

文章编号:1673-9981(2008)04-0498-05

单晶硅太阳能电池的温度和光强特性

金井升, 舒碧芬, 沈辉, 李军勇, 陈美园

(中山大学太阳能系统研究所, 广东 广州 510006)

摘要:利用闪光式电池测试仪在不同温度和光强条件对单晶硅太阳能电池进行了测试. 研究发现, 当温度在 25~65 ℃ 时, 单晶硅太阳能电池光照特性的主要参数随着温度呈线性变化. 随着温度的升高, 短路电流有小幅度上升, 填充因子下降, 开路电压的降幅达到 2.3 mV/℃, 效率降幅高于 0.075 %/℃. 当光强为 340.1~4251.2 W/m² 时, 开路电压随着光强的增加呈指数关系增加, 效率随着光强的增加先增加后减小, 最大效率值 16.67% 出现在光强为 952.7 W/m² 的情况下, 填充因子随着光强的增加减小, 串联内阻的影响可以解释效率和填充因子下降的现象, 在聚光条件下太阳能电池的峰值功率得到显著提高.

关键词:太阳能电池; 温度特性; 光强特性

中图分类号: TK514

文献标识码: A

晶体硅太阳能电池在如今的光伏市场中占据了绝对主导地位, 而且这一地位在今后很长一段时间内不会改变, 因此提高晶体硅太阳能电池效率, 降低生产成本, 使晶体硅太阳能电池能与常规能源进行竞争成为现今光伏时代的主题. 在标准状况 (25 ℃, 1000 W/m²) 下晶体硅太阳能电池的最高效率是由新南威尔士大学保持的 24.7%. 尽管多年来相关研究人员不断努力, 希望进一步提高晶体硅太阳能电池的效率, 但是这一记录到目前为止还没有被刷新. 由此可见, 要想提高即使是 0.1% 的效率是多么的困难. 但是, 太阳能电池的效率会随着温度和光强等应用条件的变化而发生变化. 如果晶体硅太阳能电池在不合适的条件下工作, 1% 效率很可能就损失掉了, 因此从应用的角度保持或者提高晶体硅太阳能电池效率也很重要. 本文用闪光式电池测试仪在不同温度和光强条件下对单晶硅太阳能电池进行了测试, 并分析了其温度和光强特性, 以优化太阳能电池的应用.

1 实验装置和方法

实验中所采用的太阳能电池为长条状的普通结构

的单晶硅太阳能电池, 主要测试设备为德国 Optosolar 公司的闪光式太阳能电池测试仪, 实验装置简图如图 1 所示.

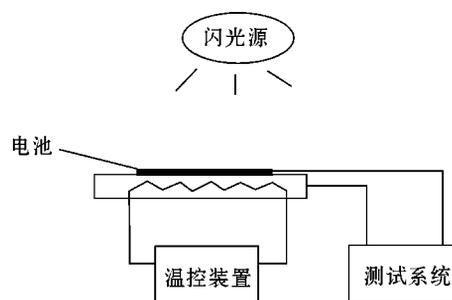


图 1 实验装置简图

利用温控设备控制承载电池片的载物台的温度, 可以改变被测电池的温度. 该设备采用的是闪光光源, 光强每次都不一样, 为了研究在不同温度下电池的电性能, 需要通过软件设置将光强修正到一定的光强常数值. 本实验将光强修正到 1000 W/m², 温度变化范围为 25~65 ℃ (太阳能电池在一般情况下在此温度范围内工作).

光强的改变主要通过两种方式实现: 一是改变

收稿日期: 2008-07-23

作者简介: 金井升 (1984—), 男, 湖南省长沙市望城人, 硕士研究生.

闪光源的实际光强,此时光强不作修正,采用实际值;二是改变被测电池和闪光源之间的距离.因为参考电池固定在载物台上,不方便移动,而且电池测试仪给出的结果只是参考电池的光强,因此被测电池的实际光强值只能通过理论计算求出.计算的方法是:在距离改变前,拟合太阳能电池的短路电流 I_{sc} 和光强的线性关系;在距离改变后,被测电池的实际光强通过实测的 I_{sc} 外推进行计算.实际上,与光强成线性关系的应是光生电流,光强增大会使光子数目增加,光生载流子随之增加.但是在低倍聚光的条件下,认为 I_{sc} 与光强成线性关系是很好的近似^[1].

将被测电池移动后,不方便控制其温度,可以通过空调进行小范围调节,为了排除温度的影响,在测试时需要将温度修正到固定值.当然可以通过既调整闪光光强又调整距离来实现光强更大范围内的变化.本实验测量了室温(27)下的单晶硅太阳能电池的光强特性.

