文章编号:1007 - 4252(2022)03 - 0003 - 253 DOI:10.20027/j.gncq.2022.0019

硅异质结太阳电池光注入性能增益分析

余友林[1,2,3],韩安军[1],刘文柱[1],刘正新[1,2,3,*]

(1. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所,上海 200000;2. 中国科学院大学 材料与光电研究中心,北京 100049;3. 上海科技大学 物质科学与技术学院,上海 201210)

摘要: 通过对硅异质结太阳电池进行正背面交替光注入,发现在一个太阳标准光强度照射条件下单独正面或背面光注入都不能使转换效率的增益达到饱和,正面和背面两次不同入光面方向光注入后转换效率增益达到饱和,增益幅度约 0.4%。光注入所产生的增益效果在 100 ℃暗态退火下基本消退,证明光注入产生的增益效果的稳定性较差,退火后再次光注入后转换效率得到恢复,说明光注入产生的效率增益和退火产生的效率衰退是一个可逆的物理过程。高强度白光和红外光光注入都可使硅异质结太阳电池在单面光注入条件下快速达到饱和,转换效率增益幅度与正背面交替光注入相同。红外光光注入与白光光注入具有相同的注入效果。

关键词: 硅异质结太阳电池;光注入;白光光注入;红外光光注入;暗态退火

中图分类号: TM914.4+1 **文献标识码:** A

Performance Gain analysis of Silicon Heterojunction Solar Cells by Light Injection

YU You-lin[1,2,3], HAN An-jun[1], LIU Wen-zhu[1], LIU Zheng-xin[1,2,3,*]

(1. Shanghai Institute of Microsystems and Information Technology of the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200000, China; 2. Research Center for Materials and Optoelectronics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. School of Physical Science and Technology, Shanghai Tech University, Shanghai 201210, China)

Abstract: Through the alternating light injection for silicon heterojunction (SHJ) solar cells at front and rear surfaces, it is found that the single-side light injection under 1-Sun cannot saturate the efficiency gain, it can be saturated after two-step light injections from both front and rear sides, the efficiency gain was about 0.4%. The efficiency gain was degraded to the initial level after dark annealing at 100 ℃, which proves that the efficiency gain contributed by light injection was not stable. The efficiency gain can be recovered by repeated light injection. In order to find a more efficient and convenient light injection

收稿日期: 2022-02-23; **修订日期:** 2022-03-09

基金项目: 上海市"科技创新行动计划"项目(19DZ1207602; 20DZ1207103);国家自然科学基金青年项目(62004208);上海市自然科学基金面上项目(22ZR1473200).

作者简介: 余友林(1992-),男,硕士研究生,主要研究方向为太阳电池衰减测试(E-mail: yuyl@mail.sim.ac.cn).

通信作者: 刘正新,男,博士,研究员,主要研究方向为太阳电池(E-mail: z.x.liu@mail.sim.ac.cn).

method for production line, light injection with high-intensity white light source and near infrared light source was performed for comparison. The results showed that the efficiency gain can be saturated by high-intensity single-sided light injection in a very short time of 30 s, where the efficiency gain is the same as that of alternating double sides light injection. An infrared light source has the same effect for light injection compared with white light source.

Key words: Silicon heterojunction solar cell; Light injection; White light injection; Near-infrared light injection; Dark annealing

