

doi:10.3788/gzxb20154409.0923004

# 大面积低损耗薄膜衬底太赫兹偏振片

毛洪艳<sup>1,2</sup>, 许红梅<sup>1</sup>, 夏良平<sup>2</sup>, 王思江<sup>2</sup>, 饶先花<sup>2</sup>, 李薇<sup>1,2</sup>,  
沈俊<sup>2</sup>, 魏东山<sup>2</sup>, 赵国忠<sup>3</sup>, 崔洪亮<sup>2</sup>, 杜春雷<sup>2</sup>

(1 长春理工大学 电子信息工程学院, 国家纳米操纵与制造国际联合研究中心, 长春, 130022)

(2 中国科学院重庆绿色智能技术研究院 跨尺度制造技术重点实验室, 重庆, 400714)

(3 首都师范大学物理系 太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京, 100048)

**摘要:**以硬质硅片作为承载体,在其表面合成性质可控的聚合物薄膜,利用光刻工艺制作微结构,将薄膜与硅片剥离,获得在柔性衬底上大面积均匀的太赫兹器件.以聚酰亚胺薄膜为衬底的太赫兹偏振片的测试结果表明:在 0.1 THz 处,器件的偏振消光比可达到 50 dB,在 0.1~2 THz 范围内偏振方向的平均透过率高达 89.78%,偏振度大于 99.84%,在 42.3 mm 直径的区域内,其偏振均匀性好,达到实用化要求.

**关键词:**太赫兹波;偏振片;光刻;聚合物薄膜;光栅;大面积;偏振

中图分类号:0436.3

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)09-0923004-5

## A Large Area and Low Loss Thin-Film Terahertz Polarizer

MAO Hong-yan<sup>1,2</sup>, XU Hong-mei<sup>1</sup>, XIA Liang-ping<sup>2</sup>, WANG Si-jiang<sup>2</sup>, RAO Xian-hua<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>,  
SHEN Jun<sup>2</sup>, WEI Dong-shan<sup>2</sup>, ZHAO Guo-zhong<sup>3</sup>, CUI Hong-liang<sup>2</sup>, DU Chun-lei<sup>2</sup>

(1 International Research Centre for Nano Handling and Manufacturing of china(CNM), College of Electronical and Information Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130022, China)

(2 Key Laboratory of Multi-scale Manufacturing Technology, Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, Chongqing 400714, China)

(3 Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Polymer membrane with quality control on the silicon surface was synthesised, where the hard silicon was used as supportive substrate. The periodically metallic structures were patterned on the polymer film surface by normal photolithography. Finally, polymer film is peeled off from supportive silicon substrate. A large area and high uniformity of micro structures thin-film terahertz device has been obtained. A terahertz polarizer on polyimide film substrate was fabricated using this method. Experimental results show that the polarization extinction ratio is more than 50dB at 0.1THz. The average transmittance reaches 89.78% in the polarization direction at the range of 0.1-2THz. The degree of polarization is over 99.84%. The polarization uniformity of the polarizer is fine around the diameter region of 42.3 mm. So, the flexible terahertz polarizer fabricated here is satisfied with practical demand.

**Key words:** Terahertz waves; Polarizers; Lithography; Polymer films; Gratings; Large area; Polarization

**OCIS Codes:** 230.4000; 240.0310; 260.5430; 300.6495; 220.3740

## 0 引言

太赫兹 (Terahertz, THz) 波通常是指频率在

0.1~10 THz(波长在 0.03~3 mm)波段的电磁波,介于微波与光波之间,具有独特的特性.随着太赫兹技术的迅速发展,太赫兹功能器件的研究被广泛关注,如在

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 31400625, 21407145)和重庆市基础与前沿项目(No. cstc2013jcyjC00001)资助

第一作者:毛洪艳(1988-),女,硕士研究生,主要研究方向为太赫兹器件. Email:maohongyan@cigit.ac.cn

导师(通讯作者):许红梅(1971-),女,副教授,博士,主要研究方向为微纳检测技术. Email:holly\_89301@cust.edu.cn

收稿日期:2015-06-05;录用日期:2015-07-29

<http://www.photon.ac.cn>

太赫兹光谱检测<sup>[1-3]</sup>、成像、通信等系统中广泛应用的偏振片<sup>[4-6]</sup>、滤波器<sup>[7-8]</sup>和调制器<sup>[9]</sup>等。

