



# 东方日升异质结伏曦产品白皮书

之

## 超薄硅片的开发和产业化应用

2023 年 12 月

东方日升新能源股份有限公司



## 目 录

1. 前言 .....	1
2. 使用超薄硅片的异质结电池的开发和量产化 .....	2-7
2.1 超薄硅片对异质结电池效率的影响	
2.2 超薄硅片对异质结电池生产良率的影响	
3. 超薄电池封装技术的开发和可靠性测试 .....	8-11
3.1 加严载荷测试	
3.2 加严老化测试	
4. 展望和思考 .....	12

## 1. 前言

在上一篇东方日升异质结伏羲产品白皮书系列文章——“[低银含金属化浆料的开发和产业化应用](#)”<sup>①</sup>文章中提及，要想实现异质结技术和产品的产业化，降本是关键，而硅片、金属化浆料、设备这三者的成本占比超过总成本 90%，是异质结产品最主要的降本方向。其中，硅片成本占比最多为 55%，占比超过了一半，如图 1.1 所示。虽然目前硅料价格已有大幅地下降，但是硅片成本在整个异质结电池的成本中仍然占据着最大部分。

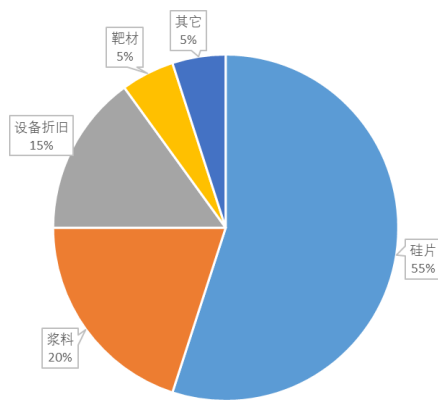


图 1.1 HJT 电池成本构成图

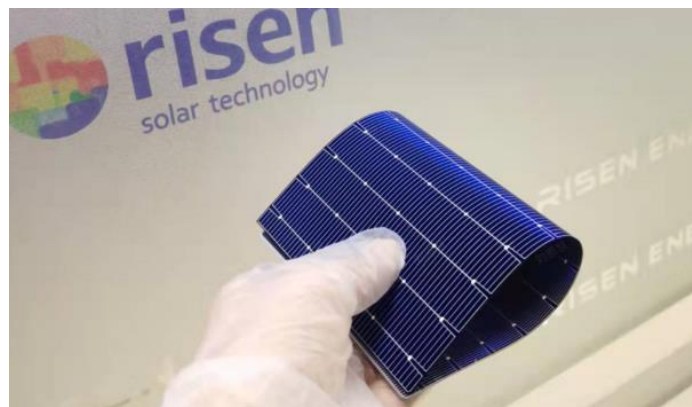


图 1.2 东方日升超薄 HJT 电池弯曲图

硅片端降本的措施有很多，但最直接最有效的措施是硅片减薄，而异质结技术的低温双面钝化接触电池工艺和完全对称的电池结构也决定了异质结技术可以使用更薄的硅片进行量产，而不会对电池效率以及良率带来负面影响。同时，薄片化的硅片还具有较好的柔韧性，为电池及组件创造更多可能，因此，使用薄片工艺将会是异质结技术独特的降本手段。如上图 1.2 所示为东方日升采用超薄硅片所制备的 HJT 电池，可以实现大幅度的弯曲。

东方日升经过多年的研究与投入，已在超薄硅片的技术开发与产业化应用方面取得了长足的进步。目前，东方日升已经实现了全面采用厚度 110 $\mu\text{m}$  超薄硅片的电池和组件的量产，同时也已经具备了采用厚度小于 100 $\mu\text{m}$  甚至更薄硅片的量产能力。