0 引言

太阳电池的衰减是光伏领域的研究热点，由于太阳电池在户外正常发电的过程中转化效率会呈现缓慢下降的趋势，不同类型的太阳电池衰减特性不一致，准确评价太阳电池的衰减、探究内部衰减机制是提高发电量的有效途径之一。Schmidt 等人[1]首次提出 P 型晶体硅太阳电池在户外实际发电过程中会出现衰减现象，且此衰减现象与电池内部的 B-O(硼-氧)复合对相关[2]。当研究人员试图通过使用 N 型晶体硅衬底来规避由 B-O 复合对造成的衰减时[3]，Fraunhofer ISE 的 Tim Niewelt 等人[4]发现 N 型太阳电池依然存在光致衰减现象。而随着各种新型高效太阳电池研发的深入，对太阳电池衰减和可靠性研究提出了新的要求。硅异质结(Silicon heterojunction, SHJ)太阳电池作为一种高效太阳电池在受到广泛应用的同时其衰减特性也受到了极大关注。目前对于 SHJ 太阳电池的光注入特性研究较多，主要原因是其在光注入后会出现与普通晶体硅太阳电池及非晶硅薄膜电池截然相反的性能变化趋势[5]。光注入后 SHJ 太阳电池会出现效率上升的现象，但产生增益的内部机理还需要进一步的研究。Koboyashi 等人[6]发现在 30 °C 条件下，SHJ 太阳电池光注入后转换效率的绝对增益为 0.3%，该研究团队将此增益归因于 SHJ 太阳电池晶体硅-非晶硅界面钝化的改善导致的开路电压和填充因子的增加。同时该团队发现对 SHJ 太阳电池施加正向偏压(无光照射)，载流子注入同样能观察到类似的增益现象。

该论文主要探究多次不同入光方向的光注入对于 SHJ 太阳电池增益效应的影响，暗态退火对光注入增益的消退效果证实电池光注入增益效应的不稳定性，通过分析比较多种光注入方式，确定短时间高强度红外光光注入是一种高效便捷的 SHJ 太阳电池光注入方式。

1 实验方法

1.1 SHJ 太阳电池在 1-Sun 标准辐照度条件下的光注入

本文中所使用的实验样品均为 SHJ 太阳电池，电池衬底为 n 型单晶硅片，在经过清洗制绒的 n 型 CZ c-Si 衬底一面依次沉积厚度为 5 ~ 10 nm 的本征非晶硅 a-Si: H 薄膜(i-a-Si: H)和 p 型非晶硅 a-Si: H 薄膜(p-a-Si: H)叠层，从而形成 p-n 异质结。接着在衬底另一面依次沉积厚度为 5 ~ 10 nm 的本征非晶硅 i-a-Si: H 薄膜和 n 型非晶硅 a-Si: H 薄膜(n-a-Si: H)叠层形成窗口层，在两侧掺杂 a-Si: H 薄膜上沉积透明导电氧化物薄膜(TCO)，最后通过丝网印刷技术在两侧顶层形成金属电极，经过 200 ℃固化，制备成具有对称结构的 SHJ 太阳电池。SHJ 太阳电池结构示意图如图 1(a)所示，实验中所制备电池大小为 15.6 cm×15.6 cm，以 n 型 a-Si: H 薄膜窗口层方向为电池正面。

实验过程中电池置于 KOPEL 测试台上，通过与测试台结合的一体式水冷维持光注入时和 STC (Standard Test Condition)测试时电池的温度稳定，测试台的温度设定为 25 ℃。光注入所使用光源为 Yamashita 的 AAA 级稳态光源模拟器，光照强度为一个标准太阳(1-Sun, 100 mW/cm^2)。电池的转换效率通过 ADCMT 6246 电子负载在 STC 标准条件下(1-Sun, 25 ℃)对实验样品进行电流-电压(I-V)特性曲线测试获得。光注入时电池的实际温度在 28 ~ 30 ℃范围内，停止光照后等待实验样品温度恢复到 25 ℃后进行 I-V 测试。为了降低测试时中断光注入对电池效率变化的影响并缩短测试周期，本实验中只在光注入始末进行 STC 条件下的 I-V 曲线测试，而在其他时间段内间隔性地进行 I-V 曲线扫描，监测 SHJ 太阳电池效率是否达到饱和。I-V

曲线特征参数变化的计算方法如式(1)，其中 Ψ 为特征参数(如填充因子 FF、短路电流 I_{SC}、开路电压 V_{OC} 等)，t 为光注入时间。

$$\Delta\Psi=\Psi(t_2)-\Psi(t_1) \tag{1}$$

SHJ 太阳电池进行光注入时垂直入射至表面，电池均处于开路状态。为了使光注入的增益达到最大化，分别从电池的正面和背面进行光注入，研究光注入增益的变化。因此，设计两个不同的入光面序列进行验证，主要包括三次光注入，序列 1 的电池入光面顺序为正面→背面→正面(图 1(b))，序列 2 的电池入光面顺序为背面→正面→背面(图 1(c))，前两次光注入验证单面光注入是否使电池的增益达到饱和，第三次光注入验证前两次不同入光面方向光注入是否使电池增益达到饱和。电池完成光注入后，STC 条件下测试正面光照时的 $I-V$ 曲线特征参数。

