

文章编号: 1674-2869(2019)03-0248-06

# 纯化试剂对 CdSe/ZnS 绿色量子点膜 光学稳定性的影响

罗晓玥<sup>1</sup>, 陈志良<sup>2</sup>, 朱小波<sup>2</sup>, 鄢国平<sup>\*1</sup>

1. 武汉工程大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430205;
2. 武汉珈源量子点技术开发有限责任公司, 湖北 武汉 430075

**摘要:**通过热注射法制备高质量的 CdSe/ZnS 绿色量子点, 采用不同配方的醇和烷烃作为洗涤溶剂通过沉淀法纯化量子点粗产品, 并制备基于液晶显示器的量子点光学转换膜。通过色彩分析仪检测分析, 研究在高温、高湿、蓝光照射条件下量子点膜的光学稳定性。采用核磁共振氢谱等方法和技术对纯化后量子点的表面配体进行分析。实验结果表明, 不同的纯化试剂改变了量子点表面油酸及三辛基氧膦配体数量, 从而影响了量子点膜的光学稳定性。

**关键词:**量子点; 液晶显示器; 量子点膜; 纯化; 稳定性

中图分类号: O6-332; O648.12<sup>\*4</sup> 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2019.03.008

## Effects of Purification Reagents on Optical Stability of CdSe/ZnS Quantum Dots Films

LUO Xiaoyue<sup>1</sup>, CHEN Zhiliang<sup>2</sup>, ZHU Xiaobo<sup>2</sup>, YAN Guoping<sup>\*1</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;
2. Wuhan Jiayuan Quantum Dots Co., Ltd, Wuhan 430075, China

**Abstract:** Highly luminescent CdSe/ZnS quantum dots were synthesized by hot injection method and further purified with the different alkanes and alcohols to prepare the quantum dot optical conversion films used in liquid crystal display. The optical stability of the quantum dots film under the conditions of high temperature, high humidity and blue light irradiation was investigated by color analyzer. The surface ligands of quantum dots were also characterized by nuclear magnetic resonance spectroscopy. The experimental results show that the number of oleic acid and trioctyl oxyphosphine ligands on the surface of quantum dots changes with the different purified reagents, influencing the optical stability of the quantum dot films.

**Keywords:** quantum dot; liquid crystal display; quantum dot films; purification; stability

量子点<sup>[1-3]</sup>, 可称为半导体纳米晶, 通常是由 II-VI、III-V 或 IV-VI 族元素组成, 粒径一般介于 1~10 nm 之间。量子点可发出明亮、纯净的荧光, 具有发射光谱随粒径和组成可调、荧光量子产率高、

发射光谱窄、激发光谱宽、光学稳定性良好等优点。因此, 量子点在多个领域具有优异的应用前景, 如场效应晶体管、发光二极管、光敏电阻、太阳能电池等<sup>[2,4-7]</sup>。量子点液晶显示器技术<sup>[8-13]</sup>是一种

收稿日期: 2018-12-18

基金项目: 国家重点研发计划“增材制造与激光制造”重点专项课题(2018YFB1105502, 2016YFB1101302); 国家自然科学基金(51373128); 武汉市第五批“黄鹤英才计划”(创新人才)入选人才项目(武人才办[2017]1号); 湖北省新世纪高层次人才工程入选科研项目(鄂人社函[2017]344号)

作者简介: 罗晓玥, 硕士研究生。E-mail: 412488319@qq.com

\*通讯作者: 鄢国平, 博士, 教授, 博士研究生导师。E-mail: guopyan2006@163.com

引文格式: 罗晓玥, 陈志良, 朱小波, 等. 纯化试剂对 CdSe/ZnS 绿色量子点膜光学稳定性的影响[J]. 武汉工程大学学报, 2019, 41(3): 248-253.

