

并联双结太阳电池的设计与研究

黄倩露 周海锋 钱一伟 王 强

南通大学电子信息学院, 江苏 南通 226019

摘要 设计了一种并联双结(DPJ)单晶硅太阳电池,该电池在同一个单晶硅太阳电池内形成一个PN结和一个NP结,分别吸收短波能量与长波能量。两个结共用一个N型区,通过N型区形成并联结构。DPJ太阳电池的短路电流比传统单晶硅太阳电池的短路电流提高约11.9%,电池的开路电压基本保持不变。研究了DPJ太阳电池的最佳工艺条件,结果显示:随着深结和浅结扩散浓度的增加,电池的光谱响应强度均先增加后减小;深结扩散完成后,随着杂质再分布扩散温度的提高和扩散时间的增加,电池的光谱响应强度先增加后基本保持不变;随着浅结扩散时间和温度的增加,电池的光谱响应强度有微弱增加。

关键词 材料; 硅太阳电池; 双结太阳电池; 光谱响应

中图分类号 TM914.4+1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.121601

Design and Study of Double Parallel Junctions Solar Cells

Huang Qianlu Zhou Haifeng Qian Yiwei Wang Qiang

School of Electric and Information, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China

Abstract A double parallel junctions (DPJ) silicon solar cell structure is designed. The solar cell forms a PN junction and a NP junction in the same monocrystalline silicon solar cell, respectively, which absorbs short wave energy and long wave energy. The two junctions share a N-type region and form a parallel structure by the N-type region. The short circuit current of the solar cells is increased about 11.9% compared with the traditional monocrystalline silicon solar cells, and the open circuit voltage of the solar cells keeps constant. The optimal technological condition of DPJ solar cells is studied, and the results show that the spectrum response of the solar cells enhances firstly, and then decreases with the increasing of diffusion concentration for deep junction and shallow junction. The spectrum response of the solar cells increases firstly, then remains unchanged with the redistribution diffusion temperature raising and the diffusion time extending of the impurities after the diffusion of deep junction is completed. The spectrum response of the solar cells increases slightly with the increase of shallow junction diffusion time and temperature.

Key words materials; silicon solar cells; double junctions solar cells; spectrum response

OCIS codes 160.6030; 350.6050; 300.6170

1 引言

单晶硅太阳电池是目前量产的硅基太阳电池中转换效率最高的电池,其效率约为20.3%^[1]。但单晶硅太阳电池的转换效率依然不能满足实际需求,人们需要研究新型的硅基太阳电池来进一步提高电池的转换效率,而提高电池对光的吸收是增强电池转换效率的重要手段^[2]。

太阳光能量是随着波长非均匀分布的,因此要实现了对光能的良好吸收和转化,必须针对不同波长的光进

收稿日期: 2016-07-08; **收到修改稿日期:** 2016-08-26; **网络出版日期:** 2016-11-20

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2015045)、南通市科技计划项目(GY2015010)、江苏省前瞻性联合研究项目(BY2016053-10)、南通大学研究生科研创新计划资助项目(YKC16013)

作者简介: 黄倩露(1992—),女,硕士研究生,主要从事太阳能电池器件与工艺方面的研究。E-mail: 714318954@qq.com

导师简介: 王 强(1978—),男,博士,副教授,主要从事太阳能电池器件与工艺方面的研究。

E-mail: wang_q@ntu.edu.cn(通信联系人)

行太阳能电池对其的吸收研究。结果表明,短波吸收主要位于电池上表面 300 nm 以内的位置,长波吸收主要位于电池内部 600~1000 nm 的位置^[3]。但是,由于光的能量不同,所以吸收的最佳深度并不确定。传统的单晶硅太阳能电池只有一个 PN 结,为了能兼顾吸收长短波的能量,电池结的深度一般为 300~500 nm^[4],这既没有有效地吸收太阳光的短波能量,又没有很好地利用太阳光的长波能量。

