



# 东方日升异质结伏曦产品白皮书

之

## 低银含金属化浆料的开发和产业化应用

2023年8月

东方日升新能源股份有限公司



# 目 录

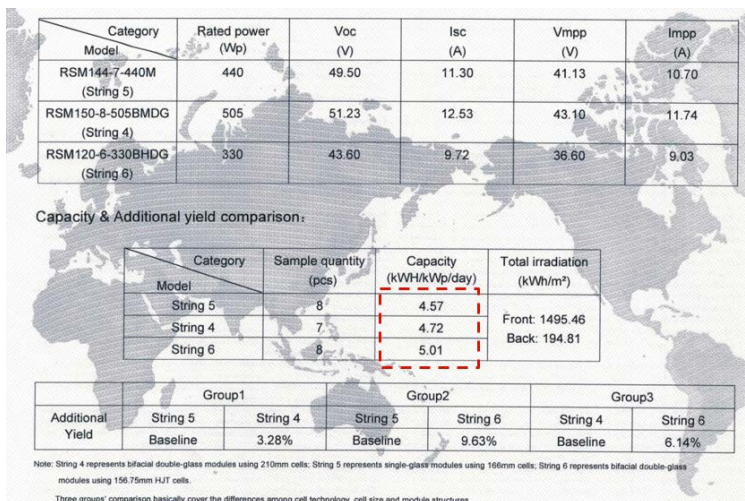
1、前言 .....	1-3
1.1 异质结电池成本简析	
1.2 降本方案之低银含浆料的应用	
2、东方日升低银含浆料的开发逻辑 .....	4-6
2.1 电导率	
2.2 铜、铝、锌、镍金属的储量情况	
2.3 铜、铝、锌、镍金属的价格情况	
3、东方日升低银含浆料的开发与应用 .....	7-12
3.1 低银含浆料的包覆性	
3.2 光电热对于低银含浆料的影响	
3.2.1 横向低成本金属离子迁移的测试	
3.2.2 烘烤及光照通电后纵向低成本金属离子扩散的测试	
3.2.3 铜应用的极限测试	
4、东方日升低银含浆料的组件可靠性测试 .....	13-14
5、使用不同银含浆料电池的组件发电量对比 .....	15
6、综述 .....	16

## 1、前言

如果将  $p$  型多晶硅 ( $p$ -Poly) 称为 1 代电池,  $p$  型背钝化 ( $p$ -PERC) 称为 2 代电池,  $n$  型隧穿氧化层钝化 ( $n$ -TOPCon) 称为 2.5 代电池, 那么  $n$  型异质结 ( $n$ -HJT) 当之无愧应被称为 3 代电池。

HJT 电池代表的是下一代的电池技术, 因为其本身具备众多的优点。例如: HJT 电池是晶硅电池中的世界记录保持者, 有望超过 27%, 最接近晶硅电池的理论极限。HJT 电池不仅具备高效的优点, 而且天生免疫 PID/LID 等上一代电池常见的多种衰减, 制程简单且能耗低, 仅有四个主要步骤, 良率可以超过 99%。同时, HJT 产品全制程采用小于 200℃ 的低温工艺, 可以兼容 90 $\mu$ m 之下的超薄硅片, 配合无主栅电池和异连接组件技术, 能带来超低的碳足迹分值。

HJT 组件有很多性能优势, 其稳定的功率温度系数、超高的双面率和优异的抗衰减性能, 使异质结组件成为发电量最高的产品。通过模拟计算单瓦发电量, HJT 组件的发电量比 PERC 组件高 6% 左右, 比 TOPCon 组件高 3% 左右。东方日升也在中国银川进行了为期一年的实证测试, 数据表明, 异质结双面组件的发电量相比于单面 PERC 组件高 9.6% 左右, 相比于双面 PERC 组件高 6.1% 左右, 如图 1.1 所示。更高的发电量将大幅降低光伏系统的 BOS 成本和 LCOE, 也给客户带来更高的发电量收益, 同时带来更多的碳减排量, 在有碳交易的情况下, 给客户带来更高的碳价值。



如图 1.1 SGS & CPVT 报告\_中国银川实证测试

目前行业里大家亟需攻克的难点主要是在降本, 东方日升通过多年的努力以及行业的发展进步, 有望在 2023 年底或 2024 年初时持平 TOPCon 甚至 PERC 的成本。

## 1.1 异质结电池成本简析

在 HJT 电池的成本构成中，硅片成本、浆料成本和设备折旧占据了 90% 的总成本份额（如图 1.2 所示），因此在整个异质结降本路线中，首先就要从这三个方面来着手。其中，硅片成本占比最多为 55%，占比超过了一半，随着硅料价格的下降，硅片成本也在下降（如图 1.3 所示），但是其在整个异质结电池的成本中仍然占据着最大部分。

