

掺杂 Rhodamine 6G 的平面波导型 PMMA 聚光器研制

李 醒¹, 张春梅¹, 吴魏霞¹, 张 翱¹, 罗云鹏¹, 邓锐江², 邹 成², 孟 涛^{1*}

1. 北京印刷学院, 北京 102600

2. 中山大学光电材料与技术国家重点实验室, 广东 广州 510275

摘 要 通过聚光波导提高光的转换和收集效率, 是提高太阳能电池效率、减少电池用量、降低光伏发电系统成本的重要途径。利用 PMMA 作为波导基质材料, Rhodamine 6G(罗丹明 6G)作为荧光染料, 通过涂覆方法, 在表面积为 50 mm×50 mm、厚度为 5 mm 的洁净 PMMA 衬底上制备出了荧光层厚度约为 32 μm 的平面波导型聚光器, 并研究了荧光染料的掺杂浓度对其聚光比和光伏性能的影响。结果表明, 当掺杂浓度为 0.250% 时, 聚光器的聚光比和器件的光伏性能达到了最优, 分别为 0.45% 和 0.49%。

关键词 Rhodamine 6G; 聚光器; 平面波导

中图分类号: O484.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2017)12-3920-04

引 言

平面聚光波导的原理是将太阳光耦合到波导中, 在波导内部通过全内反射传输到波导端面输出。如果在波导端面贴上太阳能电池, 可实现平面波导型聚光器的光伏发电^[1]。荧光太阳能聚光波导是一种新颖的聚光器, 由于其无需追日系统、制作成本低、重量轻等优点, 成为近年来的研究热点, 其原理是将荧光分子(有机染料、无机荧光物质、量子点等)掺杂在波导中, 入射的太阳光被荧光分子吸收后发射出荧光。这些发射出来的荧光被束缚在波导中并沿波导传输, 最终被贴在波导端面的太阳能电池吸收。平面波导型荧光聚光器主要在波导正面入射光、侧面出射光, 将荧光传输到了电池上, 有效降低了聚光所导致的热效应^[2], 在无追日系统的情况下, 能够接受来自各个方向的太阳光(包括直射太阳光和漫反射光)。近年来, 在平面波导型荧光聚光器的结构设计方面, 人们做了很多工作^[3-12], 例如减少荧光的自吸收, 提高聚光器的聚光效率等。

目前对平面波导型荧光聚光器的研究主要是寻找合适的荧光材料。荧光物质需要对太阳光中波长小于 950 nm 的光具有宽的吸收光谱, 而发射波长在 1 000 nm 左右。这主要是减小发射光谱和吸收光谱的重叠, 从而减小自吸收。在荧光

材料中, 有机荧光材料因种类多、价廉、溶解度好、吸收系数大、荧光量子效率高等特点, 受到了广泛的关注。本工作选用 Rhodamine 6G 作为有机荧光材料, 利用 PMMA 作为波导基质材料, 将其分别溶解到丙酮溶液中, 得到 Rhodamine 6G 和 PMMA 混合的丙酮分散液, 将其涂敷到洁净的 PMMA 表面, 制作出掺杂 Rhodamine 6G 的平面波导型 PMMA 聚光器, 并研究了聚光器的光学性质。

1 实验部分

实验所用 Rhodamine 6G 的分子量为 479.01, 分子式为 $C_{28}H_{31}N_2O_3Cl$, 呈红色或黄棕色粉末, 对光非常敏感, 其吸收和发射光在 500~600 nm, 是一种具有极高荧光量子效率(99%)的有机荧光染料。Rhodamine 6G 在乙醇或丙酮溶液中的分散性良好。为了测量 Rhodamine 6G 的荧光特性, 利用紫外-可见-近红外分光光度计(LAMBDA 900)和光谱分析仪(MS9710C)测量了它在丙酮中的吸收和发射光谱。如图 1 所示, Rhodamine 6G 的吸收峰为 527 nm, 荧光发射峰为 577 nm。从两曲线的相对位置可以看出, Rhodamine 6G 有着相对较大的斯托克斯位移, 因而可以有效地减少自吸收。

平面波导型聚光器的主要制作步骤如下: (1) 称取 9.2 g 的 PMMA(polymethyl methacrylate)溶于 115 mL 丙酮中, 得

收稿日期: 2016-03-29, 修订日期: 2016-08-08

基金项目: 国家级创新创业训练计划项目(08150115/163, 25000115006/019), 国家重大科学研究计划项目(2012CB933704), 北京市教委面上科研项目(KM201210015008, 08190116/022)和北印英才项目(27170115004/043), 北京市教委科技创新服务能力建设项目(04190117026)资助

