

# 重掺杂 c-Si 背场 a-Si:H/c-Si 背结双面太阳能电池初步实验研究

王涛, 黄海宾, 孙喜莲, 田罡煜, 宿世超, 高超, 袁吉仁, 岳之浩, 周浪

南昌大学光伏研究院, 江西 南昌 330031

**摘要** HIT结构的 a-Si:H/c-Si 异质结太阳能电池迎光面遮光损失大是限制其效率提升的瓶颈之一。设计并制备了银栅线/SiN<sub>x</sub>/c-Si(n<sup>+</sup>)/n-c-Si/a-Si:H(i)/a-Si:H(p<sup>+</sup>)/ITO/银栅线结构的双面太阳能电池。对制备的双面太阳能电池样品每一面的进光情况进行 J-V、量子效率和 Suns-Voc 测试分析。研究表明,该结构太阳能电池采用背结结构入光可获得比前结结构入光更高的短路电流密度,从而获得更高的光电转换效率;当制绒后硅片厚度为 160 μm 时,双面太阳能电池的短路电流密度最高,为 40.3 mA·cm<sup>-2</sup>,优于 HIT 结构的最优值 39.5 mA·cm<sup>-2</sup>。

**关键词** 材料; 双面太阳能电池; 重掺杂 c-Si 背场; a-Si:H/c-Si 背结; 短路电流密度

**中图分类号** TM914.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.081602

## Preparation of Bi-Facial Solar Cell with Heavy-Doped c-Si Back Surface Field and a-Si:H/c-Si Rear Junction

Wang Tao, Huang Haibin, Sun Xilian, Tian Gangyu, Su Shichao,

Gao Chao, Yuan Jiren, Yue Zhihao, Zhou Lang

*Institute of Photovoltaics, Nanchang University, Nanchang, Jiangxi 330031, China*

**Abstract** The parasitic absorption loss in the light-injection side of HIT (heterojunction with intrinsic thin layer) structured a-Si:H/c-Si solar cell is one of the bottlenecks to limit transfer efficiency improvement of HIT cells. A kind of bi-facial solar cell with a structure of Ag grid/SiN<sub>x</sub>/c-Si(n<sup>+</sup>)/n-c-Si/a-Si:H(i)/a-Si:H(p<sup>+</sup>)/ITO/Ag grid is designed and prepared. The properties of the solar cell samples with light coming from each side are analyzed by means of J-V characteristics, quantum efficiency and Suns-Voc measurement methods. The results show that higher short-circuit current density of the cells can be obtained with rear-junction installation than that with a front-junction installation, which is the reason for higher conversion efficiency with rear-junction installation. In the research, the maximum short-circuit current density of 40.3 mA·cm<sup>-2</sup> is got in a cell with wafer thickness of 160 μm, which is higher than the maximum value of the short-circuit current density of 39.5 mA·cm<sup>-2</sup> for the HIT cells.

**Key words** materials; bi-facial solar cell; heavy-doped back surface field; a-Si:H/c-Si rear junction; short-circuit current density

**OCIS codes** 160.6000; 350.6050; 040.5350

## 1 引言

非晶硅/晶体硅异质结太阳能电池结构的典型代表是 HIT(heterojunction with intrinsic thin layer),该结构由日本三洋公司于 1992 年提出<sup>[1]</sup>。该结构最主要的优点是非晶硅/晶体硅(a-Si:H/c-Si)异质结带来的

**收稿日期:** 2017-03-21; **收到修改稿日期:** 2017-03-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(61306084,61464007,51561022)、江苏省能量转换材料与技术重点实验室开放课题基金资助项目(NJ20160032)、江西省重点研发计划-技术引进与合作研究-重点项目(2016BBH80043)

**作者简介:** 王涛(1990—),男,硕士研究生,主要从事太阳能电池器件方面的研究。E-mail: wangt\_77@163.com

**导师简介:** 黄海宾(1982—),男,博士,副教授,主要从事太阳能电池器件方面的研究。

E-mail: haibinhuang@ncu.edu.cn(通信联系人)

