

透镜焦点位置调制太阳电池开路电压的研究

肖文波^{1,2} 何兴道^{1,2} 王庆² 李淑静¹ 段军红^{1,2} 熊文林² 薛金戈¹ 段海冰²

(¹ 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室, 江西 南昌 330063)
(² 南昌航空大学大学物理国家级实验教学示范中心, 江西 南昌 330063)

摘要 实验研究了聚光太阳电池的输出开路电压随电池与透镜间距变化规律, 结果发现开路电压随间距的变化出现了峰值; 理论分析证实了此峰值是由于输出开路电压随间距成高斯分布, 通过拟合实验结果发现最大输出电压为光聚焦到电池耗尽区。此外, 实验结合理论分析, 研究了最大输出开路电压随光照度的变化关系, 得出最大开路电压随光强变化成对数关系。此项研究对于当前聚焦光伏系统的设计和具有重要的指导意义。

关键词 光电子学; 太阳电池; 透镜; 焦点; 开路电压; 效率

中图分类号 O472; TK513 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092912.3519

Research on Open Circuit Voltage of Solar Cell Under the Modulation of Lens Focus Position

Xiao Wenbo^{1,2} He Xingdao^{1,2} Wang Qing² Li Shujing¹ Duan Junhong^{1,2}
Xiong Wenlin² Xue Jin'ge¹ Duan Haibing²

¹Key Lab of Non destructive Test, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University,
Nanchang, Jiangxi 330063, China
²The National Physics Experiment Teaching Center, Nanchang Hangkong University,
Nanchang, Jiangxi 330063, China

Abstract The open circuit voltage changes with the distance between the lens and the solar cells in the concentrating photovoltaic system is studied through the experiment. The voltage peak appears during the distance change. It is confirmed by theoretical analysis that the peak appears due to the open circuit voltage changes with the distance into a Gaussian distribution, and maximum output voltage appears when the light focuss depletion area through fitting the experimental results. In addition, it is studied through the experimental study combined with theoretical analysis that there is logarithmic relationship between the maximum output open-circuit voltage and illumination. It is of great guidance for the current photovoltaic system design and research.

Key words optoelectronics; solar cells; lens; focus; open circuit voltage; efficiency

1 引言

随着经济发展, 能源需求越来越大, 自然会把目光投向太阳能的开发利用^[1,2]。尽管太阳能是清洁无污染且永不耗竭的能源, 但是在太阳能利用时存在转换效率低、制造成本高的缺陷^[1]。为了进一步降低光伏发电成本, 减少太阳电池芯片的消耗, 聚光技术是一项可行的措施^[3~6], 即通过采用廉价的聚

光系统将太阳光会聚到面积很小的高性能光伏电池上, 从而减少昂贵的太阳电池材料用量大幅度地降低系统的成本。在聚光条件下, 一方面, 电池芯片单位面积接收的辐射功率密度大幅度地增加, 太阳电池光电转换效率得以提高; 另一方面, 对于给定的输出功率, 可以大幅度降低太阳电池芯片的消耗, 从而降低系统的成本。但目前聚光光伏发电技术还很不

收稿日期: 2009-01-12; 收到修改稿日期: 2009-02-25

基金项目: 博士启动基金(EA200908017)和江西省教育厅赣教技字基金(2007179)资助课题。

作者简介: 肖文波(1975—), 男, 博士, 讲师, 主要从事自旋电子学、半导体光电检测和物理教学等方面的研究。

E-mail: xiaowenbo1570@163.com

成熟,从而限制了其广泛应用^[7~13]。在聚光情况下,太阳能电池性能的提高主要得益于电池开路电压和光生电流的提高^[6,14,15]。

尽管聚光在提高太阳能电池的转换效率方面非常重要,但是透镜与电池间距的变化对于太阳能电池转换效率的具体影响,物理上还没有给出清晰的图像。为此,本文实验研究了透镜聚焦位置的变化对于常规硅光电池开路电压(V_{oc})的影响,以及光强变化下的开路电压的特性,并进行了理论分析。得出了 V_{oc} 在照射光强不变情况下,随间距成高斯变化的规律;最大输出开路电压为光聚焦到 p-n 结耗尽区的物理规律。此结果对于从事低倍聚光光伏发电以及相关的研究具有重要的指导意义。

