

## 2017 年我国光伏技术发展报告 (2)

中国可再生能源学会光伏专业委员会

在高效多晶的技术创新上,保利协鑫的镓共掺杂技术得到应用(市场上产品为 S4),其主要效果是有效地减少了由于硼氧对引发的转换效率衰减,其光致衰减(light-induced degradation)是普通掺硼高效多晶电池的 1/10,是 PERC 高效多晶电池的一种有潜力的多晶硅片。由于镓分凝系数小,造成多晶硅锭纵向电阻率变化较大,使得硅片得率和良率受到影响,成本升高。因此,保利协鑫与浙江大学硅材料国家重点实验室合作开展了掺镓多晶硅的理论计算和实验研发工作,通过镓掺杂源的不同放置位置、热场设计等来实现对电阻率分布不均匀的改善。通过理论计算,掺镓多晶方锭电阻率实验测量值与模拟值吻合良好,如图 4 所示<sup>[6]</sup>。

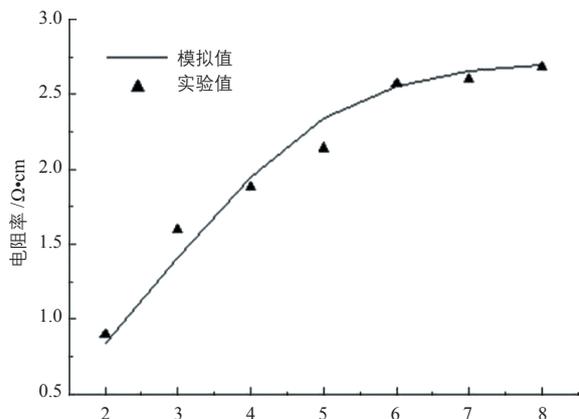


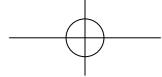
图 4 掺镓多晶硅锭理论计算模拟电阻率与实验值的比较

高效多晶硅片本身电性能也有一个渐变式的增长,约为 0.05%~0.10%。这得益于籽晶使用

的优化、坩埚品质的提升、所用硅料品质的提升,以及长晶工艺的优化等。铸锭技术的一个发展方向是铸造单晶。其硅片产品类单晶硅片曾在市场短暂应用过,但后来被高效多晶挤压,基本没有市场份额。2016 年,该技术得到几家铸锭和设备企业的重新开发,目前在单晶比例及硅片品质上都有很大程度的提升。在单晶光伏组件逐步增长的市场环境逼迫下,该技术及类单晶产品可能会以更高的性价比回到市场上来。保利协鑫与浙江大学硅材料国家重点实验室合作研发了掺镓的铸造准单晶技术,通过控制热场和固液界面来改善电阻率的纵向和横向分布不均匀的情况,抑制位错的增殖。该技术兼具低光衰和低成本的优点,具有产业化应用前景<sup>[7]</sup>。

### 1.3.4 硅片切割技术进展

从硅片切割行业发展来看,单、多晶通用的传统砂浆钢线切割技术已经成熟,工艺改进空间不大;作为主要成本部分的砂浆、钢线等耗材价格均已逼近成本线,很难再有下降空间。适用于单晶切割的新金刚线切片技术因环保、高效率、线径更细、可切硅片更薄等优点,迅速成为未来单晶切片的技术方向,并构成单晶比多晶在切片环节的降成本优势。2016 年,国内单晶切片已大部分由砂浆钢线切割转变为金刚线切割。多晶由于电池制绒技术还有待发展成熟,金刚线切割多晶硅片技术尚未全面量产推广,但已经成为多



晶硅片切割必须选择的未来技术路线<sup>[8]</sup>。

#### 1.3.4.1 大切速

传统的砂浆钢线切割是通过高速运动的钢线带动掺在切割液中的碳化硅游离颗粒磨刻硅棒，切割形成硅片，通常切速仅有 0.4 mm/min。金刚线切割是在钢线表面利用电镀或树脂层固定金刚石颗粒，切割过程中金刚石运动速度与钢线速度一致，其切割能力相比传统的游离切割有大幅提升，因而可采用 1.0 mm/min，甚至 1.2 mm/min 以上的大切速，切割效率可大幅提升 2~3 倍以上。以 8 英寸硅棒为例，传统砂浆切割一刀需要 10 h 左右，而金刚线切割只需 4 h，先进企业甚至可做到 3 h 以下，带来设备折旧和人工成本的大幅下降。

#### 1.3.4.2 降线耗

相对于传统砂浆钢线切割技术耗材价格已逼近成本线，当前金刚线耗材成本占切片环节的非硅成本已超过 50%，主要原因在于金刚线量产初期的价格虚高和技术应用初期的工艺用线量偏多。随着金刚线制作技术的普及和行业竞争，价格预计会以每年 20% 的速度下降。与此同时，随着金刚线切片技术的发展，单片硅片耗线量也在成倍下降，已经由原先的 3 m/片降至 1.5 m/片，预计未来会下降到 0.8 m/片以下。

#### 1.3.4.3 金刚线切割细线化

传统的砂浆钢线切割过程中，游离态的碳化硅颗粒在磨刻硅棒的同时也在磨刻钢线，造成钢线极大磨损，因而细线化非常困难。而金刚线切割由于金刚石颗粒固结在钢线表面，切割过程中金刚石运动速度与钢线一致，金刚石颗粒不会对钢线造成伤害，其切割能力也相比传统游离切割有大幅提升，因此给细线化提供了可能。数据测算显示，金刚线径每下降 10  $\mu\text{m}$ ，单片硅成本下降约 0.15 元、产能提升约 4%，可见降成本空间巨大。近年来，金刚线基本以每年 10~20  $\mu\text{m}$  的速度在细线化。目前，国内先进企业已实现母线 70  $\mu\text{m}$  金刚线切片量

产，母线 60  $\mu\text{m}$  金刚线也在实验中。

### 1.4 晶体硅材料技术发展趋势展望

参考国际光伏技术路线图及国内外新技术进展情况<sup>[9]</sup>，今后光伏用硅材料的发展趋势主要有以下几点：

1) 西门子法仍占据大市场份额，但流化床法所占比例会越来越高。

2) 光伏用单晶硅片金刚线切割技术在 2016 年已占据主要市场份额，今后几年还将持续扩大。

3) 随着多晶硅片制绒技术的不断进步，金刚线切割将会逐步推广，预计将从 2016 年不到 10% 增长到 2026 年的几乎 100%。

4) 光伏用硅片厚度将由 2016 年的平均 180  $\mu\text{m}$  逐渐降低，预计到 2026 年可降至 150  $\mu\text{m}$ 。

5) n 型单晶硅片在 2016 年仍然只有小批量应用，但异质结太阳能电池 (HJT)、双面太阳能电池和其他 n 型电池技术正不断进步，预计 2017 年 n 型单晶硅片产量会有一定突破。此外，铸造类单晶、掺镓晶体硅等新技术也有可能实现一定的产业化增长。

目前，硅材料产业链各环节仍然存在产能过剩的问题，我们必须重视科技创新，加大研发投入，不断降低生产成本，提高产品质量，以期在国际市场上继续保持领先的地位。

## 2 晶体硅太阳能电池研究进展

### 2.1 晶体硅太阳能电池发展概况

太阳能电池技术发展经历了百年历史，各种太阳能电池技术层出不穷，电池效率在不断提升，产业化电池的成本也在市场竞争中逐年下降。2016 年，光伏科技又取得一系列重大进步：日本 Kaneka 的 HJT 电池效率达到 26.33%；美国 SunPower 的 IBC 电池效率达到 25.2%；天合光能的单晶硅和多晶硅 PERC 电池效率分别达到 22.61% 和 21.25%；中山大学太阳能系统研究所的低温、免掺杂背结过渡金属化合物 / 晶体硅异质结太阳能电池效率达到 19%，其与香港理工大学

