

文章编号: 1000-7032(2024)10-1724-08

折射率对碳点基发光太阳能聚光器光电性能的影响

白静静¹, 许凤利², 李鹏炬¹, 李 歆¹, 徐文军³, 翟 燕^{1*}

(1. 太原工业学院 材料工程系, 山西 太原 030008;

2. 太原科技大学 应用科学学院, 山西省光场调控与融合应用技术创新中心, 山西 太原 030024;

3. 山西量界数字科技有限公司, 山西 太原 030021)

摘要: 发光太阳能聚光器作为一种新型的实现低成本电力的潜在光伏技术已经引起了广泛的关注。选择合适的荧光基质和性能优异的光波导介质成为该技术得以推广应用的关键。目前, 多数研究者把目光聚焦在荧光基质光学性能的提高上, 对光波导介质性能的优化却鲜有报道。本文使用邻苯二甲酸和邻苯二胺两种前驱体, 一步微波法快速高效地合成了一种晶态碳点。鉴于该碳点具有绿色荧光, 荧光量子产率超过80%, 并且吸收和发射光谱间存在较大的斯托克斯位移, 适合作为新型太阳能聚光器用荧光基质。另外, 采用预聚体法制备了高透明的聚氨酯膜, 并作为发光太阳能聚光器用光波导介质研究了其光学性能。通过引入硫元素, 该薄膜的折射率从1.483提高到1.547, 这直接导致利用所制备的碳点作为荧光基质封装的聚氨酯薄膜型发光太阳能聚光器器件的光电转换效率提升了41%。该结果不仅证实了聚氨酯作为光波导介质的可行性, 更为通过改良光波导介质的折射率来提高光传输的研究方法提供了实验依据。

关键词: 晶态碳点; 光波导介质; 折射率; 发光太阳能聚光器; 光电转换效率

中图分类号: TK513.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240171

Effect of Refractive Index on Photoelectric Properties of Carbon Dots-based Luminescent Solar Concentrator

BAI Jingjing¹, XU Fengli², LI Pengju¹, LI Xin¹, XU Wenjun³, ZHAI Yan^{1*}

(1. Department of Materials Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China;

2. Shanxi Center of Technology Innovation for Light Manipulations and Applications, School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

3. Shanxi Quantum Digital Technology Co. LTD, Taiyuan 030021, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhai_yanh@163.com

Abstract: Luminescent solar concentrator (LSC), as a new potential solar technology to achieve low cost electricity, has attracted wide attention, and it is the key to popularize the technique to select suitable fluorescent substrate and waveguide medium with excellent optical property. Up to now, most researchers focus on the improvement of optical properties of fluorescent substrates, but there are few reports on the performance optimization of optical waveguide medium. Here, a crystalline carbon dots (CDs) was synthesized by one-step microwave method using two precursors of phthalic acid and phthalenediamine. Since the CDs can emit green fluorescence and has a large Stokes shift between absorption and emission spectra, it is suitable as a fluorescent substrate for a new type of solar concentrator. In addition, highly transparent polyurethane (PU) films were prepared by prepolymer method, and their optical properties were studied as optical waveguide medium for LSC. By introducing sulfur element, the refractive indexes of these films were increased from 1.483 to 1.547, which directly led to a 41% increase in the photoelectric conversion efficiency of the PU film-based LSC device encapsulated with the prepared CDs as the fluorescent matrix. The results not only confirm the feasibility of PU as optical waveguide medium, but also provide experimental basis

收稿日期: 2024-07-12; 修订日期: 2024-08-01

基金项目: 山西省基础研究计划(202203021212332, 202203021211211, 202203021212330)

Supported by the Fundamental Research Program of Shanxi Province(202203021212332, 202203021211211, 202203021212330)

for the research method of improving optical transmission by increasing the refractive index of optical waveguide medium.

Key words: crystalline carbon dots; waveguide medium; refractive index; luminescent solar concentrator; photo-electric conversion efficiency

1 引言

荧光太阳能聚光器(Luminescent solar concentrator, LSC)是一种新型的非成像类平面型太阳能光电转换器件,主要由光波导介质、荧光发光材料以及光伏(photovoltaics, PV)器件三部分组成^[1]。其原理是利用荧光基质吸收太阳光进而被激发产生长波长光子,新产生的光子在光波导介质内部发生全反射,最终汇聚到面板边缘的光伏电池上,从而实现光电转换^[2]。相较于其他光伏技术,LSC可以设计成透明或半透明结构,不需要传统太阳能聚光器的跟踪装置就能够吸收更多角度的太阳光,凭借其可调的颜色、形状和尺寸等,可以集成到建筑的窗户、装饰幕墙、停车棚等场景,因此,LSC光伏技术为实现光伏建筑一体化(Building integrated photovoltaics, BIPV)提供了思路^[3-4]。