高开路电压( $V_{oc}$ ),但它也有不可避免的缺点,即由透明导电氧化物层和非晶硅层吸收损耗造成的相对较低的短路电流密度( $J_{sc}$ )<sup>[2]</sup>。转换效率为 24.7% 的 HIT 电池的短路电流密度只有  $39.5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ <sup>[3]</sup>。为克服这一缺点,将发射极和背电场集成于器件背光面而设计出了 HIT-IBC(heterojunction with intrinsic thin layer-interdigitated back contact)结构<sup>[4-5]</sup>,这样便使得器件的迎光面没有栅线遮挡,在最大程度上保证了入射光的收集,如此可将器件的短路电流密度提升到  $41.2 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ <sup>[6]</sup>。但因 HIT-IBC 结构背光面的结构比较复杂,金属电极的遮光面积大,只能单面进光,无法发挥传统 HIT 结构双面进光进而提高发电量的优势。此外,该太阳能电池结构的制备流程复杂,精度要求高,不利于大规模产业化。德国 Fraunhofer 太阳能研究所在 2011 年提出了从迎光面开始依次为银栅线/ $\text{SiN}_x$  减反层/ $n^+$ -c-Si 背场层/ $n$ -c-Si 片/ $i$ -a-Si:H 钝化层/ $p^+$ -a-Si:H 发射极/ITO/金属钛/钼/银电极的新型异质结电池结构<sup>[7-8]</sup>,该结构相对于 HIT 结构而言减少了迎光面的吸收损耗,增大了太阳能电池的短路电流密度。但该结构为单面入光设计,本课题组认为如将其背光面金属电极改为栅线结构,则可实现双面进光,进一步增大太阳能电池的光电转换效率。

## 2 实 验

以直拉法制备的  $n$  型晶向为(100)的单晶硅片作为衬底,制备非晶硅/晶体硅背结的双面太阳能电池。单晶硅片的尺寸为  $156 \text{ mm}\times 156 \text{ mm}$ ,电阻率为  $2\sim 4 \Omega\cdot\text{cm}$ ,厚度为  $(180\pm 10) \mu\text{m}$ 。双面太阳能电池的结构示意图及最终样品实物如图 1 所示。电池的制备工艺流程图如图 2 所示。具体流程如下:1)清洗制绒。为研究硅片厚度对双面太阳能电池性能的影响,采用单晶硅太阳能电池生产线中常用的碱制绒清洗工艺制备了厚度分别为  $156, 160, 166 \mu\text{m}$  的硅片;2)使用三氯氧磷( $\text{POCl}_3$ )扩散法制备背场重掺杂  $n$  型  $c$ -Si 层,采用等离子体增强化学气相沉积(PECVD)法制备氮化硅钝化减反膜,采用丝网印刷然后烧结的方法制备银栅线;3)使用自制的小型清洗设备对需要制备发射极薄膜的硅片表面进行单面 RCA 清洗,工艺流程为:SC1 溶液( $\text{H}_2\text{O}, \text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$  的体积比为  $5:1:1$ )清洗  $15 \text{ min}$ →SC2 溶液( $\text{H}_2\text{O}, \text{HCl}$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$  的体积比为  $5:1:1$ )清洗  $15 \text{ min}$ →用质量分数为 5% 的 HF 溶液去除氧化层→氮气吹干;4)采用 PECVD 设备沉积本征非晶硅钝化层和  $p$  型非晶硅发射极层,真空封装保存;5)采用磁控溅射法制备氧化铟锡(ITO)薄膜,采用热蒸发法在发射极面制备银栅线电极,ITO 薄膜的溅射和银栅线的制备均采用特定的掩模板进行;6)制成电池后,用激光将样品切割成如图 1(b)所示的  $4 \text{ cm}\times 4 \text{ cm}$  的小片,以便后续测量工作。

使用美国 Sinton 公司的 Suns-Voc 和长春博盛量子公司的太阳光模拟器测量短路电流密度( $J_{sc}$ )、开路电压( $V_{oc}$ )和  $J$ - $V$  曲线;使用台湾光焱科技公司的 QE 光谱响应量测系统测量内外量子效率和反射率。

