

doi: 10.3788/gzxb20144306.0614004

## 多晶硅太阳能电池激光掺杂选择性发射极

王雪<sup>1</sup>, 豆维江<sup>2</sup>, 秦应雄<sup>1,2</sup>, 巨小宝<sup>2</sup>

(1 华中科技大学 光学与电子信息学院, 武汉 430074)

(2 西安黄河光伏科技股份有限公司, 西安 710043)

**摘 要:**研究了多晶硅片扩散工艺与激光掺杂工艺的匹配性. 采用波长 532 nm 的纳秒脉冲激光器对扩散后未去磷硅玻璃的多晶硅片表面进行激光扫描掺杂, 激光扫描掺杂后硅片方块电阻降低为扩散后硅片方阻的 50% 左右, 而且随着激光功率的增加, 扩散到硅片表面的磷原子浓度增大, 硅片方阻下降更明显. 测试了激光掺杂后多晶硅太阳能电池的外量子效率, 其外量子效率在 340~480 nm 波段范围与常规多晶硅太阳能电池相比提高 18%~5%. 研究了激光掺杂后多晶硅电池的光电转换特性, 分析了较高激光功率掺杂时多晶硅电池的失效特性, 结果表明: 优化工艺后多晶硅太阳能电池平均光电转换效率达到 17.11%, 比普通工艺多晶硅太阳能电池提高 0.34%, 最高转换效率达到 17.47%. 激光掺杂选择性发射极工艺流程简单, 电池效率提升明显, 易于实现产业化.

**关键词:**多晶硅太阳能电池; 扩散; 选择性发射极; 激光掺杂; 方块电阻; 外量子效率; 转换效率; 失效特性

中图分类号: 文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2014)06-0614004-5

## Laser-doped Selective Emitter of Polycrystalline Silicon Solar Cell

WANG Xue<sup>1</sup>, DOU Wei-jiang<sup>2</sup>, QIN Ying-xiong<sup>1,2</sup>, JU Xiao-bao<sup>2</sup>

(1 School of optical and electronic information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(2 Xi'an Huanghe Photovoltaic Technology Co., Ltd, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The matching property of polycrystalline wafers phosphorus diffusion and laser doping process was studied. Nanosecond pulsed laser with a wavelength of 532 nm was used to conduct laser scanning doping on polycrystalline wafers which remains phosphorosilicate glass after diffusion. The sheet resistance decreases about 50%, and with the increasing of laser power, more phosphorus atoms diffuse to polycrystalline silicon, and the sheet resistance decreases more significantly. The external quantum efficiency of the conventional solar cells and laser-doped solar cells was tested, and for the band of 340~480 nm, the EQE of laser-doped cells increased by 18% to 5% compared to the conventional solar cells. The photoelectric conversion characteristics of laser-doped polycrystalline silicon cells were studied, and the failure characteristics under high laser power were analyzed. With the using of optimization of laser doping polycrystalline silicon solar cell process technology, the average photoelectric conversion efficiency of solar cells achieves 17.11%, which is 0.34% higher than that of the conventional cells. The highest efficiency achieves 17.47%. Laser doping process is simple, and conversion efficiency increases significantly, so this process makes it easy to realize industrialization.

**Key words:** Polycrystalline silicon solar cell; Diffusion; Selective emitter; Laser doping; Sheet resistance; External quantum efficiency; Conversion efficiency; Failure characteristics

**OCIS Codes:** 140.0140; 240.0240; 350.0350

基金项目: 中央高校科研业务(No. HUST2013TS048)和武汉市晨光计划(No. 2013070104010006)资助

第一作者: 王雪(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为激光技术、太阳能光伏电池. Email: wangxueat@163.com

导师(通讯作者): 秦应雄(1978-), 男, 副教授、博士, 主要研究方向为激光技术、太阳能光伏电池等. Email: qyx@hust.edu.cn

收稿日期: 2013-10-25; 录用日期: 2013-11-28

<http://www.photon.ac.cn>

## 0 引言

提高太阳能电池的光电转换效率和降低生产成本一直是太阳能电池领域的研究热点,提高晶体硅太阳能电池光电转换效率的一个重要方法就是采用选择性发射极结构.选择性发射极结构的特点是在电极栅线下方形成高掺杂、深扩散区,在发射极区域形成低掺杂、浅扩散区.

