

文章编号 1004-924X(2012)10-2237-08

多方向金属光栅偏振器及在偏振导航中的应用

褚金奎*, 王志文, 张英杰, 王寅龙

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 在同一聚碳酸酯基底上制作了 6 个不同方向的双层金属光栅偏振器, 用于消除分立器件带来的安装误差。将该偏振器应用于偏振导航传感器上并进行了测角精度测试, 基于神经网络法研究了角度测量的误差补偿方法。首先, 基于严格耦合波理论设计了一种亚波长双层金属光栅偏振器, 分析了它的周期和金属厚度对偏振器性能的影响, 其在 510 nm 波长入射时 TM 偏振光透射率高于 71%, 消光比大于 2 100。应用纳米压印技术在聚碳酸酯基底上加工制作了设计的偏振器, 其基底上设有 6 块结构参数相同但朝向不同的双层金属光栅结构。将此偏振器安装在偏振导航传感器上并在测试平台上测试了测角精度, 测试的原始误差在 $\pm 1^\circ$ 以内; 经 BP 神经网络法误差补偿后, 测角误差在 $\pm 0.2^\circ$ 以内。得到的结果可较好地满足偏振导航的要求。

关键词: 光栅偏振器; 偏振导航; 严格耦合波分析; 纳米压印; BP 神经网络

中图分类号: TP212.1; O436.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20122010.2237

Multi-orientated wire-grid polarizer and its application to polarization navigation

CHU Jin-kui*, WANG Zhi-wen, ZHANG Ying-jie, WANG Yin-long

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

* Corresponding author, E-mail: chujk@dlut.edu.cn

Abstract: Multi-orientated bi-layered nano wire polarizers were fabricated in a polycarbonate (PC) substrate to eliminate the alignment error caused by the discrete components. The polarizers were used in a polarization navigation sensor, the angular error was tested and the angular error compensation algorithm based on neural network was analyzed. First, the bi-layered nano wire polarizers were designed using Rigorous Coupled Wave Analysis (RCWA) and the effects of grating period and metal layer thickness on the polarizer performance were analyzed in detail. Experiments show that the polarizer has TM transmittance of 71% and extinction ratio of 2 100 for the wavelength of 518 nm. The polarizer was fabricated based on nanoimprint lithography and six polarizers were mounted in the substrate with the same structure but different orientations. After that, the polarizer was applied to a polarization navigation sensor and the angular error was measured at a measurement platform. Results indicates that the original angular error is within $\pm 1^\circ$, but it is $\pm 0.2^\circ$ when is compensated by using Back Propagation (BP) neural network compensation algorithm. The proposed polarizer could fulfill

收稿日期: 2012-07-20; 修订日期: 2012-08-07.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展规划资助项目 (No. 2011CB302101, No. 2011CB302105); 国家自然科学基金资助项目 (No. 51175056)

the needs of polarization navigation systems.

Key words: nano wire polarizer; polarization navigation; Rigorous Coupled Wave Analysis(RCWA); nanoimprint lithography; BP neural network

1 引言

自然界中有很多生物能够感知偏振光在天空中的强度、方向和分布模式,并能用其来实现导航定位^[1-3]。此种导航方式不受电磁干扰,误差不随时间积累,具有较广泛的应用前景。由于人类不能直接感知光的偏振,所以长久以来天空偏振光一直没有得到有效的应用。2001年,瑞士学者 Rudiger Wehner^[4]首先讨论了可以利用偏振光导航的3种情况:水下、水面和陆地,提出了利用偏振光制作导航传感器的设想。目前已经有很多学者搭建了偏振导航传感器,并取得了一些成果: Lambrinos^[5]将偏振导航传感器用在机器人上,在晴朗天气下具有较好的导航作用。澳大利亚学者 Javaan Chahl^[6]搭建了偏振导航传感器并在飞行器上做了相关测试,有望在无人机上应用。国内学者也做了相关研究,大连理工大学的褚金奎等首先开展了系统的传感器机理研究并完成了样机的搭建^[7-11],讨论了从天空偏振模式中提取方向信息的模型^[7]并搭建了天空偏振光测量系统,测试了大连地区的天空偏振光分布模式^[8-9];根据沙蚁复眼结构搭建了仿生偏振导航传感器^[10-11],将其用在机器人上,实现了 $\pm 0.2^\circ$ 的导航精度。北京大学晏磊等对天空偏振光的分布模式进行了测试^[12],说明了天空偏振光分布模式稳定;海军潜艇学院的王光辉等则讨论了偏振光导航在舰船上的应用^[13]。

