

热辅助光注入提升硅异质结太阳能电池性能研究

顾学辉^{1,2}, 王 娜², 唐 宁³, 肖宏海⁴, 韩安军²,
刘文柱², 刘正新^{1,2}

(1. 上海科技大学物质科学与技术学院, 上海 201210;

2. 中国科学院上海微系统与信息技术研究所新能源技术中心, 上海 201800;

3. 苏州莱德新能源科技有限公司, 苏州 215500; 4. 上海森永工程设备股份有限公司, 上海 201600)

摘 要: 研究热辅助光注入对晶体硅/非晶硅异质结(SHJ)太阳能电池以及掺杂非晶硅薄膜光电性能的影响,并通过优化光注入条件提升太阳能电池性能。实验结果证实:光注入可有效提升SHJ太阳能电池的光电转换效率(增幅为0.23%),主要来源于填充因子提升0.91%。而热辅助光注入提升效果更加明显,填充因子和光电转换效率的增幅分别为0.98%和0.34%。通过测试掺杂非晶硅薄膜在光注入前后的暗电导率变化发现,热辅助光注入可有效改善薄膜的电学性能,使n型非晶硅薄膜暗电导率增益比值达到9.05。通过少子寿命测试发现,热辅助光注入可改善太阳能电池的场钝化性能,减少少数载流子界面间复合,从而使SHJ太阳能电池输出性能的光致增益达到0.34%。

关键词: 晶体硅/非晶硅异质结太阳能电池; 硅异质结太阳能电池; 光注入; 热辅助光注入; 电导率; 少子寿命

中图分类号: TK514

文献标志码: A

0 引 言

晶体硅太阳能电池是光伏行业的主流产品^[1-2]。在商业化晶体硅电池中,晶体硅/非晶硅异质结(silicon heterojunction, SHJ)太阳能电池将本征非晶硅(i-a-Si:H)薄膜作为钝化层沉积在晶体硅衬底与掺杂 a-Si:H 薄膜之间,显著降低了载流子在晶体硅表面的复合损失,实现了高达 27.09% 的最高效率^[3],成为学术和光伏产业研究的热点。检验太阳能电池性能的一个重要指标是其在光照下的稳定性。由于 Staebler-Wronski (S-W)效应,i-a-Si:H 薄膜在光照射后表现出电导率明显下降的光致衰减现象^[4],这种效应被普遍解释为短波长的高能光子打破结合能较弱的 Si-H 化学键,使 a-Si:H 网络中 Si-悬挂键增加,导致深能级缺陷态浓度增加。然而,Kobayashi 等^[5-6]发现在 30 °C 条件下对 SHJ 太阳能电池进行高强度、长时间的光照射,即光注入(light soaking, LS)后,其光电转换效率(PCE)、开路电压(V_{oc})和填充因子(FF)均有明显提升,这种现象称之为反常 S-W 效应。刘文柱等^[7]提出,反常 S-W 效应归因于掺杂 a-Si:H 薄膜的光致变化,并通过详细研究表明,光注入过程中的高能光子可促进弱键合 H 原子在 a-Si:H 网络内发生跃迁与扩散,提高了硼原子和磷原子在 a-Si:H 薄膜中的掺杂效率。

在有关反常 S-W 效应的研究中,光注入实验通常在室温下进行,然而李晓东等^[8]提出在高温环境下光注入带来的增

益会消除温度系数导致的电学性能衰减,使 SHJ 太阳能电池表现出更优越的输出性能,这种方法称之为热辅助光注入(thermally assisted light soaking, TALS)。基于此,本文通过实验分析热辅助光注入对 SHJ 太阳能电池输出性能的影响,探究其载流子输运特性与钝化特性的变化,从而揭示热辅助强化光注入增益的物理机理。

