

# 单晶硅太阳能电池电致发光缺陷及工艺影响因素分析

马新尖 林涛

(西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

**摘要** 通过实验对比的方法对单晶硅太阳能电池电致发光(EL)缺陷及不同工艺的影响进行了分析,测试了电池片的开路电压、短路电流、填充因子、光电转换效率等性能参数,并统计了太阳能电池片的EL缺陷比例。实验发现浆料组分配比、烧结工艺稳定性及硅片质量是引起太阳能电池EL缺陷的主要原因,浆料质量、丝网印刷工艺参数、烧结温度稳定性及镀膜工艺的减反射及钝化效果也对太阳能电池的光电转换效率存在一定的影响。在此基础上,通过分析建议改善烧结工艺稳定性,采用性能更好的浆料和硅片,优化丝网印刷参数及氨气和硅烷流量比,来改善太阳能电池EL缺陷,提高太阳能电池的光电转换效率和合格率。

**关键词** 太阳能电池;电致发光;转换效率;浆料;烧结工艺;硅片

中图分类号 TN36 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP50.031601

## Analysis of Mono-Crystalline Silicon Solar Cells Electroluminescence Defects and Process Influencing Factors

Ma Xinjian Lin Tao

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

**Abstract** Electroluminescence (EL) defects and different process influencing factors of mono-crystalline silicon solar cells are analyzed by experimental comparison method. The open circuit voltage, short circuit current, fill factor and photoelectric conversion efficiency of the solar cells were tested, and the EL defect proportion of the solar cells is collected. It is found that the paste, sintering process, and the silicon wafer are the main causes of the EL defects. The quality of paste, the parameters of screen-printing, the stability of sintering process and the anti-reflection and passivation effect of coating process have some effects on the photoelectric conversion efficiency of solar cells. It is suggested that improving the sintering process stability, using better performance of paste and silicon wafer and optimizing the parameters of screen-printing and the flow ratios of ammonia and silane can improve the EL defect and promote the photoelectric conversion efficiency and qualified rate of solar cells.

**Key words** solar cell; electroluminescence; conversion efficiency; paste; sintering process; silicon wafer

**OCIS codes** 160.6030; 350.6050; 040.5350

## 1 引言

随着化石能源存储量减少、温室效应引起的气候变暖以及核能安全性的不确定这一系列问题的突显,人们开始寻求清洁无污染的新能源。太阳能以其取之不尽、用之不竭及清洁无污染的优点而备受人们的关注,光伏发电的成本优势也日渐明显。太阳能电池作为光伏发电的核心,其质量的优劣直接影响着太阳能电池组件的光电转换效率。而电池片在生产及使用中却存在着一系列不可忽视的质量问题,如隐裂、Al包、虚印、粗线、弓片等外在的缺陷可以及时发现,而如黑芯片、履带印、漏电等内在的隐性缺陷却不能直接观察到,这些

收稿日期: 2012-10-31; 收到修改稿日期: 2012-11-19; 网络出版日期: 2013-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(61106043)和高等学校博士学科点专项科研基金(20096118120009)资助课题。

作者简介: 马新尖(1985—),女,硕士研究生,主要从事半导体光伏电池工艺和器件等方面的研究。

E-mail: xinjianma99@gmail.com

导师简介: 林涛(1977—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事半导体光电子器件方面的研究。

E-mail: llttltao@163.com(通信联系人)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网(www.opticsjournal.net)