为了获得高性能的太赫兹器件,要求其基底材料对太赫兹波具有高的能量透过率,且拥有较好的力学支撑性能维持其器件结构的稳定,同时太赫兹波较长的波长要求其具有足够大的有效面积。这对太赫兹器件的基底材料及结构的制备工艺提出了较高的要求。聚合物薄膜材料因其在太赫兹波段具有较低的折射率和较小的吸收系数<sup>[10]</sup>,且膜的厚度越薄,其对太赫兹波反射和吸收损耗越少,透过率越高,因此在太赫兹器件的研究中被逐渐重视。D. Tian 等<sup>[11-12]</sup>直接在 $40\ \mu\text{m}$ 厚的聚乙烯薄膜表面通过电镀后光刻,制备了有效面积为 $78.54\ \text{mm}^2$ 的太赫兹偏振片。X. Wu 等<sup>[13]</sup>通过激光诱导化学镀铜的方法直接在 $40\ \mu\text{m}$ 厚的聚酰亚胺(PI)薄膜表面制备出有效面积为 $100\ \text{mm}^2$ 的太赫兹偏振片。但制备方法受限于聚合物薄膜衬底的柔软性,难以实现高性能大面积柔性衬底太赫兹器件的制备,其制备的太赫兹偏振片尺寸小,实用性不高。

本文选用硅片为载体,在其表面通过旋涂与化学合成制备性质可控的聚合物薄膜并作为衬底,使其与传统光刻工艺相兼容,通过光刻制备大面积金属微结构,将薄膜与硅片剥离形成大面积柔性太赫兹器件。该方法能够有效克服直接在聚合物薄膜表面制备微结构难的缺点,且化学合成的聚合物薄膜其力学支撑性能好,薄膜厚度与面积等性质均可控。本文首先介绍了聚合物薄膜衬底的制备方法,然后利用该方法制备出以PI薄膜为基底的太赫兹偏振片,性能测试结果表明偏振片有效面积超过 $1\ 400\ \text{mm}^2$ (此面积还可进一步提升),且拥有良好的力学支撑性;在 $0.1\sim 2\ \text{THz}$ 频段内偏振方向的平均透过率为 $89.78\%$ ,在 $0.1\ \text{THz}$ 处,偏振消光比达到 $50\ \text{dB}$ ,满足实用化要求。

## 1 聚合物薄膜衬底的制备方法

选用硅片作为载体,在硅片表面旋涂聚合物胶,通过化学合成成膜,以硅片/薄膜整体作为基底,使其具备良好力学支撑性,且与传统光刻工艺完全兼容。

为了体现化学合成法成膜的特点,将其与物理堆积成膜进行对比。图1(a)为物理堆积成膜示意图,其过程为将有机溶剂溶解的聚合物片段通过旋涂到基底上,待溶剂挥发后聚合物片段以物理堆积的方式成膜,由于聚合物片段之间为物理连接,因此其力学性能较差。相对而言,化学合成成膜方式可以根据所需的特异性能,选择相应的聚合物单体,设计各个单体的配比配制成胶体,再将胶体均匀的旋涂于硅片表面,通过控制化学聚合反应条件,使其在硅片表面合成高性能的聚合物薄膜,其过程如图1(b)。化学合成成膜的机理是聚合物单体之间的分子化学键的紧密结合,因此合成

的聚合物薄膜力学性能好,薄膜表面平整,厚度均匀,且薄膜性质可控,与硅片作为一个整体能够很好地与后续的光刻工艺相兼容,因此以其为衬底可制备出大面积微结构均匀的太赫兹器件。