1 实 验

1.1 样品制备

以尺寸为 156 mm×156 mm 的 n 型晶体硅片(c-Si)作为衬底,厚度约为 150 μm ,电阻率为 1~6 $\Omega\cdot\text{cm}$ 。首先使用碱溶液对硅片清洗制绒,在硅片表面形成尺寸范围为 3~8 μm 的金字塔形貌以提升陷光能力,之后采用标准 RCA 清洗工艺除去硅片表面的金属和有机污染物,利用 2% 的氢氟酸溶液除去硅片表面氧化层以提升钝化效果。然后,采用等离子体增强化学气相沉积(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)技术在硅片两面沉积厚度为 4~6 nm 的 i-a-Si:H 钝化层,再在正面沉积 6~10 nm 厚的 n 型非晶硅(n-a-Si:H)薄膜,背面沉积 6~10 nm 厚的 p 型非晶硅(p-a-Si:H)薄膜。采用反应等离子体沉积(reactive plasma deposition, RPD)在掺杂 a-Si:H 膜层上分别沉积厚度为 80~100 nm 的 TCO 薄膜,本文使用掺钨氧化铟(tungsten-doped indium oxide, IWO)材料作为 TCO

收稿日期: 2025-02-06

基金项目: 国家自然科学基金(T2322028; 62474184; 62004208); 国家重点研发计划(2022YFC2807104)

通信作者: 刘正新(1967—),男,博士、研究员、博士生导师,主要从事高效晶体硅太阳能电池和标准测试技术研究。z.x.liu@mail.sim.ac.cn

薄膜的靶材。最后,在电池两侧通过丝网印刷方法制备银电极,并在 185 °C 空气氛围下退火 35 min 进行固化。SHJ 太阳电池的工艺制备流程与结构如图 1 所示。

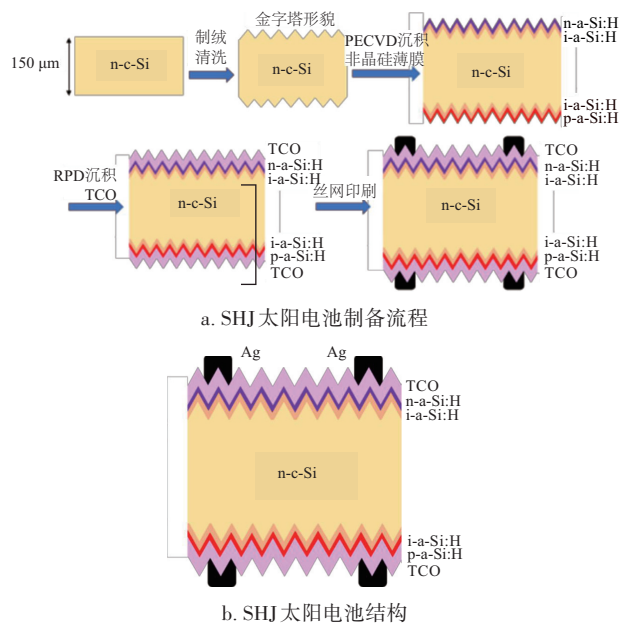


图 1 SHJ 太阳电池

Fig. 1 Silicon heterojunction solar cells

1.2 光注入实验及表征

实验过程中,将同一批次的 SHJ 太阳电池放置在温度可调节的可移动热台上,通过传动轴运输到光注入腔室,在光源下连续照射 60 s,光源的光照强度为 20 个标准太阳 (AM1.5 光谱, 20 suns, 2 W/cm²)。依据先前对热辅助光注入的研究,实验温度设置为 175 °C^[9],采用 T 型热电偶监测实验期间电池的温度变化,热电偶的测温精度为 ±0.2 °C。由于热台可靠的温度控制系统,样品进入光注入腔室后温度快速升至 175 °C,并稳定保持至光照结束。

SHJ 太阳电池在光注入前后的电学性能参数在采用稳定光源的标准测试条件 (AM 1.5 G, 25 °C, 1 sun) 下通过电流-电压 (*I*-*V*) 测试仪测试获得。掺杂非晶硅薄膜的暗电导率 (dark electric conductivity, σ_{dark}) 利用传输线模型法 (transmission line model, TLM) 测试,测试样品示意图如图 2 所示,在石英玻璃衬底上沉积厚度为 35~40 nm 的掺杂 a-Si:H 薄膜,由于 a-Si:H 薄膜的电阻率较大,因此在薄膜上蒸镀厚度 1000 nm 的银电极以形成良好的欧姆接触。

