

晶体硅太阳能电池缺陷检测与分类评价体系

王学孟¹ 叶子锐² 沈辉^{1,2} 梁璟强¹ 尹浩平²

(¹顺德中山大学太阳能研究院, 广东 佛山 528300)

(²中山大学太阳能系统研究所, 广东 广州 510006)

摘要 通过对 5000 片不同类型的低效缺陷太阳能电池样品进行检测和分析,建立了较完整的晶体硅太阳能电池缺陷检测与分类评价体系。该体系综合利用电流电压(I-V)测试、热成像测试、电致发光测试等多种测试分析手段,已整理出 16 类电池缺陷。从“缺陷定义-测试特征-性能影响-来源机理-预防手段-修复价值”等方面对各类缺陷做了详细描述和评价。该研究结果可用于指导太阳能电池的生产改进及缺陷电池的修复。

关键词 材料;太阳能电池;缺陷检测;分类评价;修复

中图分类号 TM914.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP50.031602

Defect Detection and Classification Evaluation System for Crystalline Silicon Solar Cells

Wang Xuemeng¹ Ye Zirui² Shen Hui^{1,2} Liang Jingqiang¹ Yin Haoping²

(¹ Shunde Sun Yat-Sen University Institute for Solar Energy, Foshan, Guangdong 528300, China)

(² Institute for Solar Energy System, Sun Yat-Sen University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

Abstract About 5000 pieces of low-efficiency defective crystalline silicon (C-Si) solar cells are collected, inspected and analyzed, and a defect inspection and classification evaluation system for C-Si solar cells is established. The system which includes current-voltage (I-V) test, thermal imaging test, electroluminescence imaging test etc., can identify 16 kinds of defects. The system can give out detailed description and evaluation of these defects following the steps of "defect definition, testing feature, influence on performance, original mechanism, preventive action, value of repairing". The result will be helpful in improving C-Si solar cell production and repairing defective cells.

Key words materials; solar cell; defect inspection; classification evaluation; repair

OCIS codes 160.6000; 350.6050; 220.4840; 110.3080

1 引言

太阳能是目前全球新能源发展的重点领域,特别是以晶体硅太阳能电池技术为主导的太阳能光伏产业,在进入 21 世纪之后发展迅猛。根据国际权威光伏杂志《Photon International》的统计数据^[1],从 2003 年起太阳能电池产量保持高速增长,2011 年全球产量达到 37.2 GW,比上一年增长 36%。我国从 2007 年开始成为太阳能电池生产第一大国,2011 年产量为 21.3 GW,占全球产量 57.3%,其中绝大部分为晶体硅太阳能电池。近期晶体硅电池相关产品价格下降迅速,竞争力不断提升,在未来一段时间内仍将保持市场主流地位。

在晶体硅太阳能电池的生产中,由于材料、制作工艺等原因,会产生一定比例的缺陷电池片。根据本课题组对国内多家厂商的不完全调查,缺陷电池片的产生概率普遍为 2%~3%,据此估算,国内每年会产生几百兆瓦的缺陷电池片,相当于一个中型生产商的规模。

对缺陷太阳能电池进行系统的研究,在学术上和经济学上都有重要意义:1) 提出缺陷形成机理和预防措施,可改进电池生产工艺,减少生产过程中的缺陷,提高电池性能和成品率;2) 为缺陷电池的分类回收利用提供

收稿日期: 2012-10-08; 收到修改稿日期: 2012-12-18; 网络出版日期: 2013-01-31

基金项目: 国家 863 计划(2012AA050302)和广东省重大科技专项(2010A080805003)资助课题。

作者简介: 王学孟(1984—),男,硕士,工程师,主要从事光伏技术与应用方面的研究。E-mail: wxmcom@126.com

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

指导。国内外对硅材料和电池的缺陷分析已有比较多的工作^[2~4],但是这些工作相对零散,特别是对电池的缺陷,缺乏系统的总结与评价。本文主要针对缺陷电池,进行系统的测试、分析和研究,从大量的样本中总结缺陷的各种特性,结合对电池的回收修复,形成一个完整的系统,对电池缺陷做持续研究,以满足工业化处理的需求。

2 研究方法

在过去3年的研究工作中,收集了来自国内8个大中型生产厂家的多批次缺陷太阳电池样品。电池样品均采用太阳“化学腐蚀制绒-高温气体扩散-丝网印刷烧结”为主的常规工艺,包括了不同规格的单晶硅电池和多晶硅电池,多晶硅电池占多数。电池样品外观正常,没有肉眼可见的破损、污渍、镀膜及印刷异常等现象;效率涵盖了0~17%的范围,大部分集中在13%~16%的区间,与实际生产情况相符。因此,本文的研究样本具有一定的普遍性和代表性。

