

DOI:10.16136/j.joel.2022.12.0181

纳米亲水改性的电活性聚合物基光子晶体制备及光谱分析

李伟¹, 王喆¹, 杨智博¹, 韩融¹, 高丽媛², 许照锦^{1*}

(1. 天津理工大学理学院, 天津 300384; 2. 天津理工大学计算机科学与工程学院, 天津 300384)

摘要: 为了实现可分像素程控的固态响应型光子晶体 (photonic crystals, PCs), 进而提升固态柔性反射式彩色显示器件性能, 本研究通过使用纳米颗粒涂层来改善电活性聚合物 (electroactive polymer, EAP) 丙烯酸酯薄膜 VHB4905 表面的亲水性, 使其具备良好的 PCs 组装条件, 从而实现了在疏水 EAP 基底上制备 PCs。通过对比在不同层数亲水涂层上自组装 PS 二维光子晶体 (two-dimensional photonic crystals, 2D PCs) 的反射光谱, 发现了在丙烯酸酯薄膜上涂覆 2 层纳米亲水涂层时自组装 PCs 的效果最好。通过对比其与传统玻璃基 PS 2D PCs 的反射光谱, 发现改性后的丙烯酸酯基 2D PCs 拥有更高的反射率增强峰值。该结果验证了经过亲水涂层改性后在 EAP 上组装 PCs 的可行性, 也为进一步以 EAP 作为驱动源的响应型 PCs 的制备提供了技术基础。

关键词: 显示器件; 纳米亲水涂层; 丙烯酸酯薄膜; 二维光子晶体 (2D PCs); 光谱分析

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-0086(2022)12-1233-07

Preparation and spectral analysis of photonic crystals on nano hydrophilic modified electroactive polymer substrate

LI Wei¹, WANG Zhe¹, YANG Zhibo¹, HAN Rong¹, GAO Liyuan², XU Zhaojin^{1*}

(1. College of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China; 2. School of Computer Science and Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: The final purpose of this study is realizing a solid-state responsive photonic crystals (PCs), which is constructed from program-controlled pixels, and improving the performance of reflection type flexible solid-state color display device. In this study, PCs growth on electroactive polymer (EAP) acrylate film VHB4905 substrate is achieved by coating nano hydrophilic particle on the substrate, which can create good conditions for PCs assembly. By comparing the reflection spectra of self-assembled PS two-dimensional photonic crystals (2D PCs) with different layer number of hydrophilic coatings, it is concluded that two layers of nano hydrophilic coatings is the best for self-assembling on acrylate film. There has a higher reflectivity enhancement peak in the reflection spectrum of PS 2D PCs on the modified acrylate substrate compared with that of PS 2D PCs on traditional glass substrate. So, the feasibility of assembling PCs on EAP modified by hydrophilic coatings is verified. Furthermore, a technical basis for preparing responsive PCs driven by EAP is provided.

Key words: display device; nano hydrophilic coating; acrylate film; two-dimensional photonic crystals (2D PCs); spectral analysis

* E-mail: xuzhaojin1234@126.com

收稿日期: 2022-03-21 修订日期: 2022-05-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金(11604243, 11504268, 11204213)和天津市自然科学基金青年基金(16JCQNJC01600)资助项目

1 引 言

反射式显示器件^[1]一般是通过器件表面各个像素点对不同波长环境光的反射来进行被动式显示。相比主动式显示器件,如 LCD(liquid crystal display)^[2]、OLED(organic light-emitting diode)等^[3],它的优势在于不需要背景光源或自发光,同时也不局限于单一的三原色组合显示^[4]的显示机理。长期以来,无背光式 LCD 一直作为反射式显示器件的主要方式。随着光子晶体(photonic crystals,PCs)概念的提出^[5,6]以及近些年来响应型 PCs^[7]技术的不断发展,这种广色域、低延迟、可纯色显示的反射式显示器件正在被广泛研究。通过向 PCs 晶格间隙中填充驱动液^[8]或在 PCs 反蛋白石结构中填充响应型水凝胶^[9],可以得到凝胶态响应 PCs。其特点是可控带隙较宽,但存在着响应周期长、寿命短、对环境敏感等问题。而对于固态 PCs,其响应机制通常是通过外界温度、压力等导致的基材形变来改变其光子带隙^[10]。其特点是响应速度较快、寿命较长、更适应普通环境,但存在着可控带隙较窄、响应分辨率较小等问题,使得固态响应型 PCs 存在很大的使用局限性。