基于量子点光致发光特性的背光源发光显示技术,有色域广、色彩表现出众、低能耗等优点,更容易产业化,升级成本低,在光电子学领域中占据了相当重要的地位,将广泛应用于未来显示器中。

现有的合成技术已经能很好地控制量子点的荧光量子产率和胶体稳定性,然而在一些特殊环境中,量子点的光学稳定性还不够理想。主要原因之一是量子点的分离纯化不得当,使量子点表面配体脱落,在量子点表面形成大量缺陷,因此易受外界环境如水、氧、光学等影响<sup>[14]</sup>,导致基于量子点制备的光学转换膜器件发光效率与稳定性大幅下降,直接影响量子点显示器的寿命和色域。

目前量子点的纯化方法有重沉淀法<sup>[15-17]</sup>、凝胶色谱法、液液萃取法、过电泳法<sup>[18-19]</sup>、渗透压过滤法等。相比于其它几种方法,重沉淀法具有分离效率高、成本低、使用不受限等优点。本文通过热注射法<sup>[20-22]</sup>制备高质量的CdSe/ZnS绿色量子点。使用不同体积比的烷烃和醇做为洗涤溶剂处理量子点粗产品,从而制备基于量子点的光学转换薄膜<sup>[23]</sup>。通过色彩分析仪检测分析,研究在高温、高湿、蓝光照射条件下量子点薄膜的光学稳定性,并采用紫外-可见吸收光谱仪(ultraviolet-visible spectroscopy, UV-vis)、荧光仪、透射电子显微镜(transmission electron microscope, TEM)、核磁共振波谱仪(nuclear magnetic resonance spectroscopy, NMR)等方法和技术对所合成的量子点进行表征,分析不同纯化试剂对量子点表面配体的影响。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂与仪器

氧化镉、醋酸锌、油酸、液体石蜡、硒粉、硫粉、乙醇、正己烷、三氯甲烷、正丙醇、正丁醇、正戊醇、正辛烷、正壬烷、正癸烷、十一烷、紫外光固化胶、氘代氯仿(分析纯,国药集团化学试剂有限公司);

三辛基膦(SIGMA公司)。

荧光仪(LS-55, Perkin Elemer), UV-vis(TU-1901UV-VIS Spectrometer, SHIMADZU), TEM(JEM-2100F STEM/EDS, Japan Electronics Co, Ltd), 高速离心机(TG 16-WS, 湘仪离心机), 真空干燥箱(DZF-6020, 上海一恒科技有限公司), NMR(VX-400, Varian Mercury), 色彩分析仪(CA-210, 广州精达电子仪器仪表有限公司), 恒温-恒湿实验箱(HY-TB-408BH, 东莞市泓进检测仪器有限公司), 紫外投射仪(ZF-4, 上海光豪分析仪器有限公司), 自动涂布机(AFA-IV, 沈阳科晶自动化设备有限公司)。

### 1.2 实验方法

将77 mL液体石蜡、5 mmol醋酸锌与0.5 mmol氧化镉倒入四口烧瓶内,在通氮气环境下加热至150 °C时,加入17.5 mL油酸。减压抽真空10 min后快速加热至310 °C,并快速注入5 mmol硫粉和含0.5 mmol硒粉的5.5 mL三辛基膦混合溶液,温度降至300 °C继续反应。反应完成后停止加热,待冷却至室温,终止反应,得到量子点粗产品。

重沉淀法选用的纯化溶剂需要具备将量子点粗产品完全沉淀的功能,考虑到烷烃及醇配比的局限性,使用的纯化溶剂种类及体积比为 $V(\text{量子点}):V(\text{烷烃}):V(\text{醇})=1:0.5:2$ (烷烃试剂分别为正己烷、正辛烷、正壬烷、正癸烷和十一烷,醇试剂分别为乙醇、正丙醇、正丁醇和正戊醇), $V(\text{量子点}):V(\text{醇})=1:2.5、1:4.25、1:4.5、1:5$ 和 $1:8.5$ (醇试剂分别为乙醇、正丙醇、正丁醇和正戊醇)。取相同批次40组1 mL量子点粗产品,依次加入相应体积配比的纯化试剂并充分振荡,在10 000 r/min转速下离心3 min后去掉上清液,放入真空烘箱中干燥72 h。纯化后的量子点在100  $\mu\text{L}$ 氯仿、2 mL紫外光固化胶中分散均匀,如图1所示压板得到不同纯化条件下的量子点光转换膜。