晶体硅太阳电池的缺陷种类很多,为掌握缺陷的表现特征及成因,本文采用了多种分析手段,构建了一个有效的检测体系和流程。

主要测试内容包括太阳电池电流-电压(I-V)特性测试、电致发光(EL)成像测试和红外热成像测试。辅助测试内容包括显微分析、光致发光成像测试、Suns- V_{oc} 测试、扫描电镜(SEM)和能谱分析(EDS)测试以及串联电阻 R_s 面扫描测试。

将收集到的样品首先进行3项主要检测。由I-V特性测试获得电池的短路电流 I_{sc} 、开路电压 V_{oc} 、填充因子 F_F 、最大功率 P_m 、串联电阻 R_s 、并联电阻 R_{sh} 及逆电流 I_{rev} 的数值,通过分析首先对大部分缺陷的类型和严重性做出初步判断。例如,当 R_{sh} 及 F_F 偏低时,可能是电池出现明显漏电缺陷;当 R_s 过大,而 F_F 及 I_{sc} 偏小时,可能是电极栅线断栅或者烧结不足。

为更准确地了解缺陷的位置、形状及严重性,选用了两种不同的红外成像技术:1)利用近红外光的电致发光(荧光)成像^[5~7];2)利用中远红外光的热成像^[8]。电致发光成像测试通过对电池外加偏压,使载流子复合发光(波长950~1250 nm)。通过对比发光强度的差异可以直观、精确地检测到电池内部多种缺陷的位置及形状,例如断栅、隐裂、烧结异常及硅材料缺陷等。本文采用的电致发光成像系统为自主设计,核心部件为SONY APS幅面制冷CCD,有效像素数为3032×2016。红外热成像测试主要用于检测漏电类缺陷,通过对电池施加反向电压,电流会向漏电区域集中而显示出温度异常,用红外热像仪拍摄电池表面温度分布图,可以便捷地确定漏电的区域及严重程度。本文采用的红外热成像测试系统为自主设计,核心部件为NEC TS9100红外摄像机,有效像素数为640×480。

图1所示为一片缺陷电池的电致发光成像及红外热像测试图像。图1(a)中清晰地显示了虚线红框中的长方形暗区及暗细纹,后经过显微观察在暗纹处发现微裂纹,并且在暗纹与暗区相连处发现断栅;图1(b)显示在对应的微裂纹与断栅点相交处存在热点,表明该处存在明显漏电,是一个漏电缺陷。利用这两种互补

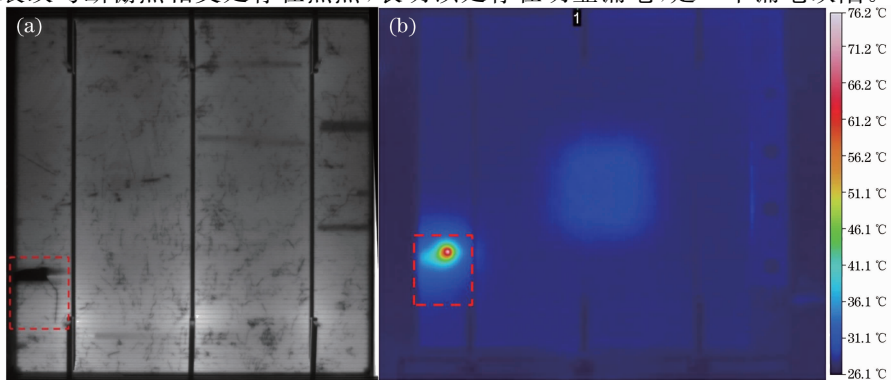


图1 缺陷(微裂纹和断栅)电池红外测试。(a)电致发光成像;(b)红外热像测试

Fig. 1 Infrared imaging tests for defected cells (microcrack and finger-missing). (a) Electroluminescence image; (b) IR thermal image

的红外成像技术,可以发现绝大部分缺陷的位置和形态,结合 I-V 特性和显微观察,更准确判断缺陷类型,然后进行针对性的辅助测试。目前采用的辅助测试分析包括对缺陷处进行显微观察和材料成分分析,利用光致发光测试可以单独分析硅片本身的材料性能^[9],结合 Suns- V_{oc} 测试分析电极和 R_s 性能的影响, R_s 面扫描测试分析电极烧结的性能等,如图 2 所示。以上的例子说明电池缺陷分析需要综合多种测试方法,才能获得准确的判断。综合测试结果及生产工艺过程,通过分析基本可以判断各类缺陷的类型及成因。

