

文章编号: 1000-7032(2025)08-1398-09

钙钛矿纳米线无模板定向成膜及其线偏振发光研究

苏庆国^{1,2}, 武玉庆^{2,3}, 徐琳琳^{1,2}, 王佩玺^{1,2*}, 陈 琪^{1,2*}

(1. 中国科学技术大学 纳米技术与纳米仿生学院, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院苏州纳米技术与纳米仿生研究所 创新实验室, 江苏 苏州 215123;

3. 河海大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 钙钛矿纳米线因具有本征线偏振发光特性而被广泛关注。然而,如果在成膜过程中没有模板辅助,钙钛矿纳米线难以获得均一取向,从而限制其线偏振发光应用前景。本工作结合钙钛矿纳米线在悬浮液中的聚集结构调控,以及适配大面积成膜的刮涂工艺,解决了钙钛矿纳米线无模板定向成膜难题。通过悬浮液浓度和刮涂剪切力优化,钙钛矿纳米线薄膜无需引入额外模板即可呈现出66.7%的光致发光偏振度、27.5%的电致发光偏振度。这一研究为高性能线偏振发光器件的大面积、低成本制备提供了新思路。

关键词: 金属卤化物钙钛矿; 半导体纳米线; 刮涂; 取向优化; 线偏振发光二极管

中图分类号: O482.31; TN312.8

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20250045

CSTR: 32170.14.CJL.20250045

Template-free Ordered Perovskite Nanowire Films for
Linearly Polarized LuminescenceSU Qingguo^{1,2}, WU Yuqing^{2,3}, XU Linlin^{1,2}, WANG Peixi^{1,2*}, CHEN Qi^{1,2*}

(1. School of Nano-Tech and Nano-Bionics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

2. i-Lab, Suzhou Institute of Nano-Tech and Nano-Bionics, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215123, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

* Corresponding Authors, E-mail: pxwang2020@sinano.ac.cn; qchen2011@sinano.ac.cn

Abstract: With intrinsic linearly polarized luminescence properties, perovskite nanowires have attracted widespread attention. However, in the absence of template-assisted alignment during film formation, perovskite nanowires are difficult to achieve uniform orientation, thereby limiting their potential applications in linearly polarized luminescence. In this work, we address the challenge of template-free oriented film formation of perovskite nanowires by combining the regulation of their aggregation structures in suspension with the scalable blade coating process. By optimizing the suspension concentration and the shear force during blade coating, we have achieved perovskite nanowire films with a photoluminescence polarization degree of 66.7% and an electroluminescence polarization degree of 27.5%. This study presents a novel approach for the large-scale and cost-effective fabrication of high-performance linearly polarized luminescent devices.

Key words: metal halide perovskites; semiconducting nanowires; blade coating; orientation optimization; linearly polarized light-emitting diode

1 引 言

金属卤化物钙钛矿材料因其溶液加工的兼容性、低廉的成本、连续可调的半导体带隙、高的

缺陷容忍度以及出色的量子产率等显著优势^[1-2],成为下一代显示技术的候选发光材料之一。近年来,以金属卤化物钙钛矿材料为发光层的钙钛矿发光二极管(Perovskite light-emitting diodes,

收稿日期: 2025-02-27; 修订日期: 2025-03-14

基金项目: 国家自然科学基金(22372193)

Supported by National Natural Science Foundation of China(22372193)

PeLEDs)发展迅速^[3-4],红/绿/蓝(R/G/B)三基色的钙钛矿发光二极管的外量子效率(External quantum efficiency, EQE)均已超过了20%^[5-7]。在传统的各向同性发光器件之外,钙钛矿还在偏振发光二极管等各向异性光源领域展现出广阔的应用价值。钙钛矿纳米线、纳米片等低维结构具有各向异性的几何形貌,能够实现本征偏振发光,而无需依赖复杂的光学结构或额外的偏振滤光片。这种特性可简化器件设计并降低制造成本,为高性能偏振光源和三维显示系统的开发提供了新的解决方案^[8-9]。

与其他类型的低维钙钛矿材料相比,钙钛矿纳米线因其一维结构具有高度的方向性、强量子限域效应和介电约束而表现出优秀的本征线偏振发光特性^[1]。三维显示技术中,线偏振光源是重要组成部分之一^[10]。目前,已有一些关于钙钛矿纳米线的线偏振性能研究。2018年,北京大学Zhang等利用外延法制备了高度取向且光学性能优异的钙钛矿纳米线阵列,并通过微区方式表征了单根的钙钛矿纳米线的光致发光偏振度(Photo-luminescence degree of polarization, PLDOP)为67.0%^[11]。偏振度DOP的计算公式为 $DOP = (I_{\parallel} - I_{\perp}) / (I_{\parallel} + I_{\perp})$,其中 $I_{\parallel}$ 和 $I_{\perp}$ 分别为平行和垂直于取向方向上的偏振发光强度。2020年,澳大利亚新南威尔士大学He等通过阳极氧化铝模板法制备了PLDOP为84.0%的钙钛矿纳米线阵列^[12]。同年,合肥工业大学Zhu等使用偏心旋涂并选择合适的纳米线分散剂获得了PLDOP为46.0%的薄膜^[13],并通过机械刷涂^[8]的方式首次获得了钙钛矿纳米线直接线偏振发光二极管器件。在上述研究中,单根钙钛矿纳米线和模板法钙钛矿纳米线阵列表现出了优异的光致发光线偏振性能。然而,由于钙钛矿纳米线在成膜时的自组装性能较差,在不使用模板辅助的情况下,仍难以获得PLDOP较高的薄膜和电致发光偏振度(Electro-luminescence degree of polarization, ELDOP)较高的器件。同时,钙钛矿纳米线表面存在大量的有机配体^[14],且纳米线成膜的致密程度往往低于其他钙钛矿体系。因此,亟需在提升钙钛矿纳米线薄膜的结构有序度的同时优化发光层薄膜与器件的工艺兼容性,从而实现高性能线偏振发光二极管的制备。