合作研发的低温、免掺杂钙钛矿 / 晶体硅异质结机械叠层太阳能电池在面积  $3 \text{ cm}^2$  取得平均效率为 24.69%；日本 Solar Frontier 的 CIGS 电池效率达到 22.3%；First Solar 的 CdTe 电池效率达到 22.1%；钙钛矿 / CIS 多结电池效率达到 17.4%；在晶体硅上制备 III-V 族化合物三结电池，一个太阳标准测试条件下效率达 30.2%。

高效晶体硅太阳能电池是全世界科研机构和光伏企业关注的焦点。传统太阳能电池的结构从上到下为：呈条状和指状图案的正面欧姆接触；覆盖于正面的减反射薄膜；形成于硅片上表面的浅 p-n 结，以及覆盖整个背面的背面欧姆接触。太阳光谱中能量小于禁带宽度  $E_g$  的光子对电池输出无贡献；能量大于  $E_g$  的光子对电池输出贡献能量为  $E_g$ ，而大于  $E_g$  的能量会以热的形式消耗掉。产生于耗尽层的电子 - 空穴对会被太阳能电池中的内建电场分开，而内建电场的大小由 p 型和 n 型材料的费米能级差决定。高效晶体硅太阳能电池通过优化电池结构与完善制备工艺，可使电池效率稳步上升。

目前研究涉及的高效晶体硅电池包括 PERC 电池、n 型双面电池、n 型 PERT 电池、HJT(双面) 电池、IBC 电池、IBC-SHJ 电池和多结电池。产业化晶体硅太阳能电池所用的硅片尺寸大多是  $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$ ，多数的组件产品都是由 60 片电池串联构成的。目前得到发展的高效晶体硅太阳能电池类型达到近 10 种之多，包括：PERC(passivated emitter and rear cell, 钝化发射极和背面电池)、PERL(passivated emitter, rear locally-diffused, 钝化发射极背部局域扩散电池)、

PERT(passivated emitter, rear totally-diffused, 钝化发射极背面全扩散电池)、氧化铝钝化、选择性发射极太阳能电池(selective emitter, SE solar cells)、MWT(metal wrap through, 金属环绕贯穿太阳能电池)、EWT(emitter wrap through, 发射区环绕贯穿电池)、硼前发射极 n 型、IBC 太阳能电池(interdigitated back contact solar cells, 交指形背接触太阳能电池)、HJT 太阳能电池(heterojunction with intrinsic thin-layer, 插入本征非晶硅薄层 / 晶体硅异质结太阳能电池)等。其中，n 型单晶硅电池倍受企业关注，IBC 电池已经实现中试生产，有数个企业正在开始进行 HJT 电池规模化生产，预计 2017 年高效晶体硅电池将得到更快的发展。

就目前来看，不管是从效率提升还是成本降低方面，晶体硅太阳能电池还是有一定的进步空间。此外，晶体硅电池在异质结结构方面的研究还有待进一步发展。下文对 2016 年晶体硅太阳能电池的发展情况进行了回顾与总结。

## 2.2 晶体硅电池研究进展

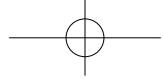
### 2.2.1 晶体硅电池研究的国际进展

国际上，2016 年有 4 种结构的高效率晶体硅太阳能电池的实验室效率保持或创造了新的超过 25% 的世界效率纪录，它们代表了晶体硅太阳能电池研发的高水平，其结构分别是：PERL 电池、IBC 电池、HJT 电池和 IBC 电池结合在一起形成的异质结背接触(HJBC) 太阳能电池、钝化接触(TOPCon) 太阳能电池。表 1 给出了高效晶体硅电池结构的实验室效率参数。

PERL 电池是澳大利亚新南威尔士大学研制的，其核心技术是钝化发射极与背部局域扩散，

表 1 2016 年晶体硅太阳能电池的国际发展水平

序号	单位	电池结构	硅片类型	电池面积 / $\text{cm}^2$	开路电压 $V_{oc}$ /mV	短路电流 $J_{sc}$ / $\text{mA} \cdot \text{cm}^{-2}$	填充因子 $FF/\%$	效率 $E_{eff}/\%$
1	Kaneka	HJBC	n-Si	180.43	743.8	42.25	83.78	26.33
2	SunPower	IBC	n-Si	153.49	737.0	41.33	82.71	25.20
3	Fraunhofer	TOPCon	n-Si	4.00	718.0	42.10	83.20	25.10
4	UNSW	PERL	p-Si	4.00	706.0	42.70	82.80	25.00



电池效率从1983年的18%提高到1999年的25%，是最早实现25%效率的晶体硅高效太阳能电池。IBC电池前表面无电极栅线，p-n结与正、负电极都位于电池的背面，而且电极是采用交指形状排列，避免了常规电池栅线的遮光损失。美国SunPower公司保持着IBC电池效率的领先地位，2016年其将IBC电池效率提升至25.2%。TOPCon是近年快速发展起来的钝化接触高效率晶体硅电池，由于这种电池实现了无需开孔的钝化接触，使单晶硅电池效率快速达到了25.1%。背结背接触结构的太阳能电池是将背接触(IBC)和异质结(HJT)电池技术相结合形成的高效电池结构。HJT电池是由晶体硅和非晶硅组成的异质结太阳能电池，日本松下公司一直保持HJT电池效率的领先地位，电池效率从1995年的14%提高到2012年的24.7%；2015年，该公司将HJBC电池效率提高到了25.6%；2016年，日本Kaneka公司又将HJBC电池效率提升到了26.33%，成为全球高效率的硅基太阳能电池。

### 2.2.2 晶体硅电池研究的国内进展

我国晶体硅太阳能电池的实验室研究总体处于“领跑”和“跟跑”并存的状态。我国多晶硅太阳能电池的实验室研究处于“领跑”状态，天合光能的光伏科学与技术国家重点实验室创造了21.25%的多晶硅太阳能电池的世界纪录；晶科能源也宣布了其多晶硅太阳能电池效率达到21.63%。在单晶硅电池方面，天合光能的光伏科学与技术国家重点实验室与澳大利亚国立大学联合开发的小面积(2 cm<sup>2</sup>)单晶硅IBC电池实验室效率达到了24.4%，独立研发的大面积156 mm×156 mm单晶硅IBC电池转换效率达到了23.5%；中科院微系统所研发的大面积HJT电池的高效率达到了23.3%(156 mm×156 mm)。总的来说，我国在实验室小面积电池的高效率方面与世界高效率还存在一些差距。

### 2.2.3 新型晶体硅异质结电池研究进展

2016年，中山大学太阳能系统研究所

以硅片为衬底的新型异质结太阳电池研究方面取得重要进展，如图5所示。该研究所首次提出以氧化物/金属/氧化物多层膜作为新型MLBC(multilayer films back contact)太阳电池的发射极，如V<sub>2</sub>O<sub>x</sub>/metal/V<sub>2</sub>O<sub>x</sub>、MoO<sub>x</sub>/metal/MoO<sub>x</sub>、WO<sub>x</sub>/metal/WO<sub>x</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/metal/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、NiO/metal/NiO等；分别将其成功应用于n-Si前结与背接触太阳电池中，并且利用低功函数材料LiF和Cs<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>作为背场降低表面复合。研究表明，中间金属层的功函数和厚度很大程度上影响了电池的器件性能，高功函数的金属能够提高电池的激活能，对载流子的输运方式进行转变。最终，通过对电池的光学与电学性能进行优化，前结电池取得13.55%的效率，面积为4 cm<sup>2</sup>(由国家光伏检测中心认证)；MLBC太阳电池取得的高器件效率为19.02%(中山大学太阳能系统研究所测试)，面积为4 cm<sup>2</sup>。同时，中山大学太阳能系统研究所与香港理工大学进行合作，成功制备出低温、免掺杂钙钛矿/MLBC晶体硅机械叠层太阳电池，在小面积0.76 cm<sup>2</sup>上取得高光电转换效率25.54%，平均效率25.35%；在大面积3 cm<sup>2</sup>上取得高效率25.34%，平均效率24.69%。

