

M5211-6-UM 型立式硼扩散设备研制

吴志明, 郭浩, 赵志然

(湖南红太阳光电科技有限公司, 湖南长沙 410111)

[摘要] M5211-6-UM 型立式硼扩散炉用于晶体硅太阳能电池片硼扩散工艺, 具有全自动化、高产能、低能耗、维护便捷等特点。本文介绍了该型号设备的结构组成及性能, 给出了能耗和工艺结果, 结果表明该设备各方面性能已达到国内领先水平, 具备产业化条件。

[关键词] 硼扩散; 石英舟; 方阻均匀性

[中图分类号] TM914.41 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2023)03-0021-04

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.03.004

0 引言

光伏产业正处于由 PERC 向 TOPcon 转型的快速调整期, 根据 PVInfoLink 的统计, TOPCon 的产能将在未来加速提升, 2022 年全行业产能有望超 40 GW, 预计到 2023 年底, 将达到接近 80 GW。TOPCon 的概念由德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 (Fraunhofer-ISE) 于 2013 年提出的, 是一种基于选择性载流子原理的隧穿氧化层钝化接触 (Tunnel Oxide Passivated Contact) 太阳能电池技术, 其电池结构为 N 型硅衬底电池, 在电池背面制备一层超薄氧化硅, 然后再沉积一层掺杂硅薄层, 二者共同形成了钝化接触结构, 有效降低表面复合和金属接触复合, 为电池转换效率进一步提升提供了更大的空间。

扩散炉是光伏电池生产工艺中的关键设备^[1], 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^[2]。湖南红太阳光电科技有限公司作为国内光伏装备研制单位, 致力于 PECVD、LPCVD、扩散、退火等异质结工艺装备的自主研制, 为光伏装备技术的发展做出了贡献。M5211-6-UM 型立式硼扩散设备较常

规卧式设备的主要优势在于工艺均匀性和低能耗, 是湖南红太阳光电科技有限公司研发的新一代高产能、低能耗的减压扩散工艺设备。

1 主要技术指标

M5211-6-UM 型立式硼扩散设备主要技术指标如下所述。

炉膛有效内径: $\Phi 350$ mm;

硅片尺寸: 兼容 182 mm \times 182 mm、210 mm \times 210 mm;

产能: 1 600 片/管;

温度控制范围: 400 ~ 1 100 $^{\circ}\text{C}$;

温控精度: $\leq \pm 0.5$ $^{\circ}\text{C}/2\ 400$ mm (801 ~ 1 100 $^{\circ}\text{C}$);

单点温度稳定性: $\leq \pm 0.5$ $^{\circ}\text{C}/24$ h (静态, 900 $^{\circ}\text{C}$ 时);

硅片每方块电阻均匀性: 片内 $\leq 5\%$, 片间 $\leq 4\%$, 批间 $\leq 4\%$;

设备尺寸: 6 800 mm \times 2 650 mm \times 6 100 mm。

2 减压硼扩散工艺原理

减压硼扩散工艺思路可分成以下几个阶段: 前氧化、预沉积、推进、后氧化, 均在低压环境下完成。减压扩散工艺流程为: ①关闭扩散炉炉门后, 抽气使石英管内压力达到设定值进行高温氧化, 在硅片表面生成一层很薄的 SiO_2 层, 形成掩膜增加均匀性; ②通入氮气和氧气, 采用三步扩散法制备 PN 结, 即第一步预沉积, 扩散温度维持在较低水平, 在硅片表面沉积一层粘稠的液态氧化硼, 分三步沉积可以使

[收稿日期] 2022-11-20

[第一作者] 吴志明 (1991—), 男, 湖南长沙人, 工程师, 硕士, 主要从事光伏装备研发与推广工作。

[引用格式] 吴志明, 郭浩, 赵志然. M5211-6-UM 型立式硼扩散设备研制[J]. 有色设备, 2023, 37(3): 21-24.

