Material Sciences 材料科学, 2020, 10(9), 744-749
Published Online September 2020 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ms
https://doi.org/10.12677/ms.2020.109089

Hans汉斯

碲化镉太阳电池弱光性能研究

朱树盛，李　阳*

五邑大学，应用物理与材料学院，广东 江门
Email: shushengzhu0519@163.com, *insidesun@163.com

收稿日期：2020年8月27日；录用日期：2020年9月11日；发布日期：2020年9月18日

摘　要

本文通过选择了三种不同并联电阻的CdTe太阳电池进行对比研究，研究发现随着光强的减弱，CdTe太阳电池的短路电流密度(J_{SC})、开路电压(V_{OC})、单位输出功率(P_{out})和填充因子(FF)均降低。结果显示并联电阻越大的CdTe太阳电池，各性能参数衰减越慢。通过分析并联电阻随光强的变化情况，我们发现并联电阻值以近似幂函数的方式增大，并且我们认为主要是并联电阻影响CdTe太阳电池的弱光特性。

关键词

碲化镉太阳电池，并联电阻，弱光性能，光强

Study on the Weak-Light Performance of Cadmium Telluride Solar Cells

Shusheng Zhu, Yang Li*

School of Applied Physics and Material, Wuyi University, Jiangmen Guangdong
Email: shushengzhu0519@163.com, *insidesun@163.com

Received: Aug. 27th, 2020; accepted: Sep. 11th, 2020; published: Sep. 18th, 2020

Abstract

In this paper, three CdTe solar cells with different shunt resistances were selected for comparative study. We found that as the light intensity decreased, the short-circuit current density (J_{SC}), open circuit voltage (V_{OC}), unit output power (P_{out}), and fill factor (FF) of CdTe solar cells all decreased. The results showed that the CdTe solar cells with larger shunt resistance have slower decay of performance parameters. By analyzing the change of the shunt resistance with the light intensity,

*通讯作者。

文章引用: 朱树盛, 李阳. 碲化镉太阳电池弱光性能研究[J]. 材料科学, 2020, 10(9): 744-749.
DOI: 10.12677/ms.2020.109089

we found that the shunt resistance value increased in a way that approximated a power function. In the end, we believe that the shunt resistance mainly affects the weak light characteristics of CdTe solar cells.

Keywords

CdTe, Shunt Resistance, Weak Light Performance, Light Intensity

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

目前，低功耗室内设备(如远程传感器、报警系统和数据传输系统等)的利用率正在稳步上升[1]。大多数低功耗设备具有远程分布的特点，且需要定期更换与维护供电设备，这必然会极大地增加设备的使用成本。值得注意是，利用光伏电池来为这些设备供电能很好的解决这一问题，因此光伏电池的室内应用倍受关注。

在室内弱光环境下，太阳电池的输出特性与电池的种类和制备工艺紧密相关，不同太阳电池的弱光性能差别很大[2]-[7]。选择一种合适的太阳电池用于室内应用是极其重要的。碲化镉(CdTe)太阳电池在材料方面有着独特的优势，例如，CdTe 是直接带隙半导体材料，性能优异。并且对可见光的吸收能力非常强，1 μm CdTe 即可实现 90%以上的可见光吸收[8]。目前 CdTe 太阳电池在弱光性能方面的研究已有报道，沈凯等人[9]发现在 0.015 sun 的光强下，CdTe 太阳电池具有较好的弱光性能，光电转换效率(PCE)达到了 9.2%，相应的单位输出功率(P_{out})达到了 138 μW/cm^2。

不同的是，我们在室内人造光下且更小的光强范围(Led 20~1000 Lux)，深入地研究了 CdTe 太阳电池的弱光性能。结果发现在 Led 1000 Lux 时，CdTe 太阳电池的单位输出功率可达 76.63 μW/cm^2，这说明 CdTe 太阳电池在光强更弱的 Led 光源下依然能保持较好的性能。因此在室内光伏产品应用方面，CdTe 太阳电池极具有很大的发展潜力。