2 实验结果及分析

2.1 温度特性

单晶硅太阳能电池的特征参数主要包括 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、填充因子 FF 和效率 η ,它们之间的关系为:

$$\eta = \frac{I_{sc} V_{oc} FF}{EA} \quad (1)$$

式(1)中: E 为光强,本实验 $E = 1000 \text{ W/m}^2$, A 为太阳能电池面积.

这四个特征参数的温度特性如图 2 所示.

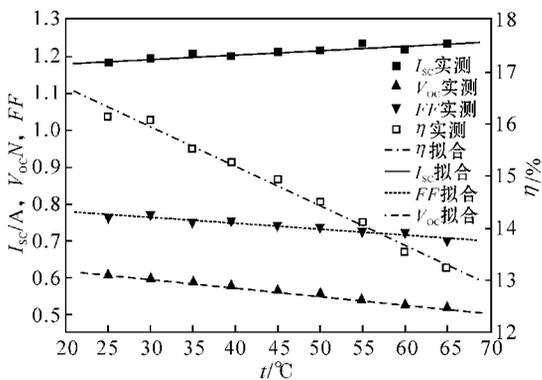


图 2 太阳能电池特征参数的温度特性

由图 2 可知, I_{sc} , V_{oc} , FF , 这四个参数与温度

呈很好的线性关系.通过线性拟合后,可得到各参数的温度变化率,见表 1.

表 1 太阳能电池特征参数的温度特性

d/dt	dI_{sc}/dt	dV_{oc}/dt	dFF/dt
$/(\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$/(\text{A} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$/(\text{V} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	$/(\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$
-0.07565	0.00121	-0.0023	-0.00162

从表 1 可以看出,单晶硅太阳能电池的 I_{sc} 随着温度升高而略微增加,相对其他参数的温度变化率而言很小.短路电流 I_{sc} 增加的原因是:单晶硅的禁带宽度随着温度升高而减小,光吸收增加,这就意味着能产生更大的 I_{sc} ;载流子的扩散系数随着温度升高而增大,因此少数载流子的扩散长度也随着温度的增加而稍有增大^[2].

V_{oc} 随着温度升高而减小,是影响太阳能电池效率降低的主要参数.这是因为 V_{oc} 随着反向饱和电流增加而降低,而反向饱和电流随着温度升高呈指数增大.在考虑 dI_{sc}/dT 的影响时,能推导出 dV_{oc}/dT 的理论公式^[3];在忽略 dI_{sc}/dT 的影响时, dV_{oc}/dT 的表达式为:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{1}{q} \frac{E_G(0) - V_{oc} + \frac{kT}{q}}{T} \quad (2)$$

式(2)中: $E_G(0)$ 是用线性外推方法得到的在 0 K 时的硅电池的禁带宽度,是包含确定反向饱和的其余参数中与温度有关的因素,数值在 1~4 范围内, k 为玻尔兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), q 为电荷电量($1.6 \times 10^{-19} \text{ J/V}$).将 $V_{oc} = 0.6 \text{ V}$, $E_G(0)/q = 1.2 \text{ V}$, $n = 3$ 代入式(2),可得到 $dV_{oc}/dT = -2.3 \text{ mV/K}$ ^[4].本实验的结果与之完全符合,由此可见,单晶硅太阳能电池的 dV_{oc}/dT 很稳定,可以认为是常数.利用这个特性,可以在其它条件不变时,根据 V_{oc} 的变化值计算出太阳能电池的工作温度.

FF 随温度升高而下降是由于并联内阻和串联内阻的影响.在弱光条件下,并联内阻的影响才会很显著^[5].对于串联内阻,在假定 n 不随温度变化后,可推导出串联内阻 R_s 随着温度升高而上升,理论证明晶体硅太阳能电池 R_s 具有正温度系数半导体型内阻的数学表述形式^[6].从物理机制上可解释为:高于室温时接触电阻可以忽略不计,基区电阻贡献很小,扩散层的薄层电阻占优势,它随温度的升高而升高^[7].而串联内阻增大会降低 FF .在假设理想因子

等于 1 时,可以推导出 FF 随着温度变化的经验公式^[8].

根据以上三个参数的温度特性值的相对大小及公式(1),就可以得出效率随着温度升高而降低的结论.测试的单晶硅太阳能电池效率的降幅高于 0.075 %/ .也就是说,在标准状况下工作良好的单晶硅太阳能电池,如果在实际应用时散热效果不理想,在相同光强下太阳能电池在 45 工作,则效率将会减少 1.5 %,这对太阳能电池来说是很严重的效率损失.因此,在应用太阳能电池时,保证较低的温度是保持电池效率的重要条件.

2.2 光强特性

室温为 27 时, V_{oc} 随着光强的增加呈指数规律增加,如图 3 所示.

