

# 高效太阳能电池技术及其核心装备国产化进展

郑达敏<sup>1,2</sup>, 赵增超<sup>1,2,3</sup>, 刘舟<sup>1,3</sup>, 文建峰<sup>1</sup>, 周翠<sup>1</sup>

(1. 湖南红太阳光电科技有限公司, 湖南长沙 410000; 2. 国家光伏装备工程技术中心, 湖南长沙 410000;

3. 中国电子科技集团第四十八研究所, 湖南长沙 410000)

**[摘要]** 当前主流太阳能电池——钝化发射极背面接触(Passivated emitter and rear contact, PERC)太阳能电池的量产效率已达 23%, 但接近理论上限。以隧穿氧化钝化(Tunnel oxide passivated contact, TOPCon)、异质结(Hetero Junction Technology, HJT)太阳能电池为代表的高效太阳能电池因其效率高, 必将取代 PERC 电池成为市场主流。然而, 当前高效电池核心装备大部分仍是进口, 因其价格昂贵, 直接阻碍了我国新一代光伏技术发展。为了解决这个问题, 国内装备厂商做了大量工作, 已提出针对不同工艺的成套装备解决方案。本文分析了两种高效太阳能电池的特点及工艺, 针对工艺核心环节的需求, 介绍了两种电池工艺核心装备的国产化进展, 并指出相关装备的未来发展趋势。

**[关键词]** 太阳能电池; 高转换效率; 光伏装备

**[中图分类号]** TM914.4

**[文献标志码]** B

**[文章编号]** 1003-8884(2021)05-0078-05

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2021.05.017

## 0 引言

为了实现“碳达峰、碳中和”目标, 光伏发电不仅要大幅增加产业规模, 更要持续降低发电成本<sup>[1]</sup>。过去十年间, 光伏发电度电成本已经从 0.378 \$/kW·h, 降至 0.06 \$/kW·h 以下, 降幅达 82%<sup>[2]</sup>。这主要得益于光伏电池的效率提升, 相关测算表明, 太阳能电池效率提升 1%, 促使光伏发电成本下降 7% 以上。当前主流的太阳能电池——钝化发射极及背接触(Passivated emitter and rear contact, PERC)电池的量产效率已可达 22.8%<sup>[3]</sup>, 但其已接近瓶颈效率 23.2%<sup>[4]</sup>。未来 10 年内, 以隧穿氧化层钝化接触(Tunnel oxide passivated contact, TOPCon)电池和异质结(Hetero Junction Technology, HJT)电池为代表的高效率太阳能电池将取代 PERC 电池成为市场主流<sup>[5]</sup>。

## 1 高效 TOPCon 电池与技术

### 1.1 TOPCon 电池

基于 N 型硅衬底的 TOPCon 太阳电池, 其结构具有高质量表面钝化(低复合电流密度)的异质结表面场, 避免了金属电极与硅片直接接触所造成的接触区复合, 故可实现效率提升。TOPCon 电池的极限理论效率可达到 26.6%<sup>[6]</sup>, 而从目前 TOPCon 量产的情况看, 最高效率难以达到 25%, 存在提升空间。

