

不同类型硅片对电池电性能的影响研究

杨爱静, 屈小勇, 李跃恒

(青海黄河上游水电开发有限责任公司 西宁太阳能电力分公司, 青海 西宁 810000)

摘要: 全球光伏能源需求持续增长, 世界各主要区域的能源政策环境趋于利好, 世界范围内潜在的能源危机可能带给新能源远超行业预期的发展机遇, 足以使业界振奋, 各企业翘首以盼, 但机遇往往与挑战并存。2022年光伏产业产能保持快速扩张趋势, 但是仍然面临上游硅料环节供需错配的问题, 而且短期内无法解决。在高价硅料压力下, 中端电池制造企业就需要想办法降低过程制造成本。本文通过研究不同厚度硅片的电性能、P型掺镓硅片及N型硅片在不同工艺里的应用及电性能情况, 希望能在降低电池片端的制造成本、根据不同的电池工艺选择合适硅片性能等方面为行业提供参考。

关键词: P型掺镓硅片; N型硅片; 硅片厚度; 电性能

中图分类号: TM914.41

文献标识码: A

DOI: 10.12230/j.issn.2095-6657.2022.32.045

原本稳定的光伏硅片厚度快速减薄, 目前行业内普遍使用的是 $150\mu\text{m}$ 厚的硅片, 未来可能会是 $130\mu\text{m}$ 。技术选型中主要的考虑是成本问题。

光照引起的晶体硅电池光衰一般主要有三类: 一是硼氧复合体光衰 BO-LID; 二是高温引起的辅助衰减 LeTID; 三是紫外线引起的表面钝化衰减 UVID。在温度较低时, 硼氧复合体的光衰是掺硼 p 型 PERC 电池的主要初始光衰机制, 即 P 型单晶电池如果使用掺硼硅片制作, BO-LID 将是引起单晶电池初始光衰的主要原因。单晶硅电池进入 PERC 时代后, BO-LID 的影响更加明显。PERC 电池使用背钝化技术, 长波段入射光子的有效吸收增加, 将电池效率在铝背场电池结构上提升了约 1% 以上。然而电池背面产生的光生少数载流子 (电子) 想被正面的 pn 结有效分离并被电极收集, 需经历较远的路径才可以。因此, 虽然背钝化使 PERC 的效率大幅提升, 却由于硅片本身的 BO-LID, 使电池的初始光衰增大到了 5% 以上, 因此, 多种技术方案均被尝试应用到 BO-LID 的降低上。显然, 降低硼含量会降低 PERC 电池的效率, 而降低氧含量的技术会使硅片成本增加。另外, 使用掺镓硅片可以解决光衰问题, 掺镓硅片替代掺硼硅片之后, 基本彻底地解决了硼氧复合对的问题, 几乎能够完全抑制光衰, 其在高效电池上具备很大的应用潜力^[1]。

Si 具有正四面体金刚石型晶体结构, 晶体硅是间接带隙半导体, 其带隙为 1.12eV , 接近最佳带隙 1.4eV , 通过模拟计算可知, 晶体硅太阳能电池的理论转换效率极限为 29%, 晶体硅的折射率为 3.4, 如果不做任何处理, 40% 的入射可见光将在前表面发生反射。为了使晶硅具有不同的导电类型, 还需对其进行掺杂, 例如掺入 B 或镓形成 P 型硅, 掺入 P 形成 N 型硅^[2]。

硅片分为晶硅类和非晶硅类, 其中晶硅类硅片又可以分为

单晶硅片和多晶硅片, 单晶硅片分为 P 型和 N 型两种类型。P 型硅片目前以掺镓硅片为主, N 型硅片各家工艺不同, 所需硅片性能不同。硅片是太阳能电池片的基体, 它的质量能体现太阳能电池片转换效率的高低。

1 实验部分及结果讨论

1.1 P 型掺镓硅片不同电阻率的电性能影响

光致衰减 (Light Induced Degradation) 指太阳电池的电性能在持续光照下衰减直至稳定的现象, 由于光照会使替位硼和间隙氧形成硼氧复合体, 使少子产生较强的复合, 导致了电池整体性能下降。为抑制或降低 LID 现象, 可在加热条件下对电池进行高光强照射, B-O 缺陷会由具有复合活性的“降级态”转变为丧失复合活性的“复原态”, 对少子寿命的衰减基本可以完全恢复, 同时通过使用掺镓元素代替掺硼元素, 可以有效降低 LID 效应, 此方法已经普遍应用于 P 型电池制作中。

