

PbS 量子点在荧光集光太阳能光伏器件上的应用

张俊^{1,3} 张军¹ 耿俊杰¹ 张义¹ 丁建军^{1,2} 孙松^{1,2} 罗震林¹ 鲍骏^{1,2} 高琛^{1,2,3}

¹ 中国科学技术大学国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029

² 中国科学技术大学材料科学与工程系中国科学院能量转换材料重点实验室, 安徽 合肥 230026

³ 中国科学技术大学物理学院, 安徽 合肥 230026

摘要 荧光集光太阳能光伏器件在平面光波导效应的作用下实现等效聚光, 可以减少太阳能电池的用量, 有效降低光伏发电的成本。将胶体化学法制备的吸收和发射在近红外波段的单分散球状 PbS 量子点荧光材料封装于两片光伏超白玻璃间的正己烷溶液中, 构成溶液夹层封装的平面光波导, 并和效率为 17% 的单晶硅太阳能电池耦合, 制作出了吸收在 700~1000 nm, 效率约为 1.31% 的近红外荧光集光太阳能光伏器件。

关键词 光学器件; 光伏; 荧光集光太阳能光伏器件; 硫化铅量子点; 近红外

中图分类号 TK513.1; O436.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0123003

Application of PbS Quantum Dots in Luminescent Solar Concentrator

Zhang Jun^{1,3} Zhang Jun¹ Geng Junjie¹ Zhang Yi¹ Ding Jianjun^{1,2}

Sun Song^{1,2} Luo Zhenlin¹ Bao Jun^{1,2} Gao Chen^{1,2,3}

¹ National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230029, China

² Key Laboratory of Materials for Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Department of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

³ School of Physical Science, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

Abstract Luminescent solar concentrator (LSC) collects sunlight equivalently through the effect of planar optical waveguide, and cuts the cost of photovoltaic electricity generation by reducing the consumption of solar cells. Quantum dot (QD) LSC is fabricated by sandwiching colloidal PbS QDs hexane solution in two glasses to form solution sandwiching planar waveguide and coupling commercial monocrystalline Si solar cells whose efficiency is 17%. The QD-LSC absorbs the 700~1100 nm near infrared solar radiation and its standard efficiency is about 1.31%.

Key words optical devices; photovoltaic; luminescent solar concentrator; PbS quantum dot; near infrared

OCIS codes 230.5590; 160.2540; 230.7370; 350.6050

1 引言

荧光集光太阳能光伏器件(LSC)^[1,2]原理是将荧光材料掺入透明介质中制成荧光平面光波导, 利用荧光材料吸收入射的太阳光, 荧光材料在光波导中发射出波长红移的荧光向侧面传输, 最终聚集到侧面粘贴的太阳能电池上, 转化为电能输出。与传统反射或折射聚光相比, 荧光集光太阳能光伏器件

具有无需跟踪、性价比高、电池热效应小等优势^[3,4]。目前研究人员选择的荧光材料主要是有机荧光染料^[3~7]和量子点(QD)荧光材料^[8~11]。有机荧光染料在工业生产上比较常见, 最先被应用在荧光集光太阳能光伏器件上, 但有机荧光染料自身的缺点限制了其在荧光集光太阳能光伏器件上的应用^[9]。量子点荧光材料的物化性能比较特殊, 利用

收稿日期: 2011-06-06; **收到修改稿日期**: 2011-07-29

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向性项目(KJ CX2-YW-M11)资助课题。

作者简介: 张俊(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事新概念太阳能电池方面的研究。E-mail: shenshi@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 高琛(1962—), 男, 博士, 研究员, 主要从事新材料、同步辐射应用和新概念太阳能电池等方面的研究。

E-mail: cgao@ustc.edu.cn(通信联系人)

量子点荧光材料制作荧光集光太阳能光伏器件具有很多优点^[11],但受到材料的限制,近年来研究人员只是在可见光波段探索量子点在荧光集光太阳能光伏器件上的应用^[8,9,12,13],而在近红外波段的应用却鲜有报道。目前市场上规模化应用的硅太阳能电池的最强光谱响应位于 1000 nm 左右,可见光波段的量子点不能充分利用太阳光谱,导致荧光集光太阳能光伏器件的效率难以提高。本文根据近红外波段 PbS 量子点^[14]的特点,针对性地构造了溶液夹层封装结构的荧光集光太阳能光伏器件,其效率最高可达到 1.38%。