以上无论是天空偏振光模式的测量还是偏振光导航传感器的搭建,偏振器都是其中一个最重要的组成部分,尤其当应用于传感器中时,需要对不同方向敏感。由于传统偏振片只能对一个方向的偏振光敏感,因此,可以将其切割成多个偏振片,再通过组装来实现偏振敏感方向不同的目的。这种方法存在装配误差,会直接影响导航精度。

亚波长金属光栅偏振器^[14-16]由一组间距小于入射波长的金属线条组成,它具有体积小、偏振性能好、允许的入射角度宽,易于集成等优点,在光通讯、液晶显示等领域具有广泛的应用前景。

利用微纳米技术可以在同一基底上制作不同朝向的偏振光栅阵列。Gregory P. Nordin^[14]首次采用干涉曝光及干法刻蚀的工艺在硅基底上制作了3种光栅朝向的亚波长金属光栅偏振器。利用这种工艺若想制作 n 种不同朝向的光栅则需要 n 次干涉曝光加 n 次干法刻蚀,工艺较复杂、成本高。Sanshiro Shishido^[15]利用65 nm标准COMS工艺在图像传感器上制作了不同方向的光栅偏振器,偏振器的消光比达到了40,但这种工艺大多采用流片的方式,只有制作大批量样品时才能够实施,在小批量或单片制作时会比较困难。Fantao Meng^[16]等利用纳米压印和金属蒸镀工艺在聚碳酸酯(PC)基底上制作了双层金属结构,在633 nm处的TM(电场方向与光栅垂直的偏振光)透射率大于51%,消光比大于950,此种工艺简单,不需要剥离或干法刻蚀工艺,具有较好的应用前景。

本文在文献^[16]的基础上设计了一种透射峰值在510 nm的具有双层纳米金属光栅结构的偏振器,利用纳米压印工艺在PC基底相应区域上一次性制作了6个不同方向的纳米光栅。然后通过热蒸镀工艺制作完成了设计的偏振器。将它应用于偏振导航传感器后,对传感器进行了测角精度的测试,结果显示经误差补偿后能够实现 $\pm 0.2^\circ$ 的测角精度。

2 双层纳米光栅偏振器的设计

设计的偏振器为双层金属光栅结构,如图1所示。图1中入射介质为空气,折射率为1,光栅金属层为铝,介质光栅及基底材料为PC。由于在亚波长尺度下经典光学理论不再适用,此处利用严格耦合波理论^[17]进行数值计算,将入射光分为TM偏振光(电场方向与光栅垂直)与TE偏振光(电场方向与光栅平行),分别计算透射率及消光比(TM透射率与TE透射率之比)。

