

doi:10.3788/gzxb20184702.0231001

高质量钙钛矿量子点薄膜制备及性能研究

余彬海, 颜才满, 饶龙石, 汤勇, 李宗涛, 陈松茂, 卢汉光

(华南理工大学 机械与汽车工程学院 表面功能结构先进制造广东普通高校重点实验室, 广州 510641)

摘 要:对聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)和聚苯乙烯-聚乙烯-聚丁烯-聚苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)高分子聚合物材料包裹钙钛矿量子点进行了研究.利用一步包裹法制备了高质量的钙钛矿量子点薄膜,在连续 365 nm 紫外激发下和 LED 远程封装时,PMMA 钙钛矿薄膜衰减率分别是 SEBS 薄膜的 4 倍和 6 倍,证明了 SEBS 包裹的钙钛矿量子点薄膜稳定性优于 PMMA.进一步对 SEBS 钙钛矿薄膜分别在空气、水等环境下的稳定性进行研究,相比钙钛矿量子点溶液 4 h 衰退约 18%,SEBS 钙钛矿薄膜在空气和水中衰退约 18%延长至约 55 h 和 240 h,说明 SEBS 包裹之后增强了钙钛矿量子点的稳定性,对钙钛矿量子点封装应用有着重要的意义.

关键词:钙钛矿;薄膜;稳定性;高质量;包裹

中图分类号:O433.4; TN383+.2

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)02-0231001-8

Study on Fabrication Technology and Properties of High Quality Perovskite Quantum Dots Film

YU Bin-hai, YAN Cai-man, RAO Long-shi, TANG Yong, LI Zong-tao,
CHEN Song-mao, LU Han-guang

(Guangdong Province Key Laboratory of Surface Functional Structure, School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Perovskite quantum dots have attracted great attention due to their narrow emission spectrum, tunable spectrum and high quantum yield, however, their poor stability because of the sensitivity of water and oxygen molecules limits their application. Polymethyl methacrylate (PMMA) and polystyrene-polyethylene-polybutene-polystyrene block copolymer (SEBS) were selected as two kinds of polymer materials to study their perovskite quantum dots film performances. The high-quality perovskite quantum dots films were fabricated by one-step package method. The decay rate of PMMA perovskite films was about 4 times and 6 times that of SEBS films under continuous 365 nm UV excitation and LED remote package, which indicated SEBS perovskite films had better stability than PMMA. Furthermore, the stability of SEBS perovskite films in air and water was studied. Compared with the 18% recession after about 4 h of the perovskite quantum dots solution, it was found that SEBS perovskite films in the air and water about 18% degradation extended to 55 h and 240 h, indicating that SEBS package enhanced the stability of the perovskite quantum dots, which has great significance to the application of perovskite quantum dot package in the future.

Key words: Perovskite quantum dots; Film; Stability; High quality; Encapsulation

OCIS Codes: 310.6860; 310.6845; 220.4610; 160.2540

基金项目:国家自然科学基金(No.51405161)和广东省科技计划项目(No.2015B010114003)资助

第一作者:余彬海(1965-),男,教授级高工,博士,主要研究方向为半导体技术. Email: bhaiyu@yeah.net

通讯作者:饶龙石(1991-),男,博士,主要研究方向为量子点合成、表征及应用. Email: memerls@mail.scut.edu.cn

收稿日期:2017-07-28;录用日期:2017-10-23

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

量子点(Quantum Dots)是一种新型纳米材料,其尺寸通常介于1~10 nm之间,由无机核以及包覆在核表面的有机分子所构成^[1].纳米尺度下,量子点具有特殊的结构特点,表现出一些奇妙特性,如小尺寸效应、量子尺寸效应、宏观量子隧道效应以及表面效应等^[2].量子点相比LED中常见的荧光材料,具有激发光谱宽、发射光谱窄、发射波长可调、量子产率高、不易发生光漂白等优点,是目前理想的荧光材料,在显示领域、激光领域、照明领域、太阳能电池、生物荧光标记等方面有着巨大的应用前景^[3].量子点具有多种类型,常见的有CdSe量子点^[4]、碳量子点^[5]、ZnO量子点^[6]、CuInS₂量子点^[7]、CdTe量子点^[8]、钙钛矿量子点等.钙钛矿量子点是近年来最为热门的量子点材料,在《Nature》2016年12月的新闻报道上—《2017 sneak peek: What the new year holds for science》,专门提到了钙钛矿量子点材料在太阳能电池领域的未来展望^[9].全无机钙钛矿量子点(CsPbX₃, X=Cl, Br, I)具有20~40 nm的窄半峰宽,高达90%的量子产率,合成方法简单,节省了成本,有望取代传统的荧光材料,并且通过调节卤族元素X(X=Cl, Br, I)的比例,可将钙钛矿量子点发光波长从380 nm调节到780 nm,实现全可见光光谱可调^[10].将钙钛矿量子点制备成LED发光器件,可以实现NTSC色域110%以上的突破,显色性能更佳^[11].