<sup>①</sup>东方日升官方公众号 <https://mp.weixin.qq.com/s/eE64j5SWqVP8mkijVwqUnA>

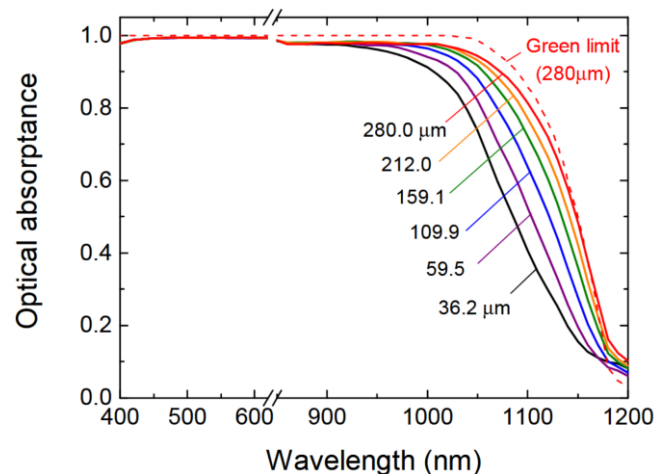
## 2. 使用超薄硅片的异质结电池的开发和量产化

如前言所述，硅片成本在整个电池的成本中占据最大比例，硅片减薄是最直接和最有效的降本手段，而异质结技术的低温双面钝化接触电池工艺和完全对称的电池结构，同时全制程温度低于 200°C 的特性，又让其与超薄硅片有着更高的适配性，能避免出现像 PERC 和 TOPCon 电池技术的不对称结构和高温工艺而造成的硅片翘曲与破损。可以说，使用超薄硅片是异质结技术特有的降本项，也是第三代电池技术的重要标志。但是在实际的电池生产和组件生产过程中，也必须面对超薄硅片带来的一些挑战。比如，

1. 使用超薄硅片是否对电池效率带来影响？
2. 使用超薄硅片是否会影响电池产线的良率？
3. 使用超薄硅片是否对组件产品的可靠性带来影响？

### 2.1 超薄硅片对异质结电池效率的影响

一般来说，硅片厚度对于电池性能的影响主要在于对于光的吸收上<sup>[1]</sup>，按照理想模型的计算，硅片厚度达到 280 $\mu\text{m}$  时才能将所有入射光吸收。同时存在这样的规律，硅片越薄，光线的穿透量就会越大，硅片厚度与光吸收呈线性关系，如图 2.1 所示。



如图 2.1 硅片厚度与光吸收线性关系图

<sup>[1]</sup> 引自 Hitoshi Sai et al 2018 Jpn. J. Appl. Phys. 57 08RB10 (<https://doi.org/10.7567/JJAP.57.08RB10>)

光的吸收量大小，最直接影响到的是短路电流密度，随着硅片厚度降低，短路电流密度呈现的是接近线性的下降，如图 2.2 (a)所示。

但同时，开路电压与短路电流密度呈现相反的状态，随着硅片厚度减薄，开路电压会呈现近似线性的上升，如图 2.2 (b)所示。

另一个重要参数填充因子并没有随着硅片厚度的变化而变化，而是有一个非常轻微的下趋势，基本可以认为保持不变，如图 2.2 (c)所示。

由此可见，硅片厚度的改变，会令短路电流密度与开路电压以填充因子为轴而呈现类似“跷跷板”一样的形态。

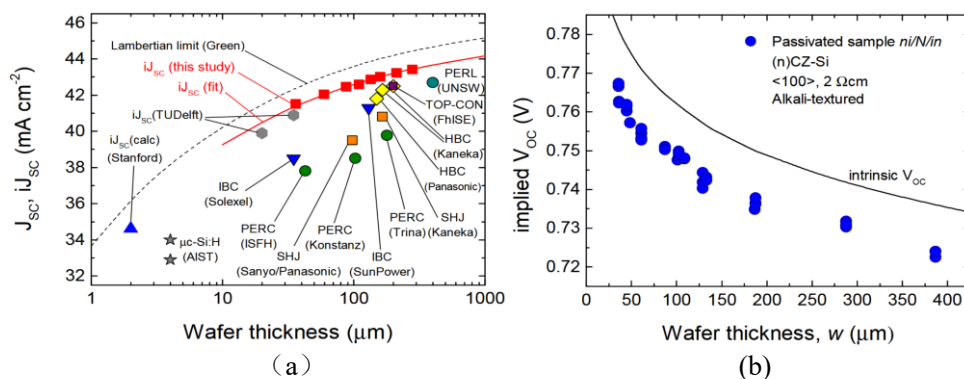
从转换效率的原始定义出发，推导出包含  $J_{sc}$ 、 $V_{oc}$ 、 $FF$  这三个主要电性能参数的形式，如<公式 1>所示：

$$\begin{aligned}
 Eff(\%) &= P_{mpp}(W)/P_{in}(W) \cdot 100\% \\
 &= [J_{sc}(A) \cdot V_{oc}(V) \cdot FF(\%)]/[CellArea(cm^2) \cdot 1000(W/m^2)] \\
 &= J_{sc}(mA/cm^2) \cdot V_{oc}(mV) \cdot FF(\%) \cdot 10(cm^2/W) \quad < \text{公式 1} >
 \end{aligned}$$

