

doi:10.3788/gzxb20164509.0912004

晶硅太阳能电池原位光老化及热致输运机理

叶金晶^{1,2}, 周健¹, 卞洁玉^{1,2}, 孙谦晨^{1,2}

(1 中国科学院上海微系统与信息技术研究所, 上海 200050)

(2 中国科学院大学, 北京 100039)

摘 要:为研究晶体硅太阳能电池在标准模拟光条件下的输出特性变化规律和电池内部载流子输运特性, 采用原位光老化技术对被测电池进行光照处理, 按标准测试实验流程测量电池的伏安特性及光谱响应等参量, 发现原位光老化后太阳能电池伏安特性各项参量衰减, 导致电池效率降低; 短波段光谱响应微量下降, 是由于原位光老化过程中电池表面产生极微量的面缺陷导致经过硅表面的微量载流子被复合; 而长波段响应明显降低, 是由于晶硅内大量体缺陷被激活导致长波载流子在经过硅材料内部时被复合. 随后将光老化后电池退火并测量比对电池各项特性参量, 结果表明, 退火对光老化后电池内部深层体缺陷具有较好的修复功能, 但对浅层面缺陷没有修复功能, 最终造成电池伏安特性参量和光谱响应只得到部分恢复.

关键词:原位光老化; 退火; 光学检测; 太阳能电池; 光谱响应; 伏安特性

中图分类号: TM914.41

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)09-0912004-6

Light Soaking in Situ and Thermally Induced Transport Mechanism of Crystalline Silicon Solar Cell

YE Jin-jing^{1,2}, ZHOU Jian¹, BIAN Jie-yu^{1,2}, SUN Qian-chen^{1,2}

(1 Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China)

(2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: In order to investigate the output variation of the silicon solar cell under the solar simulator and its internal carrier transport properties, light soaking in situ of crystalline silicon solar cell technology was conducted before the standard test which measures the cell's current-voltage characteristics, spectral response and other parameters. The results show that the attenuation of current-voltage characteristics results in reduced efficiency. The short wavelength spectral response of solar cell is decreased slightly after light soaking in situ. The reason is that the surface of the cell generates a very small amount of defect during the light soaking process which leads to slight decrease of the carrier recombination. The significant decrease of the spectral response during the long wavelength is due to a large number of the bulk defects being activated, which results in the long-wave carrier recombination when it passes through the silicon. The solar cell was then annealed and tested after light soaking. The results show that annealing has a good effect on the recovery of bulk defect deep inside the cell. There is a partial recovery of bulk defects after annealing while the surface defects are not recovered, which leads to the incomplete recovery of current-voltage characteristics and spectral response.

Key words: Light soaking in situ; Annealing; Optical inspection; Solar cell; Spectral response; Current-voltage characteristics

OCIS Codes: 120.4630; 120.4800; 160.4760; 130.0250

基金项目:中国科学院院地合作项目(No. YDJDBNJ-2012-027)、上海市自然科学基金(No. 13ZR1447400)和上海张江国家自主创新示范区专项发展资金重大项目(No. ZJ2015-ZD-001)资助

第一作者:叶金晶(1992-),女,硕士研究生,主要研究方向为太阳能电池标准测试技术. Email: yejj@mail.sim.ac.cn

导师(通讯作者):周健(1970-),男,研究员,博士,主要研究方向为半导体材料与器件设计与工艺、太阳能电池标准测试技术. Email: zjian@mail.sim.ac.cn

收稿日期:2016-03-15; **录用日期:**2016-05-13

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

太阳电池的精确测量对于评价太阳电池的效率和实际发电量具有重要价值^[1]. 与其相关的光热导致的内部输运机制有助于解释光热致电池效率和电量改变的内在机制,成为研究热点^[2-4].