为了使固态响应型 PCs 获得更宽的可控带隙和更大响应分辨率,使其作为柔性反射式显示器件的效果更好,基于固态 PCs 的响应机理,电活性聚合物(electroactive polymer, EAP)^[11]以其独有的电致伸缩性能成为了固态响应型 PCs 制备的一种新的基材选择。其中的介电弹性体(dielectric elastomer, DE)^[12]有着电致伸缩响应时间短(ms)、形变寿命长(10^7 次)、形变度大(200%—380%)及线性形变度高、柔韧性好等特点,较为适合制备固态柔性响应型 PCs。目前在实验上,制备 PCs 通常使用纳米微球自组装的方式。其原理是通过 SiO₂ 纳米微球^[13]或聚苯乙烯(polystyrene, PS)纳米微球^[14]过饱和溶液溶剂的挥发,利用微球分子间作用力,在基片上自行结合成紧密有序的面心立方结构。如垂直沉降^[15]、重力沉降^[16]和涂覆沉积等^[17]自组装方式,都是利用液面与基材相交处的表面张力推动微球自行排列,因此自组制备方方法十分依赖基材表面的亲水性。而 DE 材料拥有极高的介电常数,通常都为有机高分子材料构成,表面亲水性较差。因此要在 DE 材料表面进行 PCs 的自组装,需要对 DE 材料表面进行一定程度的亲水改性处理。

本研究以 DE 材料丙烯酸酯 VHB4905 薄膜^[18]为基底,使用纳米颗粒涂层进行表面亲水改性。通过控制纳米涂层的层数来使丙烯酸酯表面

达到不同程度的亲水性,并用气-液界面组装法^[19]分别在玻璃基片、未涂覆亲水涂层的丙烯酸酯基片和涂覆不同层数亲水涂层的丙烯酸酯基片上进行 PS 微球二维光子晶体(two-dimensional photonic crystals, 2D PCs)的自组装。通过对比不同厚度亲水涂层上样片的反射谱,来确定纳米亲水涂层的最佳层数;同时将最佳亲水涂层层数下的 2D PCs 的反射谱与同等制备条件下玻璃基上 2D PCs 的反射谱进行对比,来说明在不同种类基底上 PS 2D PCs 的光学性能差异。

2 基片亲水处理

2.1 玻璃基片

将载玻片放入铬酸溶液中超声清洗 2.5 h,静置 24 h 后,蒸馏水超声清洗 30 min,然后使用去离子水超声清洗 30 min,最后通过氮气流干燥,使其表面具有亲水性。

2.2 丙烯酸酯薄膜基片

为使丙烯酸酯薄膜表面亲水,采用子西莱公司生产的 ZXL-CQS 纳米自洁液作为亲水涂层,其组成成分见表 1。

表 1 ZXL-CQS 纳米自洁液成分及比例

Tab. 1 Composition and proportion of ZXL-CQS nano self-cleaning solution

Component name	Mass fraction/%
SiO ₂ (50 nm±20%)	2.5
TiO ₂ (50 nm±20%)	2.5
Deionized water	40
Absolute ethanol(99.5%)	55

使用前将纳米自洁液超声震荡 30 min,将丙烯酸 VHB4905 薄膜预拉伸 20%固定于样本框中,表面滴入适量纳米自洁液,均匀涂抹,使其形成厚度约 1 mm 的水膜。水平静置 5 min,然后用滤纸在一侧吸去多余溶液,常温干燥。

