发光学报
CHINESE JOURNAL OF LUMINESCENCE
中文核心期刊
主管：中国科学院
主办：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所
中国物理学会发光分会
主编：申德振

溶液法制备$CsPbBr_3$钙钛矿薄膜微观结构控制与发光特性

郑悦婷，郑鑫，胡海龙，郭太良，林金堂，李福山

引用本文:
郑悦婷, 郑鑫, 胡海龙, 等. 溶液法制备$CsPbBr_3$钙钛矿薄膜微观结构控制与发光特性[J]. 发光学报, 2020, 41(7): 775-781.
ZHENG Yue-ting, ZHENG Xin, HU Hai-long, et al. Microstructure and Luminescence Characteristics of $CsPbBr_3$ Perovskite Films by Solution Process[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(7): 775-781.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/fgxb20204107.0775

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用PVP添加剂提高钙钛矿太阳能电池光伏性能
Enhancement of The Photovoltaic Performance of CH3 NH3 PbI3 Perovskite Solar Cells by Using Polyvinylpyrrolidone Additive
发光学报. 2016, 37(1): 56-62 https://doi.org/10.3788/fgxb20163701.0056

以硫氰酸亚铜作为空穴注入层的钙钛矿发光器件
Perovskite Light-emitting Devices Based on CuSCN Hole Injection Layer
发光学报. 2019, 40(4): 504-510 https://doi.org/10.3788/fgxb20194004.0504

利用吡啶添加剂提高钙钛矿太阳能电池的光伏性能
Improvement of The Performance of Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells by Using Pyridine as Additive
发光学报. 2017, 38(11): 1503-1509 https://doi.org/10.3788/fgxb20173811.1503

CsPbBr3钙钛矿量子点微晶的制备及发光性能
Preparation and Luminescence Properties of CsPbBr3 Perovskite Quantum Dot Microcrystals
发光学报. 2019, 40(9): 1073-1078 https://doi.org/10.3788/fgxb20194009.1073

纳米ZnO墨水的溶剂及浓度优化及其在钙钛矿太阳能电池中的应用
Solvent and Concentration Optimization of Nano-ZnO Inks and Their Application in Perovskite Solar Cells
发光学报. 2016, 37(3): 265-273 https://doi.org/10.3788/fgxb20163703.0265

文章编号：1000-7032(2020)07-0775-07

溶液法制备 $CsPbBr_3$ 钙钛矿薄膜微观结构控制与发光特性

郑悦婷，郑　鑫，胡海龙，郭太良，林金堂，李福山*
（福州大学 物理与信息工程学院，平板显示技术国家地方联合工程实验室，福建 福州　350108）

摘要： 近年来，金属卤化物钙钛矿以其光吸收系数高、色纯度高、色域广、发光波长连续可调、光致发光量子产率高、载流子扩散长度大和成分稳定不易分解等优点，成为光电子应用领域极具潜力的新材料，其在太阳能电池、发光二极管、忆阻器、激光器、光电探测器和防伪标签等方面均有出色的表现，并且可通过简单的全溶液法制备，为印刷工艺的结合、大尺寸生产和产业化提供了可能。实验采用一步溶液法制备了原位生长的溴化铅铯钙钛矿薄膜，其在(100)晶面有择优取向，且相应的晶面间距小于 PDF 标准卡片值。通过增大前驱液的浓度，使样品的形貌结构产生差异，薄膜的连续性和致密性随之提高，晶粒得到细化，在 375 nm 激发光下的光致发光(PL)强度得到约 5 倍的提升，且 PL 峰位蓝移 6 nm，同时该过程导致的晶格畸变使其 PL 光谱半高宽(FWHM)增大超过 2 nm。

关　键　词： 钙钛矿；原位生长；结构特性；发光特性；前驱液浓度
中图分类号： O482.31　　**文献标识码：** A　　**DOI：** 10.37188/fgxb20204107.0775

Microstructure and Luminescence Characteristics of $CsPbBr_3$ Perovskite Films by Solution Process

ZHENG Yue-ting, ZHENG Xin, HU Hai-long, GUO Tai-liang, LIN Jin-tang, LI Fu-shan*
(*National and Local Joint Engineering Laboratory of Flat Panel Display Technology*, *College of Physics and Information Engineering*, *Fuzhou University*, *Fuzhou* 350108, *China*)
* *Corresponding Author*, *E-mail*: *fsli@fzu.edu.cn*

