

# 25%效率晶体硅基太阳能电池的最新进展

邓庆维 黄永光 朱洪亮

中国科学院半导体研究所半导体材料重点实验室, 北京 100083

**摘要** 综述了目前光电转换效率达到25%的单结非聚光晶体硅基太阳能电池研究的最新进展, 阐述发射极钝化-背部局域扩散电池结构、叉指背接触结构、异质结结构和异质结背接触结构太阳能电池高效率的原因, 并结合我国硅基光伏产业现状进行了发展趋势预测和技术需求分析。

**关键词** 光电子学; 晶硅太阳能电池; 转化效率; 发展趋势

**中图分类号** TM914.4 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.110002

## Newest Achievement of More than 25% Conversion Efficiency with Crystalline Silicon-Base Solar Cell

Deng Qingwei Huang Yongguang Zhu Hongliang

Key Laboratory of Semiconductors Materials, Institute of Semiconductors,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China

**Abstract** The latest progress of single-junction non-concentration crystalline silicon solar cell research of which photoelectric conversion efficiency up to 25% is summarized. The reason why passivated emitter, rear locally-diffused (PERL) structure, interdigital back-contacted (IBC) structure, hetero-junction with intrinsic thin-layer (HIT) structure and hetero-junction back-contacted (HBC) structure solar cells have so high efficiency is explained. Combined with the current status of China's silicon-based photovoltaic industry, the development trends are predicted, and the technical demands are analysed.

**Key words** optoelectronics; crystalline silicon solar cell; conversion efficiency; development trend

**OCIS codes** 040.5350; 040.6040; 350.6050; 350.3850

### 1 引言

在应对全球能源资源短缺、气候变暖和人类生态环境恶化的危机中,越来越多的国家开始实行“阳光计划”<sup>[1-2]</sup>, 开发和利用无污染可再生的太阳能资源。其中尤以光伏发电的发展最为迅速, 太阳能电池是光伏发电的核心, 可以直接将太阳能转化为人类使用的电能。硅基太阳能电池作为第一代电池, 目前依然是世界上产量和安装量最高的太阳能电池, 其规模占有所有光伏电池的90%以上, 在未来一段较长的时间内依然是主要形式。因此, 世界各主要国家一直未停止对硅基太阳能电池的研究、开发、应用和市场推广, 考虑到晶硅太阳能电池作为新能源形式的重要地位, 与其相关的国际贸易战争和技术革新将进一步延续。

光电转换效率是衡量太阳能电池技术水平的关键指标, 自1954年Bell实验室的Chapin等<sup>[3]</sup>报道效率达到6%的Si基pn结太阳能电池以来, 围绕提升硅太阳能电池效率的努力未曾停止过。在过去60年里, 在电池材料、结构、工艺、技术路线等方面的革新使得单结硅太阳能电池效率得到了极大提高并实现了产业化生产, 如扩散、镀膜等经典半导体工艺的使用和改进是早期电池效率提升的主要原因, 而电池结构和工艺流程如制绒工艺、光刻工艺、钝化发射级、钝化发射级背接触技术、钝化发射极背面局域扩散技术等引入在20世纪八九十年代的电池效率提升中扮演了主要的角色。1999年, 澳大利亚新南威尔士大学的钝化发射极背面局域扩散电池(PERL)

收稿日期: 2015-06-13; 收到修改稿日期: 2015-07-30; 网络出版日期: 2015-10-29

基金项目: 国家863计划(2012AA050304)

作者简介: 邓庆维(1990—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光光伏应用方面的研究。E-mail: dengqingwei@semi.ac.cn

导师简介: 朱洪亮(1957—), 博士生导师, 研究员, 主要从事光电功能集成器件方面的研究。

E-mail: zhuhl@semi.ac.cn(通信联系人)

效率达到了25%<sup>[4-5]</sup>,目前仍然是单晶硅电池效率的世界记录之一。此后的15年间,硅基太阳能电池市场迅速发展壮大,更多的研究围绕降低硅太阳能电池成本、优化相关材料性能、简化制造流程和实现大规模生产的高重复性开展工作,与之前纯粹追求最高效率不同,目前的硅电池研究需要同时兼顾成本和效率,更多的研究主体是企业带领的研究团队进行攻关以应对未来市场,因此技术路线的选择尤其重要。