首先分析光栅周期对偏振光栅性能的影响。光栅周期是决定光栅偏振器性能的关键因素之一,图2为不同的光栅周期与TM透射率及消光



图 1 双层金属光栅偏振器示意图

Fig. 1 Configuration of the bi-layered wire-grid polarizer

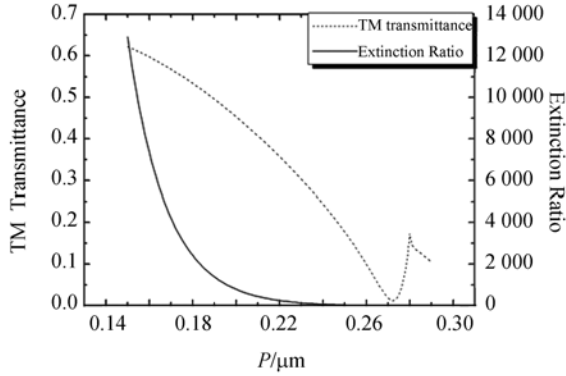


图 2 光栅周期对偏振性能的影响

Fig. 2 Effect of grating period on the properties of polarization

比的关系,其中,入射波长为 450 nm,光栅占空比为 0.425,介质光栅高 275 nm,金属铝厚度为 80 nm。此处可以选取其他的参数,并不影响光栅周期对偏振性能的影响规律。可以看出周期越小,偏振器的性能越佳。在周期为入射波长的一半到 2 倍之间时, TM 透射率会有剧烈的变化,并且存在一个极小值,这种现象在 1902 年被 Wood 在 Philosophical Magazine 中报道,并称为“Wood Anomalies”。由图 2 中可以看出在 272 nm 周期时, TM 透射率最小,这也验证了上面的说法。另外只有零级衍射波的光栅才具有偏振性能,光栅只存在零级衍射而不存在高级衍射的条件是^[18]:

$$P = \frac{\lambda}{n_1 \sin \theta \cos \phi + (n_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta \sin^2 \phi)^{\frac{1}{2}}}, \quad (1)$$

其中 P 为光栅周期, λ 为入射光的波长, θ 为入射角, ϕ 为方位角, n_1 、 n_2 分别为入射介质及基底的折射率。当光线垂直入射且入射介质为空气时,计算的临界周期为 280 nm,应用严格耦合波理论计算的 ± 1 级衍射波也是出现在 280 nm 处。周期设计时应避免其在 TM 透射率最小及 ± 1 级衍射波出现的周期附近,考虑到偏振器的性能及加工的困难程度,此处选择周期为 200 nm。

根据近年来国内外学者对一维光栅透射增强

理论的研究^[19-21],在设定入射光波长的情况下,光栅 TM 透射率峰值的高度与 F-P 腔的共振条件接近。根据 F-P 理论,随着金属厚度增加,光栅的透射率峰值也会发生红移,如图 3 所示,其它参数设定介质光栅线宽为 85 nm,介质光栅高 275 nm,光栅周期为 200 nm。同样的,这些参数的选取并不是唯一的,选用其它参数并不影响金属厚度对 TM 透射率的影响规律。从图 3 中可以看出随着金属厚度的增加,透射峰值发生了红移,与 F-P 理论相符。从图 3 中还可以看出,在金属厚度为 80 nm 时,透射峰值最大,此处设定金属厚度为 80 nm。

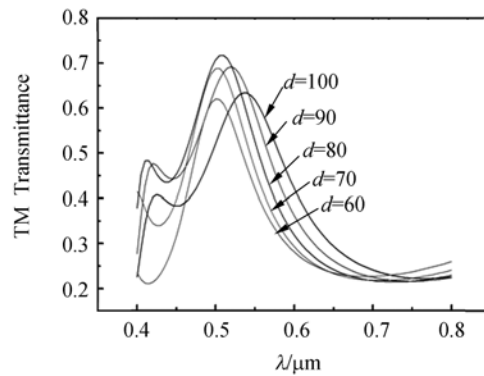


图 3 金属厚度对光栅透射率的影响

Fig. 3 Effect of grating thickness on TM transmittance

应用严格耦合波理论计算了光栅周期为 200 nm,介质光栅线宽为 85 nm,介质光栅高 275 nm,金属高 80 nm 时的 TM 透射率及消光比,由于透过光栅偏振器的光主要是 TM 偏振光,用到的也只是透射光,并且消光比中也含有 TE 偏振光的