外在缺陷和内在缺陷极大地影响了电池片的光电转换效率及使用效果,同时给制造商带来一定的经济损失,因此,对工业生产过程中电池片缺陷的检测尤为重要。

近年来,电致发光(EL)成像技术已经被广泛地用于太阳电池的缺陷检测中。Fuyuki等<sup>[1,2]</sup>通过EL成像技术分析太阳电池的本征缺陷及外部缺陷,指出电子陷阱的多少决定着具有深能级的本征缺陷的红外发光强度,同时通过对比滤波后的EL图像,发现外部缺陷可能会产生严重影响器件的长期可靠性。Lin等<sup>[3]</sup>通过EL检测成功确认了光伏组件老化过程中电池的退化机制,并指出,除了太阳电池自身的缺陷外,大多数的裂纹缺陷主要发生在具有高残余应力的区域。还有研究表明,在正向偏压下,EL强度和电池中的少数载流子数目及其扩散长度具有密切的关联性<sup>[4,5]</sup>;若某区域的EL强度较低,则表明该处存在着质量缺陷<sup>[6]</sup>。目前对于太阳能光伏电池和组件已经从简单的外观和功率合格的质量标准过度到EL测试结果和功率合格的质量标准。因此,对于太阳电池EL测试中的不良结果必须有着准确的成因分析,这样才能有针对性地进行工艺过程控制和原材料控制。对于电池片的隐裂、断栅、虚印、漏电、穿孔等问题,通过EL图像可以简单地判定。然而对于电池片部分区域EL测试发黑,则由于其成因复杂,仅从EL测试结果并不能准确分析其产生的原因,所以从太阳电池生产工艺研究EL缺陷具有一定的意义。

本文针对以上EL缺陷,设计了多组工艺对比实验,对每一组实验,测试了电池片的开路电压、短路电流、填充因子、光电转换效率、EL图像等性能参数。通过统计数据,分析了不同工艺对电池片出现EL缺陷及光电转换效率的影响,并提出了合理的建议及解决方法。

## 2 实验

### 2.1 电池制作工艺

实验中均采用标准化的单晶硅太阳能电池制作工艺。衬底为p型的125 mm×125 mm单晶硅,表面积154.83 cm<sup>2</sup>,厚度180~200 μm,电阻率1~3 Ω·cm。为了减少表面的光反射损失,首先将硅片放在含有NaOH、乙醇和添加剂的碱性溶液中进行表面制绒;然后在扩散温度为850 ℃左右、通有POCl<sub>3</sub>扩散源的扩散炉中扩散生成方块电阻45~50 Ω的n型发射层;为了防止因扩散形成的周边短路,采用等离子体刻蚀技术去掉边缘pn结,并采用HF酸溶液去掉因扩散氧化而形成的磷硅玻璃(PSG)。在450 ℃,170 Pa下,利用硅烷(SiH<sub>4</sub>)和氨气(NH<sub>3</sub>)在管式等离子体增强化学气相沉积(PECVD)设备中淀积SiN<sub>x</sub>减反射膜;通过丝网印刷工艺制作背电极、铝背场及正面栅电极,经过烧结工艺形成良好的欧姆接触。

采用四探针测试仪对扩散方块电阻进行测试,采用椭圆偏振仪对电池SiN<sub>x</sub>减反射膜的膜厚及折射率进行测试,采用太阳电池测试仪对太阳电池电学特性进行测试,采用EL缺陷测试仪对电池片EL缺陷进行测试,使用激光显微镜对电池栅电极形貌及高度和宽度进行测量。

### 2.2 实验方案

表1给出了具体的工艺实验方案,实验共7组,分别采用不同工厂Fab1(用“1”表示)和Fab2(用“2”表示)的工艺完成太阳能电池的制作。其中D组采用Fab2的硅片,其余实验组均采用Fab1的硅片。在丝网印刷时Fab1和Fab2使用相同Al背场、背电极网版和浆料以及相同的正面栅电极网版,正面栅电极分别采用浆料a和浆料b。

表1 工艺实验方案

Table 1 Scheme of the process experiments

Experimental group	Texture	Diffusion	Etching/Cleaning	PECVD	Screen-printing/Sintering	Paste
A: 200	1	2	1	1	1	a
B: 200	1	2	2	2	1	a
C: 80	1	1	2	2	2	b
D: 120	2	2	2	2	1	a
E: 67	1	1	1	1	2	b
F: 79	1	1	1	1	2	a
G: 54	1	1	1	1	1	a

