

文章编号: 1000-7032(2023)04-0634-07

沉积参数对铯铅溴钙钛矿薄膜中 CsPb₂Br₅ 相结构演变和发光特性的影响

林淑地^{1,2}, 吴海霞², 宋捷², 黄锐^{2*}, 吕有明^{1*}

(1. 深圳大学 材料学院, 广东 深圳 518060; 2. 韩山师范学院 材料科学与工程学院, 广东 潮州 521041)

摘要: 基于化学气相沉积(CVD)法制备的铯铅溴钙钛矿薄膜具有优异的光电特性,然而薄膜通常存在 CsPbBr₃ 和 CsPb₂Br₅ 两个不同的相结构区域。本文通过 CVD 法制备了铯铅溴钙钛矿薄膜,并利用 X 射线衍射(XRD)、扫描电镜(SEM)、电子能谱仪(EDS)及荧光光谱仪研究了反应气压与 N₂ 流量对其中的 CsPb₂Br₅ 相结构的影响。实验结果表明,反应气压的变化对 CsPb₂Br₅ 相结构无影响;与此不同,随着 N₂ 流量的减少,薄膜中部分 CsPb₂Br₅ 相结构逐渐转变为 CsPbBr₃ 相结构,其发光也由以~630 nm 为主的宽带发射转变为以~530 nm 为主的窄带发射。实验表明,N₂ 流量是调控 CsPb₂Br₅ 相结构和发光特性的有效手段。

关键词: 化学气相沉积; 铯铅溴钙钛矿薄膜; CsPb₂Br₅ 相结构

中图分类号: O482.31 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20220335

Effect of Deposition Parameters on Luminescence Properties and Structure Evolution of CsPb₂Br₅ Phase in Cesium Lead Bromide Perovskite Films

LIN Shudi^{1,2}, WU Haixia², SONG Jie², HUANG Rui^{2*}, LYU Youming^{1*}

(1. School of Materials, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Hanshan Normal University, Chaozhou 521041, China)

* Corresponding Authors, E-mail: rhuangnju@126.com; ymlu@szu.edu.cn

Abstract: The cesium lead bromide perovskite thin films prepared by chemical vapor deposition (CVD) have excellent optoelectronic properties, but the thin films generally have two different phase structures, CsPbBr₃ and CsPb₂Br₅. In our work, CVD method is considered to prepare cesium lead bromide perovskite thin films, and the effects of reaction pressure and N₂ flow on CsPb₂Br₅ in the thin films were studied by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectroscopy (EDS) and fluorescence spectrometer. The results show that the change of the reaction pressure has no effect on the CsPb₂Br₅ phase. However, with the decrease of the N₂ flow, part of the CsPb₂Br₅ phase in the film gradually transforms into the CsPbBr₃ phase, and its luminescence also converts from a broadband emission dominated by ~630 nm to a narrowband emission dominated by ~530 nm. Experimental results reveal that N₂ flow is an effective means to control the phase structure and luminescence properties of CsPb₂Br₅.

Key words: chemical vapor deposition (CVD); cesium lead bromide perovskite film; CsPb₂Br₅ phase

收稿日期: 2022-09-15; 修订日期: 2022-10-04

基金项目: 国家自然科学基金(12104117); 广东省自然科学基金(2020A1515010432)

Supported by National Natural Science Foundation of China (12104117); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2020A1515010432)

