

浅析晶体硅太阳能电池串联电阻及其测量方法

云南师范大学太阳能研究所
教育部可再生能源材料先进技术与制备重点实验室
云南省农村能源工程重点实验室
■ 邵俊刚 黄小龙 陈义 李雷 李承晴 廖华

摘要: 对晶体硅太阳能电池串联电阻的构成进行了理论分析。介绍了几种测量串联电阻的方法和原理,并对每种测量方法的优缺点进行了比较。

关键词: 太阳能电池; 串联电阻; 测量方法

一 引言

串联电阻是影响太阳能电池性能的重要因素之一,其大小直接影响太阳能电池的输出电流、填充因子、电池效率等参数。分析太阳能电池串联电阻的构成,并对其进行精确的测量,对太阳能电池结构的设计、制备工艺的优化和改进具有重要的意义。

二 串联电阻的构成

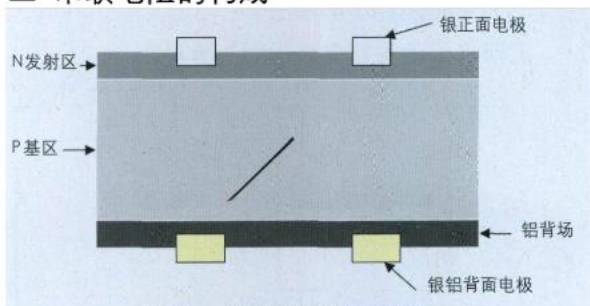


图1 太阳能电池结构示意图

根据晶体硅太阳能电池的结构可知,串联电阻可以表示为:

$$R_s = R_{mf} + R_{cf} + R_l + R_b + R_{cb} + R_{mb}$$

R_{mf} 、 R_{mb} 分别是正面和背面电极金属线电阻; R_{cf} 、 R_{cb} 分别是金属-半导体接触电阻; R_l 是正面扩散层的电阻; R_b 是基区体电阻。

1 电极金属电阻

金属电极电阻 R_m 可以表示为:

$$R_m = \frac{r_{sq} \left(\frac{l}{w} \right)}{2mn}$$

r_{sq} 为厚膜金属导体层的方块电阻; l 为栅线长度; w 为栅线宽度。

2 金属-半导体接触电阻

表征金属-半导体欧姆接触特性时,使用比接触电阻 R_c 来描述:

$$R_c = \left[\frac{\partial J}{\partial V} \right]_{V=0}^{-1}$$

对于低掺杂半导体,金属的比接触电阻表达为:

$$R_c = \frac{k}{qA^*T} \exp \left[\frac{q\phi_B}{kT} \right]$$

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3}$$

式中: A^* 为里查逊常数; q 是电子电荷; m^* 是电荷载流子的有效质量; k 是玻耳兹曼常数; h 是普朗克常数; ϕ_B 为势垒高度。由于越过势垒的热离子发射支配着电荷传输,较低的势垒高度将获得较低的接触电阻。

在高的掺杂浓度,势垒高度变小,隧道效应变为主要的导电机制,比接触电阻可表示为:

$$R_c \approx \exp \left[\frac{4\pi \sqrt{\epsilon_s m^*}}{h} \left(\frac{\phi_B}{\sqrt{N_D}} \right) \right]$$

ϵ_s 是硅的介电常数; N_D 是掺杂浓度。

3 扩散薄层电阻

商业化的晶体硅太阳能电池正面电极图形通常采用平行栅格形式。在采用平行栅格加两条焊接电极的情形下,扩散薄层引起的串联电阻可表示为:

$$R_1 = \frac{R_{sq} \left(\frac{L}{W} \right)}{4m^2}$$

其中, R_{sq} 为扩散层方块电阻; L 为电池主焊接电极方向尺寸; W 为电池细栅方向尺寸; m 为细栅线条数。

4 基区体电阻

由于基区可以认为是电阻率为 ρ 的均匀掺杂半导体, 基区体电阻 R_b 可以表示为:

$$R_b = \rho \frac{d}{L \times W}$$

d 为基区厚度, 约等于硅片厚度。

三 串联电阻的测量方法

对于串联电阻的测量人们已经进行了大量的研究, 并提出了多种测试方法。虽然方法很多, 但大体上可以分为两大类: 利用 I - V 特性曲线法、利用太阳能电池结构和欧姆定律法。

