

半导体量子棒的光控取向技术进展

张万隆, SRIVASTAVA Abhishek, ROGACH Andrey, 郭海成

引用本文:

张万隆, SRIVASTAVA Abhishek, ROGACH Andrey, 等. 半导体量子棒的光控取向技术进展[J]. 液晶与显示, 2020, 35(5): 409–421.

ZHANG Wan-long, SRIVASTAVA Abhishek, ROGACH Andrey, et al. Progress in photo-induced semiconductor quantum rods alignment[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(5): 409–421.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/YJYXS20203505.0409>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于量子棒纳米纤维大面积定向排列的偏振增亮膜及其在宽色域显示中的应用

Large-scale active luminance film with enhanced polarization made of aligned quantum-rod-containing polymeric nanofibers for highly efficient and wide color gamut LCD displays

液晶与显示. 2018, 33(4): 261–269,270 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183304.0261>

液晶光控取向技术进展

Review on liquid crystal photoalignment technologies

液晶与显示. 2015(5): 737–751 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0737>

反应性液晶修饰的光敏聚芳醚光取向稳定性研究

Photoaligning stability of photocrosslinkable poly(arylene ether)modified by reactive mesogens

液晶与显示. 2015(5): 763–768 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153005.0763>

空间调制光传播方向及偏振态的多层图案化液晶聚合物薄膜研究

Multi-layer patterned liquid crystal polymer thin films for spatially modulating light propagation directions and polarizations

液晶与显示. 2017, 32(2): 84–90 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173202.0084>

光控取向技术应用于液晶非显示领域的若干进展

Some progresses of photoalignment technique applied in liquid crystal nondisplay field

液晶与显示. 2017, 32(6): 411–423 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173206.0411>

文章编号:1007-2780(2020)05-0409-13

半导体量子棒的光控取向技术进展

张万隆^{1*}, SRIVASTAVA Abhishek¹, ROGACH Andrey², 郭海成¹

(1. 香港科技大学 先进显示与光电子技术国家重点实验室, 香港 999077;

2. 香港城市大学 功能光子研究中心, 香港 999077)

摘要:介绍了液晶分子的光控取向技术和半导体量子棒均匀定向的方法。该方法可以将高亮度、核/壳结构的 CdSe/CdS 量子棒与液晶单体相互结合,通过定向排列液晶单体来实现对量子棒的定向排列,并利用紫外光聚合固化,形成包裹量子棒的液晶聚合物薄膜。通过对高偏振荧光量子棒的光学表征,展现出高排列序参数。在应用方面,液晶聚合物中的量子棒可在微米尺度(低至 2 μm)内进行多畴取向,展现出在光子学和保密领域中的应用前景;结合量子棒/液晶聚合物(QR/LCP)薄膜与液晶显示技术,可用于新式光学驱动荧光显示设备;用于现代液晶显示设备中的量子棒亮度增益膜,在增强色彩表现(>100% NTSC)的同时,又能提高显示器的光学效率(>8%)。

关键词:半导体量子棒;光控取向;偏振荧光;液晶;多畴取向

中图分类号: TN141.9; TH691.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20203505.0409

Progress in photo-induced semiconductor quantum rods alignment

ZHANG Wan-long^{1*}, SRIVASTAVA Abhishek¹, ROGACH Andrey², KWOK Hoi-sing¹(1. *State Key Laboratory of Advanced Displays and Optoelectronics Technologies, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong 999077, China;*2. *Centre for Functional Photonics, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China*)

Abstract: The method to unidirectionally align semiconductor quantum rods (QRs) by the photo-induced alignment technique is disclosed, which has originally been developed for the alignment of liquid crystals. It is shown that the strategy facilitates the alignment of highly luminescent CdSe/CdS core/shell QRs in the aligned liquid crystal monomer (LCM), obtaining solid QRs in liquid crystal polymer (LCP) matrix after UV polymerization. Optical and characterization reveals QRs alignment with highly polarized emission, indicating the high order parameter. In application aspects, the microscale (down to 2 μm domain size) pattern alignments of QRs in LCP matrix show potential in photonic and security areas; the combination of QR/LCP composite film with liquid crystal technology present the new photo-emissive displays; the QR enhancement film improves both color performance (>100% NTSC) and optical efficiency (>8%) for modern liquid crystal display applications.

收稿日期:2019-12-10;修订日期:2020-02-23.

* 通信联系人, E-mail: wzhangn@connect.ust.hk

Key words: semiconductor quantum rods; photo-induced alignment; polarized emission; liquid crystal; pattern alignment

1 引言

近年来,半导体纳米晶材料的溶液法制备合成技术得到长足发展,并可大量制备出量子点、量子棒、纳米片等不同形状特性的纳米晶材料^[1-4]。这些纳米晶材料发射峰可调、半峰宽窄并且拥有较高的量子效率,现已广泛应用于生物探测与成像^[5-9]、太阳能光伏器件^[10-12]、液晶显示^[13-15]、发光二极管^[16-19]等诸多领域。与量子点不同,量子棒的各向异性结构特性可以使其沿长轴吸收并发射偏振光^[20-22]。以核壳结构胶体 CdSe/CdS 量子棒为例,其展现出了偏振吸收与激发、高量子效率($>80\%$)、大斯托克斯位移(Stokes Shift)等优异特性。通过实现量子棒在平面内的大规模定向排列,拥有偏振荧光特性的量子棒薄膜可广泛应用于低功耗、宽色域的液晶显示领域^[23-24]。与现有的液晶显示器量子点亮度增益膜相比^[12-13],量子棒亮度增益膜可以在增强色彩表现的同时,提升偏振片的偏振效率,最终提高液晶显示器件的总光能效率,降低显示设备能耗^[23]。

本文总结了几种常见的定向排列量子棒的方法,介绍我们实验室通过光控取向技术(Photo-Induced Alignment Technology)定向排列量子棒的技术进展^[25]。该技术是通过将 CdSe/CdS 量子棒与液晶单体混合,量子棒表面所修饰的配体与液晶分子相互交叉结合,通过定向排列液晶单体来实现量子棒的定向排列。经紫外光聚合后,液晶单体之间发生光交联反应固化成液晶聚合物薄膜,将定向排列的量子棒锁定在该薄膜中。所形成的量子棒/液晶聚合物薄膜在蓝色(450 nm)激发光下,可激发出特定波长的偏振光。其荧光光谱与该量子棒在溶液中荧光光谱相同,仍具有高量子效率、半峰宽窄等特点,可广泛应用于液晶显示领域中^[23-24]。另一方面,结合光控取向材料可重写的特点,可将量子棒在微区中多畴取向,这种灵活排列量子棒的方法也展示出该技术在光子器件和光学防伪等领域中的应用前景^[26]。

2 量子棒的光控取向技术

2.1 CdSe/CdS 量子棒合成

本文所使用的高量子效率 CdSe/CdS 量子棒通过热注入晶种生长法合成^[27-29]。

简单来说,CdSe 晶种可通过长链烷基配体混合物作用下合成,其中配体有三辛基氧化膦(TOPO)、三正辛基膦(TOP)、十六烷基胺(HDA)和十四烷基磷酸(TDPA)。随后,将制备好的 CdSe 晶种在 350 °C 下,与溶解在三辛基氧化膦中的硫混合,并加入到氧化镉与三辛基氧化膦、十八烷基