### 3 电学特性测试结果与讨论

表 2 给出了各组太阳能电池电学特性测试结果,其中  $R_s$  为串联电阻, $R_{sh}$ 为并联电阻。从表中可以看到开路电压变化幅度为 4 mV,短路电流变化幅度为 81 mA,填充因子变化幅度为 2.02%,转换效率变化幅度为 0.34%。效率计算公式为<sup>[7]</sup>

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times F_F}{A \times P_{in}},$$

式中  $V_{oc}$  为开路电压, $I_{sc}$  为短路电流, $F_F$  为填充因子, $A$  为太阳能电池面积, $P_{in}$  为入射光功率。

可以看出,当  $V_{oc}$ 、 $I_{sc}$ 、 $F_F$  三者中任何一个发生变化时,都会引起  $\eta$  的变化。通过 EL 测试,不同效率的太阳能电池存在不同程度的缺陷,而效率的高低正好又反映了太阳能电池工艺及硅片原料的优劣。

表 2 各组太阳能电池电学特性测试结果

Table 2 Electrical characteristics of the solar cell groups

Group	$V_{oc}/V$	$I_{sc}/A$	$R_s/\Omega$	$R_{sh}/\Omega$	$F_F/\%$	$\eta/\%$
A	0.630	5.669	0.0051	39.6	77.73	17.90
B	0.630	5.640	0.0050	33.2	77.95	17.89
C	0.627	5.660	0.0052	39.1	77.09	17.68
D	0.629	5.625	0.0052	29.6	77.97	17.81
E	0.630	5.688	0.0064	589.0	77.84	18.01
F	0.631	5.706	0.0095	443.6	76.00	17.67
G	0.629	5.642	0.0052	169.1	78.02	17.88

#### 3.1 浆料的影响

由表 1 实验方案知,E 组和 F 组工艺采用的浆料不同,其他工艺条件基本一致,结合表 2 实验数据可知,F 组效率相比 E 组减小 0.34%,这主要是由串联电阻的增大导致的。栅电极浆料主要由 Ag 颗粒、玻璃粉及有机溶剂等组成。经过烧结后,形成与半导体 Si 接触的 Ag 结晶粒、玻璃层以及正面栅线 Ag 电极<sup>[8]</sup>。而玻璃粉含量的增加会使得玻璃层厚度增加,从而影响电子的隧道效应<sup>[9]</sup>。有关研究表明,在玻璃层厚度低于 5 nm 时,有利于电子的隧道效应,导致较低的接触电阻和栅电极体电阻;反之,热电子效应将占主导地位,导致较高的接触电阻和栅电极体电阻<sup>[10]</sup>,从而影响电子的收集效果,导致 EL 缺陷,在测试时电池表面部分区域发黑。

另一方面,在实验中采用相同的烧结工艺,浆料 a 与烧结温度匹配度可能不如浆料 b 的匹配度佳,导致烧结后接触电阻增加,从而影响电流的收集效果,在进行 EL 测试时出现缺陷。

#### 3.2 丝网印刷及烧结的影响

由表 1 实验工艺方案可知,F 组和 G 组电池片制作中丝网印刷和烧结工艺不同,在实验中采用同一型号 57 栅线网版进行印刷烧结实验完成太阳能电池的制作。图 1 和图 2 分别给出了 F 组和 G 组丝网印刷栅电极俯视图和截面图。由图可知,F 组栅电极的高度和宽度约为 16.3  $\mu\text{m}$  和 76.5  $\mu\text{m}$ ,G 组栅电极的高度和宽度约为 15.8  $\mu\text{m}$  和 79.3  $\mu\text{m}$ ;在使用相同的网版和浆料时,根据电阻的定义可知,栅线截面积越大,电阻越小。