(一) 利用 I - V 特性曲线法

1 明暗特性曲线比较法^[1]

明暗特性曲线比较法如图 2 所示。把太阳能电池的二极管正向暗特性曲线 a 改变电流密度轴的方向后, 再与该电池的光照负载特性曲线 b 叠合, 在电压坐标轴上得到 $\Delta V = V_R - V_{oc} = I_{sc} R_s$ 。由于 V_{oc} 中不包含 R_s 的影响, 而在测曲线 a 时, 当 $I = I_{sc}$ 时, V_R 中包含了 $I_{sc} R_s$, 所以有:

$$R_s = \frac{V_R - V_{oc}}{I_{sc}}$$

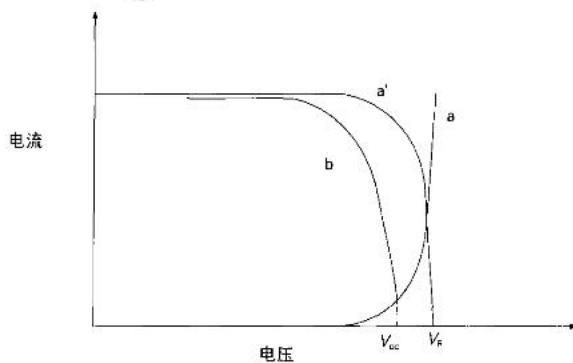


图 2 明暗特性曲线比较法

2 不同光强下负载曲线比较法

如果太阳能电池在工作光强下得到负载曲线 a , 而当改变光强, 把光强稍微降低一点后, 得到的另一条曲线 b (见图 3)。此时在曲线 a 上最佳工作点 P_a ,

对应的电流和电压分别为 I_a 和 V_a , 在曲线 b 上选一点 P_b , 让它所对应的电流 I_b 满足下列关系:

$$(I_{sc})_b - I_b = (I_{sc})_a - I_a$$

电池在两种光强照射时通过负载的改变, 而让通过 PN 结的电流不变。两种状态下结电流不变, 当然结电压也不变, 忽略光电导对串联电阻的影响, 有:

$$I_b R_s + V_b = I_a R_s + V_a$$

$$\text{所以 } R_s = \frac{V_b - V_a}{I_a - I_b} = \frac{V_b - V_a}{(I_{sc})_a - (I_{sc})_b}$$

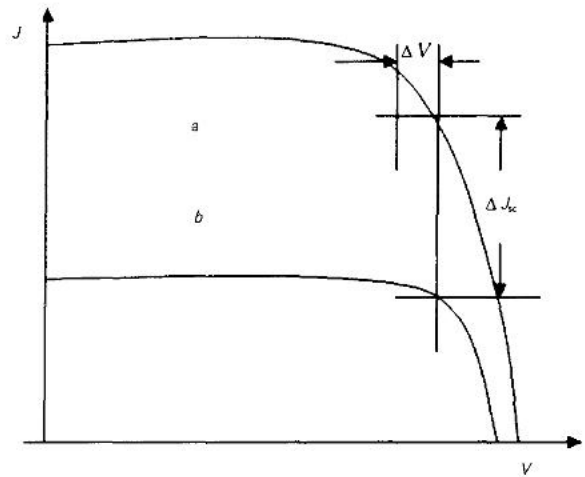


图 3 不同光强下负载曲线比较法

3 无光照条件下测试法^[2]