对于  $J_{sc}$  和  $V_{oc}$  均采用 mA 和 mV 的前提下，忽略量纲可以将公式精简为<公式 2>：

$$Eff = J_{sc} \cdot V_{oc} \cdot FF \cdot 10^{-5} \quad < \text{公式 2} >$$

从以上公式可以看到，效率  $Eff$  是短路电流密度  $J_{sc}$ 、开路电压  $V_{oc}$  与填充因子  $FF$  的乘积。由于“跷跷板”的存在，所以最终在电池效率上并没有呈现单纯的随硅片厚度变化而变化的线性关系，而是存在一个硅片厚度的“平台期”，在平台期之内，效率  $Eff$  会有下降，但较为缓慢，仍然是可以接受的，如图 2.2 (d)所示。



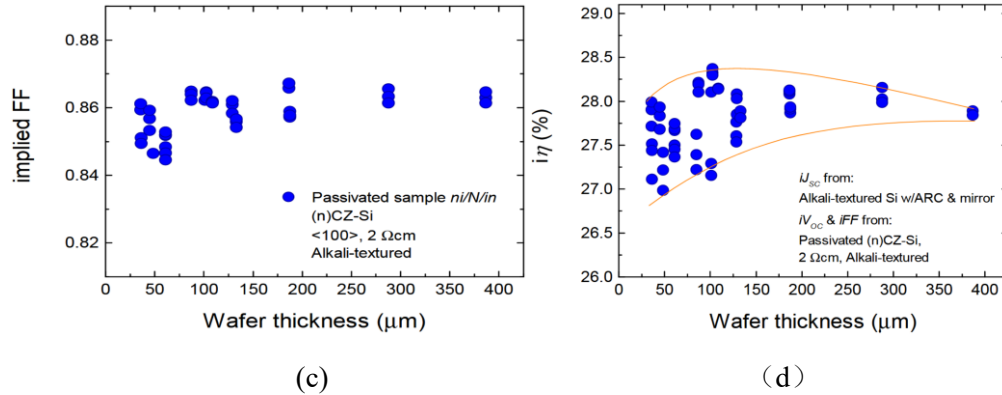


图 2.2 (a)(b)(c)(d)为硅片厚度与短路电流密度、开路电压、填充因子、电池效率关系图<sup>[1]</sup>

上述规律在我们的实验中被证实，与图 2.2 的文献数据相比，图 2.3 的实验数据与其高度近似。

从图 2.3 中可以看出，在硅片厚度减薄后，短路电流密度的下降幅度最大，而开路电压则是逐渐逼近于理论极限。鉴于实验中自动化未匹配到最佳状态等外部影响因素，填充因子略低于预期，优化后整体效率仍有上升空间。