该液态氧化硼更加均匀;第二步推进,促进硼源的分解和向硅片内部的扩散;第三步后氧化,推进 PN 结深度、优化表面掺杂浓度。

3 设备主要结构及特点

M5211-6-UM 型立式硼扩散设备主要有下柜、炉体柜、气柜、电控柜、尾气处理柜五个部件组成,设备构成如图 1 所示。设备有以下四个主要特点。

1) 设备的自动化程度高,从进料到出料实现工艺全过程自动化。

2) 采用炉顶进气炉口抽气的方式,反应腔室竖直排布,有利于粉尘的外排,不会在反应腔体内造成堆积,提升洁净度。

3) 反应腔室内径 350 mm 可对应规格 210 mm × 210 mm 和 182 mm × 182 mm 及以下规格尺寸的硅片,反应腔室内径越小,温度场控制越均匀,有利于提高工艺方阻的均匀性。

4) 立式硼扩散采用无浆进舟,相比传统卧式设备减少了 SiC 浆的结构,能耗将会更低。



图 1 立式硼扩散设备布局图

3.1 下柜

该部件是立式硼扩散设备自动化程度最高的部分,主要包含了丝杠升降模组系统(如图 2 所示)和地轨机器人系统(如图 3 所示),其中丝杠模组升降系统主要包含丝杠模组和炉门组件,载满硅片的石英舟固定在炉门组件上,跟随丝杠模组进行上下运动,实现工艺前后的放料和取料动作;地轨机器人系统主要包含地轨和机器人两部分,机器人在地轨上可根据控制系统给出的信号进行往返运动,根据工艺需求对炉门组件进行载片石英舟的取放,及载片石英舟进出设备与自动化设备的对接。

3.2 上柜

该部件是 M5211-6-UM 型立式硼扩散炉的核

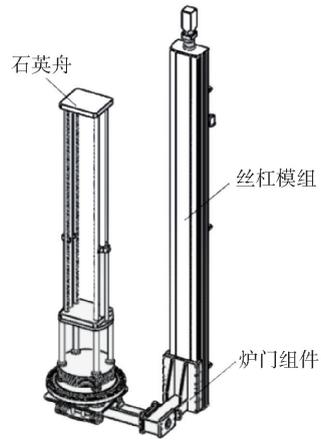


图 2 丝杠升降模组系统

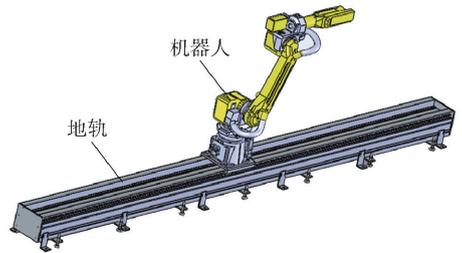


图 3 地轨机器人系统

心反应腔室(如图 6 所示),拥有 2 400 mm 的超长恒温区,采用六点内外热偶双回路控温方式,控温精度可达 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (400 ~ 1 100 $^{\circ}\text{C}$),为硼扩散工艺提供可控可靠的高温工艺环境。另外在高温低压的工作环境下,核心反应腔室采用炉口双水冷密封结构方式,密封圈使用寿命较常规卧式设备显著提升。

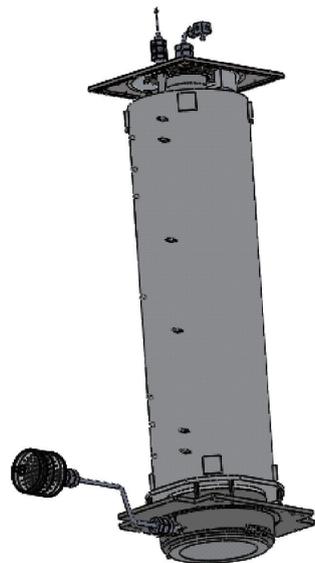


图 4 核心反应腔室

3.3 气柜

该部件由独立的计算机控制系统通过控制电磁阀、气动阀和对应的质量数字流量计控制,实现气路单管单控的功能,达到各个反应腔室独立控制的目标。其中三氯化硼作为工艺源气体,由于其特有的物理化学特性,采用独立的防爆控制气柜进行存储和控制供气。

