

# 亚波长金属光栅偏振器制备技术研究

杨江涛, 王健安, 王 银, 胡 啸

(太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 亚波长周期结构光栅具有传统光栅所不具有的特殊特性, 采用严格耦合波法设计并制作了一种柔性双层金属光栅偏振器, 通过纳米压印技术在方形的 PC (Polycarbonate, 聚碳酸酯) 上制备了周期为 278 nm, 深度为 110 nm, 占空比为 0.5 的亚波长光栅, 通过磁控溅射技术在制作的介质光栅上沉积了 70 nm 的金属铝层, 制作了具有双层金属结构的柔性双层金属光栅偏振器, 并用光谱测试系统进行了简单的性能测试。实验结果表明, 当入射光波长范围在 350~800 nm 时, 制作的柔性双层光栅偏振器偏振特性优良, 且具有非常高的透过率和消光比, 分别高达 48% 和 100000。该制作工艺只由纳米压印和金属蒸镀完成, 省去了复杂的涂胶、剥离及刻蚀, 因此在大批量生产偏振器方面具有明显的优势, 可普遍用于光探测器件、光电开关等半导体光电子器件的制作过程。

**关键词:** 柔性; 光栅偏振器; TM 透射效率; 消光比

中图分类号: TH706 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)01-0008-05

## Fabrication Technology of a Subwavelength Metal Grating Polarizer

YANG Jiangtao, WANG Jianan, WANG Yin, HU Xiao

(School of Electronics Information Engineering, Taiyuan University of Science & Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Sub-wavelength periodic grating has special characteristics that are lacking in traditional grating. In this study, a flexible double-layer metal grating polarizer is designed and fabricated using a strict coupled wave method. Through nanoimprinting technology, sub-wavelength grating with a period of 278 nm, depth of 110 nm, and duty cycle of 0.5 is prepared on a square polycarbonate (PC). A 70 nm metal aluminum layer is deposited on the fabricated dielectric grating by magnetron sputtering, and a double-layer metal structure is fabricated. A flexible double-layer metal grating polarizer is developed, and the performance of the polarizer is tested using a spectrum measurement system. Experimental results showed that when the wavelength range of the incident light was 350-800 nm, the flexible double-layer grating polarizer had good polarization characteristics. The polarized light transmission efficiency and extinction ratio were as high as high as 48% and 100000, respectively. The manufacturing process involves only nanoimprinting and metal evaporation processes and thus excludes coating, stripping, and etching of the imprint adhesive. Therefore, our method exhibits evident advantages in terms of low-cost and batch production of large-area polarizers and thus can be widely used in the manufacturing process of semiconductor optoelectronic devices such as optical-detection and optoelectronic devices.

**Key words:** flexible, wire-grid polarizer, TM transmission efficiency, extinction ratio

## 0 引言

由两条金属线通过溅射的方式形成了一组窄缝, 这组窄缝的距离小于入射光的波长, 这就形成了亚波长金属光栅偏振器, 它的体积属于纳米级别, 但其偏

振性能却非常好且容易集成, 因此它被广泛应用于光通讯及液晶显示屏的制造中。其中双层金属纳米光栅偏振器属于纳米光栅偏振器件中的一种, 由于其偏振效果更好得到人们的青睐。

纳米压印光刻技术在 1995 年首次由美国人提出<sup>[1]</sup>,

收稿日期: 2020-04-09; 修订日期: 2020-12-28.

作者简介: 杨江涛 (1988-), 男, 汉族, 山西运城人, 博士, 讲师, 研究方向: MEMS 惯性器件及光电传感导航方面的研究。E-mail: yangjiangtao6567@tyust.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (61905172); 博士科研启动基金项目 (20192015); 来晋优秀博士奖励基金项目 (20192068)。

是近 20 年才发展起来的新型的微细加工工艺,它是利用高分辨率的模板来复制加工微纳结构的一种新工艺,所以可以说这种技术首先建立在光刻技术上。第一个提出亚波长金属光栅具有检偏的偏振特性的是 Hertz 教授<sup>[2-3]</sup>,随后才相继出现了有关亚波长金属光栅相关理论及其制造方法。2005 年,韩国 LG 电子研究院利用周期 140 nm 的硅基亚波长光栅作为压印模板制作了单层金属偏振光栅。2006 年瑞士保罗谢尔研究所<sup>[4-5]</sup>在石英板上通过极紫外干涉光刻技术制备了周期为 100 nm 的亚波长光栅。随后几年,美国密歇根大学<sup>[6-7]</sup>开发一种可以连续制备周期为 200 nm 的亚波长结构的亚波长光栅,利用电子束在光栅上方沉积一层金属铝,经过测量其消光比为 1000。这种压印技术在当时被认为是未来制备亚波长金属光栅的有效方法<sup>[8]</sup>。但是随着社会的快速发展,越来越多的曲面屏及可折叠屏成为了人们生活的主流<sup>[9-10]</sup>,这就让人不得不往柔性偏振器上思考。但是,目前对柔性纳米光栅偏振器的研究甚少。所以,通过对柔性纳米光栅偏振器在结构和制作工艺方面的研究,以制作出成本低、产出高的偏振器,这对柔性电子器件的工艺推进起到了很大的支撑作用。

