

IBC 太阳能电池研究现状及发展趋势

屈小勇

青海黄河上游水电开发有限责任公司西安太阳能电力分公司 陕西 西安 710000

摘要：本文主要从高效晶硅太阳能电池产业化的角度深入分析 IBC 太阳能电池，重点介绍 IBC 太阳能电池的研究进展，阐述其电池结构特点和获得高转换效率的物理机制和制备工艺，并分析 IBC 太阳能电池与异质结电池技术和隧穿氧化钝化接触技术相结合形成 HBC 和 TBC 电池的优缺点和未来发展趋势。

关键词：IBC 太阳能电池；研究进展；HBC 太阳能电池；TBC 太阳能电池

1 IBC 太阳能电池

1.1 研究进展

IBC 太阳能电池于 20 世纪 70 年代由 Schwartz 首次提出，是最早研究的背结背接触电池，当时主要用于聚光系统。IBC 电池与其它太阳能电池结构差异较大，该电池将发射极和背表面场放置在电池的背面，且呈叉指状排列分布。其特点是：（1）电池正面没有金属栅线遮挡，可实现入射光子数的最大化，从而增加电池的短路电流密度；（2）电池正面没有金属栅线，不需要考虑正面的接触电阻问题，可以最大程度优化电池正面的陷光和表面钝化性能；（3）由于正负电极均位于电池背面，不需要过多考虑金属栅线的遮光问题，可以将金属栅线宽度适当增加，从而降低电池的串联电阻。因此，IBC 电池可以获得非常高的转换效率^[1]。

虽然 IBC 电池在当时的制造成本极高，但是这并没有让科学家放弃对 IBC 电池进行持续研究和工艺优化。1985 年，斯坦福大学光伏研究组的 Swanson 教授创立 SunPower 公司对高效背接触电池实现了商业化制造。经过斯坦福大学和 SunPower 公司的不断优化与改进，在 1996 年背接触电池获得了 23.2% 的效率。但由于采用光刻工艺，导致其生产成本过高，限制了它的应用。后续 SunPower 公司对 IBC 电池生产工艺进行简化，2002 年报道称 SunPower 减少了三分之一工艺步骤，制造成本下降了百分之三十，但是电池转换效率绝对值仅下降 0.6%。2004 年他们报道了采用点接触和丝网印刷技术研发出的第一代大面积（149cm²）电池 A-300，首次实现了商品化、大面积的在标准日照下效率达到 20% 以上的电池，最高达到 21.5%。

2007 年，SunPower 公司第二代 E 系列 IBC 电池量产平均效率达 22.4% 面积达 155cm²。同时硅片的厚度减薄到 160μm 用该背接触电池封装的组件平均效率达 19.3%，最高组件效率达 20.1%。2010 年，通过进一步优化减少复合损失 SunPower 公司第三代 X 系列电池量产，平均效率达 23.0%，在其菲律宾工厂实现了最高转换效率达 24.2%^[2] 的 IBC 电池。截止 2021 年，SunPower 公司的 IBC 电池已经发展到第六代，电池量产转换效率已经达到 24.5%。从 SunPower 官网展示的最新信息来看，其最新一代 IBC 电池已吸收了 TOPCon 电池钝化接触的技术优点，加入了隧穿氧化层与多晶硅的复合钝化结构，并保留铜电极工艺；从电池结构来看，量产工艺已经简化，成本在可接受范围，平均的转换效率可以达到 25%，第七代电池有望将平均转换效率提高到 26% 的水平。

与此同时，其他研究单位也在不断进行背结背接触电池的

开发。德国 ISC 研究所将其制备的 IBC 电池成为“ZEBRA”，该电池未使用光刻技术，而采用常规的丝网印刷技术，在大面积（239cm²）n 型单晶硅片上获得了 21% 的转换效率。德国 ISFH 研究所开发的 RISE（rear interdigitated contact scheme, metalized by a single evaporation）电池用 p 型 Fz-Si 作衬底，不使用掩膜工艺，而使用激光烧蚀形成交叉排列的两个台阶区域、背面单步铝蒸发工艺制作电极，面积为 4 cm² 的电池效率达 22%，并且可以用于大面积电池制作。2019 年，国内的天合光能公司在 IBC 太阳能电池的制造过程中引入了钝化接触技术，在 6 英寸面积上制备出了 IBC 电池，其转换效率达到 25%。2019 年 12 月，国家电投集团太阳能电力公司率先建成国内第一家量产 IBC 电池和组件的生产线，该电池暂未应用钝化接触技术，其量产平均转换效率达到 23% 以上，截止 2022 年 6 月，该电池量产平均转换效率已经突破 24.3%^[3]。