双结薄膜太阳能电池和化合物太阳能电池在不同的位置形成深浅不同的两个 PN 结,这两个 PN 结分别吸收太阳光的短波和长波能量,从而大大提高了电池的转换效率。贝尔实验室的 Herry C H 等^[5]对电池效率与结的数目的关系进行了理论计算,得出单结、双结和三结电池的极限效率分别为 37%、50%和 56%。从 Herry 等^[5]的计算结果看出,双结电池比单结电池转换效率高,且随着结数目的继续增加,效率也持续增加。美国国家能源部可再生能源实验室最新研发的双结化合物太阳能电池的转换效率达到 29.8%^[6]。虽然目前双结电池具有转换效率高、弱光发电好等特点,但其设备投入大,工艺复杂,成本高,这些问题使得双结化合物太阳能电池的市场竞争力较弱。因此有必要研究一种生产工艺与现有单晶硅太阳能电池工艺相兼容的新型硅基双结电池,以达到提高太阳能电池转换效率的目的^[7-8]。

本文应用 Silvaco 软件,设计了一种并联双结(DPJ)单晶硅太阳能电池,并对其进行了仿真研究。DPJ 太阳能电池在同一个单晶硅太阳能电池内形成两个 PN 结,两个结共用一个 N 型区,分别吸收表面处的短波光 and 电池体内的长波光,增强了对光的吸收利用效率,提高了太阳能电池的短路电流,使得 DPJ 太阳能电池具有较好的应用前景。

2 理论分析

光在材料中传播时,其强度或多或少地被削弱,这一衰减现象即为光的吸收。在材料中传播时,随着传播深度的增加,光的强度逐渐衰减,衰减公式如下^[9]:

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x), \quad (1)$$

式中 I_0 为入射光强, x 为光强离表面的距离,而吸收系数 α 计算如下:

$$\alpha = 4\pi\kappa/\lambda_0, \quad (2)$$

式中 κ 为消光系数, λ_0 为真空中光的波长。从吸收系数和消光系数可得光在材料中的穿透深度 d 为^[10]

$$d = \alpha^{-1} = \frac{\lambda_0}{4\pi\kappa}, \quad (3)$$

由(3)式可知,随着波长的增加,穿透深度逐渐增加。

在有光照的情况下,在单结硅电池的表层光生载流子产生速率最大,吸收最为理想,随着距离的增加,光生载流子产生速率迅速指数衰减到一个恒定值^[11]。但是,由太阳辐射的光谱分布(图 1)可知^[12],太阳光中能量最高的光波波长位于 400~700 nm 波段,根据(3)式计算可知,该波段在硅材料的穿透深度为 0.1~1 μm 。因此,光波穿透深度分布较广,采用单一结的太阳能电池不能很好地实现对多个波长光的吸收。因此,设计 DPJ 太阳能电池能够利用深浅结分别有效地吸收长短光波能量。

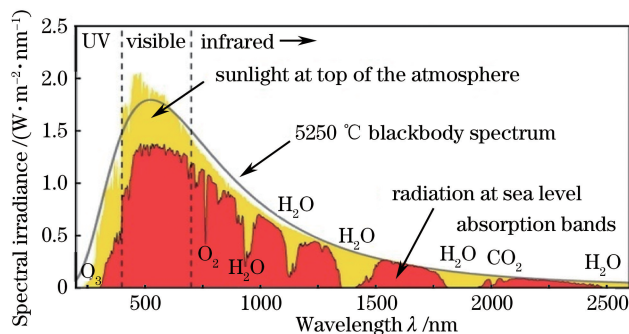


图 1 太阳辐射的光谱分布

Fig. 1 Spectra distribution of the solar radiation

3 DPJ 太阳能电池的结构设计及工艺流程设计

传统单晶硅太阳能电池和 DPJ 太阳能电池的结构分别如图 2(a)、(b) 所示。从图 2(a) 中可以看出,传统的单晶硅太阳能电池只有一个 PN 结。而从图 2(b) 可以看到,DPJ 太阳能电池从上向下依次为 PN 结和 NP 结,两个结共用一个 N 型区;电池上表面留有 N 型栅电极窗口,该区保证了位于表面 P 型区和体内 P 型区之间的 N 型区电极的引出,达到并联双结的效果;其余区域及电池背面均为 P 型区,且上 P 栅与背电极相连接。