自1973年Fisher初次提出硅太阳电池存在光老化现象以来^[5],研究者们对光老化问题开展了大量的研究与探讨,但大多数实验仍依赖传统紫外加速光老化技术设备,在常温下采用紫外波段对电池进行照射^[6],也有在高温及强光下进行光老化处理的实验,如Schutz-Kuchly和Dubois等在2-SUN、50℃下对电池进行光老化处理^[7],以加速电池老化,研究光老化带来的最坏影响.对于光伏组件的光老化一般在环境温度下采用自然光照射,无法完全掌控光照强度和温度^[2].目前,国内外常规太阳电池及组件从出厂到实际安装使用,往往要经过多次测量,每次测量都会对太阳电池的内部产生影响,导致其效率和输出功率产生变化.由于这种变化比较细微,往往被忽视.原位光老化是指在室内标准测试所用的模拟光照条件(1-SUN, 25℃)下多次测量所导致的电池效率的衰减.本文采用晶体硅太阳电池原位光老化技术,在电池测试台上,标准条件下进行光老化,获得其多次测试(老化)过程中电池的开路电压、短路电流变化规律,随后对光老化后电池进行退火,研究光热对电池内部载流子输运特性的影响.

1 实验

实验主要由标准测试、光照老化、退火三个部分组成.其中最为重要的是标准测试,这部分需要测量太阳能电池的伏安(*I-V*)曲线、效率(Efficiency)、填充因子(Fill Factor, FF)、光谱响应(Spectral Response, SR)等特性参量,以供理论分析.

实验测试方法采用太阳模拟器法,*I-V*测试所用太阳模拟器为日本山下公司生产的YSS-160AA型,SR测试所用的分光响应测试仪为日本分光公司生产的CEP-25ML型设备.

1.1 实验条件准备

在已实用化的太阳电池中,晶体硅电池一直处于主导地位,本文所选被测样品为产品线上同批次同工艺生产的156 mm×156 mm P型单晶硅太阳能电池片,共计10片,选取了其中具有代表性的1片电池.电池片有效面积通过日本Mitutoyo测量显微镜测量,取3次测量平均值.三次测量值分别为239.099, 239.135, 239.087 cm²,平均值为239.107 cm².

实验在恒温恒湿测试间进行,环境温度为25±1℃,湿度为50±5%.在进行电池片初始值测量前,需要将设备进行预热,一般为30 min,以确保模拟

光源处于稳定的最佳工作状态.然后用经校准过的标准电池AIST AK-200对光源进行校准,确保光源满足标准测试光照条件AM1.5G, 1 000 W/m².

1.2 *I-V*、SR测试及原位光老化步骤

为研究单晶硅太阳能电池在光照前后特性参量的变化,对所选取的单晶硅样片的测量贯穿光照始终.在进行光照老化前,先分别对样片进行有光照*I-V*和无光照*I-V*测量,获取样片的初始数据,有光照的*I-V*测量均在1-SUN, 25℃下进行.

SR的测量同样在标准测试环境中进行,只是将样片置于暗箱中,测量样片在300~1 200 nm波段内的光谱响应.

原位光老化使用标准测试所用的模拟光源,在标准测试台上进行,周围环境条件均为标准测试条件.预定光照8 h,分为8次进行,每次光照1 h后,测量样片*I-V*特性1次,后让样片冷却10 min,以排除光照造成的升温影响,再进行有光照*I-V*测试,如此反复测量8次.在完成8 h光照后,等样片冷却后再进行一次SR测试及无光照*I-V*测试.

1.3 退火方案

将单晶硅进行退火处理,可以使其恢复到光照老化前的状态.1973年Fischer等在200℃下退火处理光老化过的电池片,9 h后该电池片参量均有所回升^[3],之后有实验将光照老化后的电池片在450℃下进行30 h的退火处理后发现电池片缺陷减少^[8],后来研究人员采用较短的退火时间也能起到参量恢复的作用^[9],在效果相同的情况下,实验选择在黑暗条件200℃下退火30 min,待样片完全冷却后再对其进行SR、*I-V*测试.

2 测量结果与讨论

2.1 原位光老化对电池*I-V*特性的影响

*I-V*测试主要分为两种情况,一种是在1-SUN, 25℃等的标准测试条件下,对样片进行光照下电流、电压的测量,同时可以得到效率、填充因子等参量;另一种是在无光条件下,在与有光照相同的测试平台上进行暗电流的测量.在太阳电池标准测试中,*I-V*测试一般指有光照的情况,本文后续出现的*I-V*测试均指有光照的情形.