(1) 实验目的

通过掺镓替代掺硼, 彻底地解决了硼氧复合对的问题, 几乎可以完全抑制光衰, 在高效电池上具备很大的应用潜力。同时需选择合适的适应于 PERC 电池的掺镓硅片性能要求参数。

(2) 电性能参数

表 1 P 型掺镓硅片不同电阻率的电性能参数

测试条件	电阻率	Uoc/mV	Isc/mA	FF/%	NCell/%
对比组	0.4 ~ 1.1	0.687	10.288	80.35	22.55
实验一	1.1 ~ 1.2	0.684	10.297	79.99	22.37
实验二	1.2 ~ 1.3	0.685	10.298	79.93	22.39
实验三	>1.3	0.686	10.304	79.42	22.29

高电阻率硅片主要表现在升压、填充低。1.1 ~ 1.3 $\Omega\cdot\text{cm}$ 电阻率范围的硅片效率较 0.4 ~ 1.1 $\Omega\cdot\text{cm}$ 电阻率范围的硅片效率低

0.16% ~ 0.18%，大于 $1.3\Omega\cdot\text{cm}$ ($< 1.5\Omega\cdot\text{cm}$) 电阻率的硅片效率较 $0.4 \sim 1.1\Omega\cdot\text{cm}$ 电阻率范围的硅片效率低 0.26%。掺镓硅片的衰减率是 0.878%，掺硼硅片的衰减率是 2.195%，掺镓硅片在光衰减方面明显优于掺硼硅片。因此，在目前 PERC 电池的高效生产制造中，应该选择电阻率在 $0.4 \sim 1.1\Omega\cdot\text{cm}$ 的掺镓硅片。

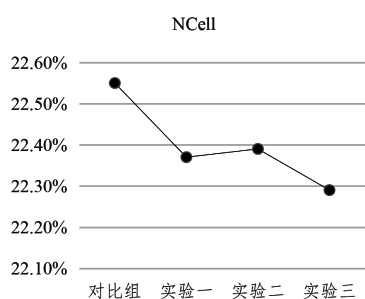


图1 对效率的影响

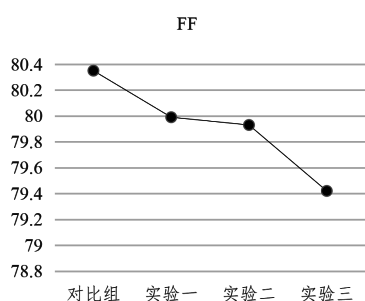


图2 对填充的影响

表2 掺镓硅片与掺硼硅片的光衰情况

类型	光衰前效率/%	光衰后效率/%	衰减量	衰减率/%
掺镓硅片	22.431	22.234	0.197%	0.878

1.2 不同厚度硅片对电性能参数的影响

在高价硅料压力下，电池制造过程中就需要想办法降低过程制造成本。原本稳定的光伏硅片厚度快速减薄，厚度已经从之前的 $190\mu\text{m}$ 减薄到目前的 $150\mu\text{m}$ ，随着硅片厚度的减薄，其电性能参数会有所变化，本次实验验证了硅片厚度减薄后电池片的电性能参数变化。

表3 不同厚度的硅片电性能参数

类型	Eta/%	Isc/mA	FF/%
$175\mu\text{m}$ 厚度	23.07	11.476	77.96
$150\mu\text{m}$ 厚度	22.90	11.354	78.19
差值	-0.17	-0.125	0.24

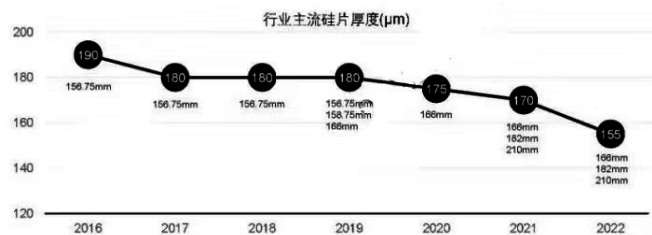


图3 近几年硅片行业的主流硅片厚度

$150\mu\text{m}$ 厚度的硅片较 $175\mu\text{m}$ 厚度的硅片效率低 0.017%，主要是电流低 125mA，填充高 0.24。由于硅片的厚度降低了，少子的传输距离变短，导致电流下降。