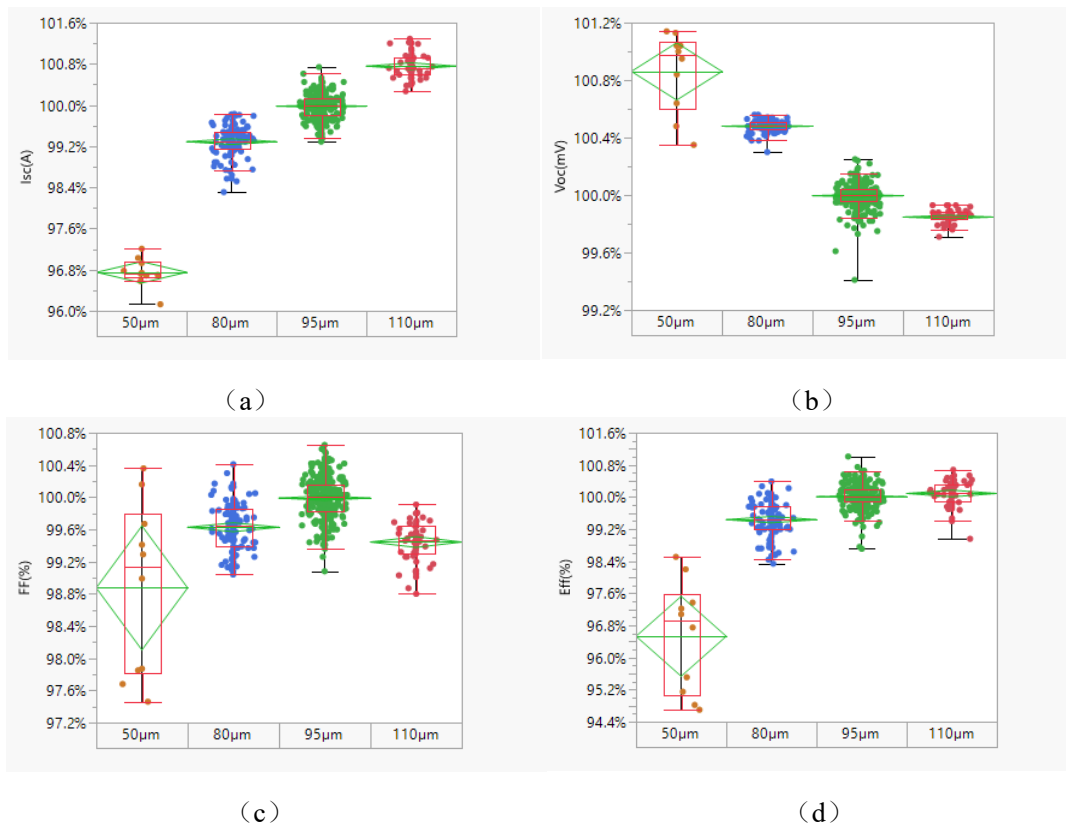


图 2.3 (a)(b)(c)(d)为硅片厚度与短路电流、开路电压、填充因子、电池效率关系图

<sup>[1]</sup> 引自 Hitoshi Sai et al 2018 Jpn. J. Appl. Phys. 57 08RB10 (<https://doi.org/10.7567/JJAP.57.08RB10>)

东方日升的异质结伏曦电池从 2023 年 4 月 27 日首批下线，到 2023 年 6 月 27 日首线满产，采用了 110 $\mu\text{m}$  厚度的硅片，最佳批次的电池平均转换效率达到了 25.8%，最高达到了 26.1% 的水平，基本符合我们的预期。如图 2.4 所示。



图 2.4 东方日升超薄硅片异质结电池的转换效率

## 2.2 超薄硅片对异质结电池生产良率的影响

在电池的生产制程中，生产良率直接影响了产品的成本，是最重要的生产指标之一。由于硅片面积变大，厚度变薄，硅片在各工序的生产过程及转运过程中，其表现和较厚的硅片相比是不一样的，就需要在生产工艺、工装治具、自动化设备上进行一些新的设计和调整。

就拿电池产线的花篮来说，早期在中试线时，因为设备限制，花篮设计为横插模式。随着硅片减薄，硅片会因为重力影响而自然下垂，如图 2.5 所示。在这种情况下，当机械臂抽取制程片时，就有可能对制程片造成划伤，产生不良。所以在量产线设计时，我们以竖插花篮作为基础设计整条产线，并有意识的调整各工序的自动化设计，除此之外，其他设备、工装夹具包括设备间的传送装置、真空装置均需要针对薄片来进行匹配性的设计和调整，这样才能保证量产后各项生产指标的达成。

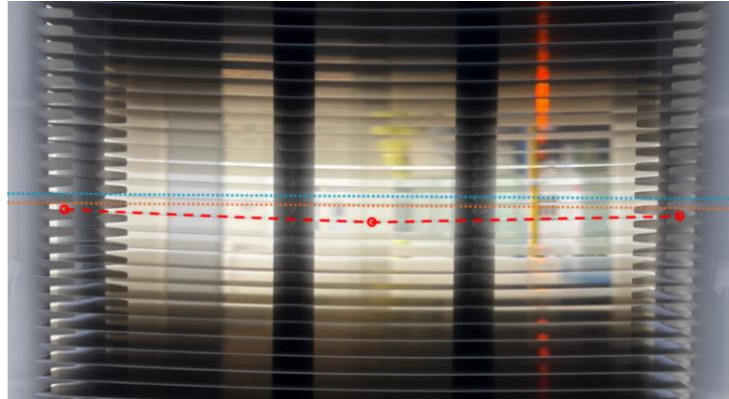


图 2.5 横放花篮时硅片的弯曲下沉

随着相关工艺、工装和设备的改进和调整，东方日升异质结伏曦电池的生产爬坡过程是比较快的，稳定后的电池良率保持在 99%以上，碎片率保持在 0.5%以下，基本都能够达到我们对良率和碎片率的要求指标，如图 2.6(a)(b)所示。

