

硅异质结太阳能电池中钝化层和发射层的优化设计

张博宇 周佳凯 任程超 苏祥林 任慧志 赵颖 张晓丹 侯国付

Design and optimization of passivation layers and emitter layers in silicon heterojunction solar cells

Zhang Bo-Yu Zhou Jia-Kai Ren Cheng-Chao Su Xiang-Lin Ren Hui-Zhi Zhao Ying Zhang Xiao-Dan
Hou Guo-Fu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 188401 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210674

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210674>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钙钛矿/硅叠层太阳能电池中平面a-Si:H/c-Si异质结底电池的钝化优化及性能提高

Passivation optimization and performance improvement of planar a-Si:H/c-Si heterojunction cells in perovskite/silicon tandem solar cells

物理学报. 2019, 68(2): 028101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181759>

硅异质结太阳能电池的物理机制和优化设计

Physical mechanism and optimal design of silicon heterojunction solar cells

物理学报. 2017, 66(10): 108801 <https://doi.org/10.7498/aps.66.108801>

钙钛矿/硅异质结叠层太阳能电池: 光学模拟的研究进展

Perovskite/silicon heterojunction tandem solar cells: Advances in optical simulation

物理学报. 2021, 70(5): 057802 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201585>

基于隧穿氧化物钝化接触的高效晶体硅太阳能电池的研究现状与展望

Status and prospective of high-efficiency c-Si solar cells based on tunneling oxide passivation contacts

物理学报. 2021, 70(17): 178401 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210316>

免掺杂、非对称异质接触晶体硅太阳能电池的研究进展

Research progress of crystalline silicon solar cells with dopant-free asymmetric heterocontacts

物理学报. 2019, 68(4): 048801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181991>

基于BiFeO₃/ITO复合膜表面钝化的黑硅太阳能电池性能研究

Performance investigation of black silicon solar cells with surface passivated by BiFeO₃/ITO composite film

物理学报. 2017, 66(16): 167701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.167701>

硅异质结太阳能电池中钝化层和发射层的优化设计*

张博宇¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 周佳凯¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 任程超¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 苏祥林¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 任慧志¹⁾²⁾³⁾⁴⁾
赵颖¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 张晓丹¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ 侯国付^{1)2)3)4)†}

1) (南开大学光电子薄膜器件与技术研究所, 天津 300350)

2) (天津市光电子薄膜器件与技术重点实验室, 天津 300350)

3) (薄膜光电子技术教育部工程研究中心, 天津 300350)

4) (天津市中欧太阳能光伏发电技术联合研究中心, 天津 300350)

(2021年4月10日收到; 2021年5月18日收到修改稿)

本征钝化层及 p 型发射层对硅异质结太阳能电池的性能具有重要的影响. 本文在常规钝化层与晶硅衬底 (c-Si) 之间插入一层低功率、高氢稀释比沉积的超薄缓冲层, 以此来提高钝化效果, 并拓宽钝化层工艺窗口. 此外, 设计并制备了具有宽带隙、高电导特性的重掺杂纳米晶硅/轻掺杂 p 型双层复合发射极. 实验结果表明, 双层钝化层具有更加稳定与优异的钝化效果, 钝化样品的少子寿命达到 4.197 ms, 隐含开路电压 (implied- V_{OC} , iV_{OC}) 达到 726 mV. 同时双层复合发射层中, 轻掺杂的掺杂层可以减弱掺杂剂向本征钝化层的扩散, 保证良好的钝化效果, 而重掺杂的掺杂层不仅能够提供足够的内建电场, 而且可以改善掺杂层与氧化铟锡薄膜的接触特性, 进而提升电池的输出特性. 并且高氢稀释比的前掺杂层还可以对钝化层起到氢处理的作用, 减少钝化层表面的悬挂键, 从而增强化学钝化效果, 进而提高电池的开路电压. 最终, 基于商业化制绒的硅片, 获得了效率达到 20.96% 的硅异质结太阳能电池, 其中开路电压为 710 mV, 短路电流密度为 39.88 mA/cm², 填充因子为 74.02%.

关键词: 硅异质结太阳能电池, 钝化层, 发射层, 复合结构

PACS: 84.60.Jt, 88.40.H-, 88.40.hj

DOI: 10.7498/aps.70.20210674

1 引言

晶硅异质结太阳能电池 (silicon heterojunction solar cells, SHJ) 因为具备高效且低成本的优点而倍受国际光伏市场的关注^[1-3]. 2017年, Yoshikawa 等^[4]使用交叉指式背接触技术的电池结构, 使器件的最终转换效率达到 26.63%, 创造了该结构太阳能电池的世界纪录, 并且通过理论分析得出晶硅太阳能电池转换效率的理论极限效率为 29.1%. 由于 SHJ 电池的非晶硅/晶体硅 (a-Si:H/c-Si) 界面质量的优劣对电池的性能参数具有关键的影响,

SHJ 电池高的开路电压的实现, 依赖于氢化本征非晶硅 (i-a-Si:H) 组成的钝化层, 通过 H 原子饱和 c-Si 表面的悬挂键, 降低光生载流子在界面处的复合和界面态密度. 但由于 i-a-Si:H 通常需要较薄的厚度, 最佳的沉积条件为接近于产生外延生长的条件^[5-7]. 过厚的 i-a-Si:H 也会造成寄生吸收, 从而降低电池的短路电流密度^[8,9]. 因而 i-a-Si:H 薄膜可调控的窗口相对较窄, 在实际实验制备中较难控制. 2015年, Paviet-Salomon 等^[10]通过较高微结构因子的本征层钝化, 在 270 μm 硅片上得到的少子寿命大于 30 ms, 并通过在图形化的 n 型纳米晶硅 (n-nc-Si:H) 上生长全面覆盖的 p 型纳米晶硅

* 国家重点研发计划 (批准号: 2018YFB1500402) 和国家自然科学基金 (批准号: 62074084) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gfhou@nankai.edu.cn

(p-nc-Si:H), 最终得到了 24.42% 的效率. 2020 年, Ru 等^[11] 使用低速生长的超薄本征缓冲层提高钝化效果, 在 244.45 cm² 面积上的电池效率达到 25.11%, 为整硅片大面积 SHJ 异质结电池的世界纪录. 2009 年, Wu 等^[12] 研究发现, 经过热丝化学气相沉积掺杂层后, 由于高反应性的氢原子扩散, i-a-Si:H 的钝化效果得到有效改善, 使用低致密度的 i-a-Si:H 更有助于该现象的产生, 通过沉积较低致密度的 i-a-Si:H 以及后续工艺改善钝化效果, 最终在硅片 (156 mm × 156 mm) 上实现了 741 mV 的高开压以及 23.0% 的转换效率.