1.2　光注入与暗态退火

为了合理利用 SHJ 太阳电池光注入所产生的增益效果获得高转换效率，电池增益效果的稳定性研究尤为重要。考虑到常规 P 型单晶硅太阳电池衰减在暗态退火(dark annealing，DA)下具有回复现象，在 SHJ 太阳电池光注入增益达到饱和后加入暗态退火过程，考察太阳电池光注入增益效应的热稳定性。

SHJ 太阳电池光注入与退火循环实验主要包括光注入过程(light injection，LI)和退火过程的循环，电池在完成单次正面和背面光注入后进行暗态退火(100 ℃，30 min)的一系列过程称为一个循环，本实验设计了两个循环：A 循环为正面光注入→背面光注入→暗态退火，B 循环为背面光注入→正面光注入→暗态退火。实验中 SHJ 太阳电池需要进行多次循环，按照首次入光面方向将 SHJ 太阳电池光注入与退火循环过程分为两个分支，第一个分支为 A 循环→B 循环→A 循环(首次入光面方向为正面)，第二个分支为 B 循环→A 循环→B 循环(首次入光面方向为背面)，循环内光注入过程按照 1.1 中的实验方法进行。

1.3　高强度白光光注入及红外光光注入

为了探究更高效便捷的 SHJ 太阳电池光注入方式，实验中分别采用高强度白光和红外光进行光注入，分析比较两种光注入方式的差异。高强度白光光注入所用光源为 60 个标准辐照强度(60-Suns)的 LED 光源，电池入光面顺序为正面光注入→背面光注入，电池单次光注入时间为 30 s，光注入过程中由于光源辐照度较高及散热条件限制，电池的实际温度在 200 ℃附近。在光注入前以及单次单面光注入结束后分别进行 STC 条件下的 $I-V$ 曲线测试获得太阳电池的输出参数。STC 测试均为电池正面 $I-V$ 曲线测试。红外光光源为红外 LED 灯，光源整体用电功率与高强度白光光源相同，只进行单次正面光注入，其他测试条件与白光光注入相同。

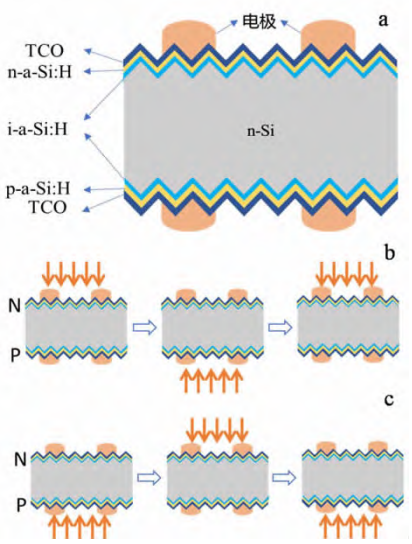


图 1　SHJ 太阳电池结构示意图(a)，入光面顺序为正面→背面→正面的电池光注入示意图(b)和入光面顺序为背面→正面→背面的电池光注入示意图(c)

Fig. 1 Schematic diagram of SHJ solar cell structure (a), the sequence of light injection surface is front → back → front (b) and the sequence of light injection surface is back → front → back (c)

2　结果与讨论

2.1　1-Sun 标准光强下的光注入

图 2(a)为 SHJ 太阳电池在 1-Sun 标准光强下入光面顺序为正面→背面→正面时的效率变化趋势。首次进行正面光注入时，电池效率在 1 h 内达到稳定，所产生的绝对效率增益为 0.22%。接着进行背面光注入，电池在 2 h 光注入后重新达到稳定，累计产生的绝对效率增益为 0.42%。最后再次进行正面光注入 1 h 后，电池性能无明显变化，证明转