实现晶体硅太阳能电池选择性发射极结构的制备方法分为两种:双步扩散法和单步扩散法.双步扩散法是第一步热扩散形成浅掺杂区域,第二步热扩散形成局部重掺杂区域,从而形成选择性发射极结构;单步扩散法是在一次热扩散中形成浅扩散区域,然后通过其他工艺形成局部重掺杂区域,从而形成选择性发射极结构.单步扩散法制备选择性发射极工艺热耗少,并且可以避免二次高温处理对硅片带来的热冲击损害<sup>[1]</sup>.激光掺杂是单步扩散法制备选择性发射极结构的一种工艺.工艺流程简单、可控,可实现区域性重掺杂,对晶硅太阳能电池光电转换效率提升效果明显,因此成为制造选择性发射极结构的重要工艺方法之一.

国内外一些光伏研究机构和企业对激光掺杂制备选择性发射极技术有着浓厚的兴趣,围绕着提高单晶硅太阳能电池的光电转换效率、掺杂工艺可靠性和降低工艺成本进行了大量的研究.目前晶体硅太阳能电池转换效率的世界纪录保持者是新南威尔士大学马丁格林实验组研制的发射极钝化及背面局部扩散小尺寸规格的晶体硅太阳能电池,该电池的转换效率达到25%<sup>[2-3]</sup>.此后新南威尔士大学又提出了单面激光掺杂和双面激光掺杂的技术方法,双面激光掺杂太阳能电池将在背面采用高掺杂点接触电极和高效钝化层设计,通过提高开路电压,P型Cz单晶硅和P型多晶硅双面激光掺杂的效率将有望达到21%和19%<sup>[4]</sup>.2010年,新南威尔士大学报导单面激光掺杂选择性发射极的电池效率达到18.7%<sup>[5]</sup>.2008年,德国夫琅禾费太阳能系统研究所报导了采用湿法化学激光掺杂法,制备的选择性发射极电池效率超过20%<sup>[6]</sup>.同年德国斯图加特大学报道了直接在磷硅玻璃上进行激光掺杂,获得了0.4%绝对转换效率的提高<sup>[7]</sup>,2009年,报道了激光掺杂大面积发射极晶体硅太阳能电池的世界记录,效率达到18.9%<sup>[8]</sup>.法国Paviet-Salomon B研究组分析和实验研究了激光功率、方阻以及饱和电流密度之间的关系<sup>[9]</sup>.北京电工所王文静研究组理论计算和实验研究了晶硅太阳能电池用532 nm倍频Nd:YAG激光掺杂的方阻,并分析了激光能量与方阻的关系<sup>[10]</sup>.中山大学沈辉、梁宗存研究组等进行了激光掺杂工艺以及激光烧结背电极的研究,提出了湿法激光掺杂背表面场及背面点接触电极工艺<sup>[11-12]</sup>.中科院宁波材料技术与工程研究

所万青研究组提出了一种交叉自对准工艺,采用激光掺杂技术和普通丝网印刷设备研制了高效率的晶体硅太阳能电池,最佳电池光电转化效率由激光掺杂前的~14.4%提高到激光掺杂后的~17.7%<sup>[13]</sup>.此外,北京交通大学、云南师范大学等众多研究机构都进行了太阳能电池选择性发射极及相关工艺的研究<sup>[1,14-15]</sup>.

本文主要研究多晶硅太阳能电池选择性发射极的激光掺杂工艺,重点解决多晶硅片磷扩散工艺与激光掺杂工艺的匹配性问题,期望在降低生产成本的同时提高产业化多晶硅太阳能电池的转换效率.

## 1 实验流程

### 1.1 实验设备和材料

实验采用156 mm×156 mm规格的P型多晶硅片,电阻率为1~3Ω·cm,厚度约为200 μm.为了便于研究,首先通过热扩散制作方阻值为75Ω/◇和85Ω/◇的两组硅片,每组300片,定为初始方阻值.再把每一组硅片三等分,分别进行一组传统工艺实验和两组激光掺杂工艺实验.激光实验由武汉帝尔激光公司协助进行,采用波长532 nm的纳秒脉冲激光器,脉冲频率25 kHz,脉冲时间4 μs,到达硅片上的聚焦光斑宽度270 μm,扫描速度6.75 m/s.实验中通过调整激光器的工作电流来调整激光功率,电流分别调至26 A和28 A,激光功率分别为46 W和54 W.