基于以上分析,本文在严格耦合波理论<sup>[11]</sup>的基础上以复眼结构中的偏振敏感单元为模仿对象,利用微加工工艺制备了一种可用于仿生的偏振光电传感器的偏振器。该偏振器是以柔性材料 PC (Polycarbonate) 作为基底利用纳米压印和磁控溅射技术制作而成的柔性双层金属光栅偏振器,并对制作的偏振器利用光谱测试系统进行偏振特性测试。

## 1 实验

图 1 为 PC 上制作的偏振器的模型图,将入射光中垂直和平行与于电场方向的光分别称为 TM 偏振光和 TE 偏振光。当 TM 偏振光照射在偏振器上时,由于电子振荡通过栅线方向时会受到阻碍,此时的光栅层就如同介质层可使 TM 光透过。电子会在 TE 光入射时以自由振荡的形式出现,导致 TE 光反射。

### 1.1 模板介绍

模板对于纳米压印相当重要,因此选择上海纳腾公司提供的模板,模板的周期是 278 nm,线宽是 139 nm,高度 100 nm,模板的扫描电子显微镜图如图 2 所示。模板防粘使用了来自 Sigma-Aldrich 公司的 Trichloro (1H, 1H, 2H, 2H-heptadecafluorodecyl) silane<sup>[12-13]</sup>。这种硅烷可以很好地与 Si 或 SiO<sub>2</sub> 表面的 OH 键结合形成含有 C-F 功能基单分子层,这种分子层在衬底表面表现出了很好的抗粘性能。做过表面处

