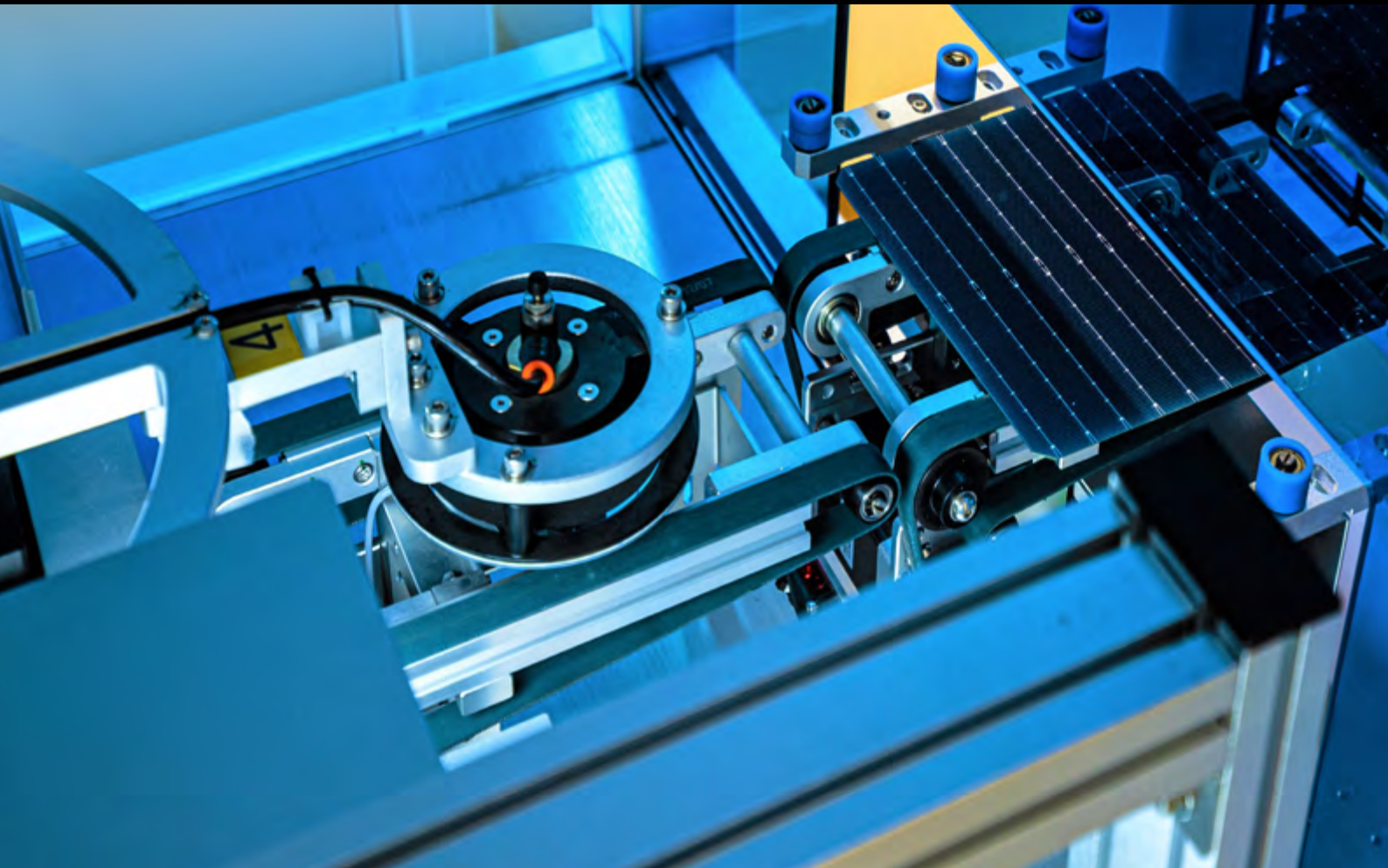


# TOPCon 电池技术报告

2021 Edition



市场瞩目的 PERC 技术继承者

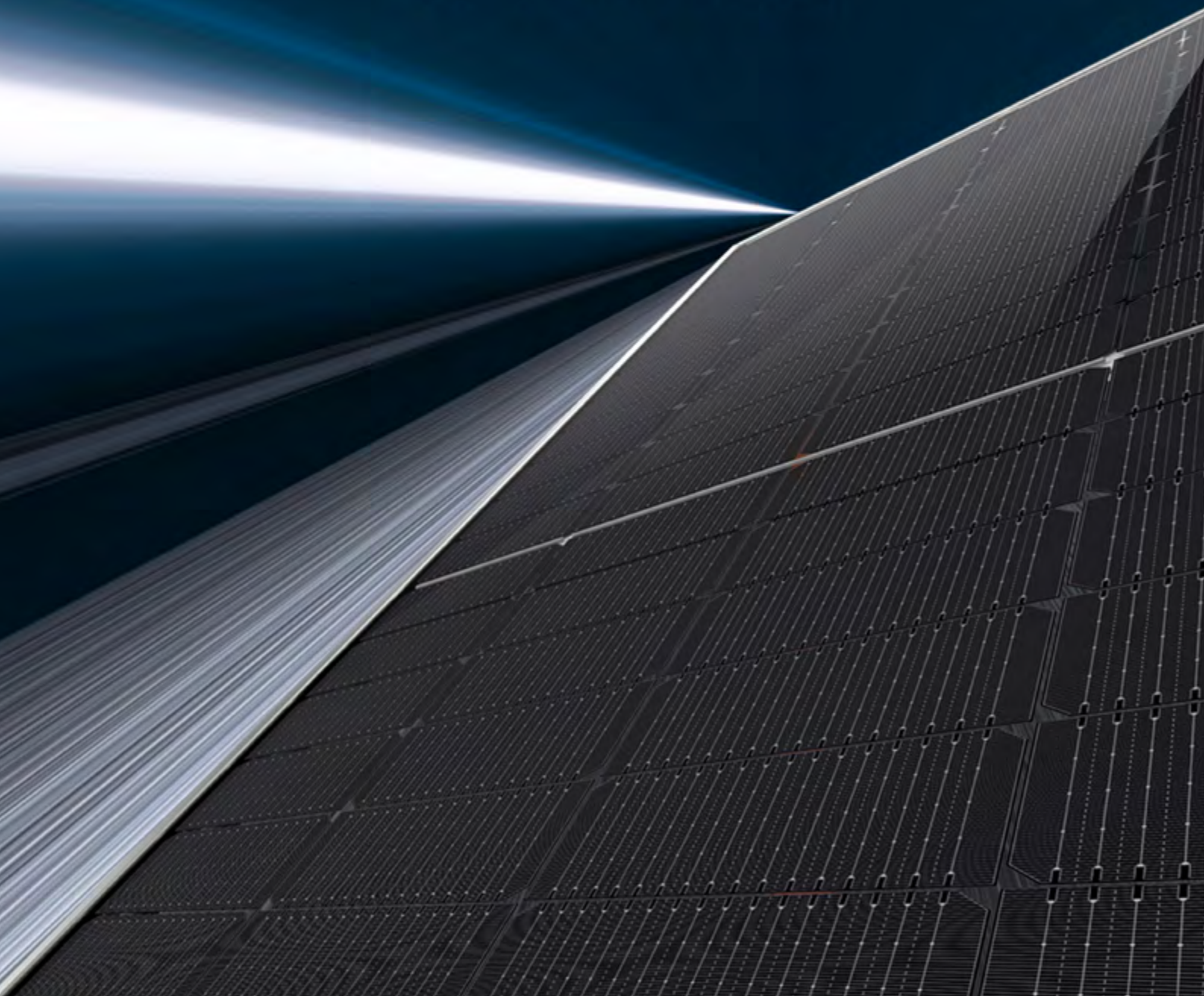
Authors: Shravan K. Chunduri, Michael Schmela



*Solar*  
**JinkO**

**TIGER Neo · 620w**

非凡N型



# 概要

在提高光伏电池效率上，选择使用正确的技术是一个重要的方面。当前 TOPCon 技术又重新引起了业内大量关注，SNEC 2021 展会上也出现了众多的使用 TOPCon 技术的产品。处于领先地位的各家 TOPCon 厂商彼此之间也正在展开电池效率的竞争。TaiyangNews 在两年前已在当时发布的《高效电池技术报告 2019》中介绍了 TOPCon 技术，但业内对当下对 TOPCon 技术的关注又促使我们再次进行全面的调研。

该技术的核心在于钝化触点以降低金属化区域的复合。理论上，该种技术电池应用一层薄薄的氧化硅，外覆多晶硅，随后进行掺杂。常规量产中在 n 型电池的背面应用这种结构。

沉积技术在 TOPCon 工艺中发挥着关键作用。早期投入该技术的研究者借鉴半导体行业的方法，使用 LPCVD 沉积多晶硅。然而，这种方法存在环绕问题，需要解决。这不仅会增加所需的工艺步骤和成本，还会导致产能的降低。针对这个问题，光伏行业开始使用改进的水平装载 LPCVD 配置，以将环绕问题限制在一定范围之内。其他几种沉积技术也同时在不断发展。今天，几乎所有光伏领域已知的沉积技术，包括 PECVD、PVD 和 PEALD，都有适用于 TOPCon 的设备方案。这些设备旨在涵盖电池背面工艺所需的不同方面——隧道氧化物制备、多晶硅的沉积和随后的掺杂。更重要的是，它们已经能够处理包括 210 毫米 (G12) 在内的大尺寸硅片。

除了沉积之外，TOPCon 工艺还涉及了 PERC 技术之外的一些步骤。其中一个是通过硼扩散形成发射极。退火可能是另一个所需的额外的步骤，具体取决于多晶硅掺杂机制。与 PERC 一样，TOPCon 也需要发射极钝化，但使用的电介质极性是相反的。

金属化过程本身不需要任何更改。然而，这些浆料需要在低温下进行一定程度的优化，该技术也需要双面使用银浆。电镀将是减少银耗以降低成本的有效替代方案。

TOPCon 的理论效率潜力最高，为 28.7%，而 ISFH 的最高实验室效率为 26.1%。晶科能源保持着量产电池效率的当前记录，为 25.25%，而几家制造商的平均生产效率已超过 24%。多家公司推出了不同的 TOPCon 组件，这从今年 SNEC 推出的产品数量中可见一斑。至于额定功率，中来光电凭借其由 66 片 G12 电池的 700 W 组件位居榜首。

在安装应用层面，早期的 TOPCon 组件主要用于对于成本接受度较好的屋顶项目。不过，最近随着市场向大尺寸组件的转变，领先供应商的最新产品系列主要集中在电站规模的应用上。对此 TOPCon 组件的一个重要优势是其较低温度系数 ( $0.32\%/^{\circ}\text{C}$ )，这使其适用于高温环境。TOPCon 架构基于 n 型硅片，不受 LID 的影响，并且由 LeTID 造成的性能损失可以忽略不计(如果有的话)。虽然 TOPCon 组件的双面率不是 n 型电池中最高的，但高于 PERC。

中来光电拥有最大的 TOPCon 产能，电池 2.1 GW，组件 3 GW。一些公司已经启动了大规模的测试产线，以及扩产计划。就目前情况而言，TOPCon 的资本支出比 PERC 高约 20%。然而，随着 TOPCon 获得更多关注以及随着更多供应商的加入，基于不同沉积技术的设备所需的资本支出预计都会有所减少。双面银浆的使用和 n 型硅片是该技术生产成本较高的主要因素，进一步优化可以节省该技术的成本。

Enjoy reading our report on TOPCon Solar Technology – 2021 Edition



**Shravan K. Chunduri**  
Head of Technology, TaiyangNews  
[shravan.chunduri@taiyangnews.info](mailto:shravan.chunduri@taiyangnews.info)  
+91 996 327 0005  
Hyderabad, India



**Michael Schmela**  
Managing Director, TaiyangNews  
[michael.schmela@taiyangnews.info](mailto:michael.schmela@taiyangnews.info)  
+49 173 15 70 999  
Duesseldorf, Germany

## 引领行业技术革命

**25.21%**

N型TOPCon转化效率

**25.19%**

P型TOPCon转化效率

**26.30%**

HJT技术转化效率

# 目录

## 01

### 简介

7

## 02

### TOPCon 基础知识

9

- 钝化基础
- 量产 TOPCon 结构
- TOPCon 发展概览

## 03

### TOPCon 工艺

14

- 沉积技术
  - LPCVD
  - PECVD
  - 基于 PVD 的技术
- PEALD
- APCVD
- 沉积技术的比较
- 与 PERC 相比额外的工艺步骤
- 金属化

## 04

### TOPCon 性能

31

- 电池效率
- TOPCon 组件功率
- TOPCon 在安装应用中的表现

## 05

### TOPCon 的商业化及生产

38

## 06

### 成本

39

## 07

### 挑战及机遇

39

## 08

### 结论

40

## 07

### 专访

41

- 中来光电陈嘉博士

**TAIYANGNEWS**

ALL ABOUT SOLAR POWER

© TaiyangNews 2021

All rights reserved.

TOPCon Solar Technology Report 2021

ISBN 978-3-949046-08-7

The text, photos and graphs in this report are copyrighted (cover photo credit: Jolywood). TaiyangNews does not guarantee reliability, accuracy or completeness of this report's content. TaiyangNews does not accept responsibility or liability for any errors in this work.

#### Publisher:

TaiyangNews UG (haftungsbeschränkt)

An der Golzheimer Heide 23

40468 Duesseldorf, Germany

[www.taiyangnews.info](http://www.taiyangnews.info)

#### Advertisers:

- JinkoSolar p. 2
- LONGi Solar p. 4
- Jolywood p. 6
- Chint p. 8
- Nines PV p. 26
- Solarmet p. 28
- Cybrid p. 39
- SNEC p. 43
- CSPV p. 45

# Niwa<sup>®</sup> 系列 N TOPCon组件



## Niwa Max

最高功率      组件效率  
**700W    22.53%**



10%-30%额外发电增益



0 光致衰减



更低度电成本

## Niwa Super

最高功率      组件效率  
**615W    22.00%**



更优弱光响应



更优的温度系数



更广泛的应用性

# 1. 简介

这次的 SNEC 2021 展会对于光伏从业者来说是一个大开眼界的机会，确实带来了不少惊喜，其中最令人惊讶的可能要数业界对 TOPCon 的青睐了。在展会上，我们可以明显地看到，关于 TOPCon 技术的研发，不再只是一些主流制造商在孤军奋战，已经有不少追随者开始涌现出来，让我们大吃一惊。此前，我们在 TaiyangNews 超高功率组件线上对 SNEC 2021 进行了预览，我们意识到，大家对 TOPCon 的兴趣正在增加，尽管还处于比较低的水平。但随着一系列基于 TOPCon 的产品在这个世界上最大的光伏贸易展上发布，一切都不言而喻了。

TOPCon 电池技术是由德国弗劳恩霍夫太阳能系统研究所 (Fraunhofer ISE) 开创的一项电池专利技

术，业内通常在口语用 TOPCon 代指钝化接触电池技术。在 TaiyangNews [《高效电池技术 2019》](#) 报告中有已对 TOPCon 技术有过介绍。迄今为止，这个领域已经有了大量发展。作为该技术的行业先行企业中来光电，一直在从事 TOPCon 相关产品的量产，同时他们也在致力于进一步改进该技术，并宣布正在开发新的第二代 TOPCon。除了中来光电之外，其他一些公司也宣布取得了该技术的新效率水平，同时也吸引了一些新的设备制造商为 TOPCon 提供生产解决方案。包括隆基、晶科、晶澳等一些公司也在 SNEC2021 展会中推出了其 TOPCon 组件产品。在这次更新的 TaiyangNews [《TOPCon 电池技术报告》2021 版](#) 中，我们将对 TOPCon 的量产和工艺相关的最新发展做一个深入探讨。



Source: Jolywood

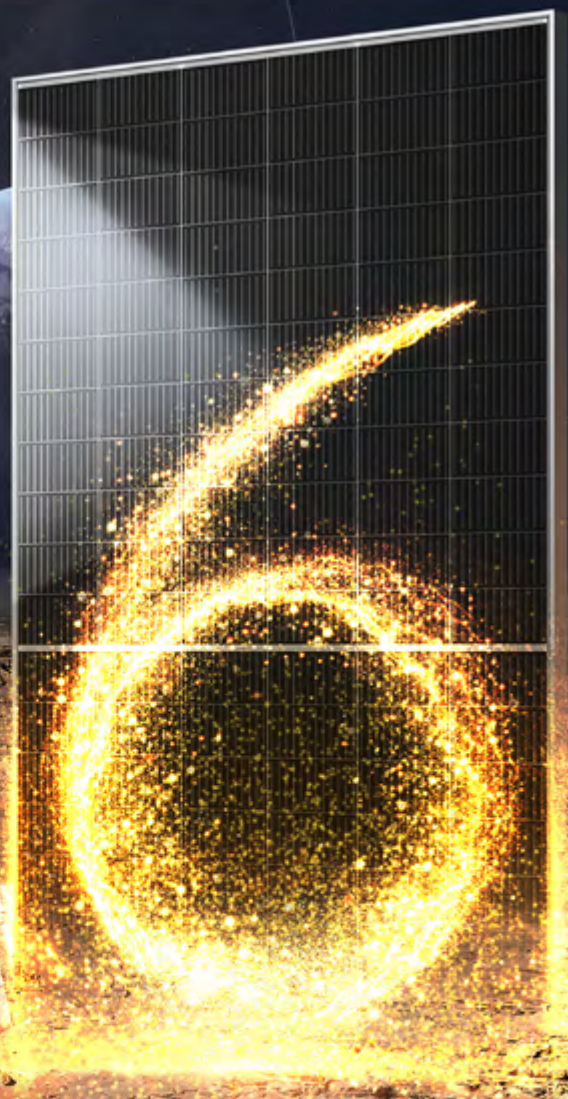
备受青睐：虽然当前中来光电是唯一一家 GW 级量产 TOPCon 产品的公司，但最近又有几家公司宣布将量产 TOPCon 组件。

CHNT

正泰新能源

# ASTRO 6 670W

大型地面电站高能优选  
ASTRO Series Module



缔造持久高效绿色能量

Create Sustainable and Efficient Green Energy



欢迎关注正泰新能源微信

SH: 601877



## 2. TOPCon 基础知识

所有先进的电池技术都有不同的电池结构，并各自遵循不同的工艺流程。与常规 PERC 电池相比，TOPCon 电池多了几个额外的工艺步骤。在其他先进的电池技术中，IBC 工艺也作为 PERC 的延伸而被推广，而 HJT 则遵循完全不同的制备流程。不过，从更广泛的角度来看，钝化方案是所有这些高效电池技术的关键区别因素。而根据钝化结构调整金属化工艺则是实现所有这些先进电池技术的另一个重要部分。钝化接触 (TOPCon) 这一技术的命名中也体现了其钝化特性的重要性。在详细介绍该技术之前，下面一小节主要总结了各种先进电池技术相关的钝化机制。

