单晶硅太阳电池双面磷扩散研究

原　赜[1,2]，李　平[1]，赵增超[1]，路春希[3]，刘爱民[1,3]

（1. 大连理工大学物理与光电工程学院，辽宁大连　116024；
2. 锦州阳光能源有限公司，辽宁锦州　121000；
3. 渤海大学新能源学院，辽宁锦州　121000）

摘要：在单晶硅太阳电池的生产过程中，对双面磷扩散吸杂效果进行实验研究。结果表明：双面磷扩散后太阳电池的转换效率（E_{ff}）、开路电压（U_{oc}）、短路电流（I_{sc}）及并联电阻（R_{sh}）数据均高于单面磷扩散，说明在吸杂效果上，单晶硅太阳电池在扩散工艺上采用双面磷扩散要好于单面磷扩散。

关键词：太阳能；单晶硅太阳电池；双面磷扩散；吸杂
中图分类号：TN305　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1674-2850(2014)22-2227-04

Study on double phosphorus diffusion of monocrystalline silicon solar cells

YUAN Ze[1,2], LI Ping[1], ZHAO Zengchao[1], LU Chunxi[3], LIU Aimin[1,3]

(1. *School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning* 116024, *China*;
2. *Jinzhou Solargiga Energy Co. Ltd., Jinzhou, Liaoning* 121000, *China*;
3. *College of New Energy, Bohai University, Jinzhou, Liaoning* 121000, *China*)

Abstract: In the production process of monocrystalline silicon solar cells, the experiment of the double phosphorus diffusion gettering effect was carried on. The results showed that the conversion efficiency (E_{ff}) of solar cells prepared by double phosphorous diffusion as well as its open circuit voltage (U_{oc}), short circuit current (I_{sc}) and the parallel resistance (R_{sh}) data was higher by comparing with single phosphorus diffusion, which illustrated that on the effect of gettering, the diffusion process by using double phosphorus diffusion was better than single phosphorus diffusion for the monocrystalline silicon solar cells.

Key words: solar energy; monocrystalline silicon solar cells; double phosphorus diffusion; gettering

0　引言

众所周知，单晶硅太阳电池磷扩散的主要目的是在硅片内部形成太阳电池的心脏P型-N型半导体（PN）结。在形成PN结的同时，磷的吸杂作用还能用来改善太阳电池的性能，而且效果显著[1~2]。硅中含有大量金属杂质，并以缺陷的方式非均匀分布于整个硅片中，也正是由于这些杂质及缺陷的存在，成为少数载流子的复合中心，大大降低了少数载流子的寿命，进而影响太阳电池的转换效率[3]。磷扩散过程中的吸杂作用有效降低了硅片内部金属杂质的有害影响，提高了少子寿命，并最终达到提高硅太阳电池光电转换效率的目的。吸杂的工艺过程为：利用$POCl_3$作为液态源，N_2为源载体，在800～900℃高温下扩散80 min左右，硅片表面就会形成高浓度磷原子的吸杂层，由于磷原子的扩入导致吸杂层存在大量的微缺陷，成为了金属杂质的吸杂点；当磷原子通过扩散进入硅片表面形成微缺陷的同时，硅片内的金属杂质由于表面吸杂层的分凝作用也沉积在表面吸杂层中，扩散、刻蚀后用HF

作者简介：原赜（1983—），男，硕士研究生，主要研究方向：太阳能电池
通信联系人：刘爱民，教授，主要研究方向：太阳能电池. E-mail：aiminl@dlut.edu.cn

溶液将硅片表面高浓度的磷硅玻璃层去除，从而达到金属吸杂的作用[4]。

实验研究表明：与常规磷吸杂扩散相比，双面磷吸杂效果明显，吸杂后硅片的少子寿命及其制成电池的转换效率均有提高[5]。

这里通过对单晶硅片进行太阳电池生产时，在扩散工艺中分别采用单面磷扩散和双面磷扩散，其他工艺保持不变，并根据印刷烧结后太阳能模拟器测试得到的 2 组电参数及 2 种不同扩散方式后少子寿命进行对比分析，研究单面和双面 2 种不同扩散方式从吸杂效果上对太阳电池光电转换效率等电参数的影响。

1 实验过程

样品片源为晶向［100］、电阻率 1～3 Ω·cm 的同一单晶硅锭切割出的 P 型单晶硅片。将 1 盒装 400 片经过硅片检验、清洗制绒后，在扩散前将硅片分为 2 组，每组各 200 片。其中，第 1 组进行单面磷扩散，第 2 组进行双面磷扩散，扩散后 2 组硅片一并经过等离子刻蚀、去磷硅玻璃层、等离子体增强化学气相沉积（plasma enhanced chemical vapor deposition，PEVCD）镀膜、正背电极印刷烧结后，最终通过同一台太阳能模拟器进行电参数测试后分别得出 2 组电池片的 U_{oc}，I_{sc} 以及 R_{sh}，E_{ff} 等电参数，并用微波光电导法对 2 种不同扩散方式分别进行少子寿命测试，所用寿命仪型号为进口 WT-2000PVN. 因整个生产流程中或有人为操作的碎片产生，最终每组测试片数小于或等于 200 片（不少于 190 片）。