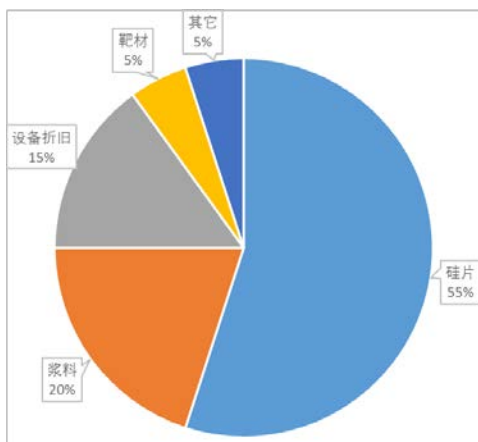


图 1.2 HJT 电池成本构成图

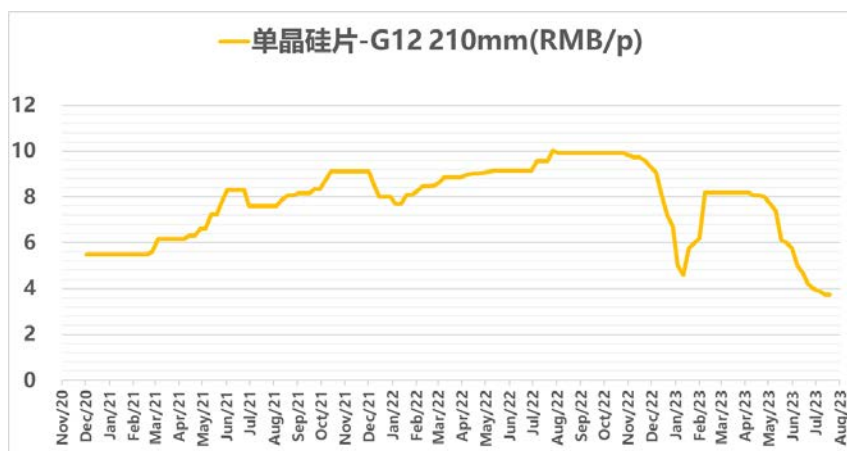


图 1.3 210 单晶硅片价格走势<sup>[1]</sup>（数据来源：财通电新）

东方日升目前已经开始全面量产厚度小于 100 $\mu\text{m}$  的超薄硅片，同时引入自切硅片，并研究重复利用硅锭边皮料的方式进行降本，已经取得了良好的降本效果。关于超薄硅片在异质结技术的量产化和产品的可靠性方面，东方日升将在下一篇文章中给大家分享。

## 1.2 降本方案之低银含浆料的应用

金属化浆料在成本中占比次之，约 20%左右。目前光伏行业使用的金属化浆料基本都称之为银浆，其中，PERC 和 TOPCon 使用的银浆含银量通常都在 90%以上。从图 1.4 所示的白银期货价格走势图中<sup>[2]</sup>来看，银价还在持续上涨中，由于异质结所使用低温银浆用量大，浆料成本占比会进一步增加，目前异质结行业从业人员都在寻找既能拥有良好的导电性能同时价格又较为低廉的替代材料。

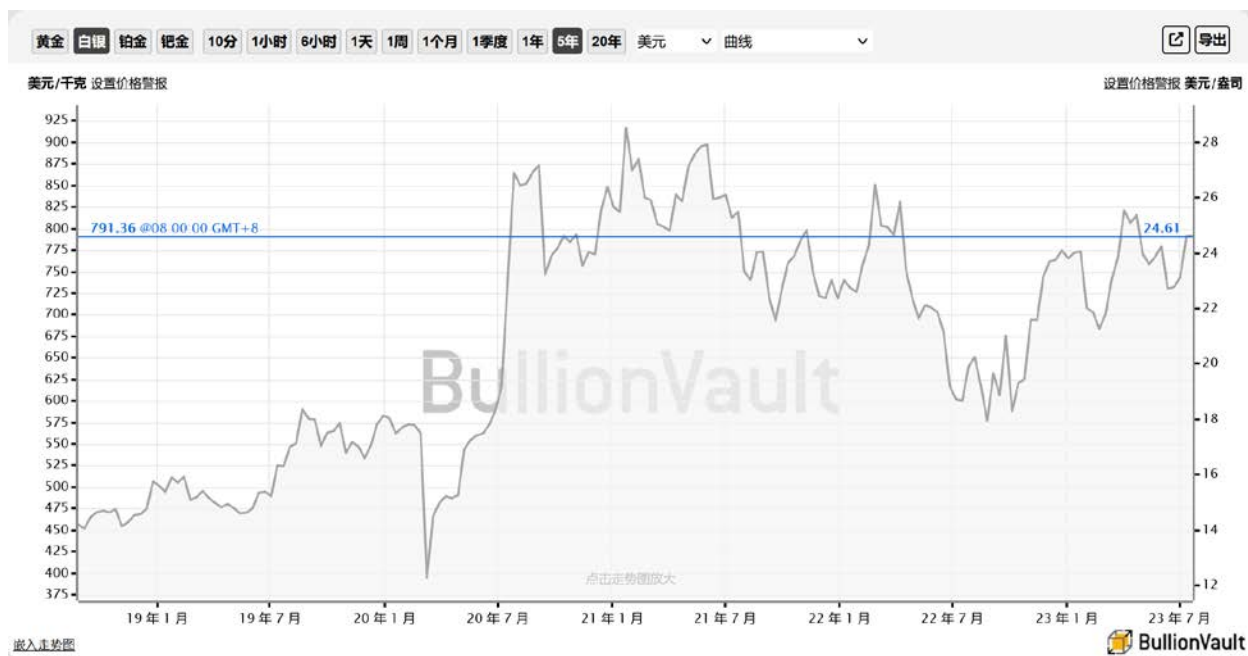


图 1.4 白银期货价格走势图中<sup>[2]</sup>

通过大量的研发和验证工作，东方日升在自己的异质结伏曦产品上已经全面导入和使用采用了采用低成本金属的低银含浆料，并且制定了详细的技术路线图，在确保电池效率与组件可靠性的同时，不断降低异质结电池和组件的成本。在本文里，东方日升将向大家详细阐述低银含浆料的开发逻辑以及异质结伏曦产品的性能测试结果。



## 2、东方日升低银含浆料的开发逻辑

如上文所述，目前太阳能电池所使用的浆料中主要成分是银材料，属于贵金属，价格高。根据 2022 年中华人民共和国自然资源部编写的“中国矿产资源报告”显示银矿储量为 71783.66 吨，相对铜、铝、锌、镍金属储量占比较少，相对容易受到期货市场价格的波动而影响电池成本，就像晶体管集成电路的发展路径一样，将最初作为连接用的金材料换成铜材料甚至铝材料，大幅降低了集成电路的成本，也带来了集成电路的大规模应用。同样，在光伏行业，将电池金属化用的浆料中的贵金属替换成低成本金属，也是降低成本的必由之路，而要选择合适低成本金属，需要从材料的电导率、储量和价格等三个维度来考虑。