2 实 验

由于实验过程中所使用的化学试剂三辛基膦(TOP)和六甲基二硅硫烷(TMS)在空气中易发生水解,实验在氮气保护的手套箱中完成。称取 0.09 g 氧化铅(PbO,纯度 99.9%,0.4 mmol)放入 100 mL 的三口烧瓶中,加入 0.25 mL 油酸(OA,纯度 99.5%,0.8 mmol)、2 mL 三辛基膦(纯度 90%)和 20 mL 十八烯(ODE,纯度 90%),在 120 °C 下加热并搅拌至黄色的 PbO 粉末完全溶解。然后用微量注射器量取 21 μ L(0.1 mmol)的六甲基二硅硫烷(纯度 95%),迅速注入到反应烧瓶中,并不断搅拌,混合溶液的颜色瞬间由淡黄色变为黑色。降低反应温度,让纳米晶体在 80 °C ~ 100 °C 的温度下生长 12 min 后停止加热,向烧瓶中加入 100 mL 的无水乙醇终止反应并冷却至室温。待溶液分层后,去除上层清液,在底层反应产物中加入无水乙醇,离心分离三次,最后得到黑色的 PbS 量子点颗粒(物质的量比 $N_{OA}:N_{Pb}:N_s=8:4:1$)。在氩气保护下将量子点颗粒烘干后,加入正己烷,使 PbS 量子点悬浮分散在正己烷溶液中存放。通过 X 射线衍射(XRD)来表征所得样品的物相结构,样品的形貌和尺寸通过高分辨透射电镜(HR-TEM)来观察,利用紫外/可见/近红外分光光度计和稳态荧光光谱仪分别测定样品的吸收和荧光发射光谱。实验用荧光集光太阳能光伏器件的结构如图 1 所示:用玻璃胶将浓度为 150 μ mol/L 的上述量子点溶液封装在两片光伏超白玻璃(折射率 $n=1.532$,透光率达到 91% 以上)之间,制成量子点荧光光波导,夹层厚度 1 mm;然后在光伏超白玻璃的 4 个侧面用紫外固化胶粘贴效率为 17% 的商品单晶硅太阳能电池,用电路板将电极引出,4 个电池串联输出,完成近红外荧光集光太阳能光伏器件的制作。

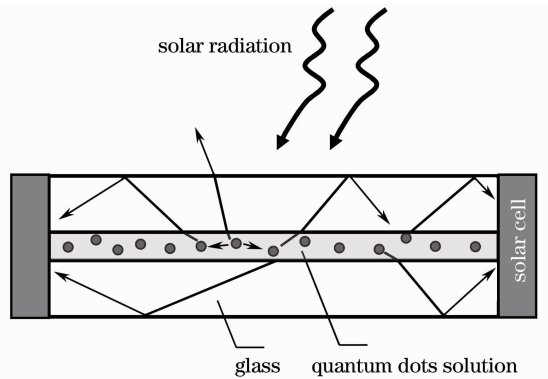


图 1 量子点荧光集光太阳能光伏器件的夹层结构示意图
Fig. 1 Sandwich structure of the QD-LSC

3 结果与讨论

图 2 是 PbS 量子点的 XRD 图,从图中可以看出实验制得的样品为 PbS 立方晶体,没有其他杂相。图 3 是油酸包覆 PbS 量子点的 HR-TEM 照片,从照片上可以看出 PbS 量子点呈球状,分散均匀,统计分析得出量子点的粒径为 (2.40 ± 0.04) nm。