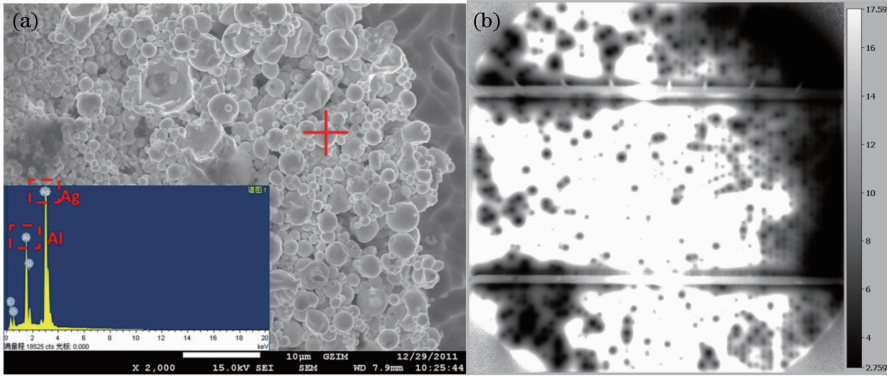


图 2 辅助测试。(a) SEM 及 EDS 分析显示浆料有污染; (b) R_s 面扫描测试显示多处电极烧结缺陷
Fig. 2 Assistant tests. (a) SEM&EDS indicating Al-paste contamination; (b) R_s -scan indicating firing defects of electrode

3 缺陷分类评价体系

本文从缺陷电池的检测分析做起,一方面分析缺陷的表现特征及成因,另一方面分析缺陷的危害程度、出现频率及可利用价值,建立了据我们所知是国内第一套的较完整的缺陷分类评价体系,并在不断完善,以便逐步向相关生产和科研机构推广应用。

3.1 体系标准

该体系对缺陷的表征评价标准包括以下 7 个项目:

- 1) 缺陷名称:根据缺陷的成因或者表现特征来定义缺陷名称;
- 2) 测试特征:明确缺陷在各类测试中的主要表现,以便在该体系的使用中能便捷地确定缺陷类型;
- 3) 形成机理:结合生产工艺过程,对缺陷形成提出合理解释;
- 4) 危害程度:缺陷对电池性能的哪些方面造成危害及其程度;
- 5) 出现频率:评估缺陷出现的频率高低,该指标将随实验样本的增长而持续修正;
- 6) 预防措施:根据缺陷形成机理,提出在生产中合理有效的预防建议;
- 7) 回收价值:根据缺陷的影响程度、面积大小以及是否有相应的修复回收方法等因素,评估缺陷太阳能电池的回收价值。

为便于实际操作,本文在“危害程度”、“出现频率”及“回收价值”等评价上,结合定量和定性的分析方法,采用分级体系,一般分为 5 级。以缺陷面积为例,评价标准为缺陷面积占电池总面积百分比,分级定义为:大,90%以上;较大,60%~90%;中等,30%~60%;较小,5%~30%;小,5%以内。

3.2 缺陷类型

按照上述体系,在已有样本中总结出 16 种缺陷类型,具体如下:

- 1) 边缘漏电:电池刻边或去背结不完全,边缘存在连接背面的扩散层,导致漏电;
- 2) 前电极烧结过度:前电极烧结过度,电极金属过于深入发射极,容易造成漏电;
- 3) 发射极破损:操作失误造成的摩擦、划痕等,使发射极破损,增加了表面复合、漏电;
- 4) 浆料污染:印刷过程中铝浆、背银等散落在电池正面,烧结后造成漏电;
- 5) 杂质污染:工艺过程中非浆料杂质附着在电池表面,造成漏电;
- 6) 挂钩点:等离子体增强化学气相沉积(PECVD)挂钩点区域由于 SiN_x 缺失,电极烧结时烧穿发射极