2 实验结果与讨论

图 1 为挑选出的单面扩散后硅片表面少子寿命扫描及分布图，所测得少子平均寿命值为 21.4 μs. 图 2 为挑选出的双面扩散后硅片表面少子寿命扫描及分布图，所测得少子平均寿命值为 27.4 μs. 由测试结果可以看出：双面扩散后硅片表面少子寿命高于单面扩散。

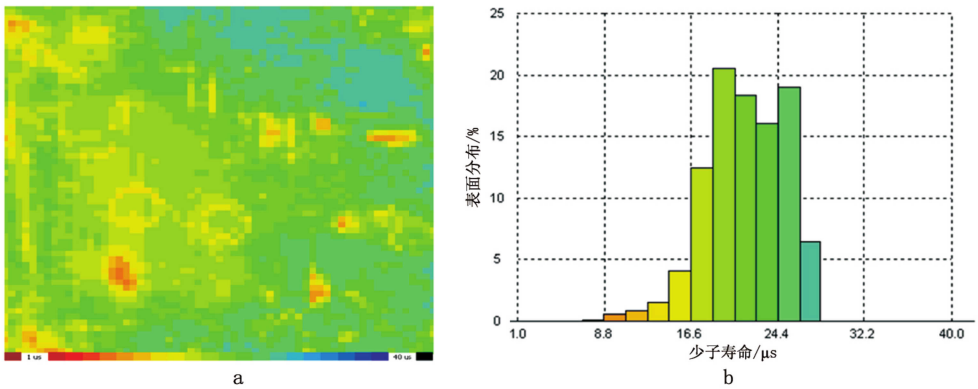

图 1 单面扩散少子寿命扫描图及载流子寿命分布图

Fig. 1 Scanning image and distribution chart of minority carrier lifetime after single diffusion

a—扫描图；b—分布图

a-Scan image; b-Distribution chart

表 1 为单面扩散和双面扩散 2 组太阳电池经测试后所得电参数对比数据，由测试结果可以看出：双面扩散电池片的 E_{ff} 为 18.87%，高于单面扩散的 18.57%；双面扩散的 I_{sc} 为 9.015 1 mA，高于单面扩散的 8.920 2 mA；双面扩散的 U_{oc} 为 0.635 5 V，高于单面扩散的 0.631 7 V；双面扩散的 R_{sh} 为 40.587 Ω，高于单面扩散的 37.079 Ω.

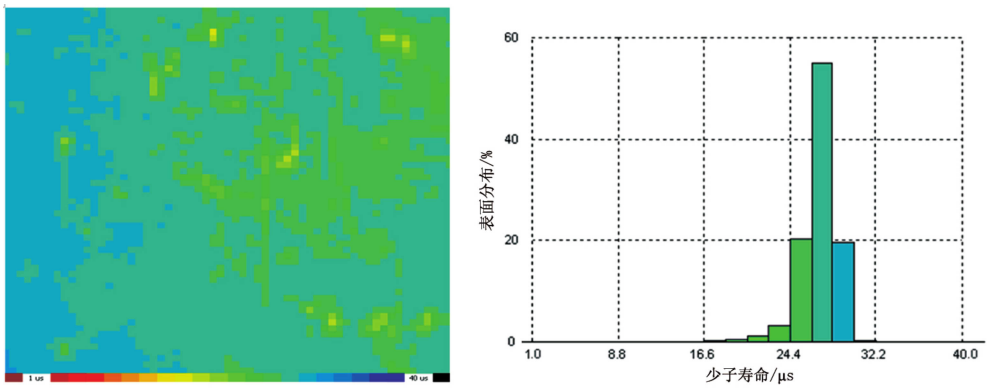

图 2 双面扩散少子寿命扫描图及载流子寿命分布图

Fig. 2 Scanning image and distribution chart of minority carrier lifetime after double diffusion

a—扫描图；b—分布图

a-Scan image; b-Distribution chart

表 1 太阳电池的电性能参数测试结果

Tab. 1 Electric performance parameters of solar cell

类型	片数/片	U_{oc}/V	I_{sc}/mA	R_s/Ω	R_{sh}/Ω	FF	E_{ff}/%
单面扩散	196	0.631 7	8.920 2	0.001 6	37.079	79.805	18.57
双面扩散	200	0.635 5	9.015 1	0.001 7	40.587	79.775	18.87