待涂层完全干燥后,重复上述过程,分别制备出涂覆 1—3 层亲水涂层的丙烯酸酯薄膜基片。

2.3 接触角测定

分别在原始丙烯酸酯薄膜基片和涂覆 1—3 层亲水涂层的丙烯酸酯基片上滴入适量去离子水,得到如下水滴形态,如图 1 所示,并测量其接触角。

经测定,4 种丙烯酸酯基片的接触角情况如表 2 所示。通过分析可知,经过 2 层纳米颗粒涂覆之后的丙烯酸酯基片亲水效果最好。涂覆 1 层和 3 层涂层的基片亲水效果都有所降低。

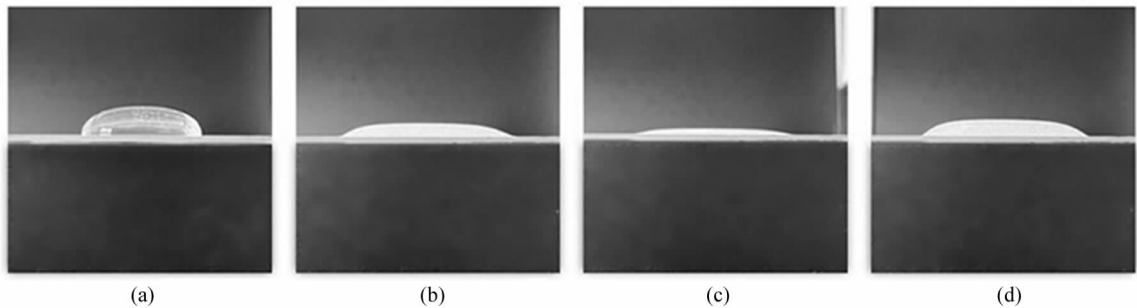


图 1 丙烯酸酯基片亲水处理前后接触角情况:

(a) 丙烯酸酯薄膜基片; (b)(c)(d) 涂覆 1、2、3 层纳米亲水涂层的丙烯酸酯基片

Fig. 1 Contact angle of acrylate substrate before and after hydrophilic treatment: (a) Acrylate film substrate; (b) (c) (d) Acrylate substrate coated with 1, 2 and 3 layers of nano hydrophilic coating

表 2 纳米涂层层数对亲水性的影响

Number of layers	0	1	2	3
Contact angle/(°)	84.12	32.36	12.48	42.96

3 自组装过程

将处理好的玻璃基片和丙烯酸薄膜基片水平放置,分别在表面滴入去离子水,形成 1—2 mm 厚的水膜,如图 2(a)所示。静置 3—5 min,使液膜稳定。

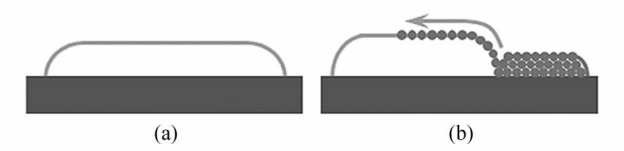


图 2 PS 微球气-液界面组合法示意图:

(a) 去离子水液膜; (b) PS 微球在毛细作用下转移到去离子水液面上

Fig. 2 Schematic diagram of gas-liquid interface assembly method of PS microspheres: (a) Deionized water liquid membrane; (b) PS microspheres are transferred to the liquid level of deionized water under capillary action

取适量 2.5% 质量分数的 300 nm PS 微球水溶液,超声分散 30 min;以 1 : 2 的比例加入无水乙醇,超声分散 30 min,制成 PS 微球醇水溶液。用微量移液器吸取 2 μL PS 微球醇水溶液,缓慢滴于去离子水液膜边缘。此时,由于乙醇与水的蒸发速率不同,醇水溶液会迅速扩张,推动水液膜收缩。当水液膜的张力达到一定程度时,PS 微球在毛细力的作用下逐渐攀爬到水液膜的表面,同时水膜扩张,与醇水溶液混合,如图 2(b)所示。