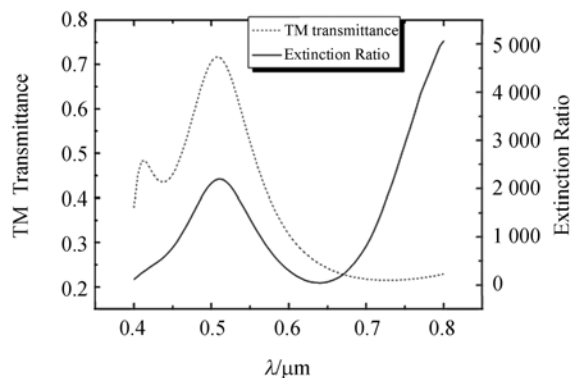


图 4 最终设计的偏振器的性能

Fig. 4 Performance of proposed polarizer

信息,所以文中不单独分析 TE 偏振光。如图 4 所示,设计的偏振器在 510 nm 左右有 71% 的透射率,消光比大于 2 100。

3 双层纳米光栅偏振器的加工

利用纳米压印及热蒸镀工艺制作了设计的偏振器,加工工艺如图 5 所示。纳米压印所用的模板为硅模板,图形为纳米光栅结构,周期为 200 nm,线宽为 115 nm,深度为 275 nm。模板上有 6 个图形,沿圆周均匀分布,每个图形面积为 2 mm × 2 mm。圆心对称的 2 个为一对,每对的光栅方向相互垂直。共有 3 对,相邻的光栅对的光栅方向相差 60°。光栅的位置和相对角度是由电子束曝光机定义的,由于电子束曝光机的精度在几纳米,所以模板上光栅位置是准确的。在 Obducat 公司的 Etire 6 压印机中压印,压印的参数为 180 °C, 5 × 10⁶ Pa, 3 min, 在 125 °C 时手动脱模。纳米压印工艺是将模板上的图形复制到基底上,所以脱模后不会改变光栅的相对位置,不会影响压印模板所设计的多方向光栅角度分布的精确性。在脱模时由于模板与 PC 的摩擦力,PC 光栅在脱

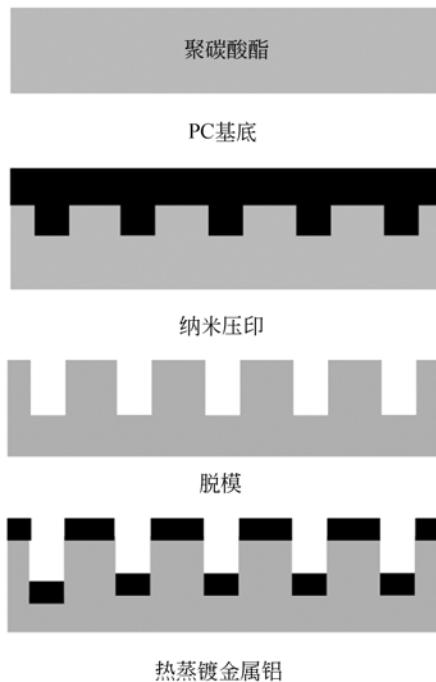


图 5 双层金属光栅偏振器制作工艺

Fig. 5 Fabrication process of bi-layered metal wire-grid polarizer

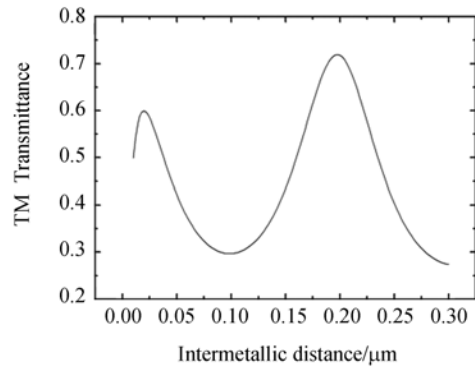


图 6 入射波长为 510 nm 时金属间距离对 TM 透射率的影响

Fig. 6 TM transmittance as a function of metal layer distance at the incident light of 510 nm

模时被拉伸,经过测量,在 115、120、125、130 °C 脱模时 PC 光栅被分别拉长至 400、375、300、350 nm,此处选择在 125 °C 下脱模来尽量接近设计的光栅尺寸。图 6 分析了金属间距离对 TM 透射率的影响,可以看出金属间距离为 195 nm 即设计的介质层光栅在 275 nm 高度时的透射率是最高的。压印后的样品在蒸镀机中采用热蒸镀工艺在 PC 光栅上部及光栅之间沉积了