换效率达到饱和，绝对效率增益为 0.41%，其中，填充因子增加 1.67%，开路电压和短路电流保持稳定，无明显增益。两次测试效率的微小差异是由测试系统的不确定度引起的。图 2(b) 中电池入光面顺序为背面→正面→背面，初次背面光注入和正面光注入产生的绝对效率增益分别为 0.19% 和 0.25%，最后再次进行背面光注入后电池效率累计增益趋于稳定(0.44%)。

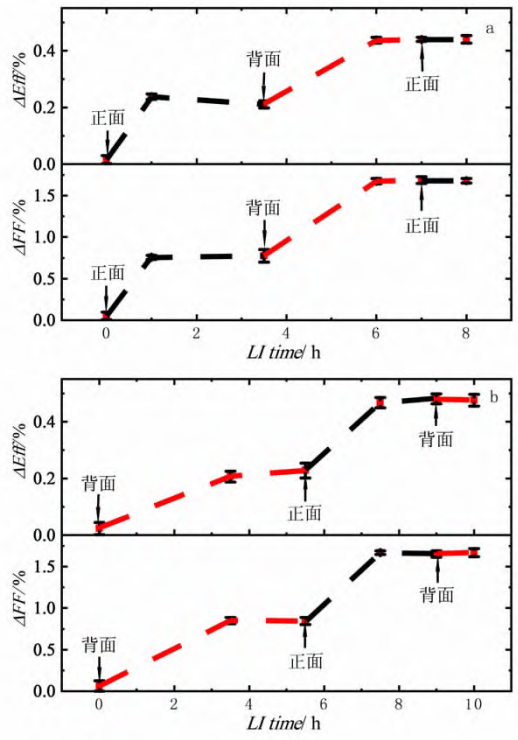


图 2 SHJ 太阳电池交替光注入后效率 Eff 和填充因子 FF 的变化：(a) 入光面顺序为正面→背面→正面；(b) 入光面顺序为背面→正面→背面(黑色曲线为正面，红色曲线为背面)

Fig. 2 Changes of Eff andFF after alternating light injection of SHJ solar cell: (a) front → back → front; (b) back → front → front (The black curve is the front, the red curve is the back)

通过对比 SHJ 太阳电池光注入前后的 I-V 曲线特征参数发现，实验过程中电池效率增加主要来源于填充因子，开路电压和短路电流变化较小，填充因子提高意味着电池内部串联电阻降低，使得电池最大功率点 P_{max} 更接近 $V_{oc}\times I_{sc}$，电池性能提升明显。SHJ 太阳电池进行正背面交替光注入时，单独正面光注入或背面光注入不能使电池性能增益达到饱和，电池性能呈现阶梯状增长趋势，而第三次更换入光面后则已无增益现象出现，表明电池在前两次不同入光面光注入后性能已达到饱和，因此，在后续实验进程中只对实验样品进行两次交替光注入即可使其效率增益达到稳定。

基于 SHJ 太阳电池不同入光面顺序下的光注入增益效果(以首次正面入射为例)，发现其从双面交替入光进行光注入后呈现阶梯状增长趋势，意味着在 1-Sun 条件下单面光注入不足以修复 SHJ 太阳电池非晶硅层中的所有缺陷。由于实验中实际使用的是 1-Sun 标准辐照度光源，正面光注入时正面增益效果很快饱和(正面非晶硅层缺陷被修复)，考虑到 SHJ 太阳电池中单晶硅和非晶硅薄膜对光的吸收，单面光注入时主要被正面吸收，只有一部分长波段的红外光能到达电池的背面，对背面的缺陷修复效果较弱，不足以使背面增益达到饱和。当更换入光面进行光注入后，光源能够直接作用于电池背面，电池背面非晶硅层缺陷被修复，性能继续增长至饱和。SHJ 太阳电池在 1-Sun 条件下需要双面光注入才能达到增益饱和，在太阳电池生产中为了获取其增益效果，产线上需要增加额外的工艺步骤才能满足电池双面受光的需求，生产成本提高，因此需要寻找一种高效便捷的光注入方式满足 SHJ 太阳电池光注入的需求。