此外, 电池的 p 型发射层作为构成 SHJ 电池的重要组成部分之一, 必须具有足够的导电性与透光性, 以及满足能带匹配等方面的要求; 更重要的是, p 型的沉积不能影响 i-a-Si:H 的微结构特性, 确保 a-Si:H/c-Si 界面的钝化效果不会受到影响^[13–16]. 2018 年, Boccard 等^[17] 在 i-a-Si:H 和 p-nc-Si:H 界面处加入 CO₂ 等离子体处理, 从而提高 p-nc-Si:H 的晶化率, 经过该处理的电池得到了 21.5% 的效率. 同年, 德国于利希研究中心的 Richter 等^[18] 探究了不同生长条件下 n, p 掺杂硅氧材料的折射率与光学带隙等特性, 并且分别使用 n 型纳米晶硅氧 (n-nc-SiO_x:H) 和 p 型纳米晶硅氧 (p-nc-SiO_x:H) 作为前后掺杂层, 获得效率为 21.4% 的 SHJ 电池. 2020 年, 中国科学院上海微系统与信息技术研究所通过三步后掺杂法提高催化化学气相沉积生长的 p 型掺杂层的掺杂浓度, 观察到氢原子的扩散有利于下方本征层的氢含量增加, 并且提高了 p 型掺杂层的掺杂浓度, 增加了场效应钝化的效果, 电池效率提升到 22.18%^[19].

本文首先研究在 c-Si 与常规钝化层之间引入超薄的 i-a-Si:H 缓冲层, 用于提高钝化效果, 同时扩展钝化的工艺窗口; 然后提出一种双层结构的发射极, 即在 p-nc-Si:H 薄膜的上面再沉积一层重掺杂的 p 型掺杂层, 用于降低掺杂层与透明导电玻璃 (ITO) 之间的接触电阻, 提高 SHJ 电池的整体性能.

2 实验

2.1 双层钝化层的制备

超薄缓冲层的制备. 实验采用 n 型 (100) 晶向直拉 (Cz) 切割硅片为衬底, 电阻率为 1.5—7.0 Ω·cm, 厚度为 180 μm. 通过等离子体化学气相沉积 (plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD) 系统制备薄膜, 具体参数为: 氢稀释比 (H₂:SiH₄) R_H = 140:20, 功率为 1 W, 衬底温度为 160 °C, 极板间距为 20 mm.

常规钝化层的制备. 在缓冲层上沉积常规钝化层, 工艺参数为: 氢稀释比 R_H = 110:20, 功率为 4 W, 衬底温度为 160 °C, 极板间距为 20 mm. 含双层钝化层的 SHJ 电池结构如图 1(a) 所示.

2.2 双层 p 型发射极的制备

前掺杂层的制备. 采用 PECVD, 硅烷:氢气:三甲基硼 (SiH₄:H₂:TMB) = 4:400:1.2, 沉积功率为 10 W, 极板间距为 20 mm, 沉积厚度为 13 nm.

后掺杂层的制备. 采用 PECVD, 硅烷:氢气:三甲基硼 (SiH₄:H₂:TMB) = 4:200:4.8, 沉积功率为 10 W, 极板间距为 20 mm, 沉积厚度为 5 nm. 含双层发射极的 SHJ 电池结构如图 1(b) 所示.

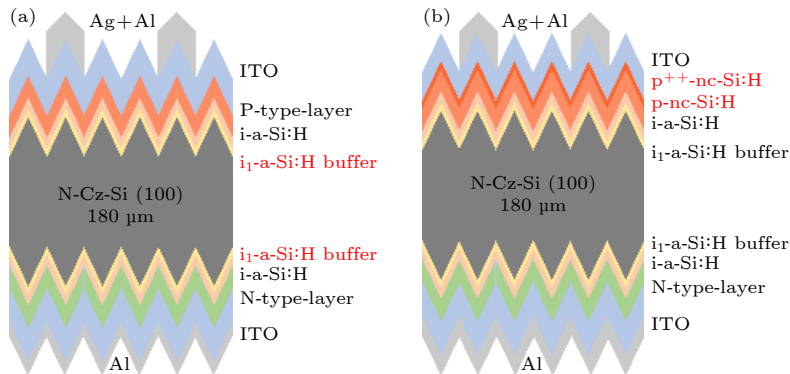


图 1 (a) 含双层钝化层的 SHJ 电池示意图; (b) 含双层发射极的 SHJ 电池示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of the SHJ solar cell with the double passivation layer; (b) schematic diagram of the SHJ solar cell with the double emitting layer.

2.3 性能测试与表征

不同硅薄膜生长厚度由 ET200 台阶仪获得. 原子力显微镜测试薄膜表面粗糙度. 拉曼光谱仪用来测试所制备硅薄膜的结晶程度. 硅薄膜电导率由共面光暗电导率测试获得. 硅薄膜载流子浓度由霍尔测试获得. 硅薄膜激活能由激活能自动测试系统获得. 样品少数载流子寿命由 WCT-120 型少数载流子寿命测试仪获得. 硅薄膜材料微结构特性由傅里叶变换红外光谱测试 (Fourier transform infrared, FTIR) 获得. SHJ 电池外量子效率 (external quantum efficiency, EQE) 由 QEX10 型太阳能电池量子效率测试系统获得. 所有电池样品由双光源太阳模拟器 (WXS-156S-L2, AM1.5GMM) 在室温 25 °C、功率密度为 100 mW/cm² 的条件下进行测试.

3 结果与讨论

3.1 双层钝化层对 SHJ 太阳能电池的影响

对单层钝化层改变氢稀释比进行实验, 图 2 为不同氢稀释比的单层钝化层在 inip 结构上的少数寿命与隐含开路电压 (implied- V_{OC} , iV_{OC}) 的变化情况.

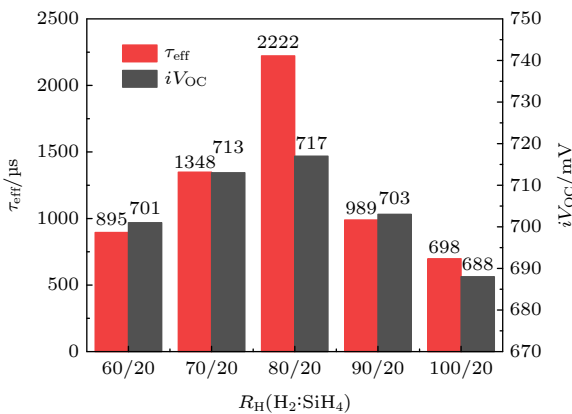


图 2 不同氢稀释比的单层钝化层的少数寿命和 iV_{OC} 的变化趋势

Fig. 2. Minority carrier lifetime and variation trend of iV_{OC} in single passivation layer with different hydrogen dilution ratio.