本文提出了钙钛矿纳米线悬浮液刮涂剪切成

膜的方法,无需模板诱导即可获得定向排列的钙钛矿纳米线薄膜,实现了高性能线偏振光致发光和电致发光。通过调控分散液浓度和刮涂剪切力,钙钛矿纳米线薄膜的最高PLDOP和ELDOP分别为66.7%和27.5%。相比之下,采用常规的旋涂工艺获得的钙钛矿纳米线薄膜的最高PLDOP和ELDOP仅为22.5%和16.1%。

2 实验

2.1 实验原材料

溴化铅(PbBr_2 , 99.99%)、碳酸铯(Cs_2CO_3 , 99%)、油酸(OA, 99%)、油胺(OAm, 80-90%)购自Macklin科技有限公司,1-十八烯(1-Octadecene, >90.0%)购自Aladdin生化科技股份有限公司,环己烷(Cyclohexane, 99.5%)、氯苯(CB, 98.0%)购自Adamas试剂有限公司。尖端超声机(沪析, JY92-IIN)购自苏州费斯生物科技有限公司。聚[双(4-苯基)(4-丁基苯基)胺](Poly-TPD, $M_n = 25\,000 \sim 35\,000$)、氟化锂(LiF, >99.98%),购自西安浴日光能科技有限公司。1,3,5-三(1-苯基-1H-苯并咪唑-2-基)苯(TPBi, LT-E302)购自Luminescence Technology科技公司。

2.2 无模板法钙钛矿线偏振发光二极管的制备

通过超声辅助法合成 CsPbBr_3 纳米线^[1]。称量0.032 g Cs_2CO_3 、0.110 g PbBr_2 放入30 mL玻璃瓶,加入10 mL 1-Octadecene、500 μL OA、500 μL OAm。对上述混合物进行变幅杆超声处理,超声功率设置为26 W,每超声4 s暂停4 s,总超声时间1 h,累计输入能量4.68 kJ。变幅杆超声完成后,将纳米线悬浮液放置48 h,使之完成Ostwald熟化过程。随后,将悬浮液转移进15 mL离心管,以5 500 r/min转速离心5 min,弃去上层溶液,以15 mL环己烷重新分散固体,并再次以3 500 r/min的转速离心5 min,洗去多余的表面活性剂等杂质。上述清洗过程一共重复四次。将沉淀分散于不同体积的环己烷或正辛烷中,制备为不同质量分数的纳米线悬浮液备用。

发光二极管器件制备:使用15 mm×15 mm的ITO刻蚀玻璃作为基底,将PEDOT:PSS以3 000 r/min的转速旋涂40 s,150 °C退火20 min;将Poly-TPD(4 mg/mL溶于氯苯)以2 000 r/min的转速旋涂40 s,120 °C退火15 min。然后吸取分散于正辛烷中的纳米线悬浮液以1 000 r/min的转速旋涂40 s,制备成旋涂工艺薄膜;刮涂工艺薄膜采用

25 μm 拱形金属刮刀制备, 纳米线所用分散剂为环己烷, 刮刀行进速率为 50 mm/s。最后, 将 TPBi (45 nm)/LiF (1 nm)/Al (100 nm) 使用物理气相沉积设备蒸镀在纳米线薄膜上, 获得钙钛矿发光二极管器件。

2.3 实验表征仪器

使用 X 射线衍射仪分析晶体结构 (Bruker, D8-ADVANCE X 射线衍射仪, Cu-K α 射线, X 射线波长为 0.154 18 nm); 采用紫外-可见分光光度计分析吸收性能 (Thermo Fisher, Biomate 160); 通过透射电子显微镜分析纳米线的结构参数 (Thermo Fisher Themis Z 球差校正场发射透射电子显微镜); 使用变温稳态荧光光谱仪 (Horiba ihr 550, 低温附件: Montana Instruments, s50) 和变激光强度时间分辨荧光光谱仪 (SPC-150 单光子计数器) 分析纳米线的光学性能; 利用扫描电子显微镜 (Hitachi, Regu-

lus 8230) 分析薄膜的取向性能; 通过稳态荧光光谱仪 (Hitachi F-4600 稳态荧光分光光度计) 结合线偏振片 (大恒光电, GCL-05) 测试薄膜和器件的线偏振发光性能; 器件电学性能测试使用广州犀浦光电有限公司的 XPQY-EQE-adv 系统。

3 结果与讨论

3.1 钙钛矿纳米线的合成及晶体结构表征

CsPbBr₃ 纳米线通过超声辅助法合成, 图 1(a) 展示了其合成原理及过程。在图 1(b) 的 X 射线衍射 (X ray diffraction, XRD) 图样中, 三个最强峰分别对应正交相 CsPbBr₃ 的 (100)、(110)、(200) 晶面^[15]。借助紫外可见吸收光谱法, 我们表征了纳米线薄膜的吸收特性, 图 1(c) 中, CsPbBr₃ 纳米线在 514 nm 表现出了一个明显的激子吸收峰。以上结果表明, 超声辅助法合成的纳米线具有良好的晶体结构和吸收性能。