1 引言

全无机卤化物钙钛矿材料因其具有高发光量子产率、可调谐的带隙、高载流子迁移率、高缺陷容忍度等优异性能而在太阳能电池、激光器、探测器和发光二极管等器件中得到了广泛的应用^[1-8]。目前已发展了多种制备全无机卤化钙钛矿材料的方法,如热注入法^[9]、过饱和结晶法^[10]、一步旋涂法^[11]与化学气相沉积法(CVD)^[12]等。CVD法可制备大面积、高质量、元素均匀分布和缺陷密度低的CsPbBr₃薄膜,且工艺简单、可控,成为一种非常有前景的制备技术。刘新风课题组通过调控CVD的生长温度,在蓝宝石衬底上实现了大面积高质量、低缺陷密度单晶CsPbBr₃薄膜的制备,并在室温下获得阈值为8 μJ·cm⁻²的放大自发辐射^[13]。Xu等利用CVD法在750 °C条件下生长了陷阱态密度低、晶粒尺寸大的CsPbBr₃相钙钛矿薄膜,基于该薄膜构建的光电探测器具有3.2×10⁻⁸ A的光电流和~2.5×10⁴的高开/关比^[12]。尽管基于CVD法制备的钙钛矿薄膜取得了突破性的进展,然而,由于CsBr与PbBr₂两者熔点差异大^[12,14],且CVD生长区域存在温差,这导致了所生长的薄膜结构不均匀,存在CsPb₂Br₅和CsPbBr₃等不同相结构区域^[15-17]。对于CsPb₂Br₅,理论计算表明CsPb₂Br₅是间接带隙材料^[18],电子空穴无法通过导带与价带间的跃迁直接复合发光,发光效率低^[19]。显然,CsPb₂Br₅的存在无疑会限制CsPbBr₃钙钛矿薄膜在高效发光器件中的应用。因此,对CVD法制备的CsPbBr₃钙钛矿薄膜中CsPb₂Br₅的调控尤为重要。

本文通过CVD法制备了铯铅溴钙钛矿薄膜,并利用XRD、扫描电镜、电子能谱仪及荧光光谱仪研究了反应气压与N₂流量对其中的CsPb₂Br₅相结构的影响。实验表明,N₂流量是调控CsPb₂Br₅相结构和发光特性的有效手段,而反应气压的变化对CsPb₂Br₅相结构无影响。

2 实验

2.1 薄膜制备

本文利用化学气相沉积方法,以CsBr与PbBr₂作为前驱体制备大面积铯铅溴钙钛矿薄膜。实验药品为西安宝莱特光电科技公司生产的纯度99.9%的CsBr、PbBr₂粉末,其质量比为1:2。称取总量为0.15 g的CsBr与PbBr₂粉末,并将其分别置于管式炉的加热中心区域,两者相距1 cm。

将长×宽为8 cm×1 cm的氧化硅衬底(氧化层厚度为300 nm的SiO₂/Si单晶基底)放置管式炉下游位置,通过控制抽气口实现对其生长气压的调控。管式炉的本底真空为6 Pa,通入高纯度N₂作为载气,炉管中心温度为630 °C,样品放置处所对应区域①的温度约为(360±20) °C,区域②的温度约为(260±20) °C。薄膜生长时间为5 min。薄膜生长完成后掀开炉盖让其自然降温,并停止载气通入,待炉温冷却后取出样品。

为了研究不同制备工艺参数对薄膜的影响,实验中在N₂流量为30 mL/min条件下,改变反应气压:50, 100, 150, 200, 300 Pa;以及在气压为100 Pa条件下,改变N₂流量:5, 10, 20, 30, 60 mL/min。

2.2 薄膜表征

在室温下,利用LabRAM HR Evolution高分辨拉曼光谱仪、Edinburgh FLS980光谱仪在325 nm的光激发下测量薄膜的发光光谱,利用场发射扫描电子显微镜(SU5000)观测薄膜表面形貌,利用电子能谱仪分析元素成分,利用D8 Advance X-射线衍射仪表征物相结构。

3 结果与讨论

图1为不同反应气压条件下制备的全无机铯铅溴钙钛矿薄膜照片。由图1可知,所制备的薄膜均存在两个明显不同的区域(黄色区域①和淡蓝色区域②)。XRD分析表明区域①的薄膜呈现

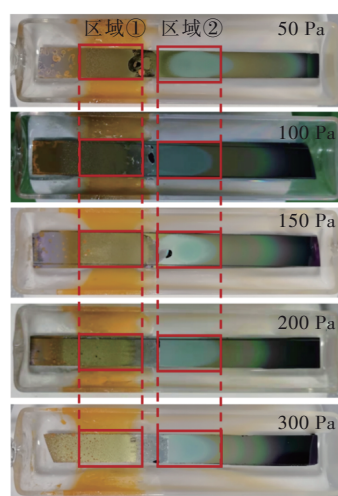


图1 不同反应气压条件下制备的全无机铯铅溴钙钛矿薄膜照片(黄色区域①和淡蓝色区域②)

