



PERC 单晶硅光伏组件 EL 明暗不均的研究

晶澳太阳能有限公司 ■ 张志敏* 刘苗 许志卫 张建军 张鹏程

摘要: 按不同电阻率对现有产线的硅片进行划分, 通过对电池及组件 EL 测试的机理探索, 系统地研究了不同电阻率硅片加工成太阳电池及组件后 EL 测试的差异, 为解决 PERC 单晶硅光伏组件 EL 明暗不均的现象提供了方向, 具有良好的实际应用价值。

关键词: PERC 单晶硅太阳电池; 组件; 电阻率; EL 明暗不均

0 引言

随着社会的发展, 近年来各种电子设备层出不穷, 每天的用电量也在不断上升。传统的火力发电虽然仍是世界上的主流发电方式, 但是其所使用的不可再生资源——煤的逐渐枯竭及燃烧所造成的严重环境污染等问题已经引起了高度关注。现如今, 人们不仅关心社会的发展, 更加重视环境的保护和治理。因此, 太阳能及水力、风力发电等清洁能源的利用让人们看到了可持续发展的希望。

光伏发电系统的核心部件是太阳电池。根据原料类型, 太阳电池可分为晶硅太阳电池和非晶硅太阳电池; 而根据硅片的加工方式, 晶硅太阳电池又可分为单晶硅太阳电池和多晶硅太阳电池^[1]。目前在单晶硅太阳电池中, 普通 p 型单晶硅太阳电池的平均转换效率可达 20% 以上, 选择性发射极 (selective emitter, SE) 叠加钝化发射极和背面电池 (Passivated Emitter and Rear Cell, PERC) 太阳电池的量产效率可达 22% 以上。

然而, 随着 PERC 太阳电池的逐步推广, PERC 光伏组件电致发光 (Electroluminescence, EL) 明暗不均的现象层出不穷, 尤其是 PERC 掺镓电池更为明显。过去, 业内普遍认为造成这一现象的原因是由于电池功率差异导致电池串联之后失配, 即常说的“混档”。但是经过验证后发现, 相同档位的电池在层压之后仍然会出现不同程度的 EL 明暗不均现象。

本文通过对不同电阻率的硅片进行划分, 加工成电池及相应组件后进行 EL 测试研究, 发现影响组件 EL 明暗不均的因素除了“混档”之外, 不同电阻率的太阳电池混合层压也是较大的影响因素。

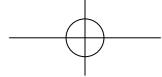
1 实验设计

1.1 实验仪器

硅片电阻率测量采用上海星纳 MS203 硅片多功能参数检测仪; 成品电池效率测量采用德国 halm 高精度 $I-V$ 测量系统; 电池 EL 测量采

收稿日期: 2018-11-13

通信作者: 张志敏 (1982—), 男, 高级工程师, 主要从事晶体硅太阳电池方面的研究。zhangzm@jasolar.com



用沛德 EL-C01 太阳电池工艺缺陷检测仪；组件 EL 测量采用捷勒 GST-EL-1000 光伏组件 EL 检测仪。

1.2 实验样品及处理

硅片样品为河北松宫半导体有限公司生产的 p 型掺镓单晶硅片，硅片尺寸为 156 mm×156 mm，电阻率范围为 0.25~3.00 Ω·cm。首先将硅片按照电阻率 0.25~1.00、1.00~1.80、1.80~3.00 Ω·cm 这 3 个范围进行分类，每个档位选 20 片硅片，共 60 片；然后按照 PERC 太阳电池工艺流程进行制备。实验过程中有专人进行跟踪，以避免混片。60 片硅片的实测电阻率数据如图 1 所示。

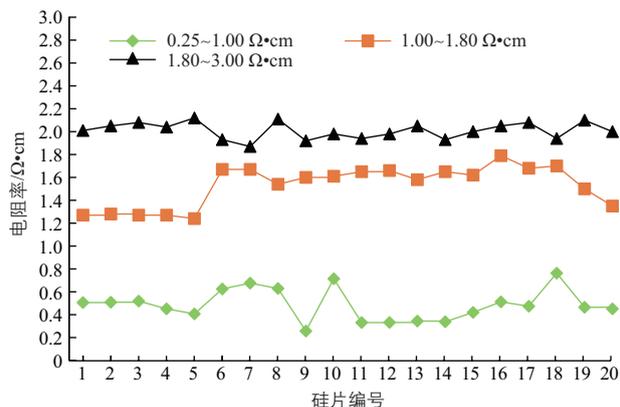


图 1 60 片硅片的实测电阻率数据

使用 halm 高精度 $I-V$ 测量系统对制备好的 60 片成品电池进行检测分选。按照效率相差 0.1% 进行分档，在 3 个电阻率范围都抽选同一效率档位 (20.26%~20.36%) 的电池作为实验样品。

