

2018 年中国光伏技术发展报告 (6)

中国可再生能源学会光伏专业委员会

表 8 为 n 型 PERT 太阳能电池的双面率数据，其产线效率普遍在 21%~21.5%。n 型 PERT 太阳能电池有两大优势：1) 双面率较高，普遍可达到

90% 左右；2) 光致衰减较 p 型 PERC 电池低。因此，目前 n 型 PERT 电池主要用于双面发电的示范项目中。

表 8 2017 年有关公司和研究机构的 n 型 PERT 电池的研究结果

公司	工艺特点	效率 /%	V_{oc} /mV	J_{sc} /mA·cm ⁻²	FF /%	双面率 /%	面积 /cm ²
英利	双面扩散双面 SiO ₂ /SiN _x	22.01	666.8	40.01	82.50	90.0	244.3
航天机电	扩硼注磷双面 SiO ₂ /SiN _x	21.34	655.9	40.74	80.24	90.0	244.3
	扩硼注磷双面 SiO ₂ /SiN _x	20.74	643.4	40.31	79.99	-	-245.5(铸锭 n 型单晶)
IMEC	双面扩散前 Al ₂ O ₃ /SiN _x 背 SiO ₂ /SiN _x 前后镀 Ni/Ag	22.80	694.2	40.50	81.10	97.2	239.0
	双面扩散背表面为发射极前 Al ₂ O ₃ /SiN _x 背 SiO ₂ /SiN _x 前镀 Ni/Cu/Ag 背表面 Al	22.90	705.0	40.90	79.40	单面	239.0
ECN	扩硼 /LPCVD 生长掺杂多晶 (Topcon)	21.50	676.0	39.70	80.00	86.0	239.0

图 28 为国际知名研究机构 IMEC 报道的 n 型 PERT 双面太阳能电池，前表面使用 Al₂O₃/SiN_x 钝化膜，电极采用电镀方式，最高效率达到了 22.9%(见表 9)；其 V_{oc} 有大幅度的提高，达到了 694 mV，双面率达到了 97% 以上。由此可见，使用 Al₂O₃/SiN_x 钝化膜具有潜力。

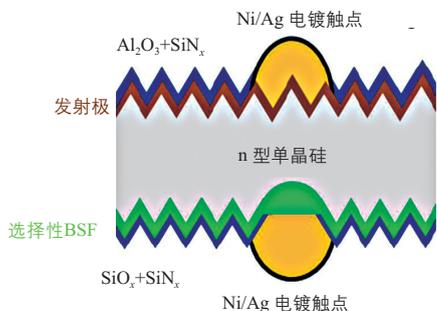
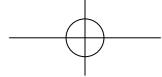


图 28 IMEC 研究所报道的 n 型 PERT 双面太阳能电池结构^[49]

表 9 IMEC 研究所的 n 型 PERT 双面太阳能电池结果^[50]

	J_{sc} /mA·cm ⁻²	V_{oc} /mV	FF/%	η /%
44 块电池平均值	40.4	691.2	80.3	22.4
最优电池	40.5	694.2	81.1	22.8

IMEC 研究所还研究了一种发射极在背表面的 n 型太阳能电池，结构如图 29 所示。其将发射结制备在背表面，仍旧使用硼扩散，在背表面钝化之后开口与全铝背场接触，其铝电极采用溅射蒸发法制备，前表面采用电镀 Ni/Cu/Ag 的方法，这种技术在降低成本方面具有潜力。该方法制备的电池效率达到了 22.9%， V_{oc} 为 705 mV， J_{sc} 为 40.9 mA/cm²，FF 为 79.4%。虽然这是一种单面电池，但是可以得到 705 mV 的高开路电压，非



常具有潜力；此外，其避免了使用背银，大幅降低了成本；另外一个可能的好处是在制备背表面 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$ 钝化膜时，由于不用顾忌吸光作用，可以使用 PECVD 沉积法制备比较厚的 Al_2O_3 膜。当然这种电池对硅片质量的要求更高一些。

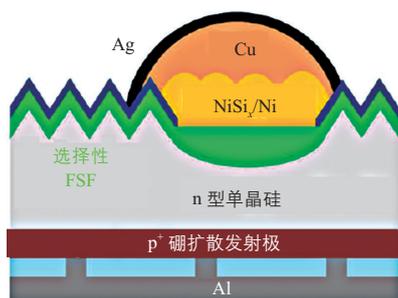


图 29 IMEC 研究所的背发射极 n 型 PERT 电池结构^[51]

在持续提高 n 型 PERT 电池效率方面，目前提出的可供选择的方案主要是采用背表面的 Topcon 技术来进一步提升其效率^[52-55]。

2.3.3 薄膜硅 / 晶体硅异质结 (HJT) 电池

2.3.3.1 发展概况

薄膜硅 / 晶体硅异质结 (HJT) 电池是指由晶体硅和非晶硅组成的异质结太阳能电池^[56-57]。HJT 电池也是一种双面电池，与 PERC 双面电池、n 型 PERT 双面电池一起，构成了双面电池的发展方向。为提高电池效率，HJT 电池采用了异质结结构，使电池具有 750 mV 的高开路电压，比硅同质结电池的最高开路电压 (约 720 mV) 高出了约 30 mV；在异质结界面插入一层本征非晶硅薄层或氧化硅隧穿层来钝化电池的正表面与背表面，从而大幅降低了表面载流子复合；采用宽带隙的非晶薄膜作为发射极，并采用透明导电氧化物 (TCO) 材料作为窗口层来提高发射极的光透过率和导电性；采用低温处理，电池全部制作工艺都在 200 °C 左右的低温下完成，有效地保护了硅片的载流子寿命。