PERL电池虽然取得了效率上的成功,但是受限于成本和工艺复杂性,该技术未能成为产业电池的方案。2014年,现代太阳能电池诞生60周年的日子,硅基光伏取得了重要的突破,两种新结构的单结硅太阳能电池达到了25%效率。美国的sunpower公司产业线上大尺寸的叉指背接触结构的太阳能电池(IBC)效率达到了25%<sup>[6]</sup>,日本夏普公司研制的异质结背接触结构的太阳能电池(HBC)达到了25.1%<sup>[7]</sup>,紧随其后,松下公司将大尺寸的HBC电池效率做到了25.6%<sup>[8]</sup>,实际上这些公司进行的效率比赛也预示产业化中的高效率电池路线。本文探讨这些效率高达25%的大尺寸非聚光-单结硅基太阳能电池的新结构原理和技术路线,采用成本和效率两个衡量标准考量技术方案的应用前景,并对国内企业应对提升晶体硅电池转化效率给出建议。

## 2 硅基太阳能电池基础结构

目前典型的硅基太阳能电池的横截面结构如图1所示,太阳光从电池正面入射,正面的电极会遮挡一部分光线,其余太阳光线经过电池减反射层实现最大程度的吸收,然后到达硅发射层与硅衬底形成的耗尽层区域,在耗尽层区域,能量超过硅禁带宽度的光子激发出的载流子,在内建电场的作用下实现分离,电子和空穴在这种分离的作用下分别被正面和背面的电极所吸收,就产生了光电流。

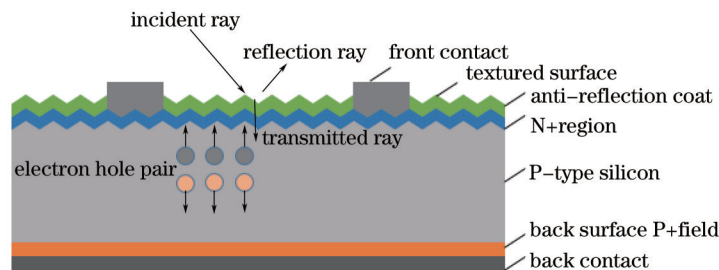


图1 典型的硅基太阳能电池结构图

Fig.1 Structure of typical silicon-based solar cell

硅基太阳能电池于1954年发明,最初主要应用于外太空作为供电的能源,在60年代美国和苏联太空竞赛背景下得到长足的发展,之后几十年一直处于实验室研究阶段,在90年代之后开始在商业应用上有所发展。在太阳能电池研究的几十年内,电池光电转换效率的逐步提高和生产成本的逐步降低是硅基太阳能电池得到民用的关键因素。在这其中,表面织构化、减反射层的制作,前表面钝化和铝背场结构等关键工艺的突破是其中的关键。

表面织构化是通过制作表面机械结构增加电池对于光的吸收率,比较常见的是金字塔结构、倒金字塔结构和纳米微结构等,应用最广的织构化方法是湿法腐蚀<sup>[9]</sup>。效率较高的织构化为倒金字塔结构,入射到这个结构上的大多数光会在入射的第一个点上进入金字塔的侧壁,大多数光耦合进入电池,反射的光将朝下反射,至少多出一次机会进入电池,同时,倒金字塔结构对于电池背部反射回的光有抑制其逃逸的作用,因而得到广泛应用。

减反射层是为了改善电池对于入射光的吸收率而制作的薄膜结构。基于光的波动理论,1/4波长厚度的减反射涂层对于对应波长有最大程度的增透作用<sup>[10]</sup>。对于实验室电池而言,最常用的减反射技术是生长一层薄的热氧化膜和通过蒸发ZnS和MgF<sub>2</sub>层生成双层减反射涂层。但是,现在几乎所有的光伏公司均采用了等离子增强化学气相沉积(PECVD)氮化硅作为减反射结构,优点在于其优秀的折射率、极好的表面和体钝化性质。