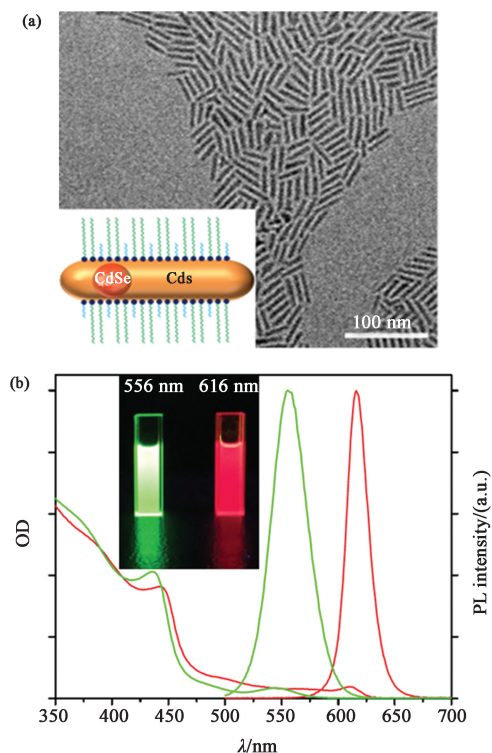


图 1 (a)透射电子显微镜下的 CdSe/CdS 核壳结构胶体量子棒形貌,插图为 CdSe/CdS 量子棒结构示意图;(b)绿色和红色两种 CdSe/CdS 量子棒吸收与荧光光谱。

Fig.1 (a) Transmission electron microscopy (TEM) images of CdSe/CdS quantum rods, the inset is the schematic structure of colloidal core-shell CdSe/CdS quantum rods; (b) Absorption and emission spectra of both green and red quantum rods.

膦酸(ODPA)以及正己基膦酸(HPA)的混合物。图1(a)为透射电子显微镜下所合成的CdSe/CdS核壳结构胶体量子棒形貌,插图量子棒结构示意图,表面包围有十八烷基膦酸(长)和正己基膦酸(短)配体。图1(b)展示两种绿色和红色量子棒的吸收与荧光光谱,具有半峰宽窄(20~30 nm)、量子效率高(高于80%)、大斯托克斯位移以及偏振荧光等特点。

2.2 量子棒的定向排列

由于单一CdSe/CdS量子棒具有偏振的吸收与激发特点,为使所制大尺寸量子棒薄膜维持偏振的荧光,必须要将量子棒大规模定向排列。定向排列的量子棒薄膜荧光的偏振度(P)可根据公式(1)计算:

$$P = \frac{(I_{//} - I_{\perp})}{(I_{//} + I_{\perp})}, \quad (1)$$

其中: $I_{//}$ 和 $I_{\perp}$ 分别为偏振片的偏振方向与量子棒排列方向平行和垂直时的光强,即两者夹角为 0° 和 90° 时的光强。

定向排列CdSe/CdS量子棒的方法主要有如下几种:(1)电场辅助组装排列法(Electrical Field Assisted Assembly)^[28, 30-35],是通过利用量子棒非中心对称晶体结构带来的偶极矩,施加电场或磁场来定向排列量子棒;(2)液体/空气界面自组装排列法(Self-Assembly at Liquid/Air Interface)^[36-40],是将精确控制量子棒浓度的溶液沉积在水与空气界面,并缓慢控制溶剂蒸发过程,可以制备出漂浮在水面上紧密堆积的向列或近晶相量子棒薄膜,以定向排列量子棒;(3)机械摩擦取向法(Mechanical Rubbing)^[41-42],是利用绒布在涂有量子棒基板上摩擦,形成沟槽和量子棒线条,来定向排列量子棒;(4)静电纺丝排列法(Electrospinning Polymeric Nanofibers)^[43-47],是通过静电纺丝工艺将量子棒均匀分布在聚合物纳米纤维,然后被高速滚筒收集成膜。由于纤维自身尺寸以及机械拉伸作用,量子棒沿着纳米纤维的轴同向排列分布,最终获得定向排列的量子棒薄膜;(5)聚合物薄膜拉伸排列法(Stretching of Polymer Films)^[48-49],是将量子棒均匀混合在链状聚合物膜中,通过机械拉伸形成剪应力,定向排列聚合物链以及量子棒,最终形成定向排列的量子棒薄膜;(6)光控取向法^[23-26],通过将量子棒与液晶单体混合,量子棒表面所修饰的

配体与液晶分子相互交叉结合,最后通过定向排列液晶单体来实现量子棒的定向排列并聚合成膜。由于配体是沿着量子棒表面垂直分布,同时又与液晶分子平行排列。因此,当液晶结合配体定向排列时,量子棒将会沿着垂直于液晶分子排列方向而定向排列。

表1为每种定向排列方法所得量子棒薄膜荧光的偏振度。对比不同排列方法所制成的量子棒薄膜,其中利用光控取向法所制的薄膜具有最高的偏振度。其原因是所使用的液晶单体具有近晶相,在定向排列中具有更高的序参数以及分子层结构,可最大限度将量子棒限制在二维平面内,而不会有倾角。在透射电子显微镜微区图像中,量子棒排列的二维序参数高达0.87^[25],这也意味着从薄膜中得到的荧光具有高偏振比。另一方面,在获得最高偏振度的同时,光控取向法制膜工艺简单,又可实现大尺寸、柔性薄膜,甚至可以在微区内实现多畴取向^[26],拥有广阔的潜在应用前景。

表1 量子棒定向排列方法及所报告最高偏振度
Tab.1 Unidirectional quantum rods alignment methods and the highest DOP reported

定向排列方法	所报告的最高偏振度
电场辅助组装排列 (Electrical Field Assisted Assembly)	0.60 ^[29]
液体/空气界面自组装排列 (Self-Assembly at Liquid/Air Interface)	0.34 ^[32]
机械摩擦取向 (Mechanical Rubbing)	0.60 ^[36]
静电纺丝排列 (Electrospinning Polymeric Nanofibers)	0.60 ^[38]
聚合物薄膜拉伸排列 (Stretching of Polymer Films)	0.70 ^[44]
光控取向 (Photo-induced Alignment)	0.81 ^[18]

2.3 光控取向技术

光控取向法是借用量子棒表面配体与液晶分子相互交叉结合,通过定向排列液晶单体来实现

量子棒的定向排列。所以为了定向排列量子棒,首先需要对液晶材料取向。液晶材料取向方法通常有 4 种:(1)摩擦取向法,也称打磨法;(2)偏振紫外光诱发聚合所导致的光控取向法;(3)斜向蒸镀法;(4)用等离子干法在平行取向材料上腐蚀形成栅格的方法。后两种方法并不是液晶取向的主流方向,且都有一定的局限性^[50]。

摩擦取向法是用一块特制的绒布在一块涂有均匀(平行)取向层(聚酰亚胺)的基板表面适当地定向摩擦,在取向层上产生了沿着摩擦方向排列的密密麻麻的微沟槽,当液晶材料与取向层接触时,为了使自身的自由能处在最低最稳定的状态,长棒状的液晶分子会倾向于让其分子长轴沿着沟槽方向排列,于是液晶指向矢平行于沟槽排列形成稳定状态。摩擦取向技术具有简单、方便、稳定性好等优点,但摩擦过程中会产生大量的粉尘和静电,对液晶显示器造成污染,从而降低了液晶显示器的成品率。另外,利用摩擦取向技术很难实现液晶器件的多畴显示,难以解决液晶显示器件视角过窄的问题。

光控取向法根据处理过程不同可分为两类:一类是复合体系,不需要表面预处理,直接用光对掺有感光高分子的液晶层进行取向;另一类是非复合体系,先用偏振光预处理聚合物衬底,再使液晶分子在衬底上定向排列,这种方法目前采用比较多^[51]。这些聚合物衬底通过偏振紫外光照射,会引发聚合物薄膜的光致异构^[52]、光交联^[53]、光降解^[54]、光诱导分子转动^[55]等现象,并产生表面各向异性,使得液晶分子在薄膜上发生取向排列^[51]。