对于新材料方面，采用热蒸发法制备ZnS/p-Si太阳电池，在面积为1 cm<sup>2</sup>上取得的高效率为8.87%，性能已经超过台湾Liang Wen Ji研发团队所制备的器件(效率为3.66%，面积为2.25

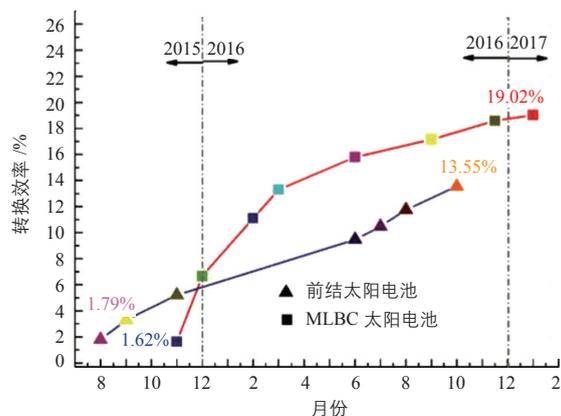
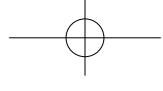


图5 新型晶体硅异质结电池(分两种结构,一种是前面结,最高效率为13.55%;另一种是背面结,最高效率约为19%)



$\text{cm}^2$ )。在 CdS/p-Si 异质结太阳电池方面, 取得 7.94% 的光电转换效率, 其面积为  $1 \text{ cm}^2$  (由国家光伏检测中心认证)。

## 2.3 晶体硅太阳电池的产业化进展

### 2.3.1 常规晶体硅电池产业化进展

常规晶体硅电池一般采用全铝背场结构, 在正面采用高方阻工艺, 或者选择性发射极技术制备前表面发射极。目前, 普通单晶硅电池效率一般为 19.6%~20.2%, 普通多晶硅电池效率一般为 18.3%~18.8%。其中, 多晶硅电池效率受硅片质量的影响较大, 采用新推出的高效多晶硅片电池效率可达到 18.5%~18.8%, 进一步采用等离子刻蚀 (RIE) 或者湿法黑硅技术 (MCCE) 可将效率绝对值提高 0.2%~0.6%。目前, 常规电池效率的提升主要来自于硅片质量、正表面银浆、发射极的进一步优化和背面铝浆的持续改善。对于这种全铝背场结构的常规电池, 背面铝背场的复合是效率损失的主要因素<sup>[10]</sup>。

### 2.3.2 p 型背面钝化电池 (PERC) 产业化进展

对于产业化 p 型常规电池而言, 尽管各种不同技术的应用在一定程度上提升了电池效率, 例如, 选择性发射极 (selective emitter) 结构、两次印刷技术 (double printing) 及发射极高方阻等, 但背面的载流子复合速率仍然是限制电池效率的主要因素。而 PERC 电池, 通过在背表面钝化, 同时采用激光进行局部开口和局域背场制备, 可将电池效率提高 0.6%~1.0%。PERC 电池与常规电池的不同之处在于背面, PERC 电池采用钝化膜钝化背面, 取代了传统的全铝背场, 从而大幅降低了背面的复合速率, 开路电压提升幅度达到 10~15 mV。 $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[11]</sup>、 $\text{SiO}_2$  及  $\text{SiN}_x$  等介质膜都可以用来作为背面的钝化膜, 目前产业化应用较多的是  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ <sup>[12]</sup> 叠层膜。

2013 年起, PERC 电池逐渐进入量产和扩展阶段。国外先进电池制造商德国 Solar World 率先进行了 PERC 电池的量产。随后, Q-Cells 及台湾地区电池厂家 SunRise、GenTech 和大陆

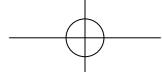
一线电池制造商纷纷跟进。大陆一流电池制造商, 如晶澳、天合、阿特斯等, 已经分别推出其 PERC 电池及组件产品。目前市场上以单晶 PERC 电池为主, 平均效率一般为 20.5%~21.0%。部分制造商也可以生产多晶 PERC 电池, 电池效率为 18.9%~19.5%, 而 60 片电池单晶和多晶的组件功率分别为 285~300 W 和 275~285 W。

实现 PERC 电池的量产,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  沉积设备是其中的关键设备。PECVD 和 ALD 沉积技术是两种主要的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  工艺。从 2016 年的产业化情况来看, PECVD 沉积技术应用更广泛, 在产业化方面占主导地位; 而 ALD 沉积  $\text{Al}_2\text{O}_3$  钝化膜工艺在实验室也已经取得了显著成果, 正在逐步走向产业化。

对于 PERC 电池效率提升的研究, 各大电池厂家都投入了很大力量。天合光能在 2015 年通过工艺优化, 在商用  $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$  多晶和单晶硅片上的电池效率分别达到了 21.25% 和 22.13%, 均成为当时工业级 PERC 电池的世界纪录; 2016 年, 天合光能 PERC 单晶电池效率进一步提升, 达到 22.61%, 继续领跑工业级 PERC 电池的世界纪录。这些高效率电池的实现, 说明产业化 PERC 电池在效率的提升方面还有很大空间。2016 年初, 天合光能的单晶和多晶 PERC 电池量产平均效率分别达到了 21.1% 和 20.16%。

### 2.3.3 n 型双面钝化电池产业化进展

n 型双面钝化电池主要涉及的电池结构包括 n 型 PERT 电池、n 型 PERL 电池, 以及 n 型双面电池。其中, n 型 PERT 及 n 型 PERL 电池一直停留在实验室阶段, 近年来取得了一些进展。2009 年, 德国 Fraunhofer ISE 实验室报道了 23.4% 的小面积 ( $4 \text{ cm}^2$ ) PERL 电池<sup>[13]</sup>; 2014 年, Fraunhofer ISE 实验室报道了 22.7% 的小面积 ( $4 \text{ cm}^2$ ) PERT 电池高效率<sup>[14]</sup>; 2015 年, Fraunhofer ISE 实验室报道了基于正面 p-n 结、背表面采用隧道氧化层钝化接触 (TOPCon) 的小面积 ( $4 \text{ cm}^2$ )



n 型电池, 效率达到 25.1%<sup>[15]</sup>。

在通往产业化的道路上, 各种大面积的 n 型双面钝化电池高效率也被相继报道。2012 年美国 IEEE 光伏大会上, 英利报道了规模化生产线 n 型双面电池达到了 20% 的效率<sup>[16]</sup>; 2015 年欧洲光伏大会上, IMEC 发表了 n 型背面结大面积双面钝化电池的新进展, 正面采用 Ni/Cu 电镀工艺, 在 6 英寸、 $5 \Omega \cdot \text{cm}$  的 n 型硅片上实现了 22.5% 的转换效率<sup>[17]</sup>; 2016 年, IMEC 在背面结上进一步提高效率, 达到 22.6%<sup>[18]</sup>。

天合光能在基于 n 型 PERT 正面结电池结构上的研究也取得了进展, 在 5 英寸、 $3 \Omega \cdot \text{cm}$  的 n 型硅片上实现了 21.98% 的转换效率, 并得到了 Fraunhofer ISE 第三方独立测试的确认。

n 型双面电池是一种已经被市场认可的并有产品销售的高转换效率产品, 从英利的“熊猫”电池开始, n 型双面电池就已经崭露头角, 市场应用不断扩大。2016 年底, 英利的“熊猫”n 型双面光伏组件获得北京鉴衡认证中心 (CGC) 颁发的行业首张双面发电产品认证证书, 其突出的优点是由于背面的发电增益, 小型系统模拟现实背面发电贡献为 10%~30%, 增益的差别来自于应用安装的地面光反射率的不同, 当然, 此种增益需要基于双面发电组件的封装方式。目前, 国内外比较有名的双面电池产业化的公司包括: 英利、航天机电、台湾英稳达、韩国 LG、日本 PVGS 等。大规模生产电池效率水平在 20.4%~21% 之间。其中, 韩国 LG 公司在技术上处于领先地位, 通过叠加多主栅 (MBB) 技术和双面电池技术, 其 60 片电池组件功率达到 310~320 W。天合光能也开始了 n 型双面电池的研发, 其中试线正面平均效率达到 21.2%, 开路电压达到 670 mV。在大规模量产上, 2016 年, 中来光伏宣布开始 2 GW n 型双面电池项目; 随后, 林洋光伏也宣布在江苏启东开展 2 GW 双面电池项目。近年来, n 型双面电池效率不断突破, 技术的发展方向也各不相同, 双面热扩散、掺杂浆料, 以及