1) 样品 1: 电阻率范围为 1.80~3.00 Ω·cm，选取 5 片电池。

2) 样品 2: 电阻率范围为 1.00~1.80 Ω·cm，选取 3 片电池。

3) 样品 3: 电阻率范围为 0.25~1.00 Ω·cm，选取 2 片电池。

保留每片电池的详细电性能参数数据，按照串联电阻 R_s 值对以上 3 组样品电池进行由大到小编码排序，编号为①~⑩，然后进行串焊，并测试串

焊后组件的 EL。

2 结果与分析

2.1 实验结果

将本次实验选定的同一效率档位的样品电池根据串联电阻 R_s 值从大到小进行编码排序，每个样品对应的电性能参数分布图如图 2~图 6 所示。

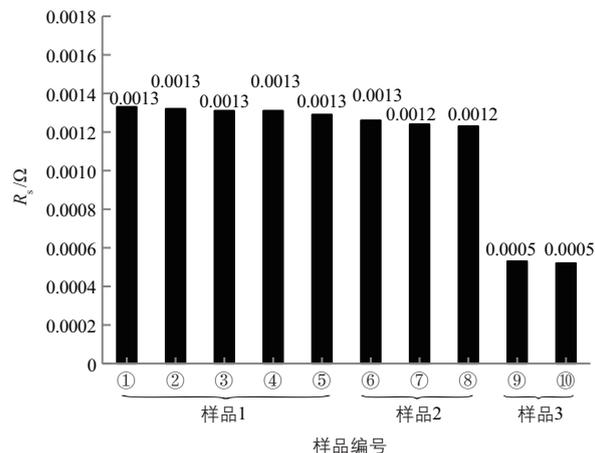


图 2 每片电池的 R_s 分布图

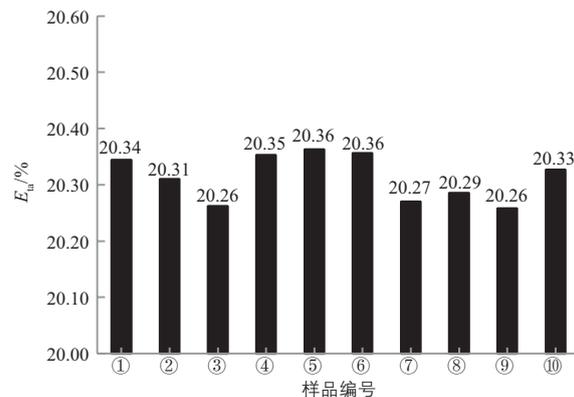


图 3 每片电池的 E_{η} 分布图

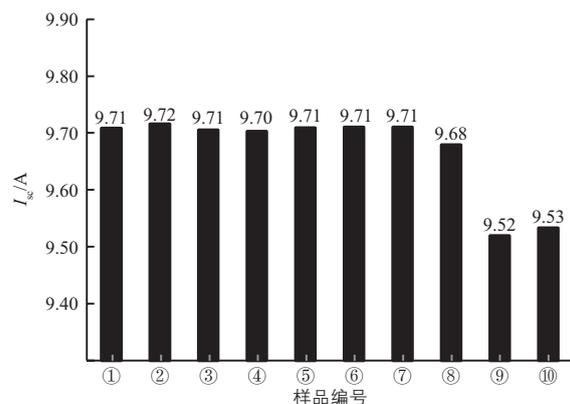
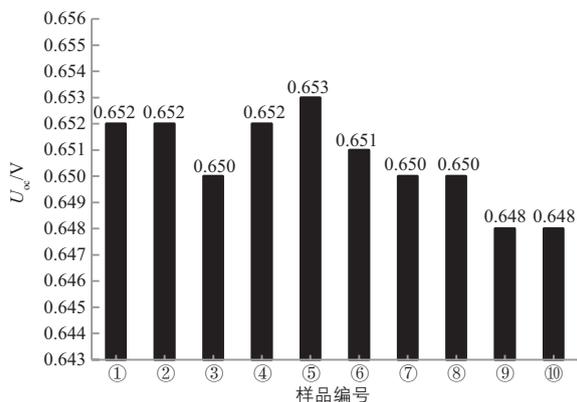
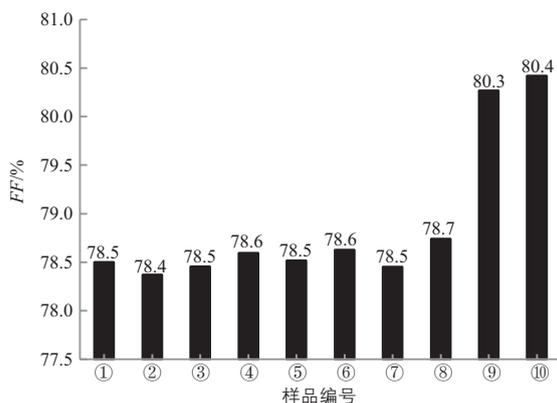