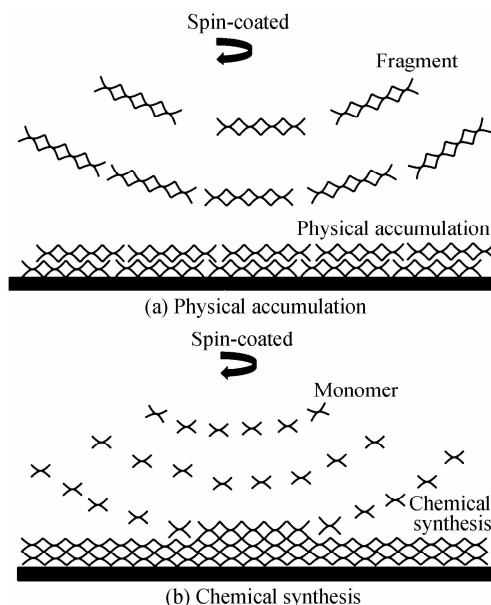


图1 聚合物薄膜成膜过程

Fig. 1 Schematic diagram of film-forming process of polymer film

## 2 大面积薄膜衬底太赫兹偏振器件

### 2.1 太赫兹偏振片的实验制备与结果

选用在太赫兹波段性能较好的聚合物PI薄膜为衬底,在其表面制备太赫兹偏振器件进行实验验证。太赫兹偏振片结构如图2,其中衬底材料为在太赫兹波段低损高透的PI薄膜,厚度 $h=8\ \mu\text{m}$ ,其表面为亚波长金属光栅,金属材料选择低电阻率的铝<sup>[14]</sup>,厚度 $t=$

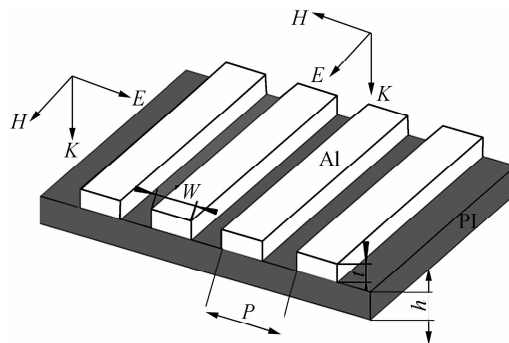


图2 太赫兹偏振片的结构

Fig. 2 Schematic diagram of terahertz polarizer  
200 nm. 由理论计算与分析可知,随着光栅周期的减小,占空比增加,获得的偏振消光比越高,但结构的制备越困难。制备中取亚波长金属光栅结构的周期 $p=10\ \mu\text{m}$ 、线宽 $w=7\ \mu\text{m}$ 。

选择合适的聚酰亚胺单体,通过一定比例配制胶体。选用硅片作为PI薄膜衬底的支撑,对硅片表面进

行处理,通过旋涂法将配制的胶体均匀涂布于硅片表面,再将其置于真空环境中逐步升温至  $300^{\circ}\text{C}$ ,使其聚合并亚胺化,最终形成对太赫兹透过率高、力学性能好、易脱膜的优质 PI 薄膜. 金属光栅结构通过镀膜技术、光刻工艺与湿法腐蚀法完成,太赫兹偏振器件的制备流程为: 1) 制备 PI 薄膜: PI 薄膜的厚度通过胶体粘度和旋涂转速控制,在硅片表面获得  $8\mu\text{m}$  厚的 PI 薄膜; 2) 镀金属铝膜: 采用磁控溅射镀膜法在 PI 薄膜上镀厚度为  $200\text{ nm}$  的铝膜; 3) 光刻: 选用正胶,通过匀胶、曝光和显影等光刻工艺流程,在铝膜表面制备出光栅周期  $10\mu\text{m}$ 、线宽  $7\mu\text{m}$  的光刻胶图案; 4) 湿法腐蚀: 选用酸性溶液为  $\text{H}_2\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O} : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{HNO}_3 = 16 : 2 : 1 : 1$ ,对金属铝膜进行湿法刻蚀,之后采用无水乙醇去掉表面未被曝光的光刻胶,获得所需亚波长铝光栅结构; 5) 剥离: 用镊子夹起薄膜的边缘,将带有铝光栅结构的 PI 薄膜缓慢的从硅片上取下来; 6) 装配: 选用外直径为  $54.8\text{ mm}$  不锈钢圈夹具将薄膜绷紧,完成太赫兹偏振器件的制备.

制备的铝光栅结构的光学显微镜照片如图 3(a),从图中可知,所制备的光栅结构完整、无明显缺陷,其光栅周期为  $10\mu\text{m}$ ,金属铝的线宽为  $7\mu\text{m}$ ,尺寸与期望值相同. 通过白光干涉仪测得铝光栅三维结构形貌如图 3(b),该图显示所制备的光栅线条侧面陡直、形貌规则,且粗糙度低. 制备完成的太赫兹器件如图 3(c),器件外直径为  $54.8\text{ mm}$ ,有效区域直径  $42.3\text{ mm}$ ,有效面积大于  $1400\text{ mm}^2$ .