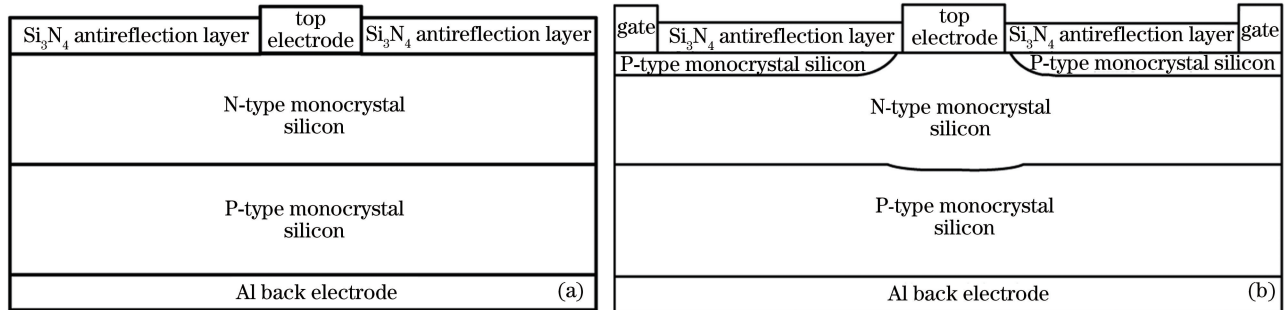


图 2 (a)传统单晶硅太阳能电池和(b)DPJ 太阳能电池的结构示意图

Fig. 2 Structural schematic diagram of (a) traditional monocrystalline silicon solar cell and (b) DPJ solar cell

DPJ 太阳能电池与现有单晶硅太阳能电池的制备工艺兼容,产业化前景广阔。与现有单晶硅太阳能电池的制备工艺相比,DPJ 太阳能电池增加了一个工艺步骤:扩散与刻蚀。该电池制备工艺中所形成的磷硅玻璃(PSG)既可以形成有效的杂质阻挡层,又可以形成扩散窗口,有利于减少工艺步骤,提高生产效率和降低生产成本。

DPJ 太阳能电池中并联双结的制造工艺流程如图 3 所示,具体制造步骤为:1) 高温扩散形成 NP 深结;2) 刻蚀保留 N 型电极区的磷硅玻璃;3) 高温扩散形成 PN 浅结;4) 去磷硅玻璃;5) 淀积氮化硅减反射膜,制备电极,形成电池。