离子注入的方式都有被产业化应用。

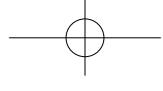
目前, n 型双面钝化电池已经具备了产业化应用的技术条件, 需要克服的困难主要在于目前制造成本相对较高, 但由于 n 型电池的高效率及低光致衰减在一定程度上降低了系统端的发电成本; 其次, 双面组件的背面发电量到底是多少, 目前还缺乏大量大型电站的对比数据。从市场角度看, n 型双面光伏组件背面发电量的市场认可程度还有待提高, 成熟的商务模式仍有待开发。

### 2.3.4 薄膜硅 / 晶体硅高效异质结电池产业化进展

薄膜硅 / 晶体硅异质结太阳电池具有优异的光电性能, 日本松下公司制备的电池高转换效率达到了 24.7%, 如果结合背接触电极结构的异质结电池, 转换效率则可达到 25.6%<sup>[19]</sup>。2016 年, 日本新能源产业技术综合开发机构 NEDO 与日本太阳能公司 Kaneka 联手合作, 通过结合异质结与背电极技术, 将面积  $180 \text{ cm}^2$  的晶硅太阳电池的转换效率提高到 26.33%, 成为新的世界纪录。这一结果不仅超过了松下创造的转换效率 25.6% 的世界纪录, 而且也是世界上首次在硅衬底上突破 26% 的效率。

异质结电池工艺具有制作工艺简单和能耗低的特点, 所制作的异质结组件在高温和高辐照度条件下具有明显的发电优势, 如果制作成双面组件, 由于背面也能吸收太阳光的能量, 其发电量可进一步提升 7% 以上。

日本松下集团异质结太阳电池的年产量约 900 MW, 其中 300 MW 在马来西亚生产, 600 MW 在日本国内生产。该公司 2015 年宣布, 决定共投资 95 亿日元 (相当于 7800 万美元) 于 2015 财年 (2015 年 4 月~2016 年 3 月) 在岛根县和滋贺县分别建 1 座太阳电池生产厂和 1 座组件生产厂。新增的投资将增加 150 MW 的日本国内产量, 这样日本国内产量在 2015 财年将达到 750 MW, 而松下集团的年度总产量将超过 1 GW。同时, 松下 2015 年 7 月 23 日宣布, 其试制出了转换效率为 22.5% 的异质结光伏组件, 而



此前的晶体硅光伏组件效率的最高纪录则是美国 SunPower 的 22.4%。同时,松下将对特斯拉汽车公司位于纽约的生产工厂投资 300 亿日元(约合 2.56 亿美元),决定从 2016 年起在纽约工厂生产太阳电池及组件,计划从 2017 年夏季起在纽约布法罗 (Buffalo) 工厂生产光伏组件,到 2019 年产能将提升到 1 GW。

近年来,我国在异质结电池研发方面也取得了很大的进展。常州天合光能和中科院上海微系统研究所,以及中科院电工所与协鑫集成等单位联合申请并实施了国家“863”项目“MW 级薄膜硅/晶体硅异质结太阳电池产业化关键技术”,在该课题的支持下,研究已取得较好成果。其中,天合光能与上海微系统研究所合作,6 英寸硅片 156 mm×156 mm 尺寸的异质结电池转换效率达到 23.29%。2016 年,协鑫集成则在异质结电池方面进行布局,加大研发投入,并且已经按照年产 250 MW 异质结电池片产能的配置,购置主要的工艺设备、仪器,建设相应的生产线,该项目投资总额约为 5.86 亿元。2016 年 12 月 19 日,福建金石能源有限公司高效太阳电池(一期)项目竣工验收,该项目总投资为 3.3 亿元人民币,HDT 高效太阳能产能达 100 MW,量产转换效率可达 22%,标准光伏组件功率可达到 320 W。

随着生产设备的国产化及原料(硅片、浆料、导电薄膜等)价格的下降,市场上异质结电池生产厂商产能、产量的增加,结合高效异质结电池高发电量的优势,异质结电池必将获得较大的市场份额。

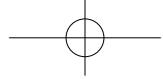
### 2.3.5 IBC 电池技术产业化进展

IBC 电池的概念最早于 1975 年由 Lammert 和 Schwartz<sup>[20-21]</sup>提出,最初应用于高聚光系统中;经过近 40 年的发展,IBC 电池在一个太阳标准测试条件下的转换效率已达到 25.2%<sup>[22]</sup>。表 2 中列出了近几年 IBC 电池技术的研究进展。美国的 SunPower 公司是产业化 IBC 电池技术的领导者,其已研发了 3 代 IBC 电池。2015 年,该公司开

发的 IBC 电池在 5 英寸 n 型 CZ 硅片衬底上达到了 25.2% 的高电池转换效率<sup>[24]</sup>;2016 年,该公司采用实验室制造的 IBC 太阳电池,创下 24.1% 的晶体硅光伏组件转换效率纪录<sup>[25]</sup>。对于 IBC 结构, SunPower 公司的研发遥遥领先,其他研究成果还有德国 Fraunhofer ISE 的 23%<sup>[26]</sup>、ISFH 的 23.1%<sup>[27]</sup>、IMEC 的 23.3%<sup>[28]</sup> 等。

采用 IBC 与 HJ 技术结合的 HJBC 技术可以使电池效率进一步提升,在硅片表面同时采用本征的非晶硅进行表面钝化,在背面分别采用 n 型和 p 型的非晶硅薄膜形成异质结。其优点是利用非晶硅优越的表面钝化性能,并结合 IBC 结构前表面无金属遮挡的结构优点,可以取得更高的电池转换效率。日本的研究人员率先在此技术上取得突破,在 2014 年将晶体硅电池的效率突破到 25% 以上。其中,日本 Sharp<sup>[29]</sup> 和 Panasonic<sup>[30]</sup> 公司将 IBC 与 HJ 技术结合,研发的 HJBC 电池效率分别达到 25.1% 和 25.6%。2016 年 9 月, Kaneka 公司与 NEDO 研究机构联合申明在面积 180 cm<sup>2</sup> 的硅衬底上实现转换效率达 26.33% 的晶硅太阳电池,创下世界纪录。Kaneka 与 NEDO 将 108 片 HJBC 电池片封装成组件,面积达 13177 cm<sup>2</sup>,通过特殊的配线、高吸光效率等设计,组件的转换效率达到 24.37%,超过了 SunPower 公司创下的 24.1% 的组件效率纪录<sup>[31]</sup>。韩国 LG 公司也默默开始 IBC 高效电池和组件的研发。HJBC 技术将成为 IBC 电池未来发展的重要方向。

我国越来越多的光伏企业对 IBC 电池技术的研发进行投入,如天合、晶澳、海润等。2013 年,海润光伏报道了其研发的 IBC 电池效率达到 19.6%<sup>[32]</sup>。2011 年,天合光能与新加坡太阳能研究所及澳大利亚国立大学建立合作,研究开发低成本可产业化的 IBC 电池技术和工艺。2012 年,天合光能承担国家“863”计划“效率 20% 以上低成本晶体硅电池产业化成套关键技术研究及示范生产线”,展开了对 IBC 电池技术的系统研发。