由图 2 可知, 单层钝化层最佳少数寿命为 2.2 ms, 但是当氢稀释比高于 4 时, 少数寿命下降明显, 这是由于钝化层发生外延导致钝化质量恶化, 因为外延硅中的氢含量是非晶硅中的 1/100—1/30, 较低的氢含量导致无法获得好的钝化结果,

另外, 外延硅中含有较多的与团簇氢相关的缺陷, 这对电池性能造成不利影响.

由于单层钝化层沉积过程中容易发生外延现象, 导致所能调节的实验窗口过窄, 很大程度上限制了硅异质结太阳能电池性能的提高 [20,21], 为了有效防止外延, 提高钝化层性能, 拓宽实验窗口, 在钝化层与 c-Si 之间插入一层超薄的缓冲层, 研究了双层钝化层对钝化效果的影响.

3.1.1 缓冲层对钝化效果的影响

将低功率高氢稀释比 (1 W, $R_H = 140:20$) 的缓冲层与常规钝化层做了 FTIR 图谱测试, 并对图谱进行了分峰处理, 如图 3 所示.

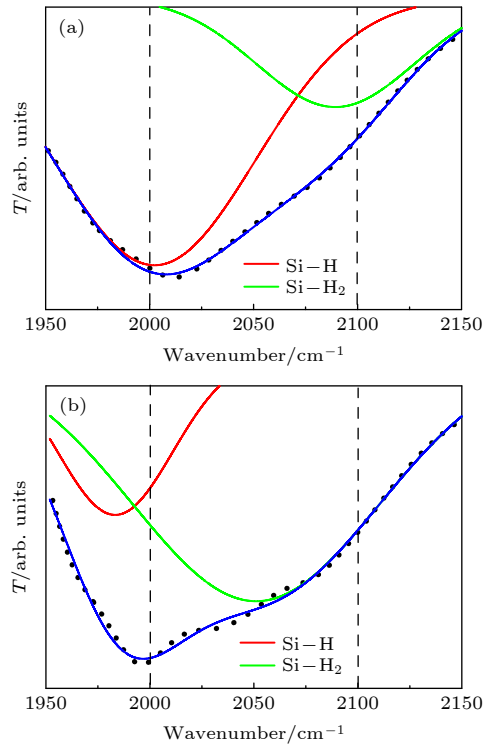


图 3 (a) 常规钝化层的 FTIR 图; (b) 缓冲层的 FTIR 图谱
Fig. 3. FTIR spectra of (a) conventional passivation layers and (b) buffer passivation layers.

从图 3 可以看出, 低功率高氢稀释比的缓冲层中, 二氢化物 ($Si-H_2$) 键的占比明显比常规钝化层多. 一般来说, 具有较低微观结构因子 (R) 的高质量 i-a-Si:H 材料有利于 SHJ 太阳能电池的性能, 然而, 在 PECVD 过程中, a-Si:H/c-Si 界面的外延生长不利于表面钝化 [9,22]. 尽管存在缺陷, 但是富氢的缓冲层仍有希望通过形成突变的 a-Si:H/c-Si 界面来改善钝化, 其原因为在 PECVD 工艺中, 在低

沉积速率条件下,可以更有效地饱和硅悬挂键,并尽可能减缓界面外延生长.同时由于缓冲层具有很高的氢稀释比,而且结构疏松,所以 Si—H₂ 键占据了主导地位.尽管这与以往对钝化层最佳效果的认知有很大不同,但是因为缓冲层的超薄特性,以及在后续钝化层的沉积过程中, Si—H₂ 键断裂,从而释放出更多的氢来饱和界面的悬挂键,从而达到了提高少数载流子寿命、增强钝化效果的目的.

低功率高氢稀释比的缓冲层中 Si—H₂ 键过多,当缓冲层厚度增加时,过多的缺陷会使得钝化效果无法得到优化,因此缓冲层的厚度至关重要,图 4 给出了不同厚度缓冲层对少数寿命和 iV_{OC} 的影响.可以看出,缓冲层厚度在 0.4—1 nm 之间时,少数寿命稳定在 3 ms 左右,说明缓冲层对钝化性能起到改善作用,当缓冲层厚度超过 1 nm 后,少数寿命与 iV_{OC} 有很大的下降,这表明疏松的缓冲层已经影响到整体钝化层的性能,而因为低功率缓冲层的存在,后续沉积的钝化层的外延性大大降低,钝化层优化的条件相较之前有了扩宽.

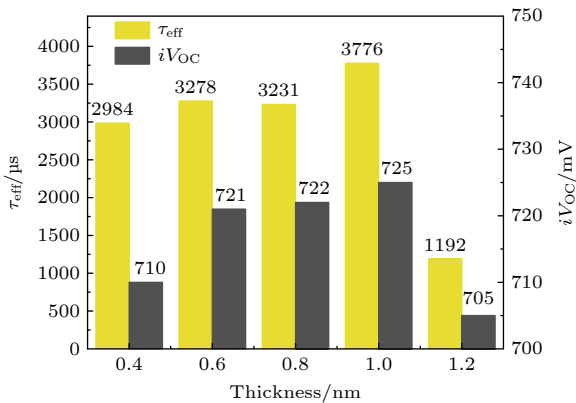


图 4 不同厚度缓冲层的少数寿命和 iV_{OC} 的变化趋势
Fig. 4. Minority carrier lifetime and iV_{OC} of samples with different thicknesses of buffer layer.

3.1.2 常规钝化层对钝化效果的影响

为了获得更好的钝化性能,在缓冲层厚度为 1 nm 的基础上对常规钝化层氢稀释比进行了进一步优化,氢稀释比从 $R_H = 80:20$ 增加到 $R_H = 120:20$,整体钝化层厚度保持一致,为 5 nm^[23].图 5 为增加常规钝化层氢稀释比对少数寿命与 iV_{OC} 的影响.可以看出,氢稀释比在 $R_H = 80:20$ — $110:20$ 范围内均有良好的钝化效果,因为低功率缓冲层的加入为 i-a-Si:H 提供了保护层,同时由于缓冲层是

低功率的,可以有效地饱和悬挂键,所以与 c-Si 接触的地方很难形成外延,并且低功率的缓冲层对 c-Si 衬底的轰击更小,对于常规钝化层来说,双层钝化层能够拓宽钝化工艺的窗口.