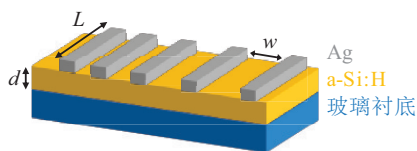


图 2 a-Si:H 薄膜暗电导率测试示意图

Fig. 2 Schematic diagram for dark electric conductivity test of a-Si:H films

通过 TLM 法测得掺杂 a-Si:H 薄膜在实验前后的暗态 *I*-*V* 曲线,并根据式 (1) 进行计算。钝化片的少数载流子寿命的测试方法为准稳态光电导衰减法,数值通过 Sinton WCT-120 测试仪测试得到。SHJ 太阳电池的虚态填充因子 (pseudo-FF, pFF) 通过 Suns-*V*_{oc} 测试得到。

$$\sigma_{\text{dark}} = \frac{I}{V} \times \frac{w}{d \times l} \quad (1)$$

式中: σ_{dark} ——暗电导率, S/cm; *I*——测得的电流值, A; *V*——印加的电压参数, V; *w*——银电极间距, cm; *d*——掺杂 a-Si:H 薄膜厚度, cm; *l*——银电极长度, 本实验中固定为 1 cm。

2 结果与讨论

2.1 SHJ 太阳电池光电特性

图 3 展示了 SHJ 太阳电池在光注入前后的光电转换效率、填充因子、开路电压以及短路电流密度 4 个电学性能参数的变化。在 25 °C 下进行光注入后, SHJ 太阳电池的平均光电转换效率、填充因子、开路电压与短路电流密度分别提升 0.23%、0.91%、1.64 mV 和 0.06 mA/cm²。在 175 °C 的热辅助光

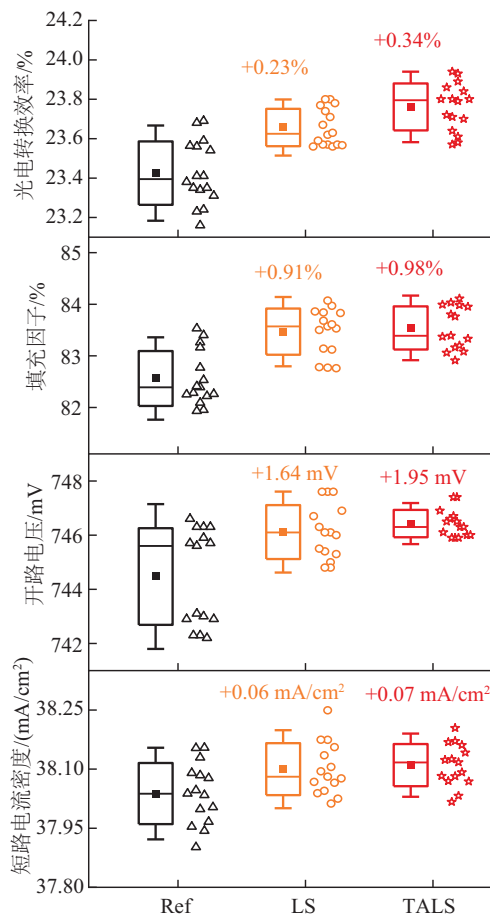


图 3 硅异质结太阳电池在光注入和热辅助光注入前后的电学参数

Fig. 3 Electrical performance parameters of SHJ solar cells before and after light soaking and thermally assisted light soaking

注入后, SHJ 太阳能电池的平均光电转换效率、填充因子、开路电压和短路电流密度均有提升, 其中平均光电转换效率和填充因子提升较为显著, 平均值高达 0.34% 和 0.98%; 开路电压和短路电流密度分别提升 1.95 mV 和 0.07 mA/cm²。

由实验结果可知, 针对 SHJ 太阳能电池进行光注入处理能提升其光电转换效率, 当升高环境温度与光子激发协同作用时, SHJ 太阳能电池的输出性能呈现出更显著的优化趋势, 表明热辅助光注入显著增强了 SHJ 太阳能电池的光电转换效率。