但是,钙钛矿量子点稳定性不足,通常认为钙钛矿量子点容易受到空气中水氧分子的影响,使其结构产生分解破坏,使得发光效率下降,发光寿命缩短,容易失活,尤其是发红光的钙钛矿量子点(CsPbI₃)^[12].利用高分子聚合物进行包裹使得钙钛矿量子点隔绝水、氧,有利于钙钛矿量子点的稳定^[13-14].本文在前驱体合成量子点同时进行高分子聚合物包裹薄膜的制备,使钙钛矿量子点合成、包裹一步完成,使得钙钛矿量子点尽量减少和空气中的水氧分子接触,达到保护的目的,从而提高钙钛矿量子点的稳定性.对常用的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)^[15]和聚苯乙烯-聚乙烯-聚丁烯-聚苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)^[16]高分子聚合物材料包裹钙钛矿量子点进行了研究,将钙钛矿量子点薄膜封装于发光器件上,简单快捷地获得高纯度、半峰宽窄、色域广的发光器件,有望应用于屏幕显示、荧光标记、照明等领域^[17].

1 实验

1.1 主要试剂

实验采用试剂均为化学分析纯.溴化铯(CsBr)、溴化铅(PbBr₂)、油酸(OA)、油胺(OAm)、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)、聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),均采购于上海阿拉丁生化科技股份有限公司.氯仿(CHCl₃)采购于广州化学试剂厂.聚苯乙烯-聚乙烯-聚丁烯-聚苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)采购于美国科腾高性能聚合物公司,所有的材料无需进一步处理.

1.2 钙钛矿量子点合成

参考曾海波团队提出的低温合成钙钛矿量子点方案进行实验,采用低温过饱和和重结晶法^[18].实验过程是将0.043g PbBr₂和0.147g CsBr溶于10 mL DMF中,并按一定比例加入表面活性剂油胺1 mL OAm和0.5 mL OA,剧烈搅拌完全溶解后得到前驱体溶液.将前驱体溶液以一定的速度滴入氯仿中,匀速搅拌均匀即可获得全无机绿色钙钛矿量子点(CsPbPb₃).该方法适用于室温下合成钙钛矿溶液,其操作简便,原料简单,节省了经济成本.

1.3 钙钛矿量子点薄膜的制备

为了尽量降低水氧分子对钙钛矿量子点溶液的影响,本文提出了在合成钙钛矿量子点的同时包裹保护起来,实现时间上的一致性,钙钛矿量子点合成、包裹一步完成,以下称“一步包裹”,以期避免水氧分子对钙钛矿分子结构的破坏.同时利用高分子聚合物紧密的化学键使得钙钛矿量子点进行单元上的分隔,达到分散均匀效果,降低钙钛矿量子点的团聚现象.制

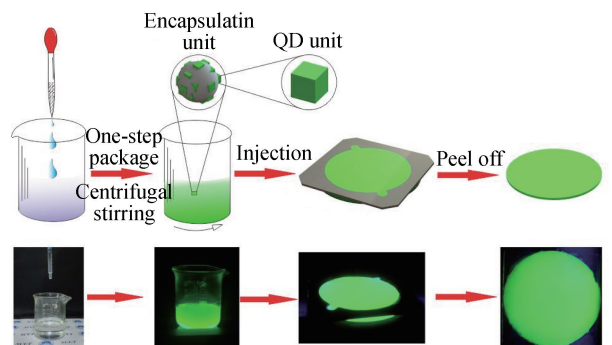


图1 高分子聚合物制备钙钛矿薄膜过程
Fig. 1 Process of manufacturing perovskite film by high molecular polymer

膜实验过程见图 1.

1) 前期准备

制备钙钛矿量子点前驱体溶液,提前将高分子聚合物溶于不良溶剂当中,实验中统一使用氯仿(CHCl_3)溶剂,浓度为 0.3 g/mL .

2) 一步包裹

将 0.4 mL 钙钛矿绿色前驱体溶液滴加到 10 mL 溶有高分子聚合物的氯仿里,边滴加边搅拌,约 5 m 后会发现出现绿色,利用 365 nm 激发光源进行照射,呈现明显的绿色荧光效应,证明钙钛矿量子点合成成功,得到钙钛矿绿色量子点胶体溶液.

3) 制备薄膜

注膜之前进行真空脱泡 90 s ,注膜采用针管注射方式,针管抽取后静置 15 min .注入模具使得恰好均匀填满模具.将模具在 $-18 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度环境中冷冻 24 h .经过上述冷冻 24 h 后,量子点基本生长结晶完全.为了完全除去氯仿,需要对薄膜进行进一步的真空干燥处理^[19].真空度选用 0.09 Mpa ,温度 $80 \text{ }^\circ\text{C}$,干燥 2 h ,空冷,得到一张表面光洁程度高,发光均匀的钙钛矿绿色量子点膜.