日本三洋电机公司 (2009 年被松下公司收购) 一直保持 HJT 电池效率的领先地位，2012 年，其 HJT 电池效率达到了 24.7%。2017 年，日本 KANEKA 公司通过结合异质结与背电极技术，

将面积为 79 cm^2 的晶硅太阳电池的转换效率提高到了 26.7%，创造了晶硅单结太阳电池效率的最高纪录^[58]。

国际上，日本松下是最大的 HJT 电池生产厂家，其年产量约为 1 GW，其他 HJT 电池厂家包括日本的 Keneka 和美国的 Silevo。

近年来，我国 HJT 电池的研发也取得了很大进展，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 计划”——兆瓦级薄膜硅 / 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，研究都已取得了较好的成果。其中，天合光能与上海微系统研究所使 6 寸 (156 mm×156 mm) 硅片制备的 HJT 电池的转换效率达到了 23.29%^[59]。我国 HJT 电池量产的平均效率约为 22%~22.5%。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，2018 年市场上 HJT 电池生产厂商 (产能、产量) 将增加，加上高效异质结电池的高发电量优势，未来 HJT 电池将取得较大的市场份额。

2.3.3.2 技术及产业化进展

2017 年是我国 HJT 电池进入实质发展的一年，2016 年及以前主要是日本企业在建立规模化的 HJT 电池生产线，包括日本松下公司 (即三洋公司) 和长洲产业公司，而我国则主要是早期的浙江上彭公司所拥有的小规模生产线。2017 年我国一些企业陆续建成了大规模的 HJT 电池生产线，包括：泰兴中智公司建成的 160 MW HJT 电池生产线；山西晋能公司建设的 100 MW HJT 电池生产线，其中的 50 MW 生产线已经建成，另外的 50 MW 生产线正在调试中；浙江上彭公司完善了其 HJT 电池生产线，并将产能提升到 70 MW；福建金石公司建成了 100 MW HJT 电池生产线，但是其很少在公开场合发布消息；汉能正在建设 600 MW HJT 电池生产线，使之成为 2017 年最大的扩产项目。截至 2017 年底，已形成生产能力的产能近 430 MW，另有 600 MW 在

建, 预计在 2018 年形成 1 GW 的产能。有 2 家生产企业暂时放弃了其已有的 HJT 电池生产线, 分别为新奥太阳能公司改造自美国应用材料公司非晶硅薄膜生产线的 30 MW HJT 生产线, 以及国电集团下属的 50 MW HJT 电池生产线, 该生产线在转手到中环公司之后并未重新启动。从产能建设来看, HJT 电池无疑是较为缓慢的, 有一些曾想投资 HJT 电池生产线的企业(如协鑫集成、国电投、长江水电集团等)并未快速上马 HJT 项目, 究其原因或许也与 PERC 电池效率的提升有关。PERC 电池的产业化效率已接近 HJT 电池的产业化效率, 且其成本又较低, 因此影响了 HJT 电池生产线的启动和建设。

国际上, 梅耶博格 (Meyer Burger) 是一家主要的 HJT 电池供应商; 据报道, 意大利光伏制造商 3Sun 已经订购年产量 200 MW 的 HJT 电池

设备, 预计在 2019 年初开始生产。

表 10 给出了我国各个公司和研究单位报道的 HJT 电池的最高转换效率, 产线量产的平均效率稍低。浙江上彭公司 HJT 电池的量产效率达到了 22%, 60 片 M2 组成的光伏组件功率为 310~320 W。泰兴中智公司批量试产的 HJT 电池效率在 21.8%~22.0% 之间。2017 年 HJT 电池的实验室最高效率仍旧属于上海微系统研究所, 达到了 23.18%。在量产设备方面, 我国企业也有了更多的选择。在诸多外国设备厂家中也有了中国设备制造商的身影, 如理想能源公司的 PECVD 设备和精曜公司的 RPD 设备。理想能源公司获得了汉能公司 600 MW 的订单, 精曜公司获得了日本住友公司 RPD 设备在中国市场销售的许可后, 开始自行制造这种新型的透明导电膜设备。表 11 给出了 HJT 设备技术方案及供应商。

表 10 我国公司及研究单位 HJT 电池的最高转换效率

公司	最高转换效率 /%	V_{oc}/mV	$J_{sc}/mA \cdot cm^{-2}$	FF/%	双面率 /%	电池面积 / cm^2
浙江上彭公司	22.28	737.1	37.45(9.15 A, M2)	80.73	95	244.30
泰兴中智公司	23.00	740.0	39.14(9.564 A, M2)	79.41	95	244.32
上海微系统研究所	23.18	739.2	38.57(9.36 A, M2)	81.30	87	242.70

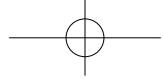
表 11 HJT 设备技术方案及供应商

技术方案		供应商	使用公司
清洗制绒工艺	槽式	YAC(日)、Singulus(德)	泰兴中智、汉能、山西晋能
非晶硅镀膜公司	Cat-CVD	Ulvac(日)	泰兴中智
	PECVD	Ulvac、MB(德)、理想、精曜、AM	山西晋能、汉能、浙江上彭
TCO 镀膜	PVD	冯·阿登纳、MB	泰兴中智、汉能、浙江上彭
	RPD	精曜	山西晋能

日本 Ulvac 公司在中国市场销售了第一批热丝 CVD(Cat-CVD) 设备, 共计 160 MW, 这种设备沉积的非晶硅膜的质量更高, 而且工艺窗口较宽, 便于企业操作, 但其均匀性有待进一步提高。此外, 作为耗材的热丝还需日方公司持续提供, 也提高了工艺成本。