荧光基质对太阳光的吸收效率及光波导介质的全内反射是影响LSC光电转换效率的两个关键因素。为了获得对太阳光的高效吸收,理想的荧光基质材料应具备高的荧光量子产率(Fluorescence quantum yield, FLQY)^[5]、与太阳光谱高度重叠的吸收谱以及吸收谱与发射谱间存在大的斯托克斯位移^[6]。目前,研究者已经使用有机染料^[7]、半导体量子点^[8]、钙钛矿纳米晶体^[9]等荧光材料进行LSC器件的设计和封装。相较于这些材料,碳点(Carbon dots, CDs)选材丰富,具有合成工艺简单灵活、成本低廉、荧光性能优异且稳定、抗光漂白等优点,且CDs以碳元素为主,由碳、氧、氮和氢等元素组成,是真正意义上的绿色环保型纳米荧光材料。通过元素掺杂等方法^[10],可以对碳点的发光效率和颜色进行有效调控,同时丰富了键合在碳核表面的官能团种类。因此,合成高FLQY、大斯托克斯位移且发光稳定的碳点用于构建LSC器件,有益于该器件光电转换效率的提高^[11]。

LSC中光波导介质通常采用透明玻璃或聚合物材料,如聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)^[12]、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)^[13]、聚二甲基硅氧烷(PDMS)^[14]、聚

甲基丙烯酸月桂酯(PLMA)^[15]、聚苯乙烯(PS)^[16]以及聚碳酸酯(PC)^[17]等。然而,选择合适的材料作为光波导介质进行该波导介质折射率的调控,增强波导介质全内反射的发生进而提升LSC器件的光电转换效率的研究尚未见报道。聚氨酯(Polyurethane, PU)作为一种新兴的高分子材料,原料丰富结构灵活,透明度高且光学性能(如折射率)可调,被广泛应用在光学元器件等领域^[18-20],这从根本上找到了调控光波导介质折射率,从而改善全内反射发生环境的理想材料。因此,本文以邻苯二甲酸为碳源,邻苯二胺为氮源,微波法合成了高效绿色发光的碳点(FLQY达80%),斯托克斯位移为145 nm。采用预聚体法制备了高透明的PU膜,通过引入硫元素提升薄膜折射率至1.547,直接导致所封装的基于该绿光碳点的LSC器件光电转换效率提升了41%。

2 实验

2.1 试剂与原料

所需化学药品和溶剂,包括邻苯二甲酸($\geq 99.5\%$)、邻苯二胺($\geq 98\%$)、1,4丁二醇(BDO, $\geq 99.7\%$)、乙二硫醇(EDT, $\geq 98\%$)、二环己基甲烷二异氰酸酯(HMDI)和聚四氢呋喃醚二醇(PTMG, $M_n=1\ 000$),均购自阿拉丁化学(中国)有限公司,二月桂酸二丁基锡(DBTDL)购置于上海化学试剂公司,无水乙醇、N,N-二甲基甲酰胺(DMF)购自天津光复科技发展有限公司。所有化学药品和试剂使用前均未进行进一步纯化。

2.2 样品制备

碳点合成:参照文献[21],称取0.377 2 g邻苯二甲酸和0.122 8 g邻苯二胺于圆底烧瓶中,加入10 mL的DMF溶剂,搅拌使其溶解,将混合物转移至微波反应仪中,800 W运行3 min。反应完成后冷却至室温,经无水乙醇洗涤两次,常温自然晾干,研磨备用。

PU膜制备:称取1.59 g HMDI和1.21 g PTMG,加入一小滴(质量分数1%)催化剂DBTDL,80 °C搅拌反应2 h生成预聚体;然后少量多次加

入 BDO 和 DMF 的混合溶液(10 mL DMF 中溶入 0.44 g BDO)进行扩链,扩链过程中适时滴加 DMF 溶剂调黏;反应约 1.5 h 后,将样品倒入预热的硅胶模具中,80 ℃烘 24 h,冷却后脱模,放置一周测试性能。

含硫聚氨酯(SPU)膜制备:在保证体系扩链剂摩尔占比不变的情况下,引入含硫扩链剂 EDT 替代 BDO,其他操作同上。不同 EDT 含量的 SPU

膜命名为 SPU0(0.00%)、SPU1(0.88%)、SPU2(1.76%)、SPU3(2.64%)、SPU4(3.52%)和 SPU5(4.39%)。

CDs@聚氨酯膜制备:将碳点溶于 DMF,在扩链反应完成后,滴加到聚氨酯样品中,搅拌使其分散均匀,1 h 后倒入预热模具,80 ℃烘 24 h,冷却后脱模,放置一周测试性能。