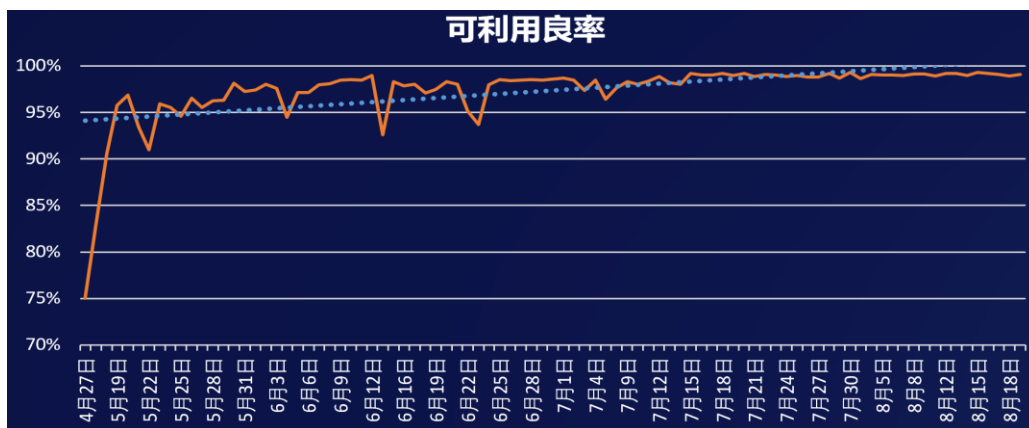


图 2.6(a) 超薄硅片可利用良率

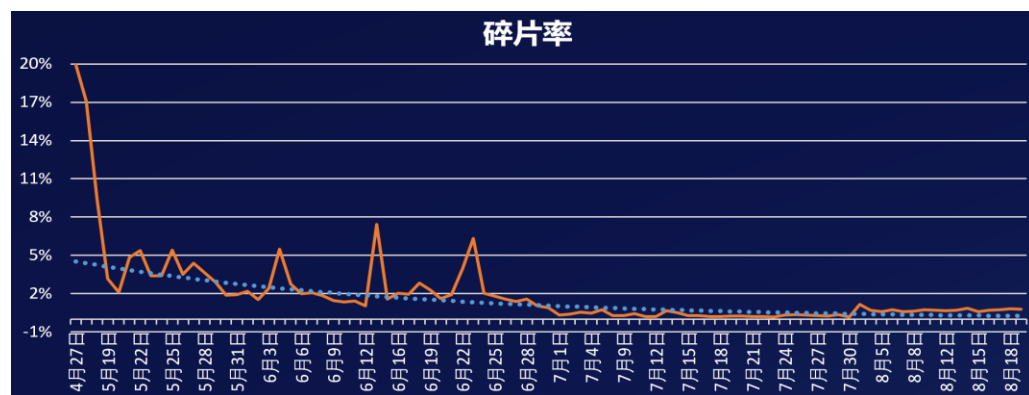


图 2.6(b) 超薄硅片碎片率



在人们的心目中，电池厚度越薄，其机械强度会越差，那么对于采用了超薄硅片的异质结电池，其机械强度是什么样的呢？为此我们对不同厚度、不同技术的电池进行了机械强度的对比测试。

如图 2.8 所示，图 2.8(a) 为 150 $\mu\text{m}$  的 PERC 电池，图 2.8(b) 为 130 $\mu\text{m}$  的 TOPCon 电池，图 2.8(c) 为 90 $\mu\text{m}$  的 HJT 电池。