RPD 设备与 PECVD 设备相比具有一定的优势, 主要是该种设备可以镀制日本住友公司特

殊开发的 IWO 薄膜, 此种薄膜的功函数较高, 与 p 型非晶硅的功函数匹配较好且透过率较高, 结晶特性也较好, 并且使用 RPD 设备对非晶硅表面的轰击不严重。据山西晋能公司报道, 使用该种设备的量产线效率高于使用磁控建设的 TCO 镀膜设备。但是由于 RPD 设备的垄断特性使其价格较高, 在规模量产方面也遇到一些问题。



使用磁控溅射镀制 TCO 膜的一个主要问题是如何选择较好的材料, 由于 IWO 无法被制备成高密度磁控溅射靶, 因此使用磁控溅射方法时只能改用其他材料, 但 HJT 电池对前表面 TCO 膜的要求很高。其需要符合: 1) 电学特性方面: 载流子收集和向金属电极的传递性能高, 对 a-Si(p) 的能带弯曲进行优化(功函数匹配), 与 Ag 或 Cu 的接触电阻低。2) 光学特性方面: 在波段 300~1200 nm, 减小在 IR 处的吸收, 未对 a-Si 层造成损坏, 柔和的沉积条件 (<200 °C, 无离子轰击), 阻止金属杂质的扩散(如 Cu 等), 适合组件封装(稳定性、无空气、水汽等引起的蜕化)。这些要求需要功函数高、迁移率高、载流子浓度较低的 TCO 材料作为前表面镀膜材料, 日本三洋公司经过 20 余年的研究和产业化实践, 选出了 IWO 作为前表面 TCO 材料, 但镀制这种材料必须使用 RPD 设备。因此, 对于提供其他镀膜解决方案的公司, 如何寻找到一款合适的 TCO 材料成为技术关键。近几年国际上先后选择了 ITO(氧化铟+氧化锡)、ITiO(氧化铟+氧化钛)、IOH(掺氢氧化铟)、ICO(氧化铟+氧化铈)、IMO(氧化铟+氧化钼)几种材料, 但是产业化的结果仍旧不是很理想。

作为不得已的解决方案, 国内有公司将 p 型非晶硅发射极制备在背表面, 如图 30 所示。

当将 p 型发射极制备在背表面时, 降低了对背表面 TCO 膜的要求, 如降低了对透光率、

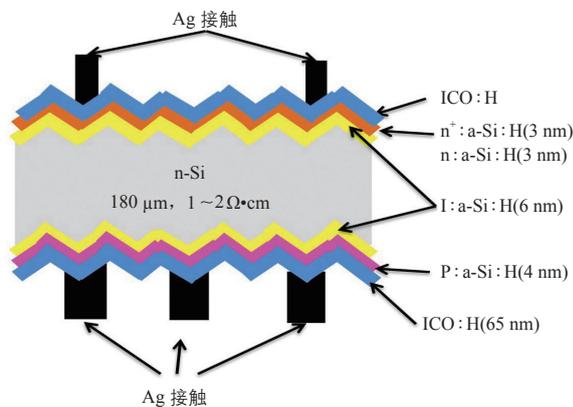


图 30 背结 HJT 电池的结构

长波吸收及厚度的要求, 从而主要考虑其功函数匹配和导电特性即可。此外, 将发射极放在背面还有一个好处, 就是可以增厚发射极, 以增加其钝化特性。

2017 年, 虽然 HJT 电池受到了来自 p 型 PERC 电池在效率方面的压力, 但是比较两者的参数可以看到, HJT 电池的 V_{oc} 可以很容易的提升到 730 mV 以上, 这是 PERC 电池很难达到的, 只是目前 HJT 电池的短路电流还较低, 需要进一步提高。因此可以预测, HJT 电池仍将成为 PERC 电池的主要竞争对手, 并在性价比方面最可能成为 PERC 电池的换代产品的主要候选者。

2.3.4 全背接触 (IBC) 太阳电池

2.3.4.1 发展概况

IBC 电池结构是一种电极具有交指形状背结和背接触太阳电池。为提高电池效率, 该电池具有如下特点: 1) 与 PERC、PERT 和 HJT 电池比较, 该电池前表面无栅线, 正、负电极采用交叉排列的方式被制备在电池背面, 避免了常规电池正面栅线约 5% 左右的遮光损失; 2) 背面利用扩散法做成 p^+ 和 n^+ 交错间隔的交叉式电极接触高掺杂区, 通过在介质化膜上开孔, 实现了金属电极与发射区或基区的点接触连接, 降低了光生载流子的背表面复合速率; 3) 由于背接触结构, IBC 电池的串联电阻低于传统电池, 具有较高的填充因子。

由于上述特点, 国际上知名的光伏研究机构都投入巨资对 IBC 电池进行了研究, 如美国 Sunpower 公司、中国天合光能、德国弗朗霍夫太阳能系统研究所、比利时 IMEC 研究所等。美国 Sunpower 公司和我国的天合光能一直保持着 IBC 电池效率的领先地位。几个重要的效率进展是: 2004 年, Sunpower 公司报道了其实验室成功研发了具有 21.5% 效率的大面积 (149 cm²) IBC 结构太阳电池; 2010 年, 其采用 Czj 型 Si 衬底, 在