本文所使用的光控取向是基于光诱导分子转动机理,所用的偶氮染料分子(SD1)在偏振光照射作用下,会发生分子转动。所照射的偏振光可以诱导一个非对称的势场,在这个势场下,只有垂直于光的偏振方向的染料吸收振子才被视作稳定结构。因此,这种分子转动现象可以用扩展模型来解释^[56-57]。当 SD1 被一束偏振光光泵,吸收发生几率与 $\cos^2\theta$ 成正比,其中 θ 是 SD1 的吸收振子与光的偏振方向的夹角。如果 SD1 的吸收振子平行于光的偏振方向,那么它们将会在能量上得到增加,这就导致了它们偏离初始位置再转向,直到吸收最小为止。这时,SD1 将会沿着垂直

于光的偏振方向排列,吸收能量最少且最稳定。有意思的是,当照射偏振光改变偏振方向时,SD1 也会随之在平面内再次转动,并保持与照射光偏振方向垂直方向排列。利用这一特性,可以在同一片基板上实现微区多畴取向,在显示、光子器件、保密应用等领域中有着巨大的潜在应用价值^[58-63]。

2.4 量子棒的光控取向过程

量子棒的光控取向是通过将量子棒与液晶单体混合,量子棒表面所修饰的配体与液晶分子相互交叉结合,然后涂在已光控取向的 SD1 基板上,液晶分子会沿着 SD1 的取向方向排列,与此同时,借助量子棒与液晶分子的分子间作用力,量子棒会沿着与液晶分子相垂直的方向排列。最后通过紫外光照射,液晶单体聚合成膜,量子棒排列在液晶聚合物网络中,形成量子棒/液晶聚合物混合薄膜(QR/LCP film)。

QR/LCP 薄膜的制作工艺如图 2 所示。QR/LCP 薄膜需要多步工艺制作完成,首先将 SD1 溶液旋涂在干净的玻璃基板上,随后加热至 100 °C 并持续 10 min 将溶剂蒸发。此时 SD1 分子为随机排列。用波长为 450 nm 的蓝色线偏振光对 SD1 基板照射,SD1 分子将沿着垂直于偏振方向定向排列。随后,将量子棒与液晶单体混合溶液旋涂在排列好的 SD1 基板上,液晶分子迅速沿着 SD1 排列方向排列。同时,掺杂在液晶分子间的量子棒,借助于液晶分子的分子间作用力,沿着垂直于液晶分子的排列方向排列。经过 UV 灯聚合后,液晶单体聚合成聚合物薄膜,将量子棒固定在聚合物网络中。根据以上步骤,量子棒将定向排列于所制的 QR/LCP 薄膜中。

为了测量所制 QR/LCP 薄膜荧光的偏振度,我们搭建了如图 3(a)所示的光学装置。用一束波长为 450 nm 的激光作为激发光照射在所制的 QR/LCP 薄膜上,激发光的偏振方向与量子棒的排列方向相同,此时量子棒的荧光强度最大^[24]。一片二色镜放置于 QR/LCP 薄膜与转动偏光片之间,激发光被反射出探测器范围,而荧光会透过二色镜和转动偏光片,最终被探测器接收。由于定向排列量子棒的荧光具有偏振性,在转动偏光片时,探测器所接收到的光强随着偏光片转动的角度而变化,如图 3(b)所示。

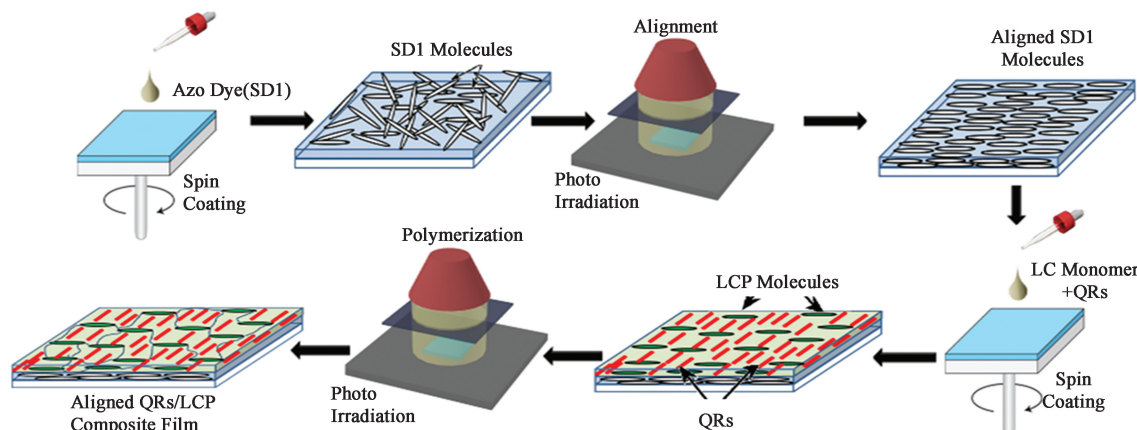
图2 QR/LCP 薄膜制作过程^[18]

Fig.2 Fabrication process of QR/LCP composite film (Reproduced with permission from Ref.[23], Copyright 2017, Wiley-VCH).

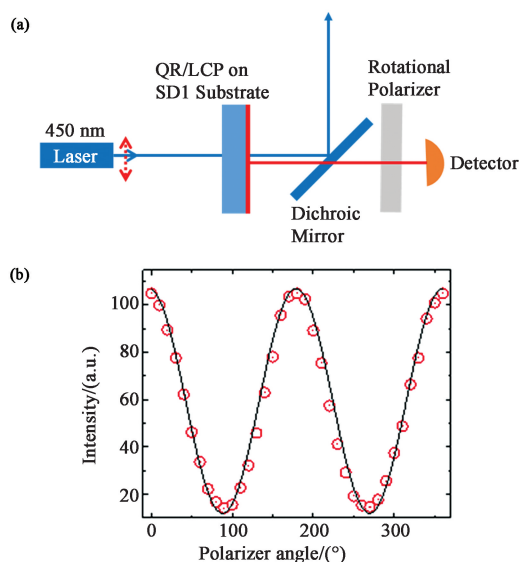


图3 (a)测量偏振度的光学装置;(b)不同偏光片的转动角度与荧光强度的变化曲线图^[18]。

Fig.3 (a) Optical setup for degree of polarization measurement; (b) Corresponding curve for the emission intensity as a function of the polarizer axis rotation angle (Reproduced with permission from Ref.[23], Copyright 2017, Wiley-VCH).