Abstract: In recent years, metal halide perovskites have become new promising materials in the field of optoelectronic applications due to the advantages of high optical absorption coefficient, high color purity, wide color gamut, continuously adjustable luminescence wavelength, high photoluminescence quantum yield, large carrier diffusion length, stable ingredients and not easy to decompose, and have excellent performance in solar cells, light-emitting diodes, memristors, lasers, photodetectors and anti-counterfeiting labels. Furthermore, perovskites can be made by simple methods like solution synthesis, which provides the possibility of combining it with the printing process, large-scale production and industrialization. In this experiment, solution-processed $CsPbBr_3$ perovskite films grown *in situ* have a preferred orientation on the (100) crystal plane, and its interplanar spacing is smaller than the value from PDF standard card. As the concentration of precursor increases, the morphological structure of samples varied, continuity and compactness of films were improved, crystal grains were refined, the photoluminescence(PL) intensity excited by light at 375 nm

收稿日期： 2020-05-03；**修订日期：** 2020-05-12
基金项目： 国家自然科学基金(U1605244)；国家重点研发计划(2016YFB0401305)资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China(U1605244); National Key Research & Development Program of China(2016YFB0401305)

was approximately 5 times original, the PL peak position blue shifted by 6 nm, and the lattice distortion caused by this process increased the full width at half maximum(FWHM) of the PL spectrum by more than 2 nm.

Key words: perovskite; *in situ* growth; structure characteristics; luminescence characteristics; precursor concentration

1 引 言

钙钛矿是一类与钛酸钙($CaTiO_3$)有着相同晶体结构的化合物总称,其原子或基团以 ABX_3 的形式在对称度极高的晶格上有序排布[1]。含铅钙钛矿具有高的光吸收系数和窄的发光光谱半高宽(高色纯度),其发光波长可通过调节其组分在整个可见光范围内改变[2-5],还具有大的载流子扩散长度和高的光致发光量子产率(PLQY)[6-7],近年来在太阳能电池(PSC)、发光二极管(LED)、忆阻器、激光器(LASER)、光电探测器、防伪标签等方面应用而受到了广泛关注[8-13]。然而,最先崭露头角的有机金属卤化物钙钛矿却存在稳定性差这一致命弱点,占据其阳离子位置的有机组分容易挥发或分解[14]。因此,在稳定性方面拥有先天优势的全无机钙钛矿逐步进入研究视野[15]。相对于溴化铅甲胺($MAPbBr_3$),溴化铅铯($CsPbBr_3$)钙钛矿多晶薄膜具有更高的热稳定性[14],这对于提升器件工作稳定性无疑十分重要。此外,均匀、致密的钙钛矿功能层除了可以通过双源共蒸法获得[15-16],还可以通过简单的全溶液法制备[17-25],这为器件的大尺寸和产业化的实现打下了基础,并为其与印刷工艺的结合提供了可能。

2009 年,Kojima 等首先利用一步溶液法实现了钙钛矿功能层在太阳能电池中的应用,基于碘化铅甲胺的器件获得了 3.8% 的光电转换效率[17],为钙钛矿光电器件的制备开辟了一条新道路。在原位生长钙钛矿薄膜的过程中,从溶剂的选择、前驱液的配制、旋涂的参数到退火的环境,任何一个环节的改变都会对最终的样品造成影响[25]。当应用于发光器件中的钙钛矿薄膜存在孔洞时,将增加激子的非辐射复合,导致器件发光效率降低[26]。因此,明确制备条件与薄膜样品微观结构之间的对应关系,实现钙钛矿薄膜的可控制备,对器件的光电性能优化具有重要意义。本文以全无机钙钛矿溴化铅铯的前驱液浓度为变量,探究其与原位生长的溴化铅铯多晶薄膜形貌结构及发光特性之间的关系,研究结果将为深入理解钙钛矿薄膜生长机理及其光电器件应用提供理论和实验依据。

2 实 验

2.1 材料及制备

一步溶液法制备溴化铅铯钙钛矿薄膜的具体过程如图 1 所示。制备过程中所用的溴化铯(CsBr,99.5%)、溴化铅($PbBr_2$,99.0%)和二甲基亚砜(DMSO,99.9%)购于上海阿拉丁(Aladdin)生化科技股份有限公司,聚乙烯吡咯烷酮(polyvinyl pyrrolidone,PVP,M_V ~40 000)购于西格玛奥德里奇(Sigma-Aldrich)(上海)贸易有限公司。上述试