面积为 155.1 cm^2 的硅片上, 实验室研发的 IBC 电池效率达到了 24.2%; 2015 年, Sunpower 公司的 IBC 电池效率达到了 25.2%^[60-61]。我国的天合光能是可产业化生产大面积 IBC 电池的领军者, 2017 年, 天合光能 6 英寸 IBC 电池的效率通过第三方测试, 达到了 24.13%^[62]; 2018 年 1 月, 天合光能研发的大面积 IBC 电池效率突破了 25.04%, 是迄今为止经第三方权威认证的中国实验室首次效率超过 25% 的单晶硅太阳能电池, 也是世界上 6 英寸大面积晶体硅衬底上制备的晶体硅电池的最高转换效率。

2.3.4.2 技术及产业化进展

采用 IBC 与 HJT 技术结合的双结背接触 (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。这一技术的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。2014 年, 日本 Sharp 和 Panasonic 公司分别将 IBC 与 HJ 技术结合, 研发的 HJBC 电池效率分别达到了 25.1% 和 25.6%^[63-64]。2016 年 9 月, 日本 KANEKA 公司与 NEDO 研究机构发表联合声明, 在面积为 180 cm^2 的硅衬底上实现了转换效率达 26.33% 的晶硅太阳能电池, 创下了世界纪录。KANEKA 与 NEDO 将 108 片 HJBC 电池封装成组件, 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% 的效率纪录。2017 年, KANEKA 通过结合异质结与背电极技术, 将面积为 79 cm^2 的晶硅太阳能电池的转换效率提高到了 26.7%^[65], 创造了晶硅单结太阳能电池效率的最高纪录。欧盟正在支持一个名为 NextBase 的 HJBC 高效太阳能电池研发项目, 项目执行期为 2016~2019 年, 旨在通过研发新型制造装备和工艺技术, 使 HJBC 电池效率达到 26% 以上,

组件成本低于 $0.35 \text{ €}/\text{W}_p$ 。

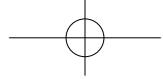
近几年 IBC 电池技术的研究进展情况如表 12 所示。

表 12 IBC 电池技术的研究进展

单位	电池尺寸	类型	关键技术	最高效率/%	时间/年
天合光能	6 英寸	IBC	丝网印刷 炉管扩散	25.04	2018
KANEKA	79 cm^2	HJBC	—	26.70	2017
SunPower	5 英寸	IBC	电镀	25.20	2015
Sharp	5 英寸或 4 cm^2	HJBC	丝网印刷	25.10	2014
Panasonic	5 英寸或 4 cm^2	HJBC	丝网印刷	25.60	2014
ANU/天合	4 cm^2	IBC	光刻	24.40	2014

随着光伏产业规模的持续扩大, 我国越来越多的光伏企业投入了对 IBC 电池技术的研发, 如天合、英利、中来、中科院微电子所等。高效率是 IBC 电池最大的特点, 也是研究者们追求的最大目标。目前多家科研单位已实现了效率为 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 电池技术的门槛、成本和售价都较高。美国 SunPower 公司持有约 1.2 GW 的 IBC 电池年产能, 其中包括年产能 100 MW 的第三代高效 IBC 电池生产线。

目前 IBC 电池在我国还未实现大规模量产, 随着天合光能等企业的进入, 以及新型工艺和材料的开发, IBC 电池的商业化应用和推广有着广泛的前景。IBC 电池的最重要目标并非进一步提高效率, 而是通过简化工艺降低成本, 以适应大规模应用的竞争。天合光能发布了其简化的 IBC 电池工艺路线, 如图 31 所示, 可以看到一个重



要的改变是将前表面的织构化放在扩散之后,这样可以减少掩膜工艺,但是前表面没有前场,或许会降低少子寿命。此外,所有的开孔全部使用丝网印刷工艺。

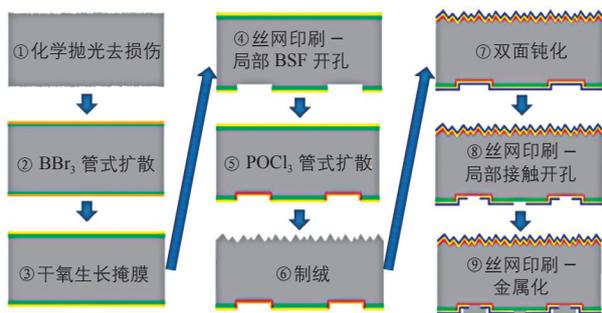


图 31 天合光能公司的简化 IBC 工艺流程

2.3.5 隧穿氧化层钝化接触 (TOPCon) 电池

2.3.5.1 发展状况

钝化接触 (Passivated Contact) 是一种既可满足良好的表面钝化要求,又无需开孔即可传输电流的太阳电池技术。2013 年在第 28 届欧洲 PVSEC 光伏大会上,德国 Fraunhofer 太阳能研究所首次提出一种新型钝化接触太阳电池,称为隧穿氧化层钝化接触 (TOPCon) 电池。这种太阳电池首先在电池背面制备一层超薄隧穿氧化硅 (1~2 nm),然后再沉积一层 20 nm 厚的磷掺杂非晶硅层,经过 800 °C 高温退火后形成掺杂多晶硅,二者共同形成了钝化接触结构,为硅片的背面提供了良好的表面钝化;由于氧化层很薄,多晶硅薄层具有重掺杂,多数载流子可以穿透这两层钝化层,而少数载流子则被阻挡。图 32 给出了 TOPCon 太阳电池的基本结构^[52]。