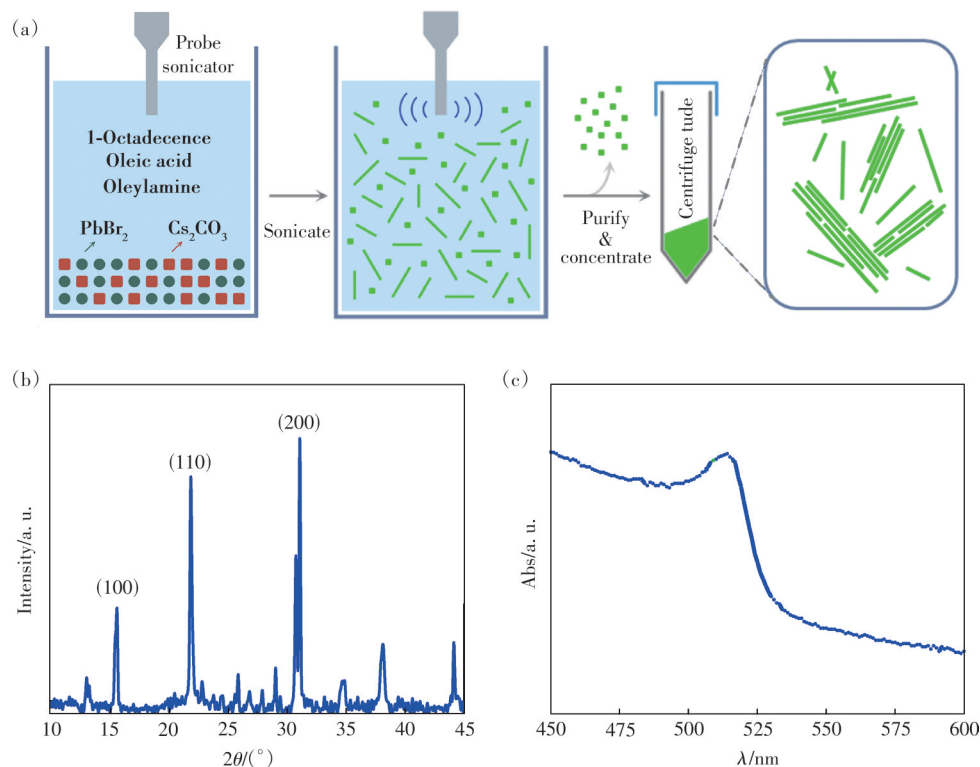


图 1 (a) 超声辅助法 CsPbBr₃ 纳米线合成示意图; (b) CsPbBr₃ 纳米线的 XRD 图谱以及 (c) 紫外-可见吸收光谱

Fig.1 (a) Schematic diagram of the synthesis of CsPbBr₃ nanowires by ultrasonic assisted method. (b) XRD and (c) ultraviolet-visible spectrum of CsPbBr₃ nanowires

3.2 钙钛矿纳米线的结构表征

图 2 展示了 CsPbBr₃ 纳米线的不同倍率的透射电子显微镜 (Transmission electron microscopy, TEM) 表征图。图 2(a)、(b) 分别展示了 9 800 倍的 TEM 图像以及对应的 CsPbBr₃ 纳米线长度统计直

方图, 可以看到, CsPbBr₃ 纳米线的长度主要分布在 200~500 nm 范围内, 纳米线的平均长度为 320.2 nm, 纳米线最长为 642.7 nm。超声合成法难以获得更长的纳米线, 这可能是由于超声过程中产生的剪切力会导致纳米线断裂。图 2(c)、

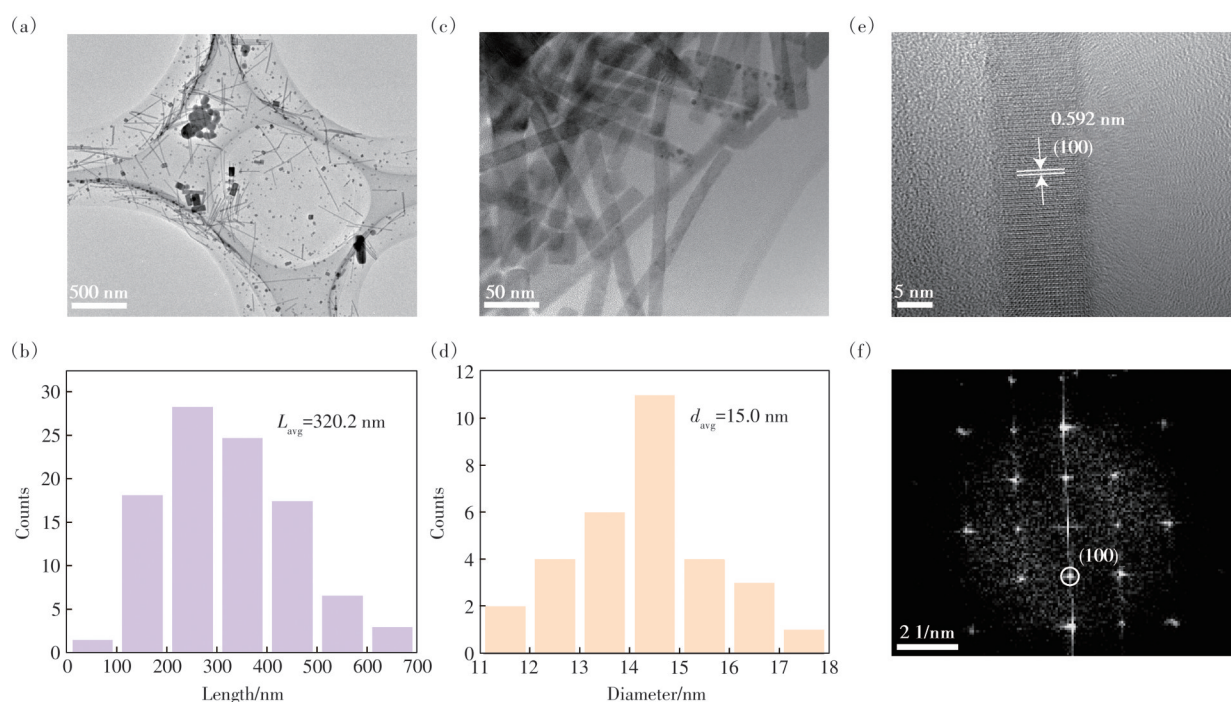


图2 (a)CsPbBr₃纳米线的9 800倍TEM图像及(b)对应的纳米线长度统计直方图;(c)CsPbBr₃纳米线的115 k倍TEM图像及(d)对应的直径统计直方图;(e)CsPbBr₃纳米线的高分辨TEM图像及(f)经FFT变换得到的衍射斑点图样