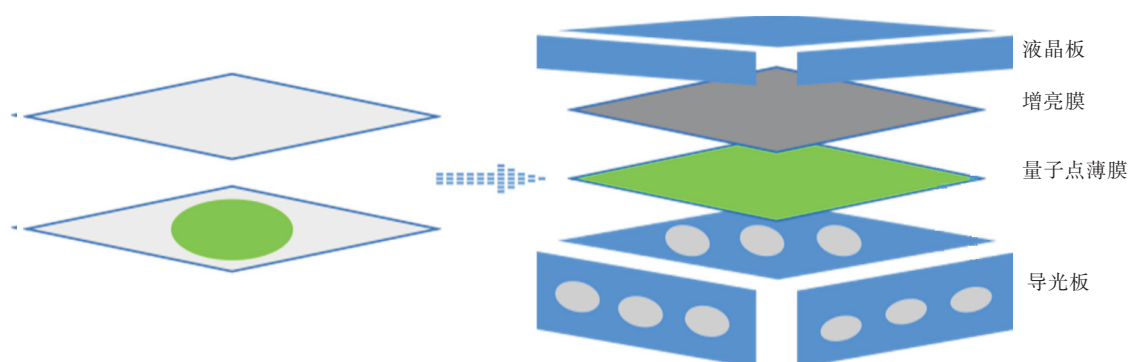


图1 量子点模组

Fig. 1 Quantum dots module

## 2 结果与讨论

### 2.1 量子点的表征

图2为CdSe/ZnS量子点的TEM图[图2(a)和图2(b)]、粒径分布图[图2(c)]、荧光发射光谱及UV-vis光谱图[图2(d)],纯化体系为 $V(\text{量子点}):V(\text{正丁醇})=1:2.5$ 。由图2(a)和图2(b)可以看出,

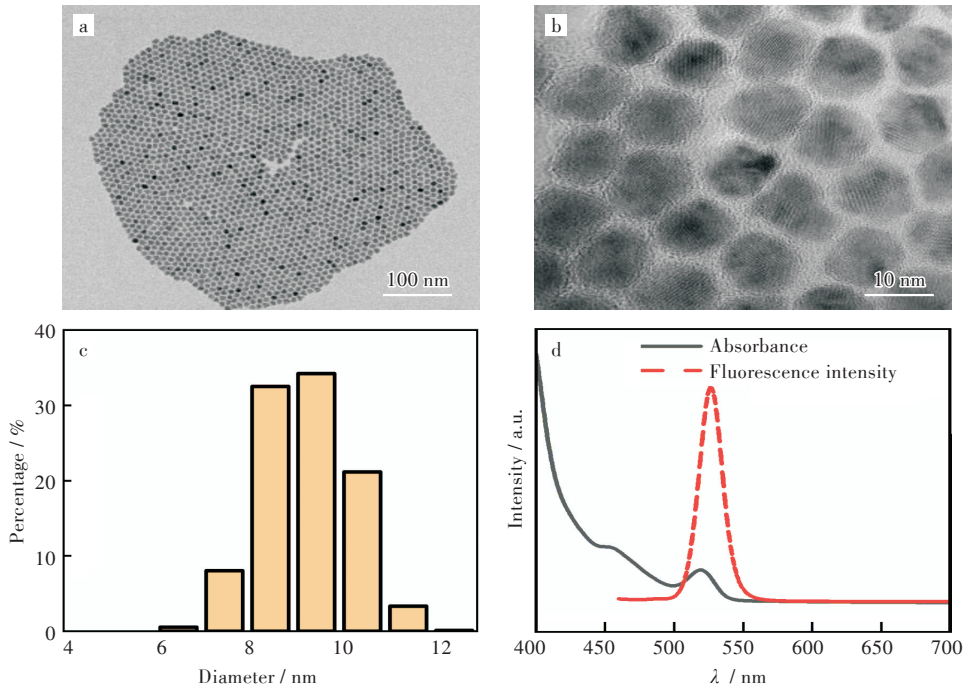


图2 CdSe/ZnS量子点:(a,b)TEM图,(c)粒径分布图,(d)紫外吸收光谱图和荧光发射光谱图

Fig. 2 CdSe/ZnS quantum dots:(a,b) TEM images,(c) partical size distribution,(d) spectra of ultraviolet absorption and fluorecence emission intensity