2. 实验

本文选用的 CdTe 太阳电池的制备工艺如下：1) 分别使用丙酮，去离子水对衬底进行清洗，再通过氮气吹干。2) 通过磁控溅射的方法制备 MZO 薄膜。3) 使用近空间升华(CSS)镀膜装置，来制备 CdTe 活性层薄膜。4) 之后在 CdTe 薄膜上蒸镀一层氯化镉(CdCl)薄膜，并进行热退火处理。5) 然后使用去离子水洗去表面的 CdCl 薄膜，再使用溴甲醇(MB)溶液对薄膜进行刻蚀，以便有效地去除 CdTe 表面的氧化物与氯化物。6) 使用真空热蒸发的方法制备 ZnTe:Cu 空穴传输层。7) 最后同样使用真空热蒸发方法蒸镀 Au 电极层。此时，整个 CdTe 光伏电池器件就制备完成，器件的有效面积为 0.16 cm^2。

CdTe 太阳电池弱光测试实验是在一个不受周围光线影响的弱光测试平台中进行的。整个测试设备包含了照明光源(LED:白光，18 W，80 lm)，一个用来保持光强一致的匀光板，一个照度计(TES-1330A，准确度±3% rdg，±0.5% f.s)，一个用来放太阳电池的物品架。实验过程中，为了防止受外部光线影响，实验装置安装在黑箱内。其中光源安装在黑箱顶层，通过控制打开 LED 灯的数量和匀光板上方的网格数量以及光源与太阳电池之间的距离来实现光强在 0~1000 Lux 之间调控。最后通过弱光测试平台侧面用来外接

导线的孔洞连接数字源表，测量太阳电池的电流电压输出特性。

3. 结果与讨论

为了全面地研究 CdTe 太阳电池的弱光性能。我们选择了标准光强下(AM 1.5 G 100 mW/cm^2)具有相似光电输出特性，但并联电阻差别较大的三个器件结构为 FTO/MZO/CdTe/ZnTe:Cu/Au (图 1(a))的 CdTe 太阳电池进行对比研究。在 AM 1.5 G 标准光强下三个 CdTe 太阳电池(A、B、C)的性能参数总结在表 1 中，其电流－电压特性曲线(*J-V*)如图 1(c)所示。

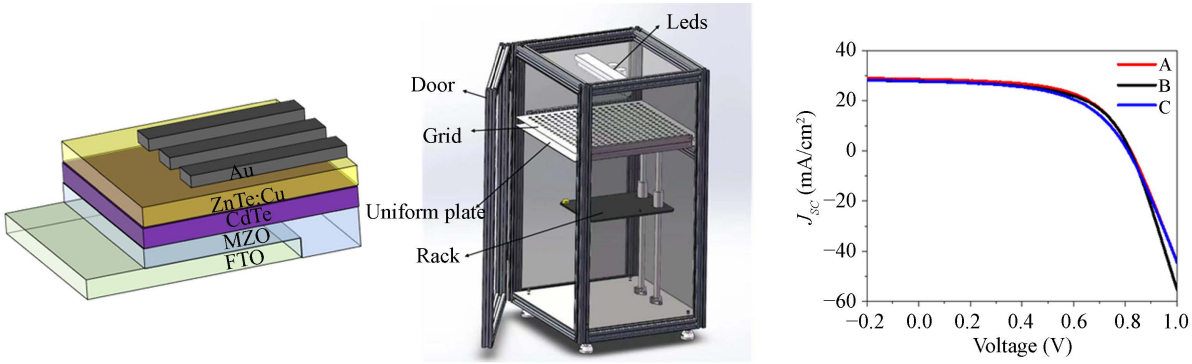

Figure 1. (a) Schematic diagram of cadmium telluride solar cell structure; (b) Weak light test platform (see the experimental part for details); (c) The *J-V* curves of three CdTe solar cells (A, B, C) at AM 1.5 G