作者简介: 李 醒, 1993 年生, 北京印刷学院本科生 e-mail: 305666769@qq.com

* 通讯联系人 e-mail: tmeng@bigc.edu.cn

到浓度为 $0.08 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 PMMA 丙酮溶液；(2) 称取 14 mg 的 Rhodamine 6G 粉末溶于丙酮中，得到浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 Rhodamine 6G 丙酮溶液；(3) 取一定量的 Rhodamine 6G 和 PMMA 的丙酮溶液，均匀混合后得到 Rhodamine 6G/PMMA 丙酮分散液，分散液中 Rhodamine 6G 与 PMMA 的质量百分比分别为 0.625%，0.500%，0.375%，0.250%，0.125% 和 0.0625%；(4) 将分散液缓慢均匀地滴到洁净的 PMMA 波导表面，在液体表面张力的作用下，混合液均匀扩散至整个 PMMA 表面。迅速将该样品放到半封闭的容器中，等样品干燥后取出，即可得到涂覆荧光层的平面波导型 PMMA 聚光器。其尺寸均为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ，荧光层厚度约为 $32 \mu\text{m}$ 。

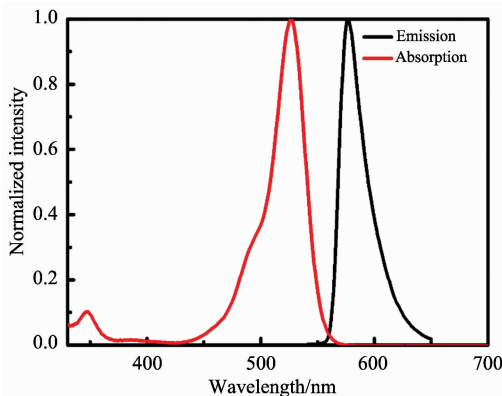


图 1 Rhodamine 6G 在丙酮溶液中的吸收和发射谱
Fig. 1 Absorption and emission spectra of Rhodamine 6G in acetone

2 结果与讨论

2.1 聚光器的吸收和发射谱测试

为了研究 Rhodamine 6G 浓度对聚光效率的影响，使用了不同浓度的 Rhodamine 6G/PMMA 丙酮溶液(浓度依次为 0.625%，0.500%，0.375%，0.250%，0.125% 和 0.0625%)制备了聚光器，图 2 是聚光器的吸收光谱。从图 2 可看出，随着浓度的增加，吸收峰没有发生位移，峰位都在

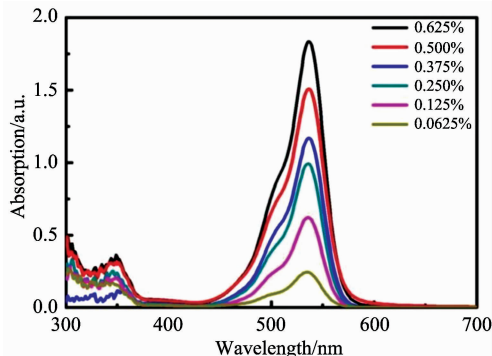


图 2 掺杂不同浓度的 Rhodamine 6G 聚光器的吸收光谱
Fig. 2 Absorption spectra of the planar luminescent solar concentrator waveguides doped with with different concentrations of Rhodamine 6G

536 nm，但随着荧光染料浓度的增加，对入射光的吸收逐渐增强。这是由于随着掺杂浓度的提高，荧光层中荧光分子的数量逐渐增加，入射光子与荧光分子相互作用的几率大大增加，因而对入射光的吸收出现了增强的趋势。

图 3 为掺杂不同 Rhodamine 6G 浓度的聚光器的发射光谱，激发光波长为 350 nm。从图 3 看出，不同掺杂浓度薄膜的荧光发射峰位置没有明显的移动，均在 580 nm 左右。随着荧光染料掺杂浓度从 0.0625% 增加到 0.250%，对应曲线的相对荧光强度也逐渐增加，但是当浓度继续增加到 0.375% 和 0.500% 后，对应曲线的相对荧光强度逐渐下降。出现以上现象的主要原因是，在一定的掺杂浓度范围内，随着掺杂浓度的增加，染料涂层中荧光分子密度逐渐增加，从而造成荧光分子对入射光的吸收率增加，因此发射出的荧光强度增加。但随着染料浓度的继续增加，荧光分子的密度过大，荧光分子发射出的荧光与其他荧光分子相互作用的几率也逐渐增加，从而导致重吸收也逐渐增加，最终导致相对荧光强度降低。