2 实验装置及测量方法

实验测量装置如图 1 所示。型号为 2CR61 硅光电池位于放大倍数为 10 倍,数值孔径 0.25 的聚焦透镜焦点附近,透镜焦距为 6.5 mm,光斑大小约为 10 μm ;硅光电池在强光下开路电压约为 0.45 ~ 0.6 V,面积约为 3 mm \times 4 mm。测量时候,一束 He-Ne 平行光通过聚焦后照到光电池上,光电池与透镜共轴且固定在带有螺旋测微器的可移动平移台上;通过螺旋测微器可以移动光电池与透镜的间距 d ,如图 1 中虚线所示,也就是可以使得光电池处于聚焦光束焦点前后;移动光电池位置的时候保证光斑是完全照射到其上,也即保证照射光强度不变。每移动一次位置,记录下光电池离透镜的距离以及输出的开路电压(V_{oc})。改变入射 He-Ne 激光的强度,测量样品处于不同位置的输出开路电压。实验中尽量保证每次操作条件相同,取重复测量 10 次的平均值作为实验

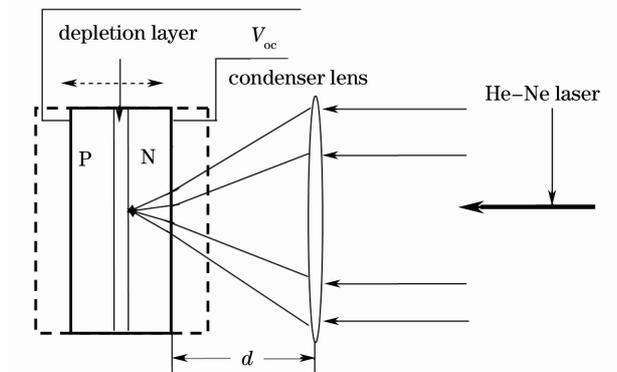


图 1 测量输出开路电压 V_{oc} 随距离 d 变化的实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the setup for measuring the open circuit voltage (V_{oc}) change with the distance d

资料。

3 实验结果及讨论

图 2 示出了激光照度在 94.7 lx 下,测量到的开路电压(V_{oc})随距离(d)变化的单次测量结果。可以看出,随着透镜与硅光电池板面距离的增大,开路电压逐渐上升,直到上升到某一极值,出现峰值后(图 2 中箭头所指),距离继续增大的同时输出开路电压开始大幅度下降,直到不能再下降为止。且发现最大值位置小于透镜焦距 6.5 mm。测量过程光的照度没有改变,只有光电池处于聚焦的位置变化了。换言之,透镜焦点位置的调制可以改变输出功率。由此结论可知,太阳能电池聚光输出效率与聚光焦点有一定的关系。改变光的照射强度为 19.8,31.1,34.2,50.1,62.9,76.9 lx 时也同样出现了峰值。图 3 示出了最大输出开路电压 V_{oc}^{max} 随光照度的变化;发现它们之间不是简单的线性关系,开路电压的上升而是呈一坡度上升,并且逐渐趋于饱和。

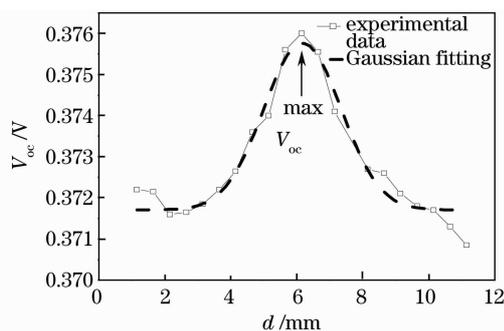


图 2 照度为 94.7 lx 下,输出开路电压 V_{oc} 随距离 d 变化曲线,虚线是拟合曲线

Fig. 2 Open circuit voltage (V_{oc}) changes with the distance (d) under illumination of 94.7 lx. The dashed line is fitting curve

光电池与外负载接通后的 $I-V$ 关系为^[6,15,16]

$$I = I_L - I_F = I_L - I_s [\exp(mqV/k_0 T) - 1] = q\bar{Q}A(L_p + L_n) - I_s [\exp(mqV/k_0 T) - 1], \quad (1)$$