Fig.2 (a)9 800× magnification TEM image and (b)corresponding length statistical histogram of CsPbBr₃ nanowires. (c)115 k× magnification TEM image and (d)corresponding diameter statistical histogram of CsPbBr₃ nanowires. (e)High resolution transmission electron microscopy image and (f)diffraction spot pattern obtained by FFT of CsPbBr₃ nanowires

(d)分别展示了115 k倍的TEM图像以及对应的CsPbBr₃纳米线直径统计图,钙钛矿纳米线的直径主要分布在13~16 nm范围内,平均值为15.0 nm。从图2(e)的高分辨透射电子显微镜图中可以看出,(100)的晶面间距为0.592 nm。图2(f)展示了图2(e)经快速傅里叶变换(Fast Fourier transform, FFT)处理的衍射斑点图样,从中可见属于晶面(100)的衍射斑点。以上结果证明,超声辅助法合成的纳米线具有良好的一维形貌和CsPbBr₃钙钛矿的晶体结构。

3.3 钙钛矿纳米线的光学性能表征

为了研究钙钛矿纳米线的光学性能和结构中的无序度,我们进行了温度相关的荧光(Photo-luminescence, PL)光谱和变激光强度时间分辨荧光(Time-resolved photoluminescence, TRPL)光谱测试。图3(a)展示了CsPbBr₃纳米线在405 nm激光连续激发下温度相关的稳态荧光光谱。在 $T=80\sim 293$ K时,在520~526 nm的光谱范围内呈现出一个单一的峰,这归因于自由激子复合,没有观察到缺陷诱导峰^[16]。随着温度升高,峰位发生蓝移,表明带隙增大^[11]。

我们提取了图3(a)中半峰宽(Full width at half

maxima, FWHM)及光子能量(Photo energy)与温度(T)的关系并进行了拟合^[16]。拟合曲线如图3(b)、(c)所示,得出由无序和杂质散射引起的0 K时的非均匀展宽(Γ_0)为25.14 meV,低于已报道的CsPbBr₃纳米线(≈ 36 meV)^[17]、CsPbBr₃纳米晶(≈ 40 meV)^[18]和CsPbBr₃单晶(≈ 33 meV)的相应数值^[19]。CsPbBr₃纳米线的热膨胀系数(A_{TE})为288.71 $\mu\text{eV/K}$,与已报道的数值相近^[16]。通过对比,可知超声辅助法合成的纳米线具有良好的结构无序度和结构稳定性。

图3(d)展示了激发光强度由7.2 nJ/cm²增大到169.5 nJ/cm²时CsPbBr₃纳米线材料的TRPL曲线的变化。当激发光强度为7.2 nJ/cm²时,衰减曲线呈现出单指数关系,没有出现钙钛矿多晶薄膜中经常报道的非辐射复合和高激发功率下的俄歇过程^[16]。当激发光强度逐渐增大,荧光强度逐渐升高,荧光寿命逐渐降低,且荧光寿命与泵浦通量呈负相关,如图3(e)所示,这通常被认为是自由载流子复合和高功率密度下的俄歇复合的特征^[20-21]。以上结果表明,超声辅助法合成的纳米线具有良好的光学和结构性能,且表面不存在显著的不利缺陷。

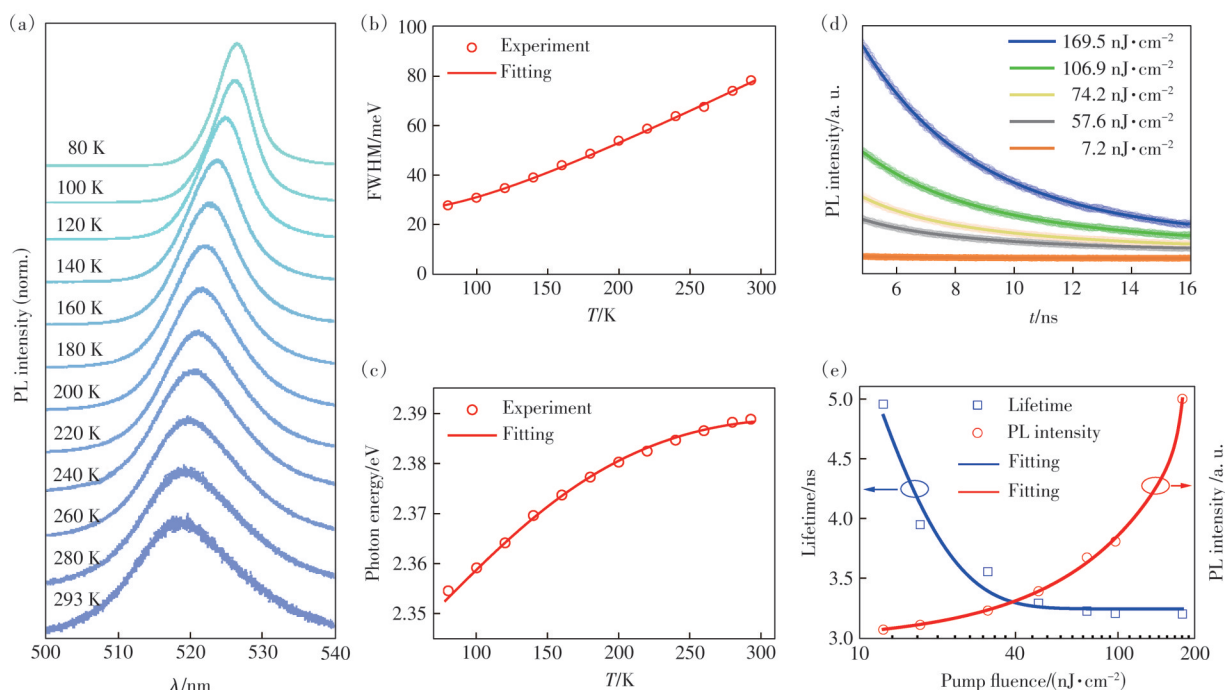


图3 (a)CsPbBr₃纳米线的变温PL光谱;(b)半峰宽-温度图谱;(c)光子能量-温度图谱;(d)变激光强度的时间分辨荧光光谱;(e)荧光寿命-激光强度-荧光强度图谱