图 1. (a) 碲化镉太阳电池结构示意图；(b) 弱光测试平台(详细介绍见实验部分)；(c) 在 AM 1.5 G 时，三个 CdTe 太阳电池(A、B、C)的 *J-V* 曲线

Table 1. Performance parameters of three CdTe photovoltaic devices (A, B, C [10] [11]) with the same structure under the standard light intensity of 100 mW/cm^2 (about 10^5 Lux)

表 1. 三个相同结构的 CdTe 光伏器件(A、B、C)在 100 mW/cm^2 (约为 10^5 Lux [10] [11])的标准光强下的性能参数

	V_{OC} [V]	J_{SC} [mA/cm^2]	FF [%]	PCE [%]	P_{out} [μW/cm^2]	R_{sh} [Ω·cm^2]	R_s [Ω·cm^2]	E_g [eV]
A	0.82	28.68	58.18	13.74	13683	1627	3.79	1.45
B	0.82	27.79	58.14	13.24	13249	1560	3.14	1.45
C	0.81	27.81	55.02	12.41	12394	1250	4.10	1.45

通过弱光测试平台测试(图 1(b))，我们得到了 A，B，C 三个 CdTe 电池在不同弱光环境下的 *J-V* 特性曲线(图 2)并比较了弱光性能(图 3)，光强范围为 20~1000 Lux。图 3(a)给出了 A、B、C 三个 CdTe 太阳电池的开路电压(V_{OC})随光强的变化。从图中可以看到，三个 CdTe 太阳电池的 V_{OC} 都表现出随光强的减弱呈对数式减小的变化规律。当入射光强降低至 200 Lux 以下时，三个电池的开路电压开始快速降低。从图 3(b)中可以看到，电池的短路电流密度(J_{SC})随着光强的减弱呈现线性减小的趋势，A 电池的 J_{SC} 始终略大于 B 和 C 电池。FF 随光强减弱的变化如图 3(c)所示，A 电池的填充因子(FF)降低幅度最小，B 电池次之，C 电池的 FF 降低幅度最大。随着光强从 1000 Lux 减弱至 20 Lux，A 电池的 FF 从 65.1%降低至 63.4%。B 电池的 FF 从 63.4%降低至 48.5%。C 电池的 FF 从 60.1%降低至 38%。仔细分析发现，当光强在 200~1000 Lux 之间时，三个电池的 FF 降低幅度不大，而当入射光强降低至 200 Lux 以下时，三个电池的 FF 快速降低。从图 3(d)中可以看到，A，B，C 三个电池的 P_{out} 随着光强的减弱都呈现线性减小的趋势。在光照强度为 1000 Lux 时，A 电池的输出功率为 76.63 μW/cm^2，B 和 C 电池的输出功率分别为 72.94 μW/cm^2 和 70.44 μW/cm^2。而光照强度降至 20 Lux 时，A 电池的 P_{out} 降低至 1.06 μW/cm^2，B 和 C 电池的 P_{out} 降低

至 0.73 μW/cm^2 和 0.51 μW/cm^2。此时相对于 1000 Lux，A、B、C 三个电池分别保留了 1.38%，1.0%和 0.72%的输出功率密度。由于 J_{SC} 与光照强度呈线性关系，所以电池输出功率的变化主要源于 V_{OC} 和 FF 的改变。

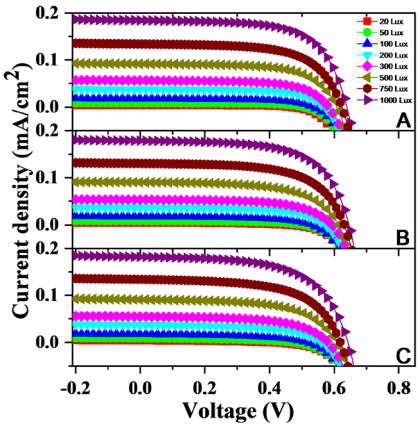

Figure 2. *J-V* characteristics of CdTe solar cells under low light conditions
图 2. 弱光条件下 CdTe 太阳电池的 *J-V* 特性