4 关键技术

4.1 多舟堆叠的自动化取放技术

在立式硼扩散设备使用过程中,由于设备反应腔采用竖直布局的结构方式,当需要增长恒温区长度时,设备高度也对应不断增加,而反应腔恒温区的长度直接决定设备单次工艺的载片量和产能,采用传统的石英舟结构方式,恒温区加长对应的取舟空间也对应增加,高度问题将会严重制约设备产能,降低设备性价比。

M5211-6-UM 型立式硼扩散炉采用多舟堆叠技术,通过在炉口设置托舟装置(如图 6 所示),在一定的下料空间尺寸条件下,可实现长恒温区内多个小舟的依次取放,从而达到缩减设备高度的目的,具体执行过程如下所述。

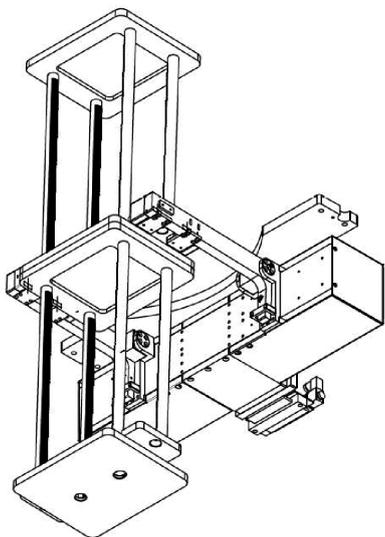


图 5 炉口托舟装置图

第一步,地轨机器人系统将一号石英舟搬运至丝杠升降模组系统的炉门上,丝杠升降模组系统将一号石英舟向上传送至核心反应腔室的预设位置,由托舟装置的对一号石英舟进行固定;第二步,丝杠升降模组系统的炉门运行至下位,地轨机器人系统将一号石英舟搬运至炉门上,丝杠升降模组系统将

二号石英舟搬运至核心反应腔室外的预设位置,叠舟装置松开对一号石英舟的夹持,实现两个石英舟的堆叠;第三步,由丝杠升降模组系统继续将两个堆叠在一起的石英舟传送至核心反应腔室内进行工艺,工艺结束后,由丝杠升降模组系统将堆叠在一起的两个石英舟向下运行至预设位置,利用托舟装置对二号石英舟进行夹持固定,丝杠升降模组系统的炉门继续向下运动至下柜中的预设位置,由地轨机器人系统将炉门上的一号石英舟搬离;第四步,炉门再次向上运动至核心反应腔室外的预设位置,托舟装置松开对一号石英舟的夹持,由丝杠升降模组系统将一号石英舟向下传送至下柜中的预设位置,由地轨机器人系统对其进行搬离。

4.2 高温环境下石英舟可靠性技术

硼扩散工艺过程复杂,具有洁净度要求高、温度高、持续时间长等特点,工艺过程最高温度可达 1 050 ℃,常规使用的石英舟原材料的物理软化温度约在 1 070 ℃。一方面长时间的高温工艺会导致石英舟发生形变,另一方面石英舟的堆叠结构方式,导致受力不均匀,会加速局部变形,而自动化上下料硅片及本身载片结构对石英舟的精度要求极高,因此石英舟的变形严重制约着其使用寿命。M5211-6-UM 型立式硼扩散炉通过采用石英舟托加小舟的结构方式,结合材料纯度的提高,实现了石英舟使用寿命的显著提升。

5 应用实例

5.1 能耗

通常将立式硼扩散设备的能耗分为升温 and 保温两部分,根据立式 1 600 pcs/管实验设备多次重复测试,发现在单次工艺过程中的能耗去向分布如图 7 所示,每次工艺能耗主要集中在保温过程中,约占总比的 80% 左右;其中升温能耗的主要元器件如下:石英件、炉体、硅片和工艺气体,在每次工艺过程中约占能耗的 20%。

针对立式硼扩散设备,根据炉体 81 kW 设计功率的分布,炉口至炉顶六个温区在 1 050 ℃ 保温过程中的电流输出比和功率如图 8 所示,其中温区二、三、四、五在 1 050 ℃ 保温过程中,电流输出比的下调空间和恒温区长度的缩减范围已经有限。炉口温区和炉顶温区的炉体设计功率合计为 13.7 kW,在工艺过程中 1 050 ℃ 的平均保温能耗合计约为 7.8