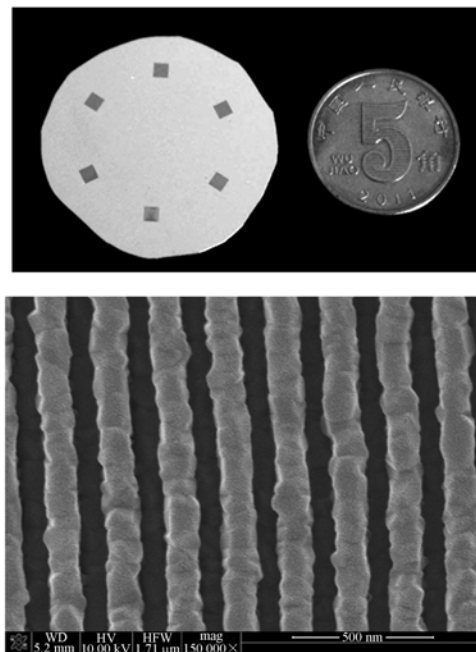


图 7 加工的多方向金属光栅偏振器的实物图及 SEM 图

Fig. 7 Optical and SEM photos of fabricated multi-oriented wire-grid polarizer

80 nm 铝,图 7 为加工的偏振片的实物图。加工出的介质光栅高度为 300 nm,即金属间的距离为 $300 \text{ nm} - 80 \text{ nm} = 220 \text{ nm}$,与设计的 195 nm 相比稍有差别。从图 6 可以看出, TM 透射率下降 15%,这对偏振性能影响不大。至此所设计的偏振器加工完毕,加工工艺简单,经济,既可以小批量实验研究,又可以进行大批量生产。

4 测角精度测试

将加工的偏振器安装在偏振导航传感器中进行测试,传感器由偏振器、光电二极管、对数放大器及后续电路处理 4 部分组成。测试装置由积分球,导航传感器及精密转台组成。由积分球(合肥星月夜光技术应用研究所研制,内径为 $\Phi 500 \text{ mm}$)产生均匀的光,在积分球的出口处贴一偏振片来产生单一线偏振光,传感器放在精密转台上连续旋转 2 圈。偏振光通过制作的双层光栅偏振器后由光电二极管(S1087)转化为电信号,偏振器上的 6 块区域中,相对的 2 个为一组,共有 3 组,每组的信号经对数放大器进行对数放大,然后经过后续的电路处理后在计算机中进行数据记录和处理。测试系统如图 8 所示。

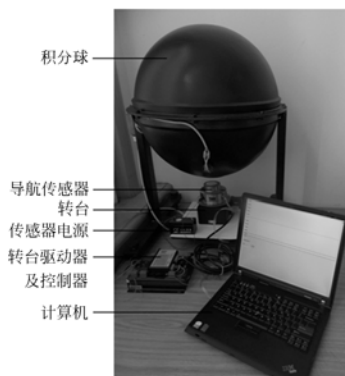


图 8 测试系统图

Fig. 8 Setup of testing instruments

偏振光通过传感器后转化为以下电压信号^[10]:

$$V_1 = 0.5 \log \left[\frac{1 + d \cos(2\theta)}{1 - d \cos(2\theta)} \right], \quad (2)$$

$$V_2 = 0.5 \log \left[\frac{1 + d \cos \left(2\theta - \frac{2\pi}{3} \right)}{1 - d \cos \left(2\theta - \frac{2\pi}{3} \right)} \right], \quad (3)$$

$$V_3 = 0.5 \log \left[\frac{1 + d \cos \left(2\theta - \frac{4\pi}{3} \right)}{1 - d \cos \left(2\theta - \frac{4\pi}{3} \right)} \right], \quad (4)$$

式中 d 表示天空偏振光的偏振程度; θ 表示天空偏振光的偏振方位角(传感器输出的航向角),是传感器的参考方向与太阳子午线之间的夹角。把它们两两联立约掉偏振度 d ,用电压值表示偏振方位角。为了写出偏振方位角 θ 的表达式,需要进一步变换,利用变换公式 $p_i(\theta) = \frac{1}{10^{V_i} + 1}$ ($i = 1, 2, 3$),可以将 \log 函数消掉,得到用 P_1, P_2, P_3 表示的偏振方位角 θ 的公式:

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{P_1(\theta) + 2P_2(\theta) - \frac{3}{2}}{\sqrt{3} [P_1(\theta) - \frac{1}{2}]} \right\}, \quad (5)$$