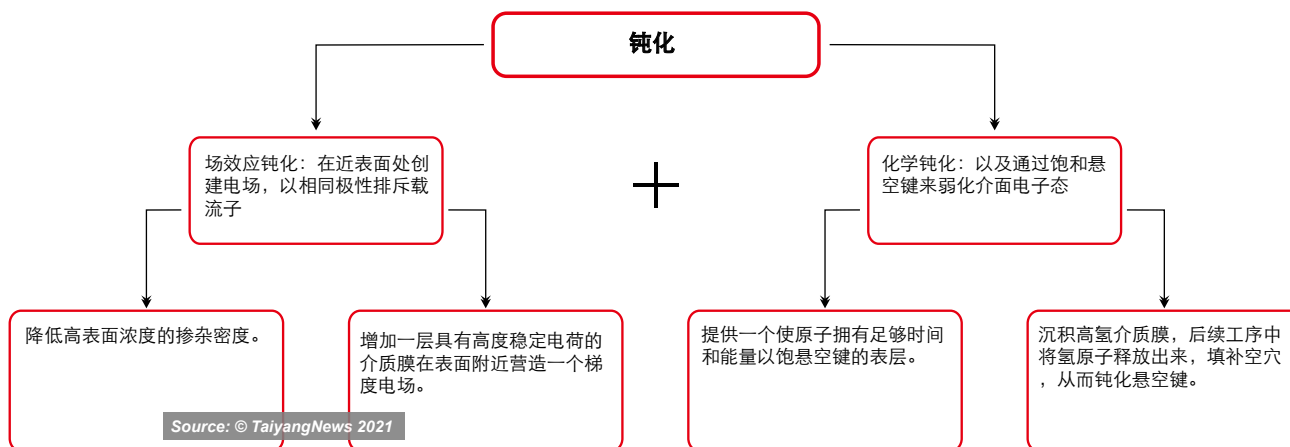
### 2.1 钝化基础

作为基本原材料的硅片在进入电池产线时仍然存在固有的缺陷。最突出的是表面缺陷，这主要是从硅锭上切割硅片过程中硅片表面晶格被破坏而形成的。硅原子周期性排列的中断导致悬挂键的存在，从而形成复合中心。而钝化的过程是通过使这些缺陷失去活性，来减少电荷载流子的表面复合，从而保证电池的效率。

主要有两种互补的钝化方法：一是极大地减少一种极性的载流子到达表面的数量，二是通过使悬挂键饱和而减少界面态。其中，后者同样可以通过两种方式实现：一种是在一定的条件下简单生长一个表面层，使原子有足够的时间和能量达到最佳能级，从而使表面悬空键饱和。或者，可以沉积一层富 H 的电介质层，通过其在烧结过程中释放的游离氢来占据悬空键的空位，从而起到钝化效果。这种方法被称为**化学钝化**。此外还存在另一种**场效应钝化**机制，通过在表面附近产生一个电场，可以阻止类似极性的电荷载流子靠近。这种效应可以通过从高表面浓度向下依次降低掺杂密度的方法来实现。或者，也可以通过施加一个具有高固定电荷的电介质层在表面附近产生电场梯度，从而形成场效应钝化（见图）。遵循这一基本原则，每一种先进的电池结构都具有其特定的钝化方案。

**PERC:** 相对于常规的铝背场 (BSF) 电池体系结构而言，PERC 电池最突出的升级也与钝化有关，而且 PERC 已经广泛取代了 BSF 电池技术。虽然铝提供了场效应钝化，但 PERC 通过在常规电池背面应用

## 晶硅太阳能电池的钝化



钝化的基本原理：硅片表面的钝化可以通过两种途径完成——化学钝化和场效应钝化，而且这两种方法是互补的。

各电池技术的关键特性

电池技术	关键工艺	主流硅片	钝化			金属化	额外步骤
			硅片的侧位	电介质	应用方法		
PERC 钝化发射极背场点接触电池	背表面钝化技术代替铝背表面场	单晶 / 多晶	前	氮化硅	PECVD	背表面场铝浆, 背电极银浆, 正面低温银浆	激光接触开孔, 背面抛光
		单晶 / 多晶	背	氧化铝 / 氮化硅 (覆盖层)	PECVD, ALD / PECVD,		
		单晶		氮氧化硅 / 氮化硅 (覆盖层)	PECVD		
PERT 钝化发射极背面全扩散电池	前后表面都进行全扩散和表面钝化	n 型	前	氧化铝, 氧化硅, 硼硅玻璃 / 氮化硅 (覆盖层)	PECVD, ALD, 扩散 / PECVD, 热氧化, 湿化学法,	正反面均使用银浆, 其中正面是铝掺杂的银浆	硼扩散, 前表面钝化, 基于湿化学法的清洗步骤
			背	氮化硅	PECVD		
PERL 钝化发射极背面局域扩散电池	前后表面都进行钝化, 其中背表面在金属接触区域是局域扩散的	n 型	前	氧化铝, 氧化硅, 硼硅玻璃 / 氮化硅 (覆盖层)	PECVD, ALD, 扩散 / PECVD, 热氧化, 湿化学法,	正反面均使用银浆, 其中正面是铝掺杂的银浆	硼扩散, 前表面钝化, 激光局域掺杂, 基于湿化学法的清洗步骤
			背	氮化硅	PECVD		
钝化接触	生长的超薄氧化铝能使载流子隧穿通过, 多晶硅的沉积和掺杂	n 型	前	氧化铝, 氧化硅, 硼硅玻璃 / 氮化硅 (覆盖层)	PECVD, ALD, 扩散 / PECVD, 热氧化, 湿化学法,	前表面铝掺杂的银浆, 特殊的背接触银浆, 所有电极能承受低温烧结工艺	硼扩散, 前表面钝化, 基于湿化学法的清洗步骤
				背	氧化硅 (薄) *		
				多晶硅 *	LPCVD, PECVD, APCVD, PEALD, PVD		
HJT 异质结	在掺杂的晶硅衬底 (n 或 p 型, 前者正在被广泛使用) 和具有相反电导率的非晶硅层 (分别是 p 或 n 型) 之间形成异质结	n 型	前 / 背	非晶硅	PECVD	需要低温固化浆料, 电镀也是一种潜在的替代方法	特殊的湿化学清洗工艺, 透明导电氧化物的沉积
IBC 插指式背接触	背表面交替进行 n+ 和 p+ 掺杂	n 型	前	氧化铝, 氧化硅, 硼硅玻璃 / 氮化硅	PECVD	正负电极均位于背表面	掩膜和清洗工艺

Source: © TaiyangNews 2021

\* Used in combination

关键点特性：各种晶硅电池技术的最大区别在于钝化机理和金属化方案。

氧化铝电介质层来提供一个全面的化学钝化。这种电介质，除了提供良好的化学钝化外，还利用自身高的正电荷来提供场效应钝化。

**n-PERx**：有两种主要的基于 n 型硅的电池体系结构，即 PERT 和 PERL，这两种结构都有着各自优异的钝化特性。PERT (钝化发射极，背面全扩散) 需要通过二次扩散形成一个磷背场 BSF，从而对场效应钝化起到增强作用。化学钝化是通过在正反两面沉积一层电介质层来获得。**PERL** (钝化发射极及背面局部扩散) 是 PERx 家族的另一个成员。这种结构结合

了 PERC 和 PERT 的优点。与 PERC 一样，电池的正反面都经过钝化处理，但是 PERL 仅在背面电极接触区域进行局部扩散。

**钝化接触**技术是一种采用新一代钝化技术的先进电池结构。除了满足表面钝化要求之外，它也旨在解决之前讨论的电池结构存在的一个主要缺点，即在大多数电池结构中形成的金属接触区域会形成高度活跃的复合中心，进而造成损失。这里可以通过插入一个更宽的带隙层，将金属电极与吸收层进行电子分离来避免。从定义上讲，钝化接触涵盖了许多包括 IBC 和

HJT 在内的其他光伏技术。

然而，本报告的范围仅限于采用隧穿氧化层的钝化接触结构，这种结构能够保证多数载流子通过，同时阻止少数载流子复合。此外该技术还具有载流子选择性，有利于电子和空穴的收集，因此可以将其应用于硅片的两侧。一些研究中心将这项技术命名为 TOPCon、Monopoly、POLO 等等。不过，业界尤其是中国的光伏产业，选择了 TOPCon 作为钝化接触的通用缩写。更准确地说，这种结构适用于 n 型硅片的背面。这一电池技术先是应用一个超薄的氧化硅层，使得电荷载流子可以“隧穿”通过，并在其上沉积一层多晶硅，随后进行掺杂。这种叠加的组合使得电流可以几乎没有任何损失地流出电池。其中，氧化硅提供了极好的化学钝化作用。重掺杂的多晶硅表面排斥少数载流子，因而提供了不错的场效应钝化效果。薄的隧穿氧化层具有高选择性，它允许多数载流子在非常低的结电阻下隧穿通过，这里意味着电子能够很容易地穿过氧化层。除了提供良好的化学钝化和场效应钝化，TOPCon 结构还具有良好的多数载流子选择性和吸收层与掺杂层之间快速的载流子输运能力。

## 2.2 量产 TOPCon 结构

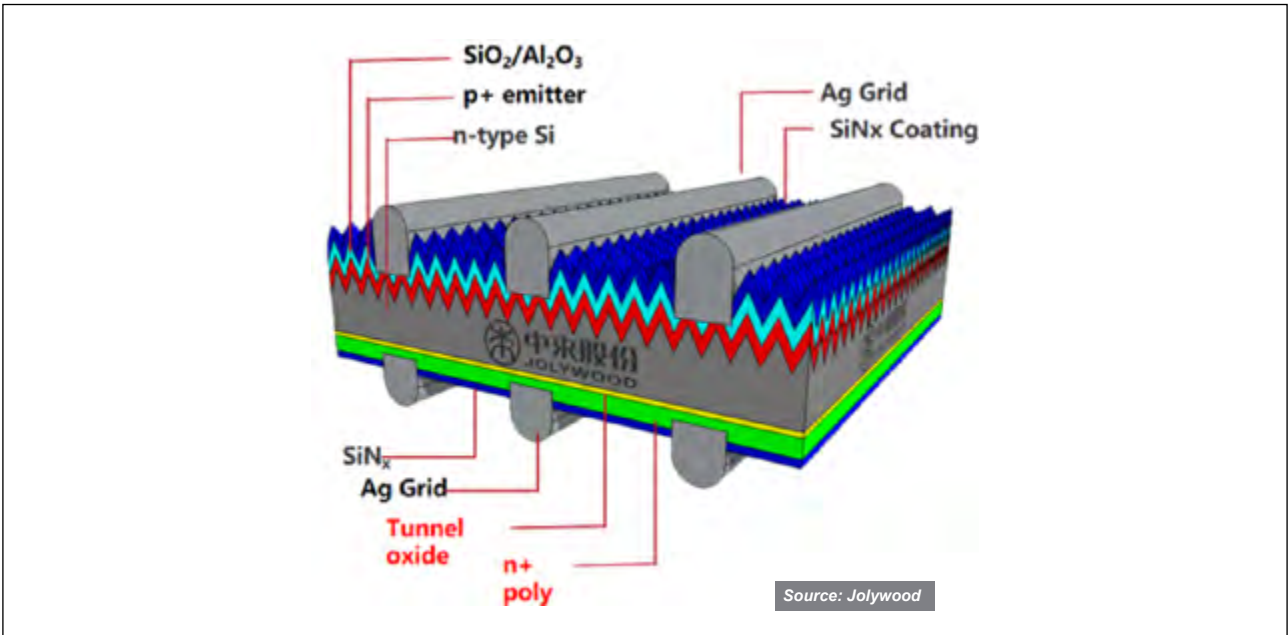
从原理上讲，TOPCon 是一种在半导体表面形成的结合了钝化和接触功能的结构。目前，行业中所提及的 TOPCon 方案一般泛指将这种钝化接触结构应用于常规晶硅电池制造，并使之与高温工艺相兼容。这种结构原则上可以应用于硅片的任意一面，也适用于 p 型硅和 n 型硅片。然而，由于多晶硅具有与晶体硅相似的带隙，在电池正面使用掺杂多晶硅时会导致比较大的吸收损耗。虽然有一些方法可以规避由此产生的不必要的吸收造成的损失，但由于涉及复杂精密的遮蔽和蚀刻工艺，将该方式运用于生产尚不成熟。因此，“钝化接触”在行业中主要用于背面处理。至于应该使用哪种基片的问题，显然在 PERC 电池结构上添加 TOPCon 结构并不具有经济性。因此，业界大多数人继续在 n 型硅片的背面设计钝化接触结构。

附图是来自中来光电的 TOPCon 太阳能电池结构示意图，作为这一领域的先行企业，中来目前在 TOPCon 的量产方面处于领先地位。基于 n 型硅的结构采用氧化铝和氮化硅电介质层来钝化 p+ 硼扩散发射极。在背面，一层非常薄的 1 纳米隧穿氧化层被覆盖于 n+ 多晶硅和氮化硅之下，最后电池正反面刷上



Source: Jolywood

钝化是关键：TOPCon 结构的关键是对表面进行钝化，尤其是背表面的钝化。



原理图：在今天的工业角度来看 TOPCon 是在电池背面利用氧化硅和掺杂多晶硅对 n 型硅片的硼发射极进行钝化处理。

银电极。

## 2.3 TOPCon 发展概览

利用氧化硅和掺杂多晶硅来作钝化接触并不是一个新概念。这种结构在 20 世纪 70 年代首次用于双极型晶体管的半导体应用。直到 10 年后，也就是 20 世纪 80 年代初，这种方法才在光伏相关应用中得到实施。著名的澳大利亚太阳能科学家马丁·格林在 1983 年开发了使用隧穿氧化层和多晶硅层的电池结构。2009

年，SunPower 公司推出了一种基于隧穿层钝化技术的 IBC 电池结构，使该技术首次投入商业应用。德国研究机构 Fraunhofer ISE 在 2014 年宣布其基于该技术制备的小面积电池的效率达到 23%，并将其电池结构方案命名为 TOPCon。目前该研究机构仍然保持着 TOPCon 电池 25.8% 的最高效率记录。研究机构 ISFH 将钝化接触技术应用于 IBC 结构，开发了一种名为 POLO 的电池结构，在 2018 年创下了 26.1% 的效率记录。

### 钝化接触与早期 PERC 技术的相似点

	衬底	氧化物薄膜	多晶硅	金属化	其他
钝化接触	<ul style="list-style-type: none"> <li>P 型</li> <li>N 型</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>湿化学处理？</li> <li>UV？</li> <li>热处理？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>PECVD？</li> <li>LPCVD？</li> <li>原位掺杂？</li> <li>非原位掺杂？</li> <li>退火？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>蒸发？</li> <li>丝网印刷？</li> <li>TCO？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>电池结构？</li> <li>工艺流程？</li> <li>产业成熟度？</li> <li>产量？</li> <li>成本？</li> </ul>
	衬底	钝化	AlO <sub>x</sub>	金属化	其他
PERC 2014 年	<ul style="list-style-type: none"> <li>P- 型？</li> <li>LID？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>AlO<sub>x</sub>:H？</li> <li>热生长 SiO<sub>2</sub>？</li> <li>SiO<sub>x</sub>Ny:H？</li> <li>SiNx:H 覆盖层？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ALD？</li> <li>PECVD？</li> <li>PVD？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>LFC？</li> <li>激光 / 化学</li> <li>开槽？</li> <li>蒸发？</li> <li>丝网印刷？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>电池结构？</li> <li>工艺流程？</li> <li>产业成熟度？</li> <li>产量？</li> <li>成本？</li> </ul>

Source: Trina Solar; graphic: © TaiyangNews 2021

几个问题：与 PERC 一开始的情况类似，关于如何实施钝化接触技术，有几个问题需要回答。

由于目前常规 PERC 电池的效率预计很快将达到极限，业界正在认真评估下一代技术——钝化接触。钝化接触技术当下正处于其进入商业化进程的初步时期。事实上，如果我们回想 2014/2015 年整个光伏行业开始从 BSF 升级至 PERC 的情景，当下从 PERC 升级到 TOPCon 有着和当时 PERC 替代 BSF 相类似的优势。一方面电池性能特别是在 Voc 上有约 20 mV 的提升，另一方面技术升级也仅需要两到三个额外的工艺步骤以及相应的生产设备。和当时的

PERC 一样，钝化接触技术的产业化同样也面临几个问题（见表）。

根据 ISFH 在 2018 年发表的计算结果，PERC 的理论极限效率为 24.5%，HJT 为 27.5%，TOPCon 最高为 28.75%，非常接近单晶硅电池所达到的极限效率，这预示了 TOPCon 结构的理论效率潜力。

效率极限对比

nmax[%]	Electron-selective contacts						
	P-diffused n+	a-si:H(i) / a-si:H(i)	SiOx (thermal) /POLY-Si(n+) PECVD	SiOx (thermal) / POLY-Si(n+) LPCVD	SiOx (chemical) / POLY-Si(n+) LPCVD	Siox / TiOy	MgOx
Al-p+	24.5 (PERC)	26.8	26.9	27.1	27.1	26.3	24.9
a-si:H(i)	24.7	27.5 (HIT)	27.7	27.9	28	26.8	25.1
SiOx /poly Si(p+)	24.9	28.1	28.3	28.7	28.7	27.3	25.4
SiOx /Si:C (p+)	24.9	28	28.2	28.5	28.6	27.2	25.3
a-si:H(i)/MoOx	24.4	26.5	26.6	26.8	26.8	26	24.7
MoOx	24.1	25.9	26	26.1	26.1	25.5	24.4
PEDOT:PSS	24.1	26	26.1	26.2	26.2	25.6	24.5

Source: ISFH, Table: © TaiyangNews 2021

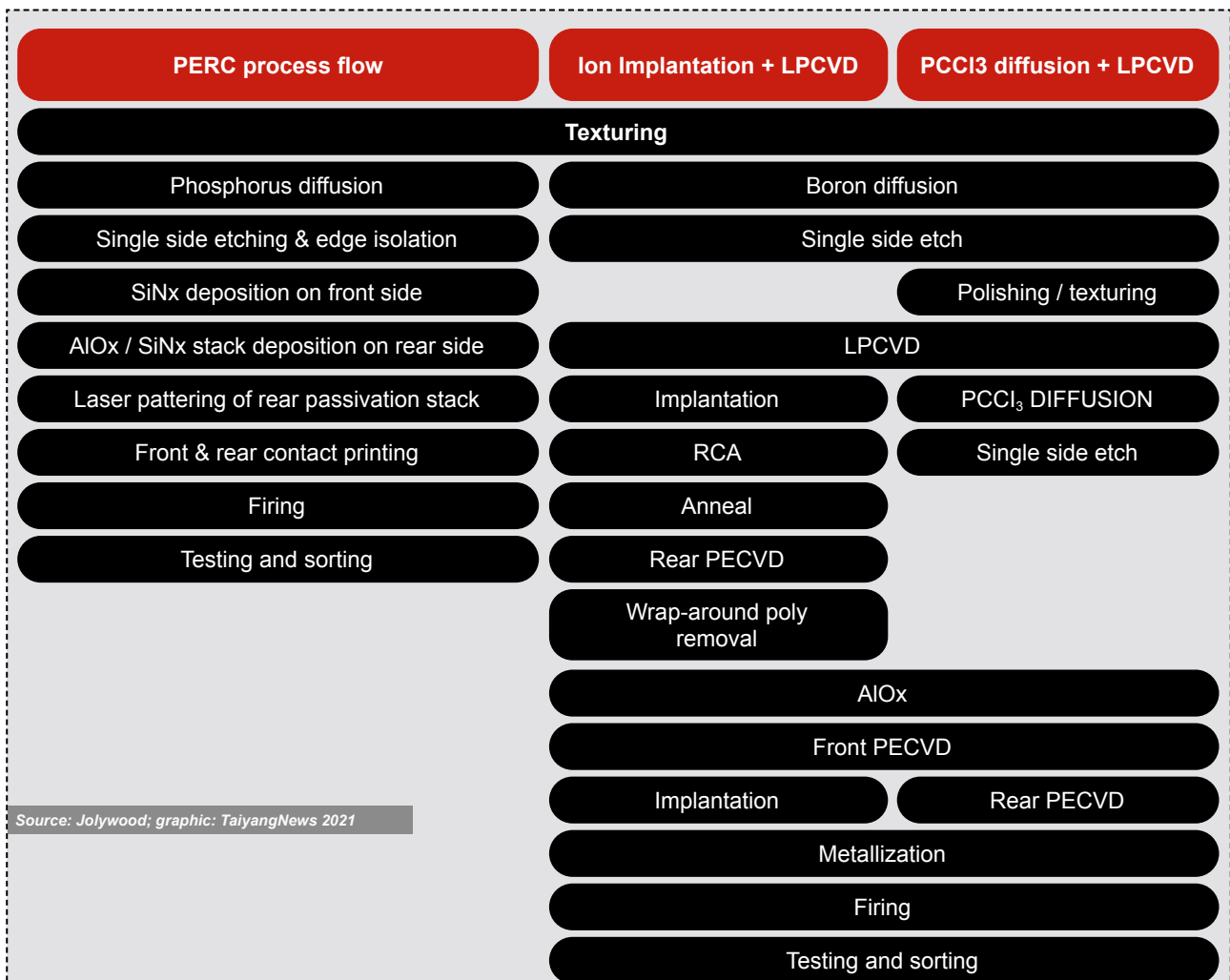
非常接近极限：根据 ISFH 的计算，TOPCon 在几种高效电池技术配置中具有最高的 28.75% 的理论效率潜力。