理的 Si 模板接触角从 30°增大为 110°,如图 3 所示,表现出较好的疏水性能,将有利于压印时脱模。

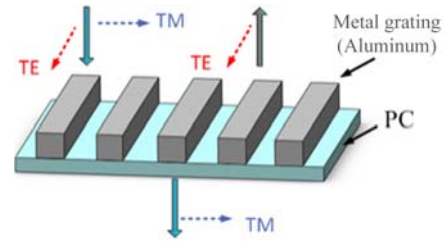


图 1 金属光栅偏振示意图

Fig.1 Schematic of metal grating

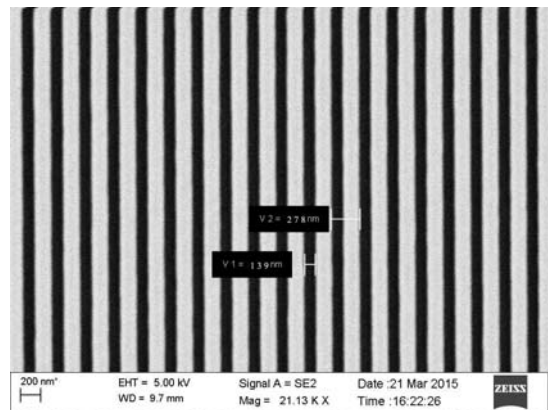


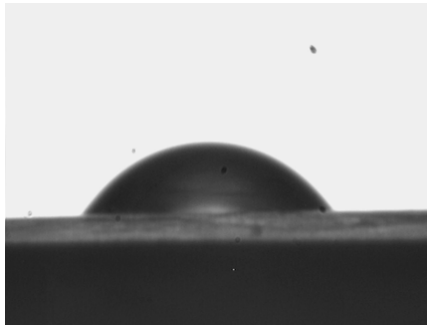
图 2 模板的 SEM 图

Fig.2 Scanning electron microscope (SEM) image of nanoimprint template

### 1.2 双层金属纳米光栅偏振片的制作

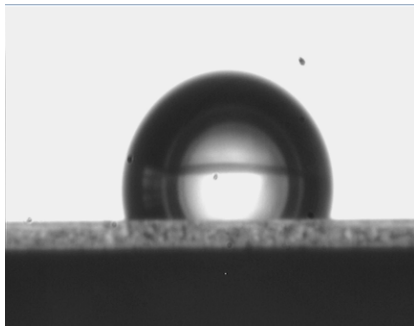
在介质光栅的顶端和底端都沉积一层金属层的光栅称之为双层金属光栅。包含双层金属光栅的偏振器的制作只需在光栅上镀一次铝膜,比单层或包裹型金属光栅不仅降低了制作工艺难度,而且偏振和滤波效果更佳。①选择铝作为偏振器的金属层,是因为铝可以实现可见光波段的最优偏振特性;②0.5 的占空比在同一波段具有最大的透射率和最大的消光比,由于透射率与金属的厚度成正比关系,但是,随着金属高度的增加,偏振器的消光比呈指数倍增大。但是,金属线栅高度的增加又会增大加工难度。因此,综合考虑,溅射金属铝的厚度为 70 nm;③偏振器的消光比会因为金属光栅层之间距离的逐渐增大呈周期性震荡,根据文献[14]中的仿真本文选择金属光栅层的距离是 50 nm;④光栅的周期和 PC 光栅高度是由模板决定的,目前的模板参数是周期 278 nm,高度为 100 nm<sup>[14]</sup>。

使用纳米压印的热压过程在柔性材料 PC (聚碳酸酯) 上压印纳米光栅。纳米压印技术最早由周郁教授提出的,它的优点在于可完成纳米结构的制作<sup>[15-16]</sup>。将模板与含有压印胶的基底紧密结合,等压印结束后小心地将模板和基底分开,这样就会在基底上形成模



(a) 模板防粘前

(a) Si template contact angle before surface treatment



(b) 模板防粘后

(b) Si template contact angle after surface treatment

图3 模板防粘

Fig.3 Anti sticking of Si template

板上的图案。图4所示为压印，脱模，和铝沉积的双层金属线栅偏振器的制造过程的示意图。本文使用的PC基底材料的厚度为0.2 mm。PC具备非常优异的性能，包括高透光率、高折射率、高抗冲性、尺寸稳定性及易加工成型等，因此PC被广泛应用于光学器件的制备中。另外，其热稳定性好，成型温度范围宽，是作为压印基底的一种理想材料。所使用的纳米压印仪（型号为NIL-150）是从中国上海纳腾仪器有限公司引进的最新微纳结构加工设备。

实验前需要将去掉保护膜的PC基底材料裁剪为20 mm×20 mm的正方形备用。但是剪切下来的PC片表面并不是很平整，会使其在压印过程中不能和模板完全接触，这就会影响应力的分布在加压和保压的过程中不能使结构完全地转移到基底上。为了解决这个问题，如图5所示在压印的过程中在PC基底下面又增加了一片1 mm厚的聚二甲基硅氧烷（Polydimethylsiloxane: PDMS）柔性薄膜，因为PDMS具有很好的柔韧性和高温稳定性，在高温施压的过程中可以很好地分散加载在硬质模板上的应力，同时对模板起到一个保护作用。

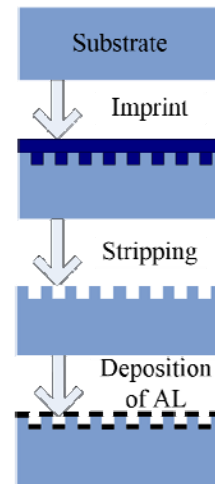


图4 柔性双层金属光栅偏振器的制作工艺流程图

Fig.4 Manufacturing process flow chart of flexible double layer metal grating polarizer

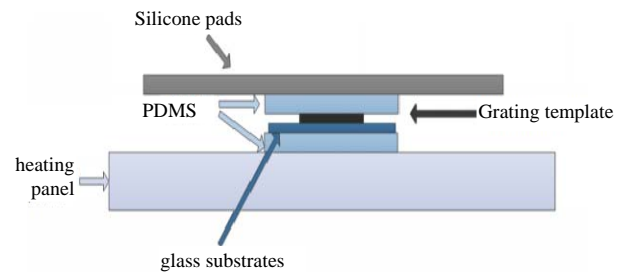
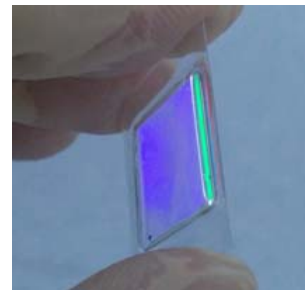