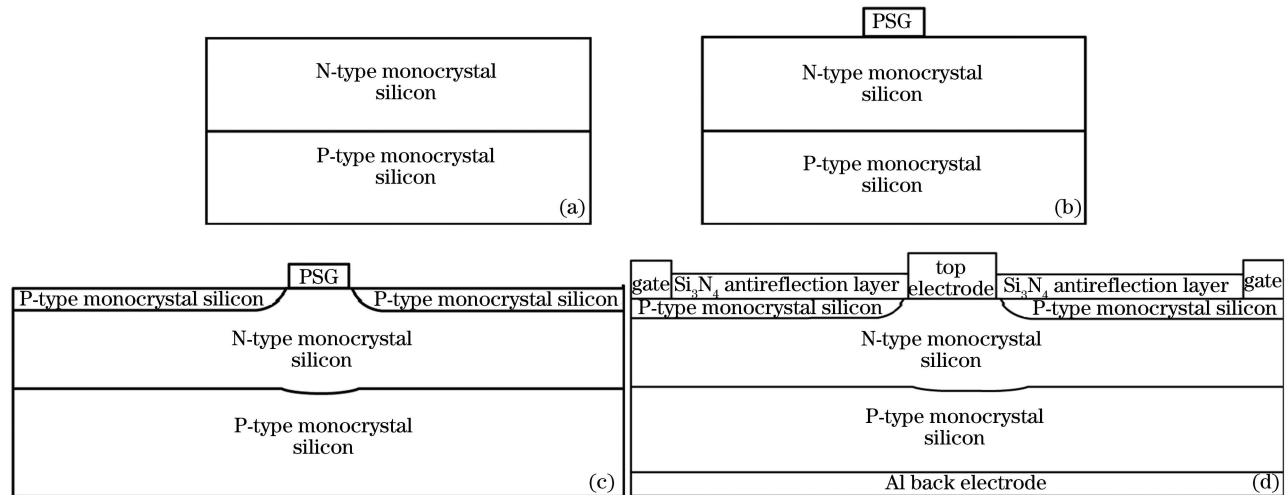


图 3 并联双结的制造工艺流程。(a) 深结扩散;(b) 刻蚀窗口;(c) 浅结扩散;(d) 电极制备

Fig. 3 Manufacturing process of DPJ. (a) Deep junction diffusion; (b) etching window; (c) shallow junction diffusion; (d) electrode preparation

4 DPJ 太阳能电池的 $I-V$ 特性

DPJ 太阳能电池与传统单晶硅太阳能电池的 $I-V$ 特性曲线如图 4 所示。从图 4 可以看出,相比于传统单晶硅太阳能电池,DPJ 太阳能电池的短路电流增大了约 11.9%,这说明 DPJ 太阳能电池的双结结构可以有效增强电池的短路电流,提高电池的转换效率。DPJ 太阳能电池的浅结位于电池表面以下 50~200 nm,是短波段太阳光的最佳吸收区域;深结位于电池表面以下 550~750 nm,可以更好地吸收长波段太阳光。从图 4 可见,与

传统单晶硅太阳能电池相比,DPJ 太阳能电池的电压基本保持不变,这说明电池的深、浅结通过 N 型区形成并联结构。由于 DPJ 太阳能电池的电压与传统单晶硅太阳能电池相比未发生大的变化,所以 DPJ 太阳能电池的封装工艺与现有的电池组件封装工艺相兼容。

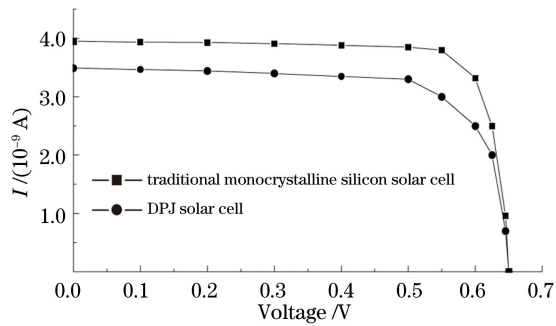


图 4 DPJ 太阳能电池与传统单晶硅太阳能电池的 I - V 特性曲线

Fig. 4 I - V curves of DPJ solar cell and traditional monocrystalline silicon solar cell

5 DPJ 太阳能电池工艺研究

由于 DPJ 太阳能电池光电性能的提高归因于电池同时拥有深、浅结,两者分别位于长波和短波的最佳吸收区域,因此需要对不同工艺条件下 DPJ 太阳能电池的光谱响应进行研究,以探索最佳工艺条件。

5.1 DPJ 太阳能电池与传统单晶硅太阳能电池的光谱响应比较与分析

DPJ 太阳能电池的浅结和深结的光谱响应曲线如图 5(a)所示,从图中可以看出,浅结光生电流主要来源于短波,光生电流的峰值位于 $400 \sim 450$ nm 范围内;深结光生电流主要来源于长波段,主要吸收峰位于 $600 \sim 700$ nm 范围内。深浅结的光生电流叠加,就得到了 DPJ 太阳能电池的光谱响应曲线,如图 5(b)所示。图 5(b)还给出了传统单晶硅太阳能电池的光谱响应曲线,比较发现,在 $350 \sim 450$ nm 的短波段和 $650 \sim 850$ nm 的长波段,DPJ 太阳能电池的光生电流较传统单晶硅太阳能电池均有所增加,这说明 DPJ 太阳能电池对太阳光能量的吸收效果更好。