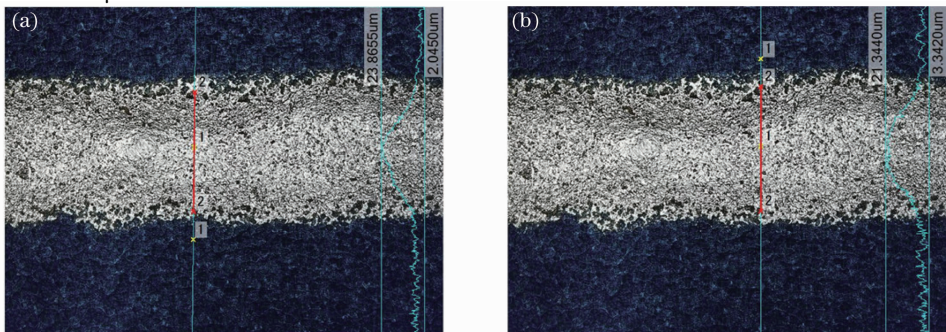


图 1 太阳能电池栅电极的俯视图。(a) F 组俯视图;(b) G 组俯视图

Fig. 1 Vertical patterns of the grid electrodes of solar cell. (a) Group F; (b) group G

由图 2 可知, F 组红色区域所占的面积略大于 G 组, 表明 F 组的栅电极体电阻小于 G 组的栅电极体电阻; F 组栅线宽度小于 G 组栅线宽度, 遮光面积变小, 增加了光入射面积, 从而增加光生载流子密度, 导致短路电流的增加, 这和 F 组短路电流大于 G 组短路电流测试结果一致。这说明丝网印刷参数的设置对于栅线高宽比有一定的影响, 栅线高宽比越大, 栅线体电阻越小, 短路电流越大; 栅线体电阻的高低影响着电流的收集效果, 从而会影响 EL 测试结果。

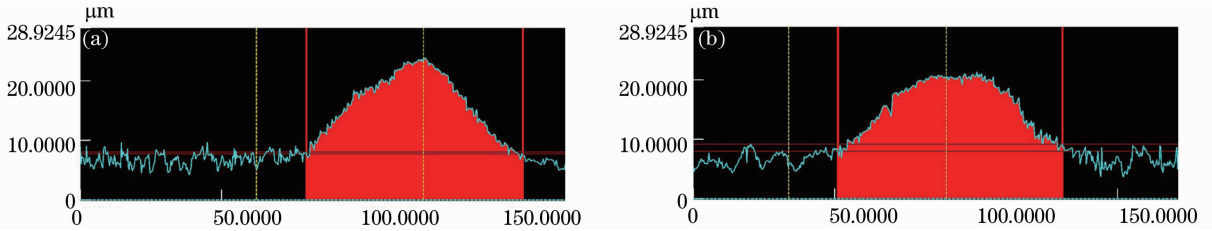


图 2 太阳能电池栅电极的截面图。(a) F 组截面图; (b) G 组截面图

Fig. 2 Cross-section images of the grid electrodes of solar cell. (a) Group F; (b) group G

另一方面, 虽然 F 组栅线的高宽比优于 G 组, 对短路电流的增加有所帮助, 但从表 2 实验数据看, F 组的串联电阻明显高于 G 组, 导致填充因子减小, 最终使得 F 组电池转换效率相比 G 组低了 0.21%, 说明丝网印刷参数对串联电阻的影响可能不如烧结温度稳定性对串联电阻的影响。因为在实验过程中, 为了避免额外的影响因素, 对 Fab2 的正常烧结温度未做调节。F 组串联电阻高于 G 组, 可能是因为烧结温度的高低及稳定性的影响, 一方面不稳定的烧结工艺可能会导致正面栅电极的过烧、烧不透、Ag 颗粒的再结晶、有机物的挥发不充分等情况而造成不良的欧姆接触, 引起串联电阻的增加, 导致 EL 缺陷并使  $F_F$  降低; 另一方面, 如果烧结参数未能达到最优化,  $\text{SiN}_x$  减反射膜中的 H 原子或分子将不能被有效地释放, 到达 Si 表面和体内的 H 变少, 不能有效地钝化 Si 表面悬挂键和体内缺陷, 这些悬挂键和体内缺陷是载流子的有效复合中心<sup>[11]</sup>, 载流子在这些复合中心处会发生无辐射复合而不能发光, 导致电池 EL 缺陷, 测试时发黑。