图5 在PC基底压印亚波长光栅

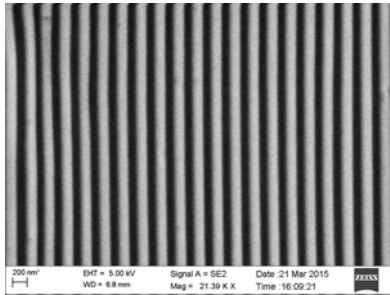
Fig.5 Printing subwavelength grating on PC substrate

压印参数为：真空度为0.07 MPa，压力为0.65 MPa，压印温度为160℃，压印时间设定为5 min。等压印时间一到立马开启冷却水进行腔室的降温，直到操作面板上的温度显示40℃时关闭压力阀往里面充氮气，待室门自动开启后用镊子取出样品然后小心地将两者分开，就可得到光栅结构，实物图和SEM图如图6所示。



(a) 实物图

(a) Physical picture



(b) SEM 图

(b) SEM picture

图6 PC光栅结构的实物图和SEM图

Fig.6 Physical and SEM pictures of PC grating structure

最后,利用真空度为  $7 \times 10^{-6}$  Mbar 的磁控溅射在光栅结构上表面溅射一层厚度为 70 nm 的 Al,加工参数如表 1 所示。

表1 柔性双层金属光栅偏振器的参数

Table 1 Parameters of subwavelength metal grating polarizer

Materials and structures	Materials and parameters
Substrate materials	PC
Metallic materials	Al
Period/nm	278
Duty cycle	0.5
Aluminum thickness/nm	70
Distance between two metal grating layers/nm	50
PC grating height/nm	100

## 2 结果和讨论

偏振器的性能由透过率和消光比决定,因此利用搭建的光谱测试系统对制造的金属光栅偏振器进行了透过率和消光比的测量<sup>[17]</sup>,光谱测试系统如图7所示。

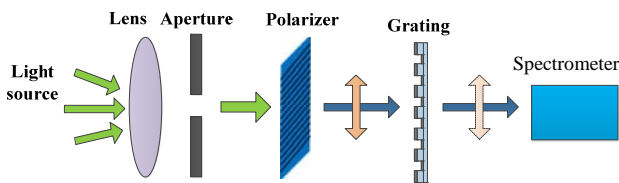


图7 光栅偏振特性测试装置示意图

Fig.7 Schematic of laboratory measurement setup

利用氙气灯发出的白光作为检测光源,经透镜聚光后再经过小孔光阑后作为点光源,非线偏光透过偏振片后形成线偏光。透过的偏振光直接垂直照射在光栅上,光栅后面放置爱万提斯光纤光谱仪,利用光纤探头测试透射光谱。旋转偏振片的相应位置分别得到 TE 和 TM 偏振光的最大与最小透射强度。然后利用公式:

$$ER = T_{TM}/T_{TE}$$

计算得到消光比,式中  $T_{TM}$ 、 $T_{TE}$  分别表示 TM 和 TE 偏振光的透射率。

应用严格耦合波理论对制造的柔性双层金属光栅偏振器进行了 TM 透射率及消光比的计算,由于一般只有 TM 偏振光才能透过偏振器,而且计算消光比也已用到 TE 偏振光的信息,所以文中不单独对 TE 偏振光进行分析。如图8所示为本文制造的柔性双层金属光栅偏振器的性能测试图,从图上可以看出本文制造的偏振器在入射光波长范围为 350~800 nm 时的透过率可达 48%,消光比可达 100000,具有非常好的偏振效果,达到了用于偏振导航的需求。

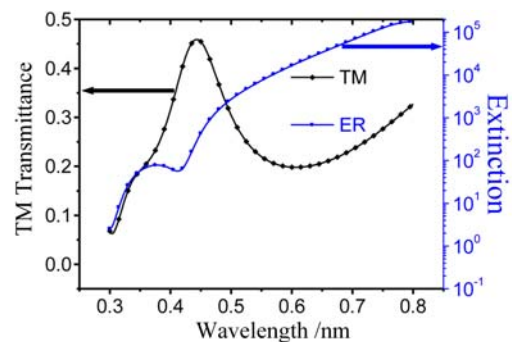


图8 柔性双层金属光栅偏振器的性能测试图

Fig.8 Performance test chart of flexible double layer metal grating polarizer

## 3 结论

利用纳米压印技术和磁控溅射在柔性材料上通过简单的方法制作出了柔性双层金属光栅偏振器,并进行了透过率和消光比的测试。实验结果显示,当入射光的波长在 350~800 nm 之间,加工的偏振器性能优良,透过率和消光比分别高达 48% 和 100000,具有较好的偏振效果,达到了用于偏振导航的要求。制作的柔性双层金属光栅偏振器只涉及纳米压印和磁控溅射两个工艺,并且不包括任何抗蚀剂旋涂、剥离和刻蚀工艺,制作过程是非常简单的,适合大批量生产。本文制造的柔性双层金属光栅偏振器有望应用到光学系统中,特别是在液晶显示器领域。