在图3(b)中,通过 Malus's Law 可计算出量子棒在通过线偏光片后的理论荧光强度,其公式^[64]为:

$$I(\theta) = (I_{\max} - I_{\min}) \cos^2 \theta + I_{\min}, \quad (2)$$

其中: θ 是偏光片的偏振方向与量子棒排列方向的夹角, $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别是探测器所接收到最强和

最弱的荧光。由此可得,计算的理论曲线(黑色线)与在偏光片不同转动角度时荧光强度的实验数据(红色空心圆)可完美拟合。同时,也可根据公式(1)计算出偏振度(P)可高达 0.81^[23]。

2.5 微区内量子棒的光控取向

目前,有几种方法可以实现对量子棒的区域排列,但仍然很难控制量子棒在不同区域内、不同方向的定向排列^[65-66]。基于光诱导分子转动机理的光控取向技术则可以通过控制取向层的取向,从而实现在不同区域内精确控制量子棒排列的方向^[67-68]。从光控取向材料 SD1 的扩散模型原理得知,SD1 可以通过多次、不同偏振方向的照射来改变排列方向^[57]。利用这种独特的、可重写的特点,配合光学掩模板或者照射光的干涉,可以在同一片基板上实现在微区内通过多次不同偏振方向的照射,实现 SD1 的多畴取向,其取向精度可达亚微米级^[69]。这也给量子棒在微区内的多畴取向提供了可能^[26]。

图4展示了量子棒薄膜多畴取向的过程。首先,将光控取向材料 SD1 旋涂至干净的玻璃基板上并加热烘干,用线偏振光(偏振角度为 0°)进行第一次照射,使 SD1 分子均匀定向排列。然后旋转线偏振光角度至 90° ,配合光学掩模板进行第二次照射。这时,SD1 分子在掩模板所盖住的区域保持原有排列方向,而被第二次照射的 SD1 分子会重新定向,其排列方向跟随照射光的偏振角度同时转动 90° 。此时,相邻区域的 SD1 分子排列方向相互垂直。最后,根据相同的步骤将量子

棒与液晶单体混合溶液旋涂至该 SD1 基板上并进行 UV 聚合,形成 QR/LCP 薄膜^[21]。

各向异性的吸收和荧光是半导体量子棒的最

大特征,因此,通过控制激发光偏振方向与量子棒排列方向的夹角,可以调节量子棒的荧光强度^[24],如图 5 所示。

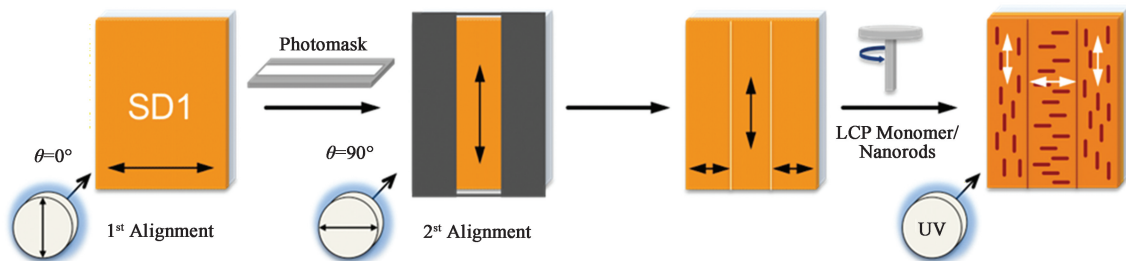


图 4 量子棒薄膜的多畴取向过程^[21]

Fig.4 Fabrication process of pattern alignment of QR/LCP composite film (Reproduced from permission from Ref [26], Copyright 2017, American Chemical Society).

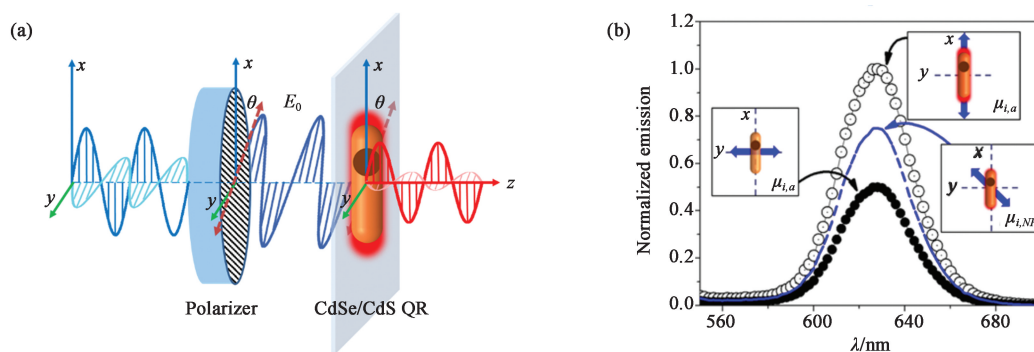


图 5 (a)单个核壳结构量子棒的各向异性吸收与荧光,其长轴(*c*-axis)在 *xyz* 坐标内沿着 *x* 轴方向; (b)在照射光偏振角度 θ 为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 时,量子棒的相对荧光强度。

Fig.5 (a) Anisotropic absorption and emission from a singlecore-shell CdSe/CdS semiconductor QR, with its long axis (*c*-axis) parallel to the *x*-axis in the *xyz* coordinates; (b) Relative emission intensities of CdSe/CdS QRs aligned in *xy* plane at $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ and 90° with regard to the polarization azimuth of the impinging light (Reproduced with permission from Ref. [24], Copyright 2018, Wiley-VCH).

因此,在量子棒与激发光(波长为 λ)偏振方向夹角为 θ 时,量子棒的吸收系数 $\mu_{i,QR}$ 可以表示为:

$$\mu_{i,QR} = \frac{2\pi\epsilon''_{rod}}{n_{\perp}\lambda} |f_{LF,c}|^2 \cos^2\theta + \frac{2\pi\epsilon''_{rod}}{n_{\parallel}\lambda} |f_{LF,a}|^2 \sin^2\theta, \quad (3)$$

其中: $n_{\parallel}$, $n_{\perp}$, $\epsilon_{\parallel}$ 和 $\epsilon_{\perp}$ 是与量子棒相互作用的液晶分子分别沿着长轴(*c*-axis)和短轴(*a*-axis)的折射率和相对介电常数, ϵ''_{rod} 为量子棒相对介电常数的虚部, $f_{LF,c}$ 和 $f_{LF,a}$ 为量子棒在长轴(*c*-axis)和短轴(*a*-axis)的局部场因子^[24]。因此,通过控制激发光的偏振方向,可以精确调控量子棒薄膜的荧光强度。

此外,如果激发光为非偏振光,则对于图案多畴取向的量子棒薄膜可以表现出均匀的荧光强度分布。如图 6(a)所示,在 QR/LCP 薄膜中,可以看到“SKL”字母的荧光图案。

为了获得 QR/LCP 薄膜中量子棒排列的最高精度,我们制作了不同周期的一维量子棒荧光光栅,如图 6(b)所示。通过荧光显微镜可以清楚地分辨出定向排列量子棒的各向异性吸收及荧光。从不同周期的荧光强度分布图中,可以轻松根据对比度计算出偏振率。对于大周期的光栅图案,量子棒的偏振比($I_{\parallel}/I_{\perp}$)维持在 2.5 左右。为了更进一步研究光控量子棒的取向精度,光栅周期分别减少至 10, 5, 2 μm ^[26]。