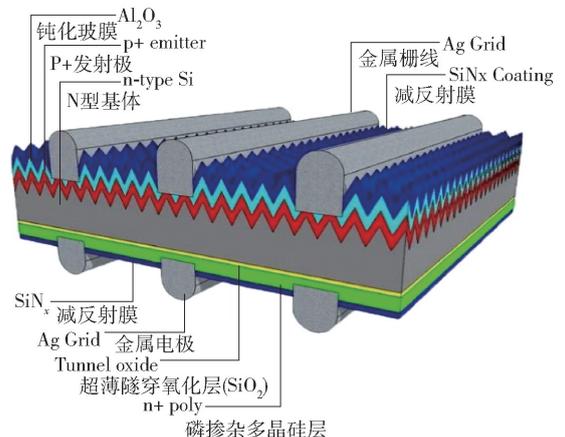


图 1 TOPCon 电池结构示意图<sup>[7]</sup>

相比 PERC 电池, TOPCon 电池还具备以下优

**[收稿日期]** 2021-06-02

**[作者简介]** 郑达敏(1989-), 男, 湖南永州人, 工程师, 硕士, 主要从事高效光伏电池工艺及装备发展研究工作, 现任湖南红太阳光电科技公司科技与规划部主任。

**[基金项目]** 云南省重大科技专项(2019ZE007)

**[引用格式]** 郑达敏, 赵增超, 刘舟, 等. 高效太阳能电池技术及其核心装备国产化进展[J]. 有色设备, 2021, 35(5): 78-82.

点：

(1) 电池的衬底为 N 型硅, 其光致衰减效应接近于零;

(2) 电池基体少子寿命高, 其弱光响应好, 辐照强度低于  $400 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  仍可发电;

(3) 如图 1 所示, 电池为双面结构, 在任何角度都可以增加光吸收, 且背面转换效率可达到正面的 85% 以上。

## 1.2 TOPCon 电池工艺

TOPCon 是一种新型钝化接触技术, 该技术在电池表面使用一层超薄的氧化层和掺杂的薄膜硅进行钝化。同时, 超薄氧化硅减少了表面态保持了较低的隧穿电阻, 掺杂薄膜硅提供了场致钝化并对载流子选择性透过, 与硅基底形成良好的钝化接触。如图 2 所示, 当前主流的 TOPCon 技术由清洗制绒、硼扩散、湿法刻蚀、 $\text{SiO}_x$ /非晶硅膜沉积、P 扩散/高温晶化、正面  $\text{AlO}_x/\text{SiN}_x$  沉积、背面  $\text{SiN}_x$  沉积、丝印烧结等工序组成。



图 2 TOPCon 电池工艺路线

与传统 PERC 电池工艺相比, TOPCon 工艺增加了硼扩散与接触钝化层 ( $\text{SiO}_x$ /非晶硅膜) 沉积两个环节。硼扩散工艺可通过扩散炉实现, 常用气源为  $\text{BBr}_3$ , 通过低压方式扩散进入衬底材料当中。接触钝化层制备有 LPCVD/PECVD/PEALD 等技术路线, 其中 LPCVD 工艺最为成熟, 成为目前市场主流。LPCVD 制备多晶硅膜结合传统的全扩散工艺。该工艺使用 LPCVD 制备背表面  $\text{SiO}_2$  膜并制备多晶

硅膜。先使用 LPCVD 制备  $\text{SiO}_2$  膜, 然后在  $600 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$  的温度制备本征非晶硅膜<sup>[8]</sup>。然而, 受这两项环节的扩散炉与多晶硅沉积装备的影响, 电池载流子传输与钝化性能仍有待提升, 导致其量产效率与实验室效率相差 2% 以上。

## 2 高效 HJT 太阳电池与制造工艺

### 2.1 HJT 太阳电池

HJT 太阳电池是一种利用晶体硅基板和非晶硅薄膜制成的混合型太阳电池。其结构由 n 型单晶衬底、光照侧 p-i 型氢化非晶硅层 (膜厚  $5 \sim 10 \text{ nm}$ )、背面侧 i-n 型氢化非晶硅层 (膜厚  $5 \sim 10 \text{ nm}$ ) 以及两侧透明电极和集电极构成具有对称结构。非晶硅钝化的对称结构可以获得较低的表面复合速率使得 HJT 电池可以获得更高效率。目前, HJT 电池的实验室最高效率为 25.7%<sup>[9]</sup>, 国内以通威为代表的 HJT 量产电池片平均效率达到 24.3%。

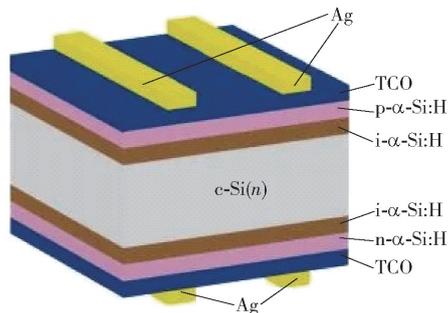


图 3 HJT 电池结构示意图<sup>[10]</sup>

同样相比 PERC 太阳电池, HJT 电池具备以下优点:

(1) 更高的双面率。如图 3 所示, HJT 电池由于其独特的双面对称结构使其更易于制作成双面电池组件, 目前双面率已突破 90%。

(2) 更低的衰减。HJT 电池不会出现硼氧复合因子从根本上避免了初始光衰的现象。

(3) 更优秀的温度系数。HJT 组件的温度系数为  $-0.23\%$ , 使得 HJT 组件可以在同等环境下有更加优异的发电表现。

(4) 更大的降成本潜力。HJT 电池加工温度低, 可以使用更薄的硅片 ( $\leq 100 \mu\text{m}$ ), 工艺步骤也更为简便, 制造成本具备很大下降空间。

### 2.2 HJT 电池工艺

HJT 电池加工温度低, 可以使用更薄的硅片 ( $\leq$

100 μm), 制造成本具备很大下降空间。如图 4 所示, 其工艺步骤也更为简便, 只有四步: (1) N 型硅片通过优化硅的表面织构。(2) 通过 PECVD 在晶硅表面沉积 i/p 非晶硅和 i/n 非晶硅。(3) 通过溅射技术在电池两面沉积透明 ITO。(4) 通过丝网印刷技术在 ITO 上制作银电极<sup>[11]</sup>。

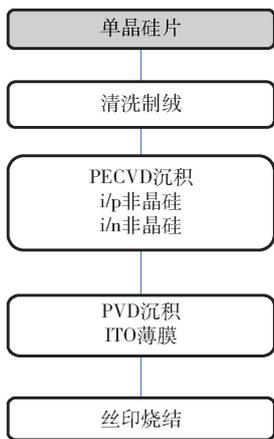


图 4 HJT 电池工艺路线

由于 HJT 电池是晶体硅和非晶硅相结合的异质结构, 其制约着电池效率的提升难点在于: (1) 制备高品质纳米级非晶硅基薄膜材料的设计与生长; (2) 大面积低损伤高品质 ITO 薄膜的均匀生长。

就 ITO 薄膜制备工艺而言, 存在磁控溅射(基于 PVD 的沉积技术)和离子反应镀膜(RPD)两种工

艺路线, RPD 装备产能低售价高, 且受到专利限制(目前专利权为日本住友拥有), 而 PVD 溅射镀膜膜厚均匀易控制, 镀膜工艺稳定可控, 工艺重复性较好, 靶材寿命较长, 适合连续生产, 行业普遍认可 PVD 是主流技术。针对异质结非晶硅薄膜沉积也主要有两种工艺方法: 等离子体增强化学的气相沉积法(PECVD)与热丝化学气相沉积(HWCVD), 前者是目前非晶硅薄膜沉积环节主流技术, 工艺成熟度较高; 后者具备更好的钝化效果, 但装备维护成本高, 因此目前产业应用相对较少。

### 3 TOPCon 电池技术核心装备

#### 3.1 硼扩散炉

扩散炉<sup>[12]</sup>是半导体加工中的热处理装备, 已经广泛应用于集成电路、分立器件、太阳能光伏行业中的扩散、氧化工艺, 特别适用于对结深和均匀性指标要求高的场合。低压扩散是太阳能光伏生产中关键环节, 低压扩散炉装备的性能直接影响电池的效率 and 产能。低压硼扩散工作时, 液态或气态硼源经载气携带进入高温低压环境下石英管中, 在硅片表面与硅反应生成硼原子, 硼原子扩散进入硅片, 形成 PN 结。目前, 国际先进低压扩散主要集中于欧洲少数几家公司, 与欧美等发达国家相比, 我国低压硼扩散炉技术研究起步比较晚, 对比低压扩散炉的关键参数如图 1 所示。