注：FF 为填充因子

通过吸杂过程可知：单面扩散工艺只将硅片一个表面作为扩散层，产生 PN 结的同时只形成一个高浓度磷原子的吸杂层，即只有一个通过分凝作用扩散沉积金属杂质的表面吸杂层。而双面扩散工艺却将硅片的 2 个表面都作为扩散层，在扩散过程中同时形成 2 个表面吸杂层，金属杂质能够通过 2 个表面进行扩散沉积，在去磷硅玻璃时金属杂质能够得到更好的去除，从而更多地提高少子寿命。表 1 的 I_{sc}实验数据对比同样验证了这一点。

已知开路时，当电流 $I=0$，开路电压可表示为

$$U_{oc}=\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_L}{I_S}+1\right),$$

其中，k 为玻尔兹曼常数；T 为绝对温度；q 为电荷量；I_L 为光电流；I_S 为反向饱和电流。

太阳电池的光伏电压与入射光辐照度的对数成正比，与环境温度成反比，与电池面积的大小无关，同时与暗电流有关，暗电流不仅包括反向饱和电流，还包括薄层漏电流和体漏电流[6]。由于双面扩散的 U_{oc}高于单面扩散的 U_{oc}，说明双面扩散的漏电流小于单面扩散的漏电流，而漏电流是由于杂质或缺陷引起的载流子复合而产生的电流，因片源相同说明双面扩散后硅片的杂质少于单面扩散，即双面扩散的吸杂效果更好。

研究测量了 2 种电池的内量子效率（internal quantum efficiency，IQE），如图 3 所示。在较短入射光波长范围（350～800 nm）内，双面扩散及单面扩散太阳电池的 IQE 几乎没有差别，但在较长波长范围（950～1 100 nm），IQE 差距明显，双面扩散电池 IQE

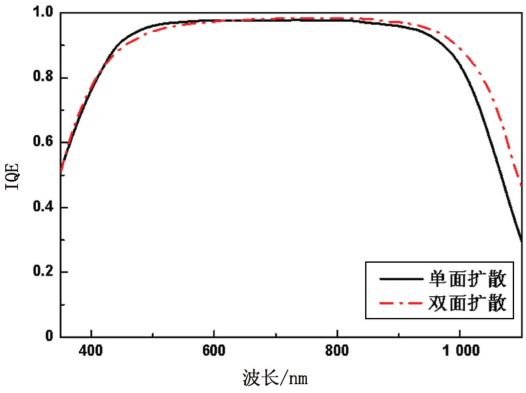

图 3 电池 IQE

Fig. 3 IQE of solar cells

明显提升。长波长量子效率主要受到电池背面性能的影响，背电场性能及被表面载流子复合均会对IQE产生影响，并最终导致电池参数的变化。双面扩散背表面由于磷的吸杂作用，减少了金属杂质的浓度，从而导致背表面附近硅的禁带复合中心减少，降低了载流子在背表面附近的复合，增大了电池的U_{oc}和I_{sc}.

3 结论

通过对单晶硅太阳电池单面磷扩散和双面磷扩散所测得E_{ff}等电性能参数进行对比，从吸杂效果上分析了2种不同扩散方式对太阳电池的影响。结果表明：双面磷扩散后电池片的E_{ff}，U_{oc}，I_{sc}，R_{sh}数据均高于单面磷扩散，说明在吸杂效果上，单晶硅太阳电池在扩散工艺采用双面磷扩散比采用单面磷扩散好。

[参考文献] (References)

[1] NARAYANNA S, WENHAM S R, GREEN M A. High efficiency polycrystalline silicon solar cells using phosphorus pretreatment[J]. Appl. Phys. Lett., 1986, 48(13): 873-875.

[2] LOGHMARTI M, STUCK R, MULLER J C, et al. Strong improvement of diffusion length by phosphorus and aluminum gettering[J]. Appl. Phys. Lett., 1993, 62(9): 979-981.

[3] 邓海，杨德仁，唐骏，等. 铸造多晶硅中杂质对少子寿命的影响[J]. 太阳能学报，2007，28 (2)：151-154.
DENG H, YANG D R, TANG J, et al. The impact of impurities on minority carrier lifetime of multicrystalline silicon[J]. Act Energiae Solaris Sinica, 2007, 28(2): 151-154. (in Chinese)

[4] 徐毕毕. 物理提纯硅磷吸杂及其太阳电池光衰减性能的研究[D]. 广州：中山大学，2010.
XU B B. Study on physical purification silicon phosphorus absorption and solar cell light attenuation performance[D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2010. (in Chinese)

[5] 杨利利，杨佳，武建，等. 物理冶金法单晶硅片双面磷扩散研究[J]. 科技创新导报，2013 (20)：48-49.
YANG L L, YANG J, WU J, et al. Study on physical metallurgy method of monocrystalline silicon chip double-sided phosphorous diffusion[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013(20): 48-49. (in Chinese)

[6] 秦玲. 太阳电池基本参数的影响因素分析与研究[J]. 价值工程，2012，31 (32)：33-35.
QIN L. Analysis and research on influencing factor of solar cell basic parameter[J]. Value Engineering, 2012, 31(32): 33-35. (in Chinese)