前表面钝化是通过镀膜结构减小电池表面复合的工艺,未经钝化的电池表面有大量表面态,光照激发的电子-空穴对在表面复合十分严重,对电池性能影响较大,前表面钝化就是通过淀积表面态较小的薄膜结构覆盖原表面的过程,一般减反射层就有表面钝化的作用。

铝背场结构目前应用在大多数产业化电池中,通过丝印铝浆与硅在577℃温度下铝与硅形成共熔合金,铝硅

烧融物再生长在电池背面形成 P<sup>+</sup>/P 结得到。铝背场能够在电极处形成良好的欧姆接触,而且有一定的吸杂作用。

### 3 25%高效率硅基新结构太阳能电池发展现状

目前硅基太阳能电池的种类很多,不考虑聚光情况,目前转换效率达到 25% 的高效率硅基太阳能电池主要有发射极 PERL、叉指背接触 IBC、异质结 HBC 等结构,下表总结了目前高效率的硅基太阳能电池,由于 HBC 电池技术的基础是带有本征非晶硅薄层的异质结太阳能电池(HIT),下文也将简要介绍下 HIT 电池。

表 1 高效率硅基太阳能电池

Table 1 High efficiency silicon-based solar cell

Research unit	Type of silicon base	Cell area /cm <sup>2</sup>	Cell structure	Open-circuit voltage /mV	Short-circuit current / (mA/cm <sup>2</sup> )	Cell efficiency	Year of the cell developed
UNSW	P-type FZ	4	PERL	706.0	42.70	25.0%	1989 <sup>[2-3]</sup>
Sunpower	N-type CZ	121	IBC	730.3	41.22	25.0%	2014 <sup>[4]</sup>
Sharp	N-type CZ	3.72	HBC	736.0	41.7	25.1%	2014 <sup>[5]</sup>
Panasonic	N-type CZ	143.7	HBC	740.0	41.8	25.6%	2014 <sup>[6]</sup>

Attention: CZ refers to the Czochralski crystal growth method, which is low-cost technology; FZ refers to the float zone melting silicon crystal growth method, which is more costly.

#### 3.1 PERL 太阳能电池

澳大利亚的新南威尔士大学研制了 PERL 结构的硅太阳能电池,1999 年在 4 cm<sup>2</sup> 的 P 型 FZ 硅实现了 25% 的转换效率(1999 年是 24.7%,2009 年太阳能光谱参照修正之后达到 25% 的效率)。PERL 电池的特点是极好的单晶质量,在晶体硅正反双面均长了 SiO<sub>2</sub> 层,良好的钝化特性使得电池界面复合损失很低。金属电极通过 10 μm×10 μm 的小孔接触到电池,而且电极接触的半导体部分重掺杂,这种结构能够形成良好的欧姆接触从而减小串联电阻,而且可以抑制接触处载流子复合,被称为选择性点接触工艺<sup>[1]</sup>。另一个主要的特点是背面的 Al 电极层和 SiO<sub>2</sub> 层,这种组合对于入射到 Si/SiO<sub>2</sub> 界面角度在 24.7° 下的光线有高界面反射率。电池正面各向异性腐蚀形成的倒金字塔结构能够有效地减少入射光的反射,而且对于电池背面反射回的光有高的反射率。这样吸收的光线就能够很大程度上陷在电池内部,提高了电池的量子效率。此外,一层 MgF<sub>2</sub>/ZnS 双层结构覆盖在氧化层表面,使得表面反射率进一步降低。这些举措使得 PERL 电池的内量子效率显著提高,蓝光处内量子效率甚至达到了 100%。PERL 电池一直是高效硅基太阳能电池的代表<sup>[12-13]</sup>,但其复杂的光刻工艺以及对衬底晶格质量的高要求使得实现成本较高,因而一直没有实现规模生产。