### 3. TOPCon 工艺

钝化接触的基本原理是为了实现全背面金属接触。为了在现实中实现这一点，需要两步工艺：界面氧化硅的生长和本征多晶硅层的沉积，随后进行掺杂。原则上，从 n-PERT 升级到钝化接触时，需要三个额外步骤。与 PERC 相比，由于 TOPCon 通常在 n 型上使用，它需要在后续的清洗步骤中进行硼扩散来形成发射极。虽然 PERC 有两个综合的清洗步骤，而 TOPCon 至少需要三个。即使是 BSF 电池也可以直接升级到 TOPCon。即使是如今很少见的 BSF 技术，也可以绕过 PERC，直接升级到 TOPCon 技术。

从形成发射极开始，也可以从背表面处理工艺开始。由于该技术发展尚处于起步阶段，且每一步都有多种完成方式，因此，根据所选择的技术方案，其涉及的工艺顺序和步骤也有所不同的。通常来说，电池加工的第一步准备工作都是先利用湿法清洗去除表面切割损伤和制绒。大多数 TOPCon 制造商似乎都选择了从形成发射极开始的工艺方案。这种方法使制造商能够将需要高温推进的硼扩散工艺安排在最前面，从而保证电池结构的其余部分，特别是非常薄的隧穿氧化层免于面对高温的环境。硼的扩散也可以通过离子注入实现，在这种情况下上述限制不适用。

TOPCon 的工艺流程有几种不同的方案。它可以



Source: Jolywood; graphic: TaiyangNews 2021

典型的工艺流程：虽然有几种不同的 TOPCon 工艺流程，但氧化硅和掺杂多晶硅层的应用是该工艺的关键。

然而，**Semco Smartech** 等公司已经开发了一种从背表面处理开始的工艺，完全去除了专门的退火或激活步骤。**Semco** 公司首席执行官 **Raymond de Munnik** 表示：“使隧穿氧化层即使在硼扩散之后也同样有效，这是关键。而且我们证明了这一点。”他对 **Semco** 深厚的 TOPCon 工艺技术知识感到自豪。另一方面，他也承认，工业上习惯于先形成发射极，然后通过单面刻蚀来去除各面的玻璃质。然后再通过湿法刻蚀对背表面进行抛光。下一步是形成薄的隧穿氧化层，同样也有各种各样的隧穿氧化物可供选择。

早期工业上就有一些人使用湿化学方法来形成超薄的氧化层。随后，其他方法也被发展出来，比如等离子体辅助氧化、湿化学盐酸氧化、湿化学硝酸氧化、热氧化和 UV/O<sub>3</sub> 阳极氧化。然而，隧穿氧化物的厚度仍然是一个重要的特性。虽然到目前为止还没有标准，但根据文献，在氧化层较厚的情况下不太可能发生隧穿，因为一般假定在氧化层很薄（约小于 2nm）的情况下才会发生隧穿效应。

众所周知，热生长的氧化硅不仅能提供卓越的化学钝化质量，其设置和处理也都容易完成。并且还可以集成到随后的多晶硅沉积工艺中。随着电池制造商更加注重简化工艺流程，在工具平台允许的情况下，一次性完成氧化物和多晶硅的生长和沉积是首选。然而，**Centrotherm** 认为应该将这些步骤分离开来，因为这不仅可以降低成本，还可以提高薄膜质量。在 TOPCon 工艺中，多晶硅的沉积是核心，几乎所有用于光伏的沉积技术都在此环节中得到了不同程度的运用，包括 **LPCVD**、**PECVD**、**APCVD**、**ALD** 和 **PVD**。

沉积后的多晶硅必须进行掺杂，对此也不同意方案可供选择。例如，中来光电采用离子注入来实现多晶硅的 n+ 掺杂，这也可以在管式炉中进行 POCl<sub>3</sub> 扩散工艺来完成。相比之下，虽然离子注入避免了 PSG 刻蚀，但它需要额外的磷源激活步骤。另一种通过某些仪器平台实现的原位掺杂工艺也是同样的情况。而且原位掺杂因其带来的工艺流程的简化而吸引了大量的关注。应用在背面的 TOPCon 结构也会导致正面的寄生沉积，这需要通过湿法处理去除，而剥离多晶硅层的难易程度取决于选择的沉积技术。正面通过 PECVD 单独沉积或 ALD 和 PECVD 联合沉积的氧化铝和氮化硅来钝化。在钝化接触层上再用 PECVD 覆盖一层氮化硅。最后一步在电池两面印刷银浆，然后进行烧结，这样电池就制备完成了，之后准备 IV 测试和分类。

## 3.1 沉积技术

毫无疑问，TOPCon 是一种更加复杂和涉及技术广泛的电池加工工艺。TOPCon 需要在 PERC 的基础上增加大约 3 到 4 个工艺步骤，包括硼发射极的形成，隧穿氧化层的生长，多晶硅的沉积和掺杂，以及附加的扩散工艺后续的清洗工作。在钝化接触电池的制备方面，相关工艺的核心在于三步——界面氧化层的生长、本征多晶硅层的沉积以及多晶硅的掺杂。

如上所述，来自于各大厂商的 LPCVD, PECVD, APCVD, ALD 和 PVD 设备都被推广到制备钝化接触电池的核心处理中。然而，LPCVD 是目前最受欢迎的工具。

### 3.1.1 LPCVD

LPCVD 是一种广泛应用于半导体产业的处理工艺，用于多晶硅的沉积以及硅的掺杂，这正是 TOPCon 所需要的。由于该工艺在半导体产业中已有丰富的应用经验和现成可用的技术，一些欧洲设备供应商将 LPCVD 作为首选。这种热处理工艺是通过在真空条件下用气相前驱体来沉积薄膜。工艺过程中通过降低压力来减少不必要的气相反应，并提高整个硅片成膜的均一性。今天所有被推广用于钝化接触的 LPCVD 设备都能够在同一运行过程中生长隧穿氧化层和多晶硅而不破坏真空。而且所有这些设备供应商提供的 LPCVD 也可用于多晶硅的原位掺杂，至少可以作为一种选择。

在为半导体客户提供多晶硅沉积设备而累积了丰富经验的 **Semco** 公司，也为 TOPCon 开发了一套 LPCVD 解决方案。该公司提供的设备甚至缓解了 LPCVD 技术的一些主要问题。其中一个重大改变在于利用不锈钢室取代易碎的石英反应器。

在 CSPV 2020 会议 TaiyangNews 论坛上，首席执行官 **de Munnik** 在演讲中强调，随着硅片尺寸的增大，会出现许多挑战。他解释称，硅片会存在弓形和 / 或反弓形弯曲。反应腔中的动态加工环境，特别是在加热过程中，可能导致硅片轻微晃动，从而造成断裂。通常采用的背靠背装载方式（即在一个槽内放置两片硅片）会导致前驱体向硅片间隙渗透的风险，从而造成寄生沉积。

**Semco** 对这一问题的解决方案是将硅片水平放置在反应腔中。该公司声称对这种方法拥有 10 年的

批量生产经验，该设计最初用于没有固定形状因子的线带硅片。据 de Munnik 说，从这一经验中得到的教训是，即使在温度上升阶段，重力也会导致硅片弯曲，而水平放置硅片使它们能够在径向和轴向自由移动。这样就消除了加工环境中的压力。此外，水平方向放置使得气体分布与硅片表面平行，同时提供了更高的灵活性来微调工艺窗口。最重要的是，它解决了 LPCVD 的一个关键问题，即绕镀问题。de Munnik 认为，虽然这种方法不会完全消除绕镀，但它确实得到了更好的控制，或至少将其降低到一个可预测的水平。

该公司下一步解决的是技术集成的问题。在销售用于生长薄型氧化层的热氧化炉方面有着相当丰富经验的 Semco，已经能够将这些技术集成到 LPCVD 平台中。通过同时提供原位掺杂处理完成设备集成的最后一步。该公司名为 HORTUS 的 LPCVD 平台完成了在电池背面建立钝化接触结构所需的所有必需工艺。该平台首先进行氧化硅的热生长，并在同一运行过程中，在不破坏真空的情况下，沉积本征多晶硅，并在沉积的后半部分对多晶硅进行掺杂。

对于设备制造商来说，提高产能是个重要的的开发目标，制造商当然希望每批次可以装载越来越多的硅片，从而提高整体生产效率。这意味着设备需要配备越来越多的硅片插槽。但是，可以增加的插槽数量是有物理限制的。反应腔的直径不可能随着硅片的尺寸和长度而不断增加。de Munnik 表示：“这一点现在已经很好理解了，因为许多客户在这种垂直装载设计下使用 M10 或 G12 硅片时遇到了困难，尤其是产量的下降。”de Munnik 强调，为了满足不断增长的产量需求，Semco 自行设计了 3.2 mm 的硅片间槽距（间距），这是对以往装载工艺的重大改进。这种设计使得该公司即使是在高温硼扩散工艺中也能继续使用相同的 3.2 mm 间距。他进一步强调，这种方法有助于加工低至 120 微米的薄硅片，这表明了该公司的解决方案为未来在更薄硅片领域的发展做好了准备。目前较大的 M10 和 G12 硅片厚度在 170 $\mu$ m 以上。一开始每个反应器只能装载 1400 个硅片，现在该公司能做到每个反应器装载 1800 个更大尺寸的硅片。整体设计不仅简化了硅片在花篮上的装载问题，而且花篮本身是中国本地制造的，易于清洗和更换——这证明了该解决方案的成本效益。

Semco 公司的 HORTUS LPCVD 平台采用 6 栈管配置。通过该平台可以将三步工艺全部完成，即隧穿氧化层的生长、多晶硅的沉积和多晶硅的原位掺

杂，每个生产批次可处理 10800 片硅基片。这意味着，G12 尺寸的硅片每小时的加工产量为 5700 片，而 M10 硅片的产量将增加到 6000 片。上述都是针对多晶硅层厚度为 160 纳米的情况。Semco 一直都是早期 TOPCon 开发商的设备合作伙伴，比如韩国的 LG，并且该公司声称这套设备拥有超过 4 年的量产经验。据 de Munnik 透露，他们还向一些量产良率 96% 的主流制造商供应过“几套”设备。

Centraltherm 是另一家重要的设备制造商，它也涉足半导体行业的加工设备供应。该公司也提供基于 LPCVD 的 TOPCon 电池生产解决方案。据该公司高级技术总监 Josef Haase 称，采用 LPCVD，特别是沉积未掺杂的多晶硅，已经成为实现 TOPCon 结构生产的主要途径。虽然其第一代设备已被恰当地设计用于完成这些基本任务，但该公司在其平台上添加了原位掺杂功能，来简化这一流程。然而，增加原位掺杂功能会降低产量。虽然多晶硅掺杂可以通过每批次每管 1600 片的半间距装载完成，但原位掺杂工艺需要更宽的间距，即 4.76mm 的全间距。因此，每批次只能装载 800 片基片。而且由于要额外处理硅烷和磷化氢或二硼烷的混合气体，反应腔变得有点复杂。这方面仍然有待改进。连续掺杂不仅完全取消了 POCl<sub>3</sub> 扩散步骤，而且也避免了 PSG 蚀刻。在原位掺杂阶段，掺杂物的均匀分布只需要一个简短的 RTP 激活步骤。鉴于这种简单的热处理炉价格低廉，退火或激活步骤很容易被制造商接受。而且通过适当的优化，这一步也可以被整合到烧结工艺中。

Centrotherm 公司与其他公司不同，在涉及到隧穿氧化层生长时，并不赞成将这一步整合到一个设备中。“这有可能吗？是的，非常有可能，”Haase 说。然而，我们必须考虑怎样使成本更低。他解释说，在 650 $^{\circ}$ C 下生长隧穿氧化层是可行的，但如果需要更高的温度的话，那么两个炉子会更具成本效益。在一个设备中同时生长隧道氧化层和沉积多晶硅，除了大大增加工艺时间外，还将每批次的加工数量限制在 800 片，特别是选择了原位掺杂的时候，而单独生长隧穿氧化层就可以无缝衔接地一次处理 1600 片半间距装载的硅片。而且，与集成平台相比，在清洁环境中生长的隧穿氧化层质量会更好。Haase 表示，“每家公司都是分开处理的，因为从目前的成本角度来看，这很有意义。”虽然设备平台支持集成加工，但这最终还是看制造商的选择。

Centrotherm 公司推出了一款全新的 c.DEPO X LPCVD 设备系统，基于 10 栈管配置。与其他设备制





Source: Semco

快速完成所有步骤：Semco 的 LPCVD 平台，称为 HORTUS，完成了在电池背面建立钝化接触结构所需的所有必要工艺，并且仍然支持每小时 5,700 片 G12 晶片的非常高的产能。

造商类似，Centrotherm 扩大了设备的加工规模，以适应更大的 210 硅片。根据选择的工艺配方、掺杂配置和工艺集成，该设备可实现每小时 6000 片的产量。多晶硅的厚度是另一个影响产量的参数，目前的流行的标准是在 100 到 150 纳米之间。Centrotherm 已经向“几家”电池制造商提供了 LPCVD 炉。

**拉普拉斯**是另一家中国重要的 LPCVD 供应商，主要专注于基于更大更薄硅片的 TOPCon 电池。该公司于 2016 年成立，并于 2017 年推出了首个 LPCVD 中试产品。最终，拉普拉斯发展成为一家满足 TOPCon 所有热加工需求的一站式供应商，包括提供硼和磷的扩散炉、用于多晶硅沉积和掺杂的 LPCVD、用于在硼发射极上生长钝化层的 PEALD 以及在原位掺杂中激活掺杂源的退火炉。2020 年对该公司来说是关键的一年，当时拉普拉斯与一家未披露的电池制造商签订了 GW 规模的 TOPCon 关键设备供应合同。据 John Jiang 透露，同时该公司还从其他光伏制造商那里赢得了为 TOPCon 试验线提供生产设备的投标。关于 LPCVD，该公司提供了两种不同

的产品平台——一种用于沉积本征多晶硅层，另一种用于原位掺杂。最终该公司还开发了前面工艺需要的磷扩散炉以及掺杂多晶硅需要的退火炉。硼发射极也需要钝化，为此，该公司开发了 PEALD 工具。

拉普拉斯也大力提倡水平方向加工硅片，原因有二：一是要限制硅片的绕镀，二是要解决与大硅片相关的碎片问题。为了克服石英管变形的问题，拉普拉斯在加工过程中使用浆来支持花篮，这样花篮就不会直接放在管中，这是一种最初为硼扩散而开发的方法。撇开细节不谈，拉普拉斯表示已经优化了工艺，将石英器皿的使用寿命提升到至少四个月，据 Jiang 称，这占到成本的 1.5%，该公司计划通过进一步提高使用寿命，将其降低到 1%。

在产量方面，对于尺寸在 190mm 以下的硅片，每管可以装载 2000 片。该设备需要 80 分钟以上来完成本征多晶硅的沉积，再加上原位掺杂的话，所需的沉积时间将达到 3 小时。如果是 G12 硅片，装载量将降至 1600 片。而且净产量取决于管道数量和工艺

### TOPCon 用途的 LPCVD 设备

Company	Centrotherm	捷佳伟创	SEMCO	拉普拉斯	普乐
Model	c.DEPO X	LD-420	HORTUS LPCVD	-	-
Technology	LPCVD	LPCVD	LPCVD	LPCVD	LPCVD
Applications	Tunneling oxide + intrinsic polysilicon + in-situ doping	Tunneling oxide, polysilicon, in-situ doping	Tunneling oxide, polysilicon, in-situ doping	Tunneling oxide + intrinsic polysilicon + in-situ doping	Tunneling oxide + polysilicon
Suitable Fab configuration	-	-	-	-	-
Wafer orientation	-	-	Horizontal	Horizontal	-
Equipment configuration	10-stack tube	4-6-stack tube	6-stack tube	5-6 stack tube	-
Wrap-around	-	-	minimal	minimal	-
In-situ doping	-	Yes	Yes	optional	No
Wafers per tube	1,600 - half pitch loading, 800 full pitch	1,600	1,400	2,000	-
Growth rate	-	-	-	-	-
Oxide layer thickness	-	1.4 - 2.2	-	-	1 - 1.5
Polysilicon layer thickness	100 - 150	80 - 200	160	-	100
Throughput (WPH)	6,000	3,000*	G12: 5,700 M10: 6,000	G12: 7,200 M10: 8,000	3,600
Mechanical Yield (%)	-	-	0.96	-	-
Film uniformity	-	3% within wafer, run to run; 4% wafers of same batch	-	-	-
Footprint	-	-	-	-	-
Uptime (%)	-	-	-	-	-
Commercial status	Ready	-	Ready	Ready	Ready
Already in mass production	Finished testing	-	Yes	Yes	Yes

Source: © TaiyangNews 2021

*\*In-situ doping; \*\* Ex-situ doping*

不同的配置：当前用于 TOPCon 应用的 LPCVD 设备不仅能够处理背面钝化所需的所有任务，而且还提供不同的配置。

配方的选择。比如，5 个管道的配置可以在原位掺杂的情况下处理 3,300 片以上的 M10 硅片。Laplace 的装机量已达到约 3 GW。

普乐新能源是一家中国的设备制造商，目前一直积极为光伏和半导体行业提供各种沉积和加工设备。

该公司也为包括 TOPCon、HJT 和 IBC 在内的高效电池结构提供了生产开发解决方案。对于 TOPCon 技术，该公司提供了两种不同的设备平台——PVD 和 LPCVD。该公司的 LPCVD 平台用于完成隧穿氧化层的生长和多晶硅的沉积。从上料到下料，整个过程只

需 13 个步骤，平均周期时间为 110 分钟。不过，该公司指出，一些公司甚至可以控制在 100 分钟以内。进一步缩短周期时间的一种方法是对多晶硅层厚度的优化，目前厚度在 80 到 150 纳米之间。Polar PV 的 LPCVD 产能每小时达到 3600 片，其中氧化硅厚度为 1-1.5 nm 和多晶硅厚度为 100nm。Polar PV 声称，它为中来光电整个 2.4 GW 的产能提供过 LPCVD 设备。

中国领先的设备供应商捷佳伟创 (S.C New Energy) 也为 TOPCon 提供了两种解决方案，其中 LPCVD 自然是首选。该公司名为 LD-420 的 LPCVD 炉，其标准配置设有 6 根炉管，同时也可订制有 5 或 4 根炉管的款式。炉管的内径为 420 毫米，可加工 G12 尺寸的硅片，同时该公司还将考虑特殊需求，对炉子进行设计，以进一步加工边长高达 230 毫米的大硅片。该公司采用双层石英管结构，配套水冷管密封技术。每个管有一个 2200 毫米的平面区域，采用背靠背 +2.38mm 半间距排列的装载方式可容纳 1600 片硅片。该设备支持较宽范围的低压处理环境，从 15 到 600Pa。其设计的 LPCVD 炉可以完成 TOPCon 工艺的三个重要步骤——生长 1.4-2.2 nm 厚的隧穿氧化层、沉积 80-200 nm 厚的多晶硅层以及原位掺杂。捷佳伟创公司将 150 nm 定为多晶硅层厚度的工艺指标，保证硅片内和运行间的膜层厚度均匀性偏差在 3%，而同一批次的厚度均匀性偏差在 4%。