1.2 制备工艺

较之传统太阳能电池，IBC 电池的工艺流程要复杂得多。IBC 电池工艺的关键问题，是如何在电池背面制备出呈叉指状间隔排列的 P 区和 N 区，以及在其上面分别形成金属电极。随着技术的不断进步，目前已经有成熟的丝网印刷工艺和图形化工艺可以完全取代光刻工艺技术，大幅缩短工艺流程和生产成本，制备工艺流程为：（1）去损伤层，通常采用高浓度的 KOH（体积分数：20%~22%）对硅片表面进行腐蚀抛光。（2）磷扩散，在硅片背表面高温磷扩散形成背表面场（BSF）。（3）氮化硅掩膜+激光刻蚀，通常可以采用 PECVD 沉积氮化硅作为掩膜层，再使用激光刻蚀的方法，按照设计好的图形刻蚀需要形成发射极的掩膜区。（4）清洗制绒，制绒去除硅片正面的磷硅玻璃层和背面激光刻蚀处的损伤层，在硅片表面和刻蚀出得到绒面结构，增加硅片表面的陷光效果。（5）硼扩散，激光刻蚀区域通过高温硼扩散制备出发射极，在前表面形成浮动发射极结构。（6）硼硅玻璃去除，硼扩散后通常需要经过 HF 溶液清洗去除硼硅玻璃。（7）双面沉积氧化铝+氮化硅膜，Al₂O₃ 薄膜因带有固定负电荷，常用于 p 型硅表面，形成良好的钝化效果，而在掺杂的 n 型硅上面一般会产生产副作用，但在该工艺流程中，n 型的背表面场上方有氮化硅掩膜保护，因此双面沉积氧化铝并不影响背表面场的钝化性能，可以大幅度提升电池发射极和正面的钝化性能。使用管式 PECVD 设备可双面沉积氮化硅形成减反射层。（9）丝网印刷制备电极。（10）对电池片进行效率测试和外观检查并分档。

2 基于IBC电池结构的晶体硅电池

从目前 IBC 电池发展趋势来看,仅基于 IBC 电池结构进行转换效率提升可以考虑:(1)优化背电极接触区域,降低接触电阻;(2)使用体寿命较高的 n 型硅片作为基体,对其前后表面制备良好的钝化层,保持较高的少子寿命。但这些提效空间有限。大幅度提升电池转换效率需要同时提升电池的开路电压、短路电流密度和填充因子,因此对于 IBC 电池来讲,主要是从开路电压和填充因子处入手,就现有晶硅电池技术而言,将与 TOPCon 钝化技术与 IBC 电池结构相结合形成 TBC 太阳能电池,或者与 HJT 钝化技术与 IBC 电池结构相结合开发出 HBC 太阳能电池无疑是最佳选择。

2.1 IBC+HJT (HBC) 太阳能电池

从图 2 松下公司的 HBC 电池结构来看,在基于 N 型单晶硅片正面依次沉积氢化非晶硅(a-Si:H)薄膜作为正面钝化层,并采用 SiNx 减反射层取代透明的 TCO 导电膜,光学损失更少、成本更低;在硅片背面,依次沉积氢化非晶硅(a-Si:H)背钝化层,以及钝化层上呈叉指状分布的 p-a-Si:H 层和 n-a-Si:H 层,分别作为发射极和 BSF,二者中间设置隔离区。同时,在发射极和 BSF 上再沉积透明导电薄膜,并制备金属电极。目前 HBC 电池也已取得较好的研发进展,HBC 电池主要是由日本钟渊化学 Kaneka 在推动,已取得较好的研发进展,2017 年日本化学公司和太阳能电池制造商 Kaneka 通过背接触异质结技术实现的最高效率 26.63%^[4]。

HBC 电池获得高转换效率的原因在于:(1)采用 a-Si:H 作为双面钝化层,在背面形成局部 a-Si/c-Si 异质结结构,基于高质量的非晶硅钝化,获得较高的开路电压,充分吸收了 HJT 电池钝化技术的优点。(2)采用 IBC 电池结构,前表面无遮光损失,从而拥有较高的短路电流密度。基于二者结合后的电池结构,HBC 电池工艺流程与 HJT 电池存在部分兼容,其核心工序主要为制绒、非晶硅薄膜沉积、TCO 膜沉积和电极金属化 4 道工序。与 HJT 电池工序流程相比,HBC 电池工艺流程的差异主要体现在如何实现背面叉指状的不同掺杂区域,以及背面金属电极的制作。

HBC 电池在继承了两者的优点的同时,也保留了 IBC 和 HJT 电池各自生产工艺的难点:(1)投资成本高;(2)本征和掺杂非晶硅镀膜工艺,工艺窗口非常窄,对工艺清洁度要求极高;(3)需要低温组件封装工艺;(4)制程复杂;正负电极都处于背表面,需要严格的电极隔离工艺;(5)双面率低,HBC 电流的导入设计中 HJT 引入了 IBC 的工艺,造成了双面率的损失,一般只做单面电池。