式中 I_L 为光电流,与光照强度成线性函数; A 为 p-n 结的面积, q 为电子电量, k_0 为玻尔兹曼常数, \bar{Q} 为 p-n 结扩散长度($L_p + L_n$) 内的非平衡载流子的平均产生率,是光照射到电池内位置的函数; I_s 是反向饱和电流,与外加偏压无关,但是强烈依赖于温度的函数;室温下基本上不变; m 是理想因子,为考虑光生载流子各种复合过程的因素,一般情况下, $1 < m < 2$ 。

当外电路开路的时候,输出电流 $I=0$,那么输出开路电压为

$$V_{oc} = \frac{mk_0 T}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right), \quad (2)$$

当光强很弱的时候, 即 $I_L \ll I_s$, 上式可以泰勒展开为

$$V_{oc} = \frac{mk_0 T}{q} \left[\frac{I_L}{I_s} - \frac{1}{2} \left(\frac{I_L}{I_s} \right)^2 + \dots \right],$$

$$V_{oc} \propto \frac{mk_0 T}{q} \frac{I_L}{I_s}. \quad (3)$$

稳定光照下 p-n 结中非平衡载流子电子和空穴的产生率 \bar{Q} 随光照射电池位置 x 的变化满足高斯分布如下^[16]

$$\bar{Q}(d) \propto \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{K}\right], \quad (4)$$

式中 x 是光照射到电池的位置, x_0 是与电池内间场大小和位置有关的常数, K 是与扩散有关的量; 结合(3)式, (4)式, 则开路输出电压 V_{oc} 随光照射的电池位置 x 的变化满足

$$V_{oc} \propto \exp\left[-(x-x_0)^2/K\right], \quad (5)$$

实验结果发现它们之间确实成如上所示的关系; 利用高斯分布拟合 V_{oc} 随 d 的变化, 如图 2 中拟合部分, 得到 $x_0 \approx 6.17$ mm; $x_0 < f = 6.5$ mm, 说明光聚焦照到电池的表面并不是最大的输出开路电压, 而是要聚焦深入一些; 这是由于硅电池的耗尽区处于 p-n 结的中间, 这里内间场最大, 约为几百微米, 考虑到硅的折射率约为 3, 两者相乘正好约等于透镜焦距减去 x_0 的光程。实验与理论分析一致。根据(2)式, 可知最大开路电压随光强变化应是对数变化, 这应与文献[16]中的关系一致; 利用对数拟合实验结果, 如图 3 中拟合部分, 符合很好。且发现 $m \approx 1.34$, 值的大小符合理论分析。

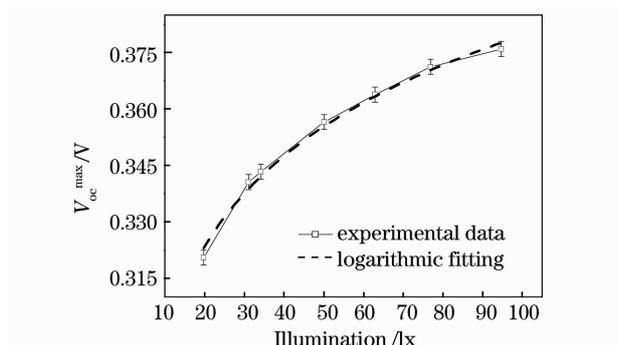


图 3 最大输出开路电压 V_{oc}^{max} 随光照度的变化, 虚线是拟合曲线

Fig. 3 Variation of the max open circuit voltage (V_{oc}^{max}) with the illumination. the dashed line is fitting curve

4 结 论

通过调节硅光电池离聚焦透镜的间距, 测量输

出开路电压的特性, 并进行了理论分析; 实验结果发现, 随间距的变化, 硅光电池所产生的开路电压存在最大输出值; 理论分析证实了它们之间成高斯分布。且发现最大输出电压对应的位置应为聚光焦点处于耗尽区, 这与理论分析一致。此项研究对于当前聚光光伏系统的建设, 提高光电转换效率具有一定的帮助。