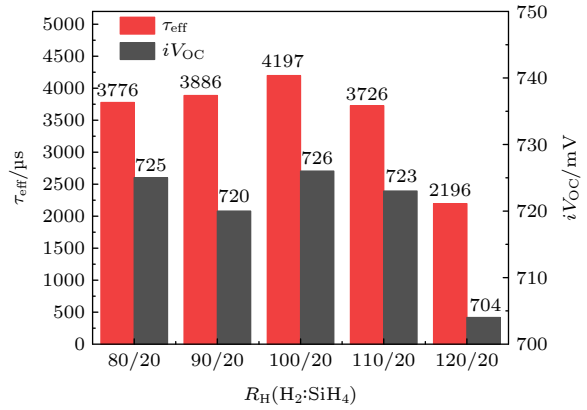


图 5 不同氢稀释比的双层钝化层的少数寿命与 iV_{OC} 的变化趋势
Fig. 5. Minority carrier lifetimes and iV_{OC} of samples of double passivation layer for different hydrogen dilution ratio.

为了验证双层钝化层的可重复性,同时与常规钝化层进行对比,采用常规单层钝化层与双层钝化层在 inip 结构上各做了 10 组实验进行统计学分析.图 6 为两种不同钝化层的少数寿命的箱线图,可以明显地看出,采用单钝化层时的样品钝化寿命多数不超过 2.5 ms,而采用双钝化层的样品钝化寿命多数超过 3.5 ms,这说明低功率缓冲层可以很好地抑制外延的发生,而且该低功率缓冲层对钝化层实验的可重复性也起到重要的作用.当常规钝化层的氢稀释比 $R_H = 110:20$ 时,钝化效果最好,并且具有很好的可重复性.

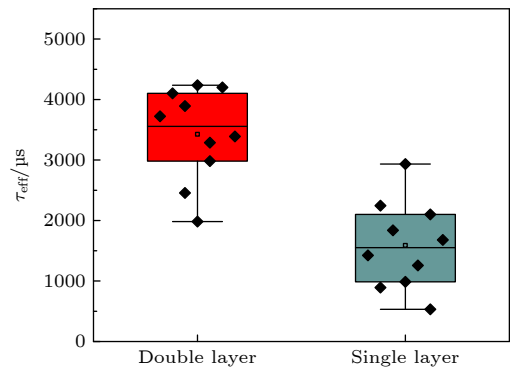


图 6 双层钝化层与单层钝化层的少数寿命箱线图
Fig. 6. Minority carrier lifetimes of samples with double passivation layers or single passivation layers.

3.2 双层发射层对 SHJ 太阳电池的影响

3.2.1 前掺杂层对 SHJ 太阳电池的影响

发射极过高的掺杂会带来更多的缺陷,使悬挂键数量与自由载流子浓度增加^[24-26],因此我们采用轻掺杂的 p-nc-Si:H 作为发射层的前掺杂层.首先为了获得更接近实际 SHJ 电池中发射层的电学性能,在玻璃上沉积厚度 5 nm 的 i-a-Si:H,再沉积 15 nm 的 p 型掺杂层,然后进行相应的电学测试.图 7 所示为 p 型掺杂层载流子浓度、电导率与激活能随掺杂量的变化.

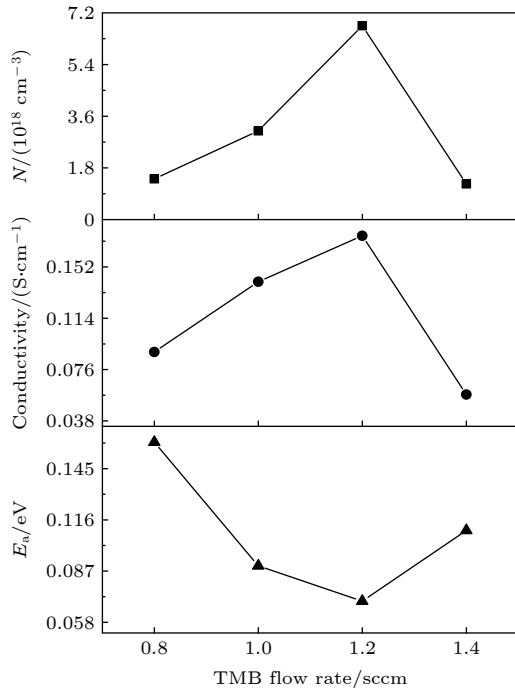


图 7 不同掺杂量的 p 型掺杂层的载流子浓度、电导率以及激活能

Fig. 7. Carrier density, conductivity and activation energy of p-type layers with different TMB flow rate.

从图 7 可以看出,当 TMB 的流量从 0.8 sccm (1 sccm = 1 mL/min) 增至 1.2 sccm 时,电导率从 0.089 S/cm 上升至 0.175 S/cm,激活能从 0.16 eV 下降至 0.07 eV,载流子浓度从 $1.42 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 上升至 $6.75 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,而当 TMB 流量继续增加时,电导率出现明显下降,激活能上升至 0.11 eV,载流子浓度下降至 $1.24 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.为进一步验证,对不同掺杂量的 p 型掺杂层进行了拉曼测试,如图 8 所示.

从图 8 可以看出, TMB 掺杂流量在 1.2 sccm

之前,结晶率基本持平,而当超过 1.2 sccm 时,薄膜结晶度下降明显,原因是掺杂量的增加使得缺陷增加,同时抑制结晶化作用进一步加强,结晶度下降从而导致电导率、载流子浓度下降以及激活能上升^[27].

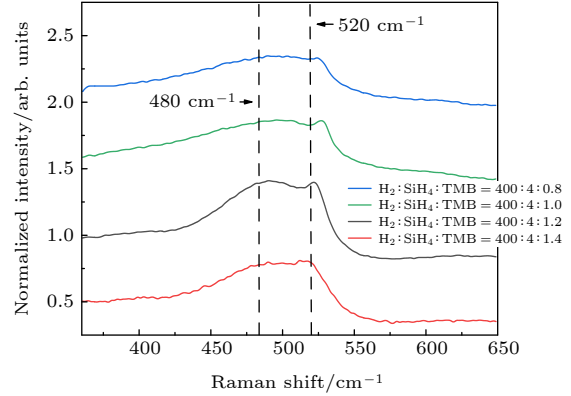


图 8 不同掺杂量的 p 型掺杂层的 Raman 图谱

Fig. 8. Raman spectra of p-type layers with different TMB flow rate.