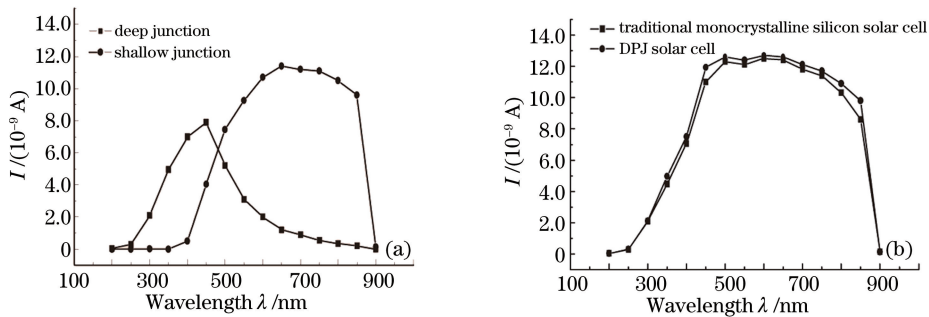


图 5 (a) 浅结和深结的光谱响应曲线;(b)DPJ 太阳能电池与传统单晶硅电池的光谱响应曲线

Fig. 5 (a) Spectral response curves of shallow junction and deep junction; (b) spectral response curves of DPJ solar cell and traditional monocrystalline silicon solar cell

5.2 DPJ 太阳能电池扩散工艺研究

深、浅结的扩散浓度对 DPJ 太阳能电池光谱响应的影响如图 6 所示。从图 6(a)可以看出,在离子浓度为 $5 \times 10^{18} \sim 1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ 时,对应的光谱响应曲线基本重合;从图 6(b)可以看出,在离子浓度为 $1 \times 10^{16} \sim 5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,对应的光谱响应曲线也基本重合。图 6(a)、(b)内插图均为光谱响应曲线上波长为 500 nm 附近对应的光电流的放大图,可以看出,随着深、浅结扩散浓度的增加,电池的光谱响应强度均呈现出先升高后下降的趋势。

对于深结[图 6(a)]来说,随着扩散浓度的增加,在相同工艺条件下,电池表面杂质浓度的增加降低了电池的串联电阻,进而增大了电池电极可收集的有效光生电流;但是杂质浓度过高时,必然会在电池的表面形

成重掺杂区域,导致电池中的缺陷增加,甚至形成“死层”^[13-14],从而导致电池的电流密度下降,降低了电池的光谱响应性能。同时,深结扩散浓度过大会影响浅结的形成,进一步提高浅结的扩散浓度,这将提高电池表面的杂质浓度从而增加其缺陷密度^[15]。

对于浅结[图 6(b)]来说,随着扩散浓度的增加,电池的串联电阻逐渐减小,电池的光谱响应强度逐渐增强;但是当浅结扩散杂质浓度过高时,必然导致电池表面的载流子复合率增加,而电池的光谱响应强度减小^[16-17]。

因此,深浅结扩散中均存在一个电学性能最佳的扩散浓度,即当深结扩散离子浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、浅结扩散浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,DPJ 太阳电池的短路电流最大。