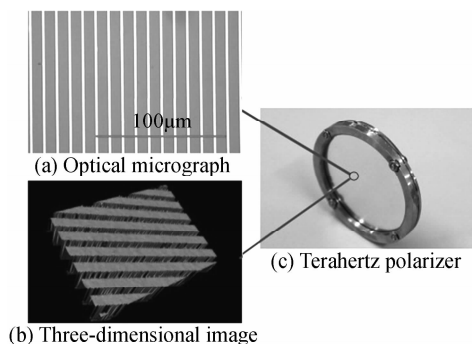


图 3 THz 偏振片制作结果

Fig. 3 Production results of terahertz polarizer

## 2.2 太赫兹偏振片的性能测试与分析

作为对比,分别测试了常规基底材料高阻硅和石英片. 所测试的 PI 薄膜是采用本文工艺参数所合成,厚度为  $8\mu\text{m}$ ,基底材料高阻硅和石英片均选择常规厚度,分别为  $0.5\text{ mm}$  和  $1\text{ mm}$ . 采用太赫兹时域光谱系统 (THz-TDS, API, T-Ray 5000) 透射模式,在湿度  $< 5\%$ ,室温条件下,测得三种材料在太赫兹波段的透过率如图 4(a),其中实线、长虚线和短虚线分别表示 PI 薄膜、高阻硅和石英片对太赫兹波的透过率. 在  $0.2\sim$

$2\text{ THz}$  内,PI 薄膜、高阻硅和石英片平均透过率分别为  $96.36\%$ ,  $52.14\%$  和  $62.99\%$ . 在此频段内 PI 薄膜对太赫兹波透过率明显高于其它两者. PI 薄膜、高阻硅和石英的折射率图谱,见图 4(b),在  $0.2\sim 2\text{ THz}$  内,PI 薄膜、高阻硅和石英片的折射率值分别为  $1.77$ 、 $3.414$  和  $2.037$ . PI 薄膜折射率明显低于高阻硅和石英,因此对太赫兹波反射较小,但具有较高的透过率,是优异的低损耗太赫兹器件衬底材料.

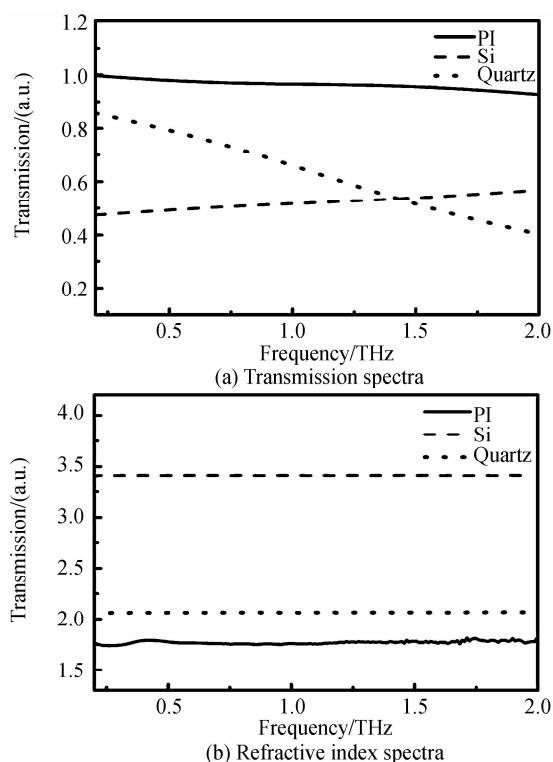


图 4 PI 薄膜、高阻硅和石英的太赫兹特性图谱

Fig. 4 Terahertz Spectroscopy of PI thin-film, Si and quartz

将测得太赫兹波在空气中传输的透射光谱  $I_{\text{Ref}}$  作为参考值,在太赫兹波聚焦点处放入所制备的 THz 偏振片,通过旋转偏振片的角度,记录透过偏振片的太赫兹波能量最大时的光谱  $I_p$ ,经归一化处理,即得 P 偏振透过率  $T_p = I_p / I_{\text{Ref}}$ . 然后将偏振片旋转  $90^{\circ}$ ,通过相同的方法获得 S 偏振下的透过率为  $T_s$ ,实际偏振消光比  $EX = T_p / T_s$ . 为了进行对比,采用相同的方法对一款 TYDEX 公司的商业太赫兹偏振片进行了相同的测试与处理,其光栅周期约为  $0.83\mu\text{m}$ .