1.4 钙钛矿量子点薄膜的表征

钙钛矿量子点薄膜制备完成后利用日本岛津公司的 RF-6000 荧光分光光度计进行发射光谱和连续紫外激发下薄膜随时间变化(激发波长选用 365 nm)的表征.远程封装性能采用佛山多谱公司的积分球测试系统,恒流 30 mA ,测试发射光谱随时间变化规律.钙钛矿量子点溶液衰退曲线利用日本岛津公司的 RF-6000 荧光分光光度计进行了发射光谱随时间变化的表征,热稳定性和 SEBS 钙钛矿量子点薄膜稳定衰退曲线利用佛山多谱公司的积分球测试系统进行表征.透光率采用北京普析通用仪器公司的 TU-1901 双光束紫外可见分光光度计进行表征.

2 结果与分析

2.1 PMMA 和 SEBS 钙钛矿量子点薄膜的性能对比

单独表征纯聚合物制备的薄膜(纯 SEBS 薄膜和纯 PMMA 薄膜)的透光率.如图 2 所示,纯 SEBS 薄膜透光率约为 89% ,纯 PMMA 薄膜透光率约为 92% ,纯 SEBS 薄膜略低于纯 PMMA 薄膜透光率,不过纯 SEBS 薄膜透光率接近于 90% ,仍旧是理想的基质材料.内插图为对应实物图,可以看到,无论纯 PMMA 薄膜还是纯 SEBS 薄膜,“SCUT”字眼均清晰可见,说明纯 SEBS 薄膜透光率也是比较理想的.故选择该两种聚合物作为钙钛矿量子点的包裹的基质材料.

钙钛矿量子点薄膜的发射光谱(激发波长 365 nm)采用 RF-6000 荧光分光光度计表征,如图 3

所示.明显发现,两种高分子聚合物存在着极大的差异.从图 3(a)发射光谱可知,PMMA 薄膜发射峰波长位于 497 nm ,半峰宽为 35 nm ;SEBS 薄膜发射峰波长位于 517 nm ,半峰宽为 22 nm ;另外,SEBS 薄膜和钙钛矿量子点溶液发射峰几乎重合,并且半峰宽相比 PMMA 更窄更接近于钙钛矿量子点溶液的半峰宽,说明 SEBS 相比 PMMA 更加完整地保留了钙钛矿量子点原来的光学特性.

图 3(b)是 PMMA、SEBS 包裹的钙钛矿薄膜随时间变化的稳定性比较,发现 PMMA 薄膜在连续 365 nm 波长激发下, 900 s 后钙钛矿量子点薄膜光致发光强度(PL 值)衰减达到了约 43% ;SEBS 薄膜在连续激发下, 300 s 后 PL 值衰减仅为 13% ;在连续 365 nm 波长激发下 900 s 后,PMMA 薄膜衰减率约为 SEBS 薄膜的 4 倍.由此可见,在 365 nm 连续激发下,SEBS 的稳定性大于 PMMA.

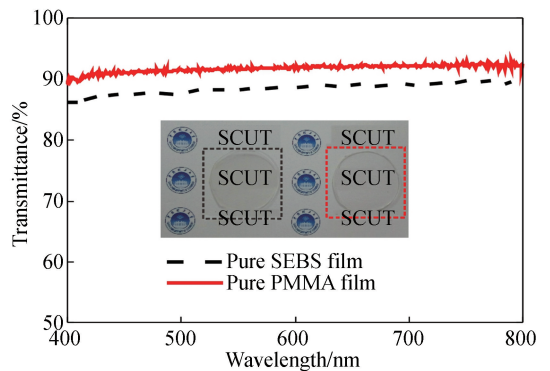


图 2 纯 SEBS 薄膜与纯 PMMA 薄膜透光率

Fig.2 Transmittance for pure SEBS film and pure PMMA film

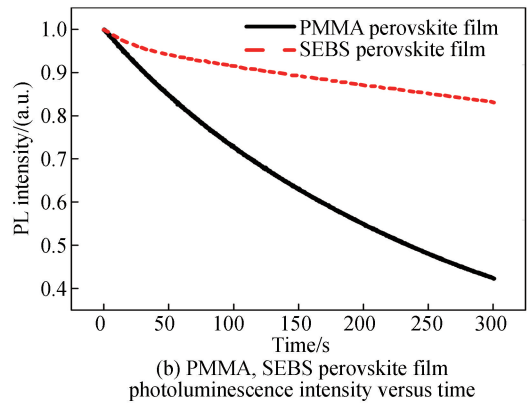
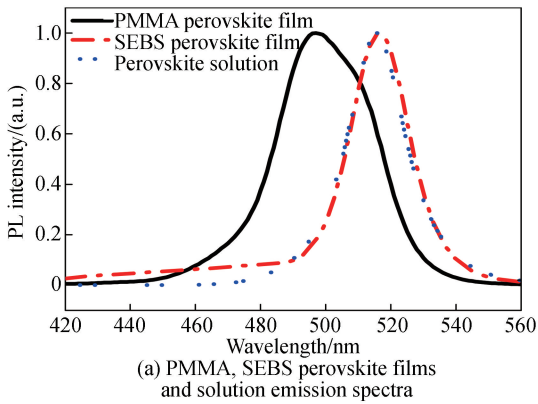