Fig.3 (a)Temperature-dependent PL spectra of CsPbBr₃ nanowires. (b)FWHM-*T* curve. (c)Photon energy-*T* curve. (d)Laser intensity dependent TRPL spectra. (e)PL lifetime-laser intensity-PL intensity curves

3.4 无模板法工艺对纳米线取向及PLDOP的影响

基于上述CsPbBr₃纳米线材料,我们通过图4(a)所示的装置进行了旋涂(Spin coating, SC),所获薄膜的扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)图像和PLDOP图谱如图4(b)、(c)所示。此外,刮涂薄膜由图4(d)所示的刮涂(Blade coating, BC)装置制备,刮刀行进速率为50 mm/s,薄膜的SEM图像和PLDOP图谱如图4(e)、(f)所示。

两种工艺所获薄膜中的纳米线取向分布通过SEM图像进行对比。图4(b)、(e)表明,旋涂工艺由于不具有明显的单向剪切力,所获得的薄膜中纳米线的取向较为杂乱。刮涂工艺获得了取向较为均一的薄膜,这表明,在刮刀推动纳米线悬浮液行进的过程中,其施加的定向剪切力使纳米线的取向趋于一致。另外,刮涂工艺下的溶剂挥发相对于旋涂更慢,使纳米线具有更长的弛豫时间。在适当速率的溶剂挥发带动下,纳米线排列也可能有轻微的调整,最终实现纳米线取向度的提升。分别对刮涂和旋涂所获薄膜的扫描电镜图像进行了FFT处理^[22]。结果显示,刮涂所得薄膜SEM图像的FFT图样具有明显的各向异性特征,而旋涂所得

薄膜呈现出了各向同性的特点,如图4(b)、(e)插图所示。PLDOP测试对比了两种无模板法工艺对于薄膜线偏振度的影响,如图4(c)、(f)所示,其中通过刮涂工艺获得的薄膜PLDOP最高为66.7%,而旋涂工艺获得的薄膜PLDOP最高为22.5%。

3.5 无模板法钙钛矿纳米线器件电学性能研究

为了研究刮涂工艺的CsPbBr₃纳米线薄膜的电学性能,我们采用ITO/PEDOT:PSS/Poly-TPD/NWs/TPBi(45 nm)/LiF(1 nm)/Al(100 nm)结构制备了以CsPbBr₃纳米线薄膜为发光层的钙钛矿线偏振发光二极管器件,并测试了两种无模板法工艺器件的电学性能和电致发光线偏振性能。

图5(a)为器件能级排列图,图5(b)为器件在10 V下的电致发光光谱,插图为实拍发光图。使用0.5 g/mL纳米线悬浮液分别用刮涂和旋涂工艺涂布成膜并制备器件,*L*-*J*-*V*曲线和EQE-*J*曲线如图5(c)、(d)所示,器件的启亮电压为7.5 V,显著高于钙钛矿前驱体溶液体系的PeLEDs^[23],原因可能是由于纳米线表面存在大量的长链有机配体,导致器件注入势垒升高。刮涂工艺器件获得的最高亮度为113 cd/m²,旋涂工艺器件所获得的最高亮度为103 cd/m²。刮涂工艺器件最高EQE为0.057%;旋涂工艺器件最高EQE为0.024%,如图

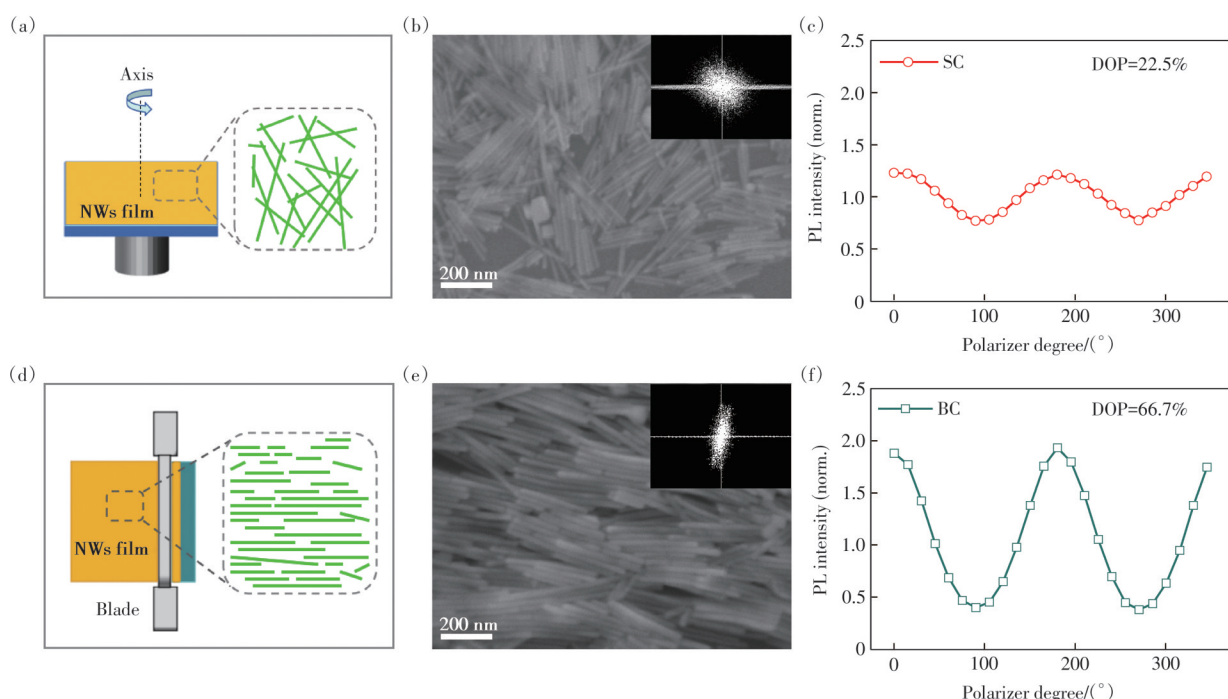


图4 (a)旋涂法成膜装置示意图;(b)旋涂薄膜SEM图像,插图为FFT图样及(c)PLDOP;(d)刮涂法成膜装置示意图;(e)刮涂薄膜SEM图像,插图为FFT图样及(f)PLDOP