实验测试结果如图 5,图 5(a) 表示 P 偏振情况下透过率光谱,其中实线为实验结果,虚线为理论计算结果. 由图 5 可知,在  $0.1\sim 2\text{ THz}$  范围内,实验测量值和理论值较为接近,且随频率变化趋势基本一致,实验测得 P 偏振平均透过率高达  $89.78\%$ ,略低于理论值,这可能是由理论仿真值均采用理想参数与实验值存在一定的误差所导致的.

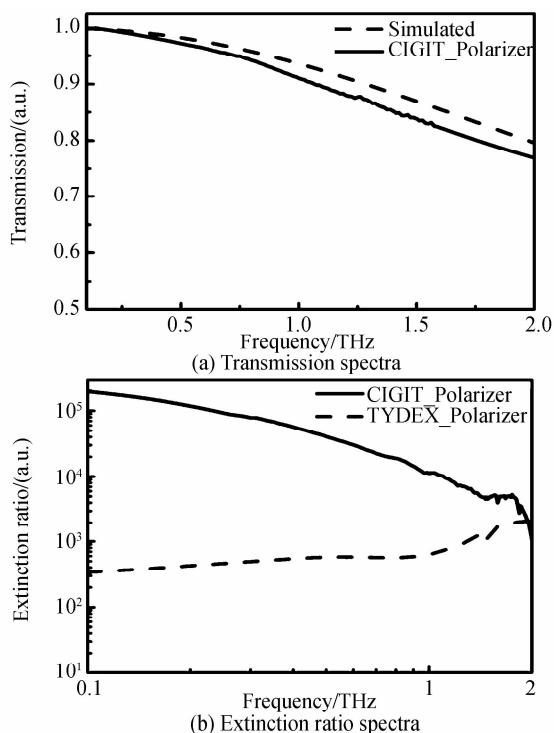


图5 实验测得CIGIT偏振片与理论值和TYDEX偏振片对比结果

Fig. 5 Experimental results of CIGIT polarizer contrast with theoretical values and TYDEX polarizer

通过对实验数据处理后获得的偏振消光比如图5(b),其中实验制备的太赫兹偏振片标记为CIGIT-Polarizer,如图中实线所示.该结果显示在0.1THz处,偏振消光比最大可达到50 dB以上,在0.1~2THz内,这一数值均大于30 dB,优于以往的单层光栅结构偏振片的性能.采用相同测试方法获得的TYDEX公司的商业化偏振片的结果如图中虚线所示,不难发现TYDEX偏振片在0.1~2THz波段内的偏振消光比位于200~1000区间,在这一波段内,实验所制备的CIGIT偏振片的偏振消光比明显优于TYDEX偏振片.因此,本文所制备的CIGIT偏振片,具有低损耗、高偏振消光比的优点.

实验中测得所制备的CIGIT偏振片不同偏振角度的偏振透过率光谱如图6,结果显示偏振片在P偏振时透过率最高,偏振角度在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 间变化,透过率依次降低,S偏振时透过率最低.

为了更直观地表征制备的THz偏振片的偏振效果,实验测得其偏振特性,偏振度 $P$ 定义为<sup>[15-16]</sup>

$$P = (T_{T\perp} - T_{T\parallel}) / (T_{T\perp} + T_{T\parallel}) \quad (1)$$

式中 $T_{T\perp}$ 和 $T_{T\parallel}$ 分别为P偏振和S偏振模式下太赫兹透射系数,如果P偏振与S偏振的太赫兹透射系数相等,则 $P=0$ ,偏振效果最差.如果P偏振太赫兹波全部透过,S偏振无太赫兹波透过,则 $P=1$ ,偏振效果最好.根据式(1)做出的偏振度图谱见图7.在0.1~

2THz范围内,偏振度接近于 $P=1$ ,在1THz处偏振度最高为0.9998,2THz处最低偏振度为0.9984.表明所制备的偏振片的偏振效果良好.