尽管在光栅周期为 10 μm 和 5 μm 时,其荧

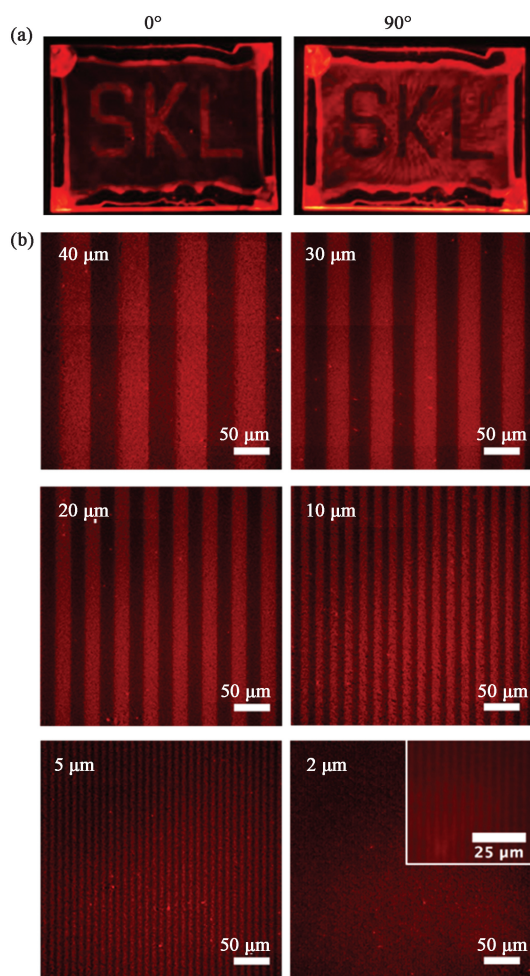


图6 (a)在 QR/LCP 薄膜中“SKL”字母图案的正、负荧光显示;(b)在荧光显微镜下,具有不同周期的一维量子棒荧光光栅的偏光图案^[21]。

Fig.6 (a) Positive and negative “SKL” character fluorescent pattern from QR/LCP composite film with polarizer at 0° and 90° , respectively; (b) Characterization of 1-dimensional fluorescent grating patterns with different domain sizes by fluorescence microscope with a linearly polarizer (Reproduced from permission from Ref. [26]. Copyright 2017, American Chemical Society).

光图案仍然清晰可见,但在显微图片中可以看到越来越多的缺陷,导致荧光强度不一致,并且偏振比分别降至 2.3 和 1.9。当光栅周期进一步减小至 $2\ \mu\text{m}$ 时,偏振比为 1.6,并且只有在荧光显微镜更大放大倍数才可以观察到明暗荧光条纹图案,如图 6(b)插图。这个更小的条纹宽度实验证实了目前通过光控量子棒取向技术的精度限制为 $2\ \mu\text{m}$,原因可以归纳为如下两个方面:

首先,随着光栅周期的减小,混合物内部和表面势能竞争越来越大。由于液晶单体的取向主要取决于 SD1 表面的各向异性能量来支配,因此这种周期性的排列也受限于薄膜的厚度。正因为有了量子棒的掺杂,这种现象比纯液晶单体的排列更加明显^[26]。另一方面,在量子棒表面配体与周围的液晶单体之间在相互作用的同时,量子棒与液晶单体排列方向又相互垂直,这可能导致存在部分微观相分离,在荧光显微镜中可以看到荧光团聚物^[70]。因此,在较小周期的荧光光栅中,这些缺陷便会影响周期性定向排列,从而导致较低的偏振比和序参数。基于这个因素,我们进一步研究了表面配体与液晶单体之间的兼容性,设计了特殊配体以提高 QR/LCP 薄膜的表现^[71]。另外,对于液晶单体与量子棒相互垂直的排列方向,我们将会设计另外一种 T 型结构配体,使量子棒与液晶单体平行排列,进一步优化其排列效果,提高其荧光偏振比。

3 量子棒光控取向的应用

3.1 基于光控量子棒取向的光驱动盒内量子棒荧光显示器

量子棒因具有各向异性吸收与荧光的特点,可以作为有固定图案的显示设备^[26]。而将液晶与 QR/LCP 膜集成,则可以设计出光驱动盒内量子棒荧光显示器。QR/LCP 薄膜不仅包含定向排列的量子棒,其表面的各向异性特点与液晶取向层相似,因此,同无量子棒的 LCP 薄膜一样,都可以为液晶分子提供足够的锚定能^[23,72]。利用这一特点,我们可以将 QR/LCP 薄膜作为液晶盒内液晶分子的取向层,从而将 QR/LCP 薄膜和液晶共同组合成密闭的器件结构,如图 7(a)所示。首先,在第一片玻璃基板(5)上涂覆光控取向的 QR/LCP 薄膜(3),并用其作为液晶的取向层。这个 QR/LCP 薄膜可以提供几乎零预倾角以及高平面内锚定能,非常有利于液晶分子的平面内均匀取向。

随后,在第二片玻璃基板(1)涂覆传统的聚酰亚胺(2),经过摩擦后可以提供类似的平面内取向^[73]。最后,将两片玻璃基板取向方向相互垂直,然后在两片玻璃基板之间喷有 $5\ \mu\text{m}$ 直径的

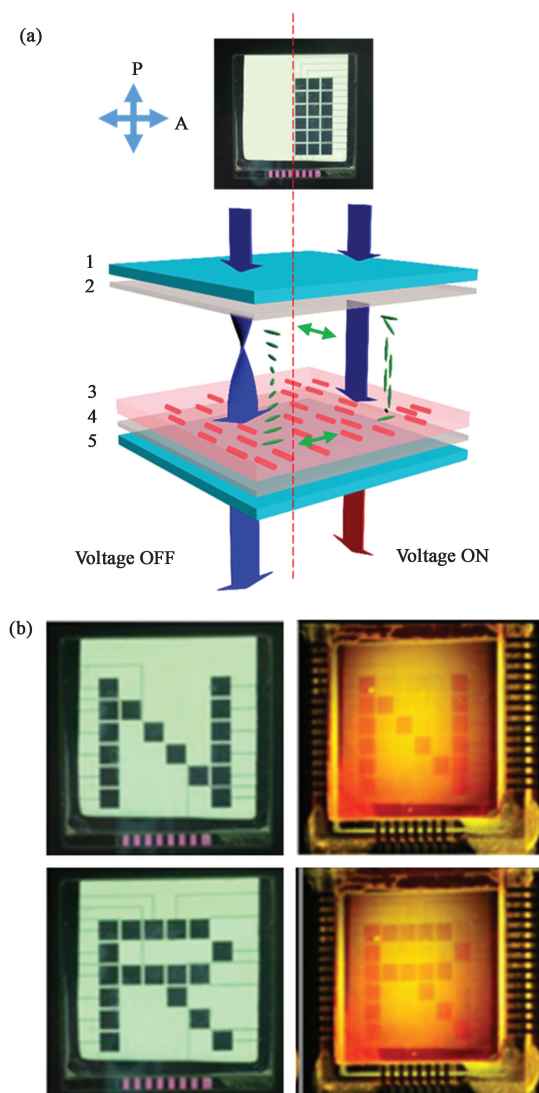


图 7 (a)光驱动盒内量子棒荧光显示器；(b)有滤光片(左)、无偏光片(右)的“N”、“R”荧光图形。

Fig.7 (a) In-LC cell optically addressable emissive QR display. (b) The polarizer-free emission patterns “N” and “R” with impinging light ($\lambda=450$ nm) and cut-off color filter (Reproduced with permission from Ref. [24]. Copyright 2018, Wiley-VCH).