Fig.1 Photographs of all-inorganic cesium lead bromide perovskite films prepared with different reaction pressures(yellow area ① and light blue area ②)

CsPbBr₃单斜相特征结构^[20],而区域②的薄膜呈现CsPb₂Br₅四方相特征结构^[21],如图2(a)、(b)所示。对于区域①,由图2(a)还可知,100 Pa条件下制备的CsPbBr₃薄膜的主峰半高宽最窄,且其峰强较强,这表明100 Pa条件下,薄膜CsPbBr₃晶粒最大,晶化度高。而随着反应气压的增大,主峰半高宽增大,且峰强减弱,这表明随着反应气压的增大,晶粒变小,结晶度降低。对于区域②,由图2(b)可知,CsPb₂Br₅薄膜主峰强度随着反应气压的增大而略微增强,半高宽则无明显变化,这表明反应气压对CsPb₂Br₅薄膜的结构影响小。

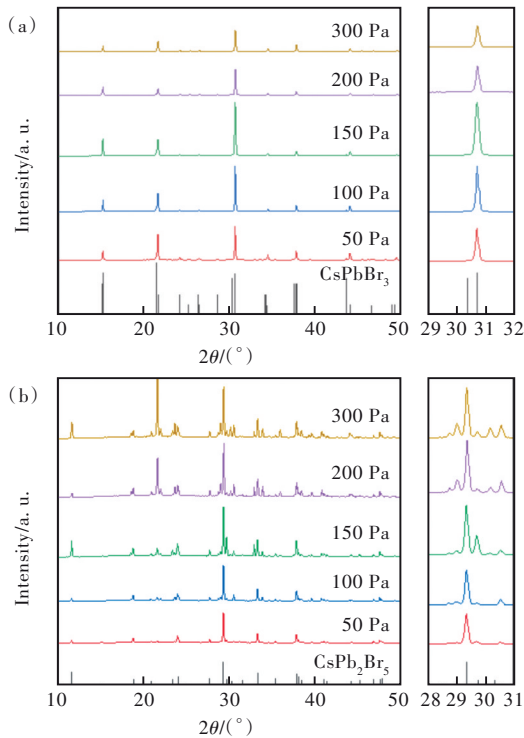


图2 不同反应气压下制备薄膜的XRD谱。(a)区域①CsPbBr₃薄膜(PDF#18-0364);(b)区域②CsPb₂Br₅薄膜(PDF#25-0211)。

Fig.2 XRD patterns of films with different reaction pressures. (a) CsPbBr₃ film (PDF#18-0364) of area ①. (b) CsPb₂Br₅ film (PDF#25-0211) of area ②.

图3的PL谱分析表明,在325 nm波长激发下,区域①的薄膜展现主峰位于~530 nm的发射光谱,与CsPbBr₃的特征发光峰相吻合。我们注意到,PL谱可以分解为一个发光峰位于528 nm的窄谱和一个发光峰位于540 nm的宽谱。根据文献报道,高能侧的窄发射光谱源于自由激子辐射复合,低能侧的宽发射光谱则源于Br空位缺陷引起的束缚激子辐射复合^[22-25]。与区域①不同,区域②的薄膜则呈现主峰位于~630 nm的宽带弱发