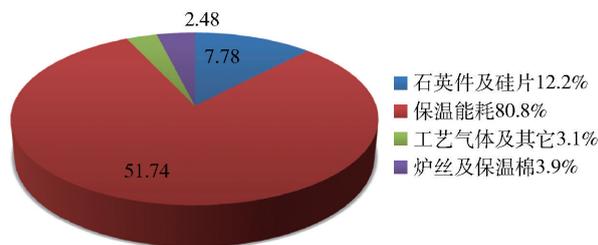


图6 立式1600 pcs/管设备单次工艺能耗分布(64 kW/h)

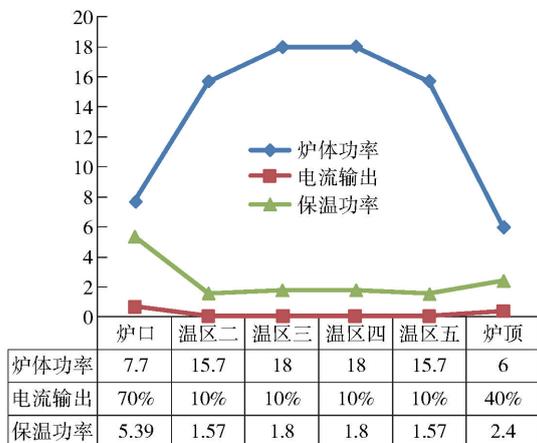


图7 炉体1050℃保温状态的能耗分布

kW,且炉口电流输出较大占比约为70%。

5.2 工艺均匀性

光伏电池工艺路线主要有 PERC、Topcon、HJT、IBC 等多条路线,其中 PERC 应用最广。PERC 分为常规低方阻工艺路线和高方阻 SE 工艺路线,高方阻 SE 工艺路线实现难度相对较大,但是电池效率更高。同理,后续当 Topcon 工艺路线突破硼扩散工艺温度过高及产线前后道等技术壁垒后,由红太阳研制的 M5211-6-UM 型立式硼扩散炉将具有良好

的市场前景。工艺结果实验测试情况如下,从表 1 可见立式扩散炉在高方阻工艺 300 Ω 的均匀性较好。

表 1 立式硼扩散炉方阻(Ω)及均匀性

位置	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4	测点 5	均匀性
炉口	289	312	297	286	281	5.3%
	298	325	326	302	297	4.6%
炉中	289	321	316	289	291	5.3%
	287	310	301	316	304	4.7%
炉顶	302	297	305	317	286	5.1%
方阻平均值					302	

6 结论

M5211-6-UM 型立式硼扩散炉是湖南红太阳光电公司研发的一款高产能立式硼扩散炉。该设备在公司实验室得到了性能验证,整机性能良好,各项技术指标均可达到当前卧式硼扩散设备指标,满足了客户对高产能、低能耗和扩散均匀性高的要求,且在高方阻工艺均匀性方面拥有潜在优势。

[参考文献]

- [1] 谢于柳. M5111-6-UM 型五管软着陆扩散炉研制[J]. 电子工业专用设备,2016(8):30-34.
- [2] 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+88.
- [3] 龙辉,赵志然,李明,等. 基于 BCl₃ 源的低压硼扩散设备及工艺研究[J]. 有色设备,2022,36(2):18-22+27.
- [4] 周佑丞,张春成,赵志然,等. 管式 PECVD 反应室流场仿真优化及应用研究[J]. 有色设备,2022,36(2):52-55.

Development of M5211-6-UM Vertical Boron Diffusion Equipment

WU Zhi-ming, GUO Hao, ZHAO Zhi-ran

Abstract: M5211-6-UM vertical boron diffusion furnace is used in boron diffusion process of crystalline silicon solar cells, which has the characteristics of full automation, high capacity, low energy consumption and convenient maintenance. This paper introduces the structure and performance of this type of equipment, and gives the energy consumption and process results. The results show that the equipment has reached the leading level in China and has the conditions for industrialization.

Key words: Boron diffusion; Quartz boat; Uniformity of square resistance