由于所用的几种基片的亲水性有差异,去离子水与基片间的接触角不同,所以自组装过程中水液膜接触角的收缩程度也存在明显差异,即水膜开始

扩张至与醇水溶液完全混合的时间不同,如表 3 所示。

表 3 4 种丙烯酸酯基片单次滴液自组装情况

Number of layers	0	1	2	3
Average change of contact angle/(°)	3.24	55.94	73.16	37.58
Average time/s	1.2	12.5	32.4	8.6

重复此滴液操作,直到水液面上布满大面积的 PS 微球,停止滴入。PS 微球会由于分子间作用力而相互吸附,在液面逐渐形成大面积紧密六边形单层结构阵列。常温静置,待去离子水完全挥发,即在基片上留下了单层 PS 微球 PCs,如图 3 所示。

从图 3 自组装的样品来看,玻璃基片自组装样貌较为平整,这是由于玻璃表面虽然经过酸蚀亲水处理,但整体表面依旧保持高度的平整性。在未经亲水处理的丙烯酸酯薄膜上,PS 微球几乎没有自组装效果,只在液膜边缘处存在较厚的 PS 微球堆积痕迹。3 片涂覆不同层数纳米亲水涂层的丙烯酸酯基片则呈现出不同的自组装样貌。其中涂覆 1 层亲水涂层的基片自组装效果较差,PS 微球区域性聚集明显,存在许多断纹;涂覆 2 层亲水涂层的基片上自组装样貌较为均匀规整,并有稳定的漫反射颜色;涂覆 3 层亲水涂层的样片出现 PS 微球过分聚集现象,堆积条纹较多。

从表 3 中的数据可以总结出:由于涂覆 2 层亲水涂层的基片亲水性较好,PS 微球单次液面自组装时间明显更长,PS 微球得以更充分地进行紧密排列。图 4 为涂覆 2 层亲水涂层基片上 PS 微球自组装局部扫描电镜 (scanning electron microscope, SEM) 图。图中显示,PS 微球整体呈六边形排列,排列紧密有序且较为平整。

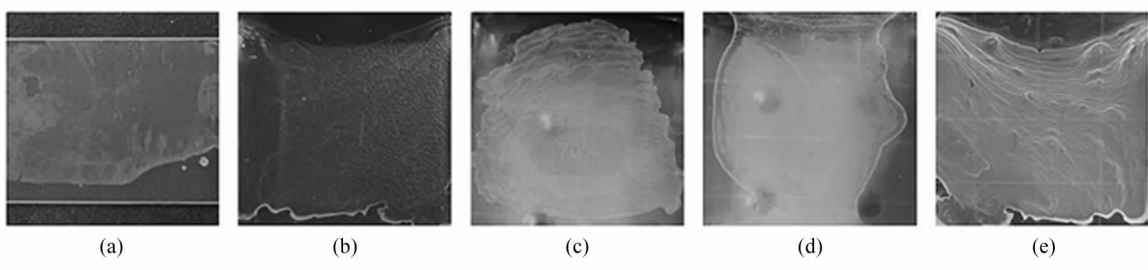


图 3 不同基片上 PS 微球自组装情况:(a) 玻璃基片;(b) 未经亲水处理的丙烯酸酯基片;
(c)(d)(e) 涂覆 1、2、3 层纳米亲水涂层的丙烯酸酯基片

Fig. 3 Self-assembly of PS microspheres on different substrates:(a) Glass substrate;
(b) Acrylate substrate without hydrophilic treatment;
(c)(d)(e) Acrylate substrate coated with 1,2 and 3 layers of nano hydrophilic coating

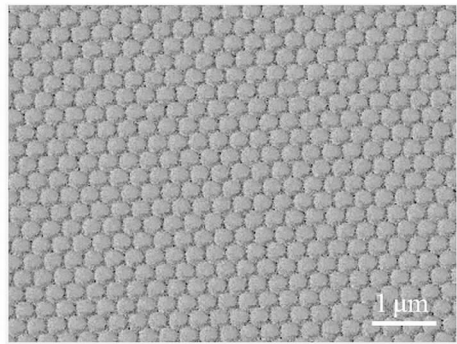


图 4 涂覆 2 层亲水涂层基片上 PS 微球阵列 SEM 图

Fig. 4 SEM of PS microsphere array on 2-layer hydrophilic coating substrate

4 反射光谱的测量

实验中使用 Ocean Optics USB2000+ 系列光纤光谱仪测定反射光谱,其主要规格参数见表 4。测量光源选用面阵式 LED 白光光源,其光谱波长范围为 420—760 nm。