### 1.2 实验流程

常规工艺采用热扩散将硅片方阻降低至70Ω/◇以下,进行成品电池的制备和测试.激光掺杂选择性发射极多晶硅太阳能电池的工艺流程如图1.

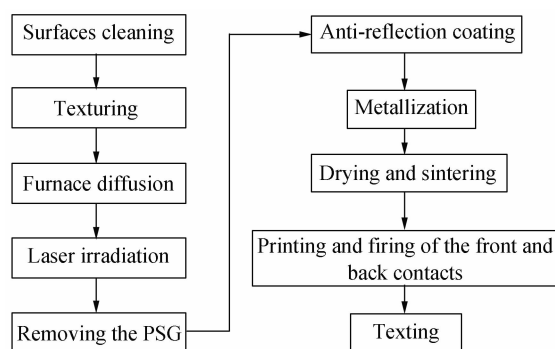


图1 激光掺杂选择性发射极太阳能电池主要工艺流程  
Fig. 1 The main production process of laser-doped selective emitter solar cells

首先对多晶硅片进行清洗,去掉表面损伤层和杂质,然后对表面进行酸腐蚀,增加电池表面的陷光率,再进行磷扩散工艺.扩散工艺后,硅片表面形成磷硅玻璃层,其中含有大量的磷原子.采用脉冲激光扫描硅片,高能量密度使磷硅玻璃局部瞬间熔化,将其中的磷原子扩散进入硅片,使激光扫描区域形成重掺杂区域,该区域宽度为270 μm.激光扫描后硅片表面形貌如图2.

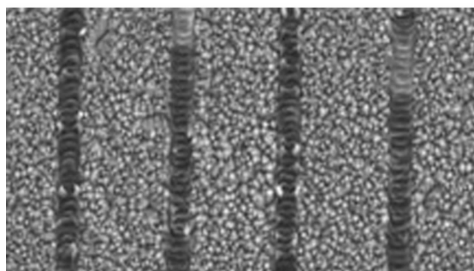


图2 激光扫描后硅片表面形貌

Fig. 2 The surface morphology of silicon wafer after laser scanning

从图2可以看出,重掺杂区域较为均匀,边界整齐.在激光掺杂工艺完成后,使用氢氟酸溶液清洗掉磷硅玻璃层和损伤层,并进行边绝缘刻蚀,然后在硅片表面镀减反膜,最后通过丝网印刷工艺制备背电极、铝背场和正电极,然后进行烧结并测试.丝网印刷正电极网版栅线宽度设计为 $40\ \mu\text{m}$ ,烧结后实际正电极栅线约为 $80\ \mu\text{m}$ .激光掺杂扫描与丝网印刷均使用高清晰度的摄像头和相同的中心定位方法,使正电极栅线与高掺杂区域在印刷时具有较高的对准准确度.由于烧结后正电极栅线宽度 $80\ \mu\text{m}$ 远小于激光扫描宽度 $270\ \mu\text{m}$ ,保证了正电极栅线可以完全覆盖在重掺杂区域内.制备完成的选择性发射极结构如图3.

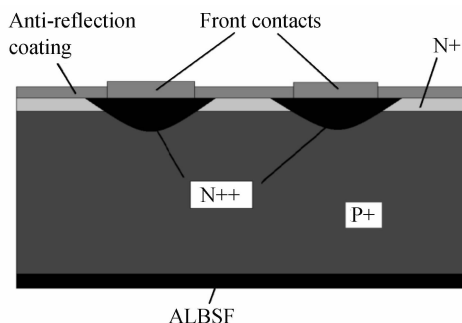


图3 选择性发射极结构

Fig. 3 The structure of selective emitter

电池正面电极制作在重掺杂区域,有利于减小金属与硅的接触电阻,从而形成良好的欧姆接触;发射极形成低掺杂区可得到较好的表面钝化,降低少数载流子在硅片表面的复合几率,从而减小电池的反向饱和电流,提高电池的开路电压 $U_{oc}$ 和短路电流 $I_{sc}$ [7].