按照目前 PECVD、PVD、湿法设备和金属化设备等设备的成熟度,经典 HBC 电池工艺已经走得通,但生产成本会比较。HBC 电池的规模量产,还需要低成本的工艺方案,特别是低成本的 PN 区掺杂方案。业内在探索低成本 PN 区掺杂工艺,并在以下几个方向有了积极的成果:(1)简化工艺,缩短制程,减少工艺设备。关键在于减少制备背面 PN 区的工序;(2)选用更低成本的非晶硅沉积设备。比如选用 HWCVD 或 LPCVD,或板式 PECVD 进一步降本;(3)选用更低成本的 TCO 膜和靶材。比如选用 AZO 或其他低成本 TCO 膜;(4)选用更低成本的金属电极工艺。如采用铜电极工艺,或配合微晶工艺采用中高温银浆方案。

2.2 IBC+TOPCon (TBC) 太阳能电池

TBC 电池是将 TOPCon 的钝化接触技术与 IBC 电池结构相

结合,对传统 IBC 电池的背面钝化结构进行优化设计。在硅片背面沉积一层超薄隧穿氧化层 SiO₂,并制备间隔排列的 p 型 poly-Si 和 n 型 poly-Si 作为发射极和 BSF,最后在制备金属电极与掺杂多晶硅层形成接触。TBC 电池特点有:(1)兼容 IBC 电池结构制作工艺;(2)高温制程,工艺接近成熟、成本低;(3)采用 TOPCon 技术,可获得优异的钝化效果和接触性能;(4)常规丝网印刷工艺,无主栅或多主栅;(5)兼容部分 TOPCon 工序。

TBC 电池部分工艺步骤与 IBC 电池兼容,核心工艺在于如何制备叉指状排列的 p 型掺杂多晶硅和 n 型掺杂多晶硅区域,并在二者之间形成隔离区,以及背面金属电极的制作。目前公开报道的 TBC 电池的工艺流程为:(1)对硅片进行去损伤、制绒、清洗和背抛光处理。(2)在硅片背面沉积隧穿氧化层,以及隧穿层上的硼掺杂的 poly 层,沉积工艺可以采用 PECVD 原位掺杂、LPCVD 或者 PVD 等方式。(3)沉积掩膜层,利用激光刻蚀等方式去除 BSF 区域和隔离区(gap)区域覆盖的掩膜层以及此前沉积的 p 型 poly Si 层,再沉积磷掺杂的 n 型 poly Si 层。在沉积 p 型 poly Si 和 n 型 poly Si 环节中,由于需要二者之间需要形成 gap 区,因此会涉及多次掩膜和激光刻蚀等工艺的应用。(4)正、背面沉积以此 AlO_x 钝化层和 SiNx 减反射层。(5)进行对应区域的电极制作,可选择激光转印、丝网印刷、电镀等方式。

3 结束语

随着高价值光伏应用市场的蓬勃发展,既美观又高效率的 IBC 电池将作为 BIPV 和分布式屋顶市场的最佳选择,越来越受欢迎。阻碍 IBC 电池技术发展的高成本问题,也已经逐渐被新工艺化解。当 IBC 电池的成本被市场和用户所接受,转换效率提升将是需要重点解决的问题。叠加目前最为成熟的异质结钝化技术和隧穿氧化钝化接触技术必然可以最大化发挥 IBC 电池的结构优势,同时提升电池的开路电压、短路电流密度和填充因子,使电池转换效率得到跨越式的提升。然而最终是与只能低温工艺制备的 HJT 电池相结合形成 HBC 电池,还是与兼容高温工艺的 TOPCon 电池相结合形成 TBC 电池,这需要整个行业所有研究人员共同努力。总之,IBC 电池产业化在接下来的几年里必将得到高速发展。

参考文献

- [1] 陈俊帆,赵生盛,高天, et al. High-efficiency Monocrystalline Silicon Solar Cells: Development Trends and Prospects[J]. 材料导报, 2019, 033(001): 110-116.
- [2] Cousins P J Smith D D, Luan H C, et al. Generation 3: Improved performance at lower cost[C]. Proceedings of the 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, HIUSA, 2010: 275-278.
- [3] 高嘉庆,郭永刚,屈小勇,吴翔,张天杰,张博,刘洪东.n 型 IBC 太阳能电池选择性发射极工艺研究[J].人工晶体学报, 2022, 51(11): 1929-1935.
- [4] Kunta Yoshikawa, Wataru Yoshida, Toru Irie, et al. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2017, 173, 37.