表 4 Ocean Optics USB2000+ 光纤光谱仪主要参数

Tab. 4 Main parameters of Ocean Optics USB2000+ optical fiber spectrometer

Name	Parameter
Detector	Sony ILX511B
Wavelength range	200—850 nm
Integration time	1 ms—65 s
Signal to noise ratio	250 : 1
Optical resolution	1.5 nm FWHM

反射光谱测量光路如图 5 所示:光源经过腔体收束后,用双小孔准直,再用凸透镜汇聚成约 0.5 mm 直径的光斑。使用分光镜将光分成光强相对平均的两束,其中透射光作为样品测量光,反射光作为

参考光。将光纤光谱仪探头以 45° 的角度与测量光的位置相对固定,并在二者连线交点处用旋转台固定样品;用另一光纤光谱仪接收参考光。测量时,旋转样品,直到反射光谱显示整体光强最大,固定此转台角度,以进行更换和移动样品操作。

分别进行玻璃基 2D PCs 样片和 3 种丙烯酸酯基 2D PCs 样片各 10 次不同区域的反射光谱采集。

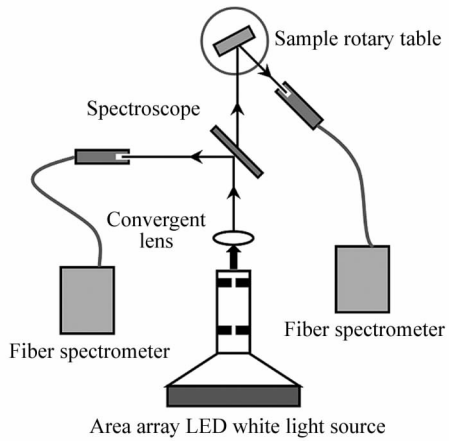


Fig. 5 Reflection spectrum measurement optical path

5 反射光谱分析

5.1 不同层数亲水涂层丙烯酸酯 2D PCs 样片对比

分别将涂覆 1、2、3 层亲水涂层的丙烯酸酯基 2D PCs 样片的各 10 次反射光谱的光强取平均值后,与参考光光谱进行光强归一化,得到图 6 对照谱。

从图 6 对照谱中可以总结出,涂覆 2 层亲水涂层的丙烯酸酯基 2D PCs 样片拥有明显反射率增强波段,其波长区间约为 530—760 nm;而涂覆 1 层和 3 层亲水涂层的样片均未出现反射明显的增强波段,反而在 460—760 nm 的较宽波段内出现不同程度的反射率减弱。其中涂覆 3 层亲水涂层的样片比涂覆

1 层的样片在此波段反射率降低了 15% 左右。

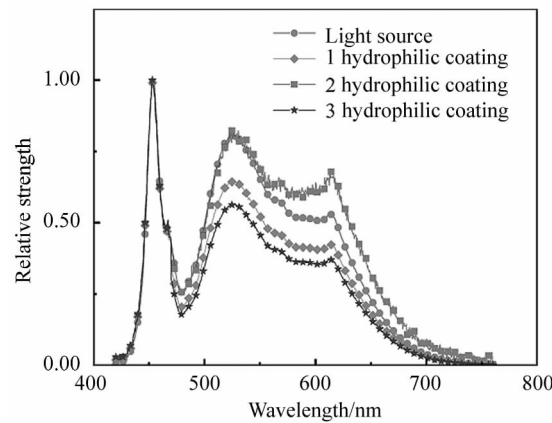


图 6 不同层数亲水涂层 2D PCs 样片光强归一化反射对照谱

Fig. 6 Normalized reflectance spectra of 2D PCs samples with different layers of hydrophilic coatings