*I-V*测试在原位光老化前进行1次,每老化1 h后进行1次测量.由于在模拟标准光源下长时间照射,电池样片及测试基台温度会有所增加,虽然测试基台有水冷控温装置,但为避免基台温升对电池的微弱温度影响(温度对于电池片的开路电压和短路电流均有影响),在光照后需冷却10 min,待电池样片温度降至25℃时方可进行*I-V*测试.原位光老化8 h,循环测试8次,最终共进行9次*I-V*测试,原位光老化8 h前后的

I - V 测试结果如图 1, 经过 8 h 标准测试光强的光照老化, I - V 曲线有明显衰减, 开路电压 V_{oc} 明显减小, 从 0.636 V 下降到 0.626 V, 功率也相应降低, 从 4.451 W 下降到 4.087 W.

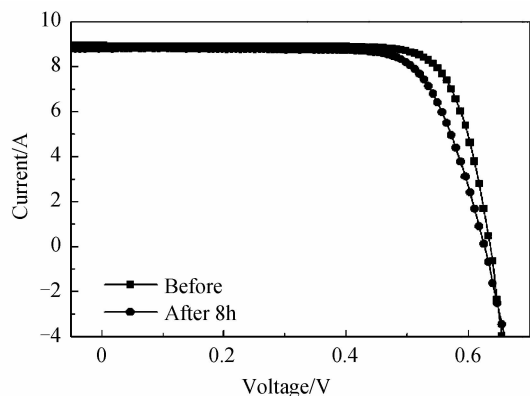
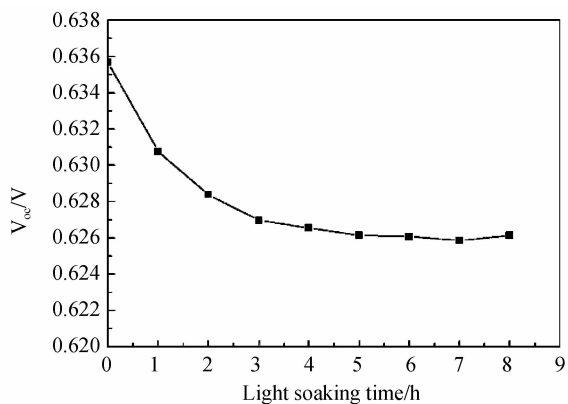
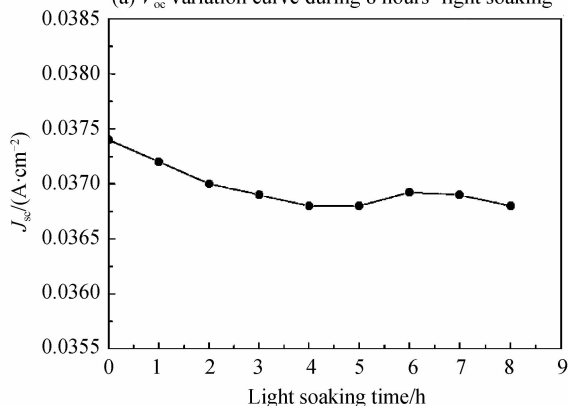


图 1 样片电池光老化 8 h 前后的 I - V 测试曲线
Fig.1 Sample cell's I - V curves before light soaking and after 8 h' light soaking

原位光老化 8 h 内每隔 1 h 测得的单晶硅电池样片主要特性参量变化曲线如图 2, 每组数据有 9 个点, 各个参量基本都呈衰减趋势. 图 2(a) 为开路电压 V_{oc} 的变化曲线, 在光照老化初期, V_{oc} 衰减明显, 随着光照时间的增加, 衰减逐渐趋于平稳. 在 5~8 h 范围内,



(a) V_{oc} variation curve during 8 hours' light soaking



(b) J_{sc} variation curve during 8 hours' light soaking

图 2 开路电压 V_{oc} 及短路电流密度 J_{sc} 在原位光老化 8 h 内变化曲线
Fig.2 V_{oc} and J_{sc} svariation curves during 8 h' light soaking

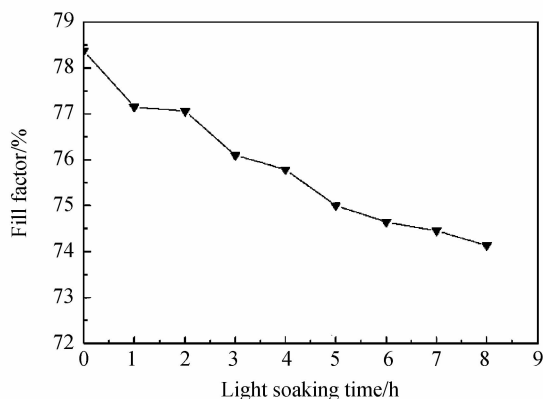
V_{oc} 波动幅度极小, 相对衰减率仅为 0.003%, 经过 8 h 光照老化, 样品 V_{oc} 总衰减率为 1.504%, 与 Fischer 等利用传统光老化设备所得到的趋势近似^[3].