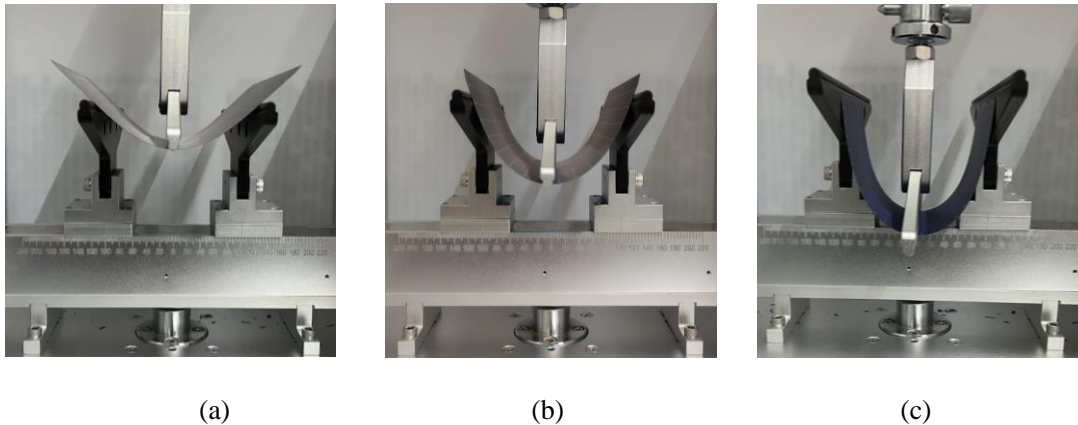


图 2.8 (a) (b) (c) 不同厚度和技术的电池机载测试图

在试验中，150 $\mu\text{m}$  的 PERC 电池与 130 $\mu\text{m}$  的 TOPCon 电池在达到了一定的弯曲度情况下，均发生破碎，而 90 $\mu\text{m}$  HJT 电池的弯曲度达到了机载测试机的最大行程后仍然完好无损（如表 2.1 所示）。可以看出，在使用了超薄硅片后，异质结电池的柔韧性大为增强，这对在电池和组件制程当中持续提升相应良率指标带来了积极的作用。

表 2.1 不同硅片厚度下 PERC、TOPCon、HJT 电池的形变量数据表

电池类型	PERC	TOPCon	HJT
厚度 ( $\mu\text{m}$ )	150	130	90
形变量 (mm)	46.74 (电池片破碎)	53.68 (电池片破碎)	98.56 (电池片完好)

### 3. 超薄电池封装技术的开发和可靠性测试

采用了超薄硅片的异质结伏曦电池，虽然电池的效率 and 良率都满足了要求，但下一个摆在研发人员面前的挑战，就是如何对其进行有效的封装，尤其是电池的互联。

传统组件封装中的电池互联是通过加热的方式，将镀锡铜带或者镀锡铜丝通过热熔的方式和电池上的银栅线连接在一起，焊接加热温度基本在 200°C 以上，但是由于异质结电池本身的生产工艺就是全生产过程不超过 200°C 的低温工艺，如果在传统的焊接温度下进行电池互联，过高的焊接温度会产生很大的可靠性隐患，尤其是在超薄电池的应用中，高温焊接的同时会带来组件端碎片率的提高和良率的下降。所以如何找到一种更好的、更可靠的、更经济的电池互联方式？如何选择合适的互联材料？如何能形成自己的专利布局？这就是产品研发和量产化过程中需要考虑的问题。

在伏曦异质结产品的开发中，东方日升首创了的异连接无应力电池互联技术（Hyper-link），这个技术具有超过 50 篇自主专利，并联合设备厂商开发了对应的互联设备。采用这种技术，东方日升已于 2023 年 6 月实现高效率、高可靠性的异质结伏曦组件量产。

为了考察组件在使用超薄电池以及异连接无应力电池互联情况下的性能，我们设计了一系列的测试来对其进行验证，主要是从组件的载荷（静载+动载）性能和老化性能方面来进行评估。

#### 3.1 加严载荷测试

参考 IEC61215 标准，我们对异质结伏曦组件的载荷性能进行了加严的静载和动载的测试，测试条件如表 3.1 所示。

表 3.1 采用超薄电池的异质结伏曦组件可靠性测试

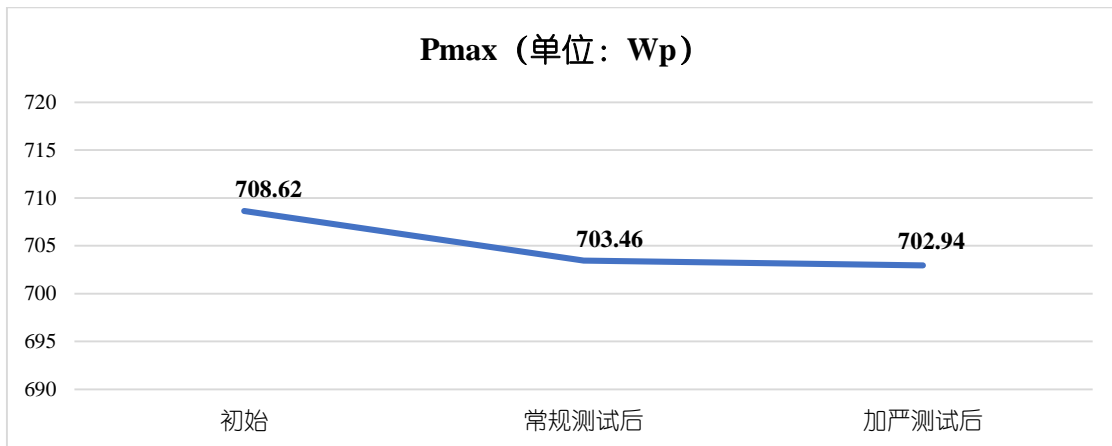
试验项目	测试条件
静态机械载荷	压块+无横梁安装/正 5400Pa、背 2400Pa
动态机械载荷	正/反 1000Pa,10000 次