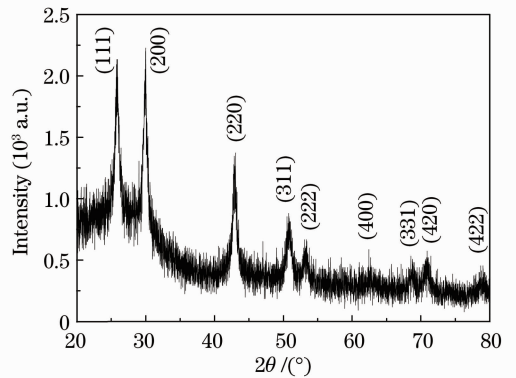


图 2 PbS 量子点的 XRD 图
Fig. 2 XRD pattern of PbS QDs

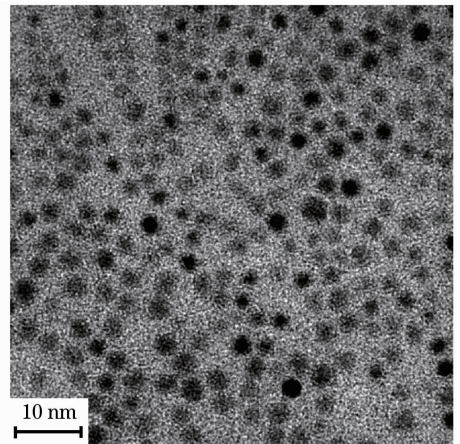


图 3 PbS 量子点的高分辨透射电镜照片
Fig. 3 HR-TEM image of PbS QDs

图4是PbS量子点在正己烷溶液中的吸收和荧光发射光谱,其最大吸收峰在826 nm,最强荧光发射峰在880 nm,斯托克斯位移为54 nm,吸收峰和发射峰之间有重叠,自吸收现象较为明显。PbS量子点的荧光发射范围为750~1100 nm,正好对应于晶体硅太阳能电池光谱响应最佳部分,适合用来制作近红外荧光集光太阳能光伏器件。

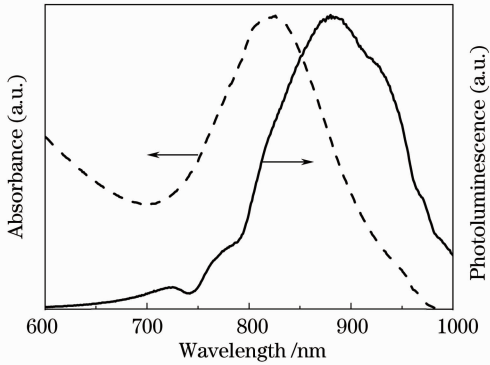


图4 常温下PbS量子点在正己烷溶液中的吸收和荧光发射光谱

Fig. 4 Absorption and emission spectra of PbS QDs in hexane solution at room temperature

图5是近红外量子点荧光集光太阳能光伏器件在室外晴天阳光下测得的 $I-V$ 曲线,得出的开路电压为2.01 V、短路电流为32.7 mA、最大输出功率为47.1 mW、填充因子为71.6%。通过与同时测量的效率为17.0%的单晶硅太阳能电池的比较(表观效率10%),最后得出其总的光电转换效率约为1.31%。图6给出了器件光电转换效率与量子点浓度之间的关系,从图中可以看出,随着量子点浓度的增加,器件的光电转换效率逐步增加,但当浓度增加到300 $\mu\text{mol/L}$ 时,器件的转换效率趋于饱和,维持