以上制备过程流程图如图 1 所示。

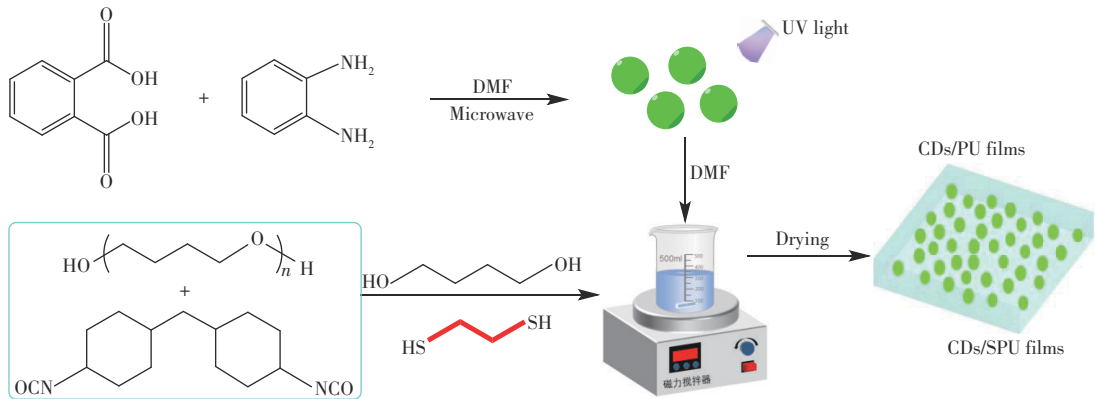


图 1 基于碳点的荧光太阳能聚光器制备流程图

Fig.1 Preparation of luminescent solar condenser based on CDs

2.3 样品表征

透射电子显微镜(TEM)图像由 JEM-2100 采集;晶体结构数据通过 X 射线衍射分析光谱仪(D8 ADVANCE, Bruker, 美国)采集;傅里叶红外光谱(FTIR)由 Nicolet iS50 采集,波段为 500~4 000 cm⁻¹ (Thermo Fisher, 美国);紫外吸收光谱由日立 U-3900 紫外/可见分光光度计采集;X 射线光电子能谱(XPS)采用 PHI-5000C ESCA 系统(PerkinElmer Inc., USA),采用 Al-Kα X 射线辐射获得;荧光光谱和量子产率通过 FLS-1000 荧光分光光度计测试得到(爱丁堡仪器,英国);折射率测试采用数字阿贝折射仪(WYA-3S, 上海仪电物理光学仪器有限公司);光电转换效率测试采用的电化学工作站为 CHI660E 型(上海辰华仪器有限公司),氙灯光源为 CHF-XM500 型(北京泊菲莱科技有限公司)。

3 结果与讨论

3.1 碳点的形貌、结构和荧光特性

图 2 为所制备 CDs 粉末的 TEM 及其高分辨(HRTEM)图像结果。该碳点呈现类球状,且粒径属于纳米尺度,分布在 1.0~10.0 nm 范围内,平均粒径约 5.0 nm。此外,从 HRTEM 图中观察到有明显的晶格条纹,间距为 0.21 nm,对应于石墨碳

(100)晶面^[22],表明所制备固态荧光碳点的碳核具有类石墨结构。

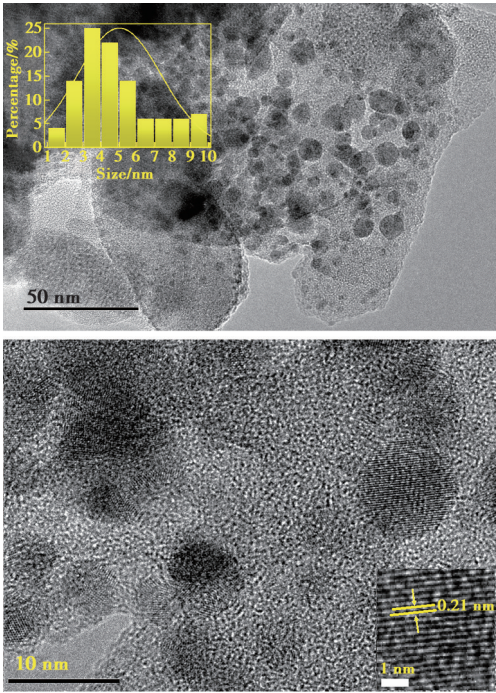


图 2 CDs 的 TEM(上)、HRTEM(下)和粒径统计直方图(上插图)

Fig.2 TEM image(top), HRTEM images(down), the statistical histogram of particle sizes(the inset in the top) of the CDs

通过傅里叶红外光谱对该碳点的微观结构进行了全面准确的分析。如图3所示, CDs在 $3\ 300\sim 3\ 500\text{ cm}^{-1}$ 处出现的吸收峰由N—H或O—H的伸缩振动造成, 在 $3\ 059\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰与C—H的伸缩振动有关, $1\ 752\text{ cm}^{-1}$ 处是C=O的伸缩振动, $1\ 615\text{ cm}^{-1}$ 是C=C的伸缩振动, $1\ 369\text{ cm}^{-1}$ 处为C=N的弯曲振动, $1\ 298\text{ cm}^{-1}$ 是C—O的变形振动, 927 cm^{-1} 是C—O—C的伸弯曲振动。这些特征峰说明碳点含有丰富的羟基、羧基和氨基等官能团, 为其荧光发射提供了可能。通过X射线衍射仪(XRD)表征了CDs的物相(图4)。由图中可知, CDs存在明显衍射峰, 说明该碳点具有晶体特征。结晶已经证明是提高碳点的FLQY和改变碳点荧光颜色的一种途径^[23-24], 邻苯二甲酸同样可以结晶形成晶态碳点^[25], 但这里不同的XRD衍射图谱预示着该碳点有着不同的晶体结构。可惜的是, 我们无法确定该碳点具体的晶体结构(利用jade6.5分析, 无法找到最佳的晶体参数)以深入研究晶体结构对碳点发光性能的调控作用。图4中插图显示了该碳点在自然光和紫外光照下的图