### 2.1 电导率

表 2.1<sup>[3]</sup>是主要金属材料的电导率，银作为电导率最好的材料，目前被大量应用在光伏电池的金属化浆料里。

表 2.1 不同金属电导率<sup>[3]</sup>

Sequence 序列	Material 材料	Conductivity 电导率 $\sigma$ , at 20°C (S/m)
1	Silver 银	$6.30 \times 10^7$
2	Copper 铜	$5.96 \times 10^7$
3	Annealed copper 退火铜	$5.80 \times 10^7$
4	Gold 金	$4.11 \times 10^7$
5	Aluminum 铝	$3.77 \times 10^7$
6	Brass 黄铜(5% Zn)	$3.34 \times 10^7$
7	Calcium 钙	$2.98 \times 10^7$
8	Rhodium 铑	$2.31 \times 10^7$
9	Tungsten 钨	$1.79 \times 10^7$
10	Zinc 锌	$1.69 \times 10^7$
11	Brass 黄铜(30% Zn)	$1.67 \times 10^7$
12	Cobalt 钴	$1.60 \times 10^7$
13	Nickel 镍	$1.43 \times 10^7$

## 2.2 铜、铝、锌、镍金属的储量情况

我国铜矿储量为 3494.79 万吨、铝土矿储量为 71113.74 万吨、锌矿储量为 4422.90 万吨、镍矿储量为 422.04 万吨，如表 2.2 所示。我国锌矿资源位居全球资源储量第二位，资源储量占比全球的 21%，铜、铝、镍等资源储量分别占全球的 3.1%、3.3%、3.1%，虽整体占比不高，但依旧比银的储量（约 12 万吨）更为乐观，如图 2.1 所示。

表 2.2 铜、铝、锌、镍储量数据（节选自 2022 年中国矿产资源报告）

序号	矿产	单位	储量
1	铜 矿	金属 万吨	3494.79
2	铝土矿	矿石 万吨	71113.74
3	锌 矿	金属 万吨	4422.90
4	镍 矿	金属 万吨	422.04

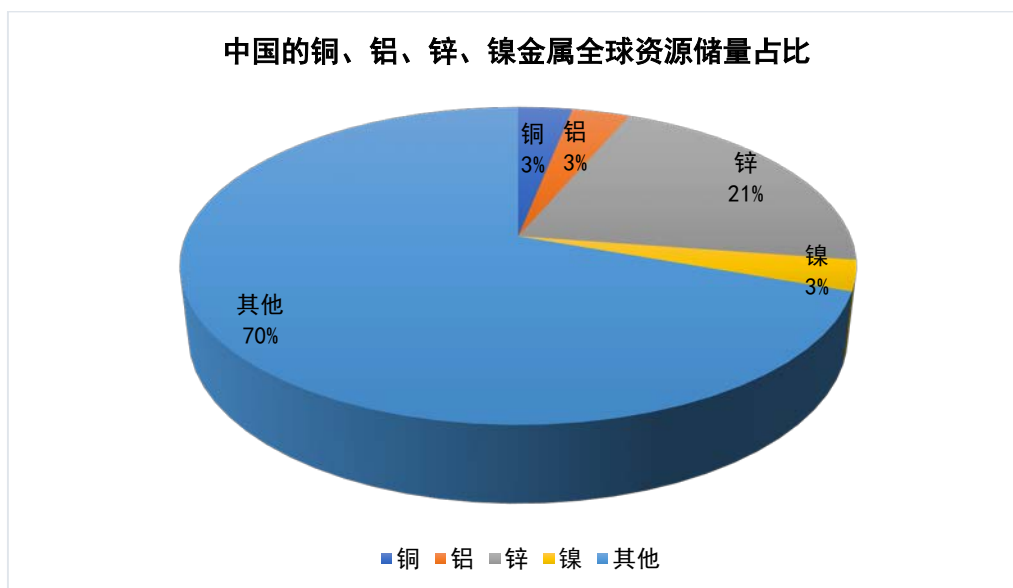


图 2.1 铜、铝、锌、镍金属全球资源储量占比图

数据来源：东方证券

## 2.3 铜、铝、锌、镍金属的价格情况

图 2.2<sup>[4]</sup>为此四种金属的 5 年历史价格趋势图，单位均为美元/吨，在 2022 年曾经达到最高点。在笔者撰写本文时，铜价为 8422 美元/吨、铝价为 2198 美元/吨、锌价为 2347 美元/吨、镍价为 20809 美元/吨，与银价 791360 美元/吨相比，均十分廉价。所以目前业界的思路都是思考如何用低成本金属来代替银。