Tempress 在 TOPCon 商业化的早期也提供过一些 LPCVD 设备。然而，在从 Amtech Group 拆分出来之后，该公司现在已经归 Innovation Industries 公司所有。其光伏业务的计划尚不清楚，目前该公司尚未回复我们的咨询。类似地，一些提供 LPCVD 设备的中国设备供应商已经在中国出现，比如北方华创 NAURA 和 Red Sun。不过，这些公司尚未回应我们的咨询，其产品细节仍不得而知。

### 3.1.2 PECVD

为解决 LPCVD 的缺点，尤其是绕镀问题，光伏行业对 PECVD 技术的关注度越来越大。梅耶博格最先将 PECVD 技术应用到 TOPCon 生产中，但是自从梅耶博格公司退出公开市场后，该技术的进展至今也没有新的进展。此外，另一家欧洲的领先设备供应商 Centrotherm 正在与 Fraunhofer 研究所合作，共同开发基于 PECVD 技术的解决方案。同时有两家中国公司，捷佳伟创新能源公司和金辰机械股份有限公司正在研究应用于 TOPCon 的 PECVD 技术。

金辰机械是一家专注于自动化技术领域的企业，在光伏组件生产设备的业务方面十分著名，其于 2019 年开始进军 TOPCon 高效电池的 PECVD 设备，为其电池生产设备业务的一部分。金辰公司一开始便同时研究应用于 HJT 和 TOPCon 高效电池两种技术的 PECVD 设备。金辰与国内伙伴合作研发用于 TOPCon 技术的装备。对于 TOPCon 技术，金辰公司专注于管式 PECVD 设备。金辰公司 PECVD 设备的首批测试用户正在持续与金属浆料厂商保持密切合作，开发出兼容的金属浆料解决方案。

据金辰介绍，TOPCon 越来越受到行业的关注。在 HJT 技术迅速发展的情形下，PERC 电池的制造商越来越多地把目光投向 TOPCon 技术。对于 PERC 制造商来说，自然会较为倾向于选择 TOPCon 作为后续升级方向，这样做不仅能够实现电池效率升级，也能延长 PERC 产线的使用寿命。TOPCon 拥有新技术发展所需要的充分优势。选择 PECVD 技术可以将绕镀对电池的影响降到可忽略的水平。绕镀是 TOPCon 技术产品良率低的主要原因，这也使得该技术广泛应用的前景曾不被看好。而若在 LPCVD 后采用额外的湿化学处理设备作为去绕镀环节清洗设备，势必又会增加整个电池生产的成本。但是 PECVD 设备不仅可以解决上述问题，而且也支持高镀膜沉积速率。

据该公司披露，该公司的管式 PECVD 设备 n 型 TOPCon 电池平均量产效率超过 24%，最高量产效率已达到 24.5%。最近，金辰的主要研究合作伙伴中科院宁波材料所宣布 TOPCon 电池的效率达到创纪录的 25.53%。与此同时，金辰还在开发一种“二合一”设备，可以在同一台机器上完成应用在原位掺杂多晶硅层顶部的隧道氧化物。

捷佳伟创出于和金辰公司几乎相同的考虑，也研发了 TOPCon 用的 PECVD 设备。该公司的卧式反应器 PD-520 在配置方面和其 LPCVD 设备很相似。该设备也可以在一个反应壳体中集成 4 至 6 根炉管，其中 6 根炉管是标准配置。每根炉管的直径是 520mm，可以兼容 M0 至 G12 尺寸的硅片，除此之外，其也能容纳边长为 230mm 的大尺寸硅片。然而，每个石墨花篮的额定装载能力是 704 片 M6 尺寸的硅片。捷佳伟创新能源公司正在推广其所称的四合一系统，即其能完成隧穿氧化层、本征和掺杂多晶硅层、减反膜的沉积，能够和 TOPCon 生产的不同工艺流程相兼容。该系统的额定产能是每小时 5600 片硅片，同一批次硅片的成膜均匀性的偏差率是 5%，但在比

较不同批次硅片的成膜均匀性时，该偏差值会更小。通过对原位掺杂工艺进行优化，可以实现宽范围的 n+ 表面层薄层电阻值 40 至 100 ohm/sq。

**Centrotherm** 在几年前也开始和德国的 **Fraunhofer ISE** 研究所合作开发基于 PECVD 技术的 TOPCon 电池生产方案。然而，2017 年研究中心发生的意外火灾事故致使该项目被搁置，直到 2019 项目才恢复启动。

ISE 的生产技术部门主管，**Jochen Rentsch**，在 **TaiyangNews** 高效电池会议上的演讲中，对最近的研究开发情况做了总结。其 TOPCon 工艺是在量产 PECVD 设备上完成的，使用了 **Centrotherm** 的频率为 40kHz 的直接等离子法 c.PLASMA PECVD 机台，该种设备在业内被广泛用于沉积 SiNx 层和 AlOx 层。该设备也能实现原位掺杂的功能。**Rentsch** 强调，该设备除了能在整个花篮范围内实现高的成膜均匀性之外，还能取得 12nm/min 的高沉积速率的效果，在此条件下，在实验室内完成一个循环周期仅需 8 至 12 分钟。这些上述的数字所对应的是相对较厚的多晶硅层的设定，主要是为了要与现有的金属浆料相兼容。然而，随着金属浆料领域的不断发展，**Rentsch** 对降低膜层厚度持积极态度，因为膜层减薄不仅会减少周

期时长，还能提高 TOPCon 技术的双面率。**ISE** 已经取得了 740mV 的隐态电压(一个钝化质量好的指标)，同时也确认了在平面上能够取得复合电流密度 J0 可降低到  $0.2 \pm 0.12 \text{ fA/cm}^2$  的记录。

**Rentsch** 提到一些 TOPCon 技术的量产化的指导方针。可见的是覆盖背面 TOPCon 层的 SiNx 层的成分对背钝化有着重要影响，此外，折射率介于 1.95 和 2.05 之间的 SiNx 层对钝化属性会有重大影响。至于背面金属化，从其低接触电阻上可以看出在高温下可实现更好的接触，1 mohm/cm<sup>2</sup> 的接触电阻也达到了所设定的目标值。至于优化发射极，研究小组对几组硼扩散曲线进行了评估，发现薄层电阻值越高，开路电压就会越高，这一点表现地十分明显。然而，随着烧结温度升高，开路电压会因发射极性质变化而下降。通过对烧结温度和发射极的薄层电阻之间的关系分析可以发现，为了取得最佳钝化质量，两者需要进行良好的折中处理。最终得出的结论是前表面会严重影响 TOPCon 电池的性能。

注意到批次型 PECVD 的趋势，**Semco** 也在致力应用于 TOPCon 技术的研究。

### 3.1.3 基于 PVD 的技术



Source: Centrotherm

同样采用 PECVD 路线：**Centrotherm** 凭借其在 PECVD 方面的长期专业知识，正在调整其 PECVD 平台以支持 TOPCon 电池工艺

从技术上将它是属于 PVD 类别的，但杰太光电技术有限公司更倾向于将该技术称为 POPAID，其全称为等离子氧化及等离子辅助原位掺杂技术。确实，该技术不仅仅是 PVD，它将 PVD 和等离子体氧化整合到了一个设备平台上。目前杰太光电已经在光伏设备供应业务中累积近 10 年时间的经验，公司最初的关注点是用于多晶硅的干法刻蚀设备。在 2019 年，该公司开始着手基于 PVD 技术的解决方案，目的就是要解决其他沉积技术的缺点，尤其是绕镀问题。该公司的设备能够满足生产 TOPCon 电池所有必要步骤——隧穿氧化层的形成，多晶硅薄膜沉积和原位掺杂。

该公司使用线性射频等离子源进行氧化，据该公司 CEO 上官泉元博士介绍，该方法具有高产量、低损伤和高度控制的优势。其设备的产量与硅片尺寸相关，每小时能够完成对 10000 片 G1 硅片的处理，而当对应 M10 硅片时，产量就减少到 8000 片。上官泉元博士说：“我们对设备的设计是通过两条并行生产线达到 1GW 产能的目标。”这一产能下多晶薄层厚度为 100nm。该产线设备系统会占据 23 米的较长空间。此设备的设计维护周期是 1 个月，但是公司希望能延长到 2 个月。作为中来的设备合作伙伴，杰太光电的 POPAID 设备也被用于中来 J-TOPCon 2.0 技术。到目前为止，杰太光电已经建立了一套生产设备，预计到年底将会出货 5GW 的 POPAID 设备，而且主要是出货到中来光电。上官泉元博士说，今年我们的设备几乎以及售罄。公司也还在扩大生产设备，这就意味着其将在明年着手处理其他客户的订单。

普乐新能源公司似乎紧紧跟踪着杰太光电设备设计的步伐，并且在 2021 年 PV CellTech 线上会议上



Source: Jtech

展示了其内联垂直磁控溅射 PVD 系统。该工具被设计成为能在 40 到 50 秒的周期内处理 60 个单元 (6×10 配置) 插槽的载体。该设备能够完成 TOPCon 生产所需的一切工序——沉积氧化硅层、正面沉积原位掺杂的多晶硅层。与 LPCVD 相比，该技术的加工步骤明显减少。反应器装置配备低能氧等离子氧化腔室，可在纯气体等离子体环境中生成隧穿氧化物。电离源也是免维护的。使用旋转硅靶和原位掺杂沉积形成的非晶硅层是通过引入掺杂气体完成。

和现有的 LPCVD 相比，PVD 有几个优点。根据普乐新能源公司的介绍，首先是运营和维护成本低。成本降低是因为 PVD 系统不涉及石英器，因为石英器价格高进而造成 LPCVD 工艺成本高。而且，PVD 是一种单面工艺，不会出现绕镀的问题，这就进一步节约了成本。此外，普乐新能源公司的 PVD 设备能够达到每小时 10000 片硅片的产量。

能耗低是 PVD 系统成本降低的另一个因素。普乐新能源公司强调，PVD 系统会使用 77% 的能耗用来镀膜，16% 用于加热。与 CVD 系统进行对比，CVD 系统 34% 的能耗用于镀膜，45% 用于加热。这就意味着 PVD 系统的能耗利用率要远优于 CVD，即能耗被用在了更加重要的地方。

PVD 在工艺耗材方面也很有优势。LPCVD 主要采用硅烷作为前驱体，而 PVD 使用的是比硅烷便宜得多的硅基靶材。但另一方面，PVD 需要较高的资本支出和较大的占地面积。

冯·阿登纳公司，一家有着数十年制造 PVD 设备经验的公司在研发基于 PVD 系统的 TOPCon 解决方案。该公司在钝化接触方面是基于在氧化硅上溅



不仅仅是 PVD: 杰太开发了一种称为 POPAID 的混合技术平台，该平台基本上结合了 PVD 和等离子体氧化，以解决 TOPCon 主流沉积技术的缺点。

射非晶硅层——该设备尚在研发阶段，但尽管如此，也还是取得了鼓舞人心的初步结果。一旦准备就绪，冯·阿登纳公司准备在其高产量 PVD 设备上应用该工艺，目前该平台的产能是每小时 10000 片硅片。

### 3.1.4 PEALD

江苏微导开发了一种名为 PEALD 的新技术，PEALD 是等离子增强原子层沉积的缩写形式。PEALD 是一种结合了 ALD 和等离子体辅助沉积方法优势的混合技术。事实上，江苏微导纳米公司是首家引入该技术的公司。公司主要推广其 ZuRong(ZR) 系列工业间歇炉，这一设备是专为为 TOPCon 相关应用量身定制的。根据规格表，ZR5000X2 机型的竞争优势在于其能通过专用的原位掺杂工艺支持各种氧化物层和 ALD 纳米层压板的沉积。工艺的精确控制能够取得理想的带隙宽度、能带排列和电阻值，因而能有效钝化表面并能很好地实现载流子选择性移动。集成到机器平台的自动化操作能够完成 TOPCon 背钝化的所有必需工艺，即，能够一次性生成隧穿氧化物和多晶硅原位掺杂。机器能依据硅片尺寸调整产量等级；当加工 M6 尺寸的硅片时，ZR 系列产品的额定产量是每小时 4200 片硅片；而当加工大尺寸硅片时（例如是 M10 和 G12），产品的产量就会下降到每小时 2800 片。沉积层具有很高的均匀性，其偏差为 3%。该设备的额定正常运行时间为可达 98%，机械产量损失可保持在 0.05% 以下。

该公司的 ZR5000X3 系统是一双面沉积系统。当应用于 PERC 电池生产时，该设备可在背面沉积氧化铝和氮化硅，也能在正面沉积氮化硅薄膜。如果生产需要，该设备可以单面使用，相应地设备的产量也会翻倍。根据江苏微导纳米公司的介绍，该设备也兼容沉积 TOPCon 的工艺。

### 3.1.5 APCVD

德国 Schmid 公司是唯一一家基于 APCVD 技术提出钝化接触问题解决方案的生产商。使用 APCVD 系统的一个好处就是其允许在单系统中串联使用多个喷射头。该系统的产量可高达每小时 4000 片硅片，但是具体数字要取决于沉积层的厚度。德国 Schmid 公司表示，其设备也支持原位掺杂；但是隧穿氧化物需要在外部进行。

APCVD 的两个明显优势是：a) 这是一个简单的大气压下进行化学气相沉积过程，b) 其并不会造成绕镀问题。根据德国 Schmid 公司介绍，与使用

PECVD 系统和 LPCVD 系统相比，其 APCVD 系统减少了 1 个生产步骤，使得原来的 8 个生产步骤变成了 7 个步骤。但是，这项技术并没有引起 TOPCon 制造商的注意。公司表示，造成这种现象的一个原因是其不愿提供免费的演示设备。

### 3.1.6 沉积技术的比较

LPCVD 技术是在半导体行业中最受欢迎的沉积技术，在 TOPCon 开发初期时便被最广泛地使用。能够允许隧穿氧化物在相同的腔室中生长是该系统的一个优点。据来自 Semco 的 de Munnik 介绍，从工艺角度看，尤其是在大规模生产的环境下，为了避免薄层（最初是化学生长的氧化硅）间出现任何间隙缺陷，隧穿氧化物薄膜的均匀性是不容易得到保证的。支持原位掺杂的功能也有助于帮助减少工艺步骤的数量。

中来光电，是 TOPCon 产能最高的公司，达 2.4GW，公司考虑到上述原因，采用了 LPCVD 技术进行多晶硅沉积。然而，中来光电采用的方法与常规方法有所不同，公司采用了离子注入法而不是扩散法实现多晶硅层的 n 型掺杂。

该技术也并不是没有缺点。首先，基于 LPCVD 技术的加工序列相当长。例如，中来光电的第一代 TOPCon 技术，是基于 LPCVD 处理的，加工步骤为 12 道，不仅冗长而且也很昂贵。此外，用扩散处理代替离子注入也并不会产生任何好处，尽管在一定程度上，原位掺杂确实有助于简化流程。

一种固有的缺陷是石英管的破裂。因为多晶硅和石英管的热膨胀系数不同（相差大约 5 倍），因此当多晶硅层变厚时，多晶硅和石英管内壁之间存在很大的压力，会造成石英管破裂。同时，多晶硅的厚度不同公司也有差异：Centrotherm 的将多晶硅的厚度设定为 100-250 $\mu\text{m}$ ，而普乐新能源公司为 400 $\mu\text{m}$ 。考虑到在石英管内壁沉积的多晶硅在每次运行时的沉积厚度为 90 至 120nm，每次运行通常会持续 1.8 小时，普乐新能源公司评估石英管可大约使用 3000 次或是可连续运行 6 到 8 个月。据 Centrotherm 公司的 Haase 介绍，碳化硅内衬有助于避免石英管破裂，在这种情况下，允许沉积得多晶硅层的厚度是 5mm，能够将石英管的使用寿命延长好几倍。但是，由于产品交货期是几个月或者甚至是 1 年，因此氮化硅并不是当下的最佳选择。为了克服与石英管相关的故障，Semco 公司一直在使用不锈钢材料作反应容器。



Source: Schmid



错失良机：虽然 APCVD 也是一种无环绕工艺，但该技术并未受到 TOPCon 厂商的关注。

不仅仅是石英管，承载硅片的石英舟也会由于上述原因在加工过程中出现破裂。普乐新能源公司对商业化生产过程中产生的石英碎片进行分析发现，大多数石英舟的破裂位置都是在接口处，而且这些舟的平均寿命通常为 20 天或是 150 次运行，这要以哪个先发生来确定。

首先，早期业内 TOPCon 生产因绕镀问题而遭受严重的良率问题。由于这种伪沉积是动态过程，因此若采用化学方法处理该问题，其步骤会很复杂，而且也会导致严重的产量问题。Semco 公司称其水平硅片处理方法可将绕镀影响限制在电池片边缘，便于后续的湿化学处理。

考虑到这些缺点，设备厂商和光伏厂商一直都在寻找代替方案。自然地，中来光电运用了其第二代 TOPCon 技术 (POPAID)，减少加工步骤至 9 步。这一内联加工方法，基于原位掺杂的单面沉积工艺，可实现高沉积速率。在众多优点中，排在最前面的是其不会产生绕镀问题。得益于亚纳米 (0.1nm) 水平的控制，隧穿氧化薄膜的沉积均匀性很好。此外，中来光电在 TaiyangNews 高效太阳技术会议上强调，利用这种方法制备得到的钝化层的质量也很高，这从测得的背面  $J_0$  的值为 3.5 fA/cm<sup>2</sup> (低于通过 LPCVD 和 PECVD 技术得到的  $J_0$  值) 就可以明显看出。据中来光电介绍，这种方法有利于实现电池高效以及高产量生产，同时也能降低成本。虽然中来光电不会透露该技术确切的细节，但是其 TOPCon2.0 很可能使用了改进的 PVD 技术。

正如在 PVD 章节中讨论的那样，该技术相较于

LPCVD 有很多优点：单面沉积，意味着没有绕镀问题；内联运行，高产量，能量利用率高，因避免使用石英制品因而运行成本低。据普乐新能源公司称，虽然 PVD 通常使用石墨载体，但也可以使用不锈钢载体。使用硅靶材也有利于降低制造成本。但是，PVD 的资本支出和空间占用都较高。

PECVD 在这方面的得分肯定很高。越来越多的公司，包括那些一直在提供 LPCVD 设备的公司，现在也开始研发基于 PECVD 的解决方案。捷佳伟创已经在提供其解决方案，而 Centrotherm 公司正处于最后阶段。Semco 公司也计划往这个方向发展。金辰公司，相对来说是这个领域的新人，也已经在用户现场对其设备进行了测试。基于 PECVD 的解决方案旨在 LPCVD 的局限性制。据 Centrotherm 公司的 Haase 介绍，单面加工，超高的均匀性，低维护和成本减少都是该技术的一些优点。该技术和设备已经在光伏方面得到应用，目前已经应用于沉积氮化硅和氧化铝层。但是，据深圳市拉普拉斯能源技术有限公司的 Jiang 称，当沉积掺杂多晶硅时，石墨舟中的陶瓷绝缘体在大约 20 次运行后变得导电，为保证产量需要及时清除多晶硅层。目前唯一缺少的是大规模制造的跟踪记录。

PEALD 是一种有趣的技术，虽然目前关于该技术的细节十分少。江苏微导纳米公司的数据表中的技术规格给人留下了良好的第一印象，该公司表示已找到合作伙伴对该技术进行评估。如果评估成功的话，江苏微导纳米公司的 PEALD 设备将不仅仅能够提供 PECVD 的好处，甚至能沉积出性能更好的隧穿氧化物层。江苏微导纳米公司在改变 PERC 电池中沉积氧化铝层的设备历史不会被大家遗忘。

**APCVD** 已经存在了很长一段时间，其正在为 IBC 和 PERL 等其他电池技术的大规模生产服务。关于钝化接触方面，APCVD 工具的加工过程简单，支持高产量。基于 APCVD 的工艺流程更少。但是，对 TOPCon 十分有信心的业内人士保持中立态度，既不认为该技术可行，也不认为不可行。