### 3.3 PECVD 镀膜和刻蚀的影响

由表 2 测试结果可知, C 组和 E 组电池转换效率相差 0.33%, 在串联电阻基本一致的情况下, 并联电阻的降低是导致 C 组  $I_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $F_F$  低于 E 组的主要原因。根据表 1 工艺实验方案, 忽略其他工艺的影响, C 组并联电阻的减小主要来自两个方面, 一方面可能是由于边缘 pn 结刻蚀不足引起短路, 导致  $I_{sc}$  的减小和  $F_F$  的降低, 从而可能导致电池片 EL 缺陷; 另一方面则是 PECVD 镀膜工艺对并联电阻的影响。图 3(a)、(b) 分别为 C 组、E 组的  $\text{SiN}_x$  膜厚及折射率分布, 在 PECVD 镀膜中, E 组  $\text{NH}_3/\text{SiH}_4$  流量比为 4000:420, 而 C 组  $\text{NH}_3/\text{SiH}_4$  流量比约为 5500:600, 由图可知, E 组  $\text{SiN}_x$  减反射膜平均膜厚和折射率分别为 78.4 nm 和 2.06, C 组  $\text{SiN}_x$  减反射膜的平均膜厚及折射率分别为 70.07 nm 和 2.17, 流量比越小折射率越高, 对于 C 组实验片来说, 折射率大的钝化效果好, 但是折射率越大对光的吸收也越大, 且减反射效果也不佳; 而 E 组

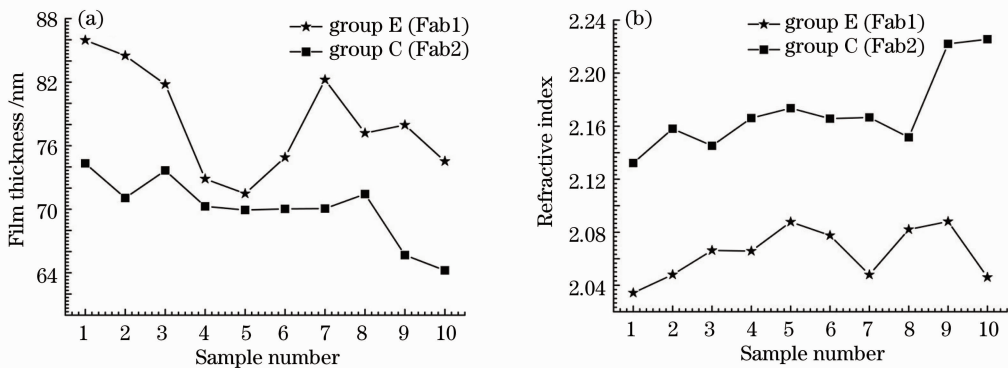


图 3 C 组和 E 组  $\text{SiN}_x$  膜厚及折射率分布。(a)  $\text{SiN}_x$  膜厚分布; (b)  $\text{SiN}_x$  折射率分布

Fig. 3 Distributions of thickness and refractive index for group C and group E. (a)  $\text{SiN}_x$  film thickness; (b)  $\text{SiN}_x$  film refractive index



$\text{SiN}_x$  膜厚及折射率大小能同时满足减反射和钝化的效果,减反射效果越好,进入半导体中的光子数越多,产生载流子的几率也就越大;钝化效果越好,界面态和悬挂键越少,对载流子的无辐射复合也就越小,在 EL 测试时电池片发黑的比例也就会降低。钝化效果好的开路电压高,这和 C 组、E 组的测试结果一致。