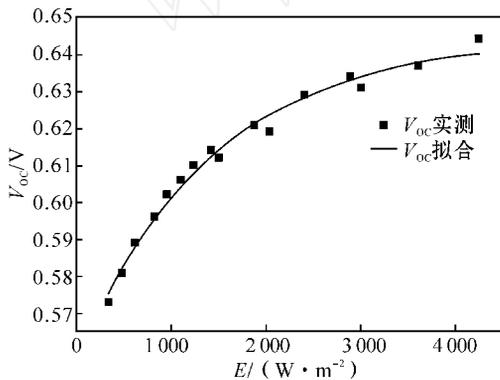


图 3 V_{oc} 和 E 的关系

将 V_{oc} 和 E 线性拟合后的公式如下:

$$V_{oc} = 0.6445 - 0.881 \times \exp\left(-\frac{E}{1404.7}\right). \quad (3)$$

在反向饱和电流不变的条件下,开路电压与光强在理论上应该是指数关系^[9],本实验的计算结果和理论完全符合.因此,如果要提高单晶硅太阳能电池的开路电压,不仅可以通过改进太阳能电池的结构来实现,而且可以通过增加聚光光强达到这一目的.

与光强的关系如图 4 所示,它随着光强的增加先增加后减小.当光强值为 952.7 W 时,最大,为 16.67 %.因此,单晶硅太阳能电池在不大于 1 倍太阳光强下的效率不一定比在大于 1 倍太阳光强条件下的效率低,某些单晶硅太阳能电池可能不适合用于聚光环境,而适合用于普通或者弱光场合.对于

随着光强的增加先升后降,有些学者认为这是串联内阻随着光强的变化逐渐增加的缘故. I_{sc} 流过串

联内阻时会产生焦耳热,在低倍聚光条件下,在假设串联内阻不随光强变化时,产生的焦耳热与 I_{sc} 平方成正比,即与光强的平方成正比,其在总功率中占据的比例会逐渐增大.当光强达到一定值时,焦耳热引起的功率损失超过因光强增加而增加的功率,所以开始下降.

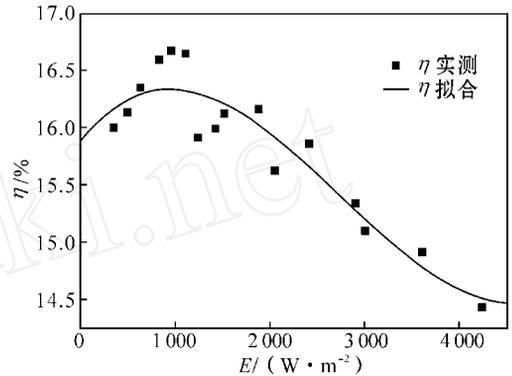


图 4 η 和 E 的关系

串联内阻的影响也可以解释图 5 中 FF 随光强增加逐渐下降的现象^[10].由图 5 可知,当 E 从 340.1 W/m^2 增加到 4251.2 W/m^2 时, FF 从 0.757 降低到 0.652. FF 与光强进行二次多项式拟合后能得到较好的结果.

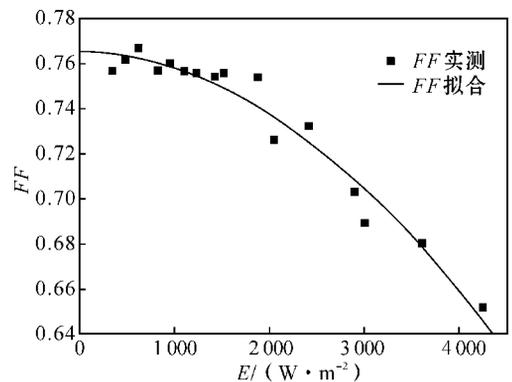


图 5 FF 和 E 的关系

图 6 为同一片电池的最大功率 (P_{mmp}) 随光强变化的情况.由图 6 可知, P_{mmp} 与光强可以很好地拟合为线性关系.在低倍聚光下,提高光强能提高电池的输出功率,这就意味着和标准状况下的电池相比,产生同样的功率所需要的电池面积更小,那么所需要的硅材料就更少或者说同样一片电池在聚光条件下能发挥更大的作用.但是也不能一味地追求高光强,

因为一方面随着电池效率的下降,通过提高光强来提高功率将变得越来越不明显;另一方面光强增加会带来温度升高以致增加冷却成本,同时对聚光器的要求也会越来越高,因此,对晶体硅太阳能电池来说,要在效益与成本之间找到平衡点。