图3 不同高分子材料一步包裹的量子点膜发射光谱和随时间变化光谱

Fig.3 Quantum dots film emission spectra and spectra versus time of different polymer materials online package

在 100 °C 的热水中,进行了 PMMA 钙钛矿薄膜和 SEBS 钙钛矿薄膜稳定性的比较,如图 4 所示,实验发现,明显热因素对钙钛矿薄膜产生一定的衰减作用.对比发现,PMMA 钙钛矿薄膜在 100 °C 热水中,15 min 就已经衰减至 20.0%,而此时 SEBS 钙钛矿薄膜衰减至 62.5%,在 60 min 后,PMMA 钙钛矿薄膜几乎殒灭,仅为原来的 9.1%,而 SEBS 钙钛矿薄膜衰减至 30%.由此可以得到:SEBS 钙钛矿薄膜热稳定性高于 PMMA 钙钛矿薄膜,具有更佳的保护作用.不过,值得指出的是,热对钙钛矿量子点影响还是比较严重的,后期对该方面要进行进一步的改进探究.

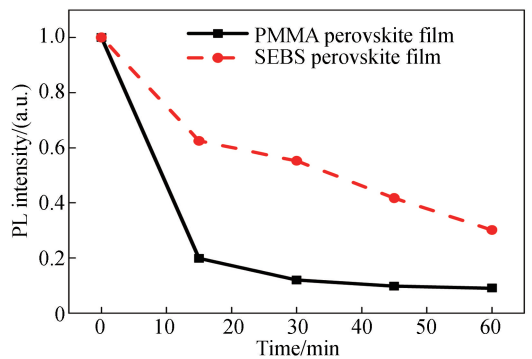


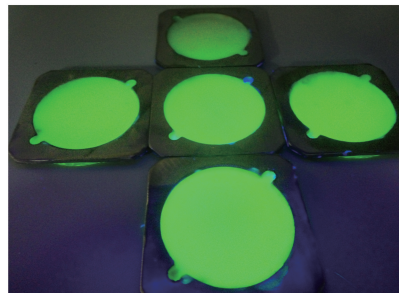
图4 PMMA 钙钛矿薄膜和 SEBS 钙钛矿薄膜在 100 °C 热水下稳定性

Fig.4 Stability of PMMA perovskite film and SEBS perovskite film under hot water at 100 °C

综合以上分析,SEBS 包裹效果优于 PMMA,更加有利于钙钛矿量子点薄膜的制备.制备出来的 SEBS 钙钛矿量子点薄膜实物图如图 5 所示,表面光洁程度高,均匀性较好,无气泡孔洞等常见的薄膜缺陷.在 365 nm 的紫外灯照射下,呈现出均匀的绿色,光致发光强度较高,说明制备的 SEBS 钙钛矿量子点薄膜成膜质量比较理想.



(a) Perovskite quantum dot films under room temperature



(b) Perovskite quantum dot films under UV 365 nm excitation

图5 钙钛矿薄膜

Fig.5 Perovskite quantum dot film

2.2 PMMA 和 SEBS 钙钛矿量子点薄膜远程封装应用性能对比

将薄膜直接应用在 RGB 器件上,其芯片仅采用了蓝光芯片以适应钙钛矿量子点激发.实验将 RGB 器件焊接至梅花板上然后进行远程量子点薄膜封装,得到蓝光-远程激发钙钛矿量子点器件,如图 6 所示.

器件紫外激发下器件呈现明显的绿色,在恒流 $I=30$ mA 下发光均匀,对应的光谱显示出明显的 RGB 蓝色芯片的蓝光窄峰和钙钛矿绿色量子点的绿光窄峰,效果理想,绿光部分半峰宽仅有 18 nm,这是钙钛矿量子点优异性能的功劳.远程激发封装应用有利于改善色温均匀性,提高出光角度和器件可靠性^[20].