经过科研人员的不懈努力，2014年，澳大利亚国立大学(ANU)与常州天合光能有限公司合作研发的小面积IBC电池效率达24.4%<sup>[33]</sup>，创下了当时IBC结构电池效率的世界纪录。同年，由常州天合光能光伏科学与技术国家重点实验室独立研发的6英寸大面积IBC电池效率已达22.9%<sup>[34]</sup>，成为6英寸IBC电池的高转换效率。天合光能依托国家“863”项目建成中试生产线，进入2015年后，天合光能科研人员采用新开发的工艺，在中试生产线做出了平均大于22%、最高23.5%(内部测试)的结果。2016年，天合光能6英寸的IBC电池效率通过第三方测试，达到23.5%，成为工业级6英寸IBC电池的新的世界纪录<sup>[35]</sup>。

高效率是IBC电池最大的特点，也是研究者们追求的大目标。目前，多家科研单位已经实

现了23%的高效IBC电池的制备，并且将开路电压提升到700 mV以上，有效降低了电池的温度系数，使IBC电池与常规电池相比具有更加优越的实际发电能力。但是，目前IBC电池使用的n型硅片成本较高，电池制备过程中需要多步掺杂及对准等复杂的工艺，使其制造成本较高，制约了IBC电池的大规模推广应用。IBC电池技术门槛高，成本和售价高，2014年仅有美国SunPower公司持有1.2 GW的IBC电池年产能，包括年产能100 MW的第3代高效IBC电池生产线。但随着我国一线光伏制造商的逐渐进入，以及新型工艺和新型材料的开发，IBC电池将沿着提高电池转换效率、降低电池制造成本的方向继续向前发展。IBC太阳电池的商业化应用和推广有着广阔的前景。

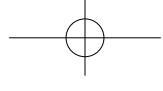
表2 IBC 电池技术的研究进展

公司 / 研究机构	电池尺寸	类型	关键技术	最高效率 / %	报道年份
SunPower	5 英寸	IBC	电镀	25.2	2015
Sharp	5 英寸或 4 cm <sup>2</sup>	HJBC	丝网印刷	25.1	2014
Panasonic	5 英寸或 4 cm <sup>2</sup>	HJBC	丝网印刷	25.6	2014
Kaneka	180 cm <sup>2</sup>	HJBC	—	26.33	2016
ANU	4 cm <sup>2</sup>	IBC	光刻	24.4	2014
Fraunhofer ISE	4 cm <sup>2</sup>	IBC	蒸镀	23.0	2013
ISFH	5 英寸	IBC	蒸镀	23.1	2013
IMEF	4 cm <sup>2</sup>	IBC	蒸镀	23.3	2013
Konstanz ISC	6 英寸	IBC	丝网印刷	22.3	2013
Bosch	6 英寸	IBC	离子注入	22.1	2013
Samsung	6 英寸	IBC	离子注入	22.4	2012
常州天合光能	6 英寸	IBC	丝网印刷、炉管扩散	23.5	2016

## 2.4 晶体硅电池及组件产业化进展

近几年，太阳电池与组件规模迅速扩大的同时，产业化太阳电池与组件效率也大幅提升。电池绝对效率每年提升0.3%~0.4%，以天合、晶澳、晶科及阿特斯等为代表的高效多晶硅电池产业化平均效率达18.5%以上，单晶硅效率达20%以上；60片156 mm电池的标准组件功率每年提升5 W<sub>p</sub>以上，多晶硅组件平均功率达270 W<sub>p</sub>，

单晶硅组件平均功率达280~300 W<sub>p</sub>。2015年，国家能源局在光伏行业推出“领跑者”计划<sup>[36]</sup>，先进技术产品应达到以下指标：单晶硅光伏组件转换效率达到17%以上，多晶硅光伏组件转换效率达到16.5%以上，薄膜光伏组件转换效率达到10%以上，以及其他有代表性的先进技术产品。主要光伏组件厂家也均推出高效组件产品，如天合和晶澳的PERC技术单晶硅光伏组件，基



于 20.5% 以上转换效率的电池，60 片 156 mm 光伏组件功率达 290 W 以上；PERC 多晶硅组件平均功率达 280 W 以上。

#### 2.4.1 光伏组件新工艺与新技术

为实现电池与组件的高效率，一些光伏厂家采用了以下新工艺与新技术：

1) 通过组件电学与光学优化，实现组件的高效率，主要是根据高效电池的电流和电压优化组件结构设计。如导电线结构，实现低电阻连接，可提高输出功率 2%~3%；配合电池光谱响应的变化，设计新型的封镀膜玻璃、EVA 等封装材料，如今出现了针对短波长增透的 EVA 或硅胶；采用微聚光焊带技术，通过优化焊带表面结构提高反射率，增加组件输出功率约 2%。

2) 黑硅技术方面，通过反应离子蚀刻 (RIE) 或金属催化的化学刻蚀 (MCCE) 方法，可在多晶硅片表面形成亚微米或纳米尺度的微细绒面结构，显著减小电池表面的光反射，提高电池绝对效率 0.2% 以上，并且解决了金刚线切割硅片的制绒工艺问题。目前，黑硅技术正在大规模导入量产的进程中。

3) 多主栅技术。市场上的主流产品的电池栅线数量逐渐由 4 主栅向 5 主栅过渡，并有向更多主栅的 Multi-busbar 及由 Meyer Burger 主导开发的 Smart Wire 方向发展的趋势。多主栅技术的应用使电流搜集的路径变短，有效降低了电池及组件的串联电阻。由于多根主栅线的存在，使单个电池表面在实际工作中承载的热应力及机械应力更加均匀，改善了组件的可靠性。

4) 电池切半及 ZWS(zero white space) 无间隙叠片技术。流经单个电池的电流变为原来的  $1/2$  或  $1/n$ ，这样的设计使组件的串联电阻引起的功率损耗大幅降低。该技术是组件端实现低电阻连接的有效途径，并通过减少组件中电池间隙提升组件单位面积功率，从而提高组件效率。由于组件工艺成本与组件生产合格率影响，电池切半实现量产的可能性较大，REC 公司已经在批量生产，

但是无间隙叠层技术工艺太复杂，良率低、成本高，并未大规模生产与销售。

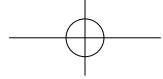
#### 2.4.2 光伏组件新产品

为满足光伏不同应用市场与不同气候地区的需求，近年光伏企业也不断开发与完善新的光伏组件产品，主要有：

1) 双面玻璃封装组件。该组件取消了传统聚合物材料的背板，采用正反面厚度为 2.5 mm 的薄玻璃封装结构，解决了现有边框组件中因背板是有机材料而易在户外降解的缺点，同时可防 PID 和电池片黑线。取消铝边框，可使组件非硅成本降低 0.01 美元/W 以上，还为高温高湿地区提供了完美解决方案；也可作为光伏建筑一体化组件，满足建筑、农业大棚等的采光、美观等要求。天合光能、阿特斯、晶澳等光伏厂家相继推出量产化的高可靠双玻光伏组件，2015 年在我国实际出货和安装大约有 1 GW<sub>p</sub>，其中天合光能约为 400 MW<sub>p</sub>。为减小组件重量，双玻组件朝着更薄的 2 mm 玻璃方向发展，配合双玻安装的不同结构设计，如农业大棚、车棚、水上应用的结构，逐渐开始成型并投入应用。

双玻因为无边框设计，导致产品的结构安装成为备受关注的问題，组件中背板玻璃取代了背板，为安装结构的设计也提供了较大的空间。为更好地支持双玻安装问题，光伏组件厂家如天合光能等也配套开发了多种类的安装结构及相对应的材料。主要安装结构有：①侧边压块式安装结构；②组件背梁式的安装设计及配套使用的材料，使双玻组件的安装效率与抗风雪荷载能力大幅提高；③水上双玻组件安装结构，针对水面光伏系统对耐高温高湿组件的需求，通过浮筒式的安装结构与双面组件背面预留挂钩结合，解决水面光伏组件可靠性与安装问题；④光伏车棚与农业大棚结构设计，双玻组件结合铝支架快速安装结构，施工便捷，免硅胶排水设计，为车棚与农业大棚项目提供完整的组件结构解决方案。