将上述不同掺杂量的 p 型掺杂层作为 SHJ 电池的发射极,并对相应电池的各个参数进行比较,结果如图 9 所示.从图 9 可以看出,当 p 型掺杂层的掺杂流量从 0.8 sccm 提升至 1.2 sccm 时,开路电压 (V_{OC}) 从 705 mV 提升至 710 mV,说明掺杂量的提高使得掺杂层与衬底之间的能带弯曲增加,而填充因子 (FF) 从 62.07% 提升至 64.35%,这归因于掺杂量的提高减小了接触电阻^[28,29].而当掺杂流量继续上升时,电池性能出现下降,尤其是 V_{OC} ,这是因为过高的掺杂流量使得 p 型掺杂层出现过多的缺陷,掺杂效率降低,导致电导率下降,发射极无法在 c-Si 表面产生足够的能带弯曲,同时过高的掺杂会增加悬挂键密度,从而降低了钝化效果^[16,30].得到的最佳条件为 $\text{H}_2:\text{SiH}_4:\text{TMB} = 400:4:1.2$,此时电池效率达到最高.

3.2.2 后掺杂层对 SHJ 太阳电池的影响

通过前面对前掺杂层的优化,获得了初始效率 (Eff) 达到 17.65% 的 SHJ 太阳电池,为了进一步获得更大的内建电势以实现有效的电子-空穴分离,且与 ITO 有良好的接触,使得 FF 与电池效率得到提升^[13],在前述前掺杂层的基础上,提出如图 1(b) 所示的双层发射极,也就是在 p/ITO 之间加入一层重掺杂的 p 型掺杂层 ($\text{p}^{++}\text{-nc-Si:H}$).

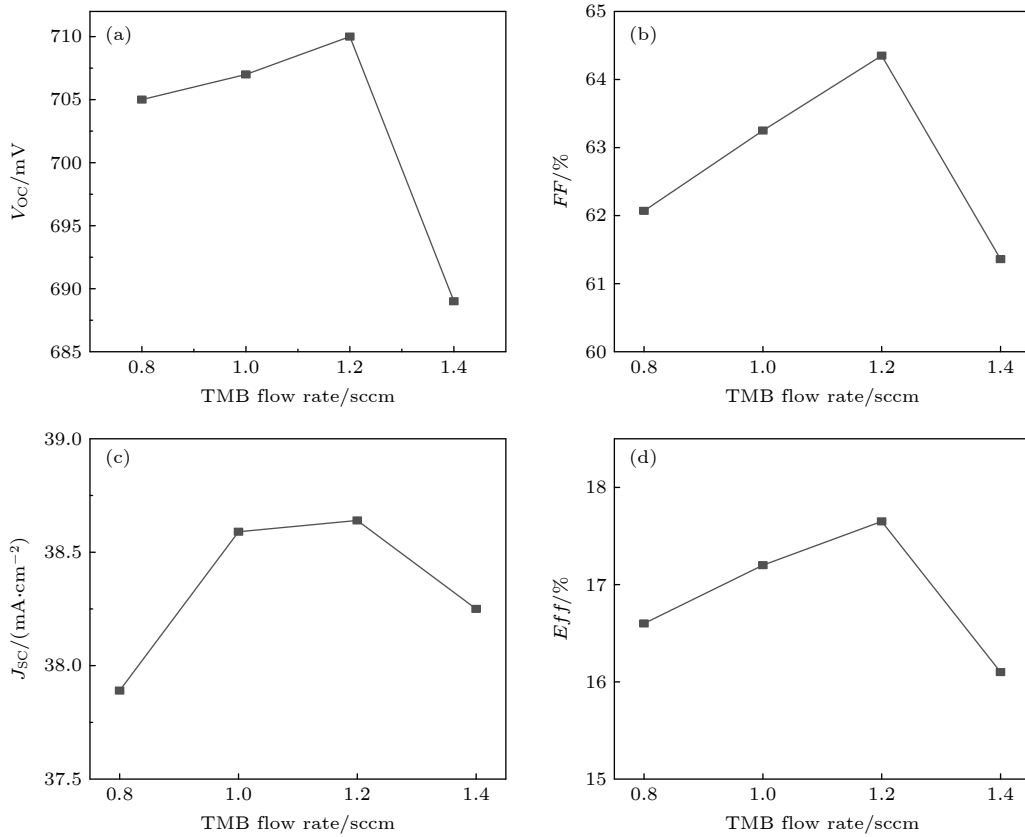


图 9 SHJ 电池性能参数随 p 型掺杂层的掺杂量的变化 (a) V_{OC} ; (b) FF ; (c) J_{sc} ; (d) Eff

Fig. 9. J - V parameters of SHJ solar cells with different TMB flow rates in p-type layers: (a) V_{OC} ; (b) FF ; (c) J_{sc} ; (d) Eff .

为了保证 p^{++} -nc-Si:H 的掺杂效率, 从氢稀释比与掺杂量两方面来进行优化. 重掺杂层采用不同氢稀释比时相应的器件性能参数见表 1. 在最优氢稀释比下不同掺杂量相应的器件性能参数如表 2 所列. 由表 1 可知, 氢稀释比的增加使得电池的效率先增后减, 其中 V_{OC} 基本没有变化, J_{SC} 略有上升, 而 FF 提升明显, 说明氢稀释比的增加使得掺杂效率上升, 重掺杂改善了 ITO 与 p 型掺杂层的接触, 载流子传输特性增强, 因此 FF 显著增加, 但是过高的氢稀释比使得重掺杂层生长速度减慢, 大量的氢气流量会对前掺杂层造成刻蚀, 这是当氢稀释比 $R_H > 60$ 以后, FF 下降的原因. 表 2 是在最佳氢稀释比的基础上增加掺杂量, 可以看出, TMB 流量增加至 4.8 sccm 时, FF 与 J_{SC} 都有小幅度提升, 这是因为掺杂量的增加使得能带进一步弯曲, 增加了少数载流子的隧穿, 同时增大了内建电场, 降低了 p/ITO 之间的接触电阻, 而当流量增加至 5.6 sccm 以上时, FF 从 71.86% 下降至 63.20%, 说明过高的掺杂使掺杂效率降低, 过多的缺陷使得接触电阻增加, 从而导致 FF 的大幅度下降 [31,32].