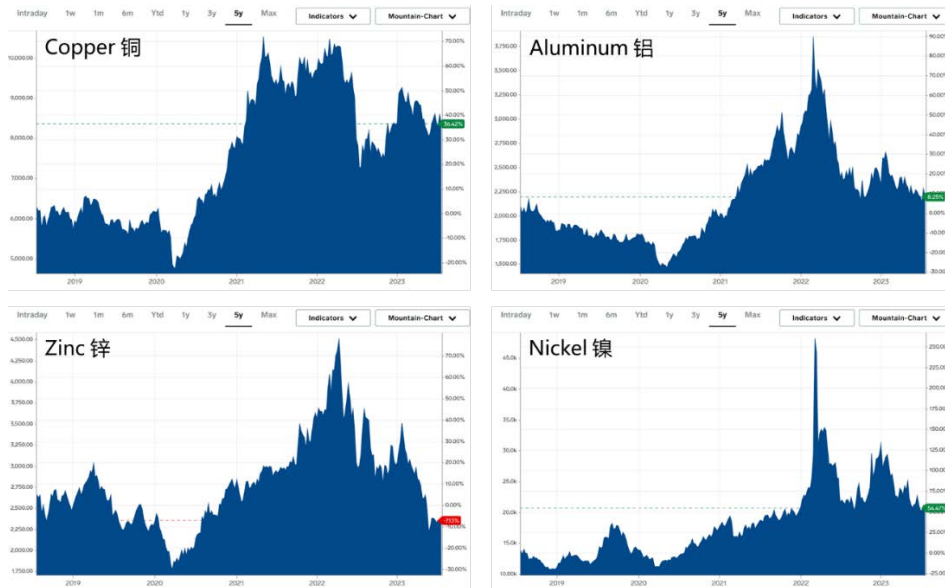


图 2.2 铜、铝、锌、镍金属历史价格趋势图

当我们结合电导率、储量、价格等维度去思考时，会发现较为适合的替代材料为：铜、铝、锌、镍。

但如何替代和采用哪种材料进行替代，目前行业里主要有两种技术路线：一是采用电镀的方式，达到无银金属化，但暂时还不成熟，具有设备昂贵、耗材昂贵、废水处理昂贵等缺点，金属化成本并没有随着不含银而快速下降，所以人们往往将其作为提效而非降本的手段；二是采用在低温浆料中，用银壳包覆低成本金属来取代纯银，这种低银含浆料与银浆非常类似，具有相同的形态和相近的性能，不需要投资新设备，可以兼容现有产线，能够使金属化成本得到明显的下降。

东方日升在多年的异质结产品研发过程中，多条路线布局，在目前金属化技术的产业化路线上，已经完全导入和量产了采用低银含的金属化浆料，并且也在和材料厂商、设备厂商一起不断的开发和优化具备更好性能、更低成本的金属化材料、工艺和设备。



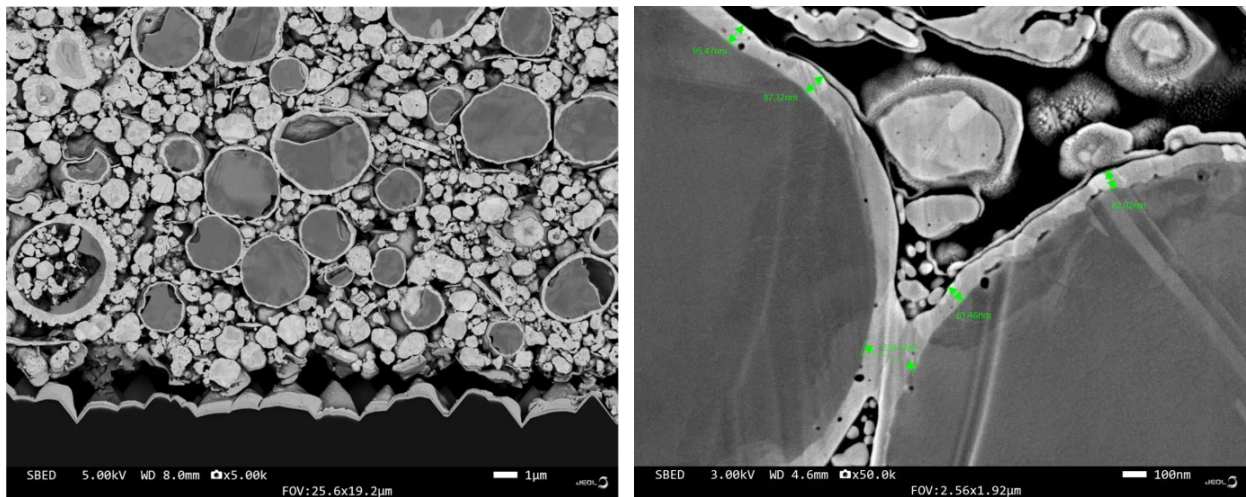
### 3、东方日升低银含浆料的开发和应用

低银含浆料是由银壳包覆低成本金属，如果银壳破损会存在低成本金属裸露的风险，而低成本金属往往是很活泼的，如果扩散进入电池内部，会形成复合中心从而降低电池效率。东方日升在低银含浆料的开发过程中，和供应商一起，在材料的制备、工艺的控制并结合电池和组件技术的优化开发出了具备良好性能的低银含浆料。

#### 3.1 低银含浆料的包覆性

图 3.1 为 FIB-SEM（聚焦离子束电镜）照片，其中外侧包裹的白壳为银，内部包裹的圆球为低成本金属，可以很清晰的看到包裹性优良，没有存在裸露的现象。

从放大后的照片也可以清晰地看到，银壳厚度在 80-100nm 之间，这样能够有效保证银壳不易破损，防止低成本金属裸露，如图 3.1 (b) 所示。



(a)

(b)

图 3.1 (a) (b) 低银含浆料的 FIB-SEM 的照片

## 3.2 光电热对于低银含浆料的影响

如果将采用了低银含浆料的电池长时间暴露在光、电、热之中，这种加速老化的处理是可以模拟出电池封装在组件长期工作后的状态的。而电池老化后，是否会出现银壳包覆性减弱、低成本金属离子析出现象非常值得探讨。为此，东方日升研发团队通过以下两个实验进行了验证：

一是在电池正负极不导通的情况下进行长时间的光照：主要验证的是如果存在低成本金属析出，其在电池表面应该会出现扩散现象，因此使用 XPS（X 射线光电子能谱）检测低成本金属离子在电池表面的横向迁移情况。

二是经过烘箱长时间烘烤后，将电池正背面短接进行长时间光照：如此进行处理之后，使用 EDS（能量色散能谱）测试低成本金属离子在电池内部的纵向渗透情况。

### 3.2.1 横向低成本金属离子迁移的测试

样品取自成品电池，采用开路 and 长期光照。其中分析区域如图 3.3 所示，在两根细栅中点，直径 400 $\mu\text{m}$  的圆形，信息深度约 5nm。