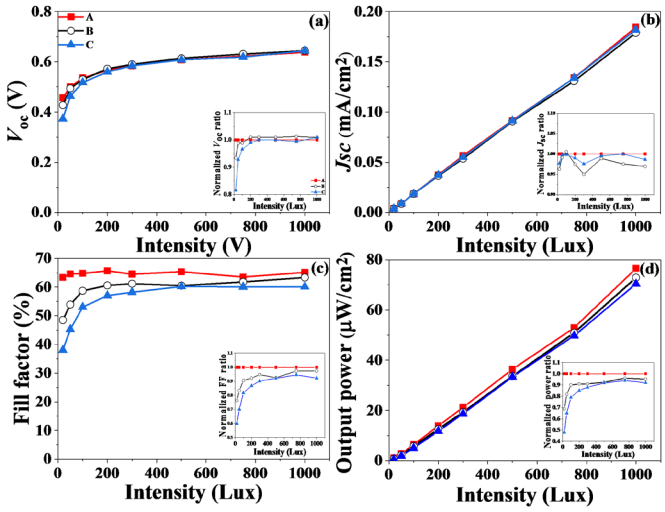

Figure 3. Performance parameter diagram of CdTe solar cell under low light conditions: (a) open circuit voltage; (b) short-circuit current density; (c) fill factor; (d) unit output power density
图 3. CdTe 太阳电池弱光条件下的性能参数图：(a) 开路电压；(b) 短路电流密度；(c) 填充因子；(d) 单位输出功率密度

根据相关报道，FF 的变化由 R_s 和 R_{sh} 共同影响[9]。图 4(a)给出了弱光条件下串联电阻(R_s)的变化情况。从图中可以看出三个电池的 R_s 随光强减弱其数值基本不变，并且数值也较小。弱光条件照射下，电池的 J_{SC} 很小，R_s 带来的影响就很小，而且它们在不同光照下的变化情况相似，所以下面对三个电池弱光性能的分析中可以不考虑 R_s 的影响，而着重考虑 R_{sh} 的变化，并分析对电池弱光性能的影响因素。从图 4(b)中我们可以看到，三个电池的并联电阻(R_{sh})随光强减弱的变化趋势相差很大。对于电池 A，即标准光强下 R_{sh} 值较大的电池，随着光强的减弱，其并联电阻值以近似幂函数的方式快速增大。对于在 AM

1.5 G 下 R_{sh} 较低的电池 B 和 C，在极弱的光强下，R_{sh} 值依然相对 A 电池较小。综合以上分析，我们可以发现，弱光环境下填充因子 FF 主要受 R_{sh} 影响，并且 R_{sh} 较大的 CdTe 太阳电池的弱光特性相对较好。图 4(c)给出了弱光环境下三个光伏器件的理想因子(n)与反向饱和电流密度(J_0)随光强的变化趋势，结果显示，三个 CdTe 电池的理想因子 n 和反向饱和电流 J_0 均变化很小。

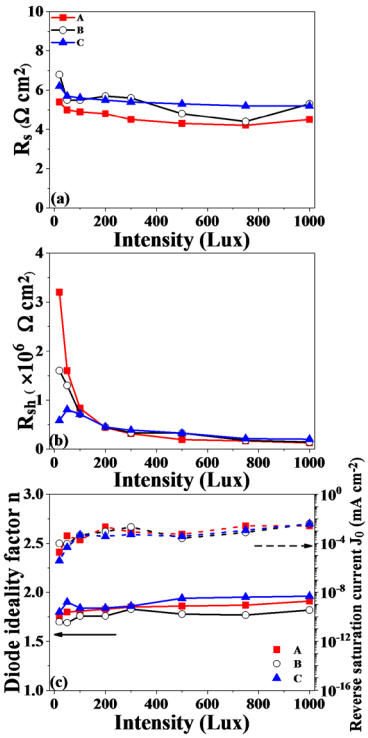

Figure 4. (a) Three battery series resistance R_s and (b) Parallel resistance R_{sh} change curve with light intensity; (c) Ideality factor and reverse saturation current curve with light intensity change