表 1 重掺杂层不同氢稀释比的电池具体参数

Table 1. J - V parameters of SHJ solar cells with different hydrogen dilution ratio in the p^{++} -nc-Si:H layer.

$H_2:SiH_4:TMB$	$J_{SC}/mA \cdot cm^{-2}$	V_{OC}/V	$FF/\%$	$Eff/\%$
120:4:4	38.7	0.709	66.57	18.26
160:4:4	38.91	0.710	69.08	19.08
200:4:4	39.15	0.709	70.84	19.66
240:4:4	38.4	0.708	65.56	17.8

表 2 重掺杂层不同掺杂量的电池具体参数

Table 2. J - V parameters of SHJ solar cells with different TMB flow rate in the p^{++} -nc-Si:H layer.

$H_2:SiH_4:TMB$	$J_{SC}/mA \cdot cm^{-2}$	V_{OC}/V	$FF/\%$	$Eff/\%$
200:4:4	39.15	0.709	70.84	19.66
200:4:4.8	39.37	0.708	71.86	20.03
200:4:5.6	38.79	0.709	69.71	19.17
200:4:6.4	38.7	0.710	63.20	17.3

为了研究双层 p 型发射极有效提升电池性能的原因, 制备出 p-nc-Si:H 和 p-nc-Si:H/ p^{++} -nc-Si:H (重掺杂) 两种发射极材料作为对比, 两种材料的厚度均控制为 15 nm, 测试了两种不同材料的

电导率以及载流子浓度, 测得单层发射极的电导率为 0.175 S/cm , 载流子浓度为 $6.75 \times 10^{18} / \text{cm}^3$, 略低于双层发射极的电导率 0.402 S/cm , 载流子浓度 $2.91 \times 10^{19} / \text{cm}^3$, 说明重掺杂层对材料的电学性能起到了有益的效果, 同时因为沉积 $\text{p}^{++}\text{-nc-Si:H}$ 的氢稀释比较低, 为确保整体材料的结晶度, 对两种材料的结晶度进行了 Raman 图谱的测试, 结果如图 10 所示. 可以看出, 双层 p 型发射极的结晶度要略高于单层 p 型发射极的结晶度, 说明在 p-nc-Si:H 上沉积的 $\text{p}^{++}\text{-nc-Si:H}$ 虽然氢稀释比较低, 但是由于生长在 p-nc-Si:H 上, 使得薄膜更易结晶.

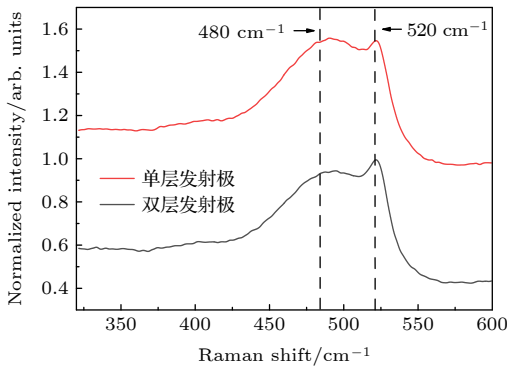


图 10 两种不同材料的 p 型掺杂层的 Raman 图谱
Fig. 10. Raman spectra of single-layer emitter and double-layer emitter.

将这两种不同的发射极应用在 SHJ 电池, 结果见图 11. 可以看出, 双层 p 型发射极的 J_{SC} 和 FF 都要高于单层 p 型发射极, 填充因子从 64.35% 提升至 71.86% , 原因在于双层的 p 型发射极改善

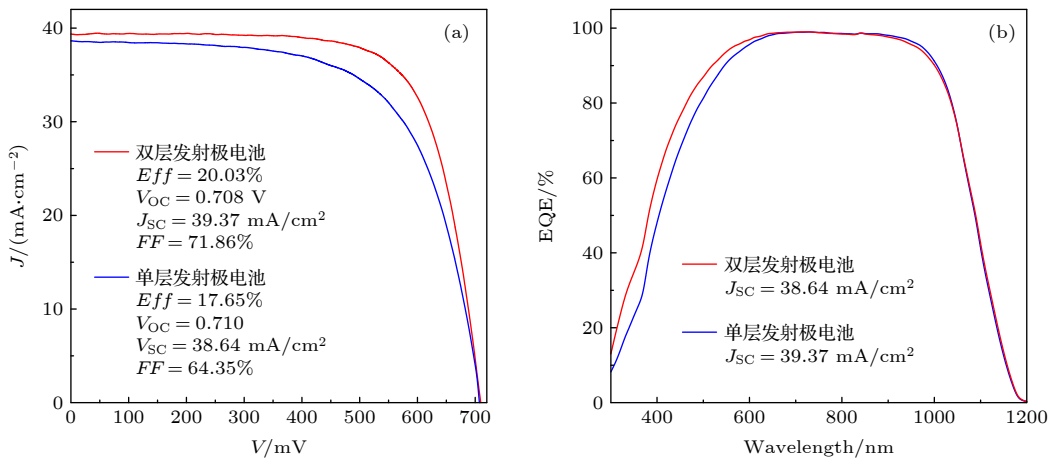


图 11 不同 p 型发射极对应的 SHJ 电池 (a) J - V 特性曲线; (b) EQE 曲线
Fig. 11. (a) J - V curves and (b) EQE curves of SHJ solar cells with different p-type emitters.

了与 ITO 的接触, 增强了内建电场对载流子的迁移能力, 并且重掺杂的 p 型掺杂层具有较高的掺杂浓度和较高的费米能级, 改善了 ITO/p 的接触特性. 同时 EQE 小幅度上升, 且在短波段最为明显, 因为光伏器件对短波的吸收主要集中在窗口层, 而对长波的吸收则集中在硅片上, 当表面窗口层的掺杂浓度为梯度掺杂时, 通过表面的短波光越多, 短波光被 c-Si 硅片层吸收, 导致光子被转换成更多的载流子^[33]. 光吸收的增强提高了载流子的利用效率, 从而有利于提高电池的电流密度.

采用本文提出的双层钝化层来提高钝化性能, 双层发射极来提高接触效果, 最终获得了最高效率为 20.96% 的 SHJ 太阳电池, 其中 V_{OC} 为 710 mV , J_{SC} 为 39.88 mA/cm^2 , FF 为 74.02% .

为了验证双层发射极优化器件性能的可重复性, 对双层发射极电池与单层发射极电池进行了统计学分析, 图 12 为 10 组不同发射极结构的 SHJ 太阳电池的光伏参数. 可以看出, 双层发射极结构太阳电池 J_{SC} 平均值在 39.25 mA/cm^2 左右, V_{OC} 平均值在 708 mV 左右, FF 平均值在 73% 左右, 均高于单层结构的 SHJ 电池.