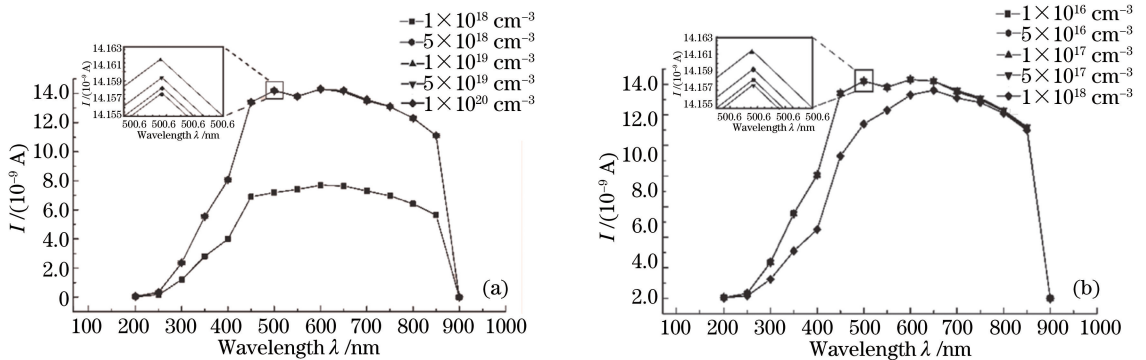


图 6 (a)深结和(b)浅结的扩散浓度对 DPJ 太阳电池光谱响应的影响,插图为 500 nm 附近的光谱响应曲线
Fig. 6 Effect of diffusion concentration of (a) deep junction and (b) shallow junction on the spectral response of DPJ solar cell, the insert map is the spectral response curves near 500 nm

5.3 DPJ 太阳电池结调整工艺研究

深结的扩散时间和扩散温度与 DPJ 太阳电池光谱响应的关系分别如图 7 和图 8 所示,可以看出,随着扩散温度和扩散时间的增加,电池的光谱响应强度先增加后基本保持不变。这是因为深结首先进行 $1050 \text{ }^\circ\text{C}$ 、30 min 的预扩散,扩散结束后未达到最佳长波吸收结深,进行杂质再分布工艺后,深结移动到最佳长波吸收结深,因此光谱响应强度先增加。预扩散后,由于电池表面形成磷硅玻璃层,随着杂质再分布的扩散时间和扩散温度的增加,表面和体内的杂质总量不变,因此当扩散温度达到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 和扩散时间达到 30 min 后,电池的深结位置基本保持不变(距表面约为 700 nm),之后扩散时间和扩散温度不再显著影响电池的光谱响应强度。

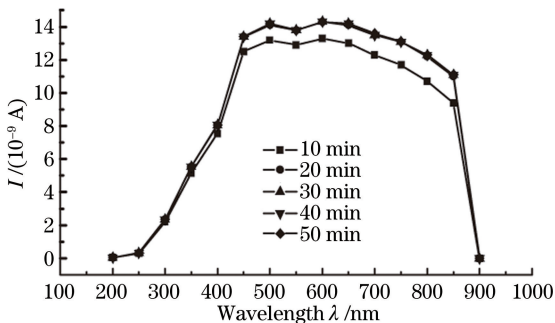


图 7 扩散温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,深结的扩散时间与 DPJ 太阳电池光谱响应的关系

Fig. 7 Relationship between the diffusion time of deep junction and the spectral response of DPJ solar cell with diffusion temperature of $1000 \text{ }^\circ\text{C}$

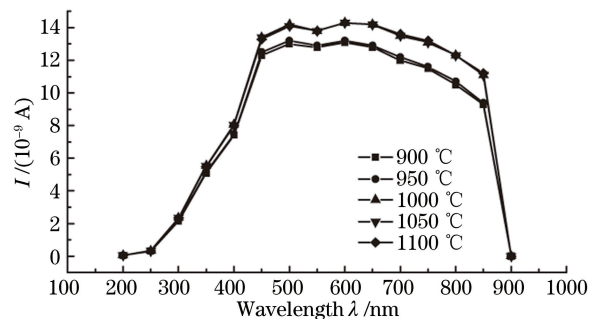


图 8 扩散时间为 30 min 时,深结的扩散温度与 DPJ 太阳电池光谱响应的关系

Fig. 8 Relationship between the diffusion temperature of deep junction and the spectral response of DPJ solar cell with diffusion time of 30 min

浅结的扩散工艺对 DPJ 太阳电池光谱响应的关系分别如图 9 和图 10 所示,可以看出,浅结扩散温度和扩散时间的变化对电池光谱响应影响不显著,随着扩散时间和扩散温度的增加,电池的光谱响应强度微弱增

加。这是由于浅结扩散后,其结深为 160~170 nm,基本保持不变,因此电池的光谱响应强度基本保持不变。当浅结扩散温度高于 850 °C 或扩散时间超过 30 min 时,将导致浅结区域扩散至电池的 N 型电极下方^[18-19],引起电池的浅结短路,破坏双结结构。