## 2 实验结果

### 2.1 激光掺杂工艺对硅片方阻的影响

在太阳能电池扩散工艺中,薄层电阻是反映扩散层质量优劣的重要工艺指标.薄层电阻的表达式为

$$R = \rho \frac{l}{t \cdot a} = \left( \frac{\rho}{t} \right) \left( \frac{l}{a} \right) \quad (1)$$

式中, $l$ 、 $a$ 、 $t$ 分别是硅片的长度、宽度和厚度, $\rho$ 为硅片的电阻率.对于方块电池片, $l=a$ ,所以 $R=\rho/t$ ,称为方

块电阻,简称方阻.从式(1)可以看出,电阻率的大小直接影响电池方阻的大小,方阻和硅片的电阻率成正比.实验利用脉冲激光高能量密度使磷硅玻璃局部瞬间熔化,将其中的磷原子扩散进入硅片表面,增加电极覆盖区的杂质磷原子浓度,减小电阻率,降低方阻,从而增加该区域光生载流子的收集率.

方阻值可以使用四探针法测得[15],由于选择性发射极结构重掺杂区域极窄,不能直接采用四探针法,因此我们在相同方阻值的多晶硅片表面用激光器进行 $(4 \times 4)\ \text{cm}^2$ 的全面积扫描,得到一个大面积重掺杂区域,再使用四探针法进行方阻测量,测得的结果可视为选择性发射极结构中重掺杂区域的方阻值.

图4给出实验中激光掺杂工艺前后硅片方阻值.激光掺杂后,硅片方阻下降,降幅为50%左右.在不同功率激光下掺杂,初始方阻 $85\ \Omega/\square$ 的多晶硅片进行激光掺杂后,方阻值依然大于初始方阻 $75\ \Omega/\square$ 的硅片进行激光掺杂后的方阻.因为初始方阻值大的硅片在热扩散时表面沉积的磷硅玻璃层薄,扩散后表面残留磷原子少.因此在进行激光掺杂时,从磷硅玻璃中扩散进入硅片表面的磷原子量少.初始方阻值不同的情况下,激励电流为28A时,方阻值降幅大于激励电流为26A时的降幅.这是由于激光器功率越大,硅片表面熔融速度越快,熔融深度越大,扩散进入硅片的磷原子越多,从而方阻值降幅越大,但是激光器功率过大反而有可能损坏电池结构.

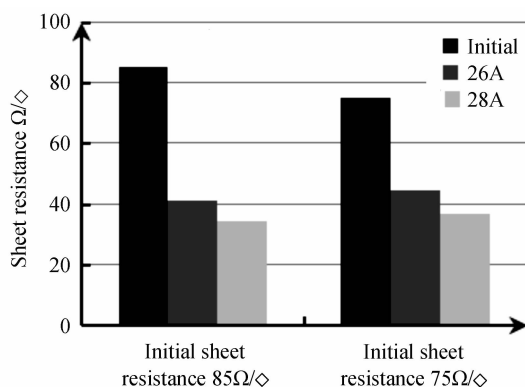


图4 激光掺杂工艺前后硅片方阻值

Fig. 4 The sheet resistance before and after laser doping

### 2.2 激光掺杂工艺对电池外量子效率的影响

太阳能电池的光谱响应可以用来表征不同波长的光对短路电流的贡献.外量子效率(External Quantum Efficiency, EQE)是光谱响应的直接反映,增强电池的光谱响应,可以提高电池的光电转换效率.为了研究激光掺杂工艺对电池外量子效率的影响,对初始方阻值 $75\ \Omega/\square$ 的电池,用PV measurements(型号QEX7)仪器测试常规工艺电池和激光掺杂工艺电池外量子效率,并绘制波长-外量子效率曲线,如图5.

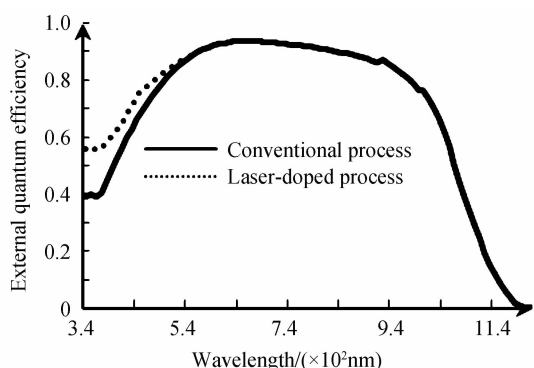


图5 常规工艺电池片和激光掺杂工艺电池片的EQE比较  
Fig. 5 Comparison of EQE between conventional cells and laser-doped cells