2.2 掺杂非晶硅薄膜暗电导率分析

掺杂 a-Si:H 薄膜的电学特性可通过测试其暗电导率得到表征。图 4 展示了 n-a-Si:H 薄膜和 p-a-Si:H 薄膜在光注入和热辅助光注入前后的暗态 $I-V$ 曲线(小图为通过计算得到的薄膜暗电导率), 曲线的斜率增大表明在相同辐照度下热辅助能显著提高掺杂 a-Si:H 薄膜暗电导率。从暗态 $I-V$ 曲线中提取出电流值与电压值并计算暗电导率。光注入后, n-a-Si:H 薄膜的平均暗电导率从 3.17×10^{-4} S/cm 提升至 9.36×10^{-4} S/cm, 在热辅助光注入后达到 2.87×10^{-3} S/cm, 暗电导率的增益比值分别为 2.95 和 9.05; p-a-Si:H 薄膜的平均暗电导率在光注入后由初始的 5.06×10^{-3} S/cm 提升至 9.04×10^{-3} S/cm, 在热辅助光注入后达到 1.38×10^{-2} S/cm, 增益比值分别为 1.79 与 2.72。

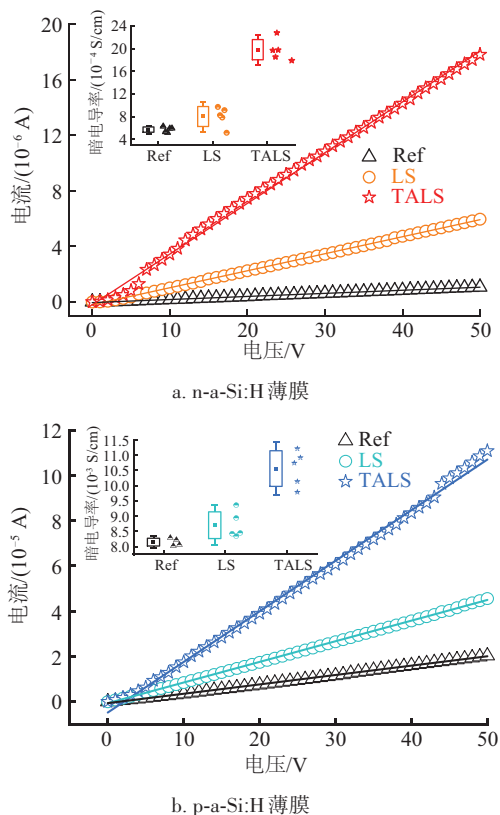


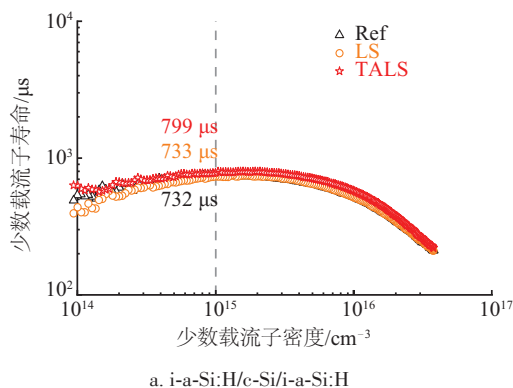
图4 掺杂 a-Si:H 薄膜在光注入和热辅助光注入前后的暗态 $I-V$ 曲线及暗电导率

Fig. 4 Dark state $I-V$ curves and dark electric conductivity of doped a-Si:H films before and after light soaking and thermally assisted light soaking

热辅助光注入能显著提高掺杂 a-Si:H 暗电导率的原因可从以下几个方面进行解释: 首先, Si-H 化学键的声子能量与弱键合 H 原子发生跃迁的能量势垒处于同一数量级^[10], 温度升高不仅增加了声子数量也增强了声子能量, 从而辅助弱键合 H 原子在 a-Si:H 网络中进行跃迁和扩散, 激活了硼和磷的有效掺杂; 其次, 硼和磷掺杂在 a-Si:H 中引入受主能级和施主能级, 温度升高会促进掺杂原子的电离, 因此产生更多的自由载流子, 从而提高电导率。n-a-Si:H 暗电导率增益比值高于 p-a-Si:H 的机理可通过过渡态模拟来解释: p-a-Si:H 薄膜中 H 从 B-H-Si 跃迁到相邻 Si-H-Si 的跃迁势垒约为 0.88 eV, 而 n-a-Si:H 薄膜中 H 从 P-Si-H-Si 向相邻 Si-H-Si 的跃迁势垒仅为 0.42 eV^[11], 因此在相同光注入条件下, n-a-Si:H 薄膜电学性能提升的效果更为显著。