图 9 为测得的电压与转动角度的关系,可以看出 3 个通道得到的电压值峰值相隔 60° ,与理论相符。但峰-峰值并不是一样的,这是因为在纳米压印工艺中,脱模造成局部区域光栅有缺陷,或者在压印过程中模板和基底中存在气泡造成局部区域的缺陷,从而使偏振片的 6 个单元做的不均匀,所以 6 个偏振单元的偏振性能也不一样,经光电转换后的电压也就不一样。另外 3 条曲线的中心不在电压为零的位置上,这也是因为 6 个单元的偏振性能不一样造成的。将数据经过归一化处理换算成角度值并进行误差计算,得到的原始误差在 $\pm 1^\circ$ 以内。

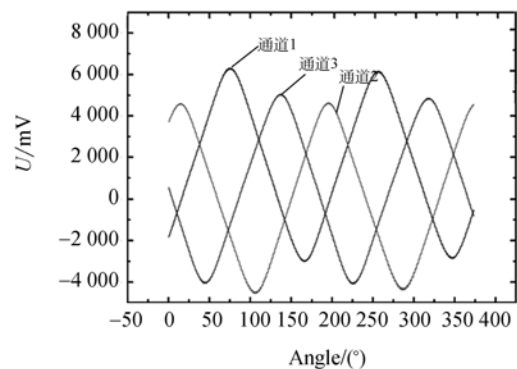


图 9 电压与传感器转动角度的关系

Fig. 9 Measured voltage as a function of rotation angle

使用 BP 神经网络法^[22]进行误差补偿。BP 神经网络的基本原理是梯度最速下降法,其中心

思想是调整权值使网络总误差最小。BP 神经网络通常包括输入层、隐含层和输出层。训练样本首先从输入层经过隐含层各节点传输至输出层节点,然后按照误差减少的原则,逆向传输逐层修正层间的权值,直到达到所要求的训练目标。使用神经网络解决偏振导航传感器的误差补偿问题时,首先需要建立误差补偿模型。选择隐含层激励输入函数为 S 型(Sigmoid)函数,输出层激励函数为线性函数的 3 层神经网络模型。采用 MATLAB 实现了 BP 神经网络的训练和测试。经过长时间反复训练与测试,确定了最佳训练样本数为 19,隐含层神经元个数为 5。对于最小梯度的确定,由于每个训练周期都会计算该时刻的梯度,而且直至梯度值小于要求的最小梯度时网络才会停止,所以应当设置合理的值来达到要求的训练精度。经过反复的测试,确定的最小梯度值为 10^{-12} 。补偿后计算出此传感器的测角误差,如图 10 所示。可以看到经 BP 神经网络法进行补偿后得到的误差在 $\pm 0.2^\circ$ 以内。可以较好的满足偏振光导航的要求。

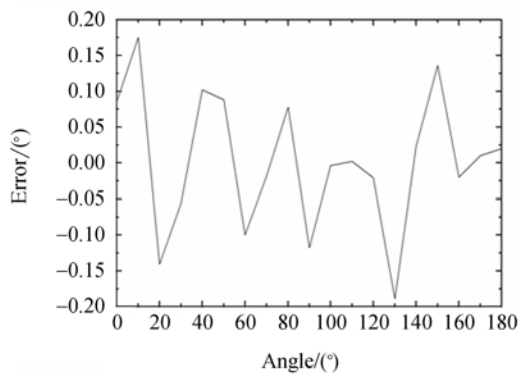


图 10 误差补偿后测角误差与旋转角度的关系

Fig. 10 Angular error as the function of rotation angle after error compensation

参考文献:

- [1] HOMBERG U, HEINZE S, PFEIFFER K, *et al.*. Central neural coding of sky polarization in insects [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 366(1565): 680-687.
- [2] KRAFT P, EVANGELISTA C, DACKER M, *et al.*. Honeybee navigation: following routes using polarized-light cues [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 366

由于偏振光栅由纳米压印工艺一次成型于聚碳酸酯基底上,而各个光栅方向在制作压印模板时已经确定好,而且精度可靠,所以即使在安装时相对于光电探测器偏移了一定的角度,对于偏振器来说也是整体偏移,即相当于公式中的 θ 加上了一个偏移量变成 $\theta + \theta'$,也就是相当于参考轴与原来的改变了 θ' 。这在后续的误差补偿中是很容易被消除的,例如在计算出偏振方位角后,整体减去 θ' ,即可消除偏移误差,在此基础上再计算原始误差、进行 BP 神经网络补偿。与之前用分离的 6 个偏振片相比没有方向上的安装误差。