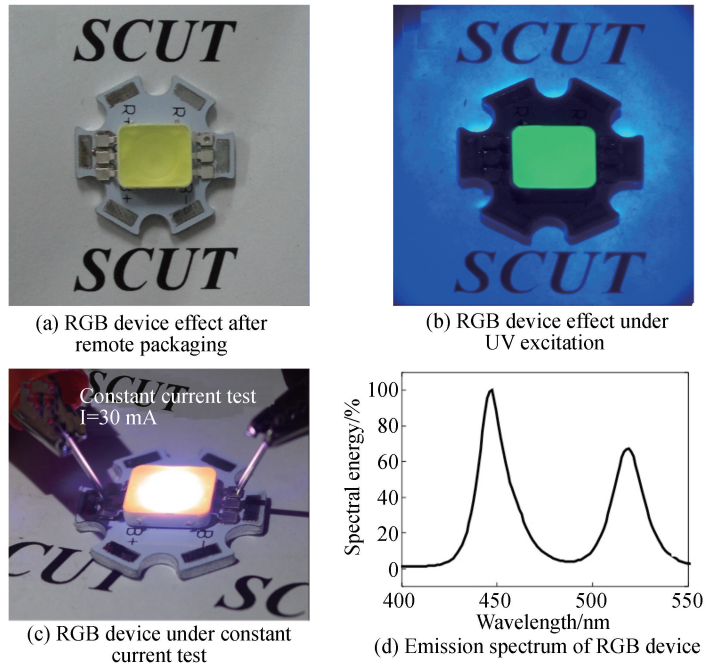


图 6 RGB 器件

Fig.6 RGB device

图 7(a)为 PMMA 膜远程封装发射光谱随时间变化图.由图可知,PMMA 一步包裹的薄膜发光强度一直下降并伴随着一定的蓝移,蓝移会导致钙钛矿量子点的主发光波长变短,换句话说,绿色钙钛矿量子点逐渐不够“绿”了,影响了其光学稳定性,直接说明 PMMA 薄膜应用在 RGB 器件上作为远程激发源,达不到较好的保护效果,钙钛矿稳定性不够,会导致其一直衰减和光学波长蓝移变化.图 7(b)为 SEBS 膜远程封装发射光谱随时间变化图.SEBS一步包裹的薄膜虽然也存在一定的衰减趋势,但它是先下降后趋于稳定,稳定

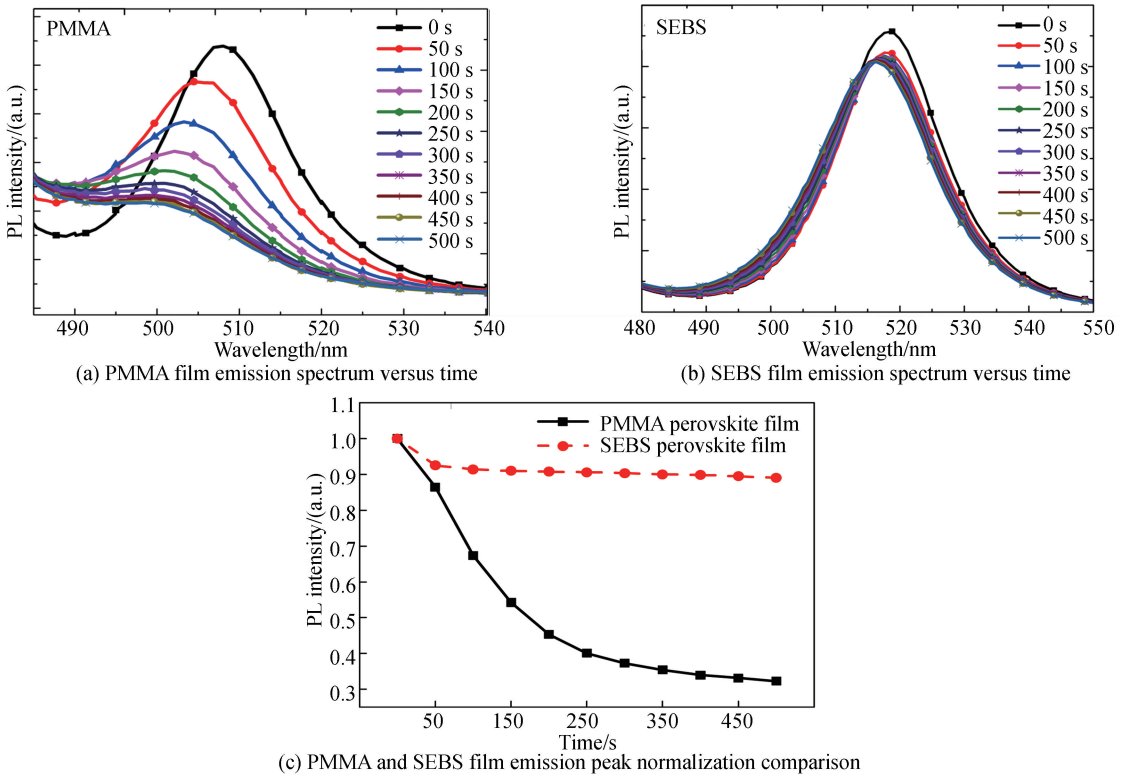


图 7 PMMA 和 SEBS 膜远程封装发射光谱随时间变化图

Fig.7 PMMA and SEBS film remote packaging emission spectrum versus time

后光谱的重合性较好,光学稳定性较好,达到了较好的保护效果.为更加直观反映包裹后的两者效果比较,将两者的峰值作图归一化处理,如图 7(c)所示,在蓝光远程激发下,连续测试 500 s 后,PMMA 衰减达到了 68%,而 SEBS 衰减率仅为 11%,PMMA 钙钛矿薄膜衰减率约是 SEBS 薄膜的 6 倍,并且 SEBS 薄膜后期比较稳定,改变不大.从而得到以下结论:用 SEBS 一步包裹的钙钛矿量子点得到了较好的保护,相比 PMMA 一步包裹有着极大的提升,在封装量子点时,SEBS 相比 PMMA 明显具备更大的优势.