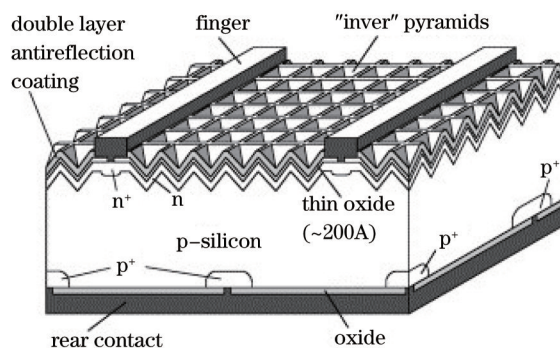


图 2 新南威尔士 PERL 电池示意图

Fig.2 PERL cell structure

#### 3.2 IBC 太阳能电池

1975 年, Schwartz 和 Lammert 第一次提出了 IBC 结构<sup>[14-15]</sup>, IBC 电池的显著特点在于没有正面电极,正负电极均位于电池背面,且正负电极呈现叉指状。当时提出的目的是为了解决由于高照明强度带来的电压饱和问题,而伴随这种结构而来的串联电阻的减小、栅线遮光的移除,对于取得高效率的光伏电池很有帮助,使得 IBC 电池一直被认为是取得高效率电池的一种有效途径。此外,IBC 电池的背面叉指化电极结构有望降低电池片间组装成本,减少铝条焊接工艺。

自从 IBC 结构被提出以后,一直是高效率太阳能电池的研究热点。2011 年, ECN 实验室利用丝网印刷硼

源发射极及热扩散的方式制出了效率为19.1%的IBC电池<sup>[16]</sup>。2012年,欧洲IMEC实验室分别利用CVD沉积硼源和 $\text{BBr}_3$ 气态扩散两种方式制备IBC,发现 $\text{BBr}_3$ 气态扩散下有实验最高效率,达到了23.3%<sup>[16]</sup>。2013年,德国的ISFH实验室研究了IBC电池的背部钝化,比较了 $\text{SiO}_2$ 基极电极处钝化与全背场 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 钝化的效果,发现 $\text{SiO}_2$ 钝化有较高的开路电压,但是填充因子偏小,转化效率大于全背场 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 钝化制作的电池,达到了23.1%<sup>[17]</sup>。

目前最高效率的IBC太阳能电池由美国的Sunpower公司保持。2014年,Sunpower公司成功刷新了IBC电池的纪录,达到了25.0%的电池效率。Sunpower公司的IBC电池结构如图3所示,采用了N型硅片作为衬底,前表面是为了减反射采用的制绒、 $\text{SiO}_2$ 钝化及前表面场优化的扩散层,背表面是叉指状的 $\text{N}^+$ 和 $\text{P}^+$ 扩散及栅线用于收集电池背部产生的光生载流子。Sunpower一直致力于高效率的太阳能电池,其IBC电池的产业线效率早就超过了20%<sup>[18]</sup>,是目前商用高效硅太阳能电池的代表。其取得高效率的关键在于局部背接触减少了接触复合损失,正面栅线的移除大大减少了电池效率中的光学损失,背面的金属化增加了背面反射以及较低的串联电阻。2011年,Sunpower等<sup>[19]</sup>在 $\text{N}^+$ 与 $\text{P}^+$ 之间采用制绒二氧化硅层做了隔离,并且在背表面做了更优的钝化,使得IBC电池工艺线效率达到了23.6%。2014年,Sunpower<sup>[20]</sup>继续在原有基础上改进,减小了发射极的复合和背部光学损失,首次做出了电池效率达到25%的IBC电池,接近了Swanson在2005年提出的实际单结太阳能电池极限效率——26%。