2.2 光注入后退火过程

SHJ 太阳电池在不同入光面顺序光注入下增益达到饱和后，在退火炉中进行 100 ℃暗态退火，验证光注入后的稳定性，退火炉的环境条件为大气。当 SHJ 太阳电池进行 A 循环时，图 3(a) 中光注入所产生的绝对增益(约为 0.42%)降低至 0，表明电池性能恢复至初始状态。入光面顺序调整为背面光注入→正面光注入→暗态退火后，图 3(b) 中光注入增益效果达到饱和后通过暗态退火恢复至初始水平(0.35%→0)，说明光注入的增益效果经过暗态退火后基本消退。

当 SHJ 太阳电池分别完成 A 循环和 B 循环后，结果显示暗态退火对于光注入产生的增益效应起到了消退作用，该消退作用与光注入的入光面顺序无关，说明 SHJ 太阳电池光注入产生的效率增益热稳定性较差，在较低环境温度下光注入产生的增益会发生消退。SHJ 太阳电池在组件的生产过程中，需

要经过焊接和层压的热过程（温度在 140 ℃以上），因此为了合理获取电池的光注入增益，SHJ 太阳电池必须在组件生产中的热过程完成后进行光注入，避免光注入所产生的增益效果被热过程所消退，同时，需要对 SHJ 太阳电池光注入的热稳定性进行进一步研究。

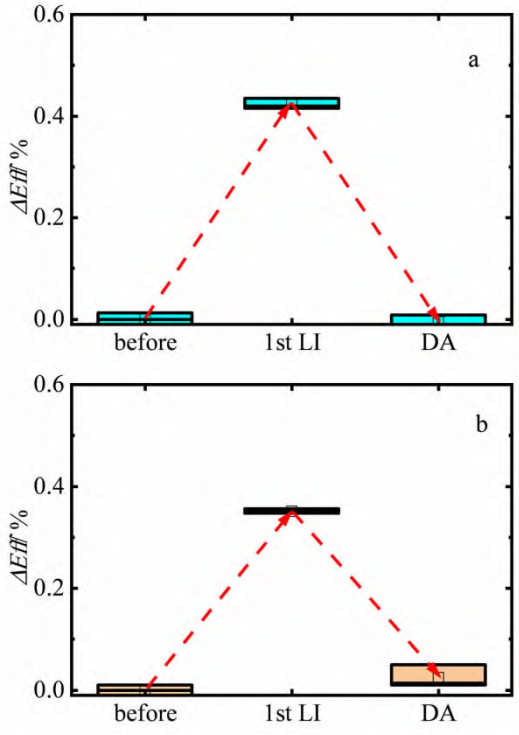


图 3　不同入光面顺序下单次循环后的效率变化趋势：（a）循环 A；（b）循环 B

Fig. 3 The gain of efficiency after one cycle in different light injection sequences: (a) cycle A; (b) cycle B

2.3　光注入退火循环过程

图 4（a）中电池所经历的循环过程为 A 循环→B 循环→A 循环，首次光注入方向为正面，第一次循环内电池光注入产生的累计绝对效率增益为 0.42%，暗态退火后电池增益消退至初始水平。第二次循环调整了入光面的顺序（首次入光面为背面），该电池经过光注入后效率产生了 0.49% 的绝对增益，暗态退火后消退至初始水平，但是保留微小的效率增益。第三次循环与首次循环参数设置相同，结果显示电池性能变化与第二次循环一致（0.5%），考虑到 *I*–*V* 测试的动态误差，从以上结果可以看出，暗态退火并没有完全消退光注入的增益效果，随着光注入次数的累计增加，电池转换效率显示出微弱增加的趋势。

图 4（b）中 SHJ 太阳电池所经历的循环为 B 循环→A 循环→B 循环，电池性能变化趋势与图 4（a）中样品相同，该电池在三次 LI 后产生的绝对效率增益分别为 0.35%、0.37% 和 0.38%，且都在暗态退火后消退至初始状态，从多次光注入和退火看，随着光注入次数的增加，电池的转换效率也有微弱的增加趋势，显示了光注入后微弱的累计效果。

通过对同一片电池进行多次光注入、退火循环实验后发现 SHJ 太阳电池在光注入中所能产生的累计增益非常微弱，三次光注入的累计效率增益只有 0.02% ~0.03%，与入光面顺序无关，说明电池中产生增益效应的微观结构热稳定性较差，即在较低的退火温度下能被消退，在下一个循环中的 LI 进程中又能重新得到恢复，光注入增益和退火消退的过程是完全可逆的物理过程。另一方面，由于 SHJ 太阳电池的转换效率在多次循环光注入退火后仍然获得同等幅度的增益，说明光注入是一种有效的提高 SHJ 太阳电池转换效率和输出功率的方法。