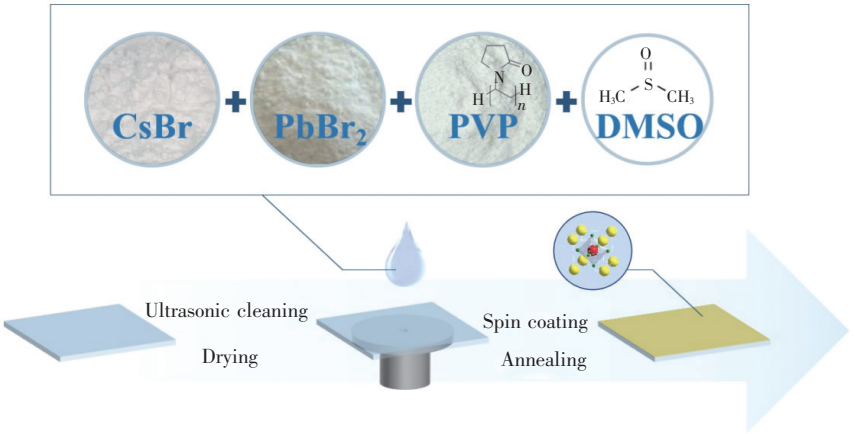

图 1 一步溶液法制备溴化铅铯钙钛矿薄膜过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of one-step solution synthesis of $CsPbBr_3$ perovskite thin films

剂均为购买后直接使用，无额外的提纯过程。钠钙玻璃基板购于益阳华南湘城科技有限公司。玻璃基板在使用前先经玻璃清洗剂洗涤，然后分别用丙酮、无水乙醇和去离子水依次超声清洗 10 min，取出后放入真空烘箱中干燥，再用真空等离子清洗机处理 10 min。

配制不同浓度的溴化铅铯前驱液时，按照表 1 中的比例称量出每组溴化铯、溴化铅和 PVP，分别溶于 1 mL DMSO 中后，60 ℃恒温加热搅拌 2 h，使固体粉末完全溶解，得到的澄清溶液用孔径为 0.22 μm 的尼龙过滤头滤除杂质后使用。

将 5 种不同浓度的前驱液分别滴在清洗过的玻璃基板上，使基板在旋涂机中以 2 000 r · min^{-1} 的转速旋转 40 s 后，取出玻璃基板并置于 90 ℃的加热台上退火 10 min。旋涂及退火过程均在充满氮气的手套箱中进行。

表 1　配制各浓度溴化铅铯前驱液所需试剂比例

Tab. 1　Proportion of reagents for $CsPbBr_3$ precursor solution of various concentrations

溴化铯(CsBr)/mmol	溴化铅($PbBr_2$)/mmol	聚乙烯吡咯烷酮(PVP)/mg	二甲基亚砜(DMSO)/mL	$CsPbBr_3$ 前驱液浓度/(mol · L^{-1})
0.05	0.05	100	1	0.05
0.75	0.75	100	1	0.75
0.1	0.1	100	1	0.1
0.125	0.125	100	1	0.125
0.15	0.15	100	1	0.15

2.2　表征

荧光显微镜照片通过奥林巴斯(Olympus) BX51M 荧光显微镜采集。光致发光(PL)光谱数据通过日立 F-4600 荧光分光光度计采集获得，使用波长为 375 nm 的激发光扫描。X 射线衍射(XRD)数据通过美国 CEM 公司 X 射线多晶衍射仪采集获得。