1.3 N型硅片不同电阻率条件下的电性能参数结果对比

P型和N型单晶硅电池相比，P型的原料中的各种杂质和缺陷较多，N型单晶硅电池复合率和电学性能相对稳定。首先，N型单晶硅电池对 Fe、Cr 等金属离子有更大的容忍性^[3]；其次，N型硅片使用能级较高的硅料以及更严格的拉晶过程控制，使得N型电池片有较高的少子寿命，这对高效晶体硅电池的研究很有用。近几年，以N型单晶硅为主的异质结电池（HJT 电池）、N型叉指背接触（interdigitated back contact）IBC 电池和N型钝化接触（TOPCon）太阳电池等新型高效晶体硅电池成为研究热点，是高效电池的主要发展方向。下面简要介绍几种N型高效电池。

TOPCon 电池，2013年由 Fraunhofer 发明，此后实验室效率快速提升，创造了 26.1% 的效率纪录，以超薄氧化层 + 重掺杂多晶硅层作为钝化层，在 P、N 型电池的单面或双面应用可形成多种电池结构。TOPCon 电池的生产线与现有 PERC 电池有一定的兼容性，成本相比 PERC 高 0.1 元 /W，目前商业化进展较快，电池量产效率为 24.5%，随着电池组件工艺的的稳定，其电性能优势的发挥需要更多实证对比案例来验证^[4]。

异质结电池（HJT 电池），采用非晶硅作为钝化层，作为背结电池，因此对硅片品质有很高的要求，非晶硅要求低温工艺（小于 250°C ），对称的电池结构使其有利于薄片化。HJT 电池产业化的核心影响因素仍是较高的银浆成本，与 TOPCon 类似，HJT 的可靠性与理论发电增益也需要实证案例来验证。

N型叉指背接触 IBC 电池（Interdigitated Back Contact）。1975年，Lammert 和 Schwartz 最早提出了 IBC 太阳能电池的概念，最初 IBC 电池主要应用在高聚光系统中^[5]。1977年，R.J.Schwartz 和 M.D.Lammert 制备的 IBC 电池在标准的光强条件下效率为 11%，而在光强条件为 $5\text{W}/\text{cm}^2$ 时效率为 15%，光强条件为 $28\text{W}/\text{cm}^2$ 时效率仍为 15%^[6]。1987年，Sinton 等优化了点接触 IBC 电池制备工艺，电池在 150 倍聚光条件下的效率提高到 28%^[7]。经过多年的发展，IBC 电池的转换效率已经超过 26%，远超其他单结晶体硅太阳能电池。1985年，Swanson 教授创立了美国 Sunpower 公司，开始商业化制造 IBC 电池^[8]。IBC 电池正负电极均在电池背面，呈交叉式分布，金属栅线在之后的优化设计上有很大的空间。电池正面没有金属栅线的遮挡，具有更高的短路电流密度，结合前表面场（FSF）也可以带来开路电压的增益，同时组件外观更加美观，备受国内外科研院所和大企业的关注。这组实验以 IBC 电池产线的 N 型单晶硅片为原材料。

目前各个厂家根据各自技术路线的不同选用的 N 型硅片的性能参数也不尽相同,但是大部分使用的是 1 ~ 7Ω.cm 范围内的 N 型硅片,在这个范围内的硅片,随着电阻率的增大,电性能也会有不同变化,具体实验数据如下表。

表 4 不同电阻率的电性能参数

类型	Eta/%	Uoc/mV	Isc/mA	FF/%
电阻率7Ω.cm	23.70	0.6996	11.840	80.52
电阻率1Ω.cm	23.53	0.6985	11.752	80.66
差值	0.17	0.0011	0.088	-0.13