### 2.2 量子点薄膜的光学性能

使用 $V(\text{量子点}):V(\text{烷烃}):V(\text{醇})=1.0:0.5:2.0$ 、 $V(\text{量子点}):V(\text{醇})=1.0:2.5$ 的不同纯化试剂对量子点做纯化处理。再将上述量子点制备的光学转化薄膜置于蓝光模组中进行老化实验,通过色彩分析仪记录薄膜亮度随时间变化的曲线,如图3所示。发现在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、95%湿度、蓝光照射条件下,在34 h之前,量子点薄膜的亮度随时间快速增强,最高亮度达到蓝光照射前的160%。这可能是由于量子点的光活化特性<sup>[24-25]</sup>,蓝光照射下量子点表面未被完全分离的醇类或水分子能弥补量子点表面缺陷,在短时间内实现荧光增强的效果。随着老化时间继续增长,在蓝光、水、氧等环境影响下,量子点表面的配体脱落形成表面缺陷,从而导致量子点薄膜的亮度减弱。如图3所示,在光照时间为185 h时,使用醇作为纯化溶剂的量子点薄膜亮度要比加入烷烃纯化处理的高。由此推断,纯化溶剂中加入单一醇类沉淀剂要比同时加入烷烃和

制备的CdSe/ZnS量子点粒径均一,单分散性良好,并具备良好的结晶性,由图2(c)分析得到其平均粒径约为9 nm。由图2(d)分析可知,所制得的CdSe/ZnS量子点的激发光谱宽、发射光谱窄,其荧光半峰宽为26 nm,激发波长为530 nm,相对荧光量子产率为83%。

醇类沉淀剂的纯化效果好。这可能是因为加入烷烃后,量子点表面配体在纯化试剂中解离度增加并更容易脱落,从而使量子点表面形成缺陷。由于在光照、水、氧环境下该量子点的ZnS壳层更容易被氧化降解<sup>[14]</sup>,导致量子点薄膜光学稳定性下降。

由上述实验条件优化可知,使用未加烷烃的纯化试剂处理的量子点能够制备出性能更加优异的光学薄膜。为了探究不同比例醇类试剂对量子点薄膜稳定性的影响,使用 $V(\text{量子点}):V(\text{醇})=1:2.5, 1:4.25, 1:4.5, 1:5, 1:8.5$ (醇分别为乙醇、正丙醇、正丁醇、正戊醇)的纯化溶剂制备量子点,经蓝光照射185 h后的量子点薄膜亮度如图4所示。经光照后,纯化体积比为1:8.5、1:5、1:4.5、1:4.25体系中,相同比例下随着纯化溶剂碳链增长,量子点薄膜亮度减弱。这说明在该纯化体系中,量子点表面配体在溶剂中的解离度对量子点表面影响较大,如配体油酸在醇中的解离度依次为乙醇 < 正丙醇 < 正丁醇 < 正戊醇。这是由于配体在不同