2) 智能组件。该组件是带有控制集成电路



芯片并具备功率优化、智能监控等功能新型组件。近年来，智能光伏组件的研究主要集中在智能控制电路的研究上，电路芯片供应商、组件制造商与光伏接线盒供应商联合开发了一系列智能接线盒系统。智能组件分为直流智能组件和交流智能组件，分别对应直流功率优化器和微型逆变器。智能组件接线盒内集成 MPPT 跟踪电路，并可以集成无线收发模块，可以实时监测并传输组件电压、电流、功率等电性能数据，具有功率优化、在线监控、安全防护等功能，这个通信监控功能也可以选择是否需要。随着智能组件核心部件（功率优化器和微型逆变器）成本的不断降低及组件制造工艺的改进，智能组件市场占有率增长迅速。2013 年，组件功率优化器和微型逆变器全球出货量为 819 MW，2014 年全球出货量上升至 1.3 GW，预计至 2020 年，功率优化器和微型逆变器总出货量将以平均每年 39% 的速度不断增长，增长速度将超过任何一种光伏功率变换产品。因此，大规模的智能组件市场拓展行动已经展开。目前，主流的功率优化器和微型逆变器供应商，如 Enphase、Solaredge 和 Tigo，都在积极与组件供应商合作；SunPower 并购微型逆变器供应商 Solarbridge 以开发 AC 智能组件；芯片供应商 Maxim 推出子串级功率优化芯片，并逐步商业化；LG 已经推出第一代完全潜入式 AC 智能组件；国内企业如康威特集、昱能等也推出低成本产品；天合光能推出的 Trina smart 智能组件覆盖了智能 AC（交流）、智能 DC（直流）、Trinapeak（电池串级功率优化）等智能光伏产品。随着成本的不断降低及组件制造工艺的改进，光伏组件智能化将是必然趋势。

3) 耐 1500 V 高压组件。1500 V 系统电压会降低电气的安全性和可靠性，同时增大 PID 等风险。制作 1500 V 光伏组件主要考虑背板的局部放电、接线盒设计等影响组件可靠性和安全性的因素，主要挑战来自于背板，一般通过加厚厚度或者新型背板材料和结构来实现。直流侧输入

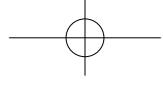
电压提高后，每串可连接更多组件，可增加 50% 的组串长度，接到逆变器的直流缆线使用量减少，汇流箱逆变器的数量也可相应减少；同时，汇流箱、逆变器、变压器等电气设备功率密度提升，体积减小，运输、维护等方面工作量也减少，有利于光伏系统成本的降低。2013 年以来，各大光伏组件厂商纷纷将重点转至 1500 V 光伏组件的研发，阿特斯、天合、晶澳等均已开发 1500 V 组件，双玻组件是天然的 1500 V 组件，避免了 1500 V 背板的可靠性风险。华为、阳光等均在研发针对 1500 V 系统的逆变器。

4) 其他新型产品设计层出不穷。比如，采用分体接线盒来提高散热和耐腐蚀性能，改进封装灌胶接线盒填充物的绝缘和导热性能；采用热管散热的光伏光热一体化组件，降低组件工作温度的同时提供一定量的民用或工业用热水；针对目前传统组件重量大的问题，通过减薄玻璃厚度，并降低型材重量，如优化截面设计，在达到机械荷载要求的同时降低组件重量，以满足日益增长的屋顶分布式光伏市场需求。

#### 2.4.3 高效晶体硅组件进展

多晶硅高效太阳能电池与组件方面，2014 年底，晶科能源宣布公司“Eagle+”组件样板在德国 TÜV 莱茵上海测试中心的测试结果中创造 60 片多晶硅组件功率新高，在标准测试条件下的组件功率达到 306.9 W。2015 年 4 月，晶科能源 60 片多晶硅组件在第三方权威机构 TÜV 莱茵测试中，功率高达 334.5 W，创造了新的多晶硅组件功率纪录。

2014 年底，天合光能的研发人员在 156 mm×156 mm 工业级大面积 p 型多晶硅衬底上实现了电池效率 20.76% 的世界纪录（经第三方机构德国 Fraunhofer ISE 测试实验室测试），该多晶硅电池效率被写入由澳洲新南威尔士大学、美国可再生能源国家实验室（NREL）、日本国家先进工业科学和技术研究所、德国 Fraunhofer ISE 及欧盟委员会联合研究中心联合发表的《太阳能电池效率》中，并刊登在权威光伏学术期刊《光伏



进展》上<sup>[37]</sup>。2015年5月,经Fraunhofer ISE证实,天合光能研发团队创造了19.2%的多晶硅PERC光伏组件窗口效率的世界纪录,打破了Q-Cells保持了4年之久的18.5%的效率纪录。2016年,天合光能又创造了19.6%的多晶硅PERC光伏组件窗口效率的新的世界纪录。

2016年8月,晶科能源发布了经过第三方权威机构TÜV莱茵的功率测试,60片单晶硅组件功率高达343.95W,成为PERC单晶硅组件输出功率的高纪录。

#### 2.4.4 晶体硅光伏组件可靠性研究进展

光伏组件的可靠性对光伏大规模应用至关重要。自2010年以来,NREL与国际电工委员会光伏专委会(IEC TC82)组织全球超过30家研究机构、光伏测试认证机构合作,组成国际光伏组件质量保证特别行动组(International PV Module Quality Assurance Task Force, PVQAT),成立了12个工作组对光伏质量与产品老化测试进行研究。我国检测认证机构,如鉴衡认证、无锡质检所等,以及天合光能、阿特斯等大型光伏企业均建立了光伏可靠性研究团队,进行不同太阳电池技术与光伏材料的可靠性研究,包括晶体硅光伏组件的衰减、老化与失效机理,不同电池导电材料与组件封装材料的兼容性和热稳定性,典型气候条件下各类光伏组件寿命预测等,其中,PID失效、蜗牛纹问题、热斑失效、电池隐裂、常见光伏组件高衰减问题尤受关注。2015年,一些光伏可靠性标准初稿相继完成,包括PID,旁通二极管热老化,高温高湿地区、沙漠地区组件可靠性测试的IEC提案等,对光伏组件质量要求更高、更明确。通过PVQAT开展的各项研究,光伏组件与系统公司也推出了不同可靠性问题的测试要求,双玻组件逐渐成为大家认可的可以解决诸多可靠性问题的良好组件设计。

## 2.5 晶体硅电池发展趋势展望

国际上持续提高晶体硅太阳电池效率技术研究趋势主要集中在以下几个方面:

- 1) 使用n型硅材料代替p型硅;
- 2) 通过改进制绒技术和抗反射镀膜技术制备较好的光陷阱,降低表面光反射,有效改善晶体硅电池的短路电流;
- 3) 通过新型的钝化膜改善表面钝化,使电池的开路电压有较大提高;
- 4) 通过掺杂技术改进p-n结设计,有效改善了开路电压和填充因子。

目前围绕着这些技术发展的电池结构主要有:n型硅双面电池、PERC、PERL、PERT、HJT、IBC、HJBC、TOPCon等高效率太阳电池。

### 2.5.1 n型硅双面电池

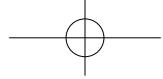
n型硅电池能够克服常规p型硅电池在光照下出现效率初始衰减的问题,并具有好的弱光效应,同时易于制造双面发电电池,使n型双面电池比p型硅单面电池在寿命周期中能够多产生10%~30%的电力,使发电成本大幅降低。PERT电池是一种以n型硅片制造的双面电池,因其高发电性和与p型硅电池相兼容的工艺引起很多制造厂商的关注,韩国的LG、德国的Q-cell都在大力发展PERT电池,并陆续推向市场。国际光伏技术路线图(ITRPV)预计:n型硅电池市场份额将从2015年的7%增加到2020年的30%,2025年产业化电池效率将达到25%。