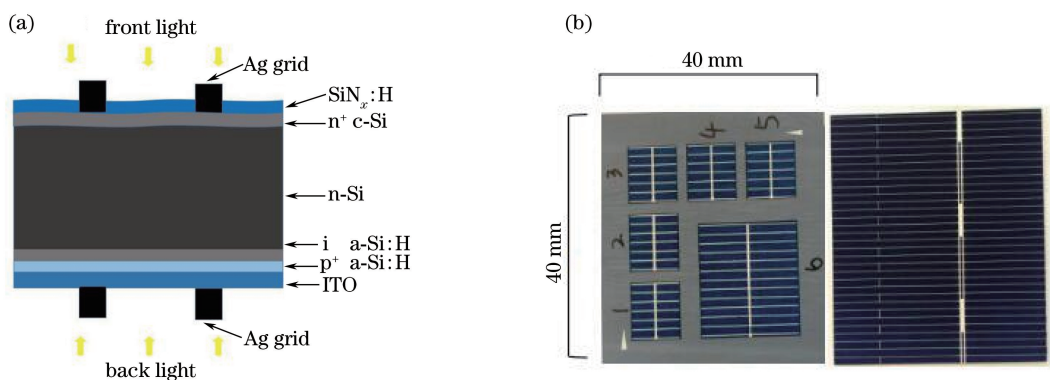


图 1 (a) 双面太阳能电池的结构示意图以及(b)最终样品的发射极面和背场面照片

Fig. 1 (a) Schematic of bi-facial solar cell and (b) pictures of emitter side and back surface field side of a final sample

## 3 结果与讨论

### 3.1 发射极面进光情况下硅片厚度对双面太阳能电池性能的影响

样品发射极面在溅射 ITO 薄膜和蒸镀银栅线时均使用了掩模板。在制备过程中,切割后的硅片利用化学腐蚀方法去除损伤层,并制备表面绒面结构。图 3 为发射极面进光情况下不同硅片厚度样品的  $J$ - $V$  曲

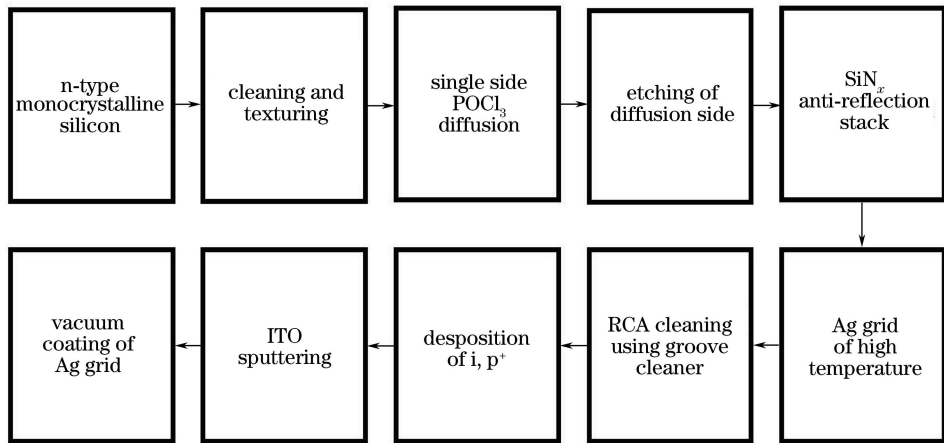


图2 双面太阳能电池的制备工艺流程图

Fig. 2 Preparation of process flow chart of bi-facial solar cell

线,  $J$  为电流密度,  $V$  为电压。可以看出, 硅片厚度为  $160\ \mu\text{m}$  的样品具有最大的开路电压和较高的短路电流密度。具体的电池性能参数见表 1。由表 1 可见, 随着硅片厚度变薄, 太阳能电池的开路电压增大, 这与硅片厚度对太阳能电池性能影响的一般规律一致<sup>[9]</sup>。结合图 4 分析可知, 积分短路电流密度受样品反射率的影响, 衬底硅片厚度为  $160\ \mu\text{m}$  的样品的反射率略低, 但其具有最高的填充因子(71.2%)和光电转换效率  $\eta$ (15.9%)。