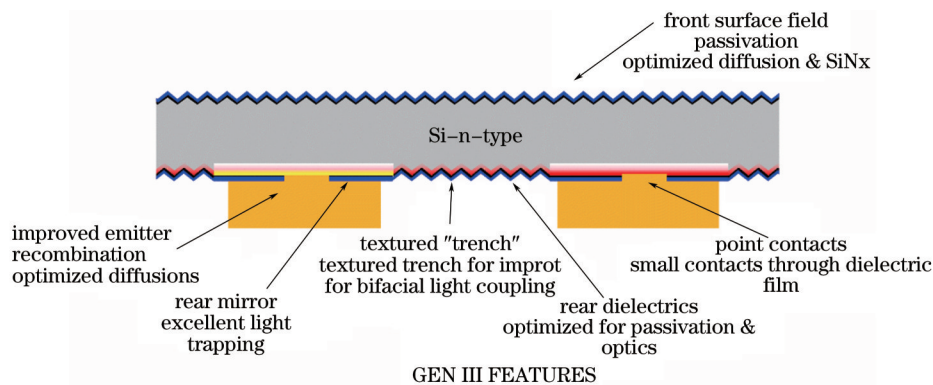


图3 Sunpower 第三代IBC电池结构示意图

Fig.3 Schematic of the Sunpower Generation 3 Solar cell

Sunpower公司分析了25%效率的IBC电池后发现,电池效率的主要损失在于发射极复合和背部光学损失,同时,常州天合公司分析的IBC电池效率的主要损失同样在于光学损失和复合损失<sup>[21]</sup>。因此,IBC电池下一步提升的空间在于背部减反射和更高效的钝化。对于硅基太阳能电池,HIT电池一直是高效钝化的代表。

### 3.3 HIT 电池

HIT太阳能电池起源于Hamakawa等<sup>[19]</sup>设计的a-Si/c-Si堆叠太阳能电池,与单晶、非晶硅太阳能电池相比,其具有低温工艺,高的稳定性等优点,HIT太阳能电池的电池效率记录由日本的松下公司(原本是三洋公司,但是三洋公司被松下公司收购)保持,松下公司2013年在面积 $101.8\text{ cm}^2$ , $98\text{ }\mu\text{m}$ 厚的N型Cz硅上制成了24.7%的HIT电池<sup>[22]</sup>。

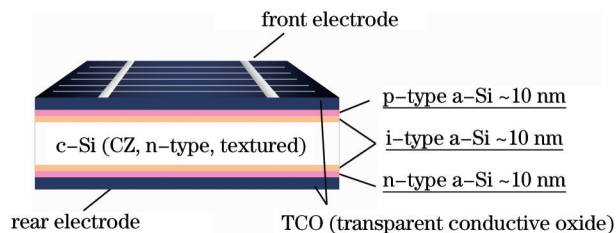


图4 HIT电池结构示意图

Fig.4 Structure of an HIT solar cell

松下公司的HIT电池结构如图所示,一层本征非晶硅和P型非晶硅淀积在随机制绒的N型Cz硅上,形成一个PN异质结,本征非晶硅和N型非晶硅淀积在另外一面形成一个背表面场结构,接着两面同时镀上非晶硅、透明导电氧化层和电极,就形成了HIT太阳能电池。HIT电池有很多优势:将本征非晶硅层插入P型

(或者N型)非晶硅和晶体硅的工艺能够形成优秀的钝化;200℃以下的低温工艺能够最大程度上保证晶体硅质量不衰减;与热扩散电池相比,HIT电池有更好的温度系数和开路电压。

### 3.4 HBC 电池

HBC结构由日本的夏普公司提出,是背接触IBC电池与硅基异质结HIT电池的良好结合。由于没有正面栅线遮光,电池有高的短路电流;由于有高质量的氢化非晶硅钝化,电池有高的开路电压。HBC结构结合两种电池的优点,于2014年成功地在N型Cz硅上制作了效率为25.1%的太阳能电池。

HBC电池的结构如图5所示。为了获得高的开路电压,需要尽可能的减少异质结面载流子的复合。公司采用了与HIT电池氢化非晶硅类似的方法实现了a-Si:H的结晶控制;为了获得高的短路电流,电极采用了全背面结构的制作。利用HIT电池的优点,所有工艺都在200℃下制作完成,因此HBC电池摒弃了背面扩散掺杂的方式分别采用氢化结晶i/p及i/n非晶硅及光刻腐蚀的技术,完成了局部高掺杂。

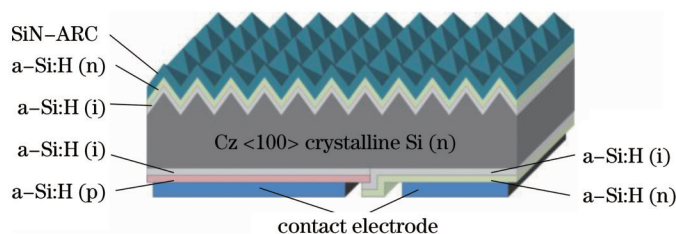


图5 HBC 电池结构示意图

Fig.5 Structure of HBC structure cells

夏普公司并不是HBC效率的保持者,目前HBC电池效率最高记录已由日本松下公司改写,他们在 $143.7\text{ cm}^2$ 的N型Cz硅上,实现了电池效率25.6%,也是目前单结硅基太阳能电池的最新记录。