可以看出,随着电阻率的增加,Uoc 逐渐增加,Isc 逐渐增加,FF 逐渐降低。这主要是因为低电阻率硅片掺杂浓度高,硅片表面和基体缺陷多、复合率大,导致短路电流密度较低。

2 结论

掺镓硅片在光衰减方面明显优于掺硼硅片。通过对其电性能的对比得出,在目前 PERC 电池的高效生产制造中,应该选择电阻率在 0.4 ~ 1.1Ω.cm 的掺镓硅片。

随着硅片厚度的减薄,电性能参数会有所变化,由于硅片的厚度降低了,少子的传输距离变短,导致电流下降。

N 型硅的少子寿命比 P 型硅片的更长,这有助于高效晶体硅电池的研究,目前各个厂家根据各自技术路线的不同选用的 N 型硅片的性能参数也不尽相同,随着电阻率的增加,Uoc 逐渐增加,Isc 逐渐增加,FF 逐渐降低。

由于制作工艺与电池结构不同,P 型与 N 型硅片对硅片厚度及电阻率的需求也不相同,选取一款性能合适的硅片,不仅可以降低生产成本,更可以在电池提质增效的道路上给予很大的帮助。

3 结语

P 型硅片目前主要应用在 PERC 太阳能电池技术上,该技术现已发展为高效晶体硅光伏电池的主流技术,P 型单晶硅电池效率现已经达到 23.4% 以上,其持续提升效率的潜力证明了其强大的生命力,且其量产的良率也在较高的水平。晶硅电池的薄片化也是未来发展的一个重要方向^[9]。但随着技术的迭代,P 型电池的效率逐渐遇到瓶颈,想进一步将电池效率提升到 24% 以上是非常困难的,因此,接触钝化电池等高效电池技术方兴未艾,各大主流光伏企业都在积极开发相关电池技术,适合目前大规模量产企业的技术升级是未来高效电池发展的主要技术之一。

从电池结构角度来看,IBC 电池正面无栅线,可以最大程度吸收太阳光,有利于电池效率的提升,国家电投已经实现了

25.5% 的高效 IBC 电池储备技术,IBC 电池与常规电池相比具有更优越的发电能力,但其使用的 N 型硅片价格较高,制备过程中需要更复杂的工艺,这制约了 IBC 电池的生产规模。但是随着 IBC 电池效率的持续提高,电池成本的不断降低,IBC 结构在光伏领域还将继续占据重要地位,在不久的将来一定会受到市场的青睐。

参考文献:

- [1] 晶澳太阳能及隆基太阳能官网. 光伏掺镓硅片 PERC 路线的又一次跨越 [EB/OL]. (2022-05-05) [2022-02-06]. www.jasolar.com.
- [2] 张云龙, 陈新亮, 周忠信, 等. 晶体硅太阳电池研究进展 [J]. 太阳能学报, 2021, 42 (10): 49-60.
- [3] MACDONALD D, GEERLIGSL J. Recombination activity of interstitia iron and other transition metal point defects in p-and n-type crystalline silicon [J]. Applied Physics Letters, 2004, 85 (18): 4061-4063.
- [4] 席珍珍, 吴翔, 屈小勇, 等. IBC 太阳电池技术的研究进展 [J]. 微纳电子技术, 2021, 58 (05): 371-378, 415.
- [5] SCHWARTZ R J, LAMMERT M D. Silicon solar cells for High concentration applications [C] // Proceedings of the IEEE International Electron Devices Meeting, Washington D.C, USA, 1975: 350-352.
- [6] 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 Electronic Devices, 1977, 24 (04): 337-342.
- [7] Sinton R A, Verlinden P, Kane D E, Swanson R M. Development efforts in silicon backside-contact solar cell [C]. 8th EUPVSEC, 1988, 1472.
- [8] Swanson R M. Design criteria for Si point-contact concentrator solar cells [J]. IEEE Transaction on Electron Devices, 1987, ED-34 (10): 21-23.
- [9] Feng Ye, Ningyi Yuan, Jianning Ding, Zhiqiang Feng. The performance of thin industrial passivated emitter and rear contacts solar cells with homogeneous emitters [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2015, 7 (01): 2237-2239.

作者简介: 杨爱静 (1987-), 女, 陕西富平人, 工程师, 大学本科, 主要从事高效晶硅太阳能电池研究。