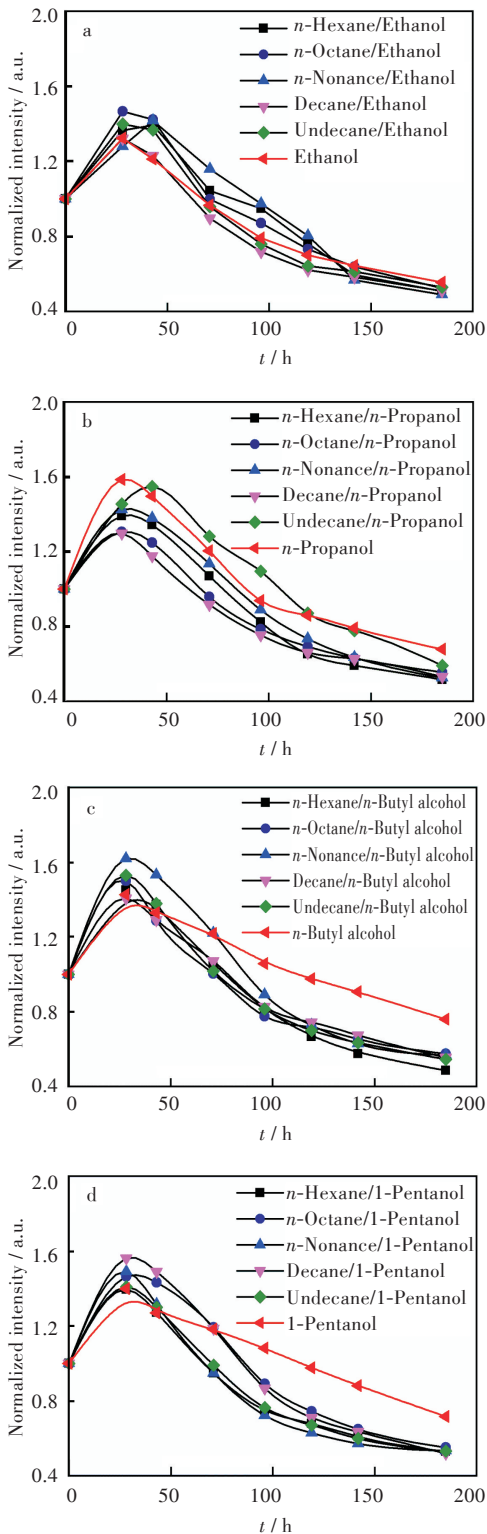


图3 不同纯化试剂得到的量子点模块的亮度曲线图:

- (a)  $V(\text{量子点}):V(\text{烷烃}):V(\text{醇})$ ,
- (b)  $V(\text{量子点}):V(\text{烷烃}):V(n\text{-丙醇})$ ,
- (c)  $V(\text{量子点}):V(\text{烷烃}):V(n\text{-正丁醇})$ ,
- (d)  $V(\text{量子点}):V(\text{烷烃}):V(n\text{-正戊醇})$

Fig. 3 Luminance curves of quantum dot modules by different purified systems: (a)  $V(\text{quantum dot}):V(\text{alkane}):V(\text{ethanol})$ ,

- (b)  $V(\text{quantum dot}):V(\text{alkane}):V(n\text{-propanol})$ ,
- (c)  $V(\text{quantum dot}):V(\text{alkane}):V(n\text{-butyl alcohol})$ ,
- (d)  $V(\text{quantum dot}):V(\text{alkane}):V(1\text{-pentanol})$

溶剂中的平衡常数不同,量子点表面配体在溶剂中的分散性越大,越容易脱落,容易产生量子点表面缺陷。量子点表面缺陷态越明显,在光照、水、氧环境下量子点本身的发光性能降低,相应量子点制作的薄膜光学稳定性下降。

$V(\text{量子点}):V(\text{醇})=1:2.5$ 时,随着选择的纯化溶剂的醇中碳链增长,最终制备的量子点薄膜亮度增强。这说明在该纯化体系中,沉淀剂的极性对量子点表面影响大,醇的极性由大到小依次为乙醇 > 正丙醇 > 正丁醇 > 正戊醇。醇的极性越大,溶剂对量子点的沉淀效果越好,相应的薄膜稳定性好。

由于量子点粗产品在正戊醇中分散系数较大,不易沉淀,所以使用正戊醇的纯化结果较为特殊。综上所述,使用体积比  $V(\text{量子点}):V(\text{正丁醇})=1:2.5$  的纯化试剂纯化的量子点能制备出抗蓝光稳定性、性能优异的量子点薄膜。