图 3.3 XPS（横向低成本金属离子迁移）

XPS 的能谱分布的实际测试结果如图 3.4 所示，其中银信号非常强烈，电池表面和向下探测 5nm 均没有检测到低成本金属元素的信号。

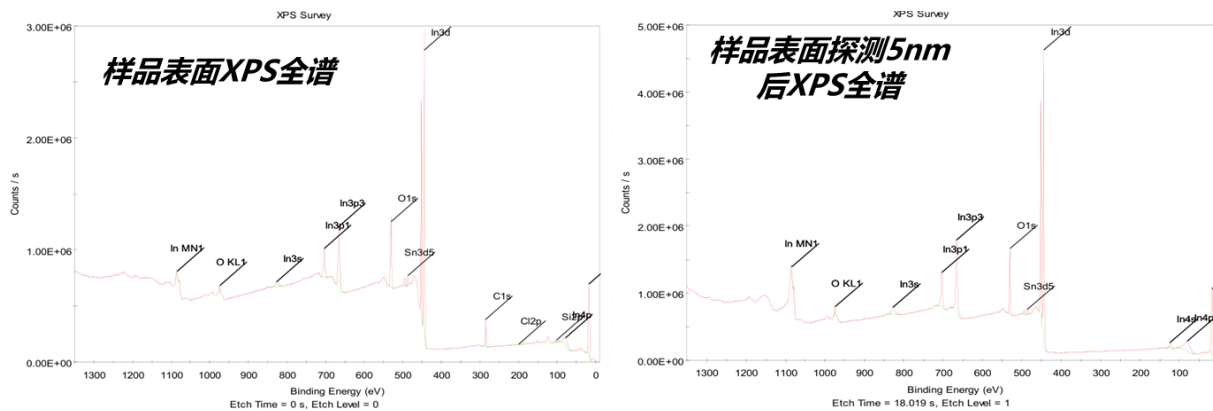


图 3.4 XPS（能谱分布）

将上述测试结果汇总如表 3.1 所示，电池表面的 ITO 为铟锡氧化物合金，所以结果中出现铟/锡/氧均为正常现象，同时也在电池表面发现一些杂质，其中硅元素为制样时对电池切割后硅粉飘落所致，而碳和氯元素则来自于空气。结果表明在经过电池老化测试后，并未出现银壳包覆性减弱及低成本金属离子析出的现象，说明在光、电、热这样的环境之中，不会对低银含浆料造成衰减影响。

表 3.1 XPS 能谱分布实测结果汇总

样品深度	试验结果 单位: At%					
	In	O	C	Sn	Si	Cl
表面 0nm	19.6	39.29	35.22	1.08	3.83	0.98
溅射 5nm	40.22	58.56	/	1.22	/	/

### 3.2.2 烘烤及光照通电后纵向低成本金属离子扩散的测试

考虑到高温和通电会加快低成本金属离子的渗透，所以先将电池烘烤较长的时间后，将正背面导通并进行长时间光照，令电池处于正常工作状态，再观察低成本金属离子的扩散情况。

对样品电池进行 FIB-SEM 切割后用 EDS 分层扫描，如图 3.5 所示，不同颜色代表不同的元素，红色代表氧元素、粉色代表硅元素、绿色代表低成本金属元素、靛色代表银元素，从图中可以看到，低成本金属仅仅存在于被包裹的银壳之内。