图 2(b) 为短路电流密度 J_{sc} 在原位光老化 8 h 过程中的变化曲线, 与 V_{oc} 相同, 在光照初期 J_{sc} 的衰减情况较为明显, 但 5~8 h 内 J_{sc} 仍有少许波动, 8 h 光照老化后总的 J_{sc} 衰减率为 1.427%.

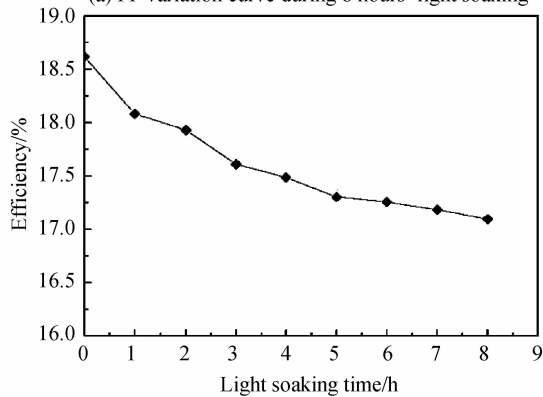
图 2 中衰减随光老化时长由明显转为平缓, 是由于电池片在制造过程中所带的杂质硼和氧, 形成类似由 Voronkov 提出的 B_iO_x 模型的结构^[10], 在经过光照后, 光子所带的能量已基本将这些缺陷态逐一激活, 发生体复合, 形成硼氧复合体等缺陷, 因此在光照初期会出现明显的衰减趋势, 而随着原位光老化实验的持续, 电池片所带有的缺陷基本都被激活, 在衰减趋势上也慢慢变得平缓.

随光照时间的增加, 填充因子、电池效率均呈下降趋势, 各曲线均在光照初期衰减明显, 后期衰减程度减小.

综合图 1~3 可知, 单晶硅电池的衰减老化主要发生在光照老化初期, 随着光照时间的增加逐渐平缓, 最终趋于稳定, 但是效率以及填充因子在当前实验中并未达到稳定的状态, 由此推测, 要让两个参量基本稳



(a) FF variation curve during 8 hours' light soaking



(b) Efficiency variation curve during 8 hours' light soaking

图 3 填充因子及电池效率在原位光老化 8 h 内变化曲线
Fig.3 FF and Efficiency's variation curves during 8 h' light soaking

定,需要更长时间的光照。

填充因子下降的原因一般被认为是串联电阻 R_s 增大或并联电阻 R_{SH} 减小,当光照较强(达到 1-SUN)时,二极管电流远大于漏电流,此时 R_{SH} 对太阳能电池的影响较小,而 R_s 的影响就变得明显^[11]。

当有串联电阻存在时,填充因子 FF 的近似表达式可写为 $FF = FF_0 (1 - R_s/R_{CH})$ ^[12],其中 R 为 R_{CH} 太阳能电池特征电阻, $R_{CH} = V_{OC}/I_{SC}$, R_s 对填充因子影响的大小可以通过它与 R_{CH} 进行比较而决定,此处 R_s/R_{CH} 为定义的归一化电阻, FF_0 是无寄生电阻时的理想填充因子

$$FF_0 = \frac{V_{OC} - \ln(V_{OC} + 0.72)}{V_{OC} + 1} \quad (1)$$

由式(1)可知,填充因子 FF 与串联电阻 R_s 呈负相关,在本实验中也得到了验证,如图 4,将 FF 值的曲线坐标轴刻度逆序显示,经过坐标处理后的 FF 曲线与 R_s 曲线基本拟合,说明光老化过程中 FF 与串联电阻 R_s 负相关,FF 衰减可以认为主要由 R_s 增加造成,而与 R_{SH} 没有直接关联。