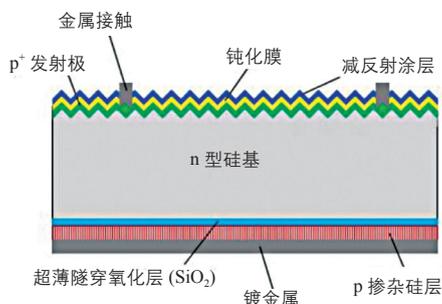


图 32 TOPCon 太阳电池的基本结构

与 PERC 及 PERL 电池结构相比, TOPCon 电池结构可对电池表面实现完美钝化。PERC 及 PERT 电池是通过将金属接触范围限制在局部区域,增加背面钝化面积来降低表面复合。但金属接触的开孔区域仍然能产生载流子的复合,使电池效率提升受到限制。TOPCon 电池结构是一种既能降低表面复合,又无需开孔的钝化接触电池技术。另一方面, TOPCon 电池全接触钝化结合全金属电极的结构,克服了 PERL 电池结构由于局部开孔对载流子传输路径的限制,实现了最短的电流传输路径,极大地降低了传输电阻,从根本上消除了电流横向传输引起的损失,提升了电池的电流和填充因子。

2013 年,德国 Fraunhofer 太阳能研究所发表了首个 TOPCon 电池的实验结果。他们采用 n 型 FZ 硅片,正面采用金字塔制绒、硼扩散、氧化铝加氮化硅叠层膜起到钝化和减反作用;背面采用 TOPCon 钝化技术;正、反面金属化均采用蒸镀 Ti/Pd/Ag 叠层结构,电池效率达到了 23.7%, V_{oc} 超过了 700 mV。随后, TOPCon 电池效率得到了快速提高, TOPCon 的钝化结构也从背面扩展到正面,衬底材料也从单晶硅扩展到多晶硅。2015 年, Fraunhofer 将 TOPCon 单晶硅太阳电池的效率提升至 25.1%, 2017 年其效率达到了 25.7%。同时, Fraunhofer 通过 TOPCon 技术,使用 n 型多晶硅衬底,于 2017 年将多晶硅太阳电池的效率提升至 22.3%,成为迄今为止效率最高的多晶硅太阳电池。

2.3.5.2 技术及产业化进展

近几年来,我国的 TOPCon 电池技术得到了快速发展,英利、上海神舟、中科院微电子所等单位报告了他们的研究成果。2016 年 11 月,在第十二届中国太阳级硅及光伏发电研讨会上,上海神舟报告了其在 n 型 PERT 电池的基础上,采用 TOPCon 技术,使电池平均效率达到了 21.4%,最高效率达 21.74%。2017 年 9 月,在第十七届中国光伏学术大会上,英利报告了其在

常规 n 型 PERT(熊猫) 电池基础上引入 TOPCon 技术, 电池效率可达到 21.8%, 开路电压达到了 676 mV, 填充因子达到了 80%^[55]。Panda-TOPCon 双面电池采用直拉法 n 型单晶硅片, 正面依次为硼扩散发射极、氧化硅 / 氮化硅钝化减反射层和金属电极; 背面依次为隧穿氧化层、掺杂多晶硅层、氮化硅钝化减反射层和金属电极。

TOPCon 电池仍然处于实验室阶段, 产业化也是以中试为主。但 TOPCon 电池与 PERC 和 PERT 电池相比, 具有高效率的优势; 与 IBC 电池相比, 具有工艺简单及低成本的优势, 这些优势都将推动此类电池在 2018 年得到更快的发展。

2.3.6 MWT 太阳电池

2.3.6.1 发展概况

MWT(Metal Wrap Through, 金属电极绕通) 技术是一种电池的金属化结构, 通过将位于正面发射极的接触电极穿过硅片基体引导到硅片背面, 以减少遮光面积的方式来提高电池的转换效率^[66-70]。其主要特点有: 1) 无主栅线, 降低遮光面积, 提高转换效率; 2) 组件采用背接触方式, 大幅降低了工艺过程中的碎片率, 更适合于薄硅片; 3) 与常规电池工艺兼容性好, 只需对现有电池生产线的量产平台进行简单改造, 增加激光开孔及过孔印刷两道工序, 就可以进行规模化生产; 4) 外表更加美观; 5) 由于采用了全新的电池和组件结构设计, 固定成本有一定增加。

MWT 技术是由荷兰国家能源研究所 (ECN) 首先研究并提出的, 从 2009 年起国内部分光伏制造企业开始将其用于工业化生产, 先后有英利、阿特斯、天威新能源、晶澳等企业进行了相关的应用开发研究。2013 年, 阿特斯宣布量产组合 MWT 结构和 PERC 结构的新一代太阳电池, 平均转换效率提高到了 20.57%。英利于 2012~2015 年在国家“863 计划”的支持下, 首次将 MWT 技术应用于高效率 n 型硅电池, 2015 年 n 型硅 MWT 电池的效率达到了 20.5%, 并建成了 50 MW 的示范生产线。天威新能源发

展了 p 型多晶硅太阳电池 MWT 技术, 电池效率达到了 19.01%。同时, MWT 光伏组件采用背连接技术, 封装损失还可以降低 1% 以上, 从而大幅提升了组件的输出功率及可靠性。MWT 电池技术实际上是一种电极制备技术, 因此其可以和各种电池技术相结合, 如“MWT+ BSF 单晶硅电池”“MWT+ BSF 多晶硅电池”“MWT+ PERC 单晶硅电池”“MWT+ PERC 多晶硅电池”“MWT+n 型 PERT 单晶硅电池”“MWT+n 型 HJT 单晶硅电池”, 不同的 MWT 电池结构如图 33 所示。由此可知, MWT 电池技术可以随着电池主工艺的变化而变化, 随着不同种类电池效率的提升而提升。