2.3 钙钛矿量子点溶液和 SEBS 钙钛矿量子点薄膜衰退对比

2.3.1 钙钛矿量子点溶液衰退曲线

图 8 为钙钛矿量子点溶液(QD 溶液)随时间的衰减曲线,可以发现,钙钛矿绿色量子点溶液在合成后一直在衰退,4 h 衰退达到 18%,并且伴随着一定的发射峰蓝移过程.溶液关于衰退的深层次根本原因暂且还没有统一的定论,通常认为是空气中的水氧分子对钙钛矿的结构破坏性极大,所以钙钛矿量子点在空气中不断被水氧分子影响,使得钙钛矿量子点结构逐渐被破坏,从而使得发光强度不断降低.所以,尽量减少空气中的水氧分子和钙钛矿接触的概率对于钙钛矿应用很有必要.

2.3.2 SEBS 钙钛矿量子点薄膜稳定性

与 PMMA 相比,SEBS 钙钛矿量子点薄膜性能较优,实验进一步研究了 SEBS 钙钛矿量子点薄膜在空气和水环境中水氧因素对 SEBS 钙钛矿量子点薄膜稳定性的影响.对于制备好的 SEBS 钙钛矿量子点薄膜,直接置于空气中作为测试和保存环境,不加以任何保护,研究其在空气中稳定性的变化规律,如图 9 所示.SEBS 钙钛矿量子点薄膜 PL 值随着时间的推移,先上升后下降,通过高斯函数曲线拟合发现在约 7.5 h 处上升达到峰值.之后 PL 峰值一直下降,约 40 h 会恢复至初始的标准值附近,约 150 h 达到初始 PL 值的一半,约 250 h PL 值降至初始 PL 值的 10%,相比钙钛矿量子点溶液 4h 衰退约 18%,SEBS 钙钛矿薄膜在空气中衰退约 18%延长至约 55 h.其原因有两点:一是空气对钙钛矿量子点影响较大,使得钙钛矿量子点的 PL 发光强度不断下降.二是制备的 SEBS 钙钛矿量子点薄膜能够相当稳定存在约 50 h,前 7.5 h 的 PL 值上升推测是钙钛矿量子点晶体还在不断地利用 SEBS 的保护作用,依靠 SEBS 聚合物的骨架作为模板进行自生长,虽然此过程肯定也会受到空气的衰退影响,但是其自身结晶生长的量子点远大于空气的影响效应,所以就出现了一段上升曲线,后面 7.5h 后自身结晶速率减缓,空气的影响作用开始发挥主导地位,从此就一直衰退.

对于制备好的 SEBS 钙钛矿量子点薄膜,进行水稳定性测试,水是去离子水,将膜置于培养皿中,加入去离子水浸泡没过为止,如图 10 所示.PL 值随时间变化见图 10(c)-(d),发现在水中 SEBS 钙钛矿量子点薄膜发射光谱图的 PL 值随着时间的推移,呈现先上升后下降的过程,并且通过高斯函数曲线拟合发现在约 110 h 处上升达到峰值;之后 PL 峰值一直随着时间推移而逐步降低,约 250 h 后 PL 值降至初始 PL 值的 40%,相比钙钛矿量子点溶液 4 h 衰退约 18%,SEBS 钙钛矿薄膜在水中衰退约 18%延长至约 240 h.可以得出结论:一是水分子对钙钛矿量子点影响大,导致钙钛矿量子点结构进行逐步地破坏,进而使得钙钛矿量子点的发光强度不断下降.二是制备的 SEBS 钙钛矿量子点薄膜在水中的稳定性比较好,前 110 h 的 PL 值上升推测和空气中的规律类似,钙钛矿量子点晶体还进行自行生长结晶,虽然此过程肯定也会受到水分子的衰退影响,但是其自身结晶生长的量子点远大于水分子的影响效应,所以就出现了一段上升曲线,后面自身结

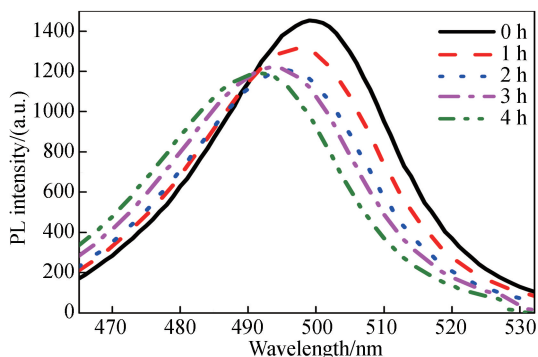


图 8 钙钛矿量子点溶液(QD 溶液)随时间的衰减曲线
Fig.8 Decay curve of perovskite quantum dots solution (QD solution) versus time