2.3 SHJ 太阳能电池钝化性能分析

太阳能电池中少数载流子寿命是用于衡量硅片或电池钝化性能的重要参数。本文分别制备 i-a-Si:H/c-Si/i-a-Si:H 和 n-a-Si:H/i-a-Si:H/c-Si/i-a-Si:H/p-a-Si:H 两种结构的钝化片样品, 采用准稳态光电导衰减法用 Sinton WCT-120 测试仪进行少数载流子寿命测试。图 5 展示了两种结构的钝化片在光注入以及热辅助光注入前后的少数载流子寿命变化。从图 5 可看出, 结构为 i-a-Si:H/c-Si/i-a-Si:H 的钝化片的少数载流子寿命曲线在实验后未发生明显变化, 少数载流子寿命提升值仅为 67 μ s, 而 n-a-Si:H/i-a-Si:H/c-Si/i-a-Si:H/p-a-Si:H 结构的钝化片在注入水平低于 1.0×10^{15} cm⁻³ 时进行光注入后少数载流子寿命明显提升, 由 2079 μ s 提升至 2465 μ s, 且在热辅助光注入下少数载流子寿命曲线继续上升, 少数载流子寿命继续增至 3189 μ s, 提升值达到 1110 μ s, 提升幅度达到 53.3%。Olibet 等^[12]研究表明, 在较高的注入水平下 ($> 10^{15}$ cm⁻³), 少数载流子寿命受化学钝化的影响, 在较低的注入水平下 ($< 10^{15}$ cm⁻³), 少数载流子寿命的高低代表场钝化性能的优劣。场钝化性能的提升说明 c-Si 与 a-Si:H 界面形成的内建电场增强, 从而加速了载流子分离, 驱使其远离晶体硅表面缺陷区域, 抑制复合, 这与刘文柱等^[7]提出的光注入激活硼原子和磷原子可有效掺杂的理论相符合。因此, SHJ 太



a. i-a-Si:H/c-Si/i-a-Si:H

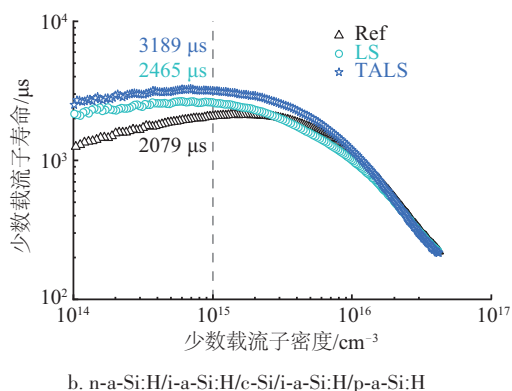


图5 两种结构钝化片在光注入和热辅助光注入前后的少数载流子寿命

Fig. 5 Minority carrier lifetime of two structure passivation sheets before and after light soaking and thermally assisted light soaking

阳电池在光注入后的增益来源于掺杂 a-Si:H 膜层场钝化性能的改善,并且热辅助光注入可在此基础上进一步提高场钝化效应,增强了 c-Si 与 a-Si:H 异质界面内建电场强度。

本文利用 Suns- V_{oc} 测试 SHJ 太阳电池在正面和背面进行光注入前后的虚态填充因子,研究器件中化学钝化的性能优劣^[13],从而进一步分析其效率提升的物理机理。如图 6 所示,