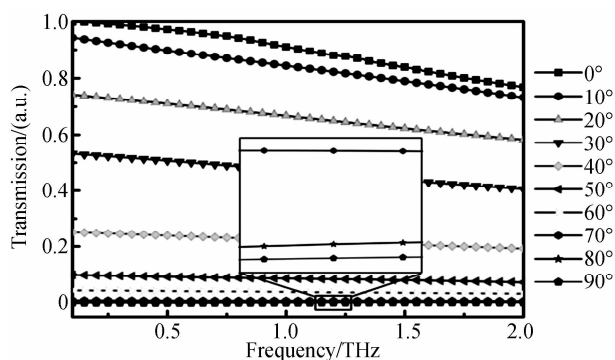


图6 不同偏振角度的偏振透过率光谱

Fig. 6 Transmission spectra of different degree of polarization

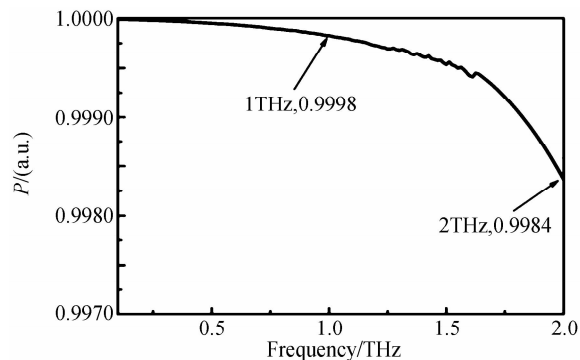


图7 偏振度特性

Fig. 7 Polarization characteristic

除了损耗与偏振消光比,偏振片中的结构缺陷也是决定其性能的一个重要指标.为了检测所制备偏振片在有效区域内各位置的一致性,实验中采用THz-TDS对其进行透射扫描成像,成像分辨率为0.5 mm.在 $f=0.5$  THz处,偏振片在不同角度下的透射成像结果如图8,其中黑色圆环为金属卡具,右侧的颜色条代表透过偏振片的能量值.图8(a)为S偏振成像结果,此时THz波几乎无法穿透亚波长光栅结构,因此成像结果为黑色,且黑度值与亮度值相差约为50 dB能量值,表明消光效果较好.图8(b)为偏振角 $45^\circ$ 时的透射成像结果,这一结果显示在CIGIT偏振片有效区域有一部分能量可穿透,图8(c)为P偏振情况下的成像结果,此时偏振片透过率高,因此有效区域亮度高.各成像结果表明所制备的太赫兹偏振片在有效区域内大面积的结构均一性很好,几乎无缺陷.这是由于先在硅片表面合成高质量的聚合物薄膜衬底,以硅与薄膜作为整体,能够达到与光刻工艺完全兼容,可制备出大面积均匀性好且无缺陷的微结构,因此该测试结果成功验证了本文所提出的方法能够制备出大面积高性能的薄膜衬底太赫兹器件.

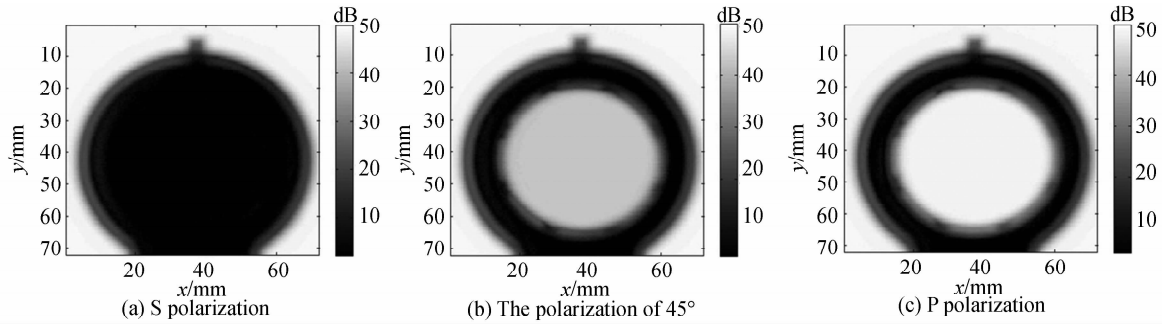


图8 偏振片不同偏振方向的透射成像

Fig. 8 Polarizer transmission imaging of different polarization direction

### 3 结论

以硅片作为承载体,在其表面采用化学合成法制备性质可控的聚合物薄膜作为衬底,达到与光刻工艺完全兼容,实现在薄膜表面制备大面积均匀性好的太赫兹器件.该方法有效克服了直接在柔性的薄膜表面加工大面积微结构的难点.通过制备出 $8\mu\text{m}$ 厚的PI薄膜作为基底材料,结合光刻工艺,完成有效面积 $1400\text{mm}^2$ 薄膜衬底太赫兹偏振器件的实验制备(有效面积可进一步提升).测试结果表明在偏振方向平均透过率达 $89.78\%$ ,在 $0.1\sim 2\text{THz}$ 范围内的偏振消光比为 $30\sim 50\text{dB}$ ,具有低损耗、高偏振消光比的优点,大面积均匀性好,成功验证了所提出方法的可行性.且所制备的太赫兹偏振片具有大面积与可靠的力学性能等实用价值,有望应用于太赫兹成像、通信等领域.