参 考 文 献

- 1 A. Shah, P. Torres, R. Tscharnner *et al.*. Photovoltaic technology: the case for thin-film solar cells [J]. *Science*, 1999, **258**: 692~698
- 2 Wu Yanpeng, Wang Xiaodong, Ma Chongfang. Solar light pipe combined with photocatalysis to decompose formaldehyde under sunny conditions in summer in Beijing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2408~2415
吴延鹏, 王晓东, 马重芳. 太阳能光催化-导光管北京夏季晴天降解甲醛的实验研究 [J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2408~2415
- 3 Adolf Goetzberger, Joachim Luther, Gerhard Willeke. Solar cells: past, present, future [J]. *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, 2002, **74**: 1~11
- 4 M. Hein, F. Dimroth, G. Siefer *et al.*. Characterisation of a 300 × photovoltaic concentrator system with one-axis tracking [J]. *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, 2003, **75**: 277~283
- 5 Masafumi Yamaguchi, Antonio Luque. High efficiency and high concentration in photovoltaics [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1999, **46**(10): 2139~2143
- 6 Chen Nuofu, Bai Yiming. Concentrating photovoltaic system [J]. *Physics*, 2007, **36**(11): 862~868
陈诺夫, 白一鸣. 聚光光伏系统 [J]. *物理*, 2007, **36**(11): 862~868
- 7 Zhengxin Liu, Atsushi Masuda, Takehiko Nagai *et al.*. A concentrator module of spherical Si solar cell [J]. *Sol. Energ. Mater. Sol. Cells*, 2007, **91**: 1805~1810
- 8 S. Khelifi, L. Ayat, A. Belghachi. Effects of temperature and series resistance on GaAs concentrator solar cell [J]. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2008, **41**: 115~119
- 9 Liu Ying, Dai Jingmin, Lang Zhiguo *et al.*. Finite-element analysis for flux distribution on focal plane of rotating parabolic concentrators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1776~1778
刘颖, 戴景民, 郎治国等. 旋转抛物面聚光器焦面能流分布的有限元分析 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(10): 1776~1778
- 10 Wang Tao, Li Xiaoting, Li Baoxia *et al.*. Characteristic analyses of solar cell with new line-focus fresnel prism [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9): 1138~1141
汪韬, 李晓婷, 李宝霞等. 新型菲涅尔线聚光太阳电池组件特性分析 [J]. *光子学报*, 2003, **32**(9): 1138~1141
- 11 Wu Yuting, Zhu Hongye, Ren Jianxun *et al.*. Thermal and power characteristics of ordinary solar cells in concentrating solar collectors [J]. *J. Tsinghua Univ (Sci and Tech)*, 2003, **43**(8): 1052~1055
吴玉庭, 朱宏喈, 任建勋等. 聚光与冷却条件下常规太阳电池的特性 [J]. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2003, **43**(8): 1052~1055
- 12 Huang Guohua, Shi Yuchuan, Yang Hong *et al.*. The performance of conventional crystalline silicon solar cells with low concentrator [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2006, **27**(1): 19~22
黄国华, 施玉川, 杨宏等. 常规太阳电池聚光特性实验 [J]. *太阳能学报*, 2006, **27**(1): 19~22

- 13 Wu Yuting, Zhu Hongye, Ren Jianxun *et al.*. Study of the thermal and power characteristics of solar cells in concentration [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2004, **25**(3): 337~340
吴玉庭, 朱宏晔, 任建勋 等. 聚光条件下太阳能电池的热电特性分析 [J]. *太阳能学报*, 2004, **25**(3): 337~340
- 14 Luque A. Solar Cells and Optics for Photovoltaic Concentration [M]. England; IOP Publilshing Ltd, 1989. 103~111
- 15 S. M. Sze. Modern Semiconductor Device Physics [M]. Beijing: Science Press, 2001. 362~398
施 敏. 现代半导体器件物理 [M]. 北京: 科学出版社, 2001. 362~398
- 16 Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng *et al.*. Physics of Semiconductor [M]. Beijing: Press of National Defense Industry [M], 2004. 140~144, 271~273
刘恩科, 朱秉升, 罗晋生 等. 半导体物理学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004. 140~144, 271~273