总之，虽然 LPCVD 较早地被采用，但由于绕镀问题正在被其他技术取代。RENA 是全球湿法加工设备的技术领导者。据 RENa 技术和工艺总监 Holger Kuhnlein 介绍，虽然每一种替代方法都承诺拥有单面沉积膜的优势，但是没有哪种技术能真正完全解决绕镀问题。Kuhnlein 说，在测试过利用不同技术制造出的样品后，可以确认无论采用何种沉积技术，发射极侧始终需要清洁，虽然清洁的程度可能会依据技术种类有所变化。所有 PECVD 供货商 / 支持者都认为 PECVD 的寄生沉积很容易处理。截止目前，PVD、LPCVD、PEALD 和 PECVD 是这场角逐中的四大主要竞争对手，但至少在设备供应商方面，最后一个赢得了更多的支持者。尽管如此，每种方法都会有其自己的优缺点。

### 3.2 与 PERC 相比额外的工艺步骤

**湿化学处理：**虽然不一定只针对 TOPCon，但是湿化学处理领域的关键发展确实对其他电池结构的改进有好处。有两种生产设备需要适应 TOPCon 技术进行改进，即去磷硅玻璃设备和去单面发射极设备。其他湿化学处理步骤的改进从更广的角度看也非常重要。RENA 公司一直在改进其用于去除损伤层和制绒的批量处理设备。在 2021 年一月初 TaiyangNews 高效电池在线会议上，RENA 公司的 Kuhnlein 提到，湿化学批量处理设备的最新进展是支持处理大尺寸硅片，以及提高花篮的装载密度。Kuhnlein 表示，随着硅片质量的总体提高和添加剂领域的发展，在 PERC 电池生产步骤中，有可能去完全除掉过，这也对 TOPCon 技术有好处。

另一个在 PERC 电池方面的进展，并且有利于 TOPCon 技术的是金字塔尺寸和反射率的优化。当前最先进的技术是使用 monoTEXH2.3 可以实现金字塔尺寸为 1 到 3 $\mu\text{m}$ ，反射率为 9.9 到 10.1%。虽然有一些方法可以将金字塔尺寸从 0.5  $\mu\text{m}$  减小到 3  $\mu\text{m}$ ，并将相应的反射率减小到 8.9% -10%，但后者只能在大约 20 次的有限运行次数中实现。RENA 公司正在研发一种更稳定的工艺，该工艺可以持续运行 200 多次，

能实现金字塔尺寸分布在 0.5 至 2  $\mu\text{m}$ ，而反射率则约为 9.3%。

RENA 公司发现 HJT 电池制绒后再清洗能提升电池转换效率，对于 PERC 电池，电池效率提升高达 0.5%，这一经验也可以用到 TOPCon 电池加工过程中。

为了解决绕镀问题，RENA 公司正在推广一种名为 InPolySide 的内联刻蚀工具平台。在碱性单面刻蚀去除多晶硅的过程中，电池发射极侧的硼硅玻璃能够避免发射极被刻蚀，而且该过程是精确的单面反应，意味着背面是完全不受影响的。在剥离步骤之后，玻璃被蚀刻掉。

**常压干式蚀刻：**作为湿化学解决方案的替代方案，位于爱尔兰都柏林的 Nines Photovoltaics 正在推广一种创新解决方案。该公司开发了一种称为 ADE（常压干式蚀刻 Atmospheric dry etching）的专利工艺。自 2010 年以来，该公司一直在开发干式蚀刻工艺，以替代光伏电池制造中常用的湿化学工艺。这项技术的独特之处在于它在大气常压下完成干式制绒，免去了典型干式蚀刻技术中对真空和等离子这两个主要需求，以及因此产生的高额成本，Nines Photovoltaics 的 CTO Laurent Clochard 强调说。

反应腔的反应区通过气幕与其余部分隔离。该过程以内联方式完成。硅片通过加热的硅片载体送入机器。蚀刻气体氟 (F<sub>2</sub>) 被热激活，以解离分子。然后通过专门设计的分配装置将蚀刻剂输送到硅片，以产生所需的蚀刻深度、制绒和均匀性。Clochard 说，该技术对环境没有特殊的不利影响。氟作为蚀刻气体的做法，本来会引起对有关温室气体的顾虑。然而，与干式蚀刻常用的会加剧高全球暖化的 SF<sub>6</sub> 不同，Nines 使用的分子氟不会对全球暖化造成影响。

该设备于 2017 年推出，主要设计用于多晶制绒。ADE 实现的效益远高于湿化学法解决方案。然而，随着市场向单晶转移，Nines Photovoltaics 也将目光转向了主流的 PERC 等先进技术。虽然该技术在制绒方面仍然具有优势，但 ADE 在 TOPCon 单元处理中发现了更具吸引力的应用。鉴于该设备为单面工艺，它可以有效地用于去除环绕。Clochard 说，“更重要的是，可以选择性的实现表面蚀刻或边缘去除，或者同时实现两者。”这意味着 Nines Photovoltaics 的工艺不仅可以在不干扰底层发射极的情况下完成蚀刻，而且还可以设置去除硅片边缘的多晶硅，优化良率。该设备甚至也可以用于镀膜沉积为单面的情况。



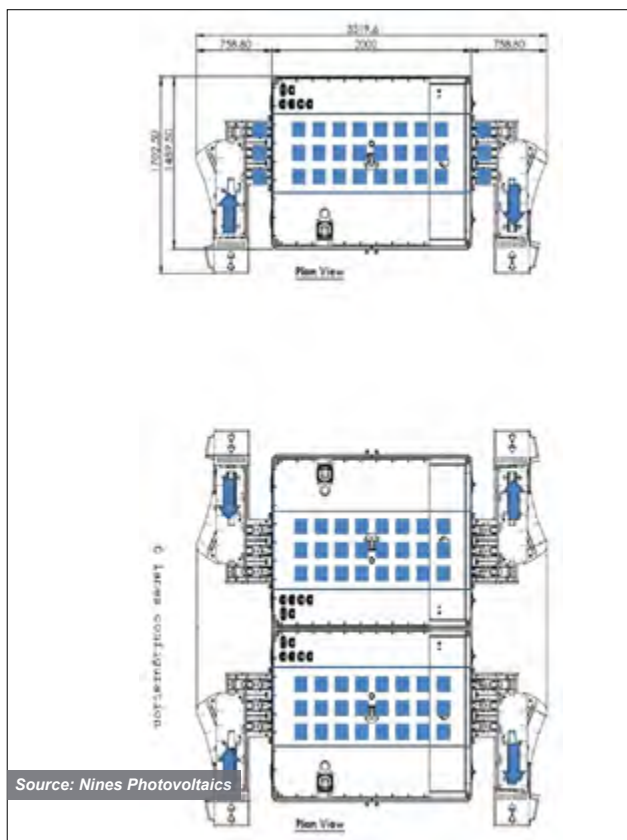
**Nines Photovoltaics** 目前正在其都柏林工厂运行一条试验线，并与 **Fraunhofer ISE** 合作进行电池工艺开发，向其提供研发规模的设备。该公司现已准备好量产规模的设备。该设备提供 2 种型号——**ADE-3000** 和 **ADE-6000**。后者可在 6 个通道中处理最大尺寸为 **M4** 的硅片，或在 4 个通道中处理 **M6** 至 **G12** 的硅片，产能分别为每小时 12,000 和 8,000 片，占地面积为 12 平方米。**ADE-3000** 的通道数正好是一半，产能也是减半。然而，这些产能数据是针对制绒工艺的，这意味着用于 **TOPCon** 中单面蚀刻的产能会高得多。“需要去除的硅量比制绒要少 10 倍，**Clochard** 解释道。公司也愿意提供单线运行的研发规模设备。至于成本，**Clochard** 说成本比湿化学工艺低得多，而且在量产中的收益更为显著，特别是蚀刻气体可在现场制备。

**硼扩散**：与 **PERC** 相比，一个重要的额外工艺步骤是发射极的形成，因为现在的 **TOPCon** 电池主

要是基于 **n** 型硅片。发射极通过硼扩散形成，有一些设备厂商提供次工序的设备。该工序对发射极的分布十分重要，而且正如上面提到的那样，该过程会影响 **TOPCon** 电池的性能。

硼扩散通常在低压管式炉中进行，几乎所有领先的扩散炉供应商都提供这样的设备平台。硼扩散的设备虽然或多或少是与磷扩散设备相同的，但需要较大的优化。**捷佳伟创**指出，硼扩散通常在较高的温度下完成——超出 **1000℃**——并且和磷扩散所需的 102 分钟的循环周期相比，硼扩散的循环时间为 150 分钟，这就使得其硅片产量变低。

硼扩散炉之间也有区别，即前驱体的选择，三溴化硼是使用最广泛的。三溴化硼作前体会会有一个传统的问题——该过程的副产品会充当石英的粘合剂，这可能会减少设备正常运行时间。然而，随着工艺优化和反应器设计的改进，前驱体消耗可以显著降低，使得停机时间不再成为一个大问题。



Source: Nines Photovoltaics



干式蚀刻占地小：**Nines Photovoltaics** 的常压干式蚀刻设备称为 **ADE**，恰如其分地满足了 **TOPCon** 中单面蚀刻去除环绕的要求。此处所示的 3 通道设备在 6 平方米的小占地面积内支持 4,000 片硅片的产能。

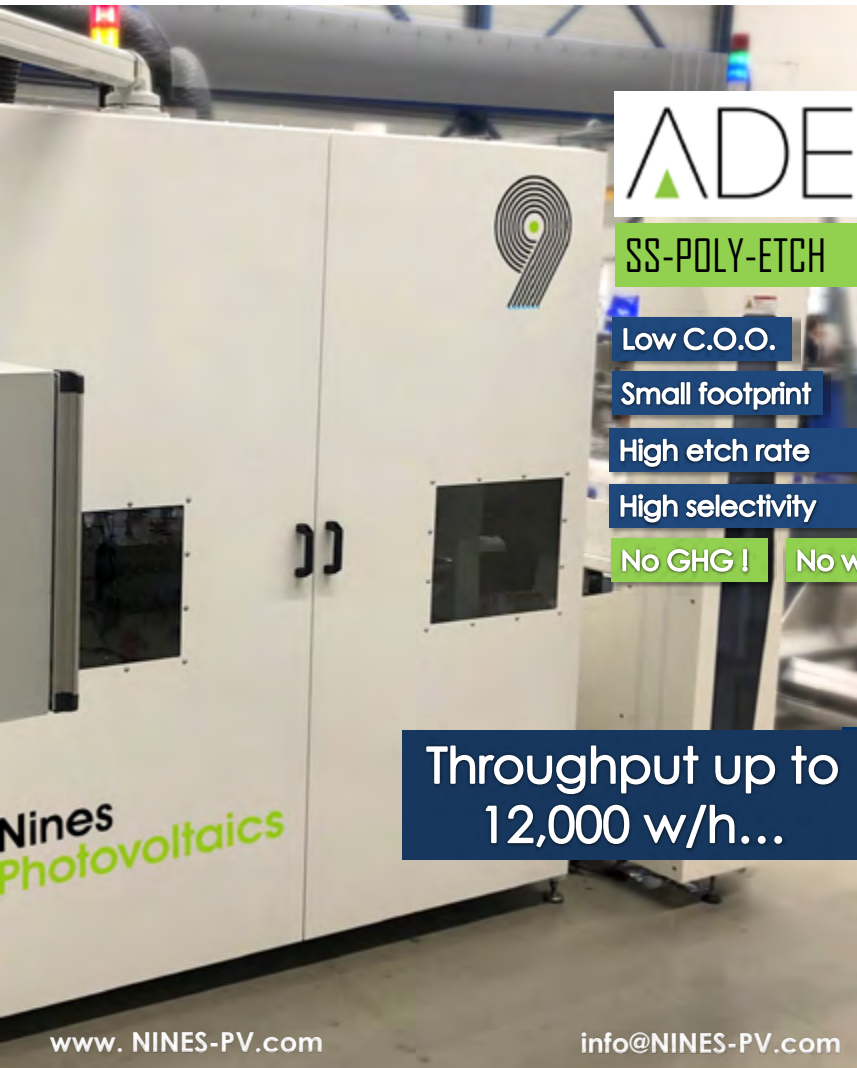
另一方面，Semco 使用三氯化硼，因为公司相信运用三氯化硼能够做出更好的结果，因为氯离子的存在能让石英管更为清洁。它还有助于进气。三氯化硼以瓶装的气态形式供应，无需使用起泡器。硼硅玻璃具有氯基前驱体，与其对应物相比更容易去除。使用三氯化硼的另一面是其腐蚀性和与之相关的安全问题。尽管存在担忧，但这种方法似乎赢得了更多的追随者。

深圳市拉普拉斯公司关于硼扩散的理念和 Semco 公司的主张是相似的。其设备还设计与水平硅片加工相兼容，也使用三氯化硼作为前驱体。与 LPCVD 设备类似，中国公司的硼扩散炉在加工时设有桨叶支撑，用来避免管子变形。

捷佳伟创不仅提供三氯化硼作为一种选择，而且也十分强烈地推荐三氯化硼用作前驱体。据 ITRPV 称，预计到今年年底，三氯化硼掺杂的市场份额将达到 20%，在未来 10 年将会逐渐增加到 30%。

**退火：**退火通常不会被深入探讨，但是却十分重要。尽管沉积多晶硅的结晶度会因技术不同而不同，LPCVD 技术更趋向于结晶，而 PECVD 等低温沉积技术会更接近于非晶，但不论采用何种沉积技术，退火操作都是不可避免的。这一步是使用简单的 RTP 工具完成的，而热处理时长因技术不同而不同。使用原位掺杂更需要退火工艺——尽管掺杂剂在工艺过程中均匀分布，但掺杂剂必须被激活。因为热处理设备价格低廉且通过退火过程提高了加工产量，所以目前的做法是退火在单独的退火炉内完成。但是，将退火过程集成到烧制工艺中可以作为未来优化的一部分。

**发射极钝化：**由于 TOPCon 通常使用 n 型硅片，因此与 PERC 相比，发射极的极性是相反的。因此，PERC 电池的背钝化结构，通常是使用氧化铝和氮化硅薄膜，应用到了 TOPCon 电池的发射极侧。几乎所有沉积氧化铝的设备供应商都能提供适合这种应用的设备，过去有些人也对氧化硅和硼硅玻璃做过评估。



ADE™  
SS-POLY-ETCH  
Low C.O.O.  
Small footprint  
High etch rate  
High selectivity  
No GHG ! No water !

### Single Side Poly-Si Etching.

**Atmospheric Dry Etching (ADE).** Designed to remove all types of poly-Si wrap around, partial or full surface, with edges of the wafers fully etched, whatever your deposition method (LPCVD,PECVD,etc...). Leading to consistently low reverse currents; **no more shunts!** Inline processing for all wafer sizes (M0 to M12). R&D, pilot and mass production versions available.

Patented silicon etching technology. Green House Gas (GHG) free chemistry. No water required.

#Sustainable etching process for the TW age.

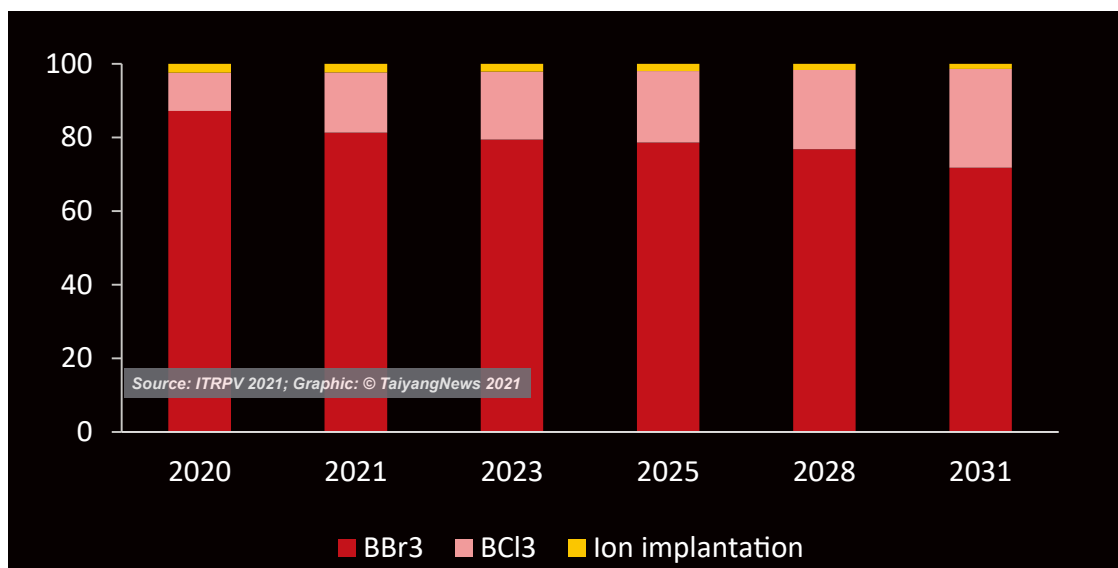


Get TOPCON-ready !

**Nines**  
Photovoltaics



## 硼掺杂的不同前驱体



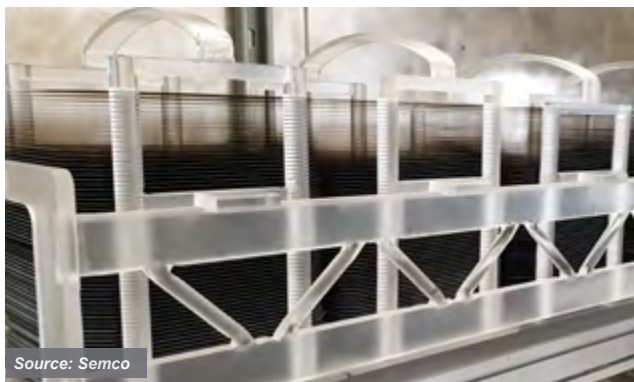
虽然 BBr3 几十年来一直是硼掺杂前驱体的主要选择，但 BCl3 现在越来越多地得到推广——这也是 Semco 从一开始就推广的方向。

### 3.3 金属化

金属化是 TOPCon 电池制造中的重要部分。和 PERC 电池一样，成本的两个影响因素是金属浆料的使用和膜沉积过程。这里的差异是 TOPCon 电池的两面都需要银浆，几乎是双倍的浆料成本。电池制造商的现有做法是使用 PERC 电池的金属浆料去接触钝化接触电池的背表面。但是，为了完全发挥出电池的性能优势，TOPCon 电池应使用定制的金属浆料。这种浆料必须具有良好控制的反应特性，能够仅与掺杂多

晶硅层接触，而且同时不会伤害下面的隧穿氧化物。正面也有一些限制因素，用于 n 型电池发射极侧的银浆通常掺杂有铝，因此即便与 PERC 相比，TOPCon 电池也需要更高的烧制温度。由于接触点必须共烧，因此必须建立一种互补的糊状化学物质，用来满足电正反两面的要求。

大多数领先的金属浆料厂商，例如贺利氏、无锡帝科以及聚和新材料，已经与 TOPCon 电池厂商建立了紧密的合作关系研发浆料。大部分厂商的 TOPCon 技术已经投入了实验线和中试线评估，因此，研发的



更好更清洁：Semco 一直大力提倡基于三氯化硼的扩散工艺，据该公司称，该工艺不仅能提供更好的效果，而且还能保持工艺过程和石英舟的清洁。



SOLAMET®



## 引领金属化创新每一步

### ■ 我们是全球光伏金属化创新领导者

传承200+年创新基因与30+年金属化实践, 随着对杜邦Solamet®光伏金属化浆料业务的成功并购, 从2021年7月起, 索特Solamet®开始独立的公司化运营, 开启全新历史篇章。

浆料是各个客户独有的。因而先进的 TOPCon 金属浆料配方通常不会在公开市场上推广。

无锡帝科从业内的视角提供了一些见解。该公司两年前推出了 TOPCon 专用浆料，分别用于电池正面与反面的。该公司的 DK93T 浆料颇具特色。据无锡帝科的技术和营销副总裁南亚雄称，它是一种背面细栅浆料，专为多晶硅膜层厚度 120 至 140nm 的典型主流 TOPCon 结构而设计。同时该公司正在与客户合作优化配方，以便更好地与电池厂家多晶硅膜层厚度相兼容。南亚雄称该公司产品可以支持低至 60nm 的多晶硅膜层。该浆料也与碱性制绒的电池背面表层兼容，这是 TOPCon 电池中取代酸性制绒的新趋势。