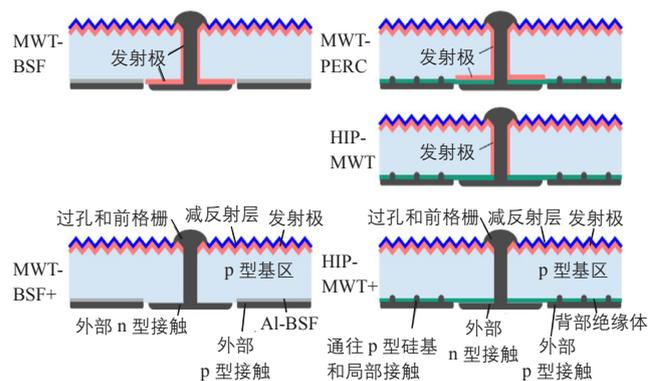
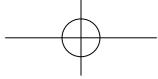


图 33 不同电池结构的 MWT 电池

2.3.6.2 技术及产业化进展

近年来, 南京日托主要发展 MWT 产业化技术, 并成功应用于规模化生产, 宣布已建成了 1 GW 的产能, 其研制的 60 片 MWT 电池的单、多晶硅光伏组件的功率可达 300 W 和 290 W 以上。2017 年, 该公司发布了“MWT+ 黑硅” 300 W 多晶硅光伏组件新产品, 说明 MWT 技术与其他高效电池技术(如黑硅技术、PERC 技术)有很好的兼容性。

日托公司目前主要是在 BSF 单晶硅与多晶硅电池的基础上制备 MWT 电池。与普通的 BSF 多晶硅电池相比, 主要是增加了激光钻孔工艺, 当然还需要有背表面的激光隔离技术等。但是其最主要的技术步骤是制备组件时的导线



连接，目前采用的是背面覆铜板的连接方式，如图 34 所示。这种连接方式可以提高组件的功率。

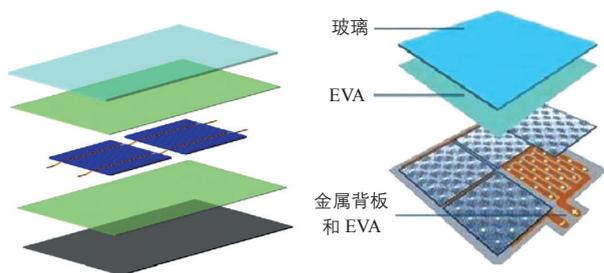


图 34 MWT 光伏组件的背表面连接方式

p 型多晶硅 MWT 电池产线的典型效率为 19.3%， V_{oc} 为 632 mV， I_{sc} 为 9.41 A， FF 为 79.73%。60 片电池的光伏组件功率达到 286 W，效率达到 17.6%；72 片电池的光伏组件功率达到了 341 W，效率达到了 20.96%。随着各种类型电池效率的不断提高，其与 MWT 结合所得到的电池效率也会不断提高。而且国内也有其他企业使用叠瓦技术代替背面覆铜板的，从而进一步降低了成本，提高了组件效率。

2.3.7 多晶黑硅太阳能电池

2.3.7.1 发展概况

所谓黑硅太阳能电池，是针对提升多晶硅太阳能电池效率发展起来的一种通过多晶硅表面制绒技术来提升多晶硅电池效率的技术，因此其是可用于 PERC、PERT 等技术的多晶硅太阳能电池。黑硅太阳能电池采用与常规酸制绒不同的处理工艺，对硅片表面进行陷光织构，提高光吸收，改善太阳能电池的光学特性，从而提升电池的光电转换效率。黑硅技术主要有干法制绒和湿法制绒 2 种方式。干法制绒为离子反应法 (Reactive Ion Etching, RIE)^[71-72]，利用微波将 SF_6 、 O_2 、 Cl_2 这 3 种气体等离子化，在电场加速下对硅片表面进行轰击，并发生化学反应，在硅片表面腐蚀出纳米 / 亚微米级绒面。湿法制绒为金属催化化学腐蚀法 (Metal Catalyzed Chemical Etching, MCCE)^[73-74]，利用 $AgNO_3$ 中的 Ag/Ag^+ 系统能量远低于硅的价带，使溶液中的 Ag^+ 得到硅的价带电子，从硅表面

的 Si-Si 键中获得的电子被还原，形成银单质颗粒，沉积在硅片表面；然后利用 H_2O_2/HF 腐蚀系统在 Ag 周围加速与硅反应，颗粒下面的硅被不断腐蚀，最终形成纳米 / 亚微米级的腐蚀坑；最后，对硅片进行一定程度的表面蚀刻修饰，以降低表面复合。图 35 给出了典型的湿法黑硅表面形貌。

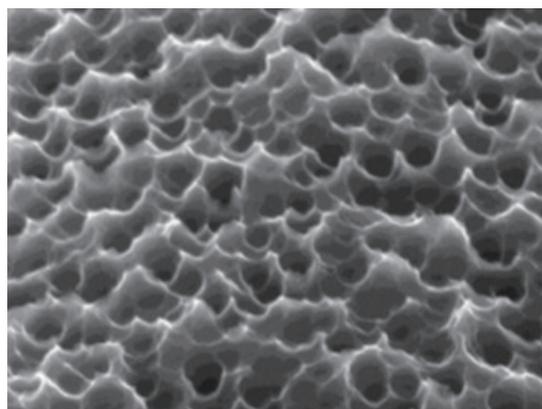


图 35 英利制备的典型的湿法黑硅表面形貌

2017 年，德国 Fraunhofer 太阳能研究所采用干法黑硅表面制绒技术，使多晶硅表面反射率降低到 2.8%；利用 TOPCon 隧穿氧化层钝化接触技术，将 n 型多晶硅电池效率提升至 22.3%。