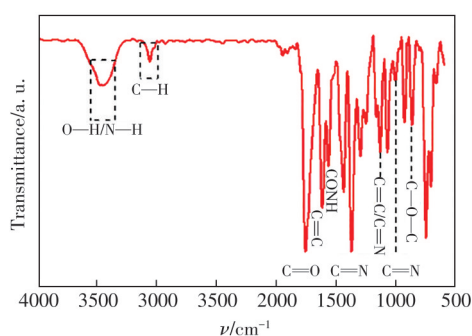


图3 CDs的傅里叶红外光谱

Fig.3 Fourier transform infrared spectroscopy of the CDs

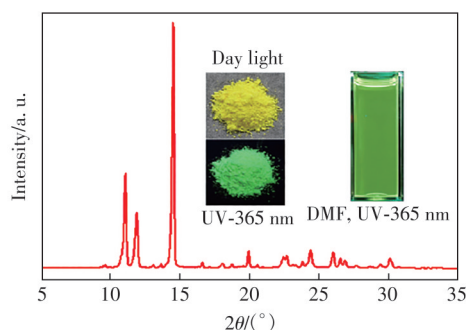


图4 碳点的XRD图谱。左插图碳点在自然光和365 nm紫外光照射下的实物照片, 右插图碳点溶液

Fig.4 XRD patten of CDs. The photos of CDs under the day light and UV-365 nm in left inset, CDs solution in right inset

片, 可以看出, 该碳点荧光发光颜色为绿色, 发光均匀。值得注意的是, 该碳点能够溶解在DMF溶液中并发出和固态时相同的绿色荧光(图4插图), 这和邻苯二甲酸相关的其他结果不同^[26]。图5呈现了该碳点的吸收光谱和发射光谱, 最佳吸收和发射峰位是365 nm和510 nm, 二者存在的斯托克斯位移为145 nm, 对应带隙能级差为0.97 eV。该碳点的荧光量子产率达80%。这些优势为碳点用于封装LSC提供了便利。

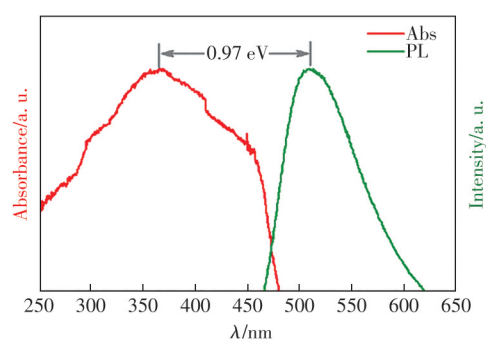


图5 CDs的紫外-可见吸收和荧光发射光谱

Fig.5 UV-Vis absorption and PL emission spectra of the CDs

3.2 聚氨酯光波导介质的透光率和折射率

如前所述, 通过PU中引入硫元素可改变其光学性能。图6为添加不同EDT含量SPU膜的紫外-可见透射光谱。可以看出, 随着EDT含量增加, 透光率逐渐增加, 由原来的88%最大增加到92%, 展示出高透明性。并且, 随着EDT含量增加, SPU膜对约450 nm以下的蓝紫可见光区和紫外光光区透射显著增强。

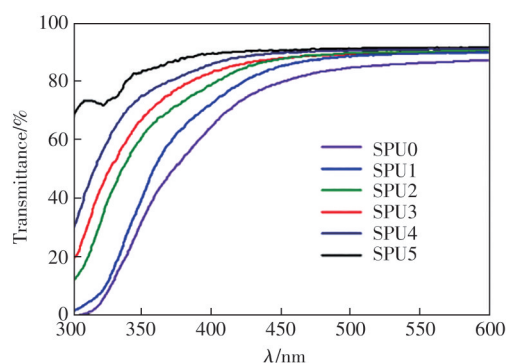


图6 不同EDT含量SPU膜的透射光谱

Fig.6 Transmittance spectra of SPU films with different EDT contents

另外, 测定了不同EDT含量SPU膜的折射率。如表1所示, 随着EDT含量增加, SPU膜的折射率也逐渐增大。SPU5中EDT含量4.39%时折射率增加到1.547, 与SPU0相比(1.483), 折射率

增大了43%。折射率的大幅提高为光子在光波导介质内传输提供了保障。折射率越高,光波导介质内发生全反射的临界角也就越大,这样会有更多的光子经光波导介质到达器件边缘,经太阳能电池进行光电转换过程。

表 1 不同 EDT 含量 SPU 光波导介质的折射率
Tab. 1 Refractive indexes of SPU optical waveguide mediums with different EDT contents

Sample	Refractive index
SPU0	1.483
SPU1	1.515
SPU2	1.524
SPU3	1.528
SPU4	1.536
SPU5	1.547