Fig.4 (a)Schematic diagram of a film-preparation apparatus using spin coating. (b)SEM, insert FFT pattern and (c)PLDOP of spin coating film. (d)Schematic diagram of a film-preparation apparatus using blade coating. (e)SEM, insert FFT pattern and (f)PLDOP of blade coating film

5(d)所示。以上结果表明,刮涂工艺在优化纳米线取向的同时有利于获得性能良好的器件。PeLEDs的性能如启亮电压、亮度、效率等还有很大的提升空间,一维纳米材料较差的薄膜形貌、覆盖率、均匀性或许是主要的原因^[13]。在后续工作中,我们拟通过配体修饰钝化钙钛矿材料表面的缺陷位点,降低非辐射复合概率以提升器件的亮度和EQE^[24-25];离子掺杂或可稳定钙钛矿纳米线的晶体结构,以提升器件的寿命^[26];界面调控也可以显著提升器件性能^[27]。

为了研究薄膜的无模板法制备工艺对电致发光线偏振性能的影响,我们测试了器件的ELDOP,如图5(e)所示,以0.5 g/mL纳米线悬浮液刮涂获得的器件的ELDOP最高为27.5%,高于以相同浓度悬浮液旋涂所获器件ELDOP的16.1%。此外,刮涂工艺制备的器件在ELDOP曲线中表现出显著的衰减现象,这可能是由于纳米线器件的启亮电压较高,使得器件在高偏压条件下难以保持良好的稳定性所致。

最后,总结了无模板法工艺、DOP和悬浮液中纳米线浓度之间的关系,如图5(f)所示。纳米线浓度分别为0.001 g/mL、0.1 g/mL、0.5 g/mL、

5.0 g/mL(基于离心沉淀质量与体积的估算值)时,刮涂薄膜的PLDOP分别为29.5%、35.0%、47.8%、66.7%。由于5.0 g/mL的高浓度纳米线沉淀较为粘稠,无法通过旋涂法获得均匀的薄膜,故旋涂薄膜的PLDOP依次为19.2%(0.001 g/mL)、22.2%(0.1 g/mL)、22.5%(0.5 g/mL)。以上结果表明,刮涂工艺薄膜的PLDOP随纳米线悬浮液浓度升高而显著提升,旋涂工艺薄膜的PLDOP则有小幅度提升。这归因于刮涂存在一个明显的单向剪切力,且随悬浮液浓度升高,剪切力传导效率提升。整体上刮涂工艺薄膜的PLDOP优于旋涂工艺。

在器件方面,钙钛矿纳米线发光二极管中,纳米线悬浮液浓度过低会导致空穴传输层因漏电流被激发,浓度过高则会使发光层过厚,器件难以导通。我们展示了以0.1 g/mL和0.5 g/mL纳米线悬浮液浓度分别进行刮涂和旋涂后所获器件的ELDOP。刮涂工艺器件的ELDOP分别为23.4%(0.1 g/mL)、27.5%(0.5 g/mL);旋涂工艺器件的ELDOP分别为14.1%(0.1 g/mL)、16.1%(0.5 g/mL)。ELDOP随浓度升高小幅度提升,原因可能是随着浓度升高,纳米线间的相互作用增强,进而提升了