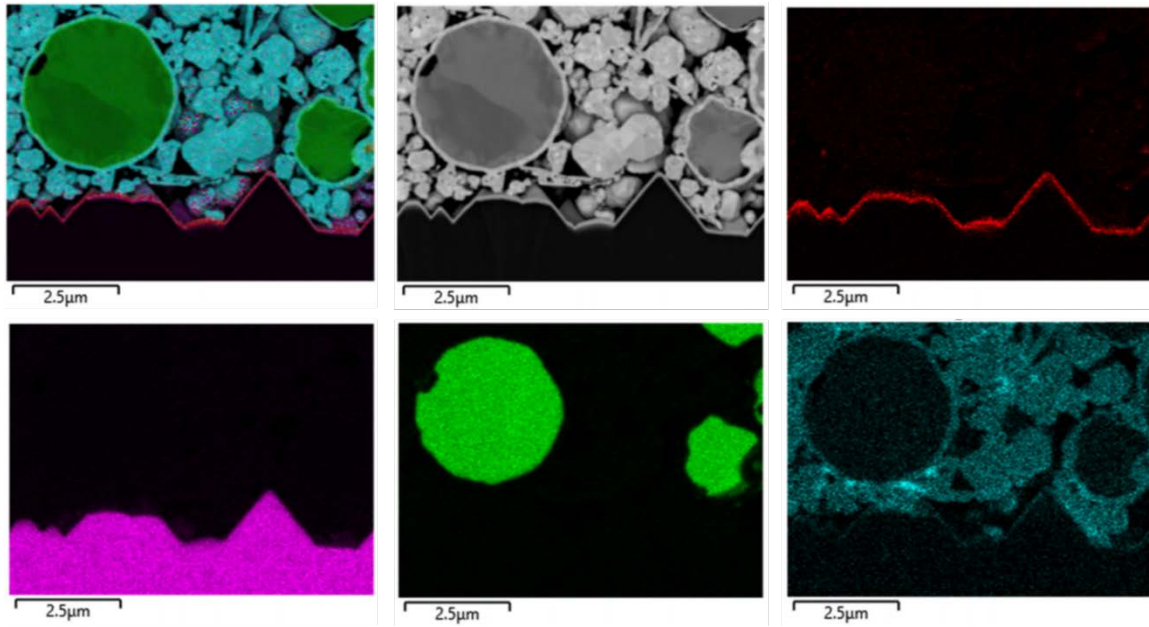


图 3.5 FIB-SEM &amp; EDS 分层图

为了更深一步的检测低成本金属元素是否进入了电池深处，我们选取了低银含浆料栅线下的逐步深入电池内部的 4 点位置进行了精密检测，如图 3.6 所示。

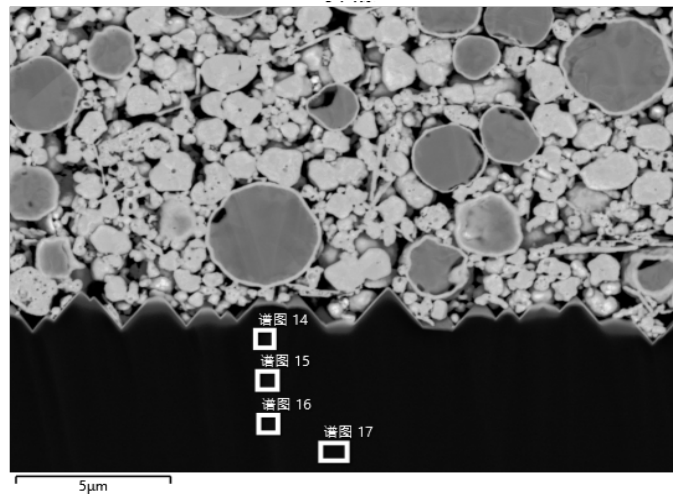


图 3.6 FIB-SEM (聚焦离子束电镜)

图 3.7 是图 3.6 中各位置的元素检测，在栅线下的硅基底中，4 点位置均只有硅元素信号，没有发现低成本金属元素的信号。

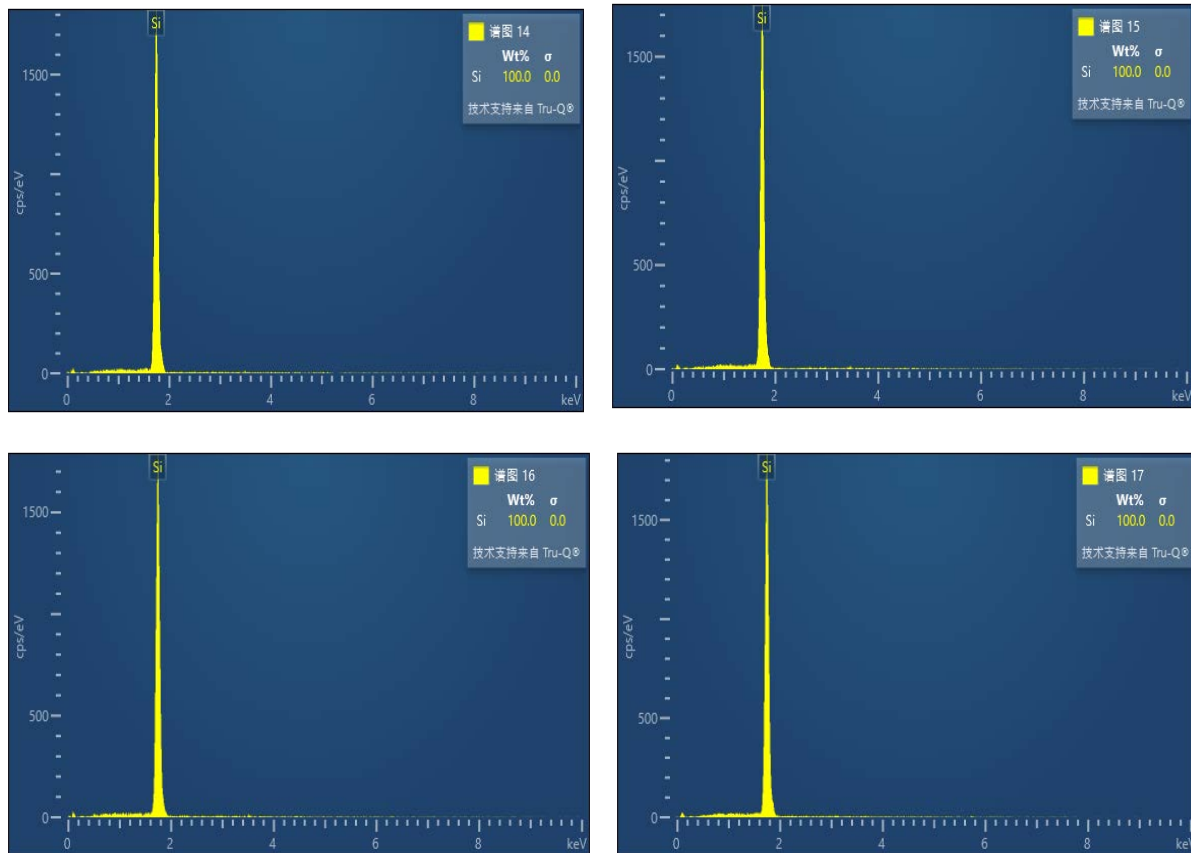


图 3.7 EDS（电池深处低成本金属元素检测）

总之，通过对电池内部的各种检测可以看得出来，无论是持续高温还是持续光照和短接通电，都无法令银壳破损后出现析出，低银含浆料中的低成本金属更不会因为电池长时间正常工作而渗透入电池内部。

### 3.2.3 铜应用的极限测试

铜、铝、锌、镍均可作为低银含浆料中低成本金属的选择，其中铜往往最被担心会扩散和渗透进入电池内部而造成电池性能的衰退。所以假设在使用铜的情况下，我们将其推至极致，看一看完全将铜裸露后与异质结电池片直接接触的情况时是否存在这方面的问题。