### 3.4 扩散工艺的影响

根据 A 组和 G 组实验测试数据可知其效率几乎一致。两组实验测得的串联电阻  $R_s$  基本一致,但 G 组的并联电阻  $R_{sh}$  高出 A 组约  $130 \Omega$ 。在单个电池中,并联电阻  $R_{sh}$  的增加会导致  $F_F$  和  $I_{sc}$  的增加,然而对比两组的实验结果并没有发现  $I_{sc}$  增加,反而是 G 组  $I_{sc}$  减少了  $0.027 \text{ A}$ 。从表 1 实验方案和表 3 中的扩散方块电阻特性分布结果可以看出,G 中实验片的方块电阻低于 A 中的,片内均匀性和极差也都比较大。当其他工艺条件相同时,扩散均匀性好的电池片,它的欧姆接触就会好,短路电流、填充因子等性能参数也就会比较稳定。而欧姆接触是串联电阻的组成部分,欧姆接触不好的太阳电池在 EL 测试时有可能会出现缺陷。

表 3 扩散方块电阻特性分布

Table 3 Characteristic distribution of diffused sheet resistance

	$R_{\square} / \Omega$	Silicon non-uniformity / %	Standard deviation / $\Omega$	Range / $\Omega$
Group G (Fab1)	46.132	6.76	2.586	10.54
Group A (Fab2)	47.800	4.00	1.940	7.40

### 3.5 制绒工艺和硅片原材料的影响

由表 2 测试结果可以看出,B 组实验短路电流高出 D 组  $15 \text{ mA}$  是导致其最终转换效率增加  $0.08\%$  的主要原因。从工艺角度分析,B 组和 D 组的主要区别为制绒工艺和硅片原材料不同,这说明 Fab1 在该方面的质量控制优于 Fab2。一方面硅片表面绒面的高度及深径能影响陷光效果,从而影响光的反射损耗及注入到电池片内的光子数,影响电池片内部产生载流子的多少,从而影响短路电流的大小<sup>[12]</sup>;另一方面,可能是质量差的硅料对短路电流产生了一定的影响,因为差的硅片内部存在较多的缺陷,这些缺陷是有效的复合中心。不论是短路电流减小还是缺陷复合中心数量的增加都会导致 EL 缺陷。

根据以上分析可知,丝网印刷参数、烧结工艺、浆料、刻蚀和 PECVD 镀膜及制绒和片源质量或多或少对电池串联电阻或是少子的复合产生影响,最终导致电池片测试中 EL 缺陷的出现。所以只有将 EL 测试结果进行统计分析,才能确定产生 EL 缺陷的主要原因。

## 4 EL 测试结果与分析

图 4 为太阳电池 EL 测试图,图 4(a)为合格单晶硅太阳电池 EL 测试图,图 4(b)为太阳电池 EL 缺陷测试图。图 4(a)中图像清晰,无黑心、黑斑等缺陷,而图 4(b)中出现局部发黑,这种 EL 缺陷出现没有固定的区域,且其光电转换效率参差不齐,所以很难从效率直接判断。实验中将所有的电池片进行了 EL 测试,发黑面积以不超出总面积的  $1\%$  为标准,并对每组实验片 EL 测试结果进行统计,测得的 EL 发黑比例如图 5 所示。

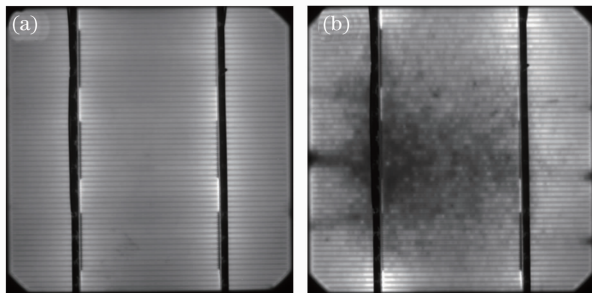


图 4 单晶硅太阳电池 EL 图。(a)合格太阳电池 EL 图;  
(b)缺陷太阳电池 EL 图

Fig. 4 EL images of mono-crystalline silicon solar cells.  
(a) EL image of qualified solar cells; (b) EL image of defective solar cells