3.3 碳点基太阳能聚光器的封装和光电性能

3.3.1 CDs@SPU0 型发光太阳能聚光器

使用所制备 CDs 与不含硫的聚氨酯基体,通过改变 CDs 含量(0.5%、1.0%、1.5%、2.5% 和 3%)封装太阳能聚光器。结果如图 7 所示,随着掺入 CDs 量的增加,所制备薄膜略发黄,透明度变化不大;当碳点含量为 3% 时,底层“LSC”字迹清晰可见,说明其仍旧维持优异的透明度。这也说明了碳点在目前的浓度下能够在聚氨酯膜中分散良好。在紫外灯照射下(图 7 下),所有薄膜均呈现边缘发光较亮的特征,说明该系列薄膜适合作为太阳能聚光器光波导层介质。随着碳点浓度达到 1.5% 时,CDs@SPU0 膜的荧光绿色肉眼可见;当达到 3.0% 时,CDs@SPU0 膜荧光亮度减弱,尤其边缘部位,荧光发光减弱更为明显。

碳点含量对聚氨酯膜透光率的影响如图 8 所示,薄膜在可见光波长范围内表现出较高的透光率,最大可达到 92%。随着掺入碳点含量增加,以约 510 nm(CDs 的发射峰位)波长为界,短波长范围内的透光率大幅减小,而后面长波长范围内的透光率却几乎不变。出现这种现象的可能原因是伴随碳点含量的不断增大,该碳点对短波长范围光的吸收增强。而该碳点的加入使 CDs@SPU0 光波导层对 510 nm 之后波长范围内的可见光维持稳定透射,确保了其在窗户等场所应用的可行性。

作为发光太阳能聚光器,其光电转换性能通过自主搭建的光电测试系统获得(如图 9 所示)。器件的光电转化效率(Photoelectric conversion efficiency, PCE) η_{PCE} 依据公式(1)计算^[25]:

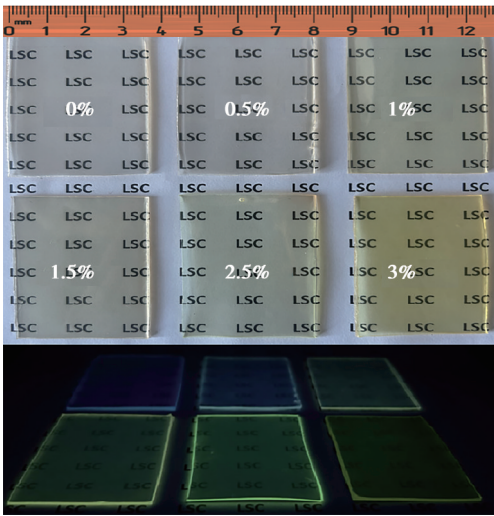


图 7 不同浓度 CDs@SPU0 薄膜在可见光(上)和 365 nm 紫外灯照射(下)的图片

Fig.7 Photos of CDs@SPU0 films with different CDs contents under visible light(up) and 365 nm UV light(down)

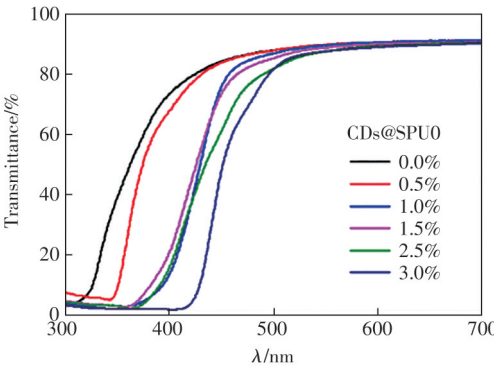


图 8 不同碳点含量 CDs@SPU0 膜紫外-可见光透射光谱
Fig.8 Transmittance spectra of CDs@SPU0 films with different CDs contents

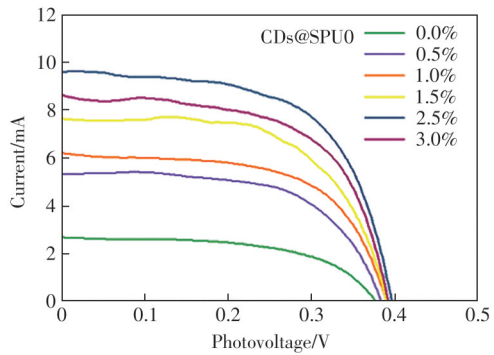


图 9 不同碳点含量 CDs@SPU0 发光太阳能聚光器的电流-电压(I-V)曲线

Fig.9 Current-voltage (I-V) curves of CDs@SPU0 luminescent solar concentrator with different CDs contents

$$\eta_{\text{PCE}} = \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}} = \frac{F \times I_{\text{sc}} \times V_{\text{oc}}}{P_{\text{in}} \times A_{\text{top}}}, \quad (1)$$