表 1 硼扩散炉关键参数

参数指标	国产装备	进口装备
基片尺寸	最大兼容尺寸 210 × 210 mm	最大兼容尺寸 230 × 230 mm
单管装片量	1 200 ~ 1 600 片/管	1 200 片/管
温控范围	600 ~ 1 100 °C	400 ~ 1 100 °C, 最高 1 250 °C
方阻均匀性	片内 ≤ 6%, 片间/批间 ≤ 5%	片内/片间 5%, 批间 4%
碎片率	≤ 0.05%	≤ 0.05%
Uptime	≥ 98%	≥ 98.5%

对比进口装备来看, 国产装备的产能有优势, 但装备性能方面存在问题, 如方阻均匀性较低、装备正常运行时间低等问题, 一定程度上影响了电池片的效率及方阻均匀性。除此之外, 国产设备在实际生产当中易出现石英件易粘连的问题。随着 TOPCon 电池的推广应用, 国内光伏装备仍需突破高温真空

密封技术、快速回温控制技术、高精度温度控制技术、压力精确控制技术、尾气防腐处理技术、自动控制技术、自动上下料及自动传输等硼扩散技术, 以提升设备的性能。

#### 3.2 LPCVD 装备

低压化学气相淀积装备<sup>[13]</sup> (Low Pressure

Chemical Vapor Deposition, LPCVD) 是 TOPCon 电池制备多晶硅薄膜的关键装备。由于其制备的薄膜具有质量优异、均匀性好、产量高的特点,广泛应用于微电子等行业中氧化硅、氮化硅和多晶硅等薄膜的制备。目前工艺装备现阶段却仅有 Tempress、Cen-

trothem、Semco、P-Tech 等国外装备厂商研发并推出了 TOPCon 电池用量产型 LPCVD 装备,国内 LPCVD 装备尚处于不成熟阶段,随着晶硅电池技术不断升级换代,LPCVD 装备具有巨大的市场潜力。对比 LPCVD 装备的关键参数如表 2 所示。

表 2 LPCVD 装备关键参数

参数指标	国产装备	进口装备
成膜种类	a-Si、p-Si、SiO <sub>x</sub>	a-Si、p-Si、SiO <sub>x</sub>
单管装片量	1 600 片	1 200 片
碎片率	≤0.03%	≤0.03%
隧穿氧化层厚度	1 ~ 2 nm	1 ~ 2 nm
本征非晶硅要求	厚度:150 nm 和 250 nm;片内均匀性:≤6%; 片间均匀性:≤5%;批间均匀性:≤5%	厚度:150 nm 和 250 nm;片内均匀性:≤3%; 片间均匀性:≤4%;批间均匀性:≤3%
Uptime	≥98%	≥98.5%

对比进口装备来看,国产装备虽然产能大,但稳定性与工艺水平不如进口装备。仍存在低压工艺难以控制,成膜均匀性不高,影响了太阳能电池的效率、产能以及成本。不仅如此,国产 LPCVD 装备在运行过程中易产生非晶硅并附着在石英器件上,导致石英器件使用寿命降低、装备维护周期缩短。未来国产装备需攻克高温真空密封技术、高精度温度控制技术、压力精确控制技术、自动上下料及自动传动等技术,实现单管产能 2 000 片/管,本征非晶硅均匀性 5% 以内,提高国际市场上装备竞争力。

## 4 HJT 电池技术核心装备

### 4.1 PVD 装备

物理气相沉积装备<sup>[14]</sup> (Physical Vapor Deposition, PVD)。其膜厚均匀易控制,镀膜工艺稳定可控,工艺重复性较好,靶材寿命较长,适合连续生产,是 HJT 电池制备 ITO 薄膜沉积的关键装备。当前 PVD 装备以国外供应商为主,主要有 Von Ardenne、Meyer Burger、Singulus 等公司。Von Ardenne 目前开发了两种 ITO 薄膜沉积装备,产能高达 1 200 片硅片/h,适用于叠层太阳能电池处理。Meyer Burger 开发一个名为 HELiA PVD 应用 PVD 技术的 ITO 薄膜镀膜系统,可实现同时在硅片正面和背面实现薄膜沉积,旋转靶材的利用率、产量高和生产成本低,装备产能可达 3 000 片硅片/h。Singulus 公司研制了一种水平内联溅射装备,可以同时沉积在硅片的正