从图5可以看出,外量子效率在340~480 nm波段范围与常规多晶硅太阳能电池相比提高18%~5%。这是由于长波长光子穿透能力强,PN结深度不影响电池对长波段光子的吸收,而短波长光子穿透能力弱,PN结表面“死层”厚度会严重影响电池对蓝光的吸收。选择性发射极电池发射极区域掺杂浓度低,PN结表面形成“死层”厚度浅,蓝光容易穿过被电池PN结吸收。由于发射极区域降低了PN结表面“死层”对电池的影响,减小了前表面少子的复合几率,使该区域由蓝光产生的光生载流子收集率增加,增强了电池对蓝光的响应<sup>[16-17]</sup>。

### 2.3 激光掺杂工艺对电池光电转换效率的影响

多晶硅太阳能电池的转换效率Eff与填充因子FF、开路电压 $U_{oc}$ 、短路电流 $I_{sc}$ 直接相关

$$\text{Eff} = \text{FF} \cdot I_{sc} \cdot U_{oc} / P \quad (2)$$

式中 $P$ 是太阳辐射功率,从式(2)中可以看出电池的转换效率正比于填充因子、短路电流和开路电压。太阳能电池的开路电压为

$$U_{oc} = kT/q \ln(I_L/I_s + 1) \quad (3)$$

式中 $k$ 为玻尔兹曼常量, $T$ 为温度, $q$ 为电荷量, $I_L$ 为光生电流, $I_s$ 为暗饱和电流。 $I_s$ 包括反向饱和电流 $I_r$ 和薄层漏电流 $I_D$ ,从式(3)可知 $U_{oc}$ 与 $I_s$ 成负相关。由于激光掺杂工艺在电极栅线下形成高浓度掺杂区域,在发射极形成低浓度掺杂区域,形成高低结,有效阻止了光生载流子的横向移动,从而减小反向饱和暗电流和薄层漏电流,提高了电池的开路电压。

理想的太阳能电池,串联电阻 $R_s$ 小、并联电阻 $R_{sh}$ 大,电池短路电流近似等于光生电流,即 $I_{sc} = I_L$ 。实际应用中,受串联电阻和并联电阻影响,电池的短路电流总小于光生电流

$$I_{sc} = I_L / (1 + R_s/R_{sh}) \quad (4)$$

短路电流与串联电阻成负相关,与并联电阻成正相关。FF反映太阳能电池的质量,同短路电流一样,FF也与串联电阻成负相关,与并联电阻成正相关。故串联

电阻和并联电阻是影响电池短路电流、填充因子以及光电转换效率的重要因素。

将进行激光掺杂工艺实验后的多晶硅片印刷背电极、正电极以及铝背场后,烘干烧结,制成成品电池,再用一定强度的平行光源照射成品电池表面,即可测量光电转换效率以及其他电性能参量。测得激光掺杂工艺电池的电性能参量和常规工艺电池片的电性能参量如表1。

表1 激光掺杂工艺电池的参量和常规电池的参量比较  
Table 1 Comparison of parameters between laser-doped cells and conventional cells

Sample	Eff/(%)	$U_{oc}/V$	$I_{sc}/A$	FF	$R_s/m\Omega$	$R_{sh}/\Omega$
Initial sheet resistance 75 $\Omega/\square$						
Normal cells	16.77	0.618	8.405	78.53	2.70	246.82
26Adoped cells	16.96	0.622	8.442	78.65	2.60	178.75
28Adoped cells	17.11	0.622	8.494	78.79	2.65	247.59
Initial sheet resistance 85 $\Omega/\square$						
Normal cells	16.87	0.621	8.444	78.33	2.93	194.92
26Adoped cells	16.94	0.621	8.440	78.68	2.66	207.81
28Adoped cells	16.80	0.619	8.387	78.72	2.57	168.76