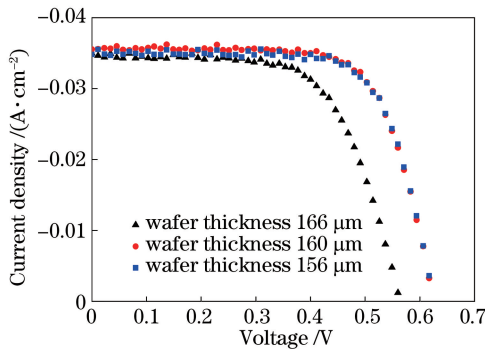
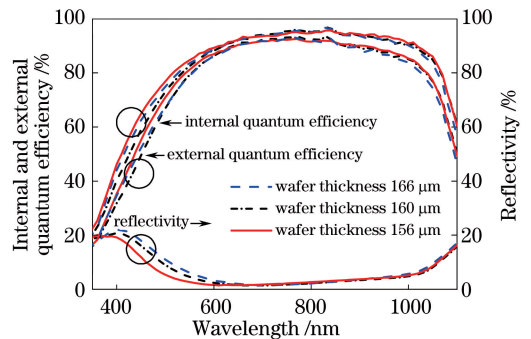
图3 不同厚度硅片样品的  $J$ - $V$  曲线Fig. 3  $J$ - $V$  curves of samples with different wafer thicknesses

图4 不同厚度硅片样品的内外量子效率和反射率曲线

Fig. 4 Internal and external quantum efficiency and reflectivity curves of samples with different wafer thicknesses

表1 不同厚度硅片样品的性能参数

Table 1 Performance parameters of samples with different wafer thicknesses

| Wafer thickness / $\mu\text{m}$ | $J_{sc} / (\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2})$ | $V_{oc} / \text{mV}$ | Fill factor / % | $\eta / \%$ |
|---------------------------------|---|----------------------|-----------------|-------------|
| 166                             | 35.7  | 560                  | 63.5            | 12.7        |
| 160                             | 35.5  | 628                  | 71.2            | 15.9        |
| 156                             | 34.8  | 629                  | 70.8            | 15.5        |

### 3.2 双面太阳能电池的双面进光特性

3个厚度硅片样品的背场面和发射极面进光的内量子效率曲线如图5所示。可见, 在  $350 \sim 800\ \text{nm}$  波段, 发射极面进光的内量子效率明显低于背场(BSF)面进光的内量子效率。这是因为此波段的波长较短, 反映的是迎光面近表面部分对光的响应。样品的发射极面上存在 ITO 层和非晶硅层, 因此比背场面的氮化硅和重掺杂  $c\text{-Si}$  层造成的光吸收损耗更大<sup>[10]</sup>。在大于  $800\ \text{nm}$  的长波长区, 发射极面作为迎光面情况下的内量子效率优于背场面作为迎光面情况下的内量子效率, 这是因为背场面表面氮化硅钝化层的钝化效果优于发射极面本征非晶硅层的钝化效果。本课题组后期将对本征  $a\text{-Si:H}$  钝化层的工艺进一步优化。

表2中 Suns- $V_{oc}$  测试所用的短路电流密度是由对应样品的外量子效率测试积分得到的。与发射极面

相比,样品背场面入光的短路电流密度明显较高,最高可达  $40.3 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,这说明背场面进光对入射光的吸收转化效率更高。随着硅片厚度从  $166 \mu\text{m}$  减薄至  $156 \mu\text{m}$ ,样品发射极面和背场面的开路电压均得以提高,分别提高到了  $627 \text{ mV}$  和  $600 \text{ mV}$ 。与背场面相比,发射极面具有更高的开路电压,这可能是由于非晶硅/晶体硅异质结面本征  $\text{a-Si:H}$  层的钝化效果优于背场面氮化硅层的钝化效果所致。Suns-Voc 测试得到的样品的光电转换效率  $\eta$  要高于太阳光模拟器的测量值,发射极面和背场面入光的转换效率最高分别为  $17.9\%$  和  $18.6\%$ 。这是因为 Suns-Voc 测量时忽略了银栅线的串联电阻对双面太阳能电池的影响。这也说明本课题组制备的样品的银栅线串联电阻较大,后续将针对此持续改进。