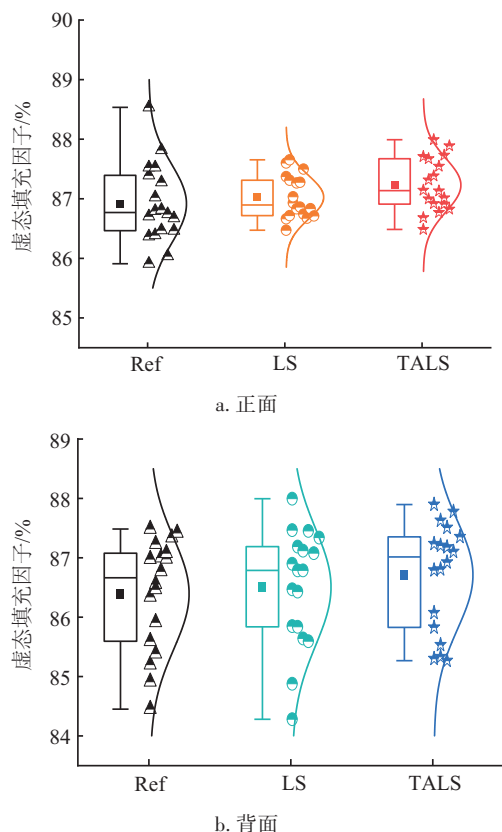


图6 SHJ 太阳电池正面和背面虚态填充因子的变化
Fig. 6 Pseudo fill factor variation of SHJ solar cells from front side and rear side

无论是从正面(n-a-Si:H 面为入光侧)还是背面(p-a-Si:H 面为入光侧),SHJ 太阳电池的虚态填充因子在光注入后绝对提升仅约为 0.10%,热辅助光注入后绝对提升为 0.20%,提升效果并不明显,表明 SHJ 太阳电池增益的主要原因并不是化学钝化性能的改善。

3 结 论

本文采用 PECVD 制备了工业尺寸的 SHJ 太阳电池,研究并证实热辅助光注入能更有效地提升其光电转换性能的现象,分析了热辅助光注入对器件以及内部膜层的电学性能和钝化性能的影响,得到以下主要结论:

1) I - V 测试结果表明,25 °C 光注入后 SHJ 太阳电池的平均光电转换效率和填充因子分别提升 0.23% 和 0.91%,开路电压和短路电流密度提升 1.64 mV 和 0.06 mA/cm²;在 175 °C 的热辅助光注入后 SHJ 太阳电池的平均光电转换效率和填充因子增益更明显,分别提升至 0.34% 和 0.98%,开路电压和短路电流密度增益分别提升至 1.95 mV 和 0.07 mA/cm²。

2) 通过 TLM 测试法发现热辅助光注入相比室温光注入可更加有效地改善掺杂 a-Si:H 薄膜的暗电导率,进一步优化了薄膜的电学性能,使 n-a-Si:H 的暗电导率增益比值从 2.95 提升至 9.05,这一结果也表明 n-a-Si:H 薄膜对光子更敏感,n 面更适合作为 SHJ 太阳电池的入光面。

3) 针对钝化性能变化,结合 Sinton WCT-120 和 Suns- V_{oc} 测试结果可得出:热辅助光注入有效提高 SHJ 太阳电池光电转换效率 0.34% 的原因是场钝化性能的改善,增强了 c-Si 和 a-Si:H 异质结界面内建电场强度,降低了少数载流子在界面间复合。

[参考文献]

- [1] 杨煜豪, 刘文柱, 张丽平, 等. 晶硅异质结太阳电池 nc-Si:H/nc-SiO_x:H 叠层窗口层研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 203-207.
YANG Y H, LIU W Z, ZHANG L P, et al. Research on nc-Si:H/nc-SiO_x:H stacked thin films as silicon heterojunction solar cell window layer [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(8): 203-207.
- [2] 姚宇波, 张丽平, 刘文柱, 等. 不同背反射结构在硅异质结太阳电池中的应用研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 37-42.
YAO Y B, ZHANG L P, LIU W Z, et al. Research on application of different back reflection structures in silicon heterojunction solar cells [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(10): 37-42.
- [3] WANG G S, SU Q, TANG H B, et al. 27.09%-efficiency silicon heterojunction back contact solar cell and going beyond[J]. Nature communications, 2024, 15: 8931.
- [4] STAEBLER D L, WRONSKI C R. Reversible conductivity