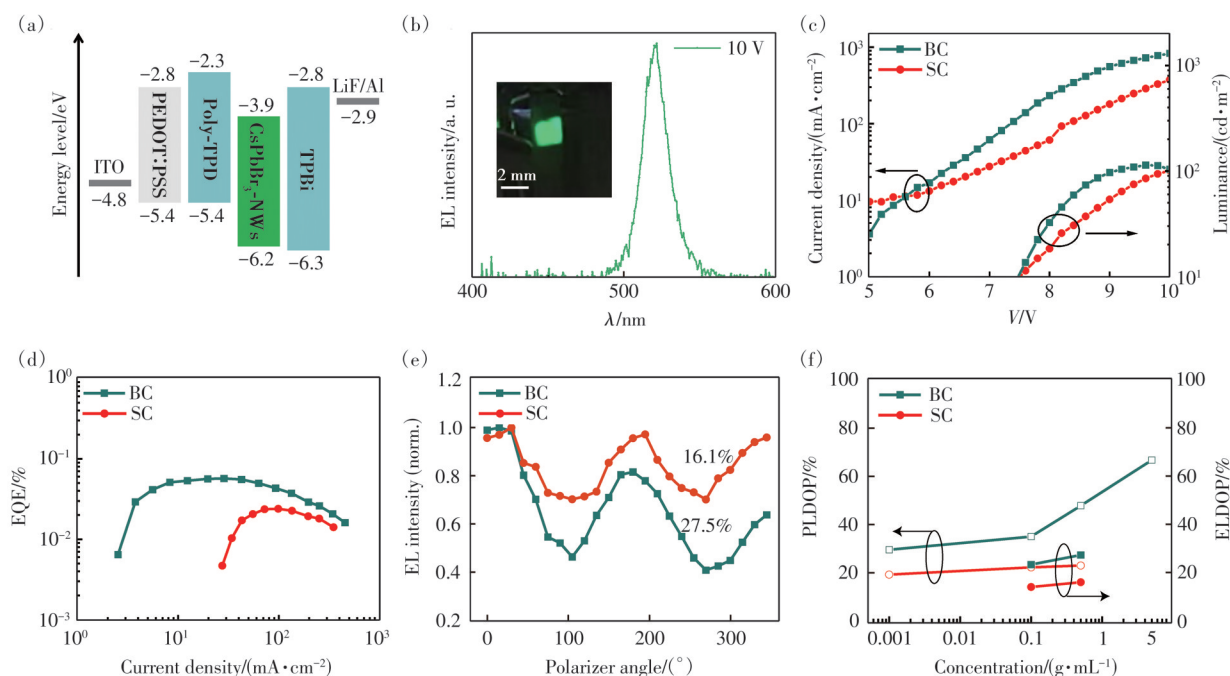


图 5 (a) 器件能级排列示意图; (b) 器件电致发光光谱, 插图为器件发光实拍图; (c) 旋涂和刮涂的 L - J - V 曲线; (d) EQE - J 曲线; (e) 使用 0.5 g/mL 纳米线悬浮液涂布成膜的器件的 $ELDOP$ 曲线; (f) $PLDOP$ -纳米线浓度- $ELDOP$ 关系图

Fig.5 (a) Energy level arrangement of device. (b) EL spectrum of the device, with an inset photograph showing the device in emission. (c) L - J - V curves of spin coating (SC) and blade coating (BC). (d) EQE - J curves. (e) $ELDOP$ curves of devices prepared from 0.5 g/mL nanowire dispersions. (f) $PLDOP$ -Concentration- $ELDOP$ curves

剪切力传导效率^[28]。同种工艺的 $ELDOP$ 始终低于 $PLDOP$, 这可能是由于器件启亮的条件限制高于薄膜, 导致器件在电致发光的条件下中高取向性区域启亮概率显著低于光致发光。另外, 刮涂工艺器件的 $ELDOP$ 曲线存在衰减趋势, 这对器件线偏振性能测试是不利的。在偏置电压下, 材料本身的不稳定性可能导致发光层被破坏^[29]; 界面的不良接触也可能导致器件发生热积累而导致器件被击穿。钙钛矿纳米线材料的性能优化有待进一步研究, 刮涂工艺和流体动力学研究也可能有助于获得更优质的各向异性薄膜并用于器件的制备。

4 结 论

本工作通过定向施加剪切力并调控纳米线悬

浮液的聚集态, 成功解决了无模板法钙钛矿纳米线定向组装成膜的难题。与传统的旋涂工艺相比, 刮涂工艺所制备的薄膜展现出更显著的取向一致性。当纳米线悬浮液浓度从 0.001 g/mL 逐渐升高至 5.0 g/mL, 并结合刮涂工艺施加定向剪切力时, 所获得的薄膜 $PLDOP$ 最高可达 66.7%; 而在 0.5 g/mL 浓度下, 刮涂工艺制备的器件 $ELDOP$ 最高可达 27.5%。相比之下, 通过旋涂法制备的薄膜 $PLDOP$ 仅为 22.5%, $ELDOP$ 仅为 16.1%。本工作为基于钙钛矿纳米线的偏振发光二极管的制备以及发光偏振度的提升提供了有益的参考。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20250045>

参 考 文 献:

- [1] TONG Y, BOHN B J, BLADT E, *et al.* From precursor powders to $CsPbX_3$ perovskite nanowires: one-pot synthesis, growth mechanism, and oriented self-assembly [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2017, 56(44): 13887-13892.
- [2] YANG X Y, MA L, YU M T, *et al.* Focus on perovskite emitters in blue light-emitting diodes [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2023, 12(1): 177.
- [3] 秦向前, 黎明亮, 赵亚萍, 等. 新型钴基空穴传输层助力高效钙钛矿发光二极管 [J]. *发光学报*, 2023, 44(3):