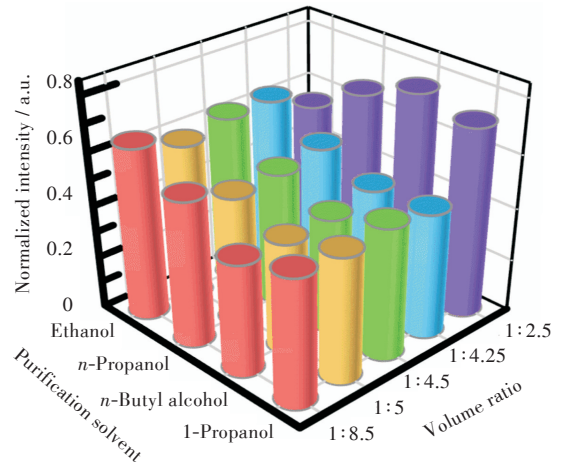


图4 使用不同醇做纯化试剂时,量子点模块的亮度图

Fig. 4 Luminance diagram of quantum dots modules purified by alcohol solvent

### 2.3 量子点表面配体表征

由于不同纯化方式影响量子点表面配体的状态,对量子点内部的无机层无影响,为了探究纯化试剂与量子点薄膜稳定性的具体关系,选取部分量子点对其表面结构做分析测试。假设每个量子点表面有400个配体,选用对硝基苯胺做为量子点内标,配制  $V(\text{量子点}):V(\text{醇})=1:8.5$ ,纯化试剂分别为乙醇、正丙醇、正丁醇、正戊醇的量子点。

核磁共振氢谱如图5所示,溶剂为氘代氯仿( $\text{CD}_3\text{Cl}$ ),  $\delta=7.26$ 处是  $\text{CD}_3\text{Cl}$  溶剂峰;  $\delta=0.88$ 处为油酸和三辛基氧磷的( $-\text{CH}_3$ )质子共振峰;  $\delta=1.27$ 处为油酸和三辛基氧磷的( $-\text{CH}_2-$ )质子共振峰;  $\delta=5.35$ 处为油酸( $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_7\text{CH}=\text{CH}(\text{CH}_2)_7\text{COOH}$ )

的质子共振峰;  $\delta = 8.07$  和  $6.64$  处分别为对硝基苯胺上靠近硝基的(-H)和远离硝基的(-H)质子共振峰。分析计算<sup>[26]</sup>可知(表1和表2),纯化后量子点表面配体油酸的数量由大到小依次为  $N(\text{乙醇}) > N(\text{正丙醇}) > N(\text{正戊醇}) > N(\text{正丁醇})$ , 三辛基氧磷的数量由大到小依次为  $N(\text{乙醇}) > N(\text{正丙醇}) > N(\text{正戊醇}) > N(\text{正丁醇})$ , 该规律与相应量子点薄膜的稳定性趋势相同。由此说明不同种类的纯化试剂会导致量子点表面油酸配体和三辛基氧磷配体的数量不同, 由于配体对量子点表面的无机层有一定的保护作用, 量子点表面配体数量越多, 薄膜光学稳定性越好。

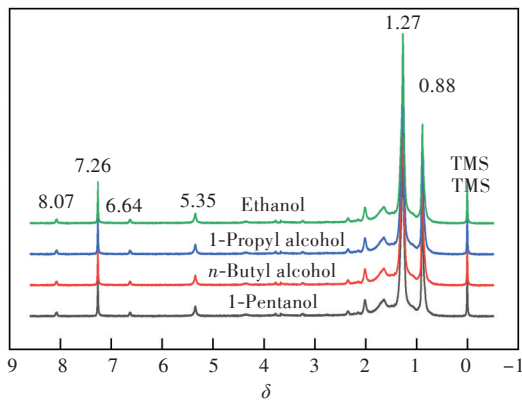


图5 量子点核磁共振氢谱图

Fig. 5  $^1\text{H}$  NMR spectra of quantum dots

表1 量子点核磁共振氢谱图数据分析

Tab. 1  $^1\text{H}$  NMR analysis of ligands on surface of quantum dots

编号	相对位移	相对积分面积			
		乙醇	正丙醇	正丁醇	正戊醇
1	0.72~0.96	29.670	19.290	17.500	18.970
2	5.21~5.47	3.810	2.470	2.060	2.110
3	7.99~8.12	1.000	1.000	1.000	1.000

