的缺陷和蔗糖溶液对光谱吸收的影响,与图5相比,光谱的透射率较低,并且暗态的透射峰也变得不明显。从实验中可见,绿色显示由亮态转变到了暗态,并且亮态和暗态的对比度高达122。

5 器件设想

通过理论仿真和实验测量,验证了双层纳米金属光栅的结构特征以及该显示器件彩色显示的可行性。基于上述特性,将SPR原理与电浸润效应相结合,提出了一种新型的基于双层纳米金属光栅的显示单元模型。

基于双层纳米金属光栅的透射式电浸润显示单元的结构如图10所示。该结构自下而上分别是衬底、透明电极、介质疏水层(绝缘层)以及双层纳米金属光栅,并使用SU-8负性胶制作亲水的围堰,形成电浸润显示(EWD)单元,再将一些亲水的特殊透明液体材料(STLM)注入到每个EWD单元中。该结构中电压施加在液滴和透明电极之间,通过调整电压来改变液滴与光栅表面的张力,从而实现液滴接触角的变化。

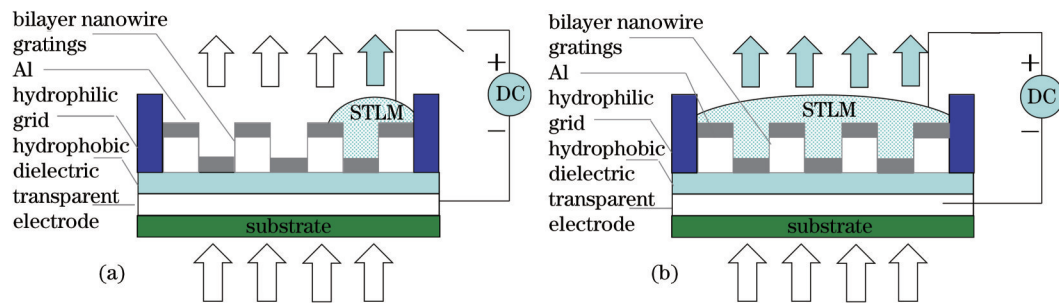


图10 透射式EWD单元横截面结构图。(a)不施加电压时,液滴在围堰边缘,单元显示亮态;
(b)施加电压后,液滴平铺在光栅表面,单元显示暗态

Fig.10 Cross-sectional schematic of the proposed transmission EWD cell.

(a) Cell exhibits bright state and liquid droplet stays at the edge of cofferdam without voltage application;

(b) cell exhibits dark state and liquid droplet lays on grating surface with voltage application

图10(a)中,不对EWD单元施加电压时,纳米纹理表面的疏水性^[22-23]使得液滴接触角很大,液滴几乎立在纳米金属光栅表面,此时透明的液滴会紧靠亲水围堰,大多数入射光直接穿过表面是空气的光栅。根据之前的仿真结果可知,整个显示单元会根据光栅周期 T 而显示特定的颜色,透射光表示为亮态。图10(b)中,适量电压被施加到氧化铟锡(ITO)透明电极和液滴之间,根据电浸润理论,此时表面张力占主导,液滴与固体间润湿性的改变引起液滴接触角的变化,整个液滴就平铺在纳米金属光栅表面。由于与光栅接触的临近材料折射率发生了改变,根据之前的理论和测试可知,通过控制液滴的折射率,可以使透射的共振波峰移到不可见光外,此时整个EWD单元显示为暗态。因此在通断电压的过程中,该EWD单元可以实现特定颜色的明暗态切换。

6 结论

利用纳米金属光栅具有彩色滤光片的特性,并结合表面等离子体共振对临近材料折射率变化敏感的特点,将其应用于透射式电浸润显示。通过仿真计算,在不同的光栅周期下,实现了红绿蓝三个子像素的透射颜色显示。实验制备了周期为520 nm的金属光栅,验证了梯形结构的纳米金属光栅透射光谱的绿色显示。通过改变金属光栅临近材料的折射率,即将临近介质由空气变为50%蔗糖溶液,实现了绿色显示由亮态到暗态的切换。对未来电浸润显示器件提出了一种基于双层纳米金属光栅的结构设计,该显示器件具有透射率高、色度和对比度高特点,在未来电浸润显示器件领域具有很大的发展潜力。

参考文献

1 Chen Liwen, Qian Jinwei. The present and future of electronic paper[J]. Advanced Display, 2009, (3): 54-57.

陈俐雯, 钱金维. 电子纸的现状与未来发展[J]. 现代显示, 2009, (3): 54-57.