反射谱对照结果也符合图 3 中自组装的样片样貌情况:涂覆 2 层亲水涂层的丙烯酸酯样片上 PS 自组装表面较为均一,存在大面积均匀结构;涂覆 1 层和 3 层亲水涂层的样片上均没有稳定的自组装区域出现,并且涂覆 3 层亲水涂层后 PS 微球明显出现无序聚集现象。分析其原因是较厚的纳米颗粒涂层对悬浊液中 PS 微球的分子间作用力场不再规范,从而干扰了自组装过程的稳定性。从反射谱来看,涂覆 1 层和 3 层亲水涂层的样片均没有出现 PCs 带隙效应。此测量结果也验证了基底样貌的无序性对 PS 微球 PCs 带隙结构的影响^[20]。

从亲水涂层的作用机理来看,也符合预期的实验结果。亲水涂层本质是纳米颗粒醇水溶液,其吸附在材料表面的实质近似于沉积自组装。由于丙烯酸酯薄膜表面本身亲水性较差,导致第 1 层亲水涂层涂覆后虽然其表面亲水性有所提高,但纳米颗粒难以达到一致的排列有序性。在涂覆第 2 层亲水涂层后,基片表面的纳米涂层颗粒才表现出较为规整的排列结构,亲水性也得到较大提高,在其上面自组装的 2D PCs 也较为均一完整。而在涂覆第 3 层纳米涂层之后,随着纳米颗粒厚度的不断堆积,整体又呈现出一种无序的颗粒组装效果,反而使表面亲水性大幅降低,以致后续 PS 微球自组装时也产生大范围的无序堆积,无法出现 PCs 带隙。

5.2 玻璃基 2D PCs 与丙烯酸酯基 2D PCs 对比

以同种分析方式将玻璃基 2D PCs 样片反射谱、参考光光谱和效果较好的 2 层亲水涂层 2D PCs 样

片反射谱进行光强归一化,得到图 7 反射光强对照谱。

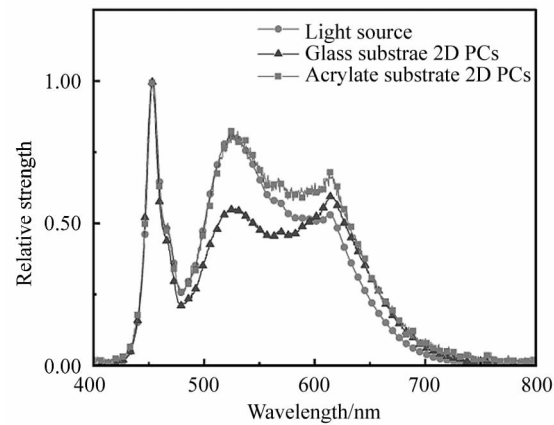


图 7 玻璃基和丙烯酸酯基 PS 2D PCs 光强归一化反射对照谱

Fig. 7 Normalized reflectance spectra of PS two-dimensional photonic crystals on glass and acrylate substrate

将两者的归一化反射谱分别与归一化光源谱作差,得到丙烯酸酯基 2D PCs 和玻璃基 2D PCs 反射率增强曲线,如图 8 所示。

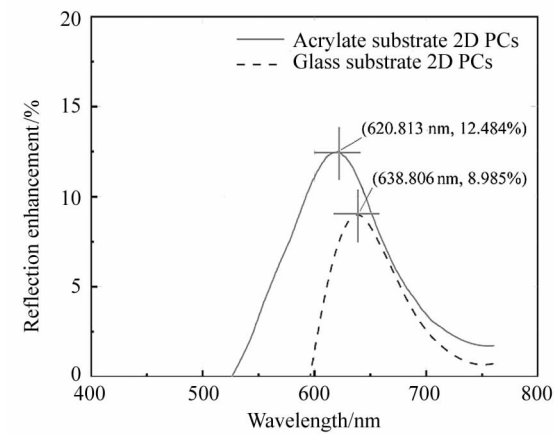


图 8 丙烯酸酯基 2D PCs 和玻璃基 2D PCs 反射率增强曲线

Fig. 8 Reflectivity enhancement curves of 2D PCs on acrylate substrate and glass substrate