间隔物并组装、固定成为液晶盒。在灌入液晶材料后,液晶盒为扭转向列模式,即液晶材料作为光波导,可以扭转入射光的偏振方向。另外,由于LCP和液晶分子的排列方向都是平行于SD1分子的排列方向,因此量子棒排列方向垂直于SD1和液晶分子。

在无外加电场的情况下,两片玻璃基板间的液晶分子作为光波导,指向矢沿着两端边缘

定向条件在平面内逐渐旋转。此时,入射光的偏振方向也会遵循液晶分子的指向矢扭转。将上基板和下基板取向方向之间的夹角,即扭转角(φ)设置为接近 90° ,此时出射光的偏振方向将与入射方向垂直,在交叉偏光片条件下为亮态,如图7(a)左侧所示,并透射蓝色激发光。与此同时,由于量子棒排列方向与激发光偏振方向也呈正交,量子棒荧光最弱,代表此荧光显示像素的暗态。另一方面,在施加电场的情况下,液晶分子会离开水平平面并沿着电场方向排列。在这种情况下,有效的双折射率降低,并且在一定的电压(当前情况下为2 V)之后,液晶分子光波导条件将被破坏,激发光的偏振方向不会被扭转。虽然此时在交叉偏振片条件下,显示器为暗态,如图7(a)右侧所示,但是激发光的偏振方向与量子棒的排列方向相同,量子棒荧光最强。图7(b)展示了在白色背光以及交叉偏光片(左排)、无偏光片(右排)的量子棒荧光显示状态。图像中“N”和“R”字母清晰可见,验证了显示器的功能。

3.2 用于现代液晶显示器的光控量子棒亮度增益膜

通过优化量子棒荧光光谱以及保持白平衡的QR/LCP膜厚度,我们用喷墨打印机(Ink-jet printer)分别将红色量子棒薄膜(波长627 nm)和绿色量子棒薄膜(波长562 nm)打印在对角尺寸约为63.5 mm(2.5 in)的玻璃基板上,作为应用于现代液晶显示器的量子棒亮度增益膜(Quantum rods enhancement film, QREF)。

随后,将这两片量子棒亮度增益膜组装并放置在蓝色背光板(波长450 nm)上,作为QREF背光板。其中红色膜面向背光首先被激发,以最大程度地减少对绿色荧光的重吸收^[18],此时QREF背光板亮度约为 $3\,000\text{ cd/m}^2$ 。将QREF背光板和商用液晶显示屏组装在一起来表征其光学性能,如图8(a)所示,显示屏亮度降低至约 250 cd/m^2 ,光学效率约为8%,而同样的显示屏在传统白色背光板上效率约为4.5%。图8(b)为配有QREF背光板的液晶显示器的色彩图,在CIE1976图表中覆盖了109% NTSC^[74]。

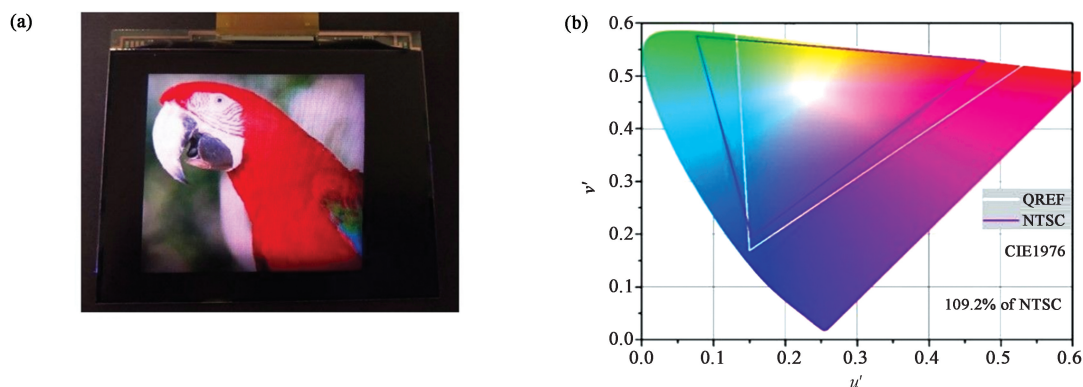


图8 配备 QREF 背光板的液晶显示屏图片(a)和在 CIE1976 图表中的色域图 (b)

Fig.8 (a) Photographs of LCD embedded with QREF backlight unit; (b) CIE 1976 color triangle for the LCD embedded with QREF backlight unit (Reproduced with permission from Ref. [74]. Copyright 2019, Royal Society of Chemistry).

4 结 论

与球形量子点相比,核/壳结构半导体 CdSe/CdS 量子棒有许多优势,例如各向异性的吸收和荧光。为了保持这些特征,本文提出了利用光控取向技术在液晶聚合物薄膜中定向排列量子棒的方法,制成 QR/LCP 薄膜。其中光控取向技术是利用偶氮染料 SD1 的光诱导分子转动机理来实现对液晶分子排列的,同时,SD1 在对量子棒局部区域定向上展示出极大的灵活性,可在微米尺度

内对量子棒多畴取向。

利用 QR/LCP 薄膜表面各向异性的特点,设计制作出光驱动盒内量子棒荧光显示器,利用量子棒作颜色转换,在荧光和液晶显示领域中展现出巨大的潜力。最后,基于光控取向的红色和绿色量子棒薄膜,结合蓝色背光板组装成 QREF 背光板,在增强显示器色彩表现的同时,可提高液晶屏偏光片的偏振效率,从而提高了液晶显示屏的光学效率,这对于移动设备而言是至关重要的。

参 考 文 献:

- [1] ROGACH A L. *Semiconductor Nanocrystal Quantum Dots* [M]. New York: Springer, 2008.
- [2] MILLIRON D J, HUGHES S M, CUI Y, *et al.* Colloidal nanocrystal heterostructures with linear and branched topology [J]. *Nature*, 2004, 430(6996): 190-195.
- [3] REISS P, PROTIÈRE M, LI L. Core/shell semiconductor nanocrystals [J]. *Small*, 2009, 5(2): 154-168.
- [4] TALAPIN D V, KOEPPE R, GÖTZINGER S, *et al.* Highly emissive colloidal CdSe/CdS heterostructures of mixed dimensionality [J]. *Nano Letters*, 2003, 3(12): 1677-1681.
- [5] MARTYNENKO I V, LITVIN A P, PURCELL-MILTON F, *et al.* Application of semiconductor quantum dots in bioimaging and biosensing [J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2017, 5(33): 6701-6727.
- [6] KAIRDOLF B A, SMITH A M, STOKES T H, *et al.* Semiconductor quantum dots for bioimaging and biondiagnostic applications [J]. *Annual Review of Analytical Chemistry*, 2013, 6: 143-162.
- [7] 严平, 李在均. 双功能石墨烯量子点的制备及在 pH 荧光检测和细胞成像中的应用 [J]. *分析化学*, 2018, 46(5): 670-677.
- [8] YAN P, LI Z J. Synthesis of bifunctional graphene quantum dots and its application in fluorescence detection of pH and cell imaging [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(5): 670-677.
- [8] 邹小波, 史永强, 郑悦, 等. 基于荧光共振能量转移的金纳米粒子/碳量子点荧光纳米探针检测精氨酸 [J]. *分析化学*, 2018, 46(6): 960-968. (in Chinese)