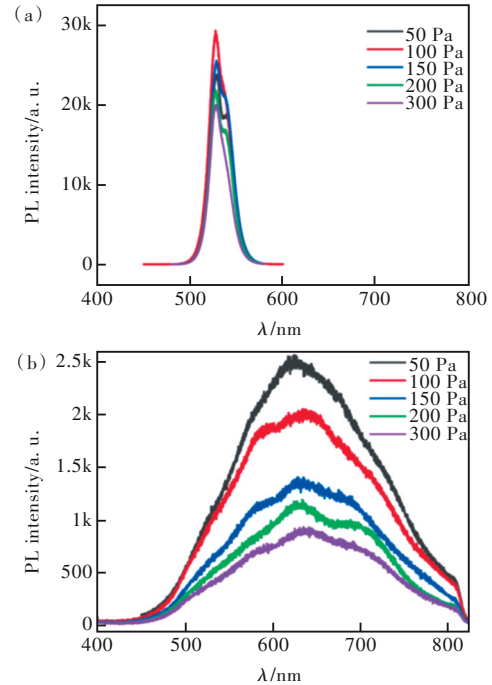


图3 不同反应气压下制备的薄膜发光谱。(a)区域①CsPbBr₃薄膜;(b)区域②CsPb₂Br₅薄膜。

Fig.3 PL spectra of films with different reaction pressures. (a) CsPbBr₃ film of area ①. (b) CsPb₂Br₅ film of area ②.

射峰,该峰为CsPb₂Br₅自陷激子态引起的光发射^[18]。图4的扫描电子显微镜照片显示了不同反应气压下制备薄膜的表面形貌。由图4(a)~(c)可知,区域①的薄膜表面颗粒尺寸均较大,约5~10 μm。相反,图4(d)~(f)显示区域②的薄膜颗粒尺寸

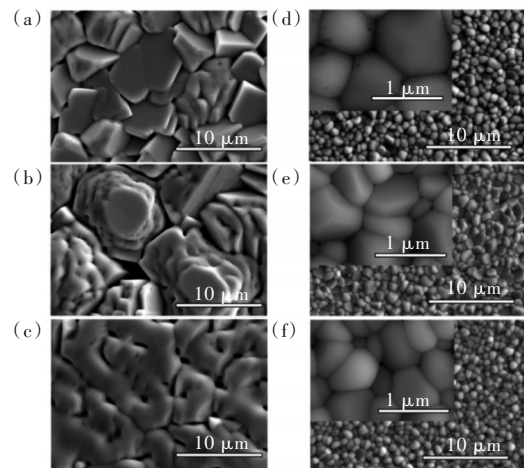


图4 不同反应气压下制备薄膜的SEM图。(a)~(c)50, 150, 300 Pa区域①CsPbBr₃薄膜;(d)~(f)50, 150, 300 Pa区域②CsPb₂Br₅薄膜。

Fig.4 SEM images of films with different reaction pressures. (a)~(c)50, 150, 300 Pa of CsPbBr₃ film of area ①. (d)~(f)50, 150, 300 Pa of CsPb₂Br₅ film of area ②.

均较小。从SEM图可以看出,随着反应气压增大,颗粒尺寸逐渐由约1 μm 减小至约0.5 μm 。这可能是由于反应气压增大提高了反应腔体内的分子数密度,使得生长速率变快,进而不利于晶粒长大。

从图3(a)还可发现,100 Pa条件下制备的区域①薄膜PL最强,300 Pa条件下制备的区域①薄膜PL最弱。结合图4的SEM结果分析,我们认为这主要是由于100 Pa条件下制备的薄膜晶粒尺寸大;而300 Pa条件下制备的薄膜晶粒尺寸小,晶粒变小导致晶界增加,表面态增多,进而导致非辐射复合中心增多,发光变弱。在以上研究的基础上,我们进一步研究反应气压为100 Pa条件下不同流量对区域②薄膜相结构的影响。图5为不同N₂流量条件下制备的全无机铯铅溴钙钛矿薄膜照片,由图5可知,在N₂流量为60 mL/min时,所制备的薄膜与图1相似,存在两个明显不同的区域,分别对应黄色区域①与淡蓝色区域②。然而,随着N₂流量逐渐减小,区域②的淡蓝色面积逐渐变小;当流量减小为5 mL/min时,区域②转变为黄色,与区域①趋于一致。