表2 量子点表面配体数

Tab. 2 Numbers of ligands on surface of quantum dots 个

配体种类	配体数量			
	$N(\text{乙醇})$	$N(\text{正丙醇})$	$N(\text{正丁醇})$	$N(\text{正戊醇})$
油酸	1 524	988	824	844
三辛基氧磷	2 129	1 485	1 281	1 404

### 3 结 语

由于纯化试剂的极性差异及量子点表面配体在纯化试剂中的解离度不同, 经重沉淀法纯化过后的量子点表面配体数量不相同。不同的纯化试剂改变了量子点表面油酸以及三辛基氧磷配体数量, 从而影响了光学转换薄膜的抗蓝光稳定性。

### 参考文献

- [1] OWEN J, BRUS L. Chemical synthesis and luminescence applications of colloidal semiconductor quantum dots [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, 139(32):10939-10943.
- [2] MO D, HU L, ZENG G M, et al. Cadmium-containing quantum dots: properties, applications, and toxicity [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2017, 101(7):2713-2733.
- [3] ALIVISATOS A P. Perspectives on the physical chemistry of semiconductor nanocrystals [J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1996, 100(31):13226-13239.
- [4] KAGAN C R, LIFSHITZ E, SARGENT E H, et al. Building devices from colloidal quantum dots [J]. *Science*, 2016, 353(6302):aac5523(1)-aac5523(9).
- [5] ZHOU R, YANG Z, XU J Z, et al. Synergistic combination of semiconductor quantum dots and organic-inorganic halide perovskites for hybrid solar cells [J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2018, 374: 279-313.
- [6] FINLEY J J, SKALITZ M, ARZBERGER M, et al. Electrical detection of optically induced charge storage in self-assembled InAs quantum dots [J]. *Applied Physics Letters*, 1998, 73(18):2618-2620.
- [7] SRINIVASAN V, HIRAGOND C B, KHANNA P K, et al. Surface engineering of CdS quantum dots for photocatalytic applications under direct sunlight [J]. *Chemistry Select*, 2018, 3(29):8491-8500.
- [8] HAMES B C, MORA-SERÓ I, SÁNCHEZ R S, et al. Device performance and light characteristics stability of quantum-dot-based white-light-emitting diodes [J]. *Nano Research*, 2018, 11(3):1575-1588.
- [9] TODESCATO F, FORTUNATI I, MINOTTO A, et al. Engineering of semiconductor nanocrystals for light emitting applications [J]. *Materials*, 2016, 9(8):672(1)-672(28).
- [10] ZHANG Q, NIE C, CHANG C, et al. Highly luminescent red emitting CdZnSe/ZnSe quantum dots synthesis and application for quantum dot light emitting diodes [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(11):3875-3884.
- [11] CHEN E G, XIE H X, HUANG J M, et al. Flexible/curved backlight module with quantum-dots microstructure array for liquid crystal displays [J]. *Optics Express*, 2018, 26(3):3466-3481.
- [12] KO Y H, JALALAH M, LEE S J, et al. Super ultra-high resolution liquid-crystal-display using perovskite quantum-dot functional color-filters [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8:12881(1)-12881(7).
- [13] SALDANHA P L, LESNYAK V, MANNA L. Large