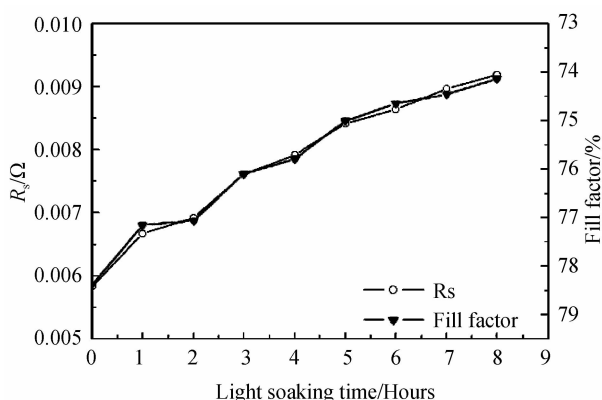


图 4 光老化 8 h 内 R_s 与 FF 的拟合情况

Fig. 4 The curve fitting between R_s and FF during light soaking during 8 h' light soaking

因此,太阳能电池效率的衰减与 V_{OC} 、 J_{SC} 及 FF 值在原位光老化过程中的下降有关,而 FF 的下降与 R_s 的增大相关联, R_s 的上升与太阳能电池表面和体内载流子浓度下降有关,原因是表面和体内的硼氧复合体等缺陷使运动载流子产生复合,从而导致 J_{SC} 的下降, V_{OC} 代表太阳能电池模型中 PN 结两端电势差,在理想情况下,有

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (2)$$

式中, I_0 是二极管饱和电流, I_L 是光生电流,由于 I_0 决定 V_{OC} ,即

$$I_0 = A \left(\frac{qD_e n_i^2}{L_e N_A} + \frac{qD_h n_i^2}{L_h N_D} \right) \quad (3)$$

式中 A 是二极管的横截面积, D_e 、 D_h 分别为电子扩散常量和空穴扩散常量, L_e 、 L_h 分别为电子扩散长度和

空穴扩散长度, N_A 为受主浓度, N_D 为施主浓度,因而 V_{OC} 大小取决于半导体的性质,其中影响最大的参量是本征载流子浓度的平方 n_i^2 ,即

$$n_i^2 = N_C N_V \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) \quad (4)$$

式中, N_C 指导带内有效态密度, N_V 价带内有效态密度,两者皆为常量,式(2)~(4)表明 V_{OC} 与电池能带带隙 E_g 有关^[12], V_{OC} 随光老化时间增长而降低的原因,可以解释为光老化导致 E_g 减小,二极管饱和电流 I_0 增大,从而 V_{OC} 下降. Bhushan Sopori 等通过测量比较电池片暗电流的实验也从另一方面证实了光老化会使电池表面产生缺陷^[13],使电池的 I-V 特性衰减。

2.2 退火对太阳能电池性能可恢复性的研究

光老化造成的影响可以通过退火来恢复^[3,8-9],此处选择恒温烘箱设置温度 200℃,退火 30 min. 退火完成后,待电池完全冷却,再进行 I-V 相关测试,测得的 I-V 曲线如图 5,单从图线上可以看出经过退火处理之后电池片特性有所恢复,但并没有完全恢复至光照前的状态。

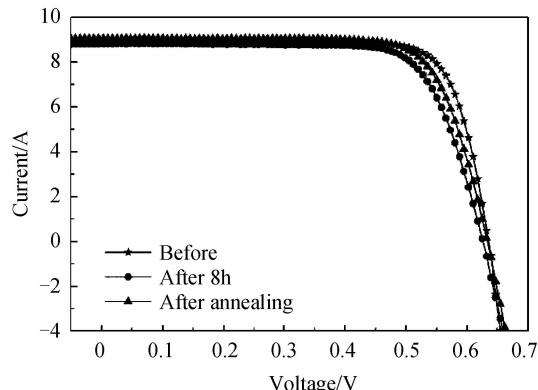


图 5 样片电池光照前后及退火后的 I-V 曲线

Fig. 5 Sample cell's I-V curves before, after light soaking and after annealing

该单晶硅太阳能电池样片光老化前后以及退火后的具体特性参量见表 1. 光老化前后,单晶硅太阳能电池样片除了串联电阻 R_s 外各参量衰减明显, V_{OC} 总衰减率为 1.504%, J_{SC} 总衰减率为 1.427%, 填充因子 FF 总衰减率为 5.418%, 效率 η_{eff} 总衰减率为 8.170%, 此处总衰减率由光老化前后数值之差除以光老化前数值求百分比得到. 在经过退火处理之后, V_{OC} 和 J_{SC} 基本恢复,但是填充因子 FF 在退火后只略有增加,距离原本数值仍有较大差距,其衰减率依然有 4.417%. FF 值在热退火之后仍难以恢复是因为 FF 与串联电阻 R_s 呈负相关,而退火处理并不能使 R_s 降至初始值. 从器件物理的角度来看,电池表面质量以及 PN 结区内载流子运输机制也与 FF 值有关^[14]。