因此我们采用铜电镀来进行旁证<sup>[5]</sup>，如图 3.8 所示，样品电池上沉积了 10nm 的 IT0，在此基础上直接覆盖了电镀铜。



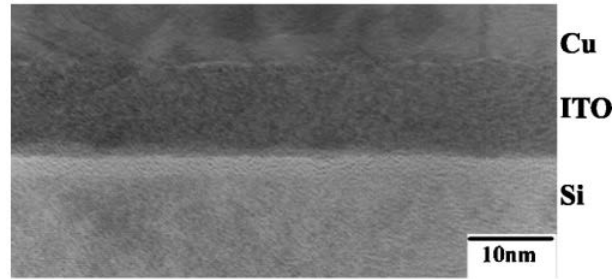


图 3.8 铜电镀示意图

在样品电池经历不同的退火温度后，对其进行方阻测试，如图 3.9 所示<sup>[5]</sup>，在退火温度小于 650 °C 时方阻无变化，但在超过 700°C 后，方阻急剧变化。

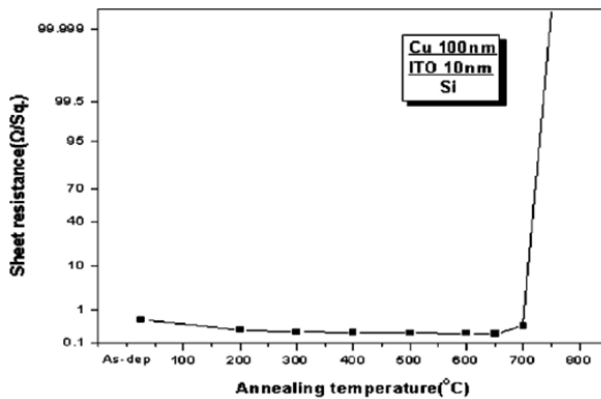


Figure 1. Sheet resistance variations of the Cu/ITO/Si stacked films with the RTA treatment.

图 3.9 方阻测试图

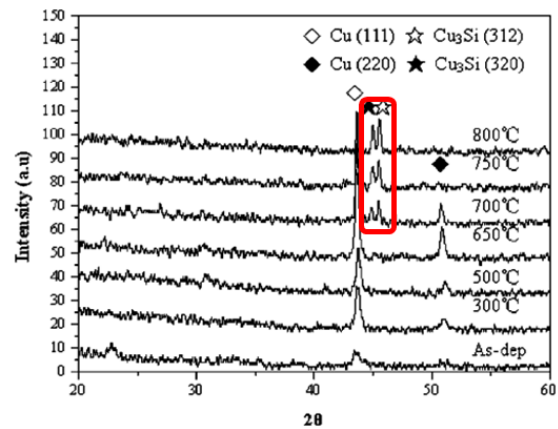


Figure 5. XRD patterns of Cu/ITO/Si sample before and after annealing.

图 3.10 XRD

通过 XRD (X 射线衍射) 的测试，如图 3.10 所示<sup>[5]</sup>，发现当退火温度超过 700°C 过后出现了  $\text{Cu}_3\text{Si}$  合金。铜元素的渗透形成了深能级中心，破坏了钝化效果，令性能发生急剧变化。

根据上述研究发现，硅片表面仅 10nm 的 ITO 就可以在温度小于 650°C 时有效阻挡铜离子的渗透，而 HJT 电池正背面 ITO 层厚度均达到了 80nm，都远远超过了此示例，并且 HJT 全程是处在低温制程中，包括退火在内均不会超过 200°C。所以从铜电镀的示例可以反证，HJT 电池搭配含有各种低成本金属的低银含浆料时更加的安全。

## 4、东方日升低银含浆料的组件可靠性测试

HJT 高效电池具备质量优异的钝化，这也就对组件封装提出了更高的要求。伴随着新的封装技术的优化，HJT 高效组件会做到更好的绝氧和阻水，这也从组件层面保证使用了低银含技术组件的可靠性。

IEC-61215 标准中规定了不同的耐候性和老化测试，包括高温高湿（85℃+85%RH）1000 小时（DH1000）、高低温（-40℃/85℃）循环 200 次（TC200），为了最大限度的验证低银含浆料的极限，我们在标准测试的基础上进行了 6 倍 IEC 标准的极限测试。

低银含浆料选取了四种样品，其中，低银含 1.0/2.0 搭配 V1/V2 代表了四种不同的型号。

DH 测试如图 4.1 所示。从 DH2000 测试来看，纯银浆料衰减率为 1.92%，低银含 1.0-V1、低银含 1.0-V2、低银含 2.0-V2 均优于纯银浆料，而且 DH6000 之后的衰减率均小于 3%，这是非常优异的成绩；低银含 2.0-V1 结果稍差，但 DH6000 后衰减率还能控制在 5%以内，也满足 IEC 标准的要求。

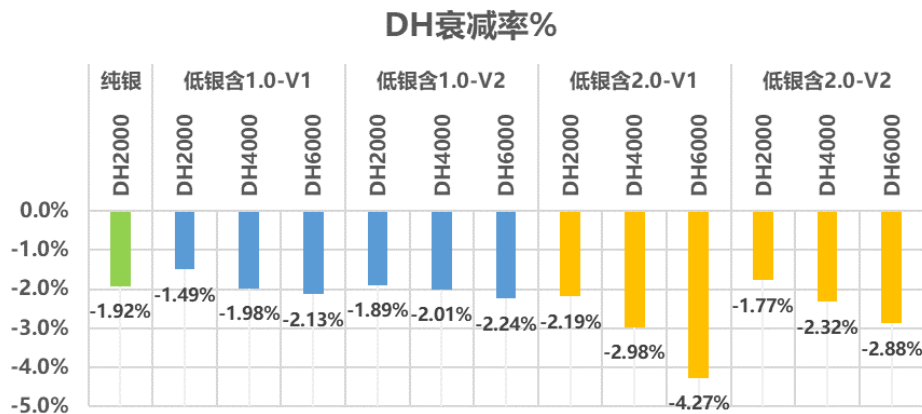


图 4.1 DH 测试衰减图

TC 测试如图 4.2 所示，纯银浆组件 TC400 的衰减率为 0.67%，而这四款低银含浆料的结果均优于纯银浆，在经过 TC1200 的测试后，低银含 1.0-V1 甚至产生了 0.57% 的增益，而低银含 2.0-V1 与低银含 2.0-V2 也几乎可以认为没有衰减，只有低银含 1.0-V2 存在稍微大一些的衰减，但结果仍然是非常优异的。