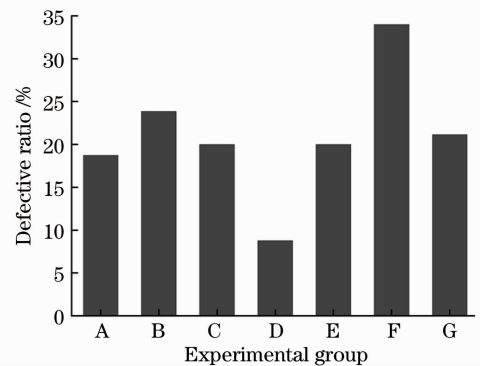


图 5 各组实验电池片 EL 缺陷比例  
Fig. 5 Defective ratios of EL images for the solar cell groups

由图可知,各组实验均出现了不同程度的 EL 缺陷,说明 EL 缺陷普遍存在于太阳能电池工业生产中。E 组和 F 组 EL 缺陷比例相差 14%,光电转换效率相差 0.34%,结合 3.1 节的分析可知,浆料组分及配比不仅对 EL 缺陷存在较大影响,而且对太阳能电池光电转换效率也存在较大影响。F 组和 G 组 EL 缺陷比例相差 12.7%,光电转换效率相差 0.21%,结合 3.2 节的分析可知,烧结温度稳定性对栅电极的接触电阻存在较大影响,不稳定的烧结温度导致接触电阻变大,对电流的收集效果变差,从而导致 EL 缺陷及转换效率的降低,同时丝网印刷参数对栅电极高宽比存在较大影响,栅线高宽比越大,不仅电流收集效果越好,而且栅线遮光面积也较小,使得光电转换效率得到提升。B 组和 D 组 EL 缺陷比例最高,约为 15%,结合 3.5 节的分析可知,在忽略制绒工艺对电流微小影响的情况下,硅片原料将成为导致太阳能电池 EL 缺陷的主要原因,这是因为硅片内部杂质缺陷是载流子的有效复合中心,内部缺陷越多,复合几率越大,复合消失的载流子因发生无辐射复合而不能发光,从而导致太阳能电池 EL 缺陷。C 组和 E 组虽然缺陷比例相差很小,但转换效率相差了 0.33%,说明 Fab1 和 Fab2 的刻蚀及镀膜工艺对 EL 测试影响差异较小,但镀膜工艺的优劣对电池的减反射及钝化效果确实存在影响,减反射效果较佳的薄膜能增加光子的入射量,激发更多电子-空穴对产生,而钝化效果较好薄膜可以有效地减少表面态,减少载流子的无辐射复合,增加少子寿命,从而使得短路电流和开路电压得到提升,由(1)式可知,最终使光电转换效率得到提升。A 组和 G 组 EL 缺陷比例及光电转换效率差别较小,结合 3.4 节的分析可知,Fab1(G 组)和 Fab2(A 组)的扩散平均方块电阻在 46~48  $\Omega$  之间,差异较小,在采用相同网版的情况下,Fab2 的方块电阻均匀性较 Fab1 略微好一些,这可能是造成 EL 缺陷和光电转换效率略有差异的原因。

综上所述,为了减少 EL 缺陷的出现及提高光电转换效率,建议使用组分配比较佳的浆料,减小接触电阻,提高电流的收集效果;优化丝网印刷参数及烧结工艺稳定性,获得较高的栅电极高宽比及良好的欧姆接触;优化  $\text{NH}_3/\text{SiH}_4$  总流量及流量比实现更佳的  $\text{SiN}_x$  膜厚及折射率,增加减反射和钝化效果;采用杂质缺陷少的硅片以减少电池片 EL 缺陷及提高光电转换效率。

## 5 结 论

在工艺实验方案的基础上结合电学参数的测试结果对单晶硅太阳能电池 EL 缺陷进行了分析。通过分析发现浆料组分配比、烧结工艺温度的稳定性及硅片的质量对太阳能电池 EL 缺陷存在影响,其中浆料和硅片质量是电池出现 EL 缺陷的主要影响因素;浆料、丝网印刷电极高宽比大小、烧结温度稳定性及 PECVD 镀膜工艺的减反射及钝化效果对光电转换效率影响较大。因此,只有改善烧结的工艺稳定性、采用性能更好的浆料及硅片才能从根本上解决电池片 EL 缺陷问题,同时需优化丝网印刷参数、烧结工艺及  $\text{NH}_3/\text{SiH}_4$  流量比和时间,以获得更好的栅电极高宽比、较小的串联电阻、较高的并联电阻及减反射和钝化效果,来最终提升产品的光电转换效率及合格率。