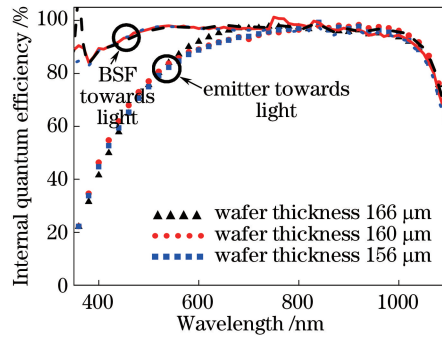


图 5 不同厚度硅片样品的背场面和发射极面进光的内量子效率曲线

Fig. 5 Internal quantum efficiency curves of samples with different wafer thicknesses of back surface filed side and emitter side

表 2 不同厚度硅片样品的双面 Suns-Voc 测量对比

Table 2 Suns-Voc measurement comparison of samples with different wafer thicknesses

| Wafer thickness / $\mu\text{m}$ | $J_{sc} / (\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$ |      | $V_{oc} / \text{mV}$ |     | $\eta / \%$ |      |
|---------------------------------|---|------|----------------------|-----|-------------|------|
|                                 | Emitter                                   | BSF  | Emitter              | BSF | Emitter     | BSF  |
| 166                             | 35.7                                      | 39.9 | 553                  | 581 | 15.7        | 17.7 |
| 160                             | 35.4                                      | 40.3 | 624                  | 586 | 17.9        | 17.8 |
| 156                             | 34.6                                      | 39.7 | 627                  | 600 | 17.3        | 18.6 |

## 4 结 论

基于重掺杂  $\text{c-Si}$  背场的  $\text{a-Si:H/c-Si}$  背结理念,设计了银栅线/ $\text{SiN}_x/\text{c-Si}(\text{n}^+)/\text{n-c-Si/a-Si:H}(\text{i})/\text{a-Si:H}(\text{p}^+)/\text{ITO}/$ 银栅线结构的双面太阳能电池,以及该太阳能电池的制备工艺流程。初步实验结果表明,所设计的太阳能电池结构和制备工艺流程可行;与将  $\text{c-Si}(\text{n}^+)$  背电场作为背光面相比,将其作为迎光面的样品可获得更高的短路电流密度和光电转换效率,短路电流密度最高可达  $40.3 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ ,优于 HIT 结构的最优值  $39.5 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。

**致谢** 本论文在器件制备过程中得到了海润光伏科技股份有限公司和上海理想能源设备有限公司的大力支持,在此表示衷心感谢!

## 参 考 文 献

- [1] Tanaka M, Taguchi M, Takahama T, *et al.* Development of a new heterojunction structure (ACJ-HIT) and its application to polycrystalline silicon solar cells[J]. Progress in Photovoltaics Research & Applications, 1993, 1(2): 85-92.
- [2] Levi D, Iwaniczko E, Page M, *et al.* Silicon heterojunction solar cell characterization and optimization using *in situ* and *ex situ* spectroscopic ellipsometry[C]. 2016 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, 2006: 1740-1743.
- [3] Taguchi M, Yano A, Tohoda S, *et al.* 24.7% record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(1): 96-99.
- [4] Schwartz R J, Lammert M D. Silicon solar cells for high concentration applications [C]. IEEE Electron Devices

Meeting, 1975, 21: 350-352.

- [5] Lammert M D, Schwartz R J. The interdigitated back contact solar cell: a silicon solar cell for use in concentrated sunlight[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1977, 24(4): 337-342.
- [6] Nakamura J, Asano N, Hieda T, *et al.* Development of heterojunction back contact Si solar cells[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(6):1491-1495.
- [7] Bivour M, Rüdiger M, Reichel C, *et al.* Analysis of the diffused front surface field of n-type silicon solar cells with a-Si/c-Si heterojunction rear emitter[J]. Energy Procedia, 2011, 8(4): 185-192.
- [8] Bivour M, Meinhardt C, Pysch D, *et al.* n-type silicon solar cells with amorphous/crystalline silicon heterojunction rear emitter[C]. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2010: 001304-001308.
- [9] Hovel H J. Semiconductors and semimetals: solar cells[M]. New York: Academic Press Incorporated, 1975.
- [10] Ritzau K U, Bivour M, Schröer S, *et al.* TCO work function related transport losses at the a-Si:H/TCO-contact in SHJ solar cells[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2014, 131: 9-13.