从反射对照谱和反射率增强曲线中分析得出,玻璃基 2D PCs 由于基底的高透光性,整体呈现出反射率减弱的趋势,但在邻近 600 nm 波长以后开始出现反射率增强,在近 638 nm 波长处达到反射强度峰值;而对于丙烯酸酯基 2D PCs,在 400 — 530 nm 的波长区间,反射光成分与光源保持高度一致。其原因是由于丙烯酸酯薄膜在表面覆盖了纳米颗粒亲水涂

层之后,表面总体呈现漫反射状态,反射光成分基本保持不变。于是从图 7 对照谱曲线趋势上得出,丙烯酸酯基 2D PCs 对比玻璃基 2D PCs,总体呈现透光度降低,反光度增强。从图 8 反射率增强曲线中可以分析出,从 530 nm 波长开始,一直到 760 nm 波长处,丙烯酸酯基 2D PCs 反射率出现不同程度的加强,在近 620 nm 波长处达到反射率最大,为 12.484%。相比较玻璃基 2D PCs 的反射率,增强峰值 8.985%,反射率增强程度提高了 3.499%。

两种基底的 2D PCs 均出现了稳定的反射率增强峰值,并在其反射峰值波长附近较大波长范围内出现不同程度的反射率加强。分析其原因为自组装制备 2D PCs 易出现不同程度的结构缺陷,导致晶格间距在一定范围内变化,产生一定宽度的反射率增强波段。并且在丙烯酸酯薄膜上增覆亲水涂层后,其表面平整度比玻璃表面更为粗糙,故在其上面进行自组装 2D PCs 更容易产生缺陷,所以导致其晶格间隙浮动更大,反映在图 8 中即是丙烯酸酯基 2D PCs 的反射率增强波段范围更宽。

6 结 论

本文通过以丙烯酸酯薄膜 VHB4905 为基底,在涂覆纳米颗粒亲水涂层后进行了 PS 微球的自组装,得到了丙烯酸酯基 2D PCs。通过对比不同层数亲水涂层上 2D PCs 的反射光谱发现,涂覆 2 层亲水涂层的 2D PCs 效果最好,其反射光谱也符合 PCs 带隙特征。亲水性测试表明:继续增覆亲水涂层会导致纳米颗粒无序性增加,从而降低涂层亲水性,无法满足 PCs 自组装要求。同时,对比相同制备条件下的玻璃基 PS 2D PCs 的反射光谱发现,丙烯酸酯基 PS 2D PCs 整体反射率加强程度更大,并且有稳定的反射率加强峰值点,满足 PCs 带隙特性。但丙烯酸酯基 2D PCs 存在着反射率加强波段较宽,反射率增强不够集中的问题,有待进一步改进。综合来看,本研究验证了使用纳米颗粒涂层的亲水处理后,在 EAP 薄膜材料上进行 PCs 自组装的可行性,也为以 EAP 作为驱动源的响应型 PCs 的进一步研究打下基础。

参考文献:

- [1] JI X D. New technology of reflective liquid crystal display device[J]. Optoelectronic Technology, 2001, 21(4): 259-266.
季旭东. 反射式液晶显示器件的新技术[J]. 光电子技术, 2001, 21(4): 259-266.