太阳能电池的等效电路如图 4 所示。

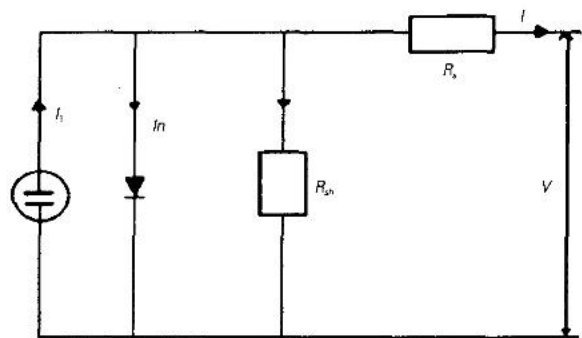


图 4 太阳能电池等效电路图

相应的 I - V 特性方程为:

$$I = -I_{ph} + I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q}{nkT} (V - IR_s) \right] - 1 \right\} + \frac{V - IR_s}{R_{sh}}$$

式中: I_{ph} 为光生电流; I_0 为反向饱和电流; n 为二极管品质因子; I 为输出电流; V 为输出电压; R_s 为串联电阻; k 为玻耳兹曼常数; T 为温度。假定在无光照的条件下测试, 则 $I_{ph} = 0$, 并联电阻 $R_{sh} \rightarrow \infty$,

上式变为:

$$I = I_0 \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right]$$

从上式可以看出, 只要在没有光照的条件下测试 I 与 V 的值, 建立 $\ln I$ 与 V 的函数关系, 就可以直接求出 R_s 的值。

4 电注入法^[3]

在无光照的条件下, 给太阳电池叠加一个弱的交流信号, 这时将太阳电池看作单二极管模型, 并忽略并联电阻 R_{sh} 的影响, 可以得到以下方程:

$$I = I_0 \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1$$

外加电流 I' 变化导致电阻的变化, 对上式求微分得:

$$r_d = \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=I'} = \frac{nkT}{q} \frac{1}{I} + R_s$$

从上式可以看出, 串联电阻 R_s 即为函数 $r_d = \left(\frac{1}{I} \right)$ 的截距。

5 开路电压点斜率法

当一恒定光源照射到太阳电池上, 利用二极管模型并忽略并联电阻 R_{sh} 的影响可以得到以下方程:

$$I = I_{ph} - I_0 \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} \right] - 1$$

对上式取微分可得到:

$$R_s = \left. \frac{dV}{dI} \right|_{I=0} = - \frac{nkT}{q} \cdot \frac{1}{I_{ph} + I_0}$$

也就是说, 可以通过测试 $I-V$ 曲线 V_{oc} 的处的斜率, 得到串联电阻 R_s 的值。

6 最大功率点法^[4]

最大功率点的方法最早由 Picciano 提出。此法是利用标准条件下测得的太阳电池 $I-V$ 特性曲线。同时假设并联电阻 $R_{sh} \rightarrow \infty$, 利用二极管模型推出:

$$R_s = \frac{V_m}{I_m} - \frac{I}{B(I_{ph} - I_m)}$$

$$B = \frac{I_m / (I_{ph} - I_m) + \ln \left[(I_{ph} - I_m) / I_{ph} \right]}{2V_m - V_{oc}}$$

7 面积法^[5]

1982年 Araujo 提出利用标准条件下的 $I-V$ 特性曲线与坐标轴所围成的面积来求解串联电阻。对于单二极管模型则有:

$$I = I_{ph} - I_0 \exp \left[\frac{q(V - IR_s)}{nkT} - 1 \right]$$

对上式中电压从0到 I_{sc} 进行积分可以得到 $I-V$ 特性曲线与坐标轴所围成的面积 A (图5中阴影部分的面积): $A = \int_0^{I_{sc}} V(I) dI$

于是可以得到:

$$R_s = 2 \left(\frac{V_{oc}}{I_{sc}} - \frac{A}{I_{sc}^2} - \frac{kT}{qI_{sc}} \right)$$