其中, F 为填充因子, P_{in} 是入射太阳能的功率密

度, A_{top} 是 LSC 的顶部表面积, I_{sc} 是在太阳光照射下电池两端电压为零时流过电池的电流, V_{oc} 是开路电压。

图 10 清晰地呈现了随着 CDs 质量百分比不断提高, PCE 呈现出了先增大后减小的趋势。这说明随着光波导层内碳点含量的增加, 波导介质吸收光子的能力不断增强, 且这些光子通过光波导介质传输到器件边缘, 进行了光电转换。当波导层内的碳点增加到一定量时, 自吸收效应加剧^[27], 部分光子被波导层内的碳点吸收, 而非在波导层内传输。当碳点含量为 2.5% 时, CDs@SPU0 发光太阳能聚光器能实现的最大 PCE 为 0.123%。

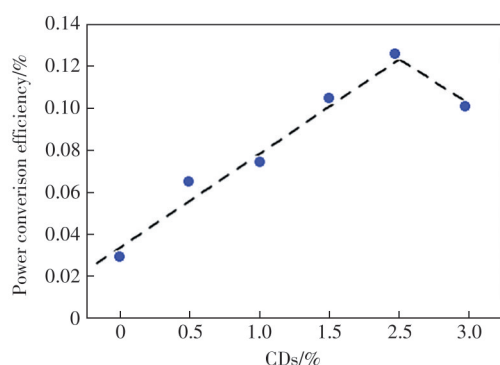


图 10 不同 CDs 含量 CDs@SPU0 发光太阳能聚光器 PCE 图
Fig.10 PCE of CDs@SPU0 luminescent solar concentrator with different CDs contents

3.3.2 CDs@SPU5 型发光太阳能聚光器

鉴于 SPU 的折射率优化, 以 EDT 添加量为 4.39% 的 SPU5 来制备 CDs@SPU5 型 LSC 器件。通过改变碳点含量 (0.5%、1.0%、2.0%、3.0% 和 4.0%) 制备了五种薄膜。如图 11 所示, 复合薄膜透明度随着掺入碳点量的增加而稍微降低, 但直到含量 4% 时, 底层“LSC”字样仍清晰可见, 表现出高的透明性。这同样说明碳点能够在该光波导介质中均匀分散, 在目前的碳点浓度下没有对透光度造成影响。从图 11 下图中可以看出, 薄膜边缘展示出良好的发光效果, 亮度随着掺入碳点量的增加呈现出先增强后减弱的变化。边缘发光亮度减弱发生在碳点含量为 4.0% 时。

图 12 为所制备 CDs@SPU5 型 LSC 器件的紫外-可见光透射光谱。结果显示, 透光率随着掺入碳点量的增多逐渐下降, 尤其是碳点含量达到 3.0%~4.0% 时, 该薄膜透光率下降明显, 透光率从 90.16% (0.0%) 下降到 71.97% (4.0%), 这有利于波导层的光传输。同 SPU0 膜一样, SPU5 膜

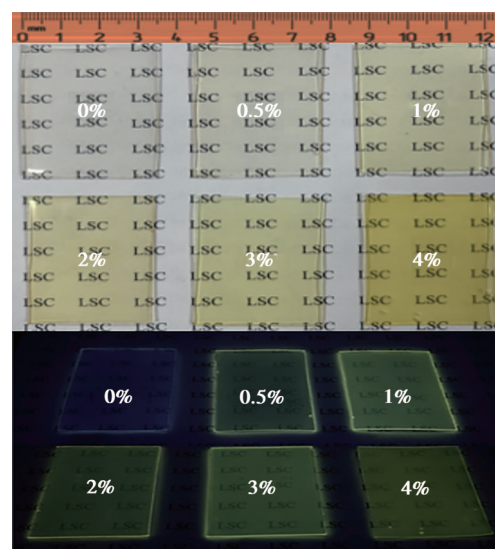


图 11 不同浓度 CDs@SPU5 薄膜在可见光(上)和 365 nm 紫外灯照射(下)下的图片

Fig.11 Photos of CDs@SPU5 films with different CDs contents under visible light(up) and 365 nm UV light(down)

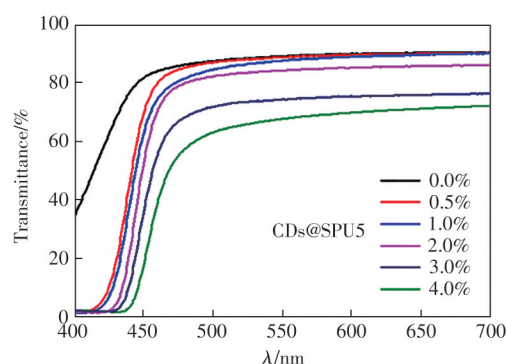


图 12 不同碳点含量 CDs@SPU5 膜的紫外-可见光透射光谱
Fig.12 Transmittance spectra of CDs@SPU5 films with different CDs contents

中加入碳点极大地增强了对蓝紫光区以及紫外光区的光吸收。然而, 相较于 CDs@SPU0 的稍微减弱, 该薄膜在大于 475 nm 的可见光区透射减弱了 20% 多, 即该薄膜作为波导层对太阳光具备强的吸收能力, 说明了该薄膜作为太阳能聚光器的应用潜力。