- 2 Liu Huigang, Zhu Yong, Shang Guanghui, *et al.*. The research and development of EPD[J]. *Advanced Display*, 2006, (1): 64-68.
刘会刚, 朱勇, 商光辉, 等. 电泳显示器的研究及进展[J]. *现代显示*, 2006, (1): 64-68.
- 3 Sun Zhiwen, Xie Erqing, Han Weihua, *et al.*. Progress of electrowetting[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2008, 23(3): 387-392.
孙志文, 谢二庆, 韩卫华, 等. 电润湿的研究进展[J]. *液晶与显示*, 2008, 23(3): 387-392.
- 4 You H, Steckl A J. Three-color electrowetting display device for electronic paper[J]. *Appl Phys Lett*, 2010, 97(2): 023514.
- 5 Xu Qingyu, Shen Kai, Xiao Changshi. The fabrication of the electrowetting display unit[J]. *Optoelectronic Technology*, 2010, 30(4): 225-229.
徐庆宇, 沈凯, 肖长诗. 电润湿显示单元研究[J]. *光电子技术*, 2010, 30(4): 225-229.
- 6 Yang Wenxu, Song Hongfei, Lei Jianguo. Numerical study on transmission enhancement of metallic nanoholearray[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(3): 033101.
杨文旭, 宋鸿飞, 雷建国. 金属纳米孔阵列透射增强的数值研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(3): 033101.
- 7 Fan Q F, Cao J, Liu Y, *et al.*. Investigations of the fabrication and the surface-enhanced Raman scattering detection applications for tapered fiber probes prepared with the laser-induced chemical deposition method[J]. *Appl Opt*, 2013, 52(25): 6163-6169.
- 8 Qi Pan, Ma Xiao, Zhong Jingang, *et al.*. Application of portable surface plasmon resonance biosensor in the quantitative detection of low concentration solution[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(7): 072802.
齐攀, 马骁, 钟金刚, 等. 便携式表面等离子体共振生物传感器在低浓度溶液定量检测中的应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(7): 072802.
- 9 Chen Qianghua, Liu Jinghai, Luo Huifu, *et al.*. Refractive index measurement system of liquid based on surface plasmon resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0512002.
陈清华, 刘景海, 罗会甫, 等. 一种基于表面等离子共振的液体折射率测量系统[J]. *光学学报*, 2015, 35(5): 0512002.
- 10 Piliarik M, Párová L, Homola J. High-throughput SPR sensor for food safety[J]. *Biosens Bioelectron*, 2009, 24(5): 1399-1404.
- 11 Rodriguez-Mozaz S, Marco M P, de Alda M J L, *et al.*. Biosensors for environmental monitoring of endocrine disruptors: A review article[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2004, 378(3): 588-598.
- 12 Lee H S, Yoon Y T, Lee S S, *et al.*. Color filter based on a subwavelength patterned metal grating[J]. *Opt Express*, 2007, 15(23): 15457-15463.
- 13 Ye Z C, Zheng J, Sun S, *et al.*. Compact transreflective color filters and polarizers by bilayer metallic nanowire gratings on flexible substrates[J]. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*, 2013, 19(3): 4800205.
- 14 Ye Yan, Zhou Yun, Zhang Heng, *et al.*. Polarizing color filter based on a submicron metal grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 0405003.
叶燕, 周云, 张恒, 等. 金属光栅型偏振彩色滤光片[J]. *光学学报*, 2011, 31(4): 0405003.
- 15 Roh S, Chung T, Lee B. Overview of the characteristics of micro- and nano-structured surface plasmon resonance sensor [J]. *Sensors*, 2011, 11(2): 1565-1588.
- 16 于艳鑫, 孙荣春, 刘仁成, 等. SPR传感器的理论及应用简介[J]. *科技创新导报*, 2010, (31): 82.
- 17 Homola J, Koudela I, Yee S S. Surface plasmon resonance sensors based on diffraction gratings and prism couplers: Sensitivity comparison[J]. *Sensor Actuator B*, 1999, 54(1): 16-24.
- 18 Palik E D. *Handbook of optical constants of solids*[M]. Orlando: Academic Press, 1985.
- 19 Lin Yanqiang, Wang Ning, Liu Shuting, *et al.*. The preparation and study of electrowetting display array controlled by single voltage[J]. *Advanced Display*, 2012, 23(1): 23-27.
林燕强, 王宁, 刘书婷, 等. 单电压控制的电润湿显示阵列的制备与研究[J]. *现代显示*, 2012, 23(1): 23-27.
- 20 Chen Rongfa. Analysis and study on the capability of aluminium films prepared by electron beam vapour deposition and magnetron sputtering[J]. *Vacuum*, 2003, (2): 11-15.
陈荣发. 电子束蒸发与磁控溅射镀铝的性能分析研究[J]. *真空*, 2003, (2): 11-15.
- 21 Goldstein J I, Newbury D E, Echlin P, *et al.*. *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*[M]. New York: Plenum Press, 1981.
- 22 Fu Aihong, Li Chunfu. The preparation and development of biomimic super-hydrophobic surface[J]. *Materials Review*, 2011, 25(18): 444-449.
傅爱红, 李春福. 超疏水表面的研究进展及制备技术[J]. *材料导报*, 2011, 25(18): 444-449.
- 23 Park K C, Choi H J, Chang C H, *et al.*. Nanotextured silica surfaces with robust superhydrophobicity and omnidirectional broadband supertransmissivity[J]. *ACS Nano*, 2012, 6(5): 3789-3799.