2.3.7.2 金刚线切割的多晶硅片制绒技术

2017 年，与铸造多晶硅相关联的技术开发与应用的重点之一是金刚线切多晶硅片制绒工艺技术。2017 年，湿法黑硅的研发工作取得了长足的进步，设备、添加液及工艺都已趋于成熟，利用常规电池工艺和湿法黑硅工艺结合，铸造多晶硅的电池效率提升可达到 0.3%~0.4%。同时，干法黑硅的应用也因为 PERC 电池工艺的逐步大规模应用得到推进。

在金刚线切多晶硅片推广应用方面，湿法黑硅技术完美解决了电池应用上的技术难题，2017 年该技术在协鑫、阿特斯等企业已进入批量化生产。保利协鑫推出了 TS⁺ 系列“鑫多晶”黑硅片新产品，其采用单面制绒的方法制备单面黑硅产品，起到降本增效的作用。该产品正面为多孔黑硅绒面，绒面尺寸为 600~800 nm，绒面孔型深

度为 400~500 nm, 整体绒面均匀。这种优良陷光的硅片绒面, 为多晶硅太阳能电池提供了有效的陷光表面结构, 电池效率增加。背面采用背面抛光技术, 实现具有更高反射率的背表面, 为背钝化技术的实施提供可靠的材料基础。采用这种正面与背面相结合的单面黑硅技术, 设备产能增加了 1 倍, 加工成本降低 40% 以上, 排废量降低了近 50%。“背钝化”与“黑硅陷光”相结合, 量产电池的平均效率可达 20.3%~20.5%。

但是, 由于湿法黑硅技术需要增加厂房、设备等固定资产的投资, 限制了该技术的大规模推广。2017 年, 对于金刚线切割的铸造多晶硅, 占市场份额最大的制绒技术路线是: 常规链式酸制绒工艺中添加辅助添加剂, 实现常规蠕虫状绒面制备。此技术制备的多晶硅片绒面反射率较高, 虽然电池性能较常规电池低 0.03%~0.07%, 但是不需要新的固定资产投资, 单片电池成本只增加 0.03~0.05 元, 成本优势显著, 因此迅速实现了其的大规模推广应用。(待续)

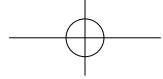
参考文献

- [49] Recamán M, Kuzma I, Li Y, et al. Selective epitaxy as contact passivation approach in bifacial n-type PERT solar cells[A]. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition[C]. Amsterdam, Netherlands, 2017.
- [50] Cornagliotti E, Tous L, Russell R, et al. High efficiency bifacial n-PERT cells with co-plated Ni/Ag contacts for multi-wire interconnection[A]. SNEC 2017 Scientific Conference[C]. Shanghai, China, 2017.
- [51] Maria Recamán-Payo, Li Yuandong, Izabela Kuzma-Filipek, et al. Opportunities for silicon epitaxy in bulk crystalline silicon photovoltaics[A]. 29th European Photovoltaics Solar Energy Conference and Exhibition[C]. Amsterdam, Netherlands, 2014.
- [52] Feldmann F, Bivour M, Reichel C, et al. Passivated rear contacts for high-efficiency n-type Si solar cells providing high interface passivation quality and excellent transport characteristics[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2014, 120: 270 – 274.
- [53] Feldmann F, Bivour M, Reichel C, et al. A passivated rear contact for high-efficiency n-type silicon solar cells enabling high VocS and FF>82%[A]. 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition[C]. Paris, France, 2013.
- [54] Richter A, Benicka J, Feldmann F, et al. n-Type Si solar cells

with passivating electron contact: Identifying sources for efficiency limitations by wafer thickness and resistivity variation[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 173: 96 – 105.

- [55] 翟金叶, 等. 21.5% 以上效率 Panda-TOPCon 双面电池技术研究 [A]. 第 17 届中国光伏学术大会 [C]. 呼和浩特, 2017.
- [56] Descoeurdes A, Holman Z C, Barraud L, et al. >21% efficient silicon heterojunction solar cells on n- and p-type wafers compared[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2013, 3(1): 83 – 89.
- [57] 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.
- [58] Yamamoto K, Adachi D, Yoshikawa K, et al. Record-breaking efficiency back-contact heterojunction crystalline Si solar cell and module[A]. 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition[C]. Amsterdam, Netherlands, 2017.
- [59] Meng F, Liu J N, Shen L L, et al. High-quality industrial n-type silicon wafers with an efficiency of over 23% for Si heterojunction solar cells[J]. Frontiers in Energy, 2017, 11(1): 78 – 84.
- [60] Green M A, Emery K, Hishikawa Y, et al. Solar cell efficiency tables(version 47)[J]. Progress in Photovoltaics Research and Application, 2016, 24: 3 – 11.
- [61] Jeyakumar R, Maiti T K, Khader M M, et al. High-efficiency c-Si based interdigitated point contact back heterojunction solar cells[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2017, 28(13): 9697 – 9703.
- [62] Xu Guanchao, Yang Yang, Zhang Xueling. Large-area(6 inch) screen-printed IBC solar cells with efficiency above 24.1% without passivated contacts[A]. 33rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition[C]. Amsterdam, Netherlands, 2017.
- [63] Nakamura J, Katayama H, Koide N, et al. Development of hetero-junction back contact Si solar cells[A]. 40th IEEE Photovoltaic Specialist Conference [C]. Denver, Colorado, 2014.
- [64] Yoshikawa K, Yoshida W, Irie T, et al. Exceeding conversion efficiency of 26% by heterojunction interdigitated back contact solar cell with thin film Si technology[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 173: 37 – 42.
- [65] 应用异质结和背接触技术, 日本 Kaneka 公司 HBC 电池效率达到创纪录的 26.33%[EB/OL]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_7165948f0102wtle.html, 2016-09.
- [66] Newman B K, Bende E E, Aken B B V, et al. Manipulating reverse current in 21% n-MWT cells[A]. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition[C]. Hamburg, Germany, 2015.
- [67] Clement F, Menkoe M, Kubera T, et al. Industrially feasible multi-crystalline metal wrap through (MWT) silicon solar cells exceeding 16% efficiency[J]. Solar energy materials and solar cells, 2009, 93: 1051 – 1055.
- [68] Clement F, Lutsch M, Kubera T, et al. Processing and