#### 参考文献

- [1] TU Shan, ZHANG Wen-tao, XIONG Xian-ming, *et al.* Principal component analysis for transgenic cotton seeds based on terahertz time domain spectroscopy system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(4): 430001-0430001.  
涂闪, 张文涛, 熊显名, 等. 基于太赫兹时域光谱系统的转基因棉花种子主成分特性分析[J]. *光子学报*, 2015, **44**(4): 430001-0430001.
- [2] YANG Chen, TIAN Lu, ZHAO Ku, *et al.* Spectroscopic studies on the edible flavoring in terahertz range [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, **41**(5): 627-630.  
杨晨, 田璐, 赵昆. 食用香料的太赫兹时域光谱[J]. *光子学报*, 2012, **41**(5): 627-630.
- [3] WANG He, ZHAO Guo-zhong. Terahertz spectroscopic inspection of several kinds of plastic [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(7): 1185-1188.  
王鹤, 赵国忠. 几种塑料的太赫兹光谱检测[J]. *光子学报*, 2010, **39**(7): 1185-1188.
- [4] DORADLA P, ALAVI K, JOSEPH C S, *et al.* Terahertz polarization imaging for colon cancer detection [C]. SPIE, 2014, **8985**: 89850K.
- [5] HORIGUCHI S, ARAKAWA K, MINAMIKATA Y, *et al.* Error-free 30 - 50 Gbps wireless transmission at 300 GHz[J]. *IEEE*, 2013, **345**(47): 660-662.
- [6] HANGYO M, TANI M, NAGASHIMA T. Terahertz time-domain spectroscopy of solids: a review [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **26**(12): 1661-1690.
- [7] MELO A M, KORNBERG M A, KAUFMANN P, *et al.* Metal mesh resonant filters for terahertz frequencies [J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(32): 6064-6069.
- [8] YUAN Ming-hui, ZHAO Ti. A tunable terahertz bandpass filter with a slit aperture flanked by symmetrically distributed parallel grooves on both sides [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **44**(3): 0323003.  
袁明辉, 赵堤. 一种双面周期开槽型可调太赫兹带通滤波器[J]. *光子学报*, 2014, **44**(3): -0323003.
- [9] CHEN H T, PADILLA W J, CICH M J, *et al.* A metamaterial solid-state terahertz phase modulator [J]. *Nature Photonics*, 2009, **3**(3): 148-151.
- [10] MIDDENDORF J R, CETNAR J S, OWSLEY J, *et al.* High fill-factor substrate-based wire-grid polarizers with high extinction ratios [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2014, **4**(3): 376-382.
- [11] DONG-BIN T, HUAI-WU Z, WEI-EN L, *et al.* Double wire-grid terahertz polarizer on low-loss polymer substrates [J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, **27**(10): 104210.
- [12] TIAN D, DONG X, WEN Q, *et al.* Terahertz transmission characteristics of double wire-grid polarizer on low-loss polyethylene substrate [J]. *Applied Physics B*, 2011, **104**(1): 125-130.
- [13] WU X, LI H, LIANG S, *et al.* Terahertz broadband polarizer using bilayer subwavelength metal wire-grid structure on polyimide film [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, **13**(1): 012303.
- [14] GALE, WILLIAM F. Smithells metals reference book [M]. Terry C, Totemeier. eds. Butterworth-Heinemann, 2003.
- [15] KONDO T, NAGASHIMA T, HANGYO M. Fabrication of wire-grid-type polarizers for THz region using a general-purpose color printer [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2003, **42**(4A): L373-L375.
- [16] LIU Li-ming, ZHAO Guo-zhong, ZHANG Gao-hui, *et al.* Study on polarization characteristics of terahertz one-dimensional metallic wire grids [J]. *Chinese Laser*, 2012, **39**(3): 0311001.  
刘立明, 赵国忠, 张皋辉等. 太赫兹波段一维金属线栅的偏振特性研究[J]. *中国激光*, 2012, **39**(3): 0311001.