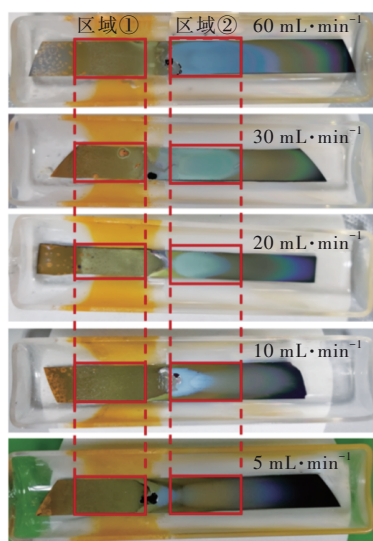


图5 不同N₂流量条件下制备的全无机铯铅溴钙钛矿薄膜照片

Fig.5 Photographs of all-inorganic cesium lead bromide perovskite films prepared with different N₂ flow

图6的XRD分析表明,在N₂流量为60 mL/min时,区域②的薄膜呈现CsPb₂Br₅四方相结构特征;随着N₂流量的减小,区域②薄膜相结构逐渐发生变化;当N₂流量为5 mL/min时,薄膜呈现CsPb₂Br₅和CsPbBr₃的混合相结构。这说明减少N₂流量有利于区域②薄膜CsPb₂Br₅四方相向

CsPbBr₃单斜相转变。由图6还可知,随着氮气流量从10 mL/min降低至5 mL/min,CsPbBr₃相的衍射主峰强度略有增强,但半高宽无明显变化。由图7的PL谱可知,在325 nm波长激发下,当N₂流量为60 mL/min时,区域②的薄膜呈现主峰位于~630 nm的宽带弱发射峰。当N₂流量减小为5 mL/min时,薄膜的光发射显著增强,并且发光峰位蓝移至~530 nm,其半高宽明显变窄。结合图6的XRD分析结果可知,光发射特性随N₂流量的显著变化可归咎于CsPb₂Br₅四方相向CsPbBr₃单斜相的转变。我们注意到,当N₂流量从10 mL/min减小为5 mL/min时,PL的峰值发生了红移,这可能为束缚激子辐射复合所导致^[23,25-26]。

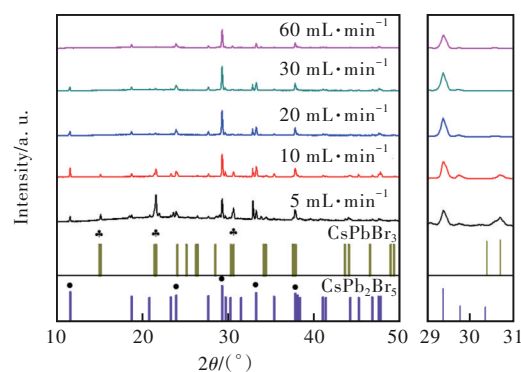


图6 不同N₂流量区域②薄膜的XRD谱(CsPbBr₃(PDF# 18-0364)、CsPb₂Br₅(PDF#25-0211))

Fig.6 XRD patterns of films with different N₂ flows at area ② (the marked diffraction peaks of CsPbBr₃ film (PDF#18-0364) and CsPb₂Br₅ film(PDF#25-0211))

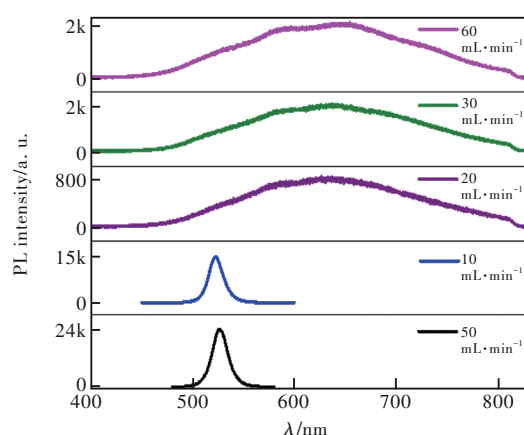


图7 不同N₂流量区域②薄膜的PL谱

Fig.7 PL spectra of films with different N₂ flow at area ②

图8显示了区域②薄膜的扫描电子显微镜图片,由图8可知,当N₂流量为60 mL/min时,薄膜颗粒尺寸较小,约为0.5~1 μm ;随着N₂流量的减小,颗粒尺寸不断增大;当N₂流量减小为5 mL/min