根据南亚雄提供的资料，基于 M6 硅片 TOPCon 电池的典型浆料用量是约 140 毫克。同时一些浆料厂商也在设法将浆料用量优化到 100 毫克至 120 毫克。“在这个耗量水平上很难平衡浆料性能和可靠性，”南亚雄强调，“正反面细栅的宽度不同。虽然在正面很容易做到 30  $\mu\text{m}$ ，但用银铝浆做这一宽度的细栅很难。不过 35  $\mu\text{m}$  的宽度还是可以实现的。”

中来光电能够实现 30  $\mu\text{m}$  的细栅宽度，而拉普拉斯表示，在生产需要双面银浆电极的双面电池时，已经实现了 100 毫克的浆料耗量。接受调研的每一家设备制造商和电池厂家都表示，浆料的开发速度令人满意。

同时金属浆料也会影响沉积过程，尤其是产量。正如早期讨论的那样，多晶硅层的通常厚度是 80 到 150nm，多晶硅层越薄越好——多晶硅层越薄，沉积周期越短，因而能够改善沉积设备的产量。设备侧对

实现更薄的多晶硅层没有限制，但是金属浆料的兼容性会对其有限制作用。

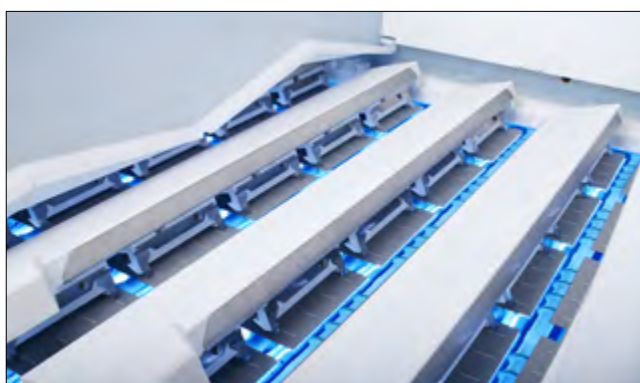
#### 电镀：

RENA 公司将与金属浆料相关的高制造成本视为 TOPCon 的主要障碍之一，因此其正在推广将镀铜作为丝网印刷的替代方案。在总结与 RENA 公司电镀设备 InCellPlate 相关的最新进展时，Kuhnlein 强调当前一代产品不需要在氮气氛围下退火。其设备的加工流程是：激光开槽、双面电镀和接触退火。该公司的电镀解决方案可实现在激光开槽宽度为 10 $\mu\text{m}$  的情况下制造出窄的副栅。

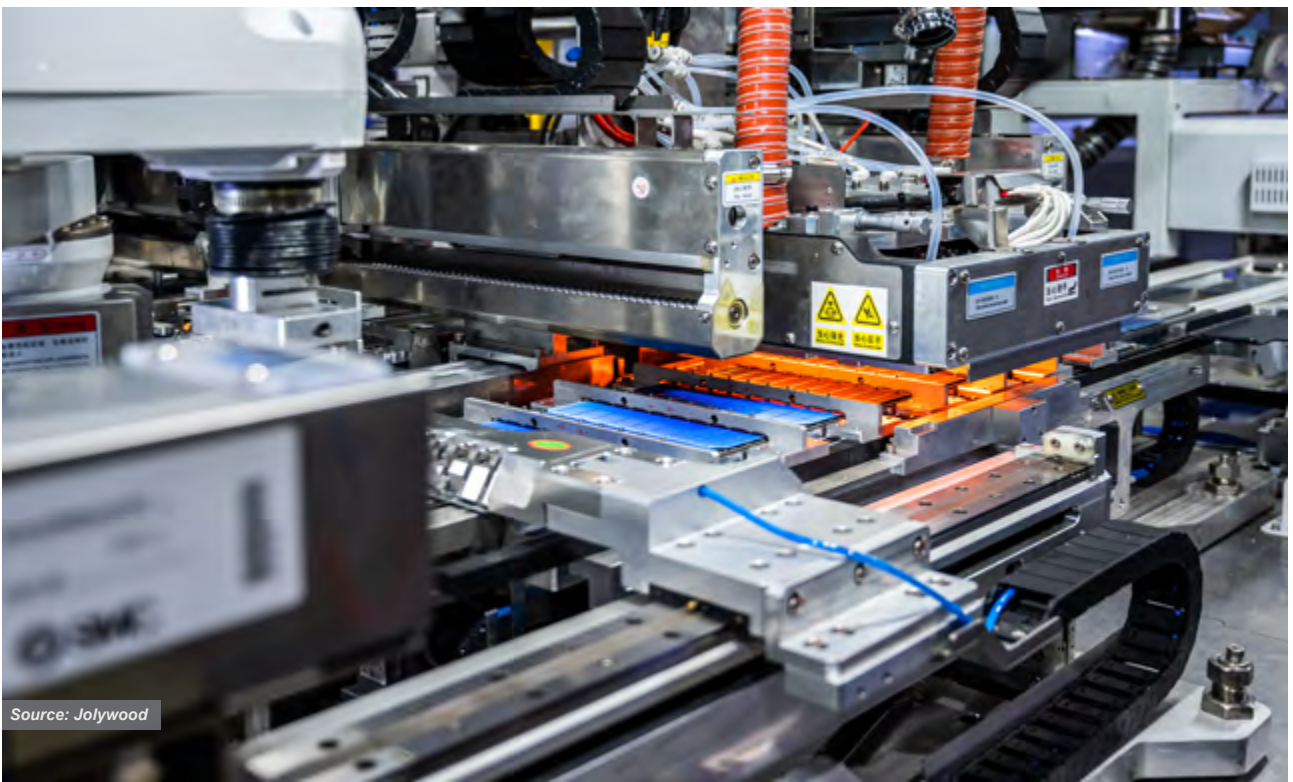
RENA 公司已经在与晶科能源合作研发基于电镀的金属化解决方案。该公司提供了研究进展的更新，应用于晶科能源的 HOT2.0 技术，使电池的转换效率达 23.9%，与常规丝网印刷技术相比，电池的绝对效率提升了 0.1%。然而，目前电池的平均转换效率为 22.6%，RENA 公司制定了路线图，预计到 2022 年使用铜触点技术可将电池转换效率提高到 23.5%。该公司进一步强调，与烧结银浆相比，激光和电镀方法对电池造成的损伤低得多，因此其提升转换效率的潜力更高，约为 0.3 到 0.5%。电镀形成的薄触点也有助于提升电池的双面率。



Source: RENA



RENA 的镀铜溶液不仅从电池的耗材中消除了贵金属银，还有助于将细栅的厚度降低至 10  $\mu\text{m}$ 。



Source: Jolywood

组件制造端：与电池不同，组件制造方面不需要使用特殊技术进行任何重大更改。

## 4. TOPCon 性能

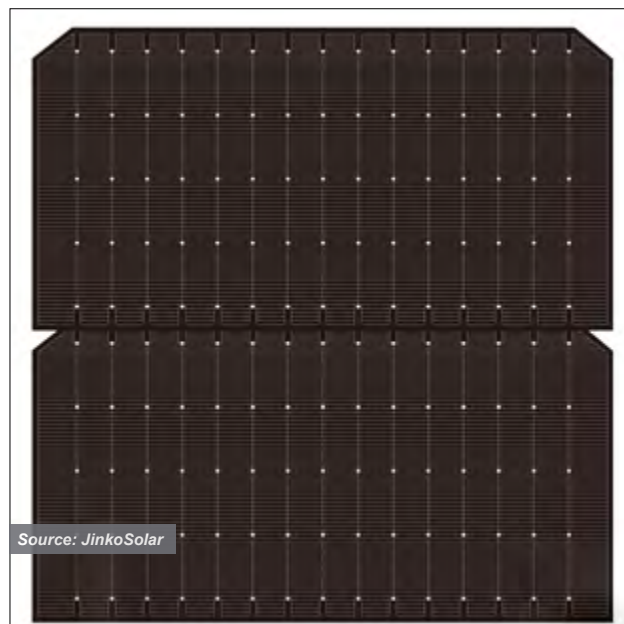
正如早期讨论的那样，TOPCon 能够明显地减少载流子在接触区域的复合，具有高转换效率潜力与优势。这就使得 TOPCon 电池能够达到超过 700mV 的较高开路电压。虽然传统上只有几家公司提供 TOPCon 组件，但是一些领先的光伏厂商也加入了这个行列，并在今年的 SNEC 展会上展示了 TOPCon 组件。本章总结了 TOPCon 技术在电池、组件、系统层面上的表现。

### 4.1 电池效率

正如我们在上面讨论的那样，TOPCon 技术有着高达 28.7% 是更高理论效率潜力，甚至比异质结电池的 27.5% 都要高。然而，目前 ISFH（德国哈梅林太阳能研究所）取得的 TOPCon 电池的最高转换效率是 26.1%，仍然要比日本 Kaneka 公司取得的最高转换效率 26.63% 的异质结电池的值低。上述两种取得最高转换效率的电池在设计制作时结合了 IBC 结构。ISFH 通过将其专有的 POLO 结构与适用于 p 型硅片的 IBC 技术相结合，创下了 TOPCon 电池的世界记录。对于双面接触电池，Fraunhofer ISE（弗劳恩霍夫太阳能系统研究所）宣布其 TOPCoRE 电池的转换效率达到了 26%，创造了世界记录。该种电池是在 TOPCon 结构基础上增加了背结结构。

领先光伏生产商之间的较量也值得关注，各公司从去年底开始就陆续公布了一系列效率记录。天合光能作为早期就开始采用 TOPCon 技术的生产商，在 2020 年 7 月之前一直保持着 24.58% 的最佳电池效率，但是后来被晶科的 24.79% 的效率记录超越。不久之后，晶科能源在 2021 年 1 月初又取得了 24.9% 的新纪录。隆基作为生产 p 型 PERC 电池的主力军，在 2021 年 4 月也宣布其在面积为 242.77 cm<sup>2</sup> 的 TOPCon 电池上取得了转换效率为 25.09% 的新纪录。在 6 月，仅仅约两个月之后，晶科能源宣布其 TOPCon 电池的转换效率达到 25.25%，又夺回了一席之地。在晶科能源宣布的第二天，隆基又宣布其 TOPCon 电池的转换效率达到了 25.21%，两者仅相差 0.04%。晶科能源不仅创造效率记录，还增加了与 TOPCon 技术有关的商业活动，其在 TaiyangNews 超高功率光伏组件线上会议上展示了大规模生产时，TOPCon 电池的转换效率可达 24.15%。

可以说，中来光电在 TOPCon 的商业化方面

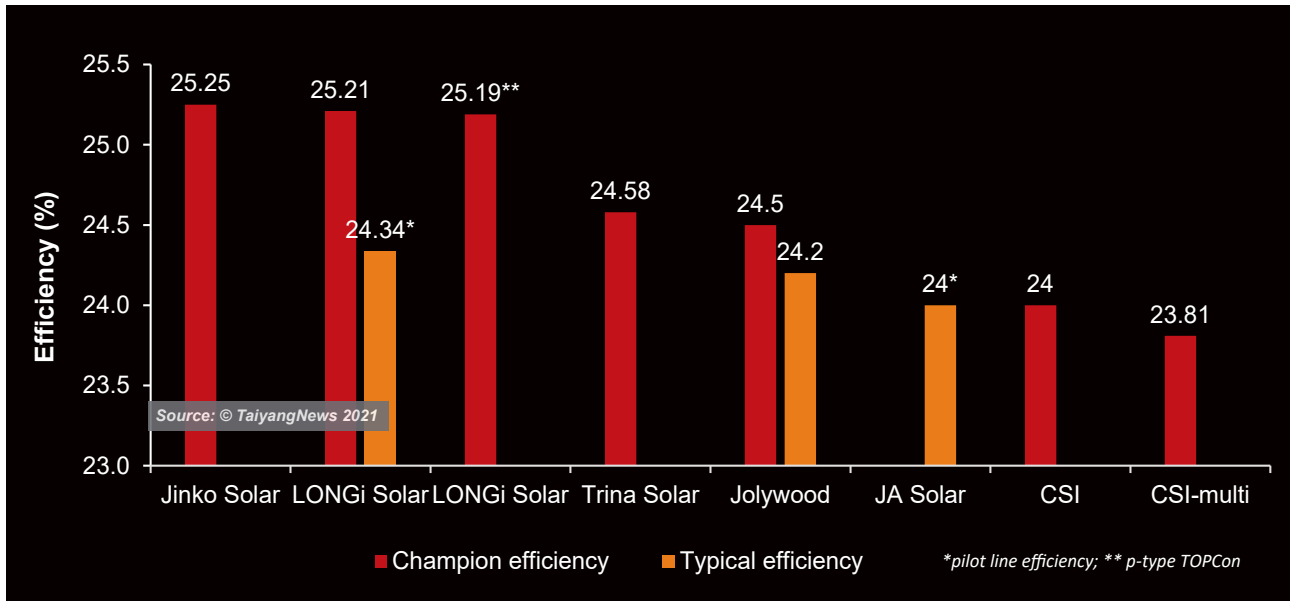


冠军：虽然主流供应商之间一直在争夺最高效率记录，但目前晶科以 25.25% 的最佳效率荣登榜首。

一直处于领先地位，其可能是唯一一家拥有 GW 规模 TOPCon 生产线的公司。中来光电最初从事 n 型 PERT 技术，从 2016 年到 2018 年，其将 PERT 的转换效率从 21.5% 提升到 22%。与此同时，中来光电在 2017 年开始研发 TOPCon 技术，最初取得的转换效率为 21.8%，目前大规模生产的平均水平是 23.8%。在应用了 TOPCon 2.0 技术的中试线上，中来光电的 TOPCon 电池的平均转换效率可达 24.09%，产品良率达 97%，但其最佳研发效率为 24.5%。中来光电在 TaiyangNews 高效电池会议上也分享了其关于进一步提升电池效率等级的路线图。优化的方法有使用选择性发射极、对减反层与电极进行优化和减少多晶硅层的厚度等，公司的目标是到 2022 年下半年取得 25% 的转换效率。在发射极侧也采用 TOPCon 结构，并有选择性地与多晶硅层进行局部接触，采用这种技术，公司预计电池转换效率能够再增加 0.2%，这一目标预期在 2024 年达成。中来光电表示，预计在最后会使用高质量硅片提升电池转换效率，在 2025 年效率能达到 25.52%。公司还计划发展下一代电池技术，例如叠层结构，该结构使用 TOPCon 作基底，顶部利用钙钛矿电池，这样做能够打破晶体硅电池转换效率 26% 的壁垒。

除了效率之外，TOPCon 领域的另一个非常重要

## 最高和典型 TOPCon 电池效率



效率水平：最近，TOPCon 吸引了光伏电池 / 组件制造商的注意——现在正在迅速达到新的效率高度。

的发展是将技术扩展到更大尺寸的硅片。主要的厂家已经将 TOPCon 技术应用到了 M10 尺寸的硅片上，最近在 SNEC 展会上，一些公司甚至展示并推出了基于 G12 尺寸硅片的组件。

### 4.2 TOPCon 组件功率

商业化的 TOPCon 组件很少，因为直到现在大多数公司还是只在运行测试线。少数的确实能够提供 TOPCon 组件的还是传统的 TOPCon 生产商，例如隆基和中来光电。在 2019 年，天合光能开始提供 TOPCon 组件，最近国电投也加入了其中。然而，在 2021 年的 SNEC 展会上，很多公司推出了大量高功率 TOPCon 组件（见图表）。

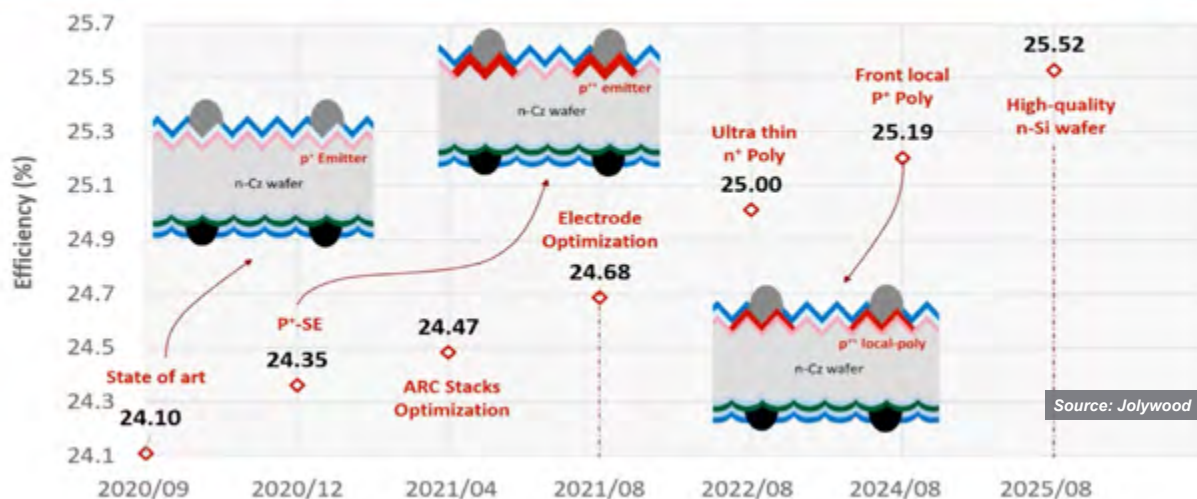
中来光电提供多种类型的 TOPCon 组件，其中 4 款组件为主力型号。这些组件在硅片尺寸（182mm 或是 210mm）和电池片数量上存在着很大区别，并且每种硅片尺寸版式又分两种型号，额定功率的范围为 415 W 到 700 W。G12 尺寸硅片的组件使用 12 根主栅实现互联，而稍小的 M10 尺寸硅片的组件使用 11 根主栅，半片电池和整片电池的主栅数量是相同的。该系列的顶级产品称为 Niwa Max，是一款 700 W 组件，共集成了 66 片 G12 电池片，组件转换效率



量产先驱：中来光电引领 TOPCon 量产之路；它不仅是第一个投入 GW 级量产的公司，而且量产电池的效率也接近 24%。



## Jolywood NTOPCon Bifacial Cell Technology



发展路线图：中来光电在 TaiyangNews 在线会议上分享了其发展计划，到 2025 年将其 TOPCon 技术的效率提高到 25.5%。

为 22.53%。一块使用 60 片电池的小型组件的功率为 640W，但其转换效率略高，为 22.61%。该公司的 M10 产品系列有两种版型——72 片电池片和 54 片电池片——额定功率分别为 560 W 和 415 W。

天合光能是 G12 尺寸硅片的坚定拥护者，也是一家很早就开始从事 TOPCon 技术研发工作的企业。其已经在 210mm 尺寸的硅片上运用了 TOPCon 技术，也在近期的 SNEC 上推出了功率为 700W 的组件。