测试结果显示：

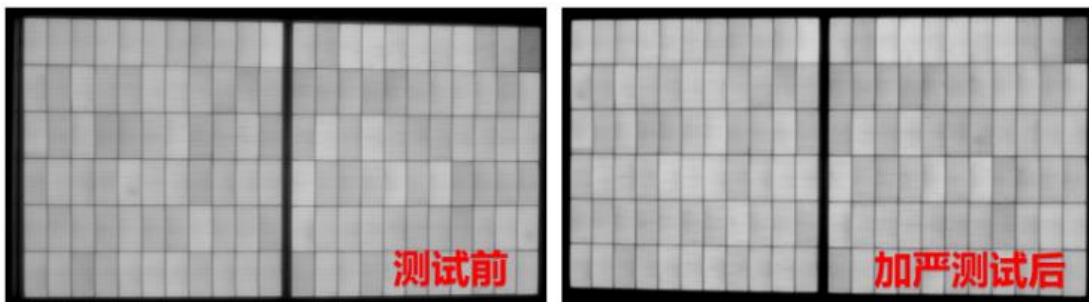
- 使用压块及无横梁安装方式，在正面 5400Pa、背面 2400Pa 载荷下，EL 无隐裂及裂片，功率衰减小于 1%，如图 2.9 所示。



(a)



(b)



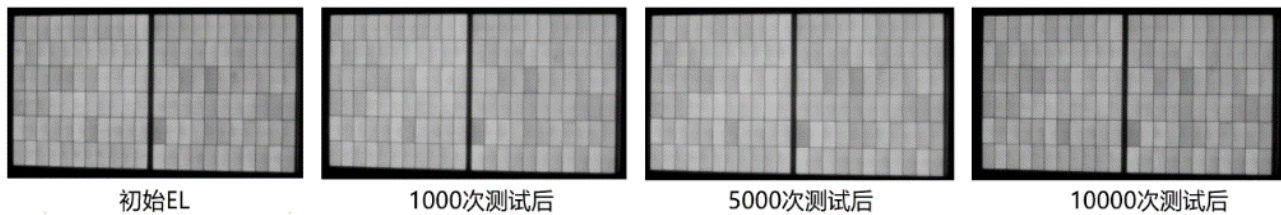
(c)

图 2.9(a)(b)(c) 静态机械载荷测试

- 使用常规动载测试条件，在进行了 1000 次循环后，持续进行 5000 次和 10000 次动态机械载荷测试，测试结果显示，EL 无隐裂及裂片，组件动载性能满足标准要求，如图 2.10 所示。



(a)



(b)

图 2.10(a)(b) 动态机械载荷测试

### 3.2 加严老化测试

采用超薄硅片和异连接无应力电池互联技术的异质结光伏组件的老化测试，是在基于 IEC61215:2021 中规定的光伏组件不同耐候性和老化测试的标准测试方法上，设计了加倍测试的方式，来验证异质结光伏组件的可靠性。

我们随机抽取了两块异质结光伏组件，分别进行如下可靠性测试，两块组件的单倍测试均满足 IEC 要求，多倍测试如高温高湿（85°C+85%RH）2000 小时（DH2000）、高低温（-40°C/85°C）循环 400 次（TC400）、湿冻 30 小时（HF30）、潜在电势诱导衰减 288 小时（PID288），功率衰减均小于 3%，反向电流+热辅助光致衰减 324 小时（LeTID324）功率衰减小于 1%，测试结果如图 3.1 所示。