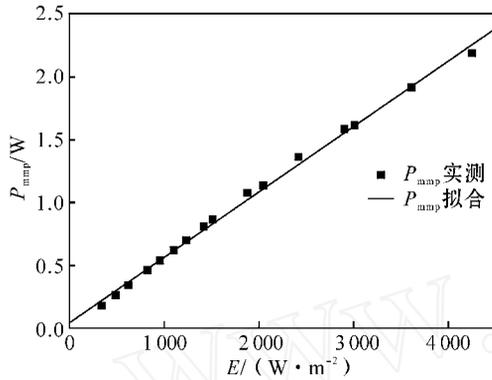


图 6 P_{mmp} 和 E 的关系

3 结 论

单晶硅太阳能电池随着温度的升高, I_{sc} 小幅度线性上升, FF 线性下降, 但是下降幅度很小. V_{oc} 线性下降的幅度为 2.3 mV/ , 和理论计算值完全吻合, V_{oc} 的下降在整个电池的电性能参数的变化中占据主导地位, 效率的温度变化率高于 0.075 %/ . 如果没有良好的冷却措施, 太阳能电池在相对高温的条件下工作, 效率损失非常明显. 当光强为 $340.1 \sim 4251.2 \text{ W/m}^2$ 时, 随着光强的增加, V_{oc} 呈指数规律增加, 为提高单晶硅太阳能电池的 V_{oc} 提供了一条新的途径. 随着光强增加先增加后减小; 当光强值为 952.7 W 时, 达到最大值 16.671 % . P_{mmp} 随着光强的增加呈线性增加, 对发挥单晶硅太阳能电池的发电潜力具有重要意义.

参考文献:

[1] AGARWALI S K, MURALIDHARANI R, AGARWA-

LAT A, et al. A new method for the measurement of series resistance of solar cells [J]. Phys D: Appl Phys, 1981, 14: 1643-1646.

[2] 刘恩科. 光电池及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 107-108.

[3] EL-ADAWI M K, AL-NUAIM I A. The temperature functional dependence of V_{oc} for a solar cell in relation to its efficiency new approach [J]. Desalination, 2007 (209): 91-96.

[4] 马丁·格林. 太阳能电池工作原理、工艺和系统的应用 [M]. 李秀文, 谢鸿礼, 赵海滨, 等, 译. 北京: 电子工业出版社, 1987: 86-87.

[5] SHARMA S K, SAMUEL K B, SRINIVASAMURTHY N, et al. Overcoming the problems in determination of solar cell series resistance and diode factor [J]. J Phys D: Appl Phys, 1990, 23: 1256-1260.

[6] 程晓舫, 李坚, 余世杰. 晶体硅太阳能电池串联内阻的函数形式 [J]. 太阳能学报, 2004, 25 (3): 345-349.

[7] ARORA J D, VERMA A V, BHATTNAGAR M. Variation of series resistance with temperature and illumination level in diffused junction poly- and single-crystalline silicon solar cells [J]. Journal of Materials Science Letters, 1986, 5: 1210-1212.

[8] SEWANG Y, GARBOUSHIAN V, AMONIX I, et al. Reduced temperature dependence of high-concentration photovoltaic solar cell open-circuit voltage (V_{oc}) at high concentration levels [C] // Photovoltaic Energy Conversion 1994, Conference Record of the Twenty Fourth, IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1994. Waikoloa HI USA: [s. n.], 1994: 1500-1504.

[9] ANTON I, SALA G, PACHON D. Correction of the V_{oc} vs temperature dependence under non-uniform concentrated illumination [C] // 17th EC Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich (Germany): [s. n.], 2001.

[10] MOSALAM SHAL TOUT M A, EL-NICKLAWY M M, HASSAN A F, et al. The temperature dependence of the spectral and efficiency behavior of Si solar cell under low concentrated solar radiation [J]. Renewable Energy, 2000 (21): 445-458.

The temperature and illumination intensity characteristic of the monocrystalline silicon solar cell

JIN Jing-shen , SHU Bi-fen , SHEN Hui , LI J un-yong , CHEN Mei-yuan

(Institute of Solar Energy System , Sun Yat-sen University , Guangzhou 510006 , China)

Abstract : This paper tested the monocrystal silicon solar cell using the flash solar cell tester in different temperature and illumination intensity conditions ,and analyzed its temperature characteristic and illumination intensity characteristic to optimize its application. It was found that when the temperature was between 25 and 65 ,the main parameters of the monocrystal silicon solar cell's light characteristic changed linearly with temperature. As the temperature went up ,the short current increased marginally , oppositely ,the fill factor decreased ,the open voltage also decreased at a rate of 2.3 mV/ ,and the efficiency decreased at a rate of more than 0.075 %/ . We explained these theoretically. Altering the illumination intensity of the flash between 340.1 W/ m² and 4251.2 W/ m² ,We found when the illumination intensity rose up ,the open voltage increased exponentially ,but the efficiency increased at first and then decreased ,the highest efficiency 16.67 % showed up at 952.7 W/ m² ,the fill factor decreased ,the last two phenomena can be attributed to the series resistance's effect ,the solar cell's max power was improved significantly when being concentrated.

Key words : solar cells ; temperature characteristic ; illumination intensity characteristic