松下HBC电池的结构如图6所示,正面制绒,且有SiN钝化层,背面是非晶硅,下面是叉指状分布的n型非晶硅和p型非晶硅及相应的电极。测试结果发现,相比于HIT电池,HBC电池在量子响应度上有明显的增加,使得电池的短路电流由 $39.5\text{ mA/cm}^2$ 增长到 $41.8\text{ mA/cm}^2$ ,有5.8%的提升。但开路电压有1.3%的减少,应是背部结构复杂性增加导致钝化效果降低的原因。

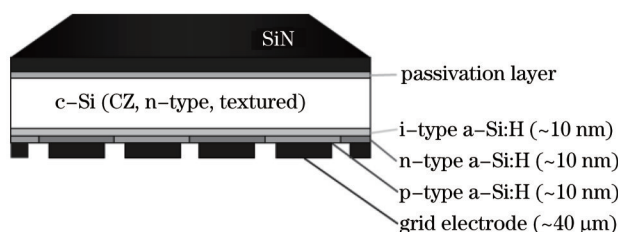


图6 松下公司的HBC 电池结构示意图

Fig.6 Structure of crystalline silicon heterojunction solar cell with interdigitated back contact.

### 3.5 4种结构电池的比较

PERL电池很早就达到了25%的光电转化效率,但是一直停留在实验室阶段。IBC电池和HIT电池不仅在实验室有高的转化效率,而且应用在了产业线上。HBC电池是刚刚提出的概念,能否应用在产业线上尚属未知。表2比较了4种类型电池的优缺点,并给出了相应的代表研究机构和产业化现状。

## 4 结论与展望

硅基太阳能电池经过60年的研究和发展,提出了非常多的方案,以实现高效率。目前从实验室至产业化规模生产角度来看,通过无遮光的背接触结构提高短路电流,和通过异质结结构提高开路电压,以及这两种方案的结合,都是有望在产业上实现25%效率的可靠路径。

这几年国内太阳能电池的规模达到了世界第一的水平,硅太阳能电池的效率也不断提高,各大晶硅光伏公司都在朝转换效率超越20%以上的高效电池方向推进。在国家863计划等课题的资助下,一些公司已经具有了小规模生产20%效率电池的能力。常州天合公司在2014年,已经在 $2\text{ cm}\times 2\text{ cm}$ 的N型Cz硅上成功研制出效率达24.4%的HBC太阳电池,如图7所示,部分结构看起来与Sunpower的IBC电池结构类似,目前未披露技术细节。

表2 4种电池(PERL,IBC,HIT和HBC)的优缺点比较

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of the four types of solar cell (PERL,IBC,HIT and HBC)

Type of cell	Advantage	Disadvantage	Industrialized or not	Representative research institution
PERL	The "inverted pyramid structure" and double-layer antireflection structure reduce the reflectivity of light for the most part. The SiO <sub>2</sub> passivation layer of the front and back reduce surface recombination, increase the carrier collection efficiency and the open-circuit voltage.	Complex lithography process and high requirements of the quality of substrate lattice make its realization cost too much.	no, stay in the laboratory	UNSW(The University of New South Wales)
IBC	No shading by front metallization occurs. It is benefit for the fabrication of antireflection structure which is good for short-circuit current. The increased back electrode width reduce series resistor, and the cross-finger electrode is good for cell packaging.	The back electrode structure affected the back passivation in some degree, and affected the promoting of open-circuit voltage.	Yes, and the highest industrialized efficiency is about 25%.	Sunpower Trina solar ECN(Energy research Centre of the Netherlands) IMEC (Interuniversity Microelectronics Centre)
HIT	The process inserting intrinsic amorphous silicon layer into amorphous silicon and crystalline silicon make excellent passivation; The low temperature process under 200 °C make the quality of crystal silicon drop a little; Comprised to the thermal diffusion cell, HIT cell have a good temperature coefficient and open-circuit voltage.	It cost too much for the fabrication of N-type HIT cell, and it is very difficult for the fabrication of P-type HIT cell. The efficiency of the P-type HIT cell is under 20% now.	Yes, and the highest industrialized efficiency is about 21%.	Panasonic
HBC	Combined with high short-circuit current of IBC cell and high open-circuit voltage of HIT cell, The efficiency of HBC cell break through 25%.	The production process is very complicated, much difficulty will be faced when it is applied to industry.	No, it is realized in laboratory not long ago.	Panasonic Sharp