同样, 通过在模拟太阳光下 (AM 1.5 G, 100 mW/cm²) 的电流-电压测试 (图 13) 确定了该薄膜的光电转化能力。由图中可知, 随着碳点含量的增加, 短路电流先增强后减弱, 拐点出现在碳点含量为 3.0% 时, 这与其透射光谱测试结果一致。利用该测试数据, 依据公式 (1) 计算不同碳点含量的 CDs@SPU5 型发光太阳能聚光器的 PCE 值 (图 14)。可以看出, PCE 值随着 CDs 量的增加而

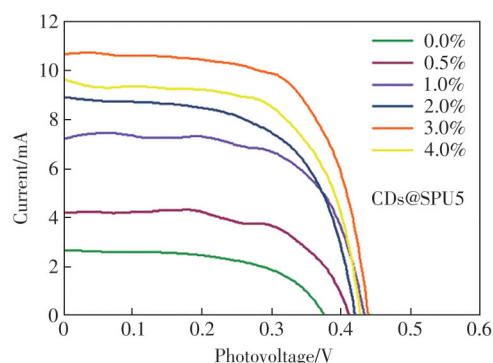


图 13 不同碳点含量 CDs@SPU5 发光太阳能聚光器的电流-电压(I - V)曲线

Fig.13 Current-voltage (I - V) curves of CDs@SPU5 luminescent solar concentrator with different CDs contents

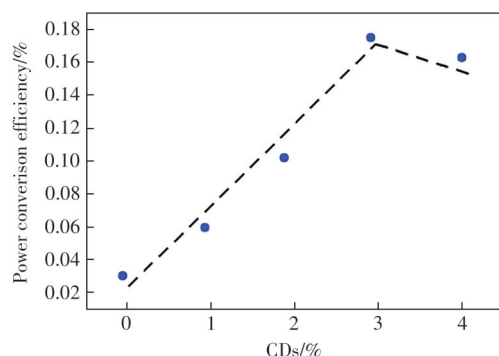


图 14 不同碳点含量 CDs@SPU5 发光太阳能聚光器 PCE 图

Fig.14 PCE of CDs@SPU5 luminescent solar concentrator with different CDs contents

增高,这源于更多的碳点参与光吸收和传输过程。碳点含量超过 3.0% 时,同 CDs@SPU0 一样,波导

层内 CDs 间的自吸收效应加剧,其影响超过对光的传输,导致 PCE 值降低。在碳点含量 3.0% 时, CDs@SPU5 型太阳能聚光器获得外部光学效率 $\eta_{\text{opt}}=4.1\%$, PCE 值为 0.1736%,与 CDs@SPU0 型太阳能聚光器相比, PCE 提高了 41%。因此,通过引入硫元素改善聚氨酯光波导介质的折射率,进而增大全内反射发生的逃逸锥,增大波导介质对光子的捕捉能力,从而增强光传输,极大地提高了该薄膜作为发光太阳能聚光器的光电转换能力。

4 结 论

本文选择邻苯二甲酸和邻苯二胺两种前驱体,采用微波法快速合成了晶态碳点。该碳点具有绿色荧光,发光高效且稳定,吸收和发射光谱间存在较大的斯托克斯位移,适合作为新型太阳能聚光器用荧光基质。另外,为了调节光波导介质的光学属性,通过引入硫元素制备了高透明的含硫聚氨酯膜,将薄膜的折射率从 1.483 提高到 1.547,直接导致利用所制备的碳点作为荧光基质封装的聚氨酯型发光太阳能聚光器的光电转换效率提升了 41%。这一结果不仅说明了聚氨酯作为光波导介质的可行性,更为通过调控波导介质的折射率以改善光传输的思路提供了实验依据。

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.20240171>.

参 考 文 献:

- [1] WEBER W H, LAMBE J. Luminescent greenhouse collector for solar radiation [J]. *Appl. Opt.*, 1976, 15(10): 2299-2300.
- [2] RONCALI J. Luminescent solar collectors: quo vadis? [J]. *Adv. Energy Mater.*, 2020, 10(36): 2001907.
- [3] DEBIJE M. Semiconductor solution [J]. *Nat. Photonics*, 2017, 11(3): 143-144.
- [4] RICHARDS B S, HOWARD I A. Luminescent solar concentrators for building integrated photovoltaics: opportunities and challenges [J]. *Energy Environ. Sci.*, 2023, 16(8): 3214-3239.
- [5] LIU H X, BAI H T, LAM J W Y, *et al.* Recent advances in aggregation-induced emission materials for enhancing solar energy utilization [J]. *Nanoscale Horiz.*, 2023, 8(4): 453-459.
- [6] LI J R, ZHAO H G, ZHAO J J, *et al.* Boosting efficiency of luminescent solar concentrators using ultra-bright carbon dots with large Stokes shift [J]. *Nanoscale Horiz.*, 2023, 8(1): 83-94.
- [7] PINTOSI D, COLOMBO A, LEVI M, *et al.* UV-curable fluoropolymers crosslinked with functional fluorescent dyes: the way to multifunctional thin-film luminescent solar concentrators [J]. *J. Mater. Chem. A*, 2017, 5(19): 9067-9075.
- [8] MEINARDI F, EHRENBURG S, DHAMO L, *et al.* Highly efficient luminescent solar concentrators based on earth-abundant indirect-bandgap silicon quantum dots [J]. *Nat. Photonics*, 2017, 11(3): 177-185.
- [9] LIU G J, ZHAO H G, DIAO F Y, *et al.* Stable tandem luminescent solar concentrators based on CdSe/CdS quantum dots and carbon dots [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2018, 6(37): 10059-10066.