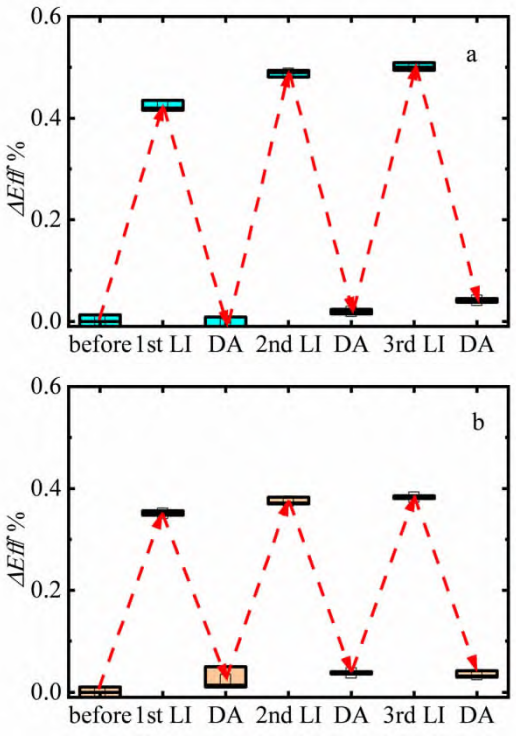


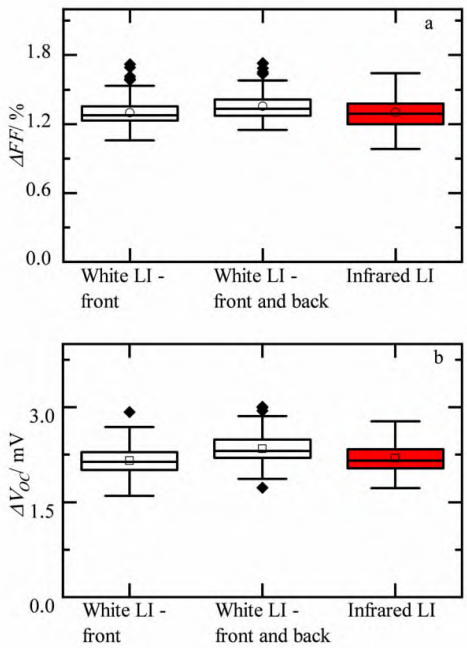
图 4　SHJ 太阳电池电池在不同循环顺序下的变化趋势：（a）循环顺序为 A→B→A；（b）循环顺序为 B→A→B

Fig. 4 Variation Trend of SHJ solar cell under different cycle sequences: (a) cycle sequence is A → B → A; (b) cycle sequence is B → A → B

2.4 高强度白光光注入和近红外光光注入

为了研究高强度光注入(60～80-Suns)的有效性,使用高强度白光和近红外光进行同样的实验验证。高强度白光光注入时,首先进行正面光注入,达到饱和后更换入光面,在同样条件下进行背面光注入。实验证明,白光和近红外光高强度光注入时,单次光注入即可使转换效率达到饱和,而且达到饱和的时间非常短,只需要 30 s,达到饱和所需的光通量小于 1-Sun 标准光强光注入时的光通量,说明高强度白光和近红外光光注入具有更快的增益效果。图 5 的结果显示,SHJ 太阳电池电学参数变化具体表现为填充因子 FF 提升约 1.5%、开路电压 V_{oc} 提升约 2 mV、短路电流 I_{sc} 基本保持不变、转换效率 Eff 提升约 0.4%,与 1-Sun 标准光强光注入相当。与 1-Sun光注入条件下电池的电学参数变化相比,高强度光注入的开路电压增益较大,可能与两种光注入方式下所使用的样品结构的微小差异相关。另外,高强度白光光注入条件下,正面叠加背面光注入后产生的转换效率增益(0.43%)与单正面光注入(0.40%)较为接近,说明短时间光注入可以使电池的增益达到饱和,这样可以大幅度缩短光注入时间,具有很高的生产性。