3　结果与讨论

3.1　荧光显微镜照片

图 2 左侧纵列为不同浓度前驱液制成的钙钛矿薄膜的荧光显微镜照片，中间纵列的蓝色区域对应荧光照片中突起的晶粒位置，右侧纵列的红色区域对应荧光照片中的薄膜孔洞。从图 2(a) ~ (c)中可以观察到，前驱液浓度为 0.05 mol · L^{-1} 的溴化铅铯薄膜上分布着大量微米级到纳米级的不规则晶粒和孔洞，发光情况并不理想。与之相比，图 2(d) ~ (f)中前驱液浓度为 0.075 mol · L^{-1} 的溴化铅铯薄膜虽然仍有孔洞存在，但孔洞与不规则晶体的尺寸和分布位置趋于均匀，光致发光的亮度也有所提升。在图 2(g) ~ (i)中，前驱液浓度为 0.1 mol · L^{-1} 的溴化铅铯薄膜上的孔洞尺寸大大减小，同时出现了少量尺寸和分布都较为均匀的小晶粒，视野中的样品发光均匀。当前驱液的浓度升高至 0.125 mol · L^{-1} 时，显微镜下的薄膜已经几乎观察不到孔洞(图 2(j) ~ (l))，且有大量纳米级晶粒均匀分布在薄膜之上，发光亮度也随之提高。从前驱液浓度为 0.15 mol · L^{-1} 的溴化铅铯薄膜的显微照片(图 2(m) ~ (o))中可以看出，薄膜致密毫无孔洞，表面分布有少量尺寸均匀的晶粒，光致发光亮度高。通过对比 5 个样品，发现在实验所采用的浓度范围内，样品的致密程度与前驱液的浓度呈正相关；经初步观察，样品的光致发光强度也随前驱液浓度的提高而有所上升。

3.2　光致发光光谱分析

由不同样品在同一条件下测得的光致发光光谱(图 3(a))可以看出，5 个样品的发光强度随前驱液浓度的升高而依次增大，发光峰位则随浓度的升高有向短波长方向移动的趋势。从图 3(b)中可以更直观地看出钙钛矿薄膜的光致发光强度和发光峰位置随前驱液浓度变化的趋势：随着前驱液的浓度由 0.05 mol · L^{-1} 升高至 0.15 mol · L^{-1}，样品的光致发光强度增加了 4 倍，并且发光强度增大的趋势渐缓，而其光致发光峰的位置则由 524 nm 逐步移动至 518 nm 处。结合图 2 中的薄膜显微图像可知，在实验所采用的浓度变化范围内，随着钙钛矿薄膜孔洞的减少、致密性的提

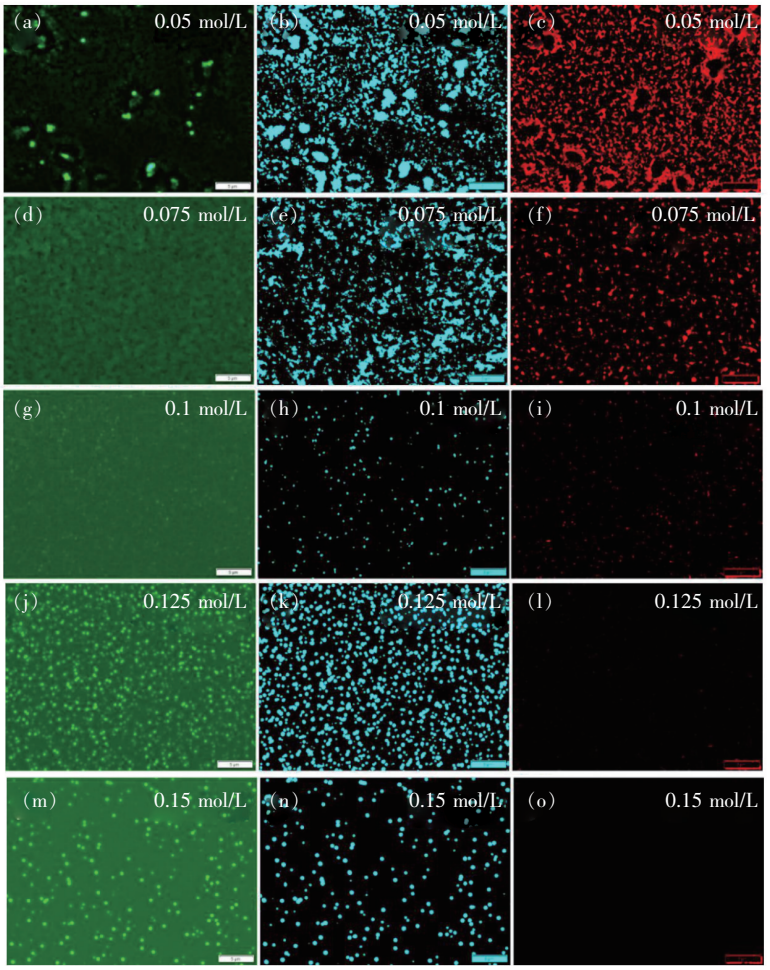

图 2 (a)、(d)、(g)、(j)、(m)是浓度依次为 0.05,0.075,0.1,0.125,0.15 mol · L^{-1}的前驱液制备的溴化铅铯钙钛矿薄膜的荧光显微镜照片(各图像右下的角比例尺均为 5 μm);(b)、(e)、(h)、(k)、(n)用蓝色标示出不平整的晶粒位置;(c)、(f)、(i)、(l)、(o)用红色标示出薄膜孔隙的位置。