### 2.5.2 PERC 电池

PERC电池采用了钝化发射极和背面接触电池技术,利用 $Al_2O_3$ 等介质在电池背面形成钝化层,不仅增加了电池长波光的吸收,还使电池背面载流子的复合率大幅降低。同时,通过在氧化铝膜上激光开孔,实现金属电极与基区的点接触连接,进一步降低了光生载流子的背表面复合速率,从而提升了电池的开路电压和短路电流,使开路电压提升幅度达到10~15mV。ITRPV预计,今后几年PERC电池的效率 and 市场份额都有大幅提升,2025年产业化的PERC单晶硅电池效率将达到24%。

### 2.5.3 IBC 电池

美国SunPower公司的IBC电池实验室高效



率已达 25.2%，生产线的电池平均效率已高达 23.62%；其他研究成果还有德国 Fraunhofer ISE 的 23%、ISFH 的 23.1%、比利时 IMEC 的 23.3% 等。ITRPV 预计，至 2025 年，IBC 单晶硅电池产业化效率将达到 26% 以上。

#### 2.5.4 HJT 电池

HJT 在异质结界面插入本征非晶硅薄层，钝化电池表面，大幅降低了表面载流子复合；采用宽带隙的非晶 SiC 薄膜作为发射极、透明导电氧化物 (TCO) 材料作为窗口层，提高了发射极的光透过率和导电性。目前，由日本松下公司开发的 HJT 电池已经实现了 23% 的量产效率。ITRPV 预计，至 2025 年，HJT 电池产业化效率将达到 25%。

#### 2.5.5 HJBC 电池

HJBC 太阳电池是目前全球实验室高效率的硅基太阳电池，效率达 26.33%。由于制备工艺的复杂性和高制造成本，HJBC 电池仍然未产业化。未来几年，研究该种电池的低成本产业化技术是发展的重点。

#### 2.5.6 TOPCon 电池

TOPCon 电池特点是在电池背面制备一层超薄氧化硅，然后沉积一层掺杂多晶硅薄层，双层薄膜形成了钝化接触结构。由于氧化层很薄，硅薄层有掺杂，多子载流子可以穿透这两层钝化层到金属电极，而少子载流子则被阻挡。由于 TOPCon 电池实现了无需开孔的钝化接触，使单晶硅电池效率快速达到了 25.1%，成为光伏领域研究的热点技术之一。

#### 2.5.7 国内晶体硅电池技术发展

国内在高效、低成本晶体硅电池产业化关键技术，如 PERC、PERT 晶体硅电池方面，开展了硼、磷掺杂技术研究。通过对热扩散、APCVD 和离子注入等掺杂方式的研究，实现高方块电阻下的均匀掺杂、均匀性的合理控制和 p-n 结的结形、结深的精确控制。进行细栅线技术和无主栅金属化图形技术研究，研究二次印刷技术和喷墨打印栅线技术，获得具有优秀高宽比的金属电极，同

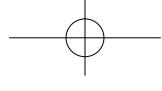
时研究银浆替代技术实现栅线低成本化。研究双面钝化及多层减反射膜技术，研究低成本工艺设备，完成钝化层与减反射层一次实现工艺。

在 HJT 太阳电池研究方面，研究方向包括：硅片吸杂、硅片表面大绒面的制备及抛光处理、非晶硅 / 晶体硅表面钝化处理、透明导电薄膜的制备、低温快速烧结技术、低温电极的焊接技术、长寿命晶体硅电池的  $I-V$  测试技术、HJT 光伏组件的老化实验、HJT 标准电池的研究与制备、HJT 电池各个换件的测试评估技术及设备、国产大绒面制备及抛光添加剂的研究、国产低温银浆的制备、国产 PECVD 设备的研制与工艺匹配、国产热丝法沉积非晶硅膜设备的研制与工艺匹配、国产反应等离子体沉积 (RPD) 设备的研制和工艺匹配、适用于 RPD 沉积的透明导电电极靶材的研究与制备。

在 IBC 电池研究方面，开展 n 型硅衬底上制备 p 型发射极制备研究，包括硼扩散、硼注入；p 型硅的钝化技术； $Al_2O_3$ 、SiNO 的工艺研究；原子层沉积 (ALD) 技术、PECVD 技术、插指状扩散区域的制备、指状背电极的制备工艺；激光加工、湿法刻蚀、丝网印刷。

IBC 电池片的连接技术、长寿命晶体硅电池的  $I-V$  测试技术的技术点包括：长寿命  $I-V$  曲线的测试、全背电极夹具、国产离子注入机的研究开发及硼注入工艺的研究、减压扩散技术设备的研究及硼扩散工艺的研究、ALD 钝化设备的国产化及其工艺匹配、国产全自动 IBC 电池专用串焊机、IBC 电池可靠性及环境实验、IBC 与 HJT 结合型的高效电池的研究。

在太阳电池关键配套材料方面，开展高效太阳电池用配套电极浆料关键技术研究：突破太阳电池用正银浆料制备技术，建成产业化中试示范线；研制无铅正面银电极、背面银电极与铝电极材料；开展低成本浆料银 / 铜粉体功能复合电极材料的成分设计与性能研究；开发出适用于非接触印刷工艺的正面电极材料，满足细栅、多栅



等高效电池应用要求(电极宽度小于 40  $\mu\text{m}$ ); 开发出适用于 n 型、MWT、HJT 电池的电极材料。

在组件封装材料及原材料制备技术研究方面, 重点突破背板材料用氟塑料薄膜制备技术, 实现产业化示范应用; 开发新型抗 PID 封装 EVA 胶膜、聚烯烃(POE)胶膜、阻水性能优异的背板材料; 研发适用于 n 型电池、HJT 电池和柔性电池的专门封装材料、透明背板封装材料; 特殊气候条件下(耐候性 >30 年)组件封装材料的开发和应用研究; 开发环保型胶太阳能电池用粘合剂、光伏组件封装胶带制备技术研究。

在高透太阳能电池用玻璃制备技术研究方面, 开发增透超过 3% 的光伏玻璃制备技术, 突破减反增透结构涂层的制备关键技术; 开发 2 mm 以下超薄钢化光伏玻璃制备技术和关键设备, 建成规模化生产示范线; 开发新型聚光光伏玻璃和具有自洁功能的镀膜光伏玻璃。

“十三五”期间继续开展高效、低成本晶体硅电池的产业化关键技术研究, 突破 HJT、IBC、TOPCon 等高效率电池关键材料、工艺、装备及光伏辅材的国产化研究, 并形成示范, 以实现关键工艺技术的突破、装备及材料国产化率的提升, 以及产业化应用水平的提高。

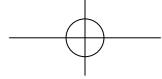
在低成本 PERC 和 PERT 晶体硅电池方面, p 型单晶电池平均效率  $\geq 23\%$ , 多晶电池平均效率  $\geq 20\%$ ; n 型双面单晶电池批产平均效率  $\geq 22\%$ , 打通离子注入扩散技术路线, 采用喷墨打印栅线和替代银栅线技术; 采用双面钝化及多层减反射膜技术, 实现设备国产化和规模生产化。

在 HJT 和 IBC 太阳能电池方面, 整线电池平均效率达到 23% 以上, 小面积实验室 HJT 电池高效率达到 25% 以上; 配套材料方面, 全面推进太阳能电池关键配套材料的国产化, 满足高效电池、长寿命光伏组件、新型薄膜电池等应用要求, 其中, 晶体硅电池用配套材料及原材料国产化率不低于 85%, 封装关键材料使用寿命不低于 30 年; 开发贱金属浆料、自清洁玻璃、透明封装基