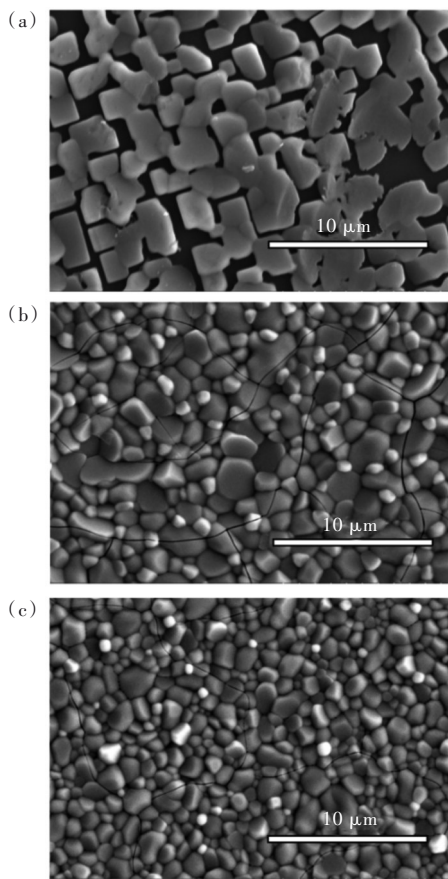


图8 不同 N_2 流量区域②薄膜的SEM图。(a)5 mL/min; (b)30 mL/min; (c)60 mL/min。

Fig.8 SEM images of films with different N_2 flow at area ②. (a)5 mL/min. (b)30 mL/min. (c)60 mL/min.

时,其颗粒尺寸增大至约2~5 μm 。图9给出了区域②薄膜Cs、Pb、Br元素的含量比随不同 N_2 流量的变化关系,其中Cs、Pb、Br元素含量比由EDS能谱测得。由图9可知,随着 N_2 流量的减小,薄膜中Cs、Pb、Br的原子百分比变化明显;当 N_2 流量由60 mL/min减少至5 mL/min时,薄膜中Cs、Pb、Br的原子百分比由1:2:5转变为接近1:1:3。这也进一步证明了薄膜中 CsPb_2Br_5 四方相向 CsPbBr_3 单斜相的转变。

在我们的实验中,相比于 CsPbBr_3 相结构,形成 CsPb_2Br_5 相结构所需能量较低。由于区域①更靠近加热源,其所获得的能量相对更高,故容易形成 CsPbBr_3 相;在同样的反应气压和氮气流量下,由于 PbBr_2 (917 $^\circ\text{C}$ @1 atom and 20.75 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)的蒸发温度与升华焓均比 CsBr (1300 $^\circ\text{C}$ @1 atom and 23.64 $\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)低^[14],同时,区域②的温度比区域①低,使得区域②形成富 PbBr_2 ,易形成 CsPb_2Br_5 薄膜。另一方面,在气压恒定的条件下,

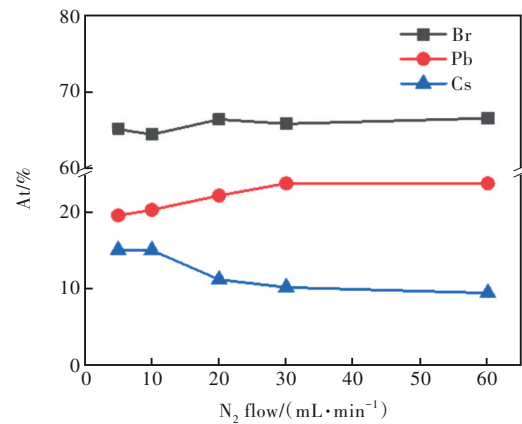


图9 由EDS能谱所得到的区域②薄膜Cs、Pb、Br元素含量随不同 N_2 流量变化的比例图。

Fig.9 The elemental content of Cs, Pb, Br ratio chart of films obtained by EDS results with different N_2 flow at area ②.