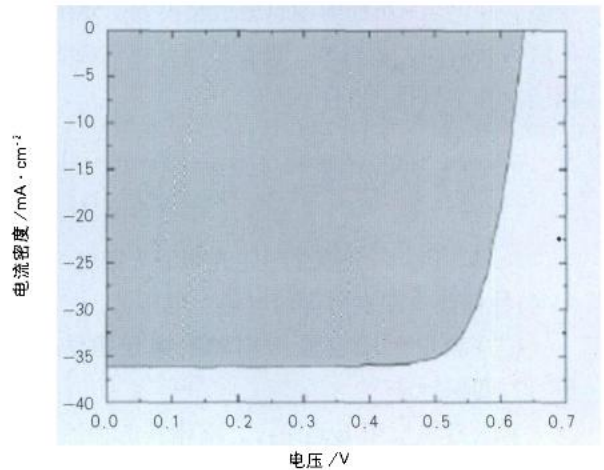


图5 面积法计算串联电阻示意图

8 光生电流与短路电流差别判断法^[6]

从试验可得知, 当入射光强小于 750 W/m^2 , 太阳电池的短路电流随入射光强的增加而成线性增加。而当入射光强大于 750 W/m^2 时, 两者关系非线性, 如图6所示。

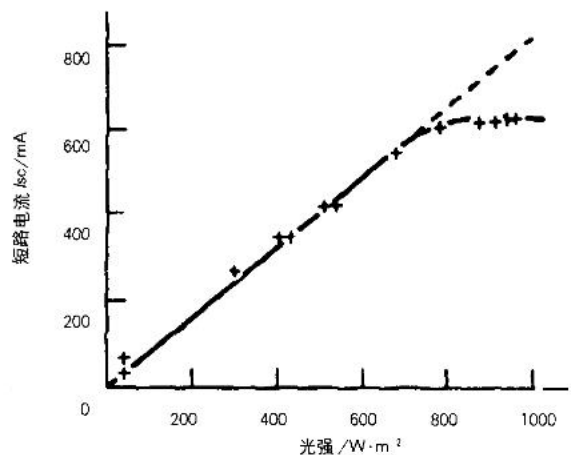


图6 短路电流和光强关系曲线

光生电流与短路电流差别判断法就是以此差别出发, 利用单二极管模型, 并忽略并联电阻 R_{sh} 的影响, 得到下式:

$$\ln \left(\frac{I_{ph} - I_{sc}}{I_0} \right) = \frac{qI_{sc}}{nkT} R_s$$

如果利用实验数据建立 $\ln(I_{ph} - I_{sc})$ 与 I_{sc} 的函数关系, 则曲线的斜率就是串联电阻 R_s 的值。

9 M.K.El-Adawi 法^[7]

考虑到明暗特性曲线比较法、不同光强下负载曲线比较法等方法利用两条曲线来测试串联电阻, 在一定程度上会引起较大的误差。而其他几种方法忽略并联电阻 R_{sh} 的影响也会引起误差。2001年 M.K.El-Adawi 等人利用单二极管模型并把二极管品质因子看作常数推出了下面的公式:

$$R_s = \frac{q}{nkT} \ln \left[\frac{I_{ph} + I_0 - I_2}{I_{ph} + I_0 - I_1} \right] - \left(\frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} \right)$$

I_1 、 I_2 、 V_1 、 V_2 分别是恒定光强下太阳能电池一条 I - V 特性曲线上两点对应的电流、电压值。

(二) 利用太阳能电池结构和欧姆定律法

1 四探针法^[9]

对于常规太阳能电池而言, 前栅线的接触电阻、正表面的扩散薄层电阻的值远大于其他方面引起的电阻, 所以, 很多情况下人们更关心前两项。三、四探针法就是基于这种思考而设计的一种简便的测量串联电阻的方法。这种测试方法的步骤是: 第一步, 将电池的细栅线与主栅线断开, 如图 7a 所示。在电池的栅线上, 将四根金属探针接触四条细栅, 其中 1、4 为电流探针, 通以直流电流 I , 2、3 为电压探针, 检测两相邻栅线上的电位差 V_{23} 。由图 7b 的等效电路可知, 这时由高内阻电位差计 V 所测得的电压 V_{23} , 即为电流 I 流经薄层电阻 R_{s2} 时所产生的电位降, 即 $V_{23} = IR_{s2}$ 。