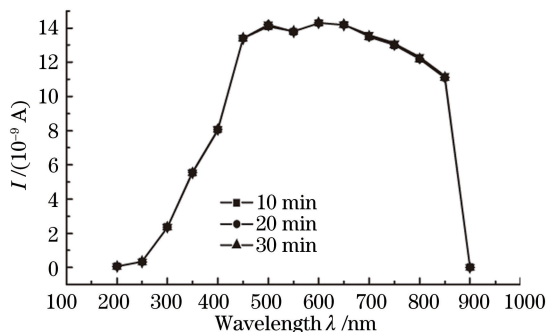


图 9 扩散温度为 850 °C 时,浅结的扩散时间与 DPJ 太阳能电池光谱响应的关系

Fig. 9 Relationship between the diffusion time of shallow junction and the spectral response of DPJ solar cell with diffusion temperature of 850 °C

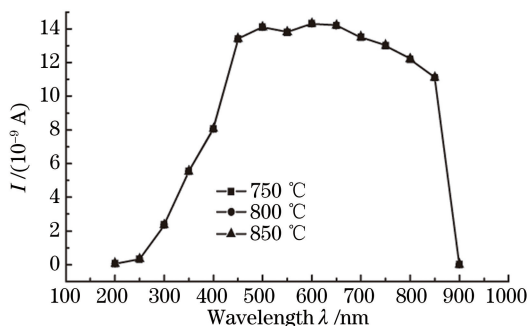


图 10 扩散时间为 10 min 时,浅结的扩散温度与 DPJ 太阳能电池光谱响应的关系

Fig. 10 Relationship between the diffusion temperature of shallow junction and the spectral response of DPJ solar cell with diffusion time of 10 min

综上所述,DPJ 太阳能电池的最佳扩散工艺如下:深结预扩散工艺的扩散温度为 1050 °C,扩散时间为 30 min;深结再分布工艺的扩散温度为 1000 °C,扩散时间为 30 min;浅结扩散工艺的扩散温度为 850 °C,扩散时间为 10 min。

6 结 论

设计了一种 DPJ 单晶硅太阳能电池。该电池由一个 PN 浅结和一个 NP 深结构成,形成 P-N-P 结构。PN 浅结接近电池表面,优化了电池的短波响应;而较深的 NP 结有效地保证了电池对长波能量的吸收。DPJ 太阳能电池的短路电流比传统单晶硅太阳能电池的短路电流提高约 11.9%,电池的开路电压基本保持不变。对 DPJ 太阳能电池工艺的研究表明:随着深结和浅结扩散浓度的增加,电池的光谱响应均呈现先增加后减小的趋势。最佳工艺参数:深结扩散浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,浅结扩散浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$;深结预扩散温度为 1050 °C,扩散时间为 30 min。随着深结杂质再分布扩散温度的提高和扩散时间的增加,电池的光谱响应强度先增加后基本保持不变;浅结扩散时间和扩散温度的增加,可微弱增加电池的光谱响应强度。综上所述,DPJ 太阳能电池可提高太阳能电池的短路电流。另外,DPJ 太阳能电池制备工艺与现有电池制备工艺兼容,具有较好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Wang Z J, Han P Y, Lu H Y, *et al.* Advanced PERC and PERL production cells with 20.3% record efficiency for standard commercial p-type silicon wafers[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2012, 20(3): 260-268.
- 2 Zhou Tao, Lu Xiaodong, Li Yuan. Upper surface anti-reflection coating on crystalline silicon solar cell[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 103101.
周涛,陆晓东,李媛.晶硅太阳能电池上表面增透膜研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(10): 103101.
- 3 Wu Zhengjun, Liang Hailian, Gu Xiaofeng. Effect of selective emitter parameters on photoelectrical characteristics of c-Si solar cell[J]. *Nanoelectronic Device & Technology*, 2010, 47(4): 202-206.
吴正军,梁海莲,顾晓峰.选择性发射极参数对太阳能电池光电特性的影响[J]. *纳米器件与技术*, 2010, 47(4): 202-206.
- 4 He Tanggui. Study on the diffusion process of crystalline silicon solar cell[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.
何堂贵.晶硅太阳能电池制作中的扩散工艺研究[D].成都:电子科技大学,2009.