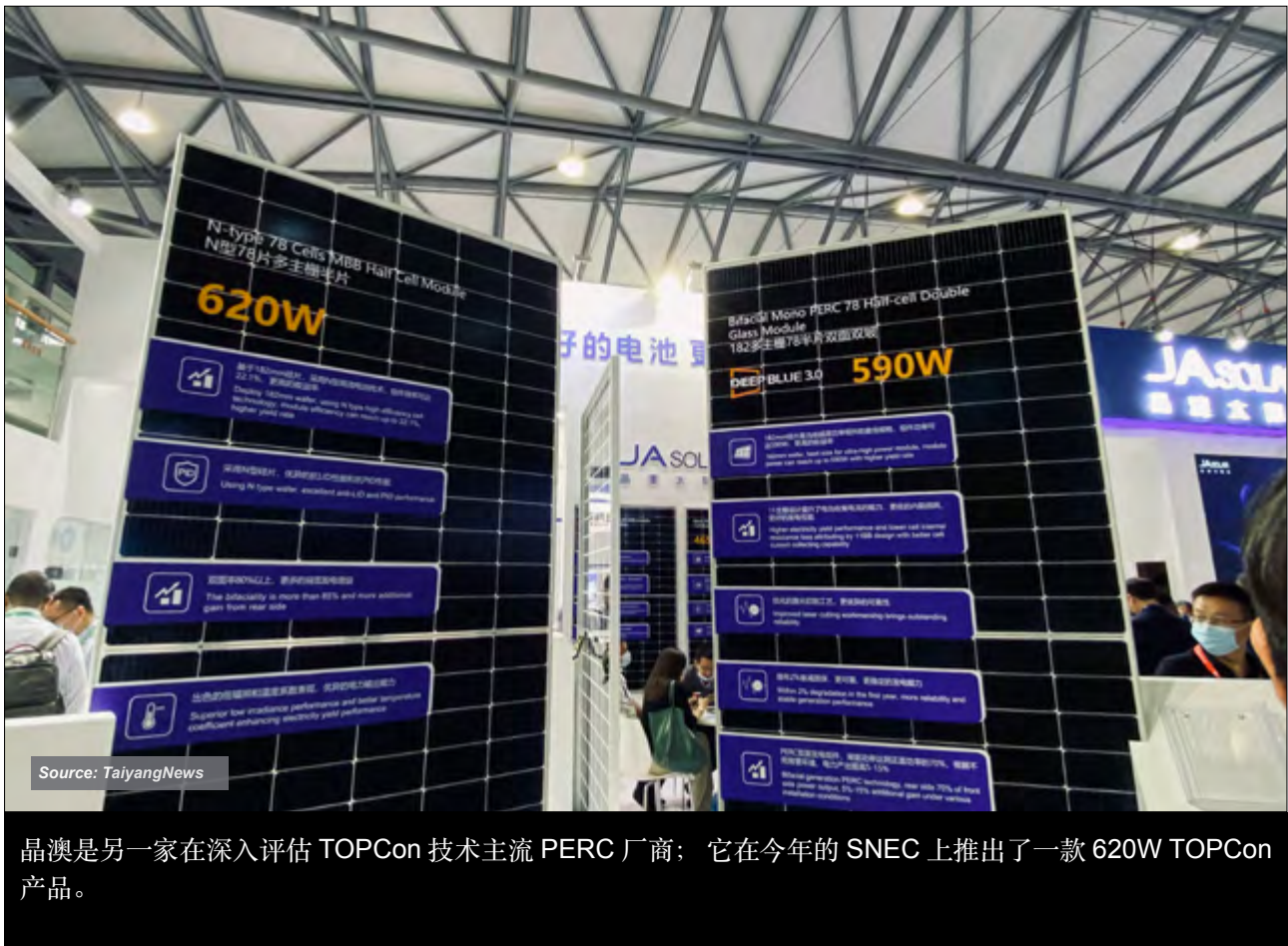
晶科能源曾在 SNEC 2020 上推出过 Tiger Pro 组件系列，今年，其推出该组件的 n 型系列，该系列在今年展会的产品列表中名列前茅。这一产品系列也在 TaiyangNews 超高功率光伏组件线上会议上介绍过。晶科能源将其称为 HOT 2.0 技术。在组件层面上，应用 TOPCon 技术的 Tiger Pro 组件的设计要素和 PERC 组件几乎是一致的——双面组件，半片组件，多主栅技术，叠焊技术——仅会有稍微的修改。一种变化是组件的多主栅布局使用 10 主栅，而不是 9 主栅。在仔细计算后，晶科能源发现 0.35mm 厚度对于 10 主栅来说是最好的。然而，其专有的用于电池互联的叠焊技术的设计保持不变。在这里，多主栅技术中用于互联的 0.35mm 的圆栅线会被在其需要弯曲的地方压成平带，对应其后电池的顶端位置。不是把这些电池片一块接着一块排列，而是要让两块电池片的边缘稍稍重合。该种组件也使用特殊结构的封装材料来

填充重叠区域，在层压过程中能够提供缓冲用以避免机械应力。该组件的额定功率为 625W，转换效率为 22.86%。

隆基和晶澳太阳能在 SNEC 推出了他们的第一批 TOPCon 组件。隆基的组件，称作 Hi-MO N，利用了 72 片 M10 尺寸的电池片，最终组件的功率为 570W，转换效率为 22.3%。晶澳太阳能的产品也是基于相同的版型，具体是 78 片电池片，组件功率为



晶科在 TOPCon 领域加大投入；该公司已在全球推出额定功率为 620 W 的 Tiger Neo 组件。



晶澳是另一家在深入评估 TOPCon 技术主流 PERC 厂商；它在今年的 SNEC 上推出了一款 620W TOPCon 产品。

620W。其他在 SNEC 上发布的引人注意的 TOPCon 产品及其各自的额定功率如下：

- 通威 — 695 W
- 尚德电力 — 620 W
- 一道新能源 — 560 W
- 协鑫 — 475 W
- 正泰新能源 — 470 W

东方日升，一家长期支持异质结电池的企业，也推出了基于混合电池技术的组件——将 TOPCon 和 HJT 技术相结合。根据可获得的有限信息，该技术将 TOPCon 结构作为背面。与传统的 HJT 结构相比，该种技术有望增加开路电压和电流密度。

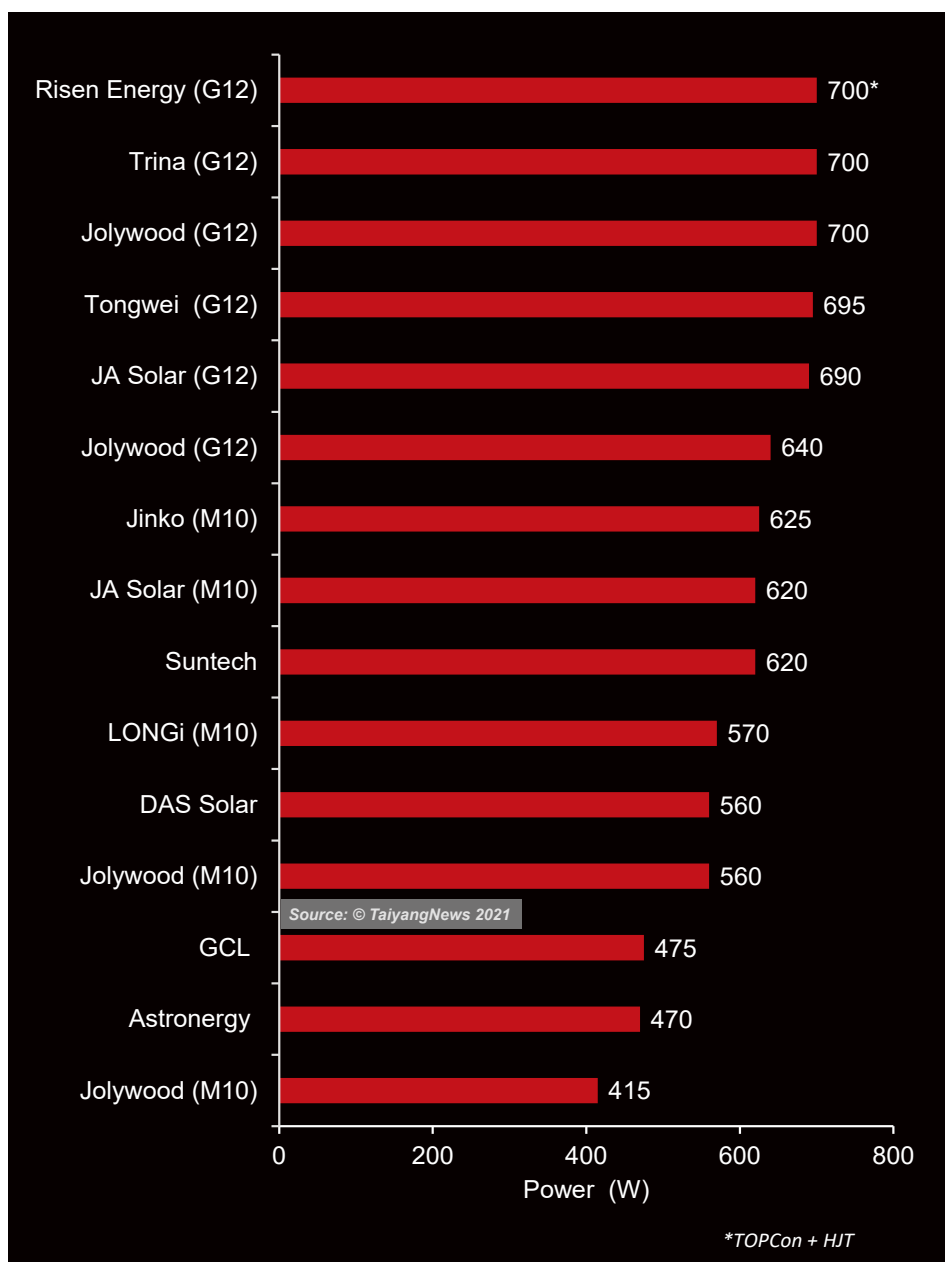
### 4.3 TOPCon 在安装应用中的表现

TOPCon 不仅能在电池和组件层面上表现出很高的转换效率，而且在真实的户外运行条件下，也表现得很好。与现有的 PERC 技术相比，TOPCon 的关键

优势在于目前的工业实践是基于 n 型硅片。这一事实足以让其免受光致衰减 (LID) 的影响。中来光电的研发总监陈嘉在 TaiyangNews 超高功率组件会议中介绍了其内部的和第三方的测试数据。内部测试数据显示，TOPCon 组件在进行 LID 测试时，实际上其功率会有轻微的增加。在 Fraunhofer ISE 的测试结果和中来光电的内部测量结果十分相近。在 LID 测试过程中，PERC 组件的功率损失高达 5%，而中来光电的组件则表现出会有 0.5% 的轻微功率增益。中来光电的技术副总裁刘志峰在 TaiyangNews 高效电池会议上展示了另一组测试结果，该结果与另一种重要的退化机制，即热辅助光致衰减 (LeTID) 有关。

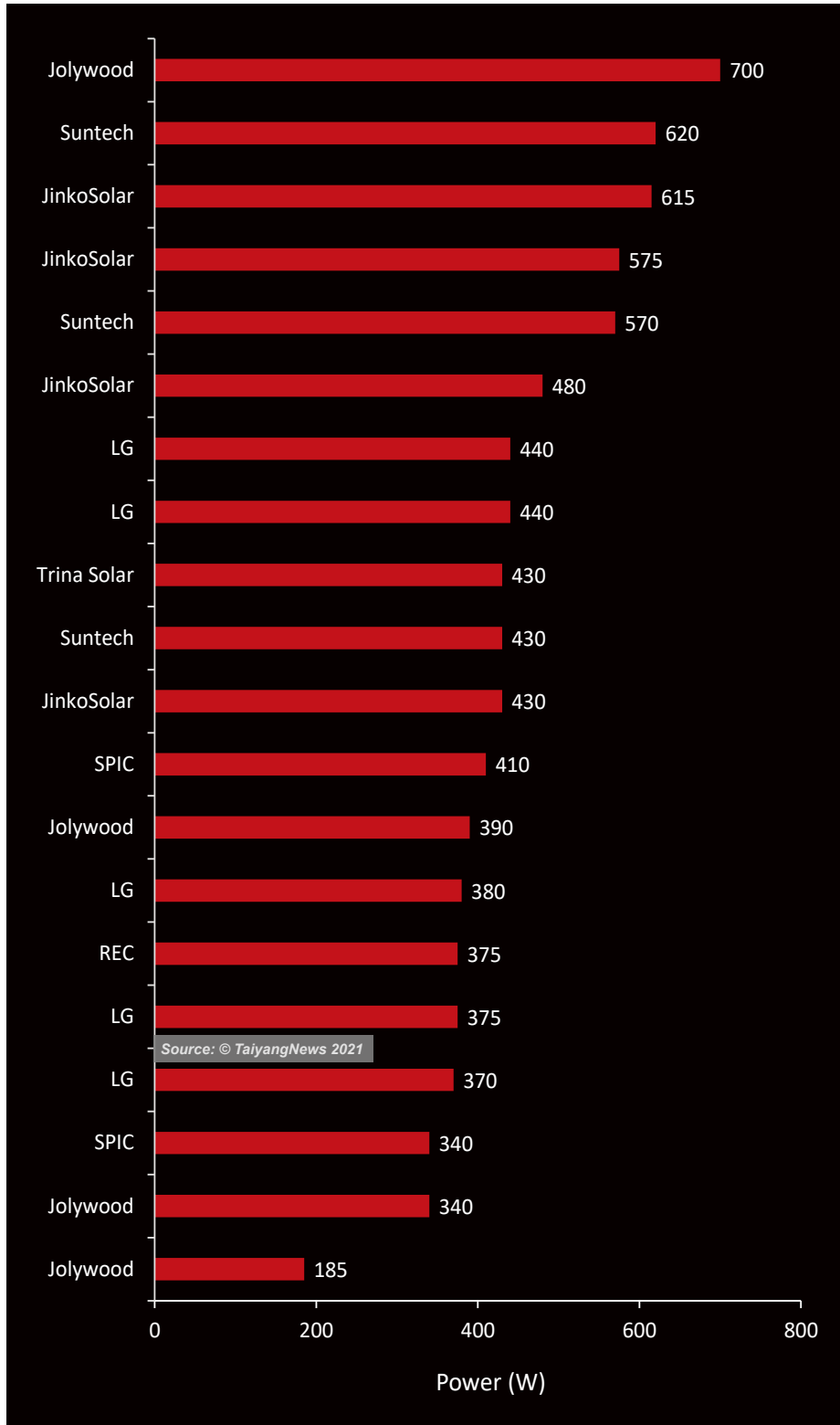
根据来自 TUV 莱茵的测试结果，PERC 组件通常会因 LeTID，造成组件功率衰退 2-3%，n 型 PERT 技术不被该现象影响，而 TOPCon 组件的功率则会有 1% 的轻微上升。中来光电也在其自己的实验室中对此衰退现象做过深入的研究，发现在大部分测试结果中，LeTID 测试均会造成功率有所轻微上升。刘志峰详细地解释了功率衰退（如果不是功率增益的话）的

## SNEC 上推出的不同 TOPCon 组件的功率



SNEC 2021 展上多家组件厂商推出了基于 TOPCon 的组件产品。

## 量产 TOPCon 太阳能组件



进入量产：只有少数组件厂商向市场供应量产型号的 TOPCon 组件，中来提供种类最多的不同组件产品。

三种现象。

- 氢在 n 型硅片中的渗透度要明显低于 p 型硅片。这意味着在烧制过程中，与 p 型硅相比，扩散到 n 型硅中的氢更少。氢越少，H-P (N-Si) 键的形成越少，因此衰退也会越少。
- n 型硅中 P-H 对的结合能 (0.41 eV) 远低于 p 型硅中 B-H 对的结合能 (0.5 eV)。因此，在退火条件下，过程越快，恢复也就越快。
- 测试结果显示，氢在 n 型硅中的扩散率通常为比氢 p 型硅的扩散率高几个数量级。因此，n 型硅中的氢更快从硅中扩散出来，这可能会导致加速恢复。

**低温度系数**是 TOPCon 电池对比 p-PERC 电池的另一个优势。中来光电 TOPCon 组件温度系数为 0.32%/°C，而领先供应商的 PERC 组件为 0.34 或 0.35%/°C。中来光电的研发总监陈嘉表示，温度系数每降低 0.05%/°C，就有可能将 LCOE 降低 0.9% 至 1.3%。凭借这个优势，中来光电主要将其产品推广到中东等干旱地区，那里的温度和地面反照率都很高——后者有利于提高双面率。

**双面率**是 TOPCon 技术的一个重要方面。一方面，TOPCon 不希望掺杂多晶硅层中产生光吸收，导致与其同样采用 n 型技术（如 n-PERT 或 HJT）

相比，双面率较低。改善双面率的一种方法是减少多晶硅层的厚度。然而，陈嘉强调，薄膜厚度只是影响双面率的几个因素之一，其他几个因素还包括金属化造成的遮光、背表面形态（制绒或抛光）、背钝化质量以及硅片质量。当然，减少膜层厚度不仅可以改善双面率，还可以提高沉积设备的产量，最终有助于降低成本。虽然陈嘉不愿透露具体的薄膜规格，只是提到“大约 100nm”。另一方面，商用 TOPCon 组件的双面率肯定高于常规；晶科能源的 TOPCon 组件拥有 85% 的双面率。即使是中来光电 80% 的双面率也高于大多数 PERC 组件 70% 的双面率。陈嘉表示，双面率每增加 10%，LCOE 就会降低 0.7% 至 1.1%。

在应用方面，TOPCon 带来的高效率率使其早期应用者（如 LG）主要针对屋顶应用推广其产品。鉴于空间限制和高能源密度需求，这种应用环境下 TOPCon 比用于工商屋顶和电站的同类产品有优势。相比之下，中来光电虽然也有住宅屋顶用组件，但其核心重点是大型电站。据陈嘉介绍，该公司的 TOPCon 产品除了应用在作为中国“领跑者”计划下的多个基地之外，还用于世界不同地区的多个电站项目。他进一步强调，公司产品最适合中东等炎热地区，截至 2020 年底，公司已向该地区出货约 900MW 组件，而 n 型组件总出货量达 4GW。晶科能源最新推出的 TOPCon 产品在设计时就考虑到了大型电厂的需求，即更大尺寸的组件和更高的功率。



与 TOPCon 的多数早期厂商主要专注于高端屋顶市场不同，中来主要专注于电站方向，如图所示。

## 5. TOPCon 的商业化及生产

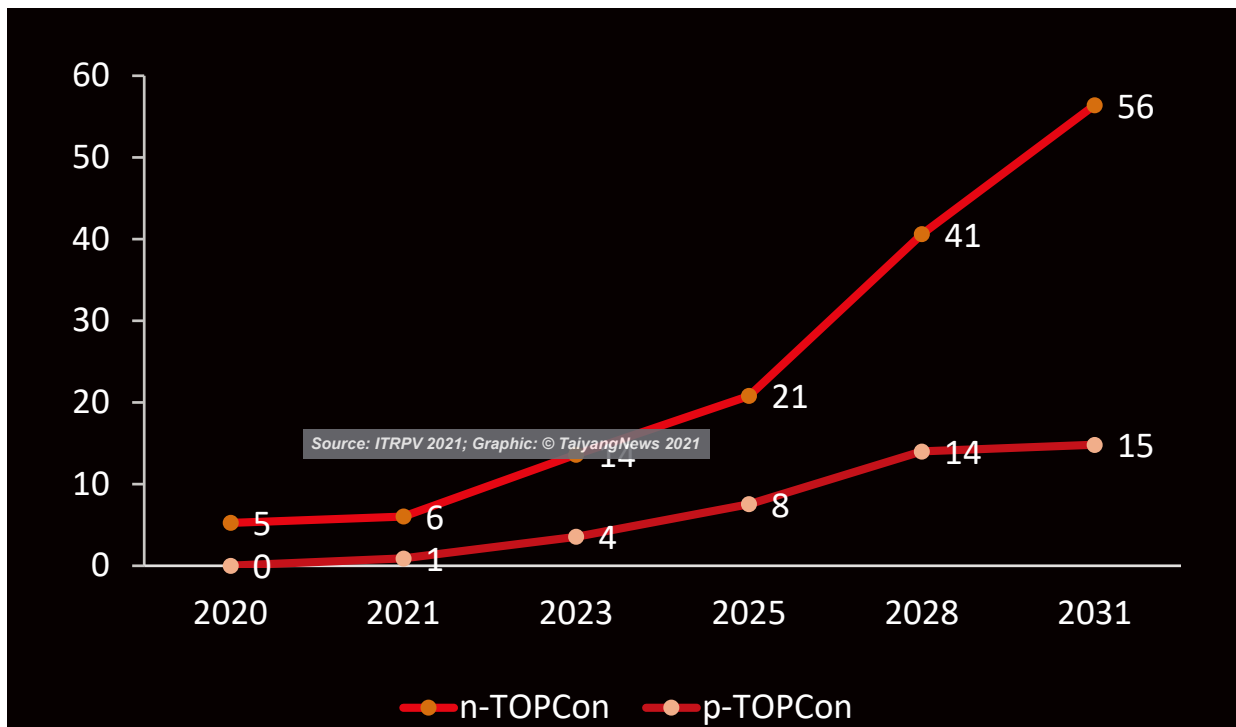
看到几家公司相继推出 TOPCon 产品是令人鼓舞的。虽然 PERC 仍然是这些公司的主要产品，但他们的 TOPCon 扩产计划更多的是受市场需求的驱动。如前所述，大多数领先的光伏企业都有试验 / 测试线，他们正在对 TOPCon 技术进行评估。而截至本报告发布时，只有少数公司已经进入 TOPCon 产品的商业生产。中来光电是 TOPCon 的领导者，拥有 2.1GW 的电池和 3GW 的组件生产能力，最近宣布计划分两个阶段进一步扩大 16GW 的生产能力。两个阶段各为 8GW，第一阶段预计需要 2 年左右的时间，第二阶段则需要 1 年。