目前,市面上典型结构的太阳能电池主要依赖如电极浆料等材料的改进来实现效率提升,而25%以上高效率的硅电池仅仅依赖材料改进是很难达到的。为此,国内的电池公司可以借鉴这些大公司的思路,进行创新突破,在已有的基础上改进升级。

综上所述,要实现产业化25%效率的硅基电池,至少需要在以下几方面有所改善:1)硅衬底材料的改进,努力提高少子寿命,目前产业化的晶硅材料主要是P型的,P型硅材料中的光生载流子寿命短。目前实现25%的高效硅电池都是N型材料。所以预期随着高效率电池的普及,N型材料有望实现大规模生产应用,由于硅片成本和N型晶硅电池的规模直接相关,这种成本和规模的相互促进会很快使得N型衬底的硅电池得到普及;2)背接触结构的应用,有效减少了电极遮光,提高了电池效率。由于背接触结构的电池涉及到严格的电极隔离工艺,预期选区激光技术有可能得到新的应用,如选区掺杂工艺和选择性刻蚀技术,这些激光技术要求严格控制光致缺陷态,对激光本身和工艺要求都很高,由于激光技术的规模应用也能降低成本,因

此未来背接触结构的硅基太阳能电池超短脉冲激光技术可能得到应用。此外,激光制绒<sup>[23]</sup>、激光打孔<sup>[24]</sup>、激光刻蚀边结和激光焊接<sup>[25]</sup>等工艺在太阳能电池上的应用,也预示激光技术在未来的太阳能电池工艺上有较大的应用;3) 硅基异质结结构是提升太阳能电池的有效方法,在提高开路电压方法有着重要意义,HIT 电池专利已经失效,国内一些厂家的 HIT 效率也在不断提高。

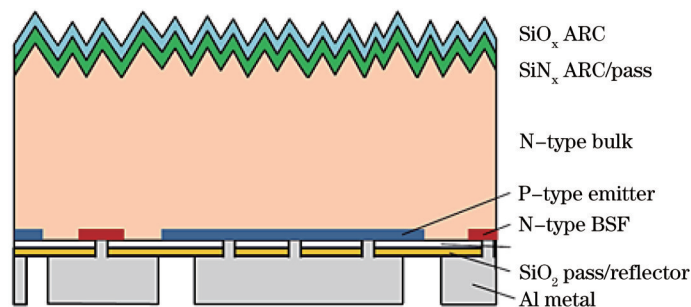


图7 IBC 太阳能电池结构示意图

Fig.7 Two-dimensional, cross-section representation of the IBC cells

未来硅基异质结可能还会有新的进展,关键的突破可能来源于薄膜材料——非晶硅材料可以用其他材料代替,但关键是要要求成本要低,可能用到更低成本的薄膜工艺如印刷工艺,比如通过硅和钙钛矿薄膜材料研制新型异质结结构,以及相应的 HBC 新型电池等,创新空间非常大。相信国内主要厂家将很快掌握背接触和异质结的工艺,且随着 N 型硅材料成本的下降,国内硅基太阳能电池行业也将进入 25% 的高效率电池时代。