- 5 Henry C H. Limiting efficiencies of ideal single and multiple energy gap terrestrial solar cells[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(8): 4494-4500.
- 6 Green M A, Emery K, Hishikawa Y, *et al.* Solar cell efficiency tables (version 47) [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2016, 24(1): 3-11.
- 7 Xing Y P, Han P D, Wang S, *et al.* A review of concentrator silicon solar cells[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51: 1697-1708.
- 8 Deng Qingwei, Huang Yongguang, Zhu Hongliang. Newest achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon-base solar cell[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(11): 110002.
邓庆维, 黄永光, 朱洪亮. 25%效率晶体硅基太阳能电池的最新进展[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(11): 110002.
- 9 Xiong Shaozhen, Zhu Meifang. Solarenergy foundation and application[M]. Beijing: Science Press, 2009: 58-59.
熊绍珍, 朱美芳. 太阳能电池基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 58-59.
- 10 Jahanshah F, Sopian K, Othman Y, *et al.* pn Junction depth impact on short circuit current of solar cell [J]. Solar Energy, 2009, 83(9): 1629-1633.
- 11 Zhao Yang, Wang Zelai, Zhang Peng, *et al.* Application of finite difference method in simulation of solar cell[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(3): 030401.
赵洋, 王泽来, 张鹏, 等. 有限差分法在太阳能电池性质仿真中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(3): 030401.
- 12 Wang Qiang, Sun Shuye, Zhang Zhuqing, *et al.* The design and simulation study on hetero and p-n stacked junctions solar cell with buried contact[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2013, 34(7): 1149-1152.
王强, 孙树叶, 张竹青, 等. 同型异质结埋栅太阳电池设计与仿真研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1149-1152.
- 13 Hu Weimin, Hong Yuan, Zhou Bin. Approach to alleviate the “Dead Layer” of n^+ / p silicon solar cells[J]. Journal of Tongji University, 1995, 23(1): 65-68.
胡伟民, 洪垣, 周斌. n^+ / p 常规硅太阳电池表面“死层”的减少方法[J]. 同济大学学报, 1995, 23(1): 65-68.
- 14 Xing Yupeng, Han Peide, Fan Yujie, *et al.* Improving efficiency of crystalline silicon solar cell by optimizing emitter using process and device simulation[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2014, 35(10): 1999-2003.
邢玉鹏, 韩培德, 范玉杰, 等. 利用工艺和器件仿真优化发射极提高单晶硅电池转换效率[J]. 太阳能学报, 2014, 35(10): 1999-2003.
- 15 Dong G Q, Liu F Z, Liu J, *et al.* Realization of radial p-n junction silicon nanowire solar cell based on low-temperature and shallow phosphorus doping[J]. Nanoscale Research Letters, 2013, 8(51): 1-7.
- 16 Zhou Tao, Lu Xiaodong, Zhang Ming, *et al.* Crystalline silicon solar cell development status and trends[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(3): 030002.
周涛, 陆晓东, 张明. 晶硅太阳能电池发展状况及趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(3): 030002.
- 17 Li Fei. Simulation of diffusion process and electrical characteristics of monocrystalline silicon solar cells[D]. Changsha: Central South University, 2010.
李斐. 单晶硅太阳电池扩散工艺与电学特性仿真研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- 18 Jia Jiejing, Dang Jidong, Xin Guojun, *et al.* On preparing the p-n junction of solar cell by means of multi-steps-diffusion [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(1): 102-107.
贾洁静, 党继东, 辛国军, 等. 多步扩散制备太阳电池 p-n 结工艺的研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(1): 102-107.
- 19 Liu Jinhu, Xu Zheng, Zhao Suling, *et al.* Diffusion process of crystalline silicon solar cells[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2012, 33(8): 1375-1380.
刘金虎, 徐征, 赵谡玲, 等. 晶体硅太阳电池扩散工艺研究[J]. 太阳能学报, 2012, 33(8): 1375-1380.