Fig. 2 (a), (d), (g), (j), (m) Fluorescence micrographs of $CsPbBr_3$ perovskite films grown out from precursors with concentrations of 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15 mol · L^{-1} in order (the plotting scale of the lower right corner of each image is 5 μm). (b), (e), (h), (k), (n) Mark positions of uneven grains in blue. (c), (f), (i), (l), (o) Mark positions of holes in films in red.

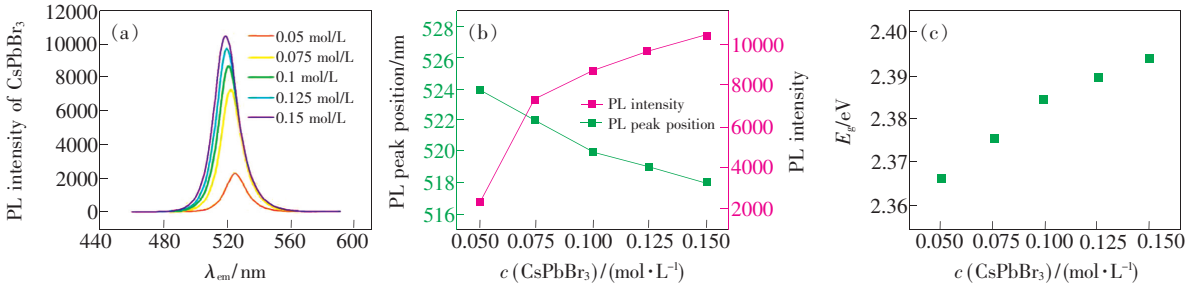

图 3 (a)前驱液浓度分别为 0.05,0.075,0.1,0.125,0.15 mol · L^{-1}的溴化铅铯钙钛矿薄膜光致发光(PL)光谱;(b)不同浓度前驱液制备的溴化铅铯钙钛矿薄膜 PL 强度和 PL 峰位与其前驱液浓度对应关系图;(c)各个样品平均禁带宽度的粗略估算值与前驱液浓度的关系。

Fig. 3 (a) Photoluminescence (PL) spectra of $CsPbBr_3$ perovskite films grown out from precursors with concentrations of 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15 mol · L^{-1} respectively. (b) Correspondence of PL peak position and PL peak value of $CsPbBr_3$ perovskite films and the concentration of precursor they were grown out from. (c) Relationship between rough estimate values of average band gaps of samples and the precursor concentration.

高，样品的光致发光特性会发生改变，其发光强度能得到约 5 倍的提升，但同时发光峰会产生约 6 nm 的蓝移，如图 3(b)所示。根据公式 $E_g = \frac{hc}{\lambda}$（其中 E_g 为禁带宽度，$h = 6.62607015 \times 10^{-34}$ J·s 为普朗克常量，$c = 2.99792458 \times 10^8$ m/s 为真空光速，λ 为辐射波长），代入各个样品发光峰的位置，可以粗略估算其禁带宽度。从图 3(c)可以看出，E_g 的估计值随前驱液浓度的升高而增大；当前驱液浓度由 0.05 mol·L^{-1} 增至 0.15 mol·L^{-1}，该值增大近 0.03 eV。带隙的增大对应着半导体晶粒尺寸的减小，说明前驱液浓度的增大能够引起钙钛矿薄膜晶粒的细化。