(转第 61 页)



式中, M_1 为苦咸水量, L。

根据相关数据可计算得到, 水的净化率 $\eta_w=79.54\%$ 。

3.3 净水装置的经济性分析

按实验搭建 1 m^2 的净水装置计算投资成本; 集热管的成本为 $4 \times 20=80$ 元, 支架成本为 100 元, 聚光槽为 60 元, 吸水面料为 40 元, 过滤材料为 50 元, 水箱为 150 元, 管路为 40 元, 总计为 520 元。当多台净水装置共同使用时可采用共用水箱、过滤装置等, 以降低投资成本。

吸水面料 1 年更换一次, 产水成本为 5 元/t, 接近大型反渗透法净化苦咸水成本, 但该装置初始投资低, 建设周期短, 维护简单。因此本装置具有较高的实用价值与良好的经济性。

4 结论

本文对现有的真空集热管使用方式进行了改进, 设计制造了一种多效太阳能膜蒸发净水器装置, 以太阳能作为唯一能量来源, 利用膜蒸发的方式达到净化苦咸水的目的, 降低了成本, 并增加了太阳辐射的吸收效率。该装置采用双层净化的方式, 使用第一次蒸发出的水蒸气的余热给第二层的苦咸水水膜加热, 同时第二层的苦咸水水膜起到水冷壁的作用, 大幅提高了装置的能源利用率; 并采用了具有特殊结构的吸收材料, 可以将脏水扩散在最外面, 有效提高了苦咸水的蒸发

(接第 32 页)

comprehensive characterisation of screen-printed mc-Si Metal Wrap Through (MWT) solar cells[A]. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference[C]. Milano, 2007.

[69] Clement F, Menkoe M, Erath D, et al. High throughput via-metallization technique for multi-crystalline metal wrap through (MWT) silicon solar cells exceeding 16% efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2010, 94: 51 - 56.

[70] Guillemin N, Heurtault B J B, Geerligs L J, et al. Development towards 20% efficient Si MWT solar cells for low-cost industrial production[J]. Energy Procedia, 2011, 8: 9 - 16.

[71] Inomata Y, Fukui K, Shirasawa K. Surface texturing of large area multicrystalline silicon solar cells using reactive ion

速率。

通过实验可以看出, 该装置完美实现了净化目标, 且净水能力很强, 完全可满足人们日常饮水的需求。

参考文献

[1] Zhang X L, Wang R H, Huo M L, et al. A study of the role played by renewable energies in China's sustainable energy supply[J]. Energy, 2010, 35(11): 4392 - 4399.

[2] 吕勇军, 鞠振河. 太阳能应用检测与控制技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2013.

[3] 常泽辉, 于苗苗, 郑子行, 等. 横管式太阳能苦咸水淡化装置产水性能研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(2): 505 - 510.

[4] 郭晓龄, 黄肖容, 邓尧. 海水淡化技术现状及展望[J]. 当代化工, 2012, (9): 964 - 966.

[5] 刘昌明, 陈志凯. 中国水资源现状评价和供需发展趋势分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.

[6] 李明春. 板式海水淡化传热传质特性模拟及试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.

[7] 贾柠泽, 侯静, 常泽辉, 等. 多效管式太阳能苦咸水淡化装置热质传递强化研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(7): 978 - 983.

[8] 于苗苗. 聚光管式太阳能苦咸水淡化系统性能研究[D]. 内蒙古: 内蒙古工业大学, 2017.

[9] Yin Z, Harding G L. "Water-in-glass" manifolds for heat extraction from evacuated solar collector tubes[J]. Solar Energy, 1984, 32(2): 223 - 230.

[10] Harding G L, Yin Z, Mackey D. Heat extraction efficiency of a concentric glass tubular evacuated collector[J]. Solar Energy, 1985, 35(1): 71 - 80.

[11] 叶鸿烈, 杨军伟, 王飞, 等. 聚光直热式加湿除湿型太阳能海水淡化装置性能测试与经济性分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(2): 505 - 512.

[12] 赖特明, 方建慧, 邓英, 等. 纳滤膜处理崇明岛苦咸水中试研究[J]. 盐业与化工, 2009, 38(2): 17 - 20. 太阳能

etching method[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997, 48: 237 - 242.

[72] Yoo J, Yu G, Yi J. Large-area multicrystalline silicon solar cell fabrication using reactive ion etching (RIE)[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2011, 95: 2 - 6.

[73] Kumaai A. Texturization using metal catalyst wet chemical etching for multicrystalline diamond wire sawn wafer[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 133: 216 - 222.

[74] Cao F, Chen K, Zhang J, et al. Next-generation multicrystalline silicon solar cells: Diamond-wire sawing, nano-texture and high efficiency[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2015, 141: 132 - 138. 太阳能