2.2 聚光性能测试

为了测试聚光器的聚光特性，将单晶硅太阳能电池片

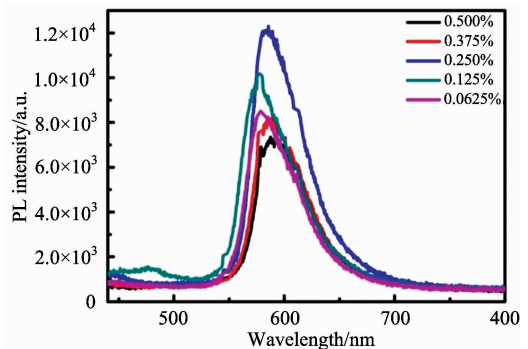


图 3 掺杂不同浓度的 Rhodamine 6G 聚光器的发射谱
Fig. 3 Emitted PL intensity of the planar luminescent solar concentrator waveguides doped with with different concentrations of Rhodamine 6G

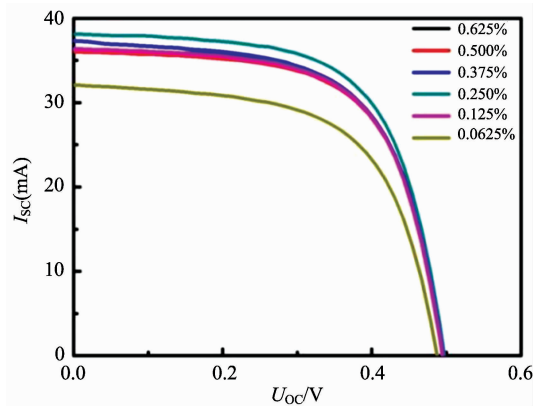


图 4 不同掺杂浓度涂覆的平面波导聚光器器件 I-V 特性曲线
Fig. 4 I-V curves of the solar cell attached to the luminescent solar concentrator waveguides with different Rhodamine 6G concentrations

(功能类似与光探测器, 只为表征波导聚光器端面出光, 不关注电池本身特性)用激光切割成为 50 mm×5 mm 大小尺寸, 并引出电极后紧贴在聚光波导的端面, 然后将其安装在测试夹具中。将整个测试装置放置在太阳能模拟器的光源下照射, 对连接在波导端面的太阳能电池进行测试。图 4 是对不同 Rhodamine 6G 掺杂浓度的平面波导型聚光器测试得到的 $I-V$ 曲线。

根据测试所得到 $I-V$ 特性曲线, 可以获得短路电流 I_{sc} 、开路电压 U_{oc} 、最大输出功率 P_m 、填充因子 FF 等参数, 然后根据各参数的关系计算得到能量转换效率 η 和光学聚光比 C , 各参数见表 1。表 1 中各参数的表达式为式(1)一式(4)

$$C = PG \quad (1)$$

$$G = A_{top}/A_{edge} \quad (2)$$

$$P = P_{out}/P_{in} = \eta/\eta_0 \quad (3)$$

$$\eta = (I_{sc}U_{oc}FF)/P_{in} \quad (4)$$

其中: C 是波导光学聚光比, G 是波导表面面积与波导端面面积之比(波导聚光器几何聚光比), P 是波导端面出射光能量与耦合到波导内的太阳光能之比, η 是电池片产生的电能与耦合到波导内的太阳光能之比, A_{top} 是接收入射光的波导面积, A_{edge} 是出射光端的波导面积, η_0 是电池片直接在太阳光模拟光源下测得的能量转换效率, I_{sc} 是电池片的短路电流, U_{oc} 是电池片的开路电压, FF 是填充因子, P_{in} 是从波导上表面耦合到波导内的光能。

表 1 实验测得到的聚光特性相关参数

Table 1 Parameters of the solar cell and the luminescent solar concentrator waveguides with different Rhodamine 6G concentrations

Sample	Concentration/%	I_{sc}/mA	U_{oc}/V	FF	$\eta/\%$	$P/\%$	G	C
1	0.625	36.19	0.49	0.64	0.45	4.09	10	0.40
2	0.500	36.69	0.49	0.64	0.46	4.18	10	0.42
3	0.375	37.39	0.49	0.63	0.46	4.18	10	0.42
4	0.250	38.16	0.50	0.64	0.49	4.45	10	0.45
5	0.125	36.36	0.49	0.64	0.45	4.09	10	0.41
6	0.062 5	32.13	0.49	0.61	0.38	3.49	10	0.35