图 4. (a) 三个电池串联电阻 R_s 和(b) 并联电阻 R_{sh} 随光强变化的曲线；(c) 理想因子和反向饱和电流随光强变化的曲线

4. 结论

我们研究了入射光强 20~1000 Lux 范围内 CdTe 太阳电池的弱光性能。结果表明，R_{sh} 越大的 CdTe 太阳电池，其弱光性能越好。在 1000 Lux 时，R_{sh} 最大的 CdTe 太阳电池的单位输出功率可达 76.63 μW/cm^2。综上所述，我们认为并联电阻较大的 CdTe 太阳电池在给室内低功耗设备供电方面将具有更大的应用潜力。

基金项目

2019 年广东省重点领域研发计划项目(第三代半导体材料与器件 2019B010132004)；广东省自然科学基金项目(2015A030313645)；五邑大学 2018/2019 年大学生创新创业训练计划项目(201811349071、201811349167、201811349168、201911349277)；五邑大学 2019 年研究生教育创新计划项目(YJS-JGXM-18-01)；五邑大学 2018 年教改项目(JX2018025)；五邑大学 2019 年教改项目(JX2019004)。

参考文献

[1] Nasiri, A., Zabalawi, S.A. and Mandic, G. (2009) Indoor Power Harvesting Using Photovoltaic Cells for Low-Power Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **56**, 4502-4509. https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2020703

[2] Li, Q., *et al.* (2017) Comparative Study of GaAs and CdTe Solar Cell Performance under Low-Intensity Light Irradiance. *Solar Energy*, **157**, 216-226. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.023

[3] Venkatesan, S., *et al.* (2019) High-Efficiency Bifacial Dye-Sensitized Solar Cells for Application under Indoor Light Conditions. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **11**, 42780-42789. https://doi.org/10.1021/acsami.9b14876

[4] Lee, H.K.H., *et al.* (2018) Organic Photovoltaic Cells-Promising Indoor Light Harvesters for Self-Sustainable Electronics. *Journal of Materials Chemistry A*, **6**, 5618-5626. https://doi.org/10.1039/C7TA10875C

[5] Dagar, J., *et al.* (2018) Highly Efficient Perovskite Solar Cells for Light Harvesting under Indoor Illumination via Solution Processed SnO_2/MgO Composite Electron Transport Layers. *Nano Energy*, **49**, 290-299. https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.04.027

[6] Kim, S., *et al.* (2019) Recent Progress in Solar Cell Technology for Low-Light Indoor Applications. *Current Alternative Energy*, **3**, 3-17. https://doi.org/10.2174/1570180816666190112141857

[7] Ma, L.-K., *et al.* (2020) High-Efficiency Indoor Organic Photovoltaics with a Band-Aligned Interlayer. Joule. https://doi.org/10.1016/j.joule.2020.05.010

[8] Britt, J. and Ferekides, C. (1993) Thin-Film CdS/CdTe Solar Cell with 15.8% Efficiency. *Applied Physics Letters*, **62**, 2851-2852. https://doi.org/10.1063/1.109629

[9] Shen, K., *et al.* (2016) CdTe Solar Cell Performance under Low-Intensity Light Irradiance. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **144**, 472-480. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.043

[10] Wu, M.J., *et al.* (2019) Bandgap Engineering Enhances the Performance of Mixed-Cation Perovskite Materials for Indoor Photovoltaic Applications. *Advanced Energy Materials*, **9**, Article ID: 1901863. https://doi.org/10.1002/aenm.201901863

[11] Chen, F.-C. (2019) Emerging Organic and Organic/Inorganic Hybrid Photovoltaic Devices for Specialty Applications: Low-Level-Lighting Energy Conversion and Biomedical Treatment. *Advanced Optical Materials*, **7**, No. 1. https://doi.org/10.1002/adom.201800662