由于无法直接对电池片进行载流子寿命的测量,此处借助参比陪伴硅片在光老化及退火处理后的现象

推测单晶硅电池片中载流子寿命,经过退火处理的硅片载流子寿命明显高于未经退火处理的光老化硅片,且恢复并不完全.退火使光老化硅片的载流子寿命部分恢复的现象与 Prakash Basnyat^[9]、Bianca Lim^[15]的实验结果一致.此现象表明退火对载流子寿命有影响,而载流子浓度与单晶硅电池片体或表面复合机制有关,由于光老化造成的体缺陷在退火处理后的特性与 B_2O_3 相似^[16],退火消除了光老化造成的复合体及缺陷,使电池片载流子寿命激活,可以认为是热导致的对体缺陷的部分修复,这与 2.1 节中原位光老化会产生硼氧复合体的结论一致,也说明退火只能修复部分体缺陷,对表面缺陷没有修复作用,这也进一步说明了 FF 难以恢复的原因.

表 1 单晶硅太阳能电池样片光老化前后以及退火后的具体特性参量

Table 1 Specific parameters of monocrystalline silicon solar cell sample before and after light soaking and after annealing

	Beforelight soaking	After light soaking	After annealing
$J_{sc}/(A \cdot cm^{-2})$	0.0374	0.0368	0.0379
I_{sc}/A	8.9333	8.8058	9.0559
V_{oc}/V	0.6357	0.6261	0.6338
P_{MAX}/W	4.4510	4.0874	4.3002
FF/%	78.3805	74.1337	74.9184
$\eta_{eff}/\%$	18.6156	17.0948	17.9851
R_s/Ω	0.0058	0.0092	0.0083

2.3 原位光老化和退火对光谱响应的影响

光谱响应的测量同样在标准测试环境中进行,由于单色光光斑较小,为正方形光斑,因此每次测试尽量都选在样片电池的同位置,为方便测算光照面积,用镂空面积为 $2 \times 2 = 4 \text{ cm}^2$ 的黑色遮光布(Mask)遮挡后确保光照面积为 4 cm^2 . 光谱响应与外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)可以通过计算相互转化,通过光谱响应测试可以同时得到 SR 曲线以及 EQE 曲线^[17].

图 6 显示了光老化前、光老化后、退火后光谱响应随波长的变化关系,图 7 为样片光老化前、光老化后、退火后 EQE 随波长的变化关系.前表面复合主要影响电池的短波响应,体复合与背表面复合主要影响电池的长波响应^[18].结合图 6、7 两组曲线可见,300~350 nm 的紫外波段,光老化对晶体硅太阳能电池光谱响应有一定的降低作用,而后期退火进一步降低了光谱响应;350~820 nm 的可见光和部分近红外波长范围内,光老化对晶体硅太阳能电池光谱响应有明显的降低作用,而后期退火对光谱响应几乎没有影响;820~1200 nm 波长范围内,光老化使得光谱响应明显降低,但后期退火使得该波段的光谱响应几乎恢复至未老化前的状态,但仍略小于光照老化前的响应.可能的原因

是,光老化过程中电池面产生极微量的面缺陷,同时体内大量体缺陷被激活,从而导致载流子经过时被复合^[19].光谱响应降低导致 J_{sc} 下降,这与图 2(b)呈现结果一致.而退火对于电池内部深层体缺陷具有较好的修复功能^[20],使一些复合体恢复至光老化前的状态,但它对浅表面缺陷没有修复功能,甚至进一步降低了光谱响应,恶化电池面缺陷.