流量越大,气相中反应分子基团平均获得的能量越少;同时,流量越大,反应分子基团在反应区域停留的时间也越短^[27]。显然,较大的 N_2 流量不利于 CsPbBr_3 晶核的形成和生长,这可能是导致 N_2 流量大于等于20 mL/min条件下在区域②生长的是 CsPb_2Br_5 相结构,而不是 CsPbBr_3 相结构的原因。相比于大的 N_2 流量条件,当 N_2 流量(小于等于10 mL/min)较小时,气相中反应气体分子平均可获得更多的能量;同时由于流量变小,反应气体分子在反应区停留的时间也变长,这无疑有助于 CsPbBr_3 晶核的形成和生长。我们认为,这可能是导致低 N_2 流量条件下区域②薄膜中 CsPb_2Br_5 四方相向 CsPbBr_3 单斜相转变的主要原因。

4 结 论

本文通过CVD法制备了铯铅溴钙钛矿薄膜,并研究了反应气压与 N_2 流量对其中的 CsPb_2Br_5 相结构的影响。研究表明,反应气压的变化对薄膜中 CsPb_2Br_5 相结构无影响;而 N_2 流量的减少则使得薄膜中部分 CsPb_2Br_5 相结构逐渐转变为 CsPbBr_3 相,并且颗粒尺寸变大,其发光也由以~630 nm为主的宽带发射转变为以~530 nm为主的窄带发射。实验表明, N_2 流量是调控 CsPb_2Br_5 相结构和发光特性的有效手段。

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.20220335>.

参 考 文 献:

- [1] KOJIMA A, TESHIMA K, SHIRAI Y, *et al.* Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2009, 131(17): 6050-6051.
- [2] BURSCHKA J, PELLET N, MOON S J, *et al.* Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells [J]. *Nature*, 2013, 499(7458): 316-319.
- [3] YANG J, LIU Z Z, HU Z P, *et al.* Enhanced single-mode lasers of all-inorganic perovskite nanocube by localized surface plasmonic effect from Au nanoparticles [J]. *J. Lumin.*, 2019, 208: 402-407.
- [4] YANG Z, ZHANG H, FANG Z H, *et al.* One-step precipitated all-inorganic perovskite QDs from amorphous media for backlighting display and reproducible laser-driven white lighting [J]. *Chem. Eng. J.*, 2022, 427: 131379-1-8.
- [5] YAN S K, LI Q, ZHANG X, *et al.* A vertical structure photodetector based on all-inorganic perovskite quantum dots [J]. *J. Soc. Inf. Displ.*, 2020, 28(1): 9-15.
- [6] SALEEM M I, YANG S Y, ZHI R N, *et al.* Surface engineering of all-inorganic perovskite quantum dots with quasi core-shell technique for high-performance photodetectors [J]. *Adv. Mater. Interfaces*, 2020, 7(11): 2000360-1-7.
- [7] XUAN T T, YANG X F, LOU S Q, *et al.* Highly stable CsPbBr₃ quantum dots coated with alkyl phosphate for white light-emitting diodes [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(40): 15286-15290.
- [8] 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.
- [9] PROTESESCU L, YAKUNIN S, BODNARCHUK M I, *et al.* Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX₃, X=Cl, Br, and I): novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut [J]. *Nano Lett.*, 2015, 15(6): 3692-3696.
- [10] LI X M, WU Y, ZHANG S L, *et al.* CsPbX₃ quantum dots for lighting and displays: room-temperature synthesis, photoluminescence superiorities, underlying origins and white light-emitting diodes [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26(15): 2435-2445.
- [11] 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): 1700579-1-8.
- [12] XU W L, NIU M S, YANG X Y, *et al.* Chemical vapor deposition growth of phase-selective inorganic lead halide perovskite films for sensitive photodetectors [J]. *Chin. Chem. Lett.*, 2021, 32(1): 489-492.
- [13] ZHONG Y G, LIAO K, DU W N, *et al.* Large-scale thin CsPbBr₃ single-crystal film grown on sapphire *via* chemical vapor deposition: toward laser array application [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(11): 15605-15615.
- [14] BAO C Y, PENG X, YING L Y, *et al.* Investigation of CsPbBr₃ CVD dynamics at various temperatures [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2021, 23(40): 23214-23218.
- [15] ZHANG Y H, SAIDAMINOV M I, DURSUN I, *et al.* Zero-dimensional Cs₄PbBr₆ perovskite nanocrystals [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2017, 8(5): 961-965.
- [16] TANG X S, HU Z P, YUAN W, *et al.* Perovskite CsPb₂Br₅ microplate laser with enhanced stability and tunable properties [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2017, 5(3): 1600788-1-8.
- [17] SONG J Z, LI J H, LI X M, *et al.* Quantum dot light-emitting diodes based on inorganic perovskite cesium lead halides (CsPbX₃) [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(44): 7162-7167.
- [18] DURSUN I, DE BASTIANI M, TUREDI B, *et al.* CsPb₂Br₅ single crystals: synthesis and characterization [J]. *ChemSusChem*, 2017, 10(19): 3746-3749.
- [19] CHENG S J, CHEN Y, ZHONG H Z. Centimeter-sized Na-doped CsPb₂Br₅ single crystals with efficient self-trapped exciton emission [J]. *Cryst. Growth Des.*, 2022, 22(7): 4025-4030.
- [20] WANG K H, WU L, LI L, *et al.* Large-scale synthesis of highly luminescent perovskite-related CsPb₂Br₅ nanoplatelets and their fast anion exchange [J]. *Angew. Chem.*, 2016, 128(29): 8468-8472.
- [21] LI G P, WANG H, ZHU Z F, *et al.* Shape and phase evolution from CsPbBr₃ perovskite nanocubes to tetragonal CsPb₂Br₅ nanosheets with an indirect bandgap [J]. *Chem. Commun.*, 2016, 52(75): 11296-11299.
- [22] SEBASTIAN M, PETERS J A, STOUMPOS 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): 235210-1-9.