从表1可以看出,初始方阻为75 $\Omega/\square$ 的电池经过激光选择性发射极工艺后,对比常规工艺电池串联电阻减小、并联电阻增大,开路电压、短路电流和填充因子上均有很明显的改善。原因是激光掺杂工艺在硅片内部形成了N++/N+高低结,有效防止载流子向结区渗透,降低体内少子的复合率,提高了并联电阻。重掺杂区域可以降低硅表面与金属电极的接触电阻,提高光生载流子的收集率,降低串联电阻,从而提高电池的短路电流 $I_{sc}$ ,改善电池的填充因子。激光掺杂选择性发射极工艺,使多晶硅电池的平均转换效率提升0.3%左右,电池的平均效率达到17.11%,单片最高转换效率达到17.47%,这说明激光掺杂工艺在提高太阳能电池转换效率上是可行的。但是对于初始方阻为85 $\Omega/\square$ 的电池在通过较高功率激光掺杂工艺后电性能改善不明显,平均转换效率略有降低。

### 2.4 激光掺杂工艺致使电池失效的分析

实验中,对于初始方阻值85 $\Omega/\square$ 的电池,使用26 A的电流进行激光掺杂时,电池效率的提升没有初始方阻值75 $\Omega/\square$ 的电池片明显,经分析其主要原因是扩散方阻的提高,大大超出了扩散工艺设备的控制能力,导致硅片表面方阻的均匀性变差,经过激光扫描掺杂,硅片方阻的均匀度进一步降低,影响了电池效率的提升。当激光掺杂电流提高到28 A时,电池效率略有降低,开路电压、短路电流以及并联电阻等电性能也有所降低。

为了进一步分析较高电流激光掺杂对电池的影响,将激光掺杂电流提高到29 A,对应激光器功率为58 W。测得转换效率分布如图6。

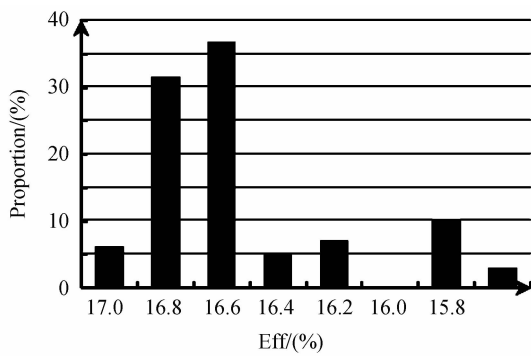


图6 电池片的转换效率分布

Fig. 6 Distribution of the conversion efficiency of solar cells

从图6可以看出,电池效率很不稳定,效率大于16.6%的只有70%左右,低于16.6%的电池达到30%左右,低于16.0%的占到13.26%,出现了较大比例的低效片,相当于只有70%左右的电池达到了正常工艺电池的水平.说明过高的激光功率进行扫描掺杂,不仅没有提高电池的光电转换效率,反而造成了一些低效片.

部分低效电池的电性能参量如表2.对比正常电池,失效电池的电性能参量均有所变化,开路电压、短路电流和填充因子都有所降低,串联电阻出现无规律变化.而并联电阻大幅减小,漏电电流大大增加.这是由于激光掺杂功率较高时,激光扫描的熔化区深度和热影响区深度加深,对于初始方阻值 $85\ \Omega/\square$ 的电池,由于初始扩散的不均匀性,在后续的烘干烧结过程中重掺杂区域的磷原子会沿着熔化及热影响区通道继续向电池内部渗透,而铝背场中的铝原子反向渗透最终致使PN结局部击穿,从而使并阻降低,漏电电流增大,严重时出现电池片失效现象.

表2 失效电池片的电性能参量

Table 2 Electrical parameters of invalid cells

Sample	Eff/%	$U_{oc}/V$	$I_{sc}/A$	FF	$R_s/m\Omega$	$R_{sh}/\Omega$	$I_D/A$
Average	16.81	0.620	8.463	77.96	3.08	134.58	0.162
Invalid 1	15.43	0.606	8.187	75.73	2.77	107.34	0.418
Invalid 2	15.95	0.610	8.325	76.47	3.21	131.82	0.350
Invalid 3	15.97	0.614	8.292	76.38	3.14	111.21	0.277
Invalid 4	15.89	0.610	8.271	76.59	2.97	101.21	0.383

### 3 结论

通过改变激光掺杂工艺中激励电流的大小,研究了多晶硅片在不同激光功率下与扩散工艺的匹配性.激光扫描掺杂后硅片方阻降低为扩散后硅片方阻的50%左右,而且随着激光功率的增加,扩散到硅片表面的磷原子浓度增大,硅片方阻下降更明显.测试了激光掺杂后多晶硅太阳能电池的外量子效率,其外量子效率在340~480 nm波段范围与常规多晶硅太阳能电池相比提高18%~5%,分析了激光掺杂电池片提高蓝光响应的原理.研究了激光掺杂后多晶硅电池的电学特

性,分析了较高激光功率掺杂时多晶硅电池的失效机理.激光掺杂工艺优化后,多晶硅太阳能电池平均光电转换效率达到17.11%,比普通工艺多晶硅太阳能电池提高0.34%,最高转换效率达到17.47%.