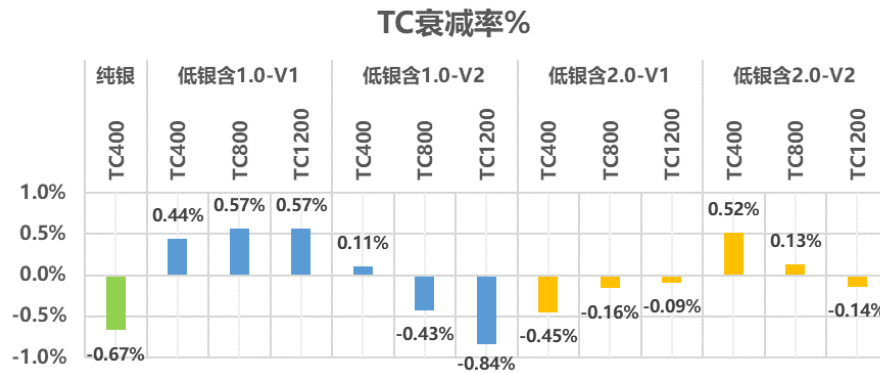


图 4.2 TC 测试衰减图

综上所述，与纯银浆的产品相比，使用低银含浆料产品的 DH、TC 测试均能满足要求，甚至更加优异，尤其是经历多倍 IEC 标准后依然能够大部分控制在 3% 以内，这说明使用低银含浆料电池的组件完全可以达到甚至超出使用纯银浆料电池的组件的性能水平。

## 5、使用不同银含量浆料电池的组件发电量对比

加严的耐候性老化测试结果已经证明了使用低银含量浆料异质结电池的组件可靠性，那么使用低银含量浆料是否会对组件的发电量带来影响？为此，东方日升在常州金坛基地的实证电站对纯银浆料组件和低银含量浆料组件进行实际发电量的监测和对比。

实证测试从 2023 年 2 月 8 日开始，从收集的几个月的数据可以看出两者的等价发电时几乎完全重合，如图 5.1 所示，这证明了使用低银含量浆料电池的组件具备与使用纯银浆料电池的组件相同的发电能力，也说明使用低银含量浆料对异质结产品的发电量不会带来影响。

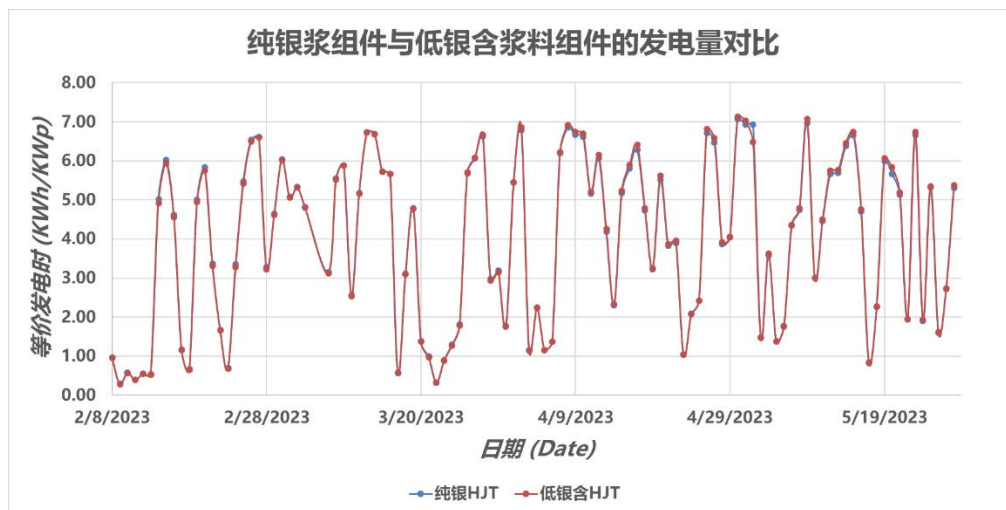


图 5.1 纯银浆组件与低银含量浆料组件发电量对比图

## 6、综述

本文以“低银含金属化浆料的开发及应用”为切入，阐述了东方日升在异质结技术降本之路上的一些探索和成果。通过对低银含浆料的材料选择、浆料包覆工艺的优化、光电热对低银含浆料性能的影响以及组件端的可靠性测试和发电量对比，充分证明了东方日升低银含金属化浆料的高可靠性及可量产性。目前，随着异质结伏曦技术的产业化应用，东方日升 HJT 电池的纯银耗量已降低至 10mg/W，处于行业领先水平，预计未来每季度下降 1mg/W，实现更低银含金属化浆料的应用。

“降本增效”是光伏人永恒不变的主题，东方日升将继续从低银含金属化浆料的应用、设备国产化、超薄硅片的应用等多方面降低异质结电池与组件的成本，同时进一步提升电池效率与组件可靠性，加速推进异质结技术的产业化进程。



## 引用文献

- [1] 引自财通电新的光伏产业链数据库
- [2] 白银价格历史走势图 <https://zh-hans.bullionvault.com/silver-price-chart.do>.
- [3] 维基百科之电导率  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical\\_resistivity\\_and\\_conductivity](https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity_and_conductivity).
- [4] 金属价格历史走势图，链接末尾的 metal-price 分别需要替换为 copper-price、aluminum-price、zinc-price、nickel-price  
<https://markets.businessinsider.com/commodities/metal-price>.
- [5] C M Liu, et al. ITO as a Diffusion Barrier Between Si and Cu[J].  
Electrochem, 2005.