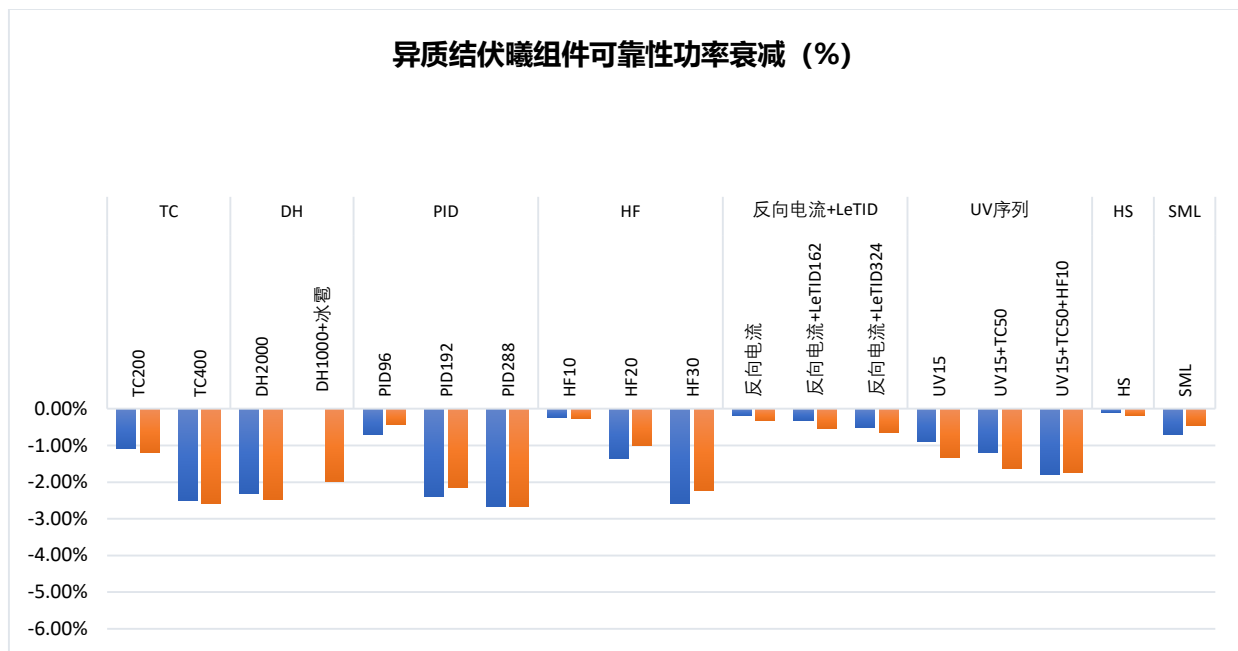


图 3.1 异质结光伏组件的可靠性测试

通过以上测试结果，我们可以发现，在使用了超薄硅片和异连接无应力电池互联技术的情况下，组件本身的机载性能和相关的可靠性都能够满足要求。在异连接无应力电池互联技术的加持下，超薄硅片完全适用于异质结电池和组件的生产，满足量产化的需求，组件本身的性能完全符合 IEC 标准的要求和户外长期使用的需求。

总之，因为降本的需求而进行的异质结电池超薄化是一条合理、可行且必由之路。东方日升率先在业界引导了这场变革，必将对于业界的未来产生深远的影响。

## 4. 展望和思考

作为行业异质结产业化的开拓者和革新者，东方日升从 2018 年开始异质结技术的研发，2019 年设立中试线，2020 年起异质结组件出货并连续两年全球出货量第一，到 2023 年伏曦组件 GW 级量产线出货，东方日升积累了深厚的异质结技术开发和量产化的经验。在整个异质结技术和产品的研发和量产化过程中，东方日升也曾迎面与诸多量产过程中的难题对峙。

在这一过程中，东方日升深刻的认识到异质结产品的研发和量产化需要将整个上下游的开发进行整合，包括硅片的开发、电池技术的开发和组件封装技术的开发，他们是互相关联的一个整体。试想一下，只有好的硅片技术，但是无法在电池量产中使用，或者有好的电池技术，但是无法有效封装成合格的组件产品，各个环节只是独立的开发自己的技术，没有上下游技术的有机整合，是无法达成最终产品的量产化。

东方日升是全行业首家量产采用超薄硅片、低银含浆料和无主栅电池技术的厂家，这三种技术对于异质结的提效和降本起到了关键的作用，而真正将这三者结合在一起的则是东方日升首创的异连接无应力电池互联技术 (Hyper-link)，也正是有了这个技术，才使上下游的开发成为一个整体。在这些技术的加持下，东方日升已经全面完成了超薄硅片的量产化应用。东方日升南滨基地 15GW 异质结伏曦项目，于短短一年内已经实现了 700Wp+ 异质结伏曦组件的大规模量产和出货。

在未来，东方日升仍旧会在异质结技术的开发和量产化上持续深耕，不断提效降本，同时结合 HBC 技术和钙钛矿叠层技术，对异质结伏曦产品不断进行迭代和升级，随着效率的提升，900Wp 不是梦，一定会实现，1000Wp，应该也不远了。