- [10] LI W H, WANG X H, LIN J S, *et al.* Controllable and large-scale synthesis of carbon quantum dots for efficient solid-state optical devices [J]. *Nano Energy*, 2024, 122: 109289.
- [11] LIN J S, WANG L H, JING Q, *et al.* Highly efficient and high color rendering index multilayer luminescent solar concentrators based on colloidal carbon quantum dots [J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 481: 148441.
- [12] HUANG H Y, TALITE M J, CAI K B, *et al.* Utilizing host-guest interaction enables the simultaneous enhancement of the quantum yield and Stokes shift in organosilane-functionalized, nitrogen-containing carbon dots for laminated luminescent solar concentrators [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(46): 23537-23545.
- [13] WANG Z J, ZHAO X J, GUO Z Z, *et al.* Carbon dots based nanocomposite thin film for highly efficient luminescent solar concentrators [J]. *Org. Electron.*, 2018, 62: 284-289.
- [14] LI X Y, QI J, ZHU J Y, *et al.* Low-loss, high-transparency luminescent solar concentrators with a bioinspired self-cleaning surface [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2022, 13(39): 9177-9185.
- [15] PURCELL-MILTON F, GUN'KO Y K. Quantum dots for luminescent solar concentrators [J]. *J. Mater. Chem.*, 2012, 22(33): 16687-16697.
- [16] GOKAN H, ESHO S, OHNISHI Y. Dry etch resistance of organic materials [J]. *J. Electrochem. Soc.*, 1983, 130(1): 143-146.
- [17] EL-BASHIR S M, BARAKAT F M, ALSALHI M S. Double layered plasmonic thin-film luminescent solar concentrators based on polycarbonate supports [J]. *Renewable Energy*, 2014, 63: 642-649.
- [18] BENLI S, YILMAZER Ü, PEKEL F, *et al.* Effect of fillers on thermal and mechanical properties of polyurethane elastomer [J]. *J. Appl. Polym. Sci.*, 1998, 68(7): 1057-1065.
- [19] GORRASI G, TORTORA M, VITTORIA V. Synthesis and physical properties of layered silicates/polyurethane nanocomposites [J]. *J. Polym. Sci. Part B: Polym. Phys.*, 2005, 43(18): 2454-2467.
- [20] KIM Y S, LEE J S, JI Q, *et al.* Surface properties of fluorinated oxetane polyol modified polyurethane block copolymers [J]. *Polymer*, 2002, 43(25): 7161-7170.
- [21] 张学文, 苗润泽, 许凤利, 等. 晶相对碳点多色发光的调制及其在白光发光二极管器件中的应用 [J]. *发光学报*, 2023, 44(2): 298-306.
- ZHANG X W, MIAO R Z, XU F L, *et al.* Crystalline phase-tuned multicolor luminescence of carbon dots for white-light-emitting diode devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2023, 44(2): 298-306. (in Chinese)
- [22] ZHUO K L, SUN D, XU P P, *et al.* Green synthesis of sulfur- and nitrogen-co-doped carbon dots using ionic liquid as a precursor and their application in Hg^{2+} detection [J]. *J. Lumin.*, 2017, 187: 227-234.
- [23] FENG Q, XIE Z G, ZHENG M. Colour-tunable ultralong-lifetime room temperature phosphorescence with external heavy-atom effect in boron-doped carbon dots [J]. *Chem. Eng. J.*, 2021, 420: 127647.
- [24] WANG Y C, JIANG K, DU J R, *et al.* Green and near-infrared dual-mode afterglow of carbon dots and their applications for confidential information readout [J]. *Nanomicro Lett.*, 2021, 13(1): 198.
- [25] WARNER T, GHIGGINO K P, ROSENGARTEN G. A critical analysis of luminescent solar concentrator terminology and efficiency results [J]. *Sol. Energy*, 2022, 246: 119-140.
- [26] XU F L, DONG R Y, CUI J C, *et al.* Transformation of crystal structure induced by the temperatures in carbon dots (CDs)-based composites with multicolor fluorescence for white Light-Emitting-Diode (WLED) [J]. *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.*, 2024, 310: 123958.
- [27] ZHOU Y F, BENETTI D, TONG X, *et al.* Colloidal carbon dots based highly stable luminescent solar concentrators [J]. *Nano Energy*, 2018, 44: 378-387.



白静静(1986-),女,山西运城人,博士,副教授,2020年于中北大学获得博士学位,主要从事功能高分子材料的制备及应用的研究。

E-mail: baijj@tit.edu.cn



翟燕(1972-),女,山西文水人,博士,教授,2007年于四川大学获得博士学位,主要从事高性能耐热聚合物的研究。

E-mail: zhai_yanh@163.com