- [23] STOUMPOS C C, MALLIAKAS C D, PETERS J A, *et al.* Crystal growth of the perovskite semiconductor CsPbBr₃: a new material for high-energy radiation detection [J]. *Cryst. Growth Des.*, 2013, 13(7): 2722-2727.
- [24] GABELLONI F, BICCARI F, FALSINI N, *et al.* Long-living nonlinear behavior in CsPbBr₃ carrier recombination dynamics [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(9): 1447-1455.
- [25] PETERS J A, LIU Z F, YU R, *et al.* Carrier recombination mechanism in CsPbBr₃ revealed by time-resolved photoluminescence spectroscopy [J]. *Phys. Rev. B*, 2019, 100(23): 235305-1-9.
- [26] KANG J, WANG L W. High defect tolerance in lead halide perovskite CsPbBr₃ [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2017, 8(2): 489-493.
- [27] HUANG R, LIN X Y, YU Y P, *et al.* Fast growth of polycrystalline film in SiCl₄/H₂ plasma [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2004, 21(6): 1168-1170.



林淑地(1997-),女,广东揭阳人,硕士研究生,2020年于韩山师范学院获得学士学位,主要从事全无机钙钛矿薄膜发光性能的研究。

E-mail: 2361062029@qq.com



吕有明(1963-),男,吉林长春人,博士,教授,博士生导师,2000年于日本长冈技术科学大学获得博士学位,主要从事氧化锌基半导体发光材料与器件、日盲紫外光电探测材料及器件、氧化物半导体透明电子学材料与器件、纳米半导体材料的制备及其光电器件的研究。

E-mail: ymlu@szu.edu.cn



黄锐(1978-),男,广东潮州人,博士,教授,2008年于南京大学获得博士学位,主要从事量子点发光材料、稀土发光材料与应用、硅基材料光电特性的研究。

E-mail: rhuangnju@126.com