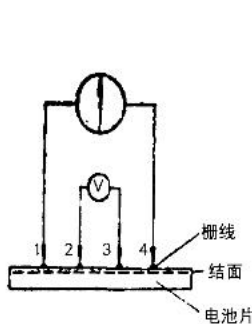


图 7a 测试原理图

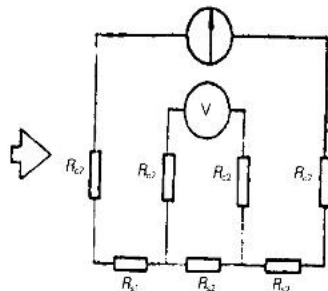


图 7b 等效电路图

第二步, 将探针 1 与 2 短路, 2、4 之间仍通以电流 I , 此时电路如图 4b 所示。再测量探针 2、3 之间的电压 V'_{23} , 此时所测得的电压 V'_{23} 是电流流经 R_{s2} 和 R_{s3} 时所产生的电位降之和, 因此, $V'_{23} = I(R_{s2} + R_{s3})$ 。

$$\text{于是就有: } \frac{V'_{23} - V_{23}}{I} = R_{c2}$$

其中, R_{c2} 就是探针 2 相接触的栅线与半导体表面之间的接触电阻。

如果电池有 N 根栅线, 并认为各栅线电阻相同, 则有:

$$R'_c = \frac{1}{N} R_c$$

由于 $V_{23} = IR_s$, 可得 $R_s = \frac{V_{23}}{I}$ 。

R_s 就是电池两条栅线间材料的薄层电阻。根据薄层电阻的定义可知:

$$R_s = \frac{\rho}{t} (L/W) = R_{\square} (L/W)$$

式中: R_{\square} 为方块电阻; L 为栅线间距; W 为栅线长度; t 为正面薄层的厚度; ρ 为薄层的平均电阻率。根据文献[9]中提供的公式就可以将 R_s 转换为太阳能电池串联电阻中的薄层电阻分量

$$R'_s = \frac{L}{12W} (\rho/t) G$$

如果电池有 N 条栅线, 则

$$R'_s = \frac{L}{12(N-1)W} (\rho/t) G$$

式中为 G 与 L/W 有关的修正因子^[10]。

这样, 在恒定电流下通过二次测量得 V_{23} 、 V'_{23} , 并经过相应的计算, 就可以分别求出接触电阻 R_c 和薄层电阻 R'_s 。

2 二探针法^[10]

先把太阳能电池的主栅线和细栅线断开, 如图 8 所示。接触电极宽度 d ; 长度 w ; 测试样品扩散薄层电阻 R_{sq} ; 接触电阻为 R ; L_1 为电极 A 与 B 之间的距离; L_2 为电极 A 与 C 之间的距离, 则 A、B 的电阻 R_1 、B、C 间的电阻 R_2 分别为:

$$R_1 = 2R + \frac{L_1}{w} R_{sq}$$

$$R_2 = 2R + \frac{L_2}{w} R_{sq}$$

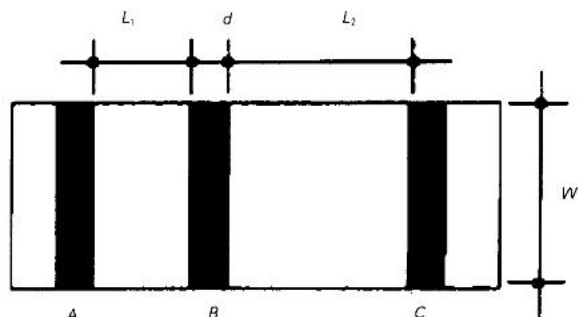


图 8 接触电阻测试图形

$$\frac{R_1 - 2R}{L_1} = \frac{R_2 - 2R}{L_2}$$

$$R = \frac{L_1 R_2 - L_2 R_1}{2(L_1 - L_2)}$$

在 $L_2 = L_1$ 的情形下, $R = R_1 - \frac{1}{2} R_2$

由上式可以看出, 只要测量出 A、B 间的电阻 R_1 , B、C 间的电阻 R_2 , 就可以计算出该电极图形下的金属半导体接触电阻。

四 结论

综合以上几种方法, 无光照条件下测试法和电注入法是在无光照的条件下, 利用太阳电池的二极管模型并忽略并联电阻的影响推出的, 在一定程度上能反映串联电阻的大小。但是太阳电池是在有光照的条件下工作, 所以上述两种方法测得的结果和实际工作状态下的串联电阻存在较大的差别。开路电压点斜率法看似简单, 但是实测的太阳电池特性曲线开路电压处大多呈非线性关系, 这给实际测量工作带来很大的困难。明暗特性比较法能较准确地测量太阳电池的串联电阻, 而且能较好地与器件的结构特点相联系, 是一种快捷方便的测量方法; 不同光强下负载曲线比较法, 则能给出太阳电池处于最佳工作点附近的串联电阻, 这对于太阳电池组件的应用极为重要。但是这两种方法是利用两条特性曲线, 并且都忽略了并联电阻的影响, 因此测量的精确度受到一定的影响。相比之下 M. K. El-Adawi 法利用一条特性曲线而且也考虑了并联电阻的影响, 测得的结果比较准确, 只是此种方法较复杂, 测试设备也较昂贵。三、四探针法和两探针法虽然方法、工具简单, 但严格来说测量的并不是太阳电池的串联电阻, 而是接触电阻和扩散薄

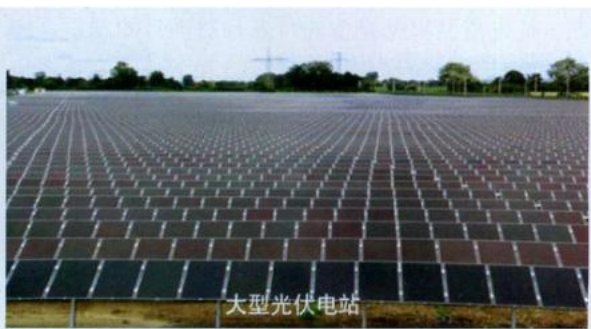
层的电阻。由于这两项是构成串联电阻的主要因素, 其他因素所占的比例较小, 所以也可以大体上反映太阳电池串联电阻的大小。相对于两探针法, 三、四探针法能够把接触电阻和扩散表层电阻区分开来, 在探究各因素对串联电阻的影响时会更有用。利用 $I-V$ 特性曲线法虽能从整体上反映太阳电池串联电阻的大小, 但是却无法具体分析是何种原因引起的串联电阻变化。对于改进太阳电池结构, 优化电池制备工艺, 三、四探针法和两探针法更具优越性。

参考文献

- [1] 赵富鑫, 魏彦章. 太阳电池及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
- [2] M. Bashahu, A. Habyarimana. Review and test of methods for determination of the solar cell series resistance [J]. Renewable Energy, 1995, 6(2): 129 - 130.
- [3] A. M. Cowley, S. M. Sze. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems[J]. J. Appl. Phys., 1965, 30: 3212.
- [4] C. M. Singal. Analytical expressions for the series resistance dependent maximum power point and curve factor for solar cells[J]. Solar Cells, 1981, 3: 163 - 177.
- [5] D. Pysch, A. Mette. A review and comparison of different methods to determine the series resistance of solar cells[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2007, 91 (18): 1698 - 1706.
- [6] S. K. Agarwal, et al. A new method for the measurement of series resistance of solar cells[J]. J. Phys. D: Appl. Phys., 1981, 14: 1643 - 1646.
- [7] M. K. El-Adawi, I. A. Al-Nuaim. A method to determine the solar cell series resistance from a single $I-V$ characteristic curve considering its shunt resistance—new approach[J]. Vacuum, 2002, 64: 33 - 36.
- [8] 曹泽淳, 黄家美. 一种测量太阳电阻串联电阻的方法—三、四探针法[J]. 太阳能学报, 1981, 2(1): 76 - 77.
- [9] N. C. Wyeth. Sheet resistance component of the series resistance in a solar cell as function of grid geometry[J]. Solid-State Electronics, 1977, 20: 629 - 634.
- [10] 庄同曾. 集成电路制造技术—原理与实践[M]. 北京: 电子工业出版社, 1987.



光伏屋顶



大型光伏电站