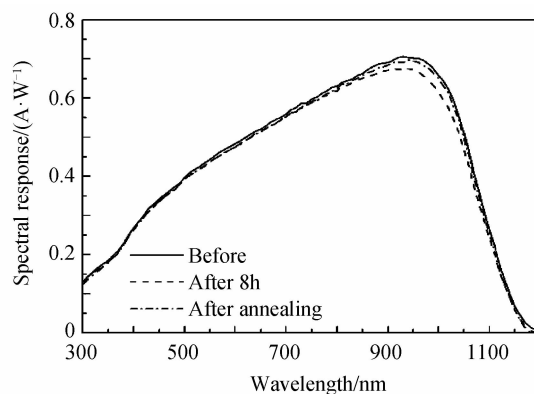


图 6 样片电池光照前后及退火后的 SR 曲线

Fig. 6 Sample cell's spectral response curves before, after light soaking and after annealing

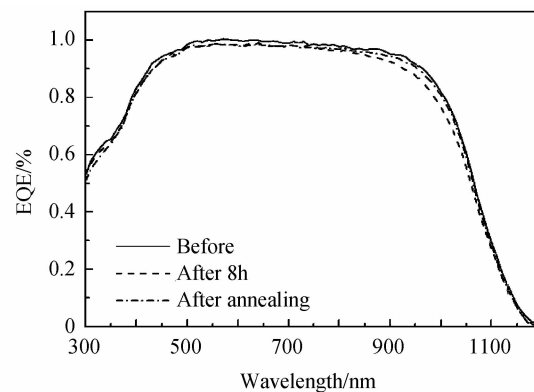


图 7 样片电池光照前后及退火后的 EQE 曲线

Fig. 7 Sample cell's EQE curves before, after light soaking and after annealing

3 结论

原位光老化可以真实反映电池在多次测量中的累积效应,通过分析原位光老化和退火试验测量发现,在 I-V 特性方面, V_{oc} 、 J_{sc} 、FF、 η_{eff} 在光老化初期衰减明显,其中 V_{oc} 在之后的老化过程中逐渐趋于稳定,而 J_{sc} 仍旧有小幅波动;FF 和 η_{eff} 在时长为 8 h 的原位光老化实验中尚未趋于稳定,后期衰减程度减小,由此推测,要让两个参量基本稳定,需要更长时间的光照.原位光老化过程中,电池表面和体内的缺陷使运动载流子产生复合,导致 J_{sc} 下降,能带带隙 E_g 的减小导致 V_{oc} 下降,FF 减小主要是源自 R_s 的增大,这几个参量的下降最终导致了电池效率 η_{eff} 的降低.在光谱响应方面,300~350 nm 的紫外波段,光老化对晶体硅太阳电

池光谱响应有一定的降低作用;350~1 200 nm 的可见光和部分近红外波长范围内,光老化对晶体硅太阳能电池光谱响应有明显的降低作用.同样地,电池片经过原位光老化后,其 EQE 也呈现与光谱响应相同的衰减情形.原因是原位光老化过程中电池表面产生极微小的面缺陷,该缺陷导致经过硅表面的微量载流子被复合,从而短波光谱响应微量下降,同时体内大量体缺陷被激活,导致长波载流子在经过硅材料内部时被复合,影响可见光和红外波段的光谱响应.后期退火实验表明,在紫外波段,后期退火进一步降低了光谱响应;在可见光波段,后期退火对光谱响应几乎没有影响;在红外波段,后期退火使得该波段的光谱响应几乎恢复到未老化前的状态,但仍略小于光照老化前的响应.表明退火对于电池内部深层体缺陷具有较好的修复功能,使一些体缺陷修复至光老化前的状态,而它对浅层面的缺陷没有修复功能,对面缺陷具有恶化作用,无法使 V_{oc} 、 J_{sc} 、FF、 η_{eff} 恢复到初始水平.