## 参 考 文 献

- 1 T. Fuyuki, A. Tani, S. Tsujii *et al.*. Photographic distinction of defects in polycrystalline Si by spectroscopic electroluminescence [C]. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2010. 001380~001382
- 2 Wang Chao, Jiang Xiaoyu, Liu Xiaohui. Defect detection in crystalline silicon solar cells based on electroluminescence imaging [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(9): 1332~1336  
王超, 蒋晓瑜, 柳效辉. 基于电致发光成像理论的硅太阳能电池缺陷检测[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(9): 1332~1336
- 3 K. M. Lin, Y. F. Lee, L. K. Wang *et al.*. Electroluminescence observation of microcrack growth behavior of crystalline silicon solar modules fabricated by hot-air soldering technology [J]. *Int. J. Mod. Phys.*, 2012, **6**(1): 43~48
- 4 T. Fuyuki, H. Kondo, T. Yamazaki *et al.*. Photographic surveying of minority carrier diffusion length in polycrystalline silicon solar cells by electroluminescence [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(26): 262108
- 5 T. Trupke, R. A. Bardos, M. C. Schubert *et al.*. Photoluminescence imaging of silicon wafers [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, **89**(4): 044107
- 6 Li Yanhua, Pan Miao, Pang Aisuo *et al.*. The application of electroluminescence imaging to detection the hidden defects in silicon solar cells [J]. *Chinese J. Luminescence*, 2011, **32**(4): 378~382

- 李艳华, 潘 森, 庞爱锁 等. 电致发光成像技术在硅太阳能电池隐性缺陷中的应用[J]. 发光学报, 2011, **32**(4): 378~382
- 7 M. A. Green. *Solar Cells-Operating Principles, Technology and System Applications* [M]. Di Dawei, Cao Zhaoyang, Li Xiuwen *et al.* Trasl. . Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2010. 50~51  
马丁·格林. 太阳能电池:工作原理、技术和系统应用 [M]. 狄大卫, 曹昭阳, 李秀文 等译. 上海: 上海交通大学出版社, 2010. 50~51
- 8 Ching-His Lin, Song-Yeu Tsai, Shih-Peng Hsu *et al.*. Investigation of Ag-bulk/glassy-phase/Si heterostructures of printed Ag contacts on crystalline Si solar cells [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2008, **92**(9): 1011~1015
- 9 Chen Ning, Zhang Liying, Zhang Yaozhong *et al.*. Effects of glass power in screen printed silver front electrodes on series resistance of silicon solar cells [J]. *Electronics Process Technology*, 2011, **32**(3): 125~127  
陈 宁, 张丽英, 张耀中 等. 银浆中的玻璃粉对晶硅太阳电池串联电阻的影响[J]. 电子工艺技术, 2011, **32**(3): 125~127
- 10 Zheng Jianhua, Zhang Yaping, Ao Yiwei *et al.*. Influence of silver paste composition on of screen-printed ohmic contacts silicon solar cells [J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2008, **29**(10): 1274~1277  
郑建华, 张亚萍, 敖毅伟 等. 银浆组成对硅太阳电池丝网印刷欧姆接触的影响[J]. 太阳能学报, 2008, **29**(10): 1274~1277
- 11 Liu Enke, Zhu Bingsheng, Luo Jinsheng. *Semiconductor Physics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008. 152~159  
刘恩科, 朱秉升, 罗晋升. 半导体物理学[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008. 152~159
- 12 Qiu Mingbo, Hang Yinhui, Liu Zhidong *et al.*. Numerical study on effect of silicon texture structure on reflectance of light [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2394~2399  
邱明波, 黄因慧, 刘志东 等. 硅片绒面形貌影响光线反射的数值研究[J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2394~2399