- changes in discharge-produced amorphous Si [J]. Applied physics letters, 1977, 31(4): 292-294.
- [5] KOBAYASHI E, DE WOLF S, LEVRAT J, et al. Light-induced performance increase of silicon heterojunction solar cells [J]. Applied physics letters, 2016, 109(15): 153503.
- [6] KOBAYASHI E, DE WOLF S, LEVRAT J, et al. Increasing the efficiency of silicon heterojunction solar cells and modules by light soaking [J]. Solar energy materials and solar cells, 2017, 173: 43-49.
- [7] LIU W Z, SHI J H, ZHANG L P, et al. Light-induced activation of boron doping in hydrogenated amorphous silicon for over 25% efficiency silicon solar cells [J]. Nature energy, 2022, 7(5): 427-437.
- [8] LI X D, YANG Y H, HUANG S L, et al. Reassessment of silicon heterojunction cell performance under operating conditions [J]. Solar energy materials and solar cells, 2022, 247: 111951.
- [9] DUAN W Y, RUDOLPH T, GEBREWOLD H T, et al. Insights into the heat-assisted intensive light-soaking effect on silicon heterojunction solar cells [J]. Solar RRL, 2024, 8(19): 2400383.
- [10] STUTZMANN M, JACKSON W B, SMITH A J, et al. Light-induced metastable defects in amorphous silicon: the role of hydrogen [J]. Applied physics letters, 1986, 48(1): 62-64.
- [11] PANDEY A, CAI B, PODRAZA N, et al. Electrical activity of boron and phosphorus in hydrogenated amorphous silicon [J]. Physical review applied, 2014, 2(5): 054005.
- [12] OLIBET S, VALLAT-SAUVAIN E, BALLIF C. Model for a-Si:H/c-Si interface recombination based on the amphoteric nature of silicon dangling bonds [J]. Physical review B, 2007, 76(3): 035326.
- [13] SINTON R A, CUEVAS A, STUCKINGS M. Quasi-steady-state photoconductance, a new method for solar cell material and device characterization [C]//Conference Record of the Twenty Fifth IEEE Photovoltaic Specialists Conference-1996. Washington, DC, USA, 2002: 457-460.

IMPROVEMENT FOR SILICON HETEROJUNCTION SOLAR CELLS BY THERMALLY ASSISTED LIGHT SOAKING

Gu Xuehui^{1,2}, Wang Na², Tang Ning³, Xiao Honghai⁴, Han Anjun², Liu Wenzhu², Liu Zhengxin^{1,2}

(1. School of Physical Science and Technology, ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China;

2. Research Center for New Energy Technology (RCNET), State Key Laboratory of Materials for Integrated Circuits, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology (SIMIT) Chinese Academy of Sciences (CAS), Shanghai 201800, China;

3. Suzhou Ryder New Energy Technology Company, Suzhou 215500, China;

4. Shanghai Nagamori Machinery Company Limited, Shanghai 201600, China)

Abstract: This paper investigated the effect of thermally assisted light soaking (TALS) on the performance of amorphous/crystalline silicon heterojunction (SHJ) solar cells. The experimental results confirm that light soaking (LS) effectively improves the power conversion efficiency and fill factor of SHJ solar cells by 0.23% and 0.91%, while TALS increases the gain to 0.34% and 0.98%. By measuring the dark electric conductivity of doped amorphous silicon films before and after the TALS, it is found that TALS has more significant effect on improving the electrical properties of the films compared to LS, enabling n-type amorphous silicon thin film dark electric conductivity gain ratio of 9.05. Combined with Sinton WCT-120 and Suns- V_{oc} measurements, it is concluded that TALS improves the field passivation performance, enhancing the built-in electric field strength of crystalline silicon and amorphous silicon heterojunction, thus reduces the recombination of minority carriers at the interface, resulting in a light-induced gain of 0.34% in the output performance of SHJ solar cells.

Keywords: amorphous/crystalline silicon heterojunction solar cells; silicon heterojunction solar cells; light soaking; thermally assisted light soaking; photo conductivity; minority carrier lifetime