造成漏电；

- 7) 裂纹:在硅片及电池工艺的制造过程中造成各种裂纹/微裂纹,经过金属电极时容易造成漏电甚至击穿;
- 8) 断栅:由于印刷问题或硅片形貌不正常,细栅出现局部不连续;
- 9) 网带印:烧结时由于网带污染或者温度异常,EL 图中电池出现与网带形状相同的背场缺陷低效区域;
- 10) 背场缺陷:铝背场出现肉眼可见的大面积异常区域,使电池性能降低;
- 11) 电极接触不良:由于烧结问题,使前电极与发射极之间出现大面积接触不良,串联电阻高;
- 12) 无 p-n 结:由于操作失误,电池没有形成有效的 p-n 结;
- 13) p-n 结反印:在单面制结的电池生产中,印刷时电池的正反面颠倒,使电池失效;
- 14) 硅料边缘缺陷:在单晶硅棒头尾区域以及多晶硅铸锭边缘区域的硅片,杂质和缺陷集中,整体少子寿命低;
- 15) 黑芯片:单晶硅拉棒时控制不良,使硅棒中心的杂质和缺陷集中,呈现同心圆的缺陷分布,硅片中心少子寿命低;
- 16) 位错簇:多晶硅片中出现高密度、大面积的位错簇,形成强烈复合区,使电池电压及填充因子下降。

3.3 典型缺陷分析

3.3.1 边缘漏电

边缘漏电的测试特征包括:1) 电池 I-V 特性参数 I_{sc} 正常, V_{oc} 正常或略有降低, F_F 和 P_m 明显降低、串联电阻 R_s 略有增大, 并联电阻 R_{sh} 明显下降;2) 在红外热像测试中, 加压后电池边缘发热明显, 如图 3 所示。该缺陷是由于生产工艺不稳定或者操作不当, 导致边缘 p-n 结刻蚀不完全造成的。边缘漏电会明显降低电池的效率, 并容易导致电池边缘发热, 影响组件的寿命和安全性。该缺陷在本文实验中出现的频率为“较低”, 在生产中可以通过规范操作、改善设备稳定性等措施来预防。由于该类缺陷集中在电池边缘, 面积属于“较小/小”, 可通过激光隔离或划片切割等手段回收处理, 使电池的性能恢复到正常水平, 因此该类缺陷的回收价值属于“高”。

3.3.2 裂纹

电池片中的裂纹分为肉眼可见的显裂纹和不可见的微裂纹, 本文实验中只有个别电池样品出现显裂纹, 绝大多数裂纹为微裂纹。裂纹的主要测试特征包括:1) 在显微镜下观察可以看到宽度为微米级的裂痕;2) 在电致发光图像中裂纹呈现发暗的细线;3) 裂纹与电极交会处可能形成漏电, 在红外热像图中呈现热点, 部分热点会出现电极击穿变形现象, 如图 4(b) 所示。

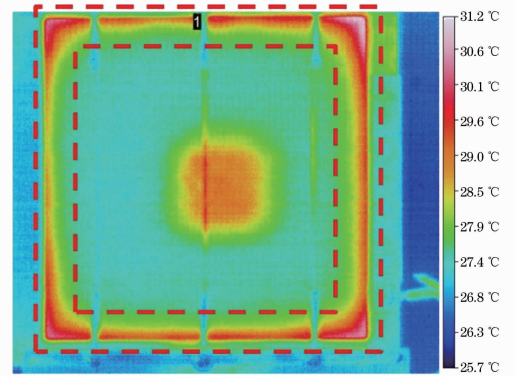


图 3 边缘漏电太阳电池的红外热像图
Fig. 3 IR thermal image of edge-leaking solar cell

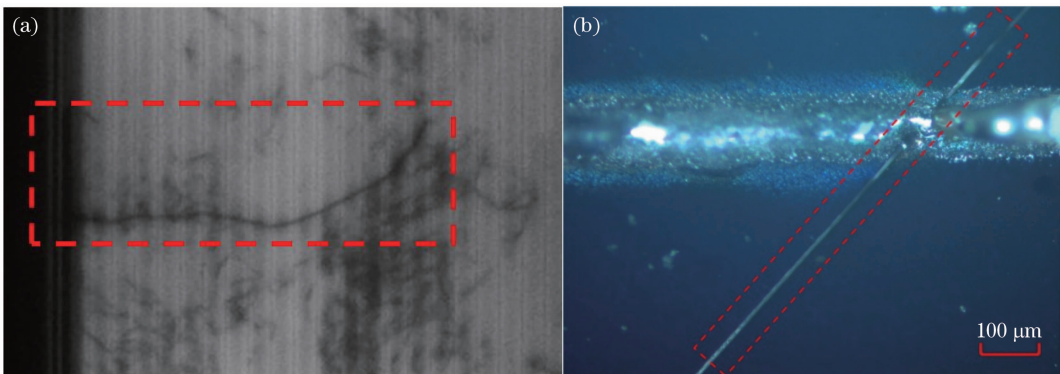


图 4 太阳电池微裂纹。(a) EL 图; (b) 显微镜图
Fig. 4 Microcrack in solar cell. (a) EL image; (b) microscope image