#### 参考文献

- 1 Ragsdale R G, Namkoong D. The NASA-Langley building solar project and the supporting Lewis solar technology program[J]. *Solar Energy*, 1976, 18(1): 41-50.
- 2 Watanabe C. Identification of the role of renewable energy: A view from Japan's challenge: The New Sunshine Program [J]. *Renewable Energy*, 1995, 6(3): 237-274.
- 3 Chapin D M, Fuller C S, Pearson G L. A new silicon p-n junction photocell for converting solar radiation into electrical power[J]. *J Appl Phys*, 1954, 25: 676-77.
- 4 Zhao J, Wang A, Green M A. 24.5% efficiency silicon PERT cells on MCZ substrates and 24.7% efficiency PERL cells on FZ substrates[J]. *Prog Photovoltaics: Res Appl*, 1999, 7(7): 471-474.
- 5 Green M A. The path to 25% silicon solar cell efficiency: History of silicon cell evolution[J]. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2009, 17(3): 183-189.
- 6 David D S, Peter C, Staffan W, *et al.*. Toward the practical limits of silicon solar cells[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(6): 1465-1469.
- 7 Junichi N, Naoki A, Takeshi H, *et al.*. Development of hetero junction back contact Si solar cells[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(6): 1491-1495.
- 8 Keiichiro M, Masato S, Taiki H, *et al.*. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell[J]. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2014, 4(6): 1433-1435.
- 9 Zhang Lidian, Shen Honglie, Yue Zhihao. The preparation and performance of the polycrystalline silicon antireflection coat[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6): 0631002.  
张力典, 沈鸿烈, 岳之浩. 多晶硅减反射复合结构的制备与性能[J]. *光学学报*, 2013 33(6): 0631002.
- 10 Zhou Tao, Lu Xiaodong, Li Yuan, *et al.*. The research of the surface antireflection film in the solar cell[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(10): 103101.  
周涛, 陆晓东, 李媛, 等. 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.
- 11 Hahn G. Status of selective emitter technology[C]. 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2010.
- 12 Benick J, Hoex B, Dingemans G, *et al.*. High-efficiency n-type silicon solar cells with front side boron emitter[C]. *Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2009: 863-870.
- 13 Green M A, Zhao J, Wang A, *et al.*. Progress and outlook for high-efficiency crystalline silicon solar cells[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 65(1): 9-16.

- 14 Schwartz R J, Lammert M D. Silicon solar cells for high concentration applications[C]. IEEE Electron Devices Meeting, 1975, 21: 350-352.
- 15 Lammert M D, Schwartz R J. The interdigitated back contact solar cell: A silicon solar cell for use in concentrated sunlight[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1977, 24(4): 337-342.
- 16 Lamers M, Mewe A A, Romijn I G, *et al.*. Towards 21% efficient N-CZ IBC based on screen printing[C]. 26th EU-PVSEC, 2011.
- 17 Peibst R, Harder N P, Merkle A, *et al.*. High-efficiency RISE IBC solar cells: Influence of rear side passivation on pn junction meander recombination[C]. Proc 28th Eur Photovoltaic Sol Energy Conf Exhib, 2013: 971-975.
- 18 Mulligan W P, Rose D H, Cudzinovic M J, *et al.*. Manufacture of solar cells with 21% efficiency[C]. Proc 19th EPVSEC, 2004: 387.
- 19 Smith D D, Cousins P J, Masad A, *et al.*. Generation III high efficiency lower cost technology: Transition to full scale manufacturing[C]. IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012: 001594.
- 20 Swanson R M. Approaching the 29% limit efficiency of silicon solar cells[C]. Conference Record of the Thirty-first IEEE, 2005: 889-894.
- 21 Tawada Y, Tsuge K, Kondo M, *et al.*. Properties and structure of a-SiC: H for high-efficiency a-Si solar cell[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53(7): 5273-5281.
- 22 Taguchi M, Yano A, Tohoda S, *et al.*. 24.7% record efficiency HIT solar cell on thin silicon wafer[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4(1): 96-99.
- 23 Zhang chao, Zhang Qingmao, Guo liang, *et al.*. Texturing process with 355 nm laser for amorphous silicon film solar cell [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0707004.  
张超, 张庆茂, 郭亮, 等. 非晶硅薄膜太阳能电池的紫外激光制绒工艺[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0707004.
- 24 Xia Bo, Jiang Lan, Wang Sumei, *et al.*. Femtosecond laser drilling of micro-holes[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0201001.  
夏博, 姜澜, 王素梅, 等. 飞秒激光微孔加工[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0201001.
- 25 Xiao S Z, Ostendorf A. Laser processing in solar cell production (invited paper)[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(12): 3116-3124.

栏目编辑: 张浩佳