- [2] BI Y, WU X J, YUAN H L. Study on optical performances of transparent LCD with dichroic dye-doped liquid crystal [J]. SID Symposium Digest of Technical Papers, 2021, 52: 750-753.
- [3] NAYAGAM V S, ANAMIKA, GOPINATH D, et al. Liquid crystal display (LCD) and organic light emitting diode (OLED) applications on natural fibre reinforced polymer matrix composites[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021: 1934490.
- [4] ZHANG W P, GAO W N, FANG T, et al. Research on the perceived brightness for laser projection television based on RGB diode laser[C]//International Conference on Optoelectronic and Microelectronic Technology and Application, December 4, 2020, Nanjing, China. Washington: SPIE Press, 2020, 11617: 1161725.
- [5] JOHN S. Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(23): 2486-2489.
- [6] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. Physical Review Letters, 1987, 58(20): 2059-2062.
- [7] WU P, WANG C C. Recent advances in stimuli responsive polymer photonic crystals[J]. Chinese Polymer Bulletin, 2019(1): 83-93.
吴攀, 汪长春. 刺激响应性聚合物光子晶体研究进展[J]. 高分子通报, 2019(1): 83-93.
- [8] FU Q Q, ZHU H M, GE J P. Electrically tunable liquid photonic crystals with large dielectric contrast and highly saturated structural colors[J]. Advance Functional Materials, 2018, 28(43): 1804628.
- [9] PUZZO D P, ARSENAULT A C, MANNERS I, et al. Electroactive inverse opal: a single material for all colors[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2009, 121: 961.
- [10] QIAO Y, ZHANG F, MENG Z H, et al. Adjustment and control of structural color of thermochromic photonic crystal material[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(8): 1573-1580.
乔宇, 张峰, 孟子晖等. 温控光子晶体结构色调控[J]. 兵工学报, 2020, 41(8): 1573-1580.
- [11] LACOUR S P, PRAHLAD H, PELRINE R, et al. Mechatronic system of dielectric elastomer actuators addressed by thin film photoconductors on plastic[J]. Sensors and Actuators A, 2004, 111(2-3): 288-292.
- [12] PENG D X, LIU Q. Research progress in electro-active polymer materials[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(2): 22-26.
彭冬雪, 刘茜. 电活性聚合物的研究进展[J]. 现代化工, 2019, 39(2): 22-26.

- [13] ZHOU L, WU Y J, LIU G J, et al. Fabrication of high-quality silica photonic crystals on polyester fabrics by gravitational sedimentation self-assembly[J]. *Coloration Technology*, 2016, 131(6): 413-423.
- [14] LIU G J, ZHOU L, ZHANG G Q, et al. Study on the binding strength of polystyrene photonic crystals on polyester fabrics[J]. *Journal of Materials Science*, 2016, 51(19): 8953-8964.
- [15] KUO C Y, LU S Y, CHEN S F, et al. Stop band shift based chemical sensing with three-dimensional opal and inverse opal structures[J]. *Sensors and Actuators B*, 2007, 124: 452.
- [16] GAO W, RIGOUT M, OWENS H. Self-assembly of silica colloidal crystal thin films with tuneable structural colours over a wide visible spectrum[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 380: 12-15.
- [17] ZHANG H, DUAN R G, LI F, et al. Microscopy evidence of the face-centered cubic arrangement of monodisperse polystyrene nanospheres[J]. *Materials & Design*, 2007, 28: 1045.
- [18] E S J, ZHU L H, ZHU X L, et al. Strain characteristics of electroactive dielectric acrylic elastomer[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2010, 33(3): 5-7.
- 鄂世举, 朱黎辉, 朱喜林, 等. 电场活化丙烯酸弹性体的应变特性[J]. *兵器材料科学与工程*, 2010, 33(3): 5-7.
- [19] YAN W G, LI Z B, TIAN J G. Fabrication and optical properties of asymmetric metal spherical shell structure[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2013, 46(3): 107-111.
- 闫卫国, 李祖斌, 田建国. 非对称金属纳米球壳的制备及光学性质研究[J]. *南开大学学报(自然科学版)*, 2013, 46(3): 107-111.
- [20] WAN Y, CAI Z Y, ZHAO X S, et al. Self-assembly method and fabrication of 3-D photonic crystals[J]. *Scientia Sinica Chimica*. 2010, 40(12): 1794-1806.
- 万勇, 蔡仲宇, 赵修松, 等. 自组装方法与三维光子晶体制作[J]. *中国科学: 化学*, 2010, 40(12): 1794-1806.

作者简介:

许照锦 (1978—), 男, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事光谱学与光学器件应用方面的研究.