- scale syntheses of colloidal nanomaterials [J]. *Nano Today*, 2017, 12:46–63.
- [14] PECHSTED K, WHITTLE T, BAUMBERG J, et al. Photoluminescence of colloidal CdSe/ZnS quantum dots: the critical effect of water molecules [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114 (28) : 12069–12077.
- [15] YANG Y, LI J Z, LIN L, et al. An efficient and surface- benign purification scheme for colloidal nanocrystals based on quantitative assessment [J]. *Nano Research*, 2015, 8(10) : 3353–3364.
- [16] PETRIS D, FREITAS D V, SNTOS R K V D, et al. Purification processes of cadmium based quantum dots in aqueous medium a comparative study [J]. *Material Research Express*, 2017, 4(7) : 5048(1)–5048(12).
- [17] SHEN Y, GEE M Y, GREYTAK A B. Purification technologies for colloidal nanocrystals [J]. *Chemical Communications*, 2017, 53(5) : 827–841.
- [18] LIM H, WOO J Y, LEE D C, et al. Continuous purification of colloidal quantum dots in large-scale using porous electrodes in flow channel [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7:43581(1)–43581(7).
- [19] SHEN Y, WEERANOPPANANT N, XIE L S, et al. Multistage extraction platform for highly efficient and fully continuous purification of nanoparticles [J]. *Nanoscale*, 2017, 9(23) : 7703–7707.
- [20] BAE W K, CHAR K, HUR H, et al. Single-step synthesis of quantum dots with chemical composition gradients [J]. *Chemical Materials*, 2008, 20 (2) : 531–539.
- [21] MORRIS-COHEN A J, DONAKOWSKI M D, KNOWLES K E, et al. The effect of a common purification procedure on the chemical composition of the surfaces of CdSe quantum dots synthesized with trioctylphosphine oxide [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2010, 114(2) : 897–906.
- [22] QU L H, PENG X G. Control of photoluminescence properties of CdSe nanocrystals in growth [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2002, 124 (9) : 2049–2055.
- [23] KONG L Q, ZHANG L, MENG Z H, et al. Ultrastable, highly luminescent quantum dot composites based on advanced surface manipulation strategy for flexible lighting-emitting [J]. *Nanotechnology*, 2018, 29(31) : 5203(1)–5203(25).
- [24] YUAN L, PATTERSON R, WEN X M, et al. Investigation of anti-solvent induced optical properties change of cesium lead bromide iodide mixed perovskite (CsPbBr<sub>3-x</sub>I<sub>x</sub>) quantum dots [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 504:586–592.
- [25] ZHEREBETSKYY D, SCHEELE M, ZHANG Y J, et al. Hydroxylation of the surface of PbS nanocrystals passivated with oleic acid [J]. *Science*, 2014, 344 (6190) : 1380–1384.
- [26] ZENG B R, PALUI G, ZHANG C Q, et al. Characterization of the ligand capping of hydrophobic case-zns quantum dots using NMR spectroscopy [J]. *Chemical of Materials*, 2018, 30(1) : 225–238.

本文编辑:苗 变



(上接第247页)

- [29] LI X Q, XIE X Z, WEI H T, et al. Tunable luminescence and energy transfer in Ca<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>: Ce<sup>3+</sup>, Li<sup>+</sup>, Mn<sup>2+</sup>, Eu<sup>2+</sup> phosphors [J]. *Luminescence*, 2017, 32(6) : 1025–1030.
- [30] ZHAO X, LI Z S, YU T, et al. Tunable orange red phosphors: S<sup>2-</sup>-doped high temperature phase Ca<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>: Eu<sup>2+</sup> for solid-state lighting [J]. *RSC Advances*, 2012, 3(6) : 1965–1969.
- [31] SHEN W Q, ZHU Y W, WANG Z L. Luminescent properties of Ca<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub> co-doped with Ce<sup>3+</sup> and Eu<sup>2+</sup> for near-ultraviolet light-emitting diodes [J]. *Luminescence*, 2015, 30(8) : 1409–1412.
- [32] CHEN J S. Effects of Ce doping on the luminescent property of Ca<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub>Cl<sub>2</sub>: Eu phosphor for green lighting [J]. *Luminescence*, 2015, 30(2) : 159–162.
- [33] LIU C M, QI Z M, MA C G, et al. High light yield of Sr<sub>8</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub>)Cl<sub>8</sub>: Eu<sup>2+</sup> under X-ray excitation and its temperature-dependent luminescence characteristics [J]. *Chemistry of Materials*, 2014, 26(12) : 3709–3715.
- [34] LIU C M, ZHANG S, LIU Z Y, et al. A potential cyan-emitting phosphor Sr<sub>8</sub>(Si<sub>4</sub>O<sub>12</sub>)Cl<sub>8</sub>: Eu<sup>2+</sup> for wide color gamut 3D-PDP and 3D-FED [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2013, 1(7) : 1305–1308.

本文编辑:苗 变