- ZOU X B, SHI Y Q, ZHENG Y, *et al.* Detection of arginine by AuNPs/CQDs nanoprobe based on fluorescence resonance energy transfer effect [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(6): 960-968. (in Chinese)
- [9] 王明丽, 孙亚楠, 郭佳怡, 等. 硫化镉量子点对三联吡啶钌电化学发光的增敏作用及用于邻苯二酚的检测 [J]. *分析化学*, 2018, 46(5): 780-786.
- WANG M L, SUN Y N, GUO J Y, *et al.* Amplification effect of CdS quantum dots on electrogenerated chemiluminescence of Ru(bpy)₃²⁺ and its application in determination of catechol [J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(5): 780-786. (in Chinese)
- [10] TANG J, KEMP K W, HOOGLAND S, *et al.* Colloidal-quantum-dot photovoltaics using atomic-ligand passivation [J]. *Nature Materials*, 2011, 10(10): 765-771.
- [11] 张梁, 孙强, 朱阳阳, 等. PbSe 量子点调控的聚合物太阳能电池性能 [J]. *发光学报*, 2019, 40(10): 1267-1273.
- ZHANG L, SUN Q, ZHU Y Y, *et al.* Improving performance of polymer solar cells by regulating PbSe quantum dots [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(10): 1267-1273. (in Chinese)
- [12] KRAMER I J, SARGENT E H. Colloidal quantum dot photovoltaics: a path forward [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(11): 8506-8514.
- [13] STECKEL J S, HO J, HAMILTON C, *et al.* Quantum dots: The ultimate down-conversion material for LCD displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2015, 23(7): 294-305.
- [14] CHEN H W, HE J, WU S T. Recent advances on quantum-dot-enhanced liquid-crystal displays [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, 23(5): 1900611.
- [15] 季洪雷, 周青超, 潘俊, 等. 量子点液晶显示背光技术 [J]. *中国光学*, 2017, 10(5): 666-680.
- Ji H L, Zhou Q C, Pan J, *et al.* Advances and prospects in quantum dots based backlights [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(5): 666-680. (in Chinese)
- [16] COE S, WOO W K, BAWENDI M, *et al.* Electroluminescence from single monolayers of nanocrystals in molecular organic devices [J]. *Nature*, 2002, 420(6917): 800-803.
- [17] ANIKEEVA P O, HALPERT J E, BAWENDI M G, *et al.* Quantum dot light-emitting devices with electroluminescence tunable over the entire visible spectrum [J]. *Nano Letters*, 2009, 9(7): 2532-2536.
- [18] 张锋, 薛建设, 喻志农, 等. 量子点发光在显示器件中的应用 [J]. *液晶与显示*, 2012, 27(2): 163-167.
- ZHANG F, XUE J S, YU Z N, *et al.* Quantum-dot light emitting device for displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2012, 27(2): 163-167. (in Chinese)
- [19] 熊雪莹, 魏昌庭, 苏文明, 等. 喷墨打印镉基绿光量子点发光二极管及其界面 [J]. *发光学报*, 2019, 40(10): 1274-1280.
- XIONG X Y, WEI C T, SU W M, *et al.* Performance and interface of inkjet-printed cadmium(Cd)-based green quantum dot light-emitting diodes [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2019, 40(10): 1274-1280. (in Chinese)
- [20] HU J T, LI L S, YANG W D, *et al.* Linearly polarized emission from colloidal semiconductor quantum rods [J]. *Science*, 2001, 292(5524): 2060-2063.
- [21] SITT A, SALANT A, MENAGEN G, *et al.* Highly emissive nano rod-in-rod heterostructures with strong linear polarization [J]. *Nano Letters*, 2011, 11(5): 2054-2060.
- [22] SHE C X, DEMORTIÈRE A, SHEVCHENKO E V, *et al.* Using shape to control photoluminescence from CdSe/CdS Core/Shell nanorods [J]. *Journal of Physical Chemistry Letters*, 2011, 2(12): 1469-1475.
- [23] SRIVASTAVA A K, ZHANG W L, SCHNEIDER J, *et al.* Photoaligned nanorod enhancement films with polarized emission for liquid-crystal-display applications [J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(33): 1701091.
- [24] ZHANG W L, SCHNEIDER J, CHIGRINOV V G, *et al.* Optically addressable photoaligned semiconductor nanorods in thin liquid crystal films for display applications [J]. *Advanced Optical Materials*, 2018, 6(16): 1800250.
- [25] DU T, SCHNEIDER J, SRIVASTAVA A K, *et al.* Combination of photoinduced alignment and self-assembly to realize polarized emission from ordered semiconductor nanorods [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(11): 11049-11055.
- [26] SCHNEIDER J, ZHANG W L, SRIVASTAVA A K, *et al.* Photoinduced micropattern alignment of semiconduc-

- tor nanorods with polarized emission in a liquid crystal polymer matrix [J]. *Nano Letters*, 2017, 17(5): 3133-3138.
- [27] TALAPIN D V, NELSON J H, SHEVCHENKO E V, *et al.* Seeded growth of highly luminescent CdSe/CdS nanoheterostructures with rod and tetrapod morphologies [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(10): 2951-2959.
- [28] CARBONE L, NOBILE C, DE GIORGI M, *et al.* Synthesis and micrometer-scale assembly of colloidal CdSe/CdS nanorods prepared by a seeded growth approach [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(10): 2942-2950.
- [29] MEKIS I, TALAPIN D V, KORNOWSKI A, *et al.* One-pot synthesis of highly luminescent CdSe/CdS core-shell nanocrystals via organometallic and "Greener" chemical approaches [J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2003, 107(30): 7454-7462.
- [30] GAO Y, TA V D, ZHAO X, *et al.* Observation of polarized gain from aligned colloidal nanorods [J]. *Nanoscale*, 2015, 7(15): 6481-6486.
- [31] MOHAMMADIMASOUDI M, HENS Z, NEYTS K. Full alignment of dispersed colloidal nanorods by alternating electric fields [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(61): 55736-55744.
- [32] HU Z H, FISCHBEIN M D, QUERNER C, *et al.* Electric-field-driven accumulation and alignment of CdSe and CdTe nanorods in nanoscale devices [J]. *Nano Letters*, 2006, 6(11): 2585-2591.
- [33] RYAN K M, MASTROIANNI A, STANCIL K A, *et al.* Electric-field-assisted assembly of perpendicularly oriented nanorod superlattices [J]. *Nano Letters*, 2006, 6(7): 1479-1482.
- [34] MOHAMMADIMASOUDI M, PENNINCK L, AUBERT T, *et al.* Fast and versatile deposition of aligned semiconductor nanorods by dip-coating on a substrate with interdigitated electrodes [J]. *Optical Materials Express*, 2013, 3(12): 2045-2054.
- [35] LI L S, ALIVISATOS A P. Origin and scaling of the permanent dipole moment in CdSe nanorods [J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(9): 097402.
- [36] QUERNER C, FISCHBEIN M D, HEINEY P A, *et al.* Millimeter-scale assembly of CdSe nanorods into smectic superstructures by solvent drying kinetics [J]. *Advanced Materials*, 2008, 20(12): 2308-2314.
- [37] RIZZO A, NOBILE C, MAZZEO M, *et al.* Polarized light emitting diode by long-range nanorod self-assembling on a water surface [J]. *ACS Nano*, 2009, 3(6): 1506-1512.
- [38] PERSANO A, DE GIORGI M, FIORE A, *et al.* Photoconduction properties in aligned assemblies of colloidal CdSe/CdS nanorods [J]. *ACS Nano*, 2010, 4(3): 1646-1652.
- [39] SINGH A, GUNNING R D, AHMED S, *et al.* Controlled semiconductor nanorod assembly from solution; influence of concentration, charge and solvent nature [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2012, 22(4): 1562-1569.
- [40] NOBILE C, CARBONE L, FIORE A, *et al.* Self-assembly of highly fluorescent semiconductor nanorods into large scale smectic liquid crystal structures by coffee stain evaporation dynamics [J]. *Journal of Physics-Condensed Matter*, 2009, 21(26): 264013.
- [41] WU K J, CHU K C, CHAO C Y, *et al.* CdS nanorods imbedded in liquid crystal cells for smart optoelectronic devices [J]. *Nano Letters*, 2007, 7(7): 1908-1913.
- [42] AMIT Y, FAUST A, LIEBERMAN I, *et al.* Semiconductor nanorod layers aligned through mechanical rubbing [J]. *Physica Status Solidi (A)*, 2012, 209(2): 235-242.
- [43] HASEGAWA M, HIRAYAMA Y, DERTINGER S. Polarized fluorescent emission from aligned electrospun nanofiber sheets containing semiconductor nanorods [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106(5): 051103.
- [44] BASHOUTI M, SALALHA W, BRUMER M, *et al.* Alignment of colloidal CdS nanowires embedded in polymer nanofibers by electrospinning [J]. *Chem. Phys. Chem.*, 2006, 7(1): 102-106.
- [45] LEE C H, TIAN L M, ABBAS A, *et al.* Directed assembly of gold nanorods using aligned electrospun polymer nanofibers for highly efficient SERS substrates [J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(27): 275311.
- [46] ROSKOV K E, KOZEK K A, WU W C, *et al.* Long-range alignment of gold nanorods in electrospun polymer nano/microfibers [J]. *Langmuir*, 2011, 27(23): 13965-13969.
- [47] 秦静,温佐良,李尚,等.基于量子棒纳米纤维大面积定向排列的偏振增亮膜及其在宽色域显示中的应用 [J].液晶与显示,2018,33(4):261-270.