3.3　X 射线衍射谱分析

图 4(a)为 5 个样品的 X 射线衍射(XRD)图谱与溴化铅铯钙钛矿晶体 XRD 标准卡片# 54-0752 的对比，在图中可以观察到(100)、(110)、(200)和(400)4 个较明显的特征峰，但(110)和(400)衍射峰十分微弱，说明(100)晶面是该方法制备的溴化铅铯薄膜中晶体的择优生长取向。对各 XRD 图谱中的(200)衍射峰进行归一化处理，并放大其横坐标(图 4(b))，可以观察到各衍射峰的位置几乎重合，说明前驱液浓度的变化并不会改变溴化铅铯钙钛矿薄膜(100)晶面的间距。但实际的衍射谱与图 4(b)中虚线所表示的标准卡片(200)衍射峰位置相比，其衍射角右移了约 0.1°。根据布拉格方程 $2d\sin\theta = n\lambda$（其中，d 为晶面间距，θ 为入射 X 射线与相应晶面的夹角，n 为衍射级数，λ 为 X 射线的波长），对于(200)衍射峰，n 和 λ 均为确定值，因此 θ 值的增大反映了 d 值的减小，说明制备的溴化铅铯薄膜中晶体的(100)晶面间距小于标准卡片值。此外，随着前驱液浓度由 0.05 mol·L^{-1} 升高至 0.15 mol·L^{-1}，XRD 的峰形先增宽，然后逐渐在左侧分裂出一个小的尖峰，高度约为主峰的 $\frac{1}{4}$。而后两个峰的分离程度加大，说明

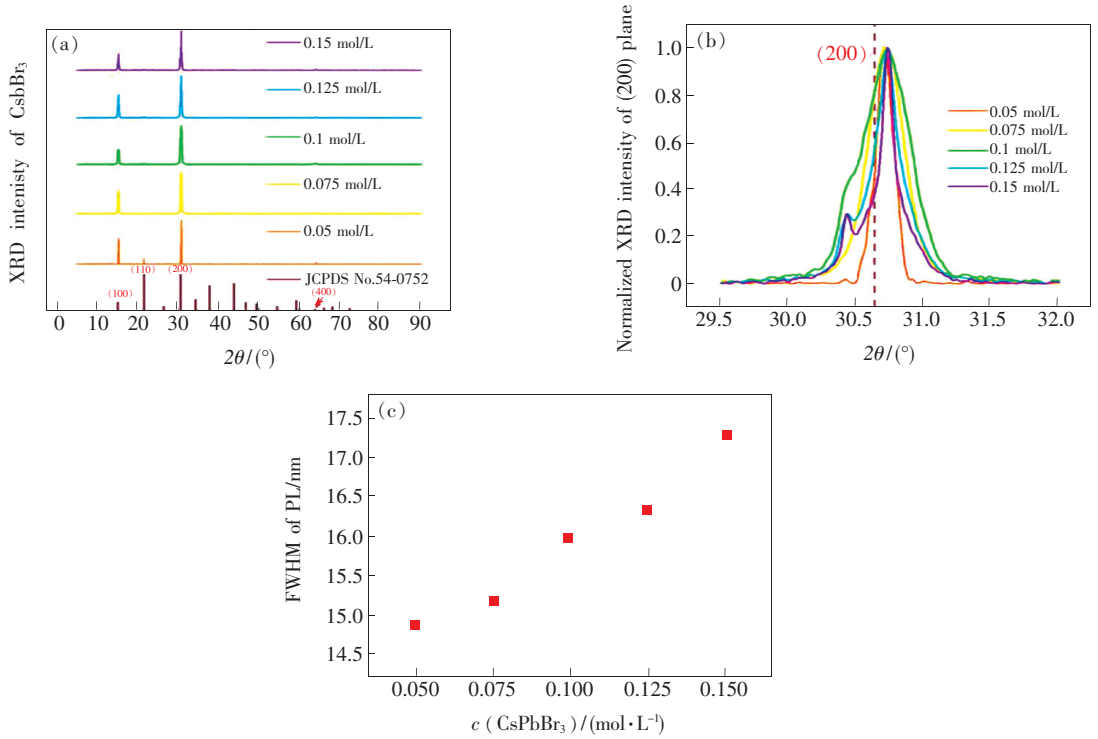

图 4　(a)前驱液浓度分别为 0.05，0.075，0.1，0.125，0.15 mol·L^{-1} 的溴化铅铯钙钛矿薄膜 X 射线衍射(XRD)谱；(b)溴化铅铯薄膜 XRD 的(200)衍射峰值归一化图像及标准卡片# 54-0752 的(200)衍射峰位置(纵向虚线)；(c)图 3(a)中 PL 光谱的半高宽(FWHM)与前驱液浓度的关系。

Fig. 4　(a) X-ray diffraction (XRD) patterns of $CsPbBr_3$ perovskite films grown out from precursors with concentrations of 0.05, 0.075, 0.1, 0.125, 0.15 mol·L^{-1} respectively. (b) Normalized XRD at (200) plane of $CsPbBr_3$ films and the standard (200) diffraction peak position of card # 54-0752 represented by a longitudinal dotted line. (c) Relationship between the full width at half maximum (FWHM) of the PL spectrum in Fig. 3(a) and the precursor concentration.