4 结 论

为改善 SHJ 电池的钝化效果和填充因子, 需要优化钝化层与发射极的工艺, 本文围绕双层钝化层和双层发射极两方面对提升 SHJ 电池性能展开了研究. 结果表明, 加入缓冲层后, 钝化层少子寿命明显提高, 同时工艺窗口也有一定拓宽. 此外,

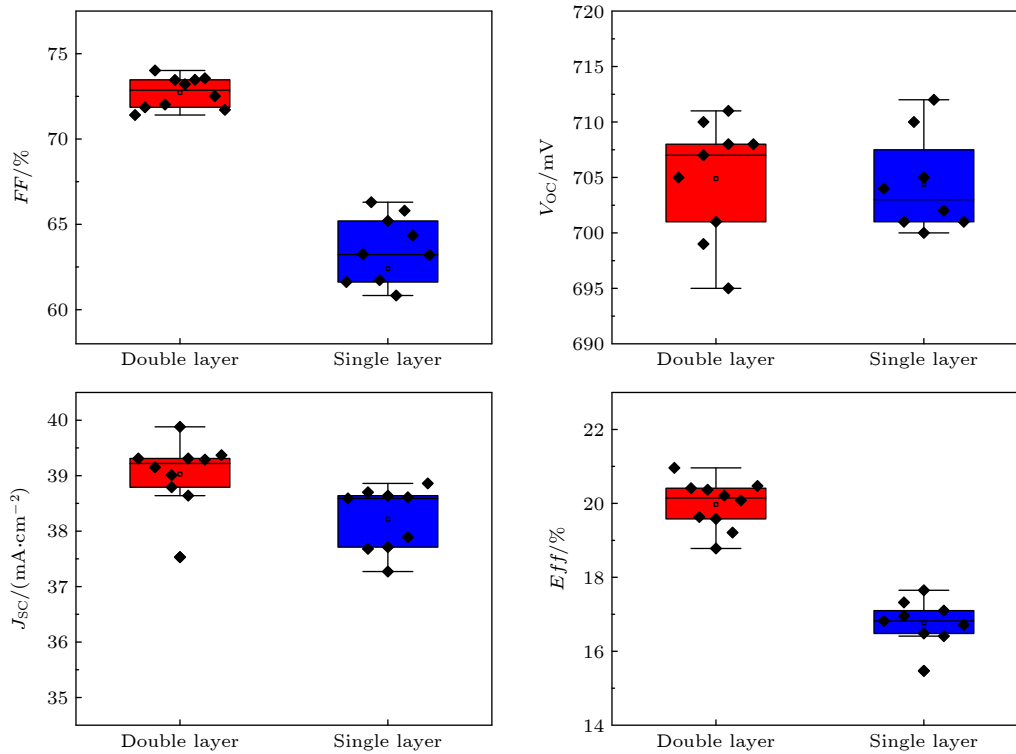


图 12 双层发射极 SHJ 电池与单层发射极 SHJ 电池的 J - V 参数箱线图

Fig. 12. Illuminate J - V parameters of SHJ solar cells with double emitter layer and single layer emitter.

轻掺杂的 p-nc-Si:H 可以减弱掺杂剂向本征钝化层的扩散, 保证良好的钝化效果, 同时重掺杂的 p⁺⁺-nc-Si:H 可以提供足够的内建电场, 并改善 p/ITO 的接触特性, 双层发射极获得了更高的 SHJ 电池效率. 采用本文提出的双层钝化层和双层发射极, 在商业化制绒的硅片上获得了效率达到 20.96% 的硅异质结太阳能电池.

参考文献

- [1] Li Z X, Wu S F, Lei L Z 2018 *Prices Monthly* **12** 1 (in Chinese) [李志学, 吴硕锋, 雷理钊 2018 价格月刊 **12** 1]
- [2] Chen C, Zhang W, Jia R, Zhang D S, Xing Z, Jin Z, Liu X Y 2013 *Science China* **43** 708 (in Chinese) [陈晨, 张巍, 贾锐, 张代生, 邢钊, 金智, 刘新宇 2013 中国科学 **43** 708]
- [3] Rehman A U, Lee S H 2013 *Sci. World J.* **11** 470347
- [4] Yoshikawa K, Yoshida W, Irie T, Kawasaki H, Konishi K, Ishibashi H, Asatani T, Adachi D, Kanematsu M, Uzu H, Yamamoto K 2017 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **173** 37
- [5] Taguchi M, Yano A, Tohoda S, Matsuyama K, Nakamura Y, Nishiwaki T, Fujita K, Maruyama E 2014 *IEEE J. Photovoltaics* **4** 96
- [6] Okuda K, Okamoto H, Hamakawa Y 1983 *Jpn. J. Appl. Phys.* **22** L605
- [7] Neumuller A, Sergeev O, Heise S J, Bereznev S, Volobujeva O, Salas J F L, Vehse M, Agert C 2018 *Nano Energy* **43** 228
- [8] Geissbuhler J, De Wolf S, Demareux B, Seif J P, Alexander D T L, Barraud L, Ballif C 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 23
- [9] Mews M, Schulze T F, Mingirulli N, Korte L 2013 *Appl. Phys. Lett.* **102** 122106
- [10] Paviet-Salomon B, Tomasi A, Descoedres A, Barraud L, Nicolay S, Despeisse M, Wolf S D, Ballif C 2015 *IEEE J. Photovoltaics* **5** 1293
- [11] Ru X, Qu M, Wang J, Ruan T, Yang M, Peng F, Long W, Zheng K, Yan H, Xu X 2020 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **215** 110643
- [12] Wu Z, Zhang L, Chen R, Liu W, Li Z, Meng F, Liu Z 2019 *Appl. Surf. Sci.* **475** 504
- [13] Korte L, Conrad E, Angermann H, Stangl R, Schmidt M 2009 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **93** 905
- [14] Ling Z P, Ge J, Mueller T, Wong J, Aberle A G 2012 *Energy Procedia* **15** 118
- [15] Pysch D, Meinhard C, Harder N P, Hermle M, Glunz S W 2011 *J. Appl. Phys.* **110** 094516
- [16] Lee Y, Kim H, Iftiqar S M, Kim S, Kim S, Ahn S, Lee Y J, Dao V A, Yi J 2014 *J. Appl. Phys.* **116** 244506
- [17] Boccard M, Monnard R, Antognini L, Ballif C 2018 *AIP Conf. Proc.* **1999** 040003
- [18] Richter A, Smirnov V, Lambertz A, Nomoto K, Welter K, Ding K N 2018 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **174** 196
- [19] Li Z, Zhang L, Wu Z, Liu W, Chen R, Meng F, Liu Z 2020 *J. Appl. Phys.* **128** 045309
- [20] Ding K N, Aeberhard U, Finger F, Rau U 2012 *Phys. Status Solidi R* **6** 193
- [21] Mazzarella L, Kirner S, Gabriel O, Schmidt S S, Korte L, Stannowski B, Rech B, Schlattmann R 2017 *Phys. Status Solidi A* **214** 1532958
- [22] Descoedres A, Barraud L, De Wolf S, Strahm B, Lachenal D, Guérin C, Holman Z C, Zicarelli F, Demareux B, Seif J, Holovsky J, Ballif C 2011 *Appl. Phys. Lett.* **99** 123506
- [23] Fujiwara H, Kaneko T, Kondo M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 133508