参考文献

- [1] SUN Hao. Research on calibration methods of solar cells and related testing equipments[D]. Hangzhou: National Institute of Metrology, 2010.
孙皓. 太阳能电池及相关测试设备的计量方法研究[D]. 杭州: 中国计量科学研究院, 2010.
- [2] ZHOU Jian, LI Hong-fei, LIU Yu-cheng, *et al.* A comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic module under natural environment[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(9): 1077-1082.
周健, 李红飞, 刘毓成, 等. 基于改进型双二级管模型的户外模组电量预测技术研究[J]. 光子学报, 2013, **42**(9): 1077-1082.
- [3] SCHMIDT J, HEZEL R. Light-induced degradation in CZ silicon solar cells: fundamental understanding and strategies for its avoidance[C]. 12th Workshop on Crystalline Silicon Solar Cell Materials and Processes, Breckenridge: 2002.
- [4] LI Xiu-jie, HAN Pei-de, YANG Yi-biao, *et al.* Reflector of solar cells based on photonic crystal heterostructures[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(10): 1786-1789.
李秀杰, 韩培德, 杨毅彪, 等. 基于光子晶体异质结的高效太阳能电池反射器研究[J]. 光子学报, 2010, **39**(10): 1786-1789.
- [5] FISCHER H, PSCHUNDER W. Investigation of photon and thermal induced changes in silicon solar cells[C]. Proceedings of the 10th IEEE PVSC, New York, 1973: 404-411.
- [6] SCHMIDT J, CUEVAS A, REIN S, *et al.* Impact of light-induced recombination centres on the current-voltage characteristic of Czochralski silicon solar cells[J]. *Progress in Photovoltaics Research and Applications*, 2001, **9**(4): 249-255.
- [7] SCHUTZ-KUCHLY T, DUBOIS S, VEIRMAN J, *et al.* Light-induced degradation in compensated n-type Czochralski silicon solar cells[J]. *Physica Status Solidi*, 2011, **208**(3): 572-575.
- [8] BOTHE K, SCHMIDT J, HEZEL R. Effective reduction of the metastable defect concentration in boron-doped Czochralski silicon for solar cells[C]. Photovoltaic Specialists Conference Record of the 29th IEEE, 2002: 194-197.
- [9] BASNYAT P, SOPORI B, DEVAYAJANAM S, *et al.* Experimental study to separate surface and bulk contributions of light-induced degradation in crystalline silicon solar cells[J]. *Emerging Materials Research*, 2015, **4**(2): 239-246.
- [10] VORONKOV V, FALSTER R. Latent complexes of interstitial boron and oxygen dimers as a reason for degradation of silicon-based solar cells[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **107**(5): 053509.
- [11] REN Ju, GUO Wen-ge, ZHENG Jian-bang *et al.* Analysis and simulation of solar cells' V-A properties based on P-N junction[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(2): 171-175.
任驹, 郭文阁, 郑建邦. 基于 P-N 结的太阳能电池伏安特性的分析与模拟[J]. 光子学报, 2006, **35**(2): 171-175.
- [12] GREEN M A. Silicon solar cells: advanced principles & practice[M]. Sydney, N. S. W., Australia: Centre for Photovoltaic Devices and Systems, 1995.
- [13] SOPORI B, BASNYAT P, DEVAYAJANAM S, *et al.* Understanding light-induced degradation of c-Si solar cells [C]. Photovoltaic Specialists Conference Record of the 38th IEEE, 2012.
- [14] PENG Xiao-jing, XU Lin, LIU Feng, *et al.* Study the effects of spectrum and solar cell parameter on fill factor[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2009, **30**(7): 878-882.
彭小静, 徐林, 刘锋, 等. 光谱及太阳能电池各参量与填充因子之关系[J]. 太阳能学报, 2009, **30**(7): 878-882.
- [15] LIM B, ROUGIEUX F, MACDONALD D, *et al.* Generation and annihilation of boron-oxygen-related recombination centers in compensated p-and n-type silicon[J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(10): 103722-103722-9.
- [16] MEEMONGKOLKIAT V. Development of high efficiency monocrystalline Si solar cells through improved optical and electrical confinement[J]. *Dissertations & Theses - Gradworks*, 2008.
- [17] ZHOU Jian, BIAN Jie-yu, LI Hong-fei, *et al.* Standard measurement of crystal silicon solar cells[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(6): 1517-1523.
周健, 卞洁玉, 李红飞, 等. 晶体硅光伏电池的标准测试[J]. 光学精密工程, 2014, **22**(6): 1517-1523.
- [18] 熊绍珍. 太阳能电池基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 105-106.
- [19] LAN D, GREEN M A. Extended spectral response analysis of conventional and front surface field solar cells[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, **134**(134): 346-350.
- [20] SAAD M, KASSIS A. Effect of interface recombination on solar cell parameters[J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2003, **79**(4): 507-517.

Foundation item: The Knowledge Innovation Project of the Chinese Academy of Sciences (No. KG CX2-YW-399 + 1). Knowledge Innovation Program of the Chinese Academy of Sciences (No. YDJDBNJ-2012-027), and Major Special Project of Shanghai Zhangjiang National Innovation Demonstration Zone Development Fund (No. ZJ2015-ZD-001)