图 4 每片电池的 I_{sc} 分布图

图5 每片电池的 U_{oc} 分布图图6 每片电池的 FF 分布图

实验数据显示,随着电阻率范围缩小, R_s 呈下降趋势,对应的 FF 呈上升趋势, U_{oc} 及 I_{sc} 呈下降趋势。

对①~⑩号电池进行单片 EL 测试,结果如图 7a 所示。从测试图像可以看出,⑨号和⑩号电池的 EL 图像略显发暗,如图 7b 所示。

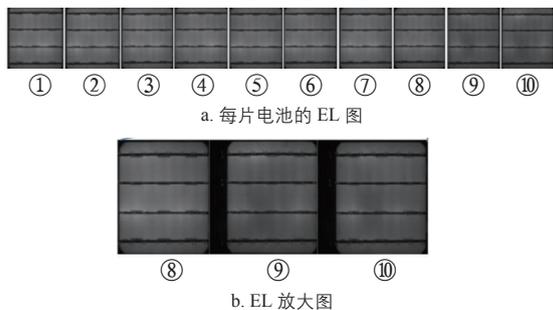


图7 单片电池的 EL 图像

按编号顺序将 10 片电池依次串焊在一起组成实验小组件,并测试其 EL,结果如图 8 所示。从图中可以看出,⑨号和⑩号电池的 EL 发黑程度相对于其他电池较为严重,整串组件出现明暗不均的现象。

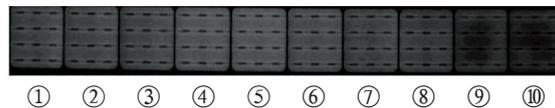


图8 串焊后的 EL 图像

2.2 结果分析

对于 p 型单晶硅太阳能电池而言,EL 探测到的主要是 p 区发的光。图 9 给出了在不同温度下 (77 K、300 K、400 K), p 型硅中少子寿命与掺杂浓度的关系^[2]。从图中可以看出,少子寿命随着掺杂浓度的增加而降低,俄歇复合的比例增加导致 EL 图像发暗。所以,相对于高电阻率硅片,低电阻率硅片会呈现 EL 图像发暗的现象。这种差异在电池串联,归一化电流密度后会变得更加明显^[2]。

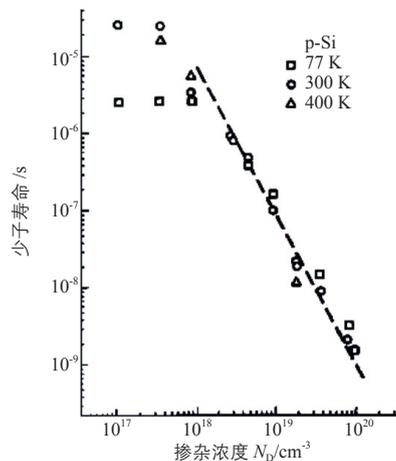
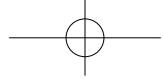


图9 p 型单晶硅太阳能电池的少子寿命与掺杂浓度之间的关系

从电学角度分析,给太阳能电池串加上正向电流后,每片太阳能电池会像发光二极管一般,发出近红外光,在回路处于稳定的状态时,流过每片电池的电流 I_{e1} 是一致的;若能计算出每片电池在回路中的电压降 $U_1 \sim U_{10}$ 的值,根据公式 $P=UI$,即可计算出每片电池的等效发光功率 $P_1 \sim P_{10}$;而等效发光功率的大小就决定了 EL 图像的亮度。因此,如何计算出每片电池的电压降 $U_1 \sim U_{10}$ 是问题的核心。