前驱液浓度的增大会引起部分晶格畸变,使其部分晶体由立方晶相转变为四方晶相,而晶格畸变导致的系统混乱度增大也解释了样品光致发光光谱半高宽随前驱液增大(图4(c))的原因。

4 结 论

采用一步溶液法制备了溴化铅铯钙钛矿薄膜,其(100)晶面为择优生长取向,且该晶面的间距小于JCPDS卡片值。通过改变该方法中前驱液浓度制备的薄膜,其连续性和致密性随着前驱液浓度的增大而提升。当溴化铅铯前驱液的浓度由0.05 mol·L^{-1}增大到0.15 mol·L^{-1}时,薄膜晶粒得到细化,其在375 nm激发光下的光致发光强度可随之得到约5倍的提升,光致发光峰的位置随之由524 nm蓝移至518 nm处,禁带宽度增大近0.03 eV,但前驱液浓度升高导致的晶格畸变使其PL光谱半高宽增大超过2 nm。

参 考 文 献:

[1] KAY H F, BAILEY P C. Structure and properties of $CaTiO_3$[J]. *Acta Crystallogr.*, 1957, 10(3): 219-226.

[2] IM J H, LEE C R, LEE J W, *et al.*. 6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell [J]. *Nanoscale*, 2011, 3(10): 4088-4093.

[3] PROTESESCU L, YAKUNIN S, BODNARCHUK M I, *et al.*. Nanocrystals of cesium lead halide perovskites($CsPbX_3$, X = Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut [J]. *Nano Lett.*, 2015, 15(6): 3692-3696.

[4] LIU Y H, XU Q, CHANG S, *et al.*. Brightly luminescent and color-tunable green-violet-emitting halide perovskite $CH_3NH_3PbBr_3$ colloidal quantum dots: an alternative to lighting and display technology [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2018, 20(30): 19950-19957.

[5] LU P, LU M, WANG H, *et al.*. Metal halide perovskite nanocrystals and their applications in optoelectronic devices [J]. *InfoMat*, 2019, 1(4): 1-29.

[6] CHO H, JEONG S H, PARK M H, *et al.*. Overcoming the electroluminescence efficiency limitations of perovskite light-emitting diodes [J]. *Science*, 2015, 350(6265): 1222-1225.

[7] SWARNKAR A, CHULLIYIL R, RAVI V K, *et al.*. Colloidal $CsPbBr_3$ perovskitenanocrystals: luminescence beyond traditional quantum dots [J]. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2015, 54(51): 15424-15428.

[8] KIM Y C, BAEK S D, MYOUNG J M. Enhanced brightness of methylammonium lead tribromideperovskite microcrystal-based green light-emitting diodes by adding hydrophilic polyvinylpyrrolidone with oleic acid-modified ZnO quantum dot electron transporting layer [J]. *J. Alloys Compd.*, 2019, 786: 11-17.

[9] LI Y X, ZHANG X Y, HUANG H, *et al.*. Advances in metal halide perovskitenanocrystals: synthetic strategies, growth mechanisms, and optoelectronic applications [J]. *Mater. Today*, 2020, 32: 204-221.

[10] MA F M, ZHU Y B, XU Z W, *et al.*. Optoelectronic perovskite synapses for neuromorphic computing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(11): 1908901.

[11] WANG N, LIU W B, ZHANG Q C. Perovskite-based nanocrystals: synthesis and applications beyond solar cells [J]. *Small Methods*, 2018, 2(6): 1700380.

[12] LIU Y, LI F S, QIU L C, *et al.*. Fluorescent microarrays of *in situ* crystallized perovskite nanocomposites fabricated for patterned applications by using inkjet printing [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(2): 2042-2049.

[13] YIN W J, YANG J H, KANG J, *et al.*. Halide perovskite materials for solar cells: a theoretical review [J]. *J. Mater. Chem.*, 2015, 3(17): 8926-8942.

[14] KULBAK M, GUPTA S, KEDEM N, *et al.*. Cesium enhances long-term stability of lead bromide perovskite-based solar cells [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2016, 7(1): 167-172.