面和背面,不需要翻转硅片破坏真空环境,最大产能可达 5 200 片硅片/h。

表 3 PVD 装备关键参数

参数指标	国产装备	进口装备
成膜种类	ITO	ITO
碎片率	< 万分之五	< 万分之五
产能	8 000 片/h	6 000 片/h
靶材利用率	80%	82%
成膜均匀性	4.5%	4%
成膜厚度	正背面各 100 nm	正背面各 100 nm
Uptime	90%	92%

从国产装备来看,其性能参数与进口设备差异不大,基本均可在真空、无翻转的情况下实现双面薄膜沉积,多数装备还具备完善的自动化配套设施以及模块化结构,并搭载旋转靶提高靶材利用率,单台产能已实现较高水平,可见,产能提升并非 PVD 装备向上优化的瓶颈,努力方向在于改善 TCO 薄膜透光性、均匀性、传导性等指标进而提升电池转换效率。另一方面,PVD 主要采用 ITO 和 SCOT 靶材,靶材的选择决定了薄膜的光电特性,进而影响电池转换效率,随着靶材配方的探索改进,ITO 薄膜的光电性能亦有所提升,进一步改善电池转换效率。因此,未来设备随靶材的优化有望带动转换效率进一步提升。

## 4.2 PECVD 装备

等离子体增强化学气相沉积<sup>[15-16]</sup> (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition, PECVD)。将低压气体放电形成的等离子体应用于化学气相沉积,广泛用于半导体、光伏领域。在制备 HJT 电池过程中可实现非晶硅薄膜沉积。从技术路径上:板式 PECVD 是目前主流,管式 PECVD 具备潜力,板式 PECVD 的优势在于:技术最成熟,易实现大面积均匀性,材料缺陷态密度低;管式 PECVD 相比较板式 PECVD,其降低生产成本端有更大的下降空间。

当前 PECVD 装备仍以进口为主。国外厂商包括:梅耶博格、应用材料等,其中 Meyer Burger 通过优化等离子体技术,开发一种称为 S-Cube 等离子体技术,有助于实现极低污染和均匀沉积,装备产能达到 2 400 片硅片/h。

表 4 PECVD 装备关键参数

参数指标	国产装备	进口装备
成膜种类	本征非晶硅、 掺杂非晶硅	本征非晶硅、 掺杂非晶硅
产能	4 000 片/h	3 000 片/h
碎片率	<0.08%	<0.05%
成膜均匀性	≤6%	≤5%
射频功率稳定时间	≤0.5 s	≤0.5 s
基片温度及精度	100-300 ± 5℃	100-300 ± 3℃
Uptime	96%	98%

对比进口装备来看,国产装备在装备产能、成膜均匀性、装备有效运行时间等装备关键指标上存在差距。同时在预热、控温精度、清洗、传动方式等可能影响装备性能的因素上同样需持续挖潜,推动装备不断迭代。PECVD 装备未来的主要优化方向是在保证镀膜质量的同时提升装备产能,且硬件成本的增加幅度需尽可能小于产能提升幅度,从而达到降本的目标。

## 5 结论

当前,高效太阳能电池技术的发展受核心装备影响,电池效率有待提升。国产装备的性能与稳定性还不完全成熟,难以满足太阳能电池在效率、良率、产能方面的需求。对于硼扩散装备而言,方阻均匀性及装备产能等仍有待改进。对于沉积装备 LPCVD、