根据《halm 光伏高精度 $I-V$ 测量系统基础培训》中的部分测量原理,串联电阻 R_s 是根据亮场正向和暗场正向曲线来计算的,如图 10 所示。



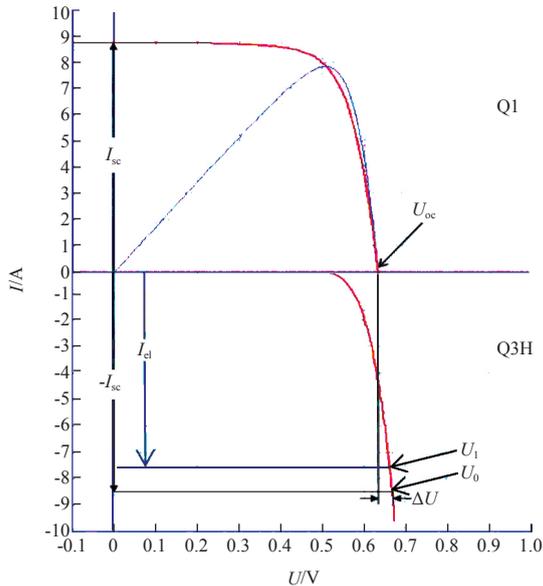
串联电阻 R_s 的计算公式为:

$$R_s = \frac{\Delta U}{I_{sc}} = \frac{U_0 - U_{oc}}{I_{sc}} \quad (1)$$

式中, U_0 为太阳电池在暗场正向对应电流为 I_{sc} 的电压降。

根据式 (1), U_0 的计算公式为:

$$U_0 = R_s I_{sc} + U_{oc} \quad (2)$$



注: 本文描述用 R_s 代表 $R_{serL,DF}$ 。 $R_{serL,DF}$ 用亮场正向 (Q1) 与暗场正向 (Q3H) 曲线来计算, 见公式 (1)

图 10 $I-V$ 特性测量串联电阻 R_s

给光伏组件正向通入约 1 倍于 I_{sc} 的电流 I_{el} 进行 EL 测试。对于每片电池都处于暗场正向的工作状态, 曲线对应 $I_{sc} \sim I_{el}$ 范围内, 单片电池的电压 U_n 与 I_{el} 基本呈线性关系变化, U_n 的变化幅度主要取决于电池的串联电阻 R_s [2]。

以①号电池为例, 其电压降 U_1 满足:

$$R_s = \frac{U_0 - U_{oc}}{I_{sc}} = \frac{U_1 - U_{oc}}{I_{el}} \quad (3)$$

则:

$$U_1 = I_{el} R_s + U_{oc} \quad (4)$$

等效发光功率的计算公式为:

$$P_1 = I_{el} U_1 = I_{el}^2 R_s + I_{el} U_{oc} \quad (5)$$

由此可见, 等效发光功率除了正比于 I_{el} 外, 还与 R_s 和 U_{oc} 有关。按照 EL 通入电流 I_{el} 为 9 A, 可根据每片电池的电性能参数计算出各自的等效发光功率值。按等效发光功率从大到小排列, 实

验组件在测试 EL 过程中每片电池的等效发光功率值如表 1 所示。

表 1 实验组件在测试 EL 过程中每片电池的等效发光功率

样品编号	电阻率/ $\Omega \cdot \text{cm}$	U_{oc}/V	R_s/Ω	I_{el}/A	P_n/W
⑤	1.80~3.00	0.653	0.0013	9	5.98
①	1.80~3.00	0.652	0.0013	9	5.98
②	1.80~3.00	0.652	0.0013	9	5.97
③	1.80~3.00	0.650	0.0013	9	5.97
⑥	1.00~1.80	0.651	0.0013	9	5.96
④	1.80~3.00	0.652	0.0013	9	5.96
⑦	1.00~1.80	0.650	0.0012	9	5.95
⑧	1.00~1.80	0.650	0.0012	9	5.95
⑨	0.25~1.00	0.648	0.0005	9	5.87
⑩	0.25~1.00	0.648	0.0005	9	5.87

从表 1 可以看出, ⑨号和⑩号电池的等效发光功率值与其他电池相比, 相差较大, 所以其 EL 图像会发暗, 这 2 片电池对应的电阻率范围为 0.25~1.00 $\Omega \cdot \text{cm}$, U_{oc} 和 R_s 均较小。

综上所述, 对硅片进行电阻率档位区分后再投入后续生产, 可以有效减少光伏组件 EL 明暗不均的现象; 另外, 在对电池成品进行电性能测试时, 增加 R_s 和 U_{oc} 条件, 并进行有效分层, 也可以减少 EL 明暗不均的现象。