5 结 论

本文利用严格耦合波理论设计了一种双层金属光栅偏振器,详细分析了光栅周期,金属厚度,金属间距离等因素对偏振器性能的影响。设计的偏振器在 510 nm 波长处有高于 71% 的 TM 透射率和大于 2 100 的消光比。利用纳米压印工艺在 PC 基底相应区域上一次性制作了 6 个不同方向的纳米光栅,然后通过热蒸镀金属铝工艺制作完成了设计的偏振器。由于目前缺乏合适的测试装置,偏振器本身的性能(TM 透射率、消光比等)还不能测试,后续将搭建相应装置来完成偏振器偏振性能的测试。将制作的偏振器用于导航传感器上进行了测角精度测试,经 BP 神经网络法误差补偿后测角精度达到了 $\pm 0.2^\circ$,较好地满足了导航传感器的要求。此偏振器制作工艺简单、经济,既适合小批量科研研究,又适合大批量的生产,在航天航空、偏振导航、偏振成像等领域有广阔的应用前景。

(1565):703-708.

- [3] TRÄGER U, HOMBERG U. Polarization-sensitive descending neurons in the locust: connecting the brain to thoracic ganglia [J]. *The Journal of Neuro Science*, 2011, 31(6):2238-2247.
- [4] WEHNER R. Polarization vision—a uniform sensory capacity [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2001, 204(14):2589-2596.
- [5] LAMBRINOS D, MÖLLER R, LABHART T, *et al.*. A mobile robot employing insect strategies for navigation [J]. *Robotics and Autonomous Systems*,

- 2000, 30(1-2):39-64.
- [6] CHAHL J, MIZUTANI A. Biomimetic attitude and orientation sensors [J]. *Sensors Journal, IEEE* 2012, 12(2):289-297.
- [7] 褚金奎, 赵开春. 仿昆虫复眼偏振敏感测角光电模型研究 [J]. *微纳电子技术*, 2006, 42(12):541-545.
CHU J K, ZHAO K CH. Study of angle measurement optoelectronic model on emulating polarization-sensitive compound eye of insect [J]. *Nano-electronic Device and Technology*, 2006, 42(12):541-545. (in Chinese)
- [8] 崔岩, 曹楠楠, 褚金奎, 等. 天空偏振光测量系统的设计 [J]. *光学精密工程*, 2009, 17(6):1431-1435.
CUI Y, CAO N N, CHU J K, *et al.*. Design of skylight polarization measurement system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(6):1431-1435. (in Chinese)
- [9] 褚金奎, 王威, 崔岩, 等. 气溶胶对天空偏振辐射影响的测量 [J]. *光学精密工程*, 2012, 20(3):520-526.
CHU J K, WANG W, CUI Y, *et al.*. Measurement for influence of aerosols on polarized sky radiance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(3):520-526. (in Chinese)
- [10] CHU J, ZHAO K, ZHANG Q, *et al.*. Construction and performance test of a novel polarization sensor for navigation [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 148(1):75-82.
- [11] 褚金奎, 陈文静, 王洪青, 等. 基于偏振光传感器的移动机器人导航实验 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(10):2419-2426.
CHU J K, CHEN W J, WANG H Q, *et al.*. Mobile robot navigation tests with polarization sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(10):2419-2426. (in Chinese)
- [12] 晏磊, 关桂霞, 陈家斌, 等. 基于天空偏振光分布模式的仿生导航定向机理初探 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, 45(4):616-620.
YAN L, GUAN G X, CHEN J B, *et al.*. The bionic orientation mechanism in the skylight polarization pattern [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, 45(4):616-620. (in Chinese)
- [13] 王光辉, 郭正东, 朱海, 等. 偏振光天文导航定位能力分析 [J]. *光子学报*, 2012, 41(1):11-14.
WANG G H, GUO ZH D, ZHU H, *et al.*. Capability analysis of polarized light celestial positioning [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(1):11-14. (in Chinese)
- [14] NORDIN G P, MEIER J T, DEGUZMAN P C, *et al.*. Micropolarizer array for infrared imaging polarimetry [J]. *JOSA A*, 1999, 16(5):1168-1174.
- [15] SHISHIDO S, NODA T, SASAGAWA K, *et al.*. Polarization analyzing image sensor with on-chip metal wire grid polarizer in 65-nm standard complementary metal oxide semiconductor process [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50(4):04DL01-1-04DL01-4.
- [16] MENG F T, GANG L, MAXIMOV I, *et al.*. Fabrication and characterization of bilayer metal wire-grid polarizer using nanoimprint lithography on flexible plastic substrate [J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(10):3108-3112.
- [17] MOHARAM M, GRANN E B, POMMET D A, *et al.*. Formulation for stable and efficient implementation of the rigorous coupled-wave analysis of binary gratings [J]. *JOSA A*, 1995, 12(5):1068-1076.
- [18] BOKOR N, SHECHTER R, DAVIDSON N, *et al.*. Achromatic phase retarder by slanted illumination of a dielectric grating with period comparable with the wavelength [J]. *Applied Optics*, 2001, 40:2076-2080.
- [19] D'AGUANNO G, MATTIUCCI N, BLOEMER M, *et al.*. Transmission resonances in plasmonic metallic gratings [J]. *JOSA B*, 2011, 28(2):253-264.
- [20] STOLAREK M, PASTUSZCZAK A, KOTYNSKI R. Numerical analysis of transmission through a sub-wavelength metallic aperture or grating at visible and Terahertz wavelengths [C]. *13th International conference on Transparent Optical Networks, Stockholm, Sweeden: ICTON*, 2011: 1-4.
- [21] ANISHUR R A, MAJEWSKI P, VASILEV K. Extraordinary optical transmission; coupling of the Wood-Rayleigh anomaly and the Fabry-Perot resonance [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(10):1742-1744.
- [22] RUMELHART D E, MCCLELLAND J L. *Parallel Distributed Processing: Psychological and Biological Models* [M]. USA: The MIT Press, 1986.