致谢 感谢武汉帝尔激光公司为论文实验研究提供的帮助.

#### 参考文献

- [1] QU Sheng, LIU Zu-ming, LIAO Hua, *et al.* Selective emitter solar cell structure and its implementation [J]. *China Construction News; Solar Energy*, 2004, **5**(4): 42-45.
- [2] ZHAO Jian-hua, WANG Ai-hua, GREEN M A. 24.5% efficiency PERT silicon solar cells on SEH MCZ substrates and cell performance on other SEH CZ and FZ substrates [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, **66**(1): 27-36.
- [3] GREEN M A, EMERY K, HISHIKAWA Y, *et al.* Solar cell efficiency tables (version 39) [J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2011, **20**(1): 12-20.
- [4] EDWARDS M. Efficiencies of 22% at low cost: the future of mass-produced laser-doped selective emitter solar cells [J]. *Photovoltaics International*, 2011, **10**: 72-78.
- [5] HAMEIRI Z, MAI L, SPROUL A, *et al.* 18.7% efficient laser-doped solar cell on P-type Czochralski silicon [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(22): 222111-222111-3.
- [6] KRAY D, ALEMAN M, FELL A, *et al.* Laser-doped silicon solar cells by laser chemical processing (LCP) exceeding 20% efficiency [C]. Photovoltaic Specialists Conference, 2008. PVSC'08. 33rd IEEE. IEEE, 2008: 1-3.
- [7] RODER T, GRABIZ P, EISELE S, *et al.* 0.4% absolute efficiency gain of industrial solar cells by laser doped selective emitter [C]. Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2009 34th IEEE. IEEE, 2009: 000871-000873.
- [8] EISELE S J, RODER T C, KOHLER J R, *et al.* 18.9% efficient full area laser doped silicon solar cell [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(13): 133501-133501-3.
- [9] PAVIET-SALOMON B, GALL S, MONNA R, *et al.* Experimental and analytical study of saturation current density of laser-doped phosphorus emitters for silicon solar cells [J]. *Solar Energy Material and Solar Cells*, 2011, **95**(8): 2536-2539.
- [10] LI Tao, ZHOU Chun-lan, ZHAO Lei, *et al.* Preparation of crystalline silicon solar cells laser doped research progress [J]. *Electrotechnical Society*, 2011, **26**(12): 141-147.
- [11] 李涛,周春兰,赵雷,等.激光掺杂制备晶体硅太阳能电池研究进展[J].*电工技术学报*, 2011, **26**(12): 141-147.
- [12] 张陆成.晶体硅太阳能电池的激光工艺和前点电极技术研究[D].广州:中山大学凝聚态物理系,2009.
- [13] 朱薇桦.晶体硅太阳能电池电极研究[D].广州:中山大学材料物理与化学系,2010.
- [14] ZHU L Q, GONG J, HUANG J, *et al.* Improving the efficiency of crystalline silicon solar cells by an intersected selective laser doping [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2011, **95**(12): 3347-3351.
- [15] 韩允.磷浆法制备选择性发射极单晶硅太阳能电池的研究[D].北京:北京交通大理学院,2011.
- [16] 屈盛.丝网印刷制作选择性发射极太阳能电池的研究[D].昆明:云南师范大学农业生物环境与能源工程系,2005:39-40.
- [17] HUYNH W U, DITTMER J J, ALIVISATOS A P. Hybrid nanorod-polymer solar cells [J]. *Science*, 2002, **295**(5564): 2425-2427.
- [18] DOU Wei-jiang, QIN Ying-xiong, JU Xiao-bao, *et al.* Diffusion processing and its matching property of multicrystalline silicon solar cells through reactive ion etching texturing [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(6): 649-653.
- [19] 豆维江,秦应雄,巨小宝,等.多晶RIE制绒后电池工艺的匹配性研究[J].*光子学报*, 2013, **42**(6): 649-653.