从表 1 可以看出, 随着 Rhodamine 6G 与 PMMA 质量比的增加, 波导器件的短路电流 I_{sc} 先从 32.13 mA 逐渐增大到 38.16 mA, 然后又逐渐降到 36.19 mA。相应的光电转换效率和光学聚光比也呈现出了先增大后减小的趋势。这主要是因为随着掺杂浓度的增加, 染料涂覆层中荧光分子的密度也在逐渐增加, 荧光分子对入射光的吸收和发射都相应地增加, 这导致了波导的光电转换效率和光学聚光比逐渐增加。但当荧光分子的数量增加到适当数量时, 由于染料本身的自吸收, 发射的荧光在波导内部逐渐损耗, 将会导致波导端面出光减少, 进而导致光电转换效率和光学聚光比逐渐减少。由此可见, 当 Rhodamine 6G 掺杂浓度为 0.250% 时, 可获得 0.45 倍的最优光学聚光比。

3 结 论

选用 Rhodamine 6G 作为荧光材料, 利用 PMMA 作为波导基质材料, 通过荧光染料层涂覆方法制备平面波导型 PMMA 聚光器, 研究了 Rhodamine 6G 掺杂浓度对其聚光比和光伏性能的影响。结果表明, 随着 Rhodamine 6G 掺杂浓度的增加, 聚光器对入射光的吸收逐渐增加, 但发射的荧光强度出现了先增加后减小的趋势。在掺杂浓度为 0.250% 时, 聚光器的荧光峰最强, 其聚光比也达到了最优。器件的光伏特性表明, 随着 Rhodamine 6G 与 PMMA 质量比逐渐增加, 器件的短路电流 I_{sc} 和光电转换效率先增大后减小, 与聚光器的聚光比规律相同。

References

- [1] Karp J H, Tremblay E J, Ford J E. Opt. Express, 2010, 18: 1122.
- [2] Slooff L H, Bende E E, Burgers A R, et al. Phys. Status Solidi, 2008, 2: 257.
- [3] Tsoi S, Broer D J, Bastiaansen C W M, et al. Opt. Express, 2010, 18: 536.
- [4] Kennedy M, McCormack S J, Doran J, et al. Sol. Energy, 2009, 83: 978.
- [5] Gutmann J, Peters M, Bläsi B, et al. Opt. Express, 2012, 20: 157.
- [6] Haines C, Chen M, Ghiggino K P. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2012, 105: 287.
- [7] El-Bashir S M. J. Lumin., 2012, 132: 1786.
- [8] Debije M G, Dekkers W. J. Renew. Sustain. Energy, 2012, 4: 013103.
- [9] van Sark W G J H M. Renew. Energy, 2013, 49: 207.
- [10] Maggioni G, Campagnaro A, Carturan S, et al. Sol. Energy Mater. Sol. Cells, 2013, 108: 27.
- [11] Currie M J, Mapel J K, Heidel T D, et al. Science, 2008, 321: 226.

[12] Albers P T M, Bastiaansen C W M, Debije M G. *Sol. Energy*, 2013, 95: 216.

Planar Waveguide-Based Luminescent Solar Concentrator in PMMA Doped with Rhodamine 6G

LI Xing¹, ZHANG Chun-mei¹, WU Wei-xia¹, ZHANG Ao¹, LUO Yun-peng¹, DENG Rui-jiang², ZOU Cheng², MENG Tao^{1*}

1. Beijing Institute of Graphis Communication, Beijing 102600, China

2. State Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Technologies, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract Photovoltaic power generation is one of the most efficient ways to utilize solar energy. In this paper, a type of planar waveguide-based luminescent solar concentrator with a surface area of 50 mm×50 mm and a height of 5 mm is fabricated by coating a layer of Rhodamine 6G-doped PMMA on a clean PMMA substrate. The thickness of the Rhodamine 6G-doped PMMA layer is 32 μm. The influence of the concentration of Rhodamine 6G on the concentration ratio and photovoltaic properties has also been investigated. The results have shown that the concentration ratio and the photovoltaic properties reach 0.45 and 0.49%, respectively when the concentration of Rhodamine 6G is 0.250%.

Keywords Rhodamine 6G; Solar concentrator; Planar waveguide

(Received Mar. 29, 2016; accepted Aug. 8, 2016)

* Corresponding author