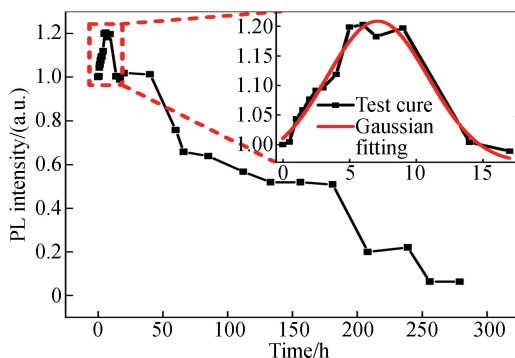


图 9 SEBS 薄膜空气中的稳定性测试
Fig.9 Stability test for SEBS film in air

晶速率减缓,水分子侵入的影响作用开始发挥主导地位,从此就一直衰减,约 250 h 后 PL 值降至初始 PL 值的 40%。

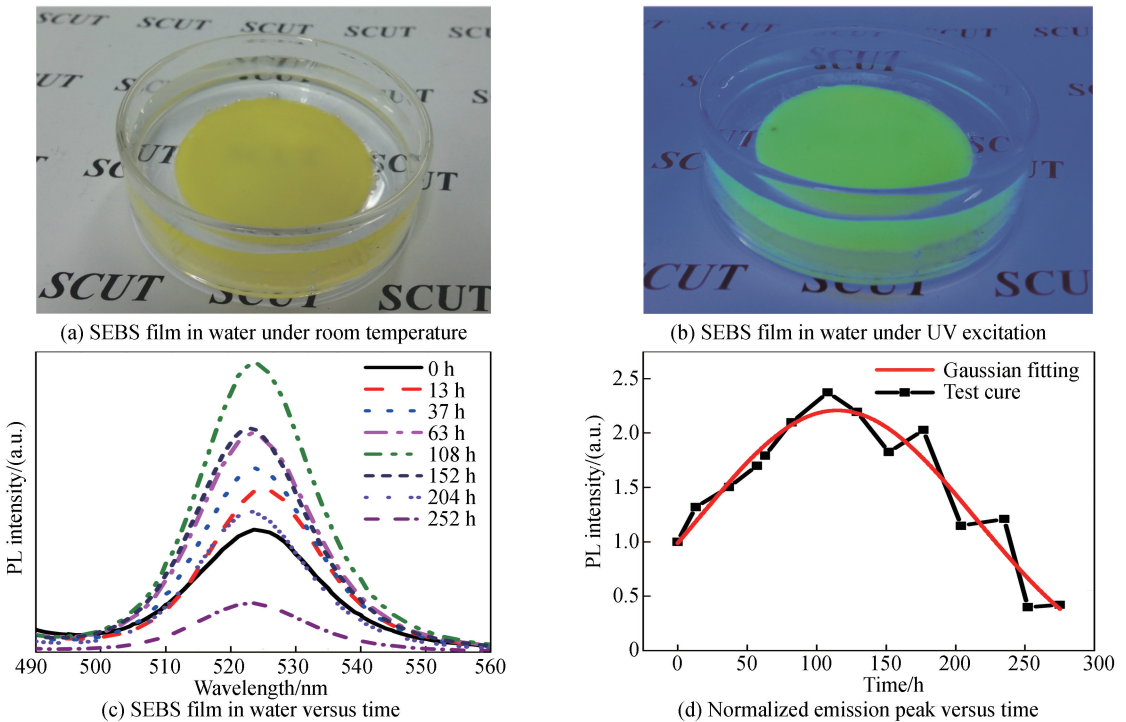


图 10 SEBS 薄膜水中的稳定性测试

Fig.10 Stability test for SEBS film in water

在空气环境下,SEBS 钙钛矿量子点薄膜约 150 h 才达到初始 PL 值的一半,在水环境下,约 250 h 后 PL 值降至初始 PL 值的 40%,相对于溶液的衰减曲线 4 h 衰退达到 18%,均已经有了极大的提升,说明了 SEBS 一步包裹制备的钙钛矿量子点薄膜提高了稳定性,已经起到了显著的效果。

3 结论

研究了聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),聚苯乙烯-聚乙烯-聚丁烯-聚苯乙烯嵌段共聚物(SEBS)两种高分子聚合物包裹对钙钛矿量子点性能的影响.在波长为 365nm 的紫外连续激发下,稳定性程度为 SEBS 的包裹性能优于 PMMA.将钙钛矿量子点薄膜封装应用于器件上检验实际应用效果,发现相比 PMMA,用 SEBS 一步包裹的钙钛矿量子点得到了较好的保护,对于器件的使用寿命有着极大程度的提高.进一步地,分别从空气、水等方面对 SEBS 包裹的钙钛矿量子点薄膜的稳定性进行了研究,并和钙钛矿溶液在相同条件下的稳定性进行了对比.结果表明,空气环境、水等因素均对 SEBS 包裹的钙钛矿量子点薄膜、钙钛矿量子点溶液的稳定性有着一定的衰退影响,但通过 SEBS 包裹后的钙钛矿量子点薄膜的稳定性明显优于钙钛矿量子点溶液,说明了 SEBS 对钙钛矿量子点起到了很好的保护作用,这对钙钛矿量子点封装应用有着重要的意义。