- 548-558.
- QIN X Q, LI M L, ZHAO Y P, *et al.* High-efficiency perovskite light-emitting diodes *via* novel cobalt-based hole transporter layer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(3): 548-558. (in Chinese)
- [4] YU M B, QIN T X, GAO G, *et al.* Multiple defects renovation and phase reconstruction of reduced-dimensional perovskites *via in situ* chlorination for efficient deep-blue (454 nm) light-emitting diodes [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 102.
- [5] BAI W H, XUAN T T, ZHAO H Y, *et al.* Perovskite light-emitting diodes with an external quantum efficiency exceeding 30% [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(39): 2302283.
- [6] LIN K B, XING J, QUAN L N, *et al.* Perovskite light-emitting diodes with external quantum efficiency exceeding 20 percent [J]. *Nature*, 2018, 562(7726): 245-248.
- [7] YUAN S, DAI L J, SUN Y Q, *et al.* Efficient blue electroluminescence from reduced-dimensional perovskites [J]. *Nat. Photon.*, 2024, 18(5): 425-431.
- [8] WEI Y P, XU Y Y, WANG Q, *et al.* CsPbBr₃ nanowire polarized light-emitting diodes through mechanical rubbing [J]. *Chem. Commun.*, 2020, 56(40): 5413-5416.
- [9] YE J Z, REN A B, DAI L J, *et al.* Direct linearly polarized electroluminescence from perovskite nanoplatelet superlattices [J]. *Nat. Photon.*, 2024, 18(6): 586-594.
- [10] GENG J. Three-dimensional display technologies [J]. *Adv. Opt. Photon.*, 2013, 5(4): 456-535.
- [11] GAO Y, ZHAO L Y, SHANG Q Y, *et al.* Ultrathin CsPbX₃ nanowire arrays with strong emission anisotropy [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(31): 1801805.
- [12] LIN C H, KANG C Y, WU T Z, *et al.* Giant optical anisotropy of perovskite nanowire array films [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(14): 1909275.
- [13] WANG J Y, WEI Y P, XU Y Y, *et al.* Photoluminescence and electroluminescence properties of aligned CsPbBr₃ nanowire films prepared by off-center spin-coating [J]. *Synth. Met.*, 2020, 267: 116481.
- [14] SETH S, SAMANTA A. A Facile methodology for engineering the morphology of CsPbX₃ perovskite nanocrystals under ambient condition [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6(1): 37693.
- [15] LI H Z, LU W W, ZHAO G L, *et al.* Synthesis of size-controllable self-assembled CsPbBr₃ perovskite nanowires: implications for photoemission with less recombination [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2022, 5(4): 5527-5534.
- [16] LI C, ZHAO L Y, FAN H, *et al.* Graphoepitaxy of large scale, highly ordered CsPbBr₃ nanowire array on muscovite mica (001) driven by surface reconstructed grooves [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2020, 8(19): 2000743.
- [17] LIU Z, SHANG Q Y, LI C, *et al.* Temperature-dependent photoluminescence and lasing properties of CsPbBr₃ nanowires [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 114(10): 101902.
- [18] SEBASTIAN M, PETERS J A, STOUPOUS C C, *et al.* Excitonic emissions and above-band-gap luminescence in the single-crystal perovskite semiconductors CsPbBr₃ and CsPbCl₃ [J]. *Phys. Rev. B*, 2015, 92(23): 235210.
- [19] SARAN R, HEUER-JUNGEMANN A, KANARAS A G, *et al.* Giant bandgap renormalization and exciton-phonon scattering in perovskite nanocrystals [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(17): 1700231.
- [20] FU J H, XU Q, HAN G F, *et al.* Hot carrier cooling mechanisms in halide perovskites [J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8(1): 1300.
- [21] ZHAO L Y, GAO Y, SU M, *et al.* Vapor-phase incommensurate heteroepitaxy of oriented single-crystal CsPbBr₃ on GaN: toward integrated optoelectronic applications [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(9): 10085-10094.
- [22] YUAN Y, ZHANG D, ZHANG F H, *et al.* Crystallographic orientation dependence of nanopattern morphology and size in electropolished polycrystalline and monocrystalline aluminum: an EBSD and SEM study [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 2020, 167(11): 113505.
- [23] 叶子青, 张灯亮, 段兴兴, 等. 基于氟代苯乙胺有机阳离子的准二维钙钛矿发光二极管 [J]. *发光学报*, 2022, 43(8): 1244-1255.
- YE Z Q, ZHANG D L, DUAN X X, *et al.* Quasi-2D perovskite light-emitting diodes with fluorophenethylammonium as organic cations [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2022, 43(8): 1244-1255. (in Chinese)
- [24] 曹雨, 王娜娜, 伊昌, 等. 钙钛矿发光二极管: 下一代发光与显示技术 [J]. *光学学报*, 2022, 42(17): 1733001.
- CAO Y, WANG N N, YI C, *et al.* Perovskite light-emitting diodes: next-generation lighting and display technology [J].

- Acta Opt. Sinica*, 2022, 42(17): 1733001. (in Chinese)
- [25] 张涛, 龚思敏, 陈平, 等. 利用多氟丙烯酸酯添加剂提升准二维钙钛矿发光二极管性能 [J]. 物理化学学报, 2023, 39(12): 2301024.
- ZHANG T, GONG S M, CHEN P, *et al.* Incorporation of a polyfluorinated acrylate additive for high-performance quasi-2D perovskite light-emitting diodes [J]. *Acta Phys. -Chim. Sinica*, 2023, 39(12): 2301024. (in Chinese)
- [26] HAO Z D, ZHANG J H, ZHANG X, *et al.* An intense blue-emitting phosphor for near-ultraviolet pumped white-light-emitting diodes: Ce³⁺-activated β -Ca₂SiO₄ [J]. *J. Lumin.*, 2014, 152: 40-43.
- [27] 黎明亮, 林克斌, 卢建勋, 等. 氯化铯掺杂 PEDOT:PSS 助力高效率、高亮度钙钛矿发光二极管 [J]. 液晶与显示, 2021, 36(1): 141-148.
- LI M L, LIN K B, LU J X, *et al.* PEDOT:PSS doped with cesium chloride for highly efficient and bright metal halide perovskite light-emitting diodes [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2021, 36(1): 141-148. (in Chinese)
- [28] 牧启辉, 郭玉强, 高亮, 等. 聚氧乙烯脱水山梨醇单油酸酯对聚合物网络液晶电光特性的影响 [J]. 液晶与显示, 2018, 33(5): 381-388.
- MU Q H, GUO Y Q, GAO L, *et al.* Effect of polyoxyethylene sorbitan monooleate surfactant on polymer-network liquid crystal display [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2018, 33(5): 381-388. (in Chinese)
- [29] 石文奇, 田宏, 陆玉新, 等. 金属卤化物钙钛矿纳米光电材料的研究进展 [J]. 物理学报, 2021, 70(8): 087303.
- SHI W Q, TIAN H, LU Y X, *et al.* Research progress of metal halide perovskite nanometer optoelectronic materials [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2021, 70(8): 087303. (in Chinese)



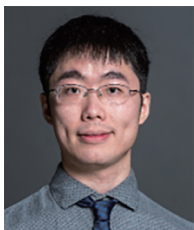
苏庆国(1999-),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,2022年于安徽科技学院获得学士学位,主要从事钙钛矿纳米线材料与器件的研究。

E-mail: qgsu2023@sinano.ac.cn



陈琪(1986-),男,江苏苏州人,博士,研究员,博士生导师,2014年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事新型显示、新能源器件的表界面研究。

E-mail: qchen2011@sinano.ac.cn



王佩玺(1992-),男,河南开封人,博士,副研究员,硕士生导师,2018年于不列颠哥伦比亚大学获得博士学位,主要从事钙钛矿材料与器件的研究。

E-mail: pxwang2020@sinano.ac.cn