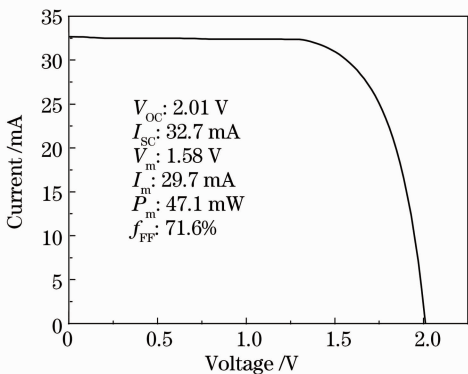


图5 室外晴天太阳光下量子点荧光集光太阳能光伏器件的 $I-V$ 曲线

Fig. 5 $I-V$ curve of QD-LSC under outdoor sunny radiation

在1.38%不再增加,表明吸收波段内的阳光已基本被量子点吸收,进一步增加量子点的浓度已无意义。

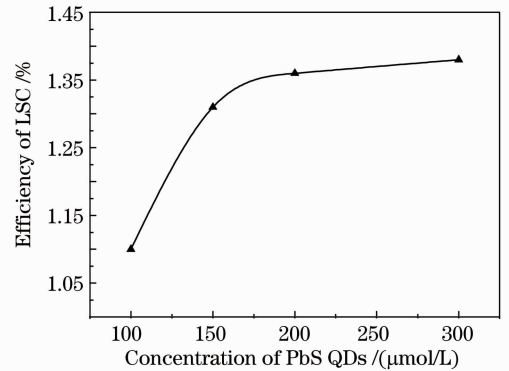


图6 量子点荧光集光太阳能光伏器件光电转换效率随量子点浓度的变化

Fig. 6 Dependence of the efficiency of LSC on PbS QD concentration

4 结 论

利用金属有机合成法,制备了尺寸均匀、单分散、量子效率较高的油酸配体包覆的PbS荧光量子点。此PbS量子点为立方结构,无其他杂相,形貌近似球形,粒径为 (2.40 ± 0.04) nm,其吸收峰位于826 nm,最强荧光发射峰在880 nm。以上述PbS量子点悬浮的正己烷溶液,制作了夹层封装结构的近红外量子点荧光集光太阳能光伏器件,其效率最高可达1.38%。PbS量子点近红外荧光集光太阳能光伏器件提高了光伏发电的性价比,对降低光伏发电的成本具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 A. Goetzberger, W. Greubel. Solar energy conversion with fluorescent collectors [J]. *Appl. Phys.*, 1977, **14**(2): 123~139
- 2 W. H. Weber, J. Lambe. Luminescent greenhouse collector for solar radiation [J]. *Appl. Opt.*, 1976, **15**(10): 2299~2300
- 3 A. F. Mansour, H. M. A. Killa, S. A. El-Wanees *et al.*. Laser dyes doped with poly(ST-Co-MMA) as fluorescent solar collectors and their field performance [J]. *Polymer Testing*, 2005, **4**(24): 519~525
- 4 A. F. Mansour, M. G. El-Shaarawy, S. M. El-Bashir *et al.*. A qualitative study and field performance for a fluorescent solar collector [J]. *Polymer Testing*, 2002, **3**(22): 277~288
- 5 L. H. Slooff, E. E. Bende, A. R. Burgers *et al.*. A luminescent solar concentrator with 7.1% power conversion efficiency [J]. *Phys. Status Solidi-R*, 2008, **2**(6): 257~259
- 6 M. J. Currie, J. K. Mapel, T. D. Heidel *et al.*. High-efficiency organic solar concentrators for photovoltaics [J]. *Science*, 2008, **321**(5886): 226~228
- 7 S. M. Reda. Stability and photodegradation of phthalocyanines and hematoporphyrin doped PMMA as solar concentrators [J]. *Sol. Energy*, 2007, **81**(6): 755~760
- 8 M. G. Hyldahl, S. T. Bailey, B. P. Wittmershaus. Photo-

- stability and performance of CdSe/ZnS quantum dots in luminescent solar concentrators [J]. *Sol. Energy*, 2009, **83**(4): 566~573
- 9 S. M. Reda. Synthesis and optical properties of CdS quantum dots embedded in silica matrix thin films and their applications as luminescent solar concentrators [J]. *Acta Mater.*, 2008, **56**(2): 259~264
- 10 A. Schuler, M. Python, M. V. d. Olmo *et al.*. Quantum dot containing nanocomposite thin films for photoluminescent solar concentrators [J]. *Sol. Energy*, 2007, **81**(9): 1159~1165
- 11 S. J. Gallagher, B. Norton, P. C. Eames. Quantum dot solar concentrators: electrical conversion efficiencies and comparative concentrating factors of fabricated devices [J]. *Sol. Energy*, 2007, **81**(6): 813~821
- 12 B. Rowan, S. McCormack, J. Doran *et al.*. Quantum dot solar concentrators: an investigation of various geometries [C]. *SPIE*, 2007, **6649**: 66490A
- 13 J. Madrid, M. Ropp, D. Galipeau *et al.*. Investigation of the efficiency boost due to spectral concentration in a quantum-dot based luminescent concentrator [C]. Conference Record of the 2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 2006, 154~157
- 14 M. A. Hines, G. D. Scholes. Colloidal PbS nanocrystals with size-tunable near-infrared emission: observation of post-synthesis self-narrowing of the particle size distribution [J]. *Adv. Mater.*, 2003, **15**(21): 1844~1849

栏目编辑:韩 峰