- [24] De Wolf S, Beaucarne G 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 022104
- [25] De Wolf S, Kondo M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 112109
- [26] Mazzarella L, Kirner S, Stanowski B, Korte L, Rech B, Schlattmann R 2015 *Appl. Phys. Lett.* **106** 023902
- [27] Zhang X D, Zhao Y, Gao Y T, Chen F, Zhu F, Wei C C, Sun J, Geng X H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 6697 (in Chinese) [张晓丹, 赵颖, 高艳涛, 陈飞, 朱锋, 魏长春, 孙建, 耿新华 2006 *物理学报* **55** 6697]
- [28] Mews M, Liebhaber M, Rech B, Korte L 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 013902
- [29] Kanevce A, Metzger W K 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 094507
- [30] Madani Ghahfarokhi O, von Maydell K, Agert C 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 113901
- [31] Mishima T, Taguchi M, Sakata H, Maruyama E 2011 *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **95** 18
- [32] Masuko K, Shigematsu M, Hashiguchi T, Fujishima D, Kai M, Yoshimura N, Yamaguchi T, Ichihashi Y, Mishima T, Matsubara N, Yamanishi T, Takahama T, Taguchi M, Maruyama E, Okamoto S 2014 *IEEE J. Photovoltaics* **4** 1433
- [33] Hao L C, Zhang M, Ni M, Shen X L, Feng X D 2019 *J. Electron. Mater.* **48** 4688

Design and optimization of passivation layers and emitter layers in silicon heterojunction solar cells*

Zhang Bo-Yu¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Zhou Jia-Kai¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Ren Cheng-Chao¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

Su Xiang-Lin¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Ren Hui-Zhi¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Zhao Ying¹⁾²⁾³⁾⁴⁾

Zhang Xiao-Dan¹⁾²⁾³⁾⁴⁾ Hou Guo-Fu^{1)2)3)4)†}

1) (*Institute of Photoelectronic Thin Film Devices and Technology of Nankai University, Tianjin 300350, China*)

2) (*Key Laboratory of Photoelectronic Thin Film Devices and Technology of Tianjin, Tianjin 300350, China*)

3) (*Engineering Center of Thin Film Photoelectronic Technology of Ministry of Education, Tianjin 300350, China*)

4) (*Sino-Euro Joint Research Center for Photovoltaic Power Generation of Tianjin, Tianjin 300350, China*)

(Received 10 April 2021; revised manuscript received 18 May 2021)

Abstract

Silicon heterojunction (SHJ) solar cells have attracted much attention in the international photovoltaic market due to their high efficiencies and low costs. The quality of amorphous silicon/crystalline silicon (a-Si:H/c-Si) interfaces of SHJ solar cells has a key influence on the device performance. Therefore, the carrier recombination rate of a-Si:H/c-Si interface needs to be effectively controlled. In addition, as the important component of SHJ solar cells, the p-type emitter must meet the requirements for high conductivity, high light transmittance, and energy band matching with c-Si. The research contents and the relevant achievements of this paper include the following aspects.

Firstly, in order to reduce the surface defects and realize the energy band alignment of a-Si:H/c-Si interface, the effect of passivation layer on passivation effect is studied. An ultra-thin buffer layer deposited by a low power and a high hydrogen dilution ratio is inserted between the conventional passivation layer and c-Si to improve the passivation effect and broaden the process window of passivation layer. The effects of the buffer layer thickness and hydrogen dilution ratio on passivation quality are further studied, and the best experimental conditions of buffer layer are obtained. The experimental results show that the sample with double-layered passivation layer is more stable than the conventional passivation layer. The minority carrier lifetime of the sample with single conventional passivation layer is 3.8 ms and the iV_{OC} is 712 mV, while the minority carrier lifetime of the sample with double-layered passivation layer is 4.197 ms and the iV_{OC} is 726 mV.

Secondly, for the p-type emitters of silicon heterojunction solar cells, the effects of doping level on the

* Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2018YFB1500402) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62074084).

† Corresponding author. E-mail: gfhou@nankai.edu.cn

photoelectric properties of p-type hydrogenated nanocrystalline silicon (nc-Si:H) thin films are studied. On this basis, the p^{++} -nc-Si:H/p-nc-Si:H double-layer emitter with wide band gap and high conductivity is designed and fabricated. By analyzing the optical and electrical properties of different emitters, it is found that p-nc-Si:H has good electrical and optical properties. Owing to the high doping efficiency of nc-Si, a small amount of doping can obtain high conductivity. Lightly doped p-nc-Si:H provides a better contact with the passivation layer, while heavily doped p^{++} -nc-Si:H can not only provide enough built-in electric field, but also improve the contact characteristics of p/ITO, thus enhancing the output characteristics of the cell. At the same time, the deposition of p-nc-Si:H layer with high hydrogen dilution ratio can also implement the hydrogen plasma treatment on the passivation layer, the reduction of the dangling bonds on the surface of the c-Si, the enhancement of the chemical passivation effect, and thus improving the open circuit voltage of the cell.

Finally, a silicon heterojunction solar cell with an efficiency of 20.96% is obtained based on the commercial czochralski silicon wafer, with an open circuit voltage of 710 mV, a short circuit current density of 39.88 mA/cm² and filling factor of 74.02%.

Keywords: silicon heterojunction solar cell, passivation layer, emitter, composite structure

PACS: 84.60.Jt, 88.40.H-, 88.40.hj

DOI: [10.7498/aps.70.20210674](https://doi.org/10.7498/aps.70.20210674)