裂纹的成因比较复杂,从拉棒铸锭^[10]、切片到电池生产,各环节都有可能导致裂纹产生和扩大,其中最主要的是在高温处理环节产生的热应力以及工艺过程的震动、摩擦等产生的机械应力。裂纹导致的危害比较多,主要包括:1)使电池容易破碎,特别是在传送、焊接和组件层压环节;2)与金属电极交会处,容易烧穿、击穿,形成不同程度的漏电,使电池的I-V性能下降,漏电发热集中,温度高。因此在组件制作中一般都避免使用带有微裂纹的电池片。该类缺陷在本文实验中出现频率为“较高”级别,在生产中较难控制,可通过提高生产过程的平稳性来预防,包括在铸锭拉棒中平稳热场,改善切片机械应力,减少电池生产中的震动和碰撞等。裂纹出现的情况比较复杂,其长度在毫米至厘米量级不等,数量也不确定,缺陷面积多为“较小”级别。对于裂纹目前尚无处理的手段,但是对于裂纹与电极交会处造成的漏电缺陷,可通过激光隔离或化学腐蚀等方法进行处理,因此裂纹类缺陷的回收价值属于“较低”级别。

4 结 论

以大规模的电池测试和分析为基础,初步建立了针对晶体硅电池缺陷的检测体系,对晶体硅电池各类缺陷进行了归纳整理,初步形成了一套完整、高效、实用的分类评价体系。该体系主要的优点在于可以对缺陷电池片进行快速的缺陷识别和性能评价,在太阳电池生产线上可管控及查找生产问题,并对低效电池片进行分类回收,以充分利用其价值。

该体系目前已初步应用于低效电池和缺陷电池的处理,并在不断完善中。目前晶体硅太阳电池的生产技术和工艺正在持续改进,一些新结构的高效低成本电池,如选择性发射极、电镀电极、金属电极绕通(MWT)结构电池、全背极电池等,也逐渐进入量产。晶体硅电池的缺陷类型和出现频率也会随着电池技术工艺的变化而变化。今后的研究将持续跟踪,不断完善检测体系和分类体系,为太阳电池的生产提供更实用的参考。

参 考 文 献

- 1 《Photon International》(Chinese), Mar 2012, p132-161
- 2 Yan Tingting, Zhang Guangchun, Li Guohua *et al.*. Application of photoluminescence for the testing of defects in crystalline silicon based solar cells[J]. *Semiconductor Technology*, 2010, **35**(5): 454~457
严婷婷, 张光春, 李果华等. 光致发光技术在Si基太阳电池缺陷检测中的应用[J]. 半导体技术, 2010, **35**(5): 454~457
- 3 M. Langenkamp, O. Breitenstein. Classification of shunting mechanisms in crystalline silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2002, **72**(1-4): 433~440
- 4 O. Breitenstein, J. Bauer, J. P. Rakotoniaina. Material-induced shunts in multicrystalline silicon solar cells [J]. *Semiconductors*, 2007, **41**(4): 440~443
- 5 Takashi Fuyuki, Athapol Kitiyanan. Photographic diagnosis of crystalline silicon solar cells utilizing electroluminescence [J]. *Appl. Phys. A*, 2009, **96**(1): 189~196
- 6 Du-Ming Tsai, Shih-Chieh Wu, Wei-Chen Li. Defect detection of solar cells in electroluminescence images using Fourier image reconstruction[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2012, **99**: 250~262
- 7 K. Bothe, K. Ramspeck, D. Hinken *et al.*. Luminescence emission from forward- and reverse-biased multicrystalline silicon solar cells[J]. *J. Appl. Phys.*, 2009, **106**(10): 104510
- 8 O. Breitenstein, J. P. Rakotoniaina, M. Kaes *et al.*. Lock-in thermography: a universal tool for local analysis of solar cells [C]. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2005. 590~593
- 9 T. Trupke, B. Mitchell, J. W. Weber *et al.*. Photoluminescence imaging for photovoltaic applications [J]. *Energy Procedia*, 2012, **15**: 135~146
- 10 Robert O. Ritchie. Failure of silicon: crack formation and propagation [C]. 13th Workshop on Crystalline Solar Cell Materials and Processes, 2003