作者简介:



褚金奎(1965—),男,河南平顶山人,教授,博士生导师,1986年于杭州电子科技大学获得学士学位,1989年于西安理工大学获得硕士学位,1992年于北京航空航天大学获得博士学位,研究方向为微机械电子系统(MEMS)、微传感器和微执行器、机构学、智能机器人和微机器人。E-mail: chujk@dlut.edu.cn



王志文(1988—),男,山东临沂人,博士研究生,2009年于山东理工大学获学士学位,研究方向为纳米压印技术及纳米金属光栅偏振器设计。E-mail: wangzw226@163.com



张英杰(1988—),女,天津人,硕士研究生,2011年于大连理工大学获得学士学位,主要研究方向为亚波长金属光栅偏振器设计及理论研究。E-mail: yingjie881230@yahoo.com.cn



王寅龙(1988—),男,辽宁抚顺人,硕士研究生,2011年于大连理工大学获得学士学位,主要从事仿生传感器研究。E-mail: yinlongwang000@gmail.com

● 下期预告

长春光机所深紫外光学薄膜技术研究进展

张立超¹,高劲松²

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室,吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所
中科院光学系统先进制造技术重点实验室,吉林 长春 130033)

综述了中科院长春光机所深紫外光学薄膜技术的研究进展。为解决高性能深紫外光学系统对薄膜光学元件的需求,在以下方面开展了系统研究:定制了两台深紫外光学薄膜专用沉积设备,分别用于高性能深紫外光学薄膜的热蒸发与离子束溅射沉积工艺,能够实现 $\Phi 410$ mm 光学元件的镀膜。通过优化薄膜沉积工艺,双面镀膜样品在 193 nm 处典型透过率为 98.5%~99%。对影响光学元件面形精度的因素进行了考察,可实现的膜厚均匀性为 0.1%(rms),能够满足高质量深紫外光学系统的容差要求。采用 X 射线衍射方法对薄膜应力进行了测量,并采用有限元方法分析了应力对元件面形的影响;针对影响薄膜实用性能的因素,提出了针对性的解决方法,采用紫外辐照方法恢复了环境污染引起的透过率下降,并基于晶振监控法实现膜厚的精确控制。基于这些研究的阶段性成果,明确了下一步的研究方向。