当光注入光源调整为近红外光光源时,光注入后转换效率的增益为 0.4%,与高强度白光光注入所产生的增益效果一致,说明近红外光源具有同样的光注入效果。



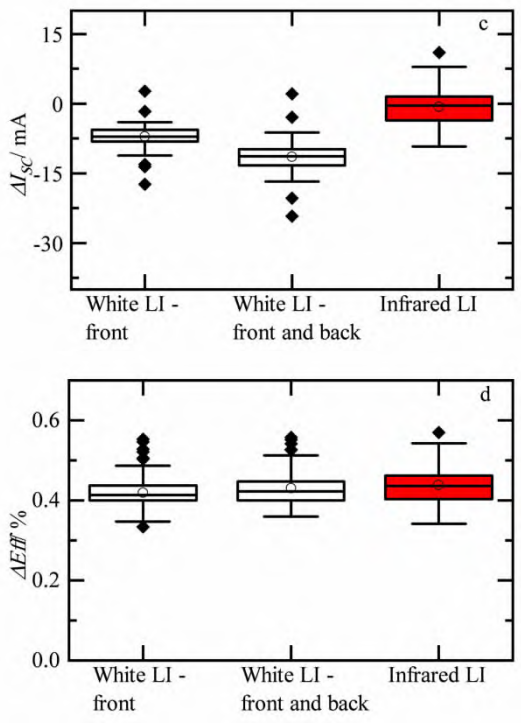


图 5 高强度白光和红外光光注入条件下,SHJ 太阳电池的填充因子 *FF*(a)、开路电压 V_{OC}(b)、短路电流 I_{SC}(c)和转换效率 *Eff*(d)的变化情况

Fig. 5 Changes of filling factor *FF* (a), open-circuit voltage V_{OC} (b), short-circuit current I_{SC} (c) and conversion efficiency *Eff* (d) of SHJ solar cell under high intensity white light and infrared light injection

3 结论

本文对 SHJ 太阳电池在不同入光面顺序下所引起的效率增益特性进行研究,发现在 1-Sun 标准太阳光强条件下的单面光注入不能使电池的效率增益达到饱和,只有在正面和背面两次不同入光面方向光注入后电池的效率增益才能达到饱和,电池效率增益约 0.4%。光注入后实施的暗态退火和光注入循环实验发现,光注入所产生的增益效果消退,且光注入产生效率增益和退火产生效率消退具有重复性,说明光注入所产生的性能增益不稳定。光注入效率增益和退火消退是一个可逆的物理过程,退火消退后通过光注入仍然可以恢复到初期光注入以上的转换效率。由此可以推断,即使组件制作的热过程导致电池效率衰退,后续光照射仍然可以使电池的转换效率恢复,光注入对 SHJ 太阳电池是一个有效的工艺技术。高强度单面白光光注入在短时间

(30 s) 内可以使电池增益达到饱和,且红外光光注入可实现与白光同样的光注入增益效果。

参考文献:

[1] Glunz S W, Rein S, Lee J Y, et al. Minority carrier lifetime degradation in boron-doped Czochralski silicon [J]. Journal of Applied Physics, 2001, 90(5): 2397-2404.

[2] Schmidt J, Bothe K. Structure and transformation of the metastable boron- and oxygen-related defect center in crystalline silicon [J]. Physical Review B, 2004, 69(2): 1129-1133.

[3] Glunz S W, Rein S, Warta W, et al. Degradation of carrier lifetime in Cz silicon solar cells [J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2001, 65(1-4): 219-229.

[4] Niewelt T, Broisch J, SchöN J, et al. Light-induced Degradation and Regeneration in n-type Silicon [J]. Energy Procedia, 2015, 77: 626-632.

[5] Hamelmann F U, Weicht J A, Behrens G. Light-Induced Degradation of Thin Film Silicon Solar Cells [J]. Journal of Physics Conference Series, 2016, 682(1): 012002.

[6] Kobayashi E, Wolf S D, Levrat J, et al. Light-induced performance increase of silicon heterojunction solar cells [J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(15): 692.