PECVD、PVD 而言,制备薄膜的均匀性和稳定性有待提升。因此,研制替代进口装备的高性价比国产化装备成为产业持续发展的必然选择。

### [参考文献]

- [1] 张侃. 碳中和背景下光伏新能源产业发展研究[J]. 现代商业,2021(9):47-49.
- [2] 周玉立,袁宏永. 国煤炭发电与光伏发电技术的经济性评估[J]. 技术经济与管理研究,2020(12):97-102.
- [3] 金艳梅,江华,强彦政,等. 中国光伏产业 2020 年回顾与 2021 年展望[J]. 太阳能,2021(4):2-11.
- [4] Martin A. Green, Ewan D. Dunlop, Jochen Hohl-Ebinger. Solar cell efficiency tables (version 56) [J]. PHOTOVOLTAICS, 2013, 3(4):1184-1191.
- [5] 杨振英,卢刚,郑璐,等. N 型背接触异质结太阳能电池概述[J]. 材料导报,2020,34(z1):19-21.
- [6] Richter A, Benick J, Feldman 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 Material and Solar Cells, 2017, 173:96-105.
- [7] 于波,史金超,李锋,等. n 型双面 TOPCon 太阳能电池钝化技术[J]. 半导体技术,2019,44(5):368-373.
- [8] 中国可再生能源学会光伏专业委员会. 2020 年中国光伏技术发展报告——晶体硅太阳能电池研究进展(4) [J]. 太阳能,2021(01):5-10.
- [9] 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 Material and Solar Cells, 2017, 173:37-42.
- [10] 谷士斌,张娟,任明冲,等. 硅异质结太阳能电池窗口层性能研究及高效电池制备[J]. 太阳能学报,2018(39):3069-3075.
- [11] 吕欣. TOPCon 型 N-PERT 双面太阳能电池工艺技术研究[D]. 西安:西安理工大学,2020.
- [12] 龙会跃,成秋云,周奇瑞,等. 一种 HJT 电池及其制备方法. 中国, CN110416328A [P]. 2019-11-05.
- [13] 魏巍. 基于 FPGA 的氧化扩散炉温度控制系统研究 [J]. 科学与信息化,2020(4):110-112.
- [14] 任攀魏,明蕊,武鹏科,等. 变温 LPCVD 沉积氮化硅薄膜的均匀性优化[J]. 微纳电子技术,2021(3):271-277.
- [15] 冷长志. 浅析 PVD 镀膜机装备的镀膜方式[J]. 价值工程,2021(15):123-124.
- [16] 王贵,梅赵环,刘苗,等. 板式 PECVD 装备维护后初期的生产品质提升方案[J]. 太阳能,2021(2):74-77.

(下转第 88 页)

## Problems Faced by Chinese Enterprises in the Construction of Smart Mines Overseas and Countermeasures

YANG Si-min, GAO Li-qiang, WANG Liang, LIU Wei

**Abstract:** The rapid development of computer technology, microelectronics technology, information technology and network technology is impelling Chinese companies to build smart mines overseas. At the same time, the construction of smart mines is becoming a critical way to improve the core competitiveness for the mining companies overseas. In view of the basic characteristics of overseas mines of Chinese-funded enterprises and the status quo of smart construction, the problems in the construction of overseas smart mines are elaborated and relevant countermeasures are proposed accordingly.

**Key words:** smart mines overseas; informationization; intelligentization; Belt and road initiative ▲

---

(上接第 82 页)

## Localization Progress of Chinese Efficient Solar Battery Technology and Its Core Equipment

ZHENG Da-min, ZHAO Zeng-chao, LIU Zhou, WEN Jian-feng

**Abstract:** The mass production efficiency of the mainstream solar battery (passivated emitter and rear contact, PERC solar battery) has reached 23%, approaching the upper limit of theoretical value. The efficient solar batteries, represented by tunnel oxide passivated contact (TOPCon) and hetero junction technology (HJT) batteries, will replace PERC batteries to become the mainstream of the market because of their high efficiency. However, most of the core equipment of efficient batteries are still imported currently and at high prices, the development of China's new generation photovoltaic technology is directly impeded. In order to solve this problem, Chinese equipment manufacturers have done a lot of work, and have proposed packaged equipment solutions for different processes. In this paper, the characteristics and technology of two kinds of efficient solar battery are analyzed. According to the requirements of the core process, the localization progress of the core equipment of the two kinds of solar battery is introduced, and the future development trend of the related equipment is pointed out.

**Key words:** Solar battery; high conversion efficiency; photovoltaic equipment ▲