- QIN J, WEN Z L, LI S, *et al.* Large-scale active luminance film with enhanced polarization made of aligned quantum-rod-containing polymeric nanofibers for highly efficient and wide color gamut LCD displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2018, 33(4): 261-270. (in Chinese)
- [48] HIKMET R A M, CHIN P T K, TALAPIN D V, *et al.* Polarized-light-emitting quantum-rod diodes [J]. *Advanced Materials*, 2005, 17(11): 1436-1439.
- [49] CUNNINGHAM P D, SOUZA J B JR, FEDIN I, *et al.* Assessment of anisotropic semiconductor nanorod and nanoplatelet heterostructures with polarized emission for liquid crystal display technology [J]. *ACS Nano*, 2016, 10(6): 5769-5781.
- [50] 黄子强.液晶显示原理 [M].2 版.北京:国防工业出版社,2008.
- HUANG Z Q. *Principle of Liquid Crystal Display* [M]. 2nd ed. Beijing: Natural Defense Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [51] 王骁乾,沈冬,郑致刚,等.液晶光控取向技术进展 [J].液晶与显示,2015,30(5):737-751.
- WANG X Q, SHEN D, ZHENG Z G, *et al.* Review on liquid crystal photoalignment technologies [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 30(5): 737-751. (in Chinese)
- [52] ICHIMURA K O, SUZUKI Y, SEKI T, *et al.* Reversible change in alignment mode of nematic liquid crystals regulated photochemically by command surfaces modified with an azobenzene monolayer [J]. *Langmuir*, 1988, 4(5): 1214-1216.
- [53] SCHADT M, SCHMITT K, KOZINKOV V, *et al.* Surface-induced parallel alignment of liquid-crystals by linearly polymerized photopolymers [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1992, 31(7): 2155-2164.
- [54] NISHIKAWA M, TAHERI B, WEST J L. Mechanism of unidirectional liquid-crystal alignment on polyimides with linearly polarized ultraviolet light exposure [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 72(19): 2403-2405.
- [55] AKIYAMA H, KAWARA T, TAKADA H, *et al.* Synthesis and properties of azo dye aligning layers for liquid crystal cells [J]. *Liquid Crystals*, 2002, 29(10): 1321-1327.
- [56] KISELEV A D, CHIGRINOV V G, PASECHNIK S V, *et al.* Photoinduced reordering in thin azo-dye films and light-induced reorientation dynamics of the nematic liquid-crystal easy axis [J]. *Physical Review E*, 2012, 86(1): 011706.
- [57] CHIGRINOV V G, PIKIN S, VEREVOCHNIKOV A, *et al.* Diffusion model of photoaligning in azo-dye layers [J]. *Physical Review E*, 2004, 69(6): 061713.
- [58] FAN F, DU T, SRIVASTAVA A K, *et al.* Axially symmetric polarization converter made of patterned liquid crystal quarter wave plate [J]. *Optics Express*, 2012, 20(21): 23036-23043.
- [59] ZHAO C X, FAN F, DU T, *et al.* Multilayer photo-aligned thin-film structure for polarizing photonics [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(13): 2993-2996.
- [60] WU H, HU W, HU H C, *et al.* Arbitrary photo-patterning in liquid crystal alignments using DMD based lithography system [J]. *Optics Express*, 2012, 20(15): 16684-16689.
- [61] CHEN P, WEI B Y, HU W, *et al.* Liquid-crystal-mediated geometric phase: from transmissive to broadband reflective planar optics [J]. *Advanced Materials*, 2019, 19: 1903665.
- [62] SUN J T, SRIVASTAVA A K, ZHANG W, *et al.* Optically rewritable 3D liquid crystal displays [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6209-6212.
- [63] TAM A M W, FAN F, DU T, *et al.* Bifocal optical-vortex lens with sorting of the generated nonseparable spin-orbital angular-momentum states [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7(3): 034010.
- [64] COLLETT E. *Field Guide to Polarization* [M]. Bellingham: SPIE, 2005.
- [65] PAQUET C, KUMACHEVA E. Patterning semiconductor nanocrystals in polymer films [J]. *Advanced Functional Materials*, 2007, 17(16): 3105-3110.
- [66] GREENER J, VAN DER LOOP T H, PAQUET C, *et al.* A study of simultaneous patterning and alignment of semiconductor nanorods via polymerization-induced phase separation [J]. *Langmuir*, 2009, 25(5): 3173-3177.
- [67] SRIVASTAVA A K, HU W, CHIGRINOV V G, *et al.* Fast switchable grating based on orthogonal photo alignments of ferroelectric liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(3): 031112.

- [68] CHIGRINOV V G, KOZENKOV V M, KWOK H S. *Photoalignment of Liquid Crystalline Materials: Physics and Applications* [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
- [69] SHTEYNER E A, SRIVASTAVA A K, CHIGRINOV V G, *et al.* Submicron-scale liquid crystal photoalignment [J]. *Soft Matter*, 2013, 9(21): 5160-5165.
- [70] DUDKA T, ZHANG W L, SCHNEIDER J, *et al.* Formulation of a composite system of liquid crystals and light-emitting semiconductor quantum rods: from assemblies in solution to photoaligned films [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(11): 1900695.
- [71] ZHANG W L, PRODANOV M F, SCHNEIDER J, *et al.* Ligand shell engineering to achieve optimal photoalignment of semiconductor quantum rods for liquid crystal displays [J]. *Advanced Functional Materials*, 2019, 29(3): 1805094.
- [72] TSENG M C, YAROSHCHUK O, BIDNA T, *et al.* Strengthening of liquid crystal photoalignment on azo dye films: passivation by reactive mesogens [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(53): 48181-48188.
- [73] CHIGRINOV V G. *Liquid Crystal Photonics* [M]. New York: Nova Science Publishers, 2014.
- [74] GUPTA S K, PRADANOV M F, ZHANG W L, *et al.* Inkjet-printed aligned quantum rod enhancement films for their application in liquid crystal displays [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(43): 20837-20846.

作者简介:



张万隆(1989—),男,吉林省吉林市人,博士后,助理研究员,2019年于香港科技大学获得博士学位,主要从事液晶光控取向技术和半导体量子棒排列方面的研究。E-mail: wzhangn@connect.ust.hk



郭海成(1951—),男,中国香港人,IEEE会士,美国光学学会会士,国际信息显示学会会士,亚太材料科学院会士,现任香港科技大学先进显示与光电电子技术国家重点实验室主任,主要从事液晶光学、双稳态显示、光控取向技术、LCoS微显示及低温多晶硅有源矩阵技术等方面的研究。E-mail: eekwok@ust.hk