[15] DUAN J L, XU H Z, SHA W E I, *et al.*. Inorganic perovskite solar cells: an emerging member of the photovoltaic community [J]. *J. Mater. Chem.*, 2019, 7(37): 21036-21068.

[16] LIU M Z, JOHNSTON M B, SNAITH H J, *et al.*. Efficient planar heterojunctionperovskite solar cells by vapour deposition [J]. *Nature*, 2013, 501(7467): 395-398.

[17] MATSUSHIMA T, BENCHEIKH F, KOMINO T, *et al.*. High performance from extraordinarily thick organic light-emitting diodes [J]. *Nature*, 2019, 572(7770): 502-506.

[18] KOJIMA A, TESHIMA K, SHIRAI Y, *et al.*. Organometalhalide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, 131(17): 6050-6051.

[19] YOU J B, HONG Z R, YANG Y, *et al.*. Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility [J]. *ACS Nano*, 2014, 8(2): 1674-1680.

[20] DOCAMPO P, HANUSCH F C, STRANKS S D, *et al.*. Solution deposition-conversion for planar heterojunction mixed halide perovskite solar cells [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2014, 4(14): 1400355.

[21] CHO H, WOLF C, KIM J S, *et al.*. High-efficiency solution-processed inorganic metal halide perovskite light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2017, 29(31): 1700579.

[22] LING Y C, TIAN Y, WANG X, *et al.*. Enhanced optical and electrical properties of polymer-assisted all-inorganic perovskites for light-emitting diodes [J]. *Adv. Mater.*, 2016, 28(40): 8983-8989.

[23] WANG Z B, LUO Z, ZHAO C Y, *et al.*. Efficient and stable pure green all-inorganic perovskite $CsPbBr_3$ light-emitting diodes with a solution-processed NiO_x interlayer [J]. *J. Phys. Chem.* C, 2017, 121(50): 28132-28138.

[24] 马雪，庄仕伟，韩丽锦，等. 合成及薄膜制备条件对 $CsPbBr_3$ 全无机钙钛矿量子点特性的影响 [J]. 发光学报, 2019, 40(8): 949-955.
MA X, ZHUANG S W, HAN L J, *et al.*. Effects of synthesis and film preparation conditions on properties of $CsPbBr_3$ inorganic perovskite quantum dots [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2019, 40(8): 949-955. (in Chinese)

[25] JUNG M, JI S G, KIM G, *et al.*. Perovskite precursor solution chemistry: from fundamentals to photovoltaic applications [J]. *Chem. Soc. Rev.*, 2019, 48(7): 2011-2038.

[26] 章楼文，沈少立，李露颖，等. 铯铅卤化物钙钛矿型平面异质结 LED 的应用与发展 [J]. 无机材料学报, 2019, 34(1): 37-48.
ZHANG L W, SHEN S L, LI L Y, *et al.*. Application and development of cesium lead halide perovskite based planar heterojunction LEDs [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2019, 34(1): 37-48. (in Chinese)

郑悦婷(1994 -)，女，福建漳州人，硕士研究生，2017 年于福州大学获得学士学位，主要从事钙钛矿量子点合成及其发光特性的研究。
E-mail: 617240938@qq.com

李福山(1978 -)，男，福建莆田人，博士，研究员，博士研究生导师，2005 年于北京大学获得博士学位，主要从事纳米光电材料与器件的研究。
E-mail: fsli@fzu.edu.cn

青年编委介绍：

李福山，《发光学报》第一届青年编委，博士，研究员，博士研究生导师，英国工程技术学会会士(IET Fellow)，福州大学量子点研究院院长，量子点发光与显示福建省高校重点实验室主任。2005 年于北京大学获得理学博士学位。主要研究领域：纳米光电材料与器件。主要学术业绩：在量子点发光与显示技术方面取得了一系列成果，获得了国家重点研发计划、国家自然科学基金联合重点支持项目等立项支持，总经费超过 1 000 万元，发表学术专著 1 部，以第一/通讯作者身份在 *Nature Communications*，*Advanced Functional Materials*，*ACS Nano*，*Nano Energy* 等权威刊物发表论文 100 余篇，总引用次数 2 200 余次。获得中国发明专利授权 20 件。获得英国物理学会出版集团颁发的 Top Cited Author Award。2016 年获得福建省青年五四奖章。2019 年当选英国工程技术学会会士。2019 年获得福建省自然科学三等奖(第一完成人)。2019 年指导博士学位论文入选中国电子教育学会优秀博士论文。