## 参考文献:

- [1] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint lithography with 25-nanometer resolution[J]. *Science*, 1996, **272**(5258): 85-87.
- [2] Ekinci Y, Solak H H, David C, et al. Bilayer AL wire-grids as broadband and high-performance polarizers[J]. *Optics Express*, 2006, **14**: 2323-2334.
- [3] Kim S H, Lee K D, Kim J Y, et al. Fabrication of photonic crystal

- structures on light emitting diodes by nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2007, **18**: 055306/1-5.
- [4] YANG Z Y, LU Y F. Broadband nanowire-grid polarizers in ultraviolet-visible-near-infrared regions[J]. *Optics Express*, 2007, **15**: 9510-9519.
- [5] GE Z, WU S T. Nanowire grid polarizer for energy efficient and wide-view liquid crystal displays[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(12): 121104-121106.
- [6] Ahn S H, Kim J S, Guo L J. Bilayer metal wire-grid polarizer fabricated by roll-to-roll nanoimprint lithography on flexible plastic substrate[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2007, **25**: 2388-2391.
- [7] DENG S R, LU B R, DONG B Q, et al. Effective polarization control of metallic planar chiral metamaterials with complementary rosette pattern fabricated by nanoimprint lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2010, **87**: 985-988.
- [8] Suyatin D B, Sun J, Fuhrer A, et al. Electrical properties of self-assembled branched InAs nanowire junctions[J]. *Nano Letters*, 2008(8): 1100-1104.
- [9] GAO C H, WANG B, FU C, et al. Polarization-controlled grating polarizer under second Bragg incidenc with silver deposited in groove[J]. *Optics Communications*, 2020: 459.
- [10] 汤厚睿. 氧化锌亚波长光栅偏振分束器的设计与分析[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- TANG H R. Design and analysis of ZnO-based sub-wavelength grating polarization beam splitter[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts And Telecommunications, 2019.
- [11] 张冲, 胡敬佩, 周如意, 等. 深紫外光栅反常偏振器件的设计与分析[J]. *中国激光*, 2020, **47**(3): 0301005.
- ZHANG C, HU J P, ZHOU R Y, et al. Design and analysis of inverse polarization grating devices for deep ultraviolet light[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, **47**(3): 0301005.
- [12] Ahn She Won, Lee Ki Dong, Kim Jin Sung, et al. Fabrication of a 50 nm half-pitch wire grid polarizer using nanoimprint lithography[J]. *Nanotechnology*, 2005, **16**: 1874-1877.
- [13] 康果果, 谭桥峰, 陈伟力, 等. 亚波长金属线删偏振器的设计、制备及偏振成像实验研究[J]. *物理学报*, 2011, **60**(1): 014218/1-7.
- KANG G G, TAN Q F, CHEN W L, et al. Design and fabrication of sub-wavelength metal wire-grid and its application to experimental study of polarimetric imaging[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, **60**(1): 014218/1-7.
- [14] 康宁, 唐军, 李大林, 等. 亚波长金属偏振光栅设计与分析[J]. *传感器与微系统*, 2015, **34**(2): 79-84.
- KANG N, TANG J, LI D L, et al. Design and analysis of sub-wavelength metal polarization grating[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2015, **34**(2): 79-84.
- [15] WU Chienli, SUNG Chengkuo, YAO Pohung, et al. Sub-15 nm linewidth gratings using roll-to-roll nanoimprinting and plasma trimming to fabricate flexible wire-grid polarizers with low colour shift[J]. *Nanotechnology*, 2013, **24**(26): 265301/ 1-7.
- [16] Yamada Itsunari, Yamashita Naoto, Tani Kunihiko, et al. Fabrication of a mid-IR wire-grid polarizer by direct imprinting on chalcogenide glass[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(19): 3882-3884.
- [17] 常闪闪, 麻云凤, 廖利芬, 等. 基于空气隙棱镜实现布鲁斯特角型偏振器消光比测量[J]. *红外技术*, 2019, **41**(9): 882-886.
- CHANG S S, MA Y F, LIAO L F, et al. Measurement of extinction ratio of brewster angle polarizer based on air gap prism[J]. *Infrared Technology*, 2019, **41**(9): 882-886.