3 结论

本文从 EL 原理和电学理论推导 2 个层面解释了不同电阻率硅片制成的同功率档位 (效率在 0.1% 偏差内) 太阳电池串焊为组件后会出现 EL 明暗不均现象的原因: 每片电池的明暗程度除了与电流成正比外, 还与单片电池的串联电阻 R_s 和 U_{oc} 有关。硅片电阻率与基体掺杂浓度会直接影响这 2 个参数, 硅片电阻率过低, 掺杂浓度过大, 基体本身过量的辐射复合及较低的载流子迁移率会导致电池的 U_{oc} 和 I_{sc} 较小, 但由于电池的 R_s 大小会使 FF 获得极大提升, 从而使 (转第 79 页)

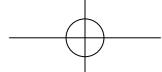


图3 导入交互式卫星地图的设计效果图

在现场定位时,可将 Helios 3D 模型导入奥维互动地图移动端,对现场人员所在位置的光伏组件进行缩放定位,如有问题可及时做出调整。

4 山地光伏电站的施工措施

在山地光伏电站的道路施工过程中,多数施工单位会依据山地的地形地貌及地势情况修改设计图纸中的光伏场区道路路径,但这样会造成光伏组件的二次调整,而且道路施工产生的落石会严重影响光伏组串的布置容量。因此,在对道路路径进行规划设计时,应在充分了解光伏场区的布置情况后进行现场踏勘调研,力求道路规整体布局合理。道路施工过程中产生的碎石等应及时清除,若不能清除的应及时反映给设计人员,因为道路施工时产生的碎石会对光伏电站布置、单元划分、线缆路径等造成影响。

山地光伏电站会遭受雷击,施工质量是主要影响因素之一。所以,应加强以下施工措施:

1) 光伏组件与支架之间搭接形成的电气通道应均匀、紧密,以减少泄流通道的差异性,避免雷击隐患存在。

2) 支架各部件之间均采用螺栓连接时,要紧密均匀,使支架形成良好的等电位整体。

3) 支架与接地扁钢之间采用螺栓连接时,首先应提高支架与接地扁钢的接触面的可靠性^[3],

(接第39页)电池具有较高的 E_{ta} , 因此,只通过 E_{ta} 对电池进行分档已不能很好地进行区分。而通过对电池电性能参数 R_s 和 U_{oc} 进行有效分层,可以减少光伏组件 EL 明暗不均的现象。

增大有效接触面积,避免接触面存在空隙;其次应涂抹导电膏,避免形成氧化腐蚀,导致接触点的电阻随时间的推移而增大。

4) 汇流线路处于防雷分区 0B 区,虽然无遭受直击雷的可能,但所途径的空间电磁场能量未得到衰减。为了使雷电过电压较小,施工时应尽可能缩小光伏组串至汇流设备的连接线围成的面积^[4]。汇流线路所经部位应设置良好的屏蔽措施。

5) 对经过光伏场区的铁塔电力线路、杆塔通信线路、受保护的树木等,设计方应在图纸上标注阴影区范围。在特殊的铁塔电力线路范围内设计和施工,应取得电力部门的同意。

5 结语

对于山地光伏电站而言,在前期踏勘、测绘、设计和施工等阶段,任何一个环节的失误,都会给光伏电站造成不可挽回的后果。因此,在项目前期规划、设计和施工阶段应采取多项措施,提高电站的整体性能水平。

借助 Helios 3D 软件、PVsyst 软件、卫星地图及无人机可提高工作效率,使设计人员更直观地了解项目所选场址的整体阴影遮挡情况,并进行设计判断,可取代大量手动设计工作;利用交互式卫星地图,可使现场人员在施工前对光伏场区的组件布置情况进行校验和调整,大幅节省时间,提高工作效率和设计成品的准确性。

参考文献

- [1] 张伟时. 谈山西境内光伏电站的岩土勘察特点和方法 [J]. 山西建筑, 2017, 43(14): 47 - 48.
- [2] GB 50797-2012, 光伏发电站设计规范 [S].
- [3] GB/T 50796-2012, 光伏发电工程验收规范 [S].
- [4] GB/T 36963-2018, 光伏建筑一体化系统防雷技术规范 [S].

太阳能

参考文献

- [1] 肖焕成. 未来五年太阳能电池市场属于单晶硅 [EB/OL]. <http://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/141119-621f6fbf.html>, 2014-11-19.
- [2] 王文静. 晶体硅太阳能电池制造技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2014. 太阳能