板等关键材料技术, 实现示范应用。(待续)

#### 参考文献

- [6] 倪鹏. 层流层对掺杂铸造多晶硅锭电阻率分布的影响 [A]. 第十六届中国光伏学术大会 [C]. 天津, 2016.
- [7] 黄春来, 等. 定向凝固法制备镓掺杂单晶 [A]. 第十六届中国光伏学术大会 [C]. 天津, 2016.
- [8] Cao F, Chen K X, Zhang J J, et al. Next-generation multi-crystalline silicon Solar cells: Diamond-wire Sawing, nano-texture and High efficiency[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2015, 141: 132.
- [9] International Technology Roadmap for Photovoltaic(ITRPV) [EB/OL]. <http://www.itrpv.net/Reports/Downloads/>, 2017-05-01.
- [10] Chen Y F, Shen H, Altermatt P P. Analysis of recombination losses in screen-printed aluminum-alloyed back surface fields of silicon solar cells by numerical device simulation[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, 120: 356 – 362.
- [11] Schmidt J, Merkle A, Hoex B, et al. Atomic-layer-deposited aluminum oxide for the surface passivation of high-efficiency silicon solar cells[A]. the 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference[C]. USA, 2008.
- [12] Rentsch J. Industrial deposition of PECVD  $\text{AlO}_x$  for rear passivation of PERC-type mc-Si solar cells[A]. 25th EU PV solar energy conference[C]. Valencia, Spain, 2010.
- [13] D Song, Xiong J, Hu Z, et al. Progress in n-type Si solar cell and module technology for high efficiency and low cost[A]. 38th IEEE Photovoltaic Specialist Conference[C]. Austin, 2012.
- [14] Benick J, Hoex B, Dingemans G, et al. High-efficiency n-type silicon solar cells with front side boron emitter[A]. 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference[C]. Hamburg, Germany, 2009.
- [15] Cornagliotti E, Russell R, Tous L, et al. Bifacial n-PERT cells (Bi-PERT) with plated contacts for multi-wire interconnection[A]. 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition[C]. Munich, 2016.
- [16] Glunz S W, Feldmann F, Richter A, et al. the irresistible charm of a simple current flow pattern-25% with a solar cell featuring a full-area back contact[A]. 31st European photovoltaic solar energy conference and exhibition[C]. Hamburg, 2015.
- [17] Uruña A, Aleman M, Cornagliotti E, et al. Beyond 22% large area n-type silicon solar cells with front laser doping and a rear emitter [A]. 31th European Photovoltaic Solar Energy Conference[C]. Brussels, Belgium, 2015.
- [18] 光伏测试网. 航天机电 N 型 Pert 双面双玻组件再创功率新高 [EB/OL]. <http://www.testpv.com/portal.php?mod=view&aid=12184>, 2015-11-03.
- [19] Masuko K, Shigematsu M, Hashiguchi T, 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.
- [20] Emery K A, Green M A, Hishikawa Y. Solar cell efficiency tables (Version 45)[J]. Progress in Photovoltaics, 2015, 23: 1 – 9.



- [21] Seif J P, Gopal Krishnamani, Bénédicte Demaurex, et al. Amorphous/Crystalline Silicon Interface Passivation: Ambient-Temperature Dependence and Implications for Solar Cell Performance[J]. IEEE Journal of photovoltaics, 2015, 5(3): 718 – 724.
- [22] Schwartz R J, Lammert M D. Silicon solar cells for high concentration applications[A]. International Electron Devices Meeting[C]. Washington, DC, 1975.
- [23] 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 – 42.
- [24] Smith D D, Cousins P, Westerberg S, et al. Towards the Practical Limits of Silicon Solar Cells[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2014, 4 (6):1465 – 1469.
- [25] Green M A, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, et al. Solar Cell Efficiency Tables (Version 47)[J]. Progress in Photovoltaics: Research & Applications, 2016, 24: 3 – 11.
- [26] Reichel C, Granek F, Hermle M, et al. Back-contacted back-junction n-type silicon solar cells featuring an insulating thin film for decoupling charge carrier collection and metallization geometry[J]. Progress in Photovoltaics: Research & Applications, 2013, 21(5):1063 – 1076.
- [27] Peibst R, Harder N, Merkle A, et al. High-efficiency RISE IBC solar cells: influence of rear-side passivation on pn-junction meander recombination[A]. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference[C]. Paris, France, 2013.
- [28] Sullivan B O, Debucquoy M, Singh S, et al. Process Simplification for High Efficiency, Small area IBC silicon solar cells[A]. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference[C]. Paris, France, 2013.
- [29] Nakamura J, Katayama H, Koide N, et al. Development of Hetero-Junction Back Contact Si Solar Cells[A]. 40th IEEE PVSC[C]. Denver, 2014.
- [30] Masuko K, Shigematsu M, Hashiguchi T, et al. Achievement of more than 25% conversion efficiency with crystalline silicon heterojunction solar cell[A]. 40th IEEE PVSC[C]. Denver, 2014.
- [31] 中国光伏测试网. 日本 Kaneka 公司 HBC 电池效率达到创纪录的 26.33%[EB/OL]. <http://www.testpv.com/portal.php?mod=view&aid=15021>, 2016-09-19.
- [32] PV-tech. [EB/OL]. [http://www.pv-tech.cn/news/HAREON\\_SOALR\\_REPORTS\\_SIGNIFICANT\\_TECHNOLOGY\\_ADVANCEMENT\\_AT\\_IEEE\\_PVSC](http://www.pv-tech.cn/news/HAREON_SOALR_REPORTS_SIGNIFICANT_TECHNOLOGY_ADVANCEMENT_AT_IEEE_PVSC), 2017-05-01.
- [33] Franklin E, Fong K, McIntosh K, et al. Design, fabrication and characterisation of a 24.4% efficient interdigitated back contact solar cell[A]. 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference[C]. Amsterdam, The Netherlands, 2014.
- [34] Zhang X L, Yang Y, Liu W, et al. Development of high efficiency interdigitated back contact silicon solar cells and modules with industrial processing technologies[A]. 41st IEEE PVSC[C]. Kyoto, Japan, 2014.
- [35] Xu G C, Yang Y, Zhang X L, et al. 6 inch IBC cells with efficiency of 23.5% fabricated with low-cost industrial technologies[A]. 43th IEEE PVSC[C]. Portland, 2016.
- [36] 中国光伏行业协会. 探究组件效率提升之道 [J]. 光伏产业观察, 2015, (10).
- [37] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, et al. Solar cell efficiency tables (version 45)[J]. Progress in Photovoltaics: Research & Applications, 2015, 23(1): 1 – 9. **太阳能**

(接第 63 页)

针对具体问题, 结合实际情况进行专业分析、查找原因, 最终采取钢板桩围堰方式进行排水, 降低灰层水位, 局部增加覆盖土层厚度、覆土强夯等措施, 为工程的顺利推进打下了基础。覆土表面冒灰水情况如图 11、图 12 所示。



图 11 4# 光伏方阵区  
灰水孔眼



图 12 5# 光伏方阵区  
灰水孔眼

#### 4 结语

灰场作为固体废物存储场所, 在灰场建设光伏电站前需严格按照规范进行封场处理, 还要根据场地具体情况新建防洪措施、处理地面不均匀沉降。虽然最初投资会略有增加, 但项目建设提高了土地利用效率, 有效地治理了灰场, 在环境保护和资源重复利用方面具有重要意义, 同时也取得了较好的社会效益和经济效益。通过灰场光伏电站新能源建设, 走出了一条老火电厂灰场治理与发展相结合的创新之路, 不仅让“金太阳”在沉寂的灰场冉冉升起, 更让“奉献绿色能源、服务社会公众”的企业精神得到了新的诠释。**太阳能**