参考文献

- [1] 穆亲. 量子点荧光探针的设计及检测应用[D]. 上海:华东理工大学,2014.
- [2] 张文进. 高质量荧光量子点合成及光电应用[D]. 上海:华东理工大学,2014.
- [3] LIU Xiang-kai, LI Ze-hua, ZHANG Fa-huan, *et al.* Advancement of perovskite quantum dots with excellent luminescence properties[J]. *Semiconductor Technology*, 2016, **41**(4): 249-260.
刘翔凯,李泽华,张发焕,等. 具有优异发光性能的钙钛矿量子点研究进展[J]. *半导体技术*, 2016, **41**(4):249-260.
- [4] QIAN Lei, ZHENG Ying, XUE Jian-geng, *et al.* Stable and efficient quantum-dot light-emitting diodes based on solution-processed multilayer structures[J]. *Nature Photonics*, 2011, **5**(9): 543-548.
- [5] WANG Li, LYU Ting, RUAN Feng-ping, *et al.* Synthesis of photoluminescent carbon nanoparticles by hydrothermal method[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(6): 706-709.
王莉,吕婷,阮枫萍,等. 水热法制备的荧光碳量子点[J]. *发光学报*, 2014, **35**(6):706-709.
- [6] 张芦元. ZnO 纳米材料的合成与性能研究[D]. 济南:山东大学,2012.

- [7] HUA Jie, LIU Yang, SHAN Mei-ling, *et al.* Effects of composition on photoluminescence properties of Cu-Zn-In-S/Zns core/shell quantum dots[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(1): 0116001.
华杰,刘洋,单美玲,等. 组分对 Cu-Zn-In-S/ZnS 核壳量子点发光性能的影响[J]. 光子学报, 2016, **45**(1):0116001.
- [8] XIA Zheng-rong, LI Rong-qing. Two temperature-dependent energy tranfers in CdTe nanocrystal films[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(1): 0116003.
夏峥嵘,李荣青. 碲化镉纳米晶中温度相关的能量转移[J]. 光子学报, 2015, **44**(1):0116003.
- [9] GIBNEY E. 2017 sneak peek: What the new year holds for science[J]. *Nature*, 2016, **541**(7635): 14-15.
- [10] ANANTHAKUMAR S, KUMAR J R, BABU S M. Cesium lead halide (CsPbX₃, X=Cl, Br, I) perovskite quantum dots-synthesis, properties, and applications: a review of their present status[J]. *Journal of Photonics for Energy*, 2016, **6**(4): 042001.
- [11] LI Xiao-ming, WU Ye, ZHANG Sheng-li, *et al.* Quantum dots: CsPbX₃ quantum dots for lighting and displays: room-temperature synthesis, photoluminescence superiorities, underlying origins and white light-emitting diodes [J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, **26**(15): 2584.
- [12] PROTESESCU L, YAKUNIN S, KUMAR S, *et al.* Dismantling the "red wall" of colloidal perovskites: highly luminescent formamidinium and formamidinium-cesium lead iodide nanocrystals[J]. *Acs Nano*, 2017, **11**(3): 3119.
- [13] WANG Hung-chia, LIN Shin-ying, TANG An-cih, *et al.* Mesoporous silica particles integrated with all-inorganic CsPbBr₃ perovskite quantum-dot nanocomposites (MP-PQDs) with high stability and wide color gamut used for backlight display[J]. *Angewandte Chemie*, 2016, **55**(28): 7924.
- [14] ZHOU Qing-chao, BAI Ze-long, LU Wen-gao, *et al.* In situ fabrication of halide perovskite nanocrystal-embedded polymer composite films with enhanced photoluminescence for display backlights[J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(41): 9163.
- [15] ZHOU Chun-yan, JIANG Yue-wei, XU Bing. Manufacture and market of PMMA[J]. *China Plastics Industry*, 2011, **39**(9): 5-8.
周春艳,姜月伟,徐兵. 国内聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的生产及市场[J]. 塑料工业, 2011, **39**(9):5-8.
- [16] ZHOU Hai-bo, JIA Jing-xia, TANG Ming-pei, *et al.* A New type thermoplastic elastomer[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2016, **45**(10): 1327-1330.
周海波,贾景霞,汤明珮,等. 新型热塑性弹性体 SEBS[J]. 辽宁化工, 2016, **45**(10):1327-1330.
- [17] BAI Ze-long, ZHONG Hai-zheng. Halide perovskite quantum dots: potential candidates for display technology[J]. *Science Bulletin*, 2015, **60**(18): 1622-1624.
- [18] LI Xiao-ming, CAO Fei, YU De-jian, *et al.* All Inorganic halide perovskites nanosystem: synthesis, structural features, optical properties and optoelectronic applications[J]. *Small*, 2017, **13**(9): 1603996.
- [19] 曾贵玉. 微纳米含能材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 150-200.
- [20] XIAO Hua, LYU Yi-jin, XU Yun-xin, *et al.* The Difference of luminous performance between traditional phosphor packaging LED and remote phosphor LED[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, **35**(1): 66-72.
肖华,吕毅军,徐云鑫,等. 传统白光 LED 与远程荧光粉白光 LED 的发光性能比较[J]. 发光学报, 2014, **35**(1): 66-72.