至于其他光伏企业，TOPCon 只是他们现有电池产能的一小部分，但仍有一些值得一提的地方。晶科能源在 TaiyangNews 会议中表示，n 型电池目前占其现有电池容量的 800 MW。尚德与江苏微导合作建设 2GW 工厂。虽然尚未得到官方证实，但隆基已计划为 TOPCon 安装 GW 规模的生产设备。今年 3 月，据报道台湾太阳能电池和组件生产商联合再生能源

(URE) 计划在 2021 年开始小批量生产 TOPCon 电池。太阳能电池制造商爱旭也在 2021 年 SNEC 上宣布将在其产品线中增加 n 型产品，总产能为 8.5 吉瓦。然而，目前还不知道这是针对 TOPCon 还是 HJT。

从技术上讲，TOPCon 的潜力无限。当 PERC 达到其效率极限时（预计很快就会达到），并且钝化接触的磨合问题得到解决，大部分现有的 PERC 产能将需要升级，自然而然的进展就是钝化接触。在 TaiyangNews 高效电池技术会议的论中，据估计，到 2022 年，TOPCon 的产能预计将至少超过 10GW。然而，随着几家公司现在已经涉足该技术，到年底可能达到 15GW 的水平。ITRPV 估计，这项技术作为一个整体，将逐步增加其市场份额，从 2021 年的仅 6% 增加到未来 10 年的 50% 以上。然而，这一预测是针对 n 型和 p 型的结合。从目前的情况来看，n 型硅片将继续成为首选材料，p 型硅的份额占比太小，预计到 2023 年才开始崭露头角。

### TOPCon 市场份额 – ITRPV



同样适用于 p 型：虽然今天的 TOPCon 都采用 N 型，但 ITRPV 还是预计这种高效电池技术的 p 型变体将于 2023 年开始出现。

## 6. 成本

降低成本是 TOPCon 具备量产竞争力的关键。与 PERC 相比，该技术当然需要更高的资本支出。同样，如上所述，即使尽一切努力通过新的沉积技术简化工艺，步骤数量也只能与 PERC 相匹敌。这仍然需要更高的资本支出，因为所涉及的步骤本身就比较复杂，比方说用于发射极形成的硼扩散、背面钝化叠层和之后的湿化学处理步骤。工艺复杂性使得生产设备变得更加昂贵。鉴于它仍然是一项新兴技术，TOPCon 尚未进入大规模量产。TOPCon 的 1GW 产线需要约 2-2.5 亿 RMB 的资本支出，比同等产能的 PERC 线高约 4000-5000 万 RMB。

## 7. 挑战及机遇

与任何高效电池结构一样，TOPCon 并非没有其局限性。如上一节所述，高资本支出和运营支出是明显的主要挑战。

**主要在电池背面：**TOPCon 的一个主要限制是其架构目前仅限于应用在电池背面，主要是由于不希望掺杂多晶硅层中产生光吸收。理论上，要使 TOPCon 应用于发射极侧，需要在接触下方具有局部多晶结构。至少目前来说，相应的成本在大批量制造中是不可行的。

**正反两面银浆的使用：**同样，如成本部分所述，银浆是 TOPCon 的生产高成本的原因之一。然而，随着市场的增长，行业肯定会投入必要的时间和精力来减少浆料消耗，进而降低成本。

**与 p 型的兼容性低：**如今，钝化接触在某种程度上主要针对 n 型硅片。然而目前主流使用的是 p 型硅片，硅片厂商对 n 型的投入不积极。。

**PERC 压力：**PERC 技术一直在突飞猛进地发展，因此业界一直对它保持高度关注。超越 PERC 技术是目前任何新技术的最大目标，钝化接触也不例外。一方面，TOPCon 和 PERC 电池之间的效率差异并不大。例如，TOPCon 组件效率为 21.61% 和额定功率为 560W，等效的 PERC 组件分别为 21.3% 和 550 W，因此 TOPCon 并没有太大的领先优势。即使是单面沉积，与 PERC 相比，TOPCon 也涉及更多步骤需要增加成本。

根据多篇中国光伏媒体的报道，TOPCon 生产成本也比 PERC 高出 20% 左右。从数字来看，与 TOPCon 相关的非硅成本比 PERC 高 0.05 至 0.09 元/瓦。TOPCon 主要使用 n 型硅片因此价格也略高，而且双面印刷的银浆也增加了生产成本，更何况高额资本支出导致的折旧成本。不过基于目前采取的一些减少浆料消耗的措施，一些专家认为设备成本将很快进一步下降。在量产效率的不断提升下，更重要的是，不断拉大的 PERC 和 TOPCon 效率差异下，该技术肯定会很快能在市场中拥有一席之地。

然而，最新一代的 TOPCon 产品已经取得了一些不错的进展。中来股份最新的基于 G12 的 J-TOPCon 2.0 组件具有 700 W 的额定功率和 22.23% 的效率。同样采用 66 片电池尺寸为 G12 的 PERC 组件可提供 670 W 的功率和 21.6% 的效率。TOPCon 在这个级别上当然看起来很有吸引力，但前提是 PERC 发展停滞在这个水平时。然而，PERC 方面的发展也不能完全被排除在外。

**与 PERC 接近：**另一方面，TOPCon 在结构和制造工艺方面都与 PERC 非常相似 -- 这一点可能对其有利。虽然，TOPCon 确实需要一些额外的生产设备，但 PERC 生产线的大多数设备仍可使用。整体工艺耐高温；虽然它仍然需要一些优化，但在重要的工艺消耗品方面，如金属化浆料不需要做出调整。组件的制造也可以保持与标准相同，而且该技术与所有先进的组件技术同样兼容。与 PERC 的密切相似性也使得它很容易扩展到采用更大尺寸的硅片。总而言之，不可否认的是，TOPCon 需要在电池层面付出额外的努力，但它最终也会获得更好的电池性能。

**Ready to partner for upgrades:** TOPCon 的一个重要优势是在生产中可将该结构与 IBC 结合。在研发层面，ISFH 采用这种电池结构创造了电池效率纪录。TOPCon 还可以用作顶部有钙钛矿的串联结构的底部电池。

## 8. 结论

在 2021 年 SNEC 展上推出的 TOPCon 组件数量之多令人惊讶。组件效率全线超过 22%，最高达到 22.9%。在组件功率方面，3 家公司——中来光电、天合以及东方日升——推出了 700 W 组件。

事实上，很长一段时间以来，TOPCon 一直被认为是接替当前主流产品 PERC 的候选技术。但它的直接竞争对手 HJT 以更高的量产效率领先。PERC 的表现比大多数专家几年前的预期要好得多。PERC 电池的量产效率达到了非常高的水平，目前接近 23%。基于大尺寸硅片的 PERC 组件，已将 PERC 的性能推至从未想象的高度。

然而，PERC 组件的进一步提升空间有限。同时原材料短缺和价格的上涨，对成本的压力正在增加。电站项目开发商对高性价比平组件需要逐年提高。投入效率更高的太阳能电池 TOPCon 是可行的答案之一。

TOPCon 在结构和制造方面与 PERC 的相似是其特有的优势。其竞争者 HJT 需要完全不同的生产线设计。

但 TOPCon 未来的发展也还有很多挑战。TOPCon 为原 n-PERT 技术支持者带来了前进的曙光，尽管被视为 PERC 当然的升级技术，但目前 TOPCon 在量产产品中拥有的市场份额可以忽略不计。中来光电是少有的产能突破 GW 规模的 TOPCon 电池 / 组件制造商。

几年之前，PERC 也面临着同样的障碍。今天的 TOPCon 所处的位置，就像上次技术换代时，PERC 替代 BSF 所处的位置一样。TOPCon 拥有相同的性能优势和类似数量的升级所需附加工艺步骤。

TOPCon 电池生产的一个关键问题是 LPCVD，考虑到其固有的环绕问题，需要额外的工艺处理，相关成本的上升和良率的拉低。从 PERC 升级 TOPCon 所带来的效益提升和所需投入的成本相比，对投融资方来说还不具有足够的推动力。

随着研发的投入，不断推动着 TOPCon 的发展，例如可以缓解环绕问题的 LPCVD 改进设计。新的沉积技术正在开发完善中，有望减少工艺步骤的数量。设备供应商对 TOPCon 技术的未来发展表现出前所未有的乐观。如果引入新的创新设备平台并优化工艺顺序，TOPCon 和 PERC 之间 15-20% 的成本差距可能会进一步缩小。通过设备厂商之间的竞争，对 TOPCon 技术越来越多的投入，降低设备成本和耗材的价格将会缩小两者之间的成本差异。

值得注意的是，主流组件厂商越来越多地在会议上介绍其 TOPCon 产品的研发情况。与此同时，TOPCon 的中试线也越来越多，并一批量产产品开始投入市场。

不过，很难说何时能看到 TOPCon 的全面出现。尤其是因过去的两年强劲的 PERC 扩产。虽然专注于 TOPCon 的公司中来光电刚刚宣布将其产能扩大到接近 20 GW。

CYBRID  
Valued by Innovations

背板出货量累计超 **170GW**

连续 **7年** 出货量全球领先

POE性能 **全球领先**



综合高分子材料方案解决商

苏州赛伍应用技术股份有限公司



## 5. 专访 – 中来光电 陈嘉博士

SNEC 2021 展会上出现的众多 TOPCon 产品，向行业传递了重要的发展趋势。TOPCon 技术长期以来的倡导者中来光电，以及当前主流 P 型 PERC 产品的供应商都推出了基于 TOPCon 技术的组件。特别是中来光电，它在与 TOPCon 有关的每一个重要方面，无论是产能、经验还是技术进展，都备受业内瞩目。该公司还宣布了一项雄心勃勃的产能扩张计划，分两期将 TOPCon 的产能增加到 16 GW。中来光电助理总经理陈嘉博士向 TaiyangNews 透露了公司的现状和未来发展路线，和其技术方面的见解。



陈嘉博士 中来光电助理总经理

陈嘉博士是中来光电研发与应用方向的助理总经理，拥有强大的学术和研究背景，获得博士学位后曾在欧洲先进技术的研究中心——比利时 IMEC 任职，目前负责中来光电的研发工作。

**TaiyangNews:** 您能否向我们介绍一下在选择 n 型路线，包括 IBC 和 n-PERT，而非主流的 p 型 PERC 时，你们是如何考虑的呢？

**陈嘉:** 当在 2016 年选择 n 型路线的时候，它还没有现在这么受欢迎。我们经过深入研究发现，n 型太阳能电池有潜力达到更高的效率水平。首先，这种材料本身比现有的 p 型要优越得多，这意味着组件可以提供更高的功率，从而降低 LCOE 平准化度电成本。此外，n 型在几乎所有方面都比 p 型更具优势，无论是双面率、衰减率还是可靠性。我们现在看到，对 n 型电池未来发展前景的预期正在实现中。

说到这里，我也必须强调，这一过程并不轻松。在我们刚起步的时候，几乎没人认可 n 型的方向，一些客户都不相信组件可以从背面发电，更不用说低温系数和无衰减等好处了。公司的多个部门，特别是市场营销、销售和技术团队，必须非常努力把数据放在客户面前，说服他们太阳能项目如何从这些优势中获益。

**TaiyangNews:** 你们目前的 TOPCon / IBC 电池组件产能是多少？有什么扩张计划嘛？

**陈嘉:** 目前中来光电的 TOPCon 产能是 2.1GW。我们正计划在江苏泰州和山西省分别增加 1.5GW 和 16GW。

**TaiyangNews:** 你们是何时决定从 PERT 升级到 TOPCon 呢？为什么？

**陈嘉:** 那是在 2018 年做出的决定，有几个原因：首先是

PERT 在电池效率和潜力方面与 P-PERC 非常相似。我们知道制备 n 型电池实际上需要更高的成本。因此，在电池效率相当的情况下，更高的成本对我们和客户都没有好处。因而必须升级我们的技术。作为其中的一部分，我们对电池结构进行了非常详细的损耗分析。我们的 n-PERT 电池的关键损失是在接触区域或金属化的地方。为了解决这个问题，我们决定改进接触区域。当时 TOPCon 在学术界非常热门，它实际上就是一种钝化接触，刚好是我们一直在寻找的解决方案。最重要的是，我们只需要增加一个步骤就可以将 n-PERT 升级到 TOPCon，这意味着投资成本也很低，而效率潜力却很大。因此，采用 TOPCon 是一个明智的选择。

**TaiyangNews:** 在 TOPCon 的产能和量产经验方面，中来光电目前处于行业领先地位。在这个过程中，你们学到的最重要的东西是什么？

**陈嘉:** 正如我之前提到的，这个过程并不容易。将一项新技术投入商业生产总是很困难的，而且 TOPCon 实际上是非常特殊的。我们必须自己建立整个供应链，无论是设备、材料还是其他工艺耗材。TOPCon 的量产三四年后才开始，并且是由中来光电和其他少数领先企业带领下开始的。这意味着整个行业都没有大规模生产的关键技术。所以我们必须一个接一个地把这些点连接起来。我们是第一批努力探索如何将不同加工设备和材料整合起来的人。是的，我们对在这段艰难的旅程中所获得的丰富经验感到非常自豪。

**TaiyangNews:** 其他一些公司也尝试了 TOPCon 技术研发，但是尚未大批量生产，或者干脆放弃了。您觉得问题的关键在哪里？中来光电又是如何克服这些困难的呢？

**陈嘉:** 首先, 我不认为他们出现了什么错误。每家公司会出于不同的原因暂停或推迟一个项目。我可以想到几个原因: 不同的经营环境, 扩产驱动的战略, 例如部分拥有大量 PERC 产能的厂家, 可能会偏向花更多的时间来评估技术, 等待技术成熟时刻的到来。因此, 这一切都取决于一个公司的情况、财务状况、能力、信念或战略。不同的公司可能会采用不同的 TOPCon 方案, 或者自主研发推动自有的技术。在我看来, 没有一家公司是失败的, 他们只是采取了不同的战略和步伐来实现 TOPCon 技术的优势。

至于中来光电, 我们一直只专注于 TOPCon 技术, 让它变得越来越好。TOPCon 是我们公司的支柱, 我们必须不断努力推动自有技术的发展达到预想的目标, 并此在过程中累积经验和技术方案。

**TaiyangNews:** 根据您的经验, TOPCon 技术能否成功的三个关键特征是什么?

**陈嘉:** 首先是 PERC 和 TOPCon 之间的效率差距。目前, 在实验室环境下, 这两种技术之间的效率差距在 1%-2%。而最近, 包括中来光电在内的多家公司已经在实验室中实现了 25% 以上的效率。这表明, 仅增加一层隧穿氧化层和多晶硅层就可以提高电池效率, 增加组件功率。并且随着越来越多的投入, 我们坚信 TOPCon 的非硅成本将与 PERC 相当。

其次是影响 LCOE 的其他因素。为推出量产的 TOPCon 电池, 我们必须站在项目开发商的角度考虑问题。因此, 对于客户来说, 组件在真实环境中能够发多少电是非常重要的。产品标签上的功率标称数只起到指示作用, 因为该功率是在实验室 STC 下测量的。然而, 组件在现场的工作温度在 75°C 左右。因此, 低温度系数在这里证明是非常有利的。另一个重要方面是双面率, 这里 TOPCon 的双面率肯定高于 PERC。通过越来越多的实际安装数据, 客户可以深入了解到 TOPCon 这些有利于降低 LCOE 平准化度电成本的优势。

那么最后一个是需要有越来越多的公司加入, 合作开发 TOPCon 技术。在中来光电, 我们一直都在积极邀请越来越多的人加入我们的 TOPCon 之旅, 分享我们的经验, 同时鼓励其他伙伴一起加入。我们也感谢我们的合作伙伴——设备和材料供应商们的全力支持, 没有他们, TOPCon 就不会达到今天的水平。TOPCon 需要产业链、价值链和供应链等各个部分共同努力, 来加快进展。

**TaiyangNews:** 现今的技术主要面临的挑战是什么? 你认为 5 年后的主要挑战是什么?

**陈嘉:** 从技术角度来说, 首先是目前 TOPCon 的工艺流程相当复杂。复杂的 TOPCon 工艺和其他简单的电池工艺之间作直接的对比是不公平的。在过去的 5 年中, 中来光电一直在研究这项技术, 但我们遭遇了重重困难, 尤其是生产方面的问题。生产中的关键问题之一是冗长工艺流程导致的良率问题, 我们一直在努力解决这些问题。这就是为什么我们一直致力于缩短工艺流程以提高产量和降低成本的原因。例如, 去年中来光电发布了采用 POPAID 技术的 J-TOPCon 2.0。该技术更侧重于缩短工艺流程。这与其他主要致力于提高实验室效率的公司相比完全不同。在中来光电, 大部分项目甚至是研发层面的项目都旨在缩短工艺流程、解决良率问题和稳定工艺。我们取得的成绩是显著的, 但我认为还有提升的空间; 我们必须进一步缩短工艺流程或至少扩大工艺窗口, 这样当 TOPCon 产能在上升到 10GW 或 20GW 水平时, 产线上出现的问题就会减少。从技术角度来看, 与 PERC 相比, 目前的第二个挑战是 TOPCon 的银浆消耗量仍然较高。我们的目标是使 TOPCon 成本与 PERC 相当。因此, 我们需要使 TOPCon 的银浆消耗量与 PERC 持平。而要做到这一点, 我们需要与浆料供应商密切合作。同时, 我们还必须优化工艺以减少银浆消耗量。当达到这个目标时, TOPCon 的成本将与 PERC 的成本相近。

**TaiyangNews:** 您认为需要多长时间才能看到一些全球电池 / 组件领先企业跟随中来光电的步伐, 将 PERC 产能升级为 TOPCon?

**陈嘉:** 我认为这个转变已经在发生。许多拥有大产能的领先制造商已经宣布了开发 TOPCon 的计划, 不仅是在研发层面, 而且有具体的生产规划。也有一些生厂商宣布将 PERC 生产线升级为 TOPCon。总的来说, 与去年相比, 总体情况更加乐观。我相信很快会有越来越多的公司将加入 TOPCon 的行列。

**TaiyangNews:** 你对目前 TOPCon 的供应链 -- 生产设备、沉积技术和金属浆料是否满意?

**陈嘉:** 首先, 我非常感谢目前致力于研究 TOPCon 的所有供应商。因为与 PERC 相比, 该部分的市场很小, 但所需的研发工作量很大。因此从 TOPCon 技术中产生的收益来说, 我可以想象这对他们来说并不是有利可图, 这也是我为什么非常感谢他们的原因。

话虽如此, 如果问我对目前的供应感到满意吗? 我想答案不完全是肯定的。有很多方面还有待提高。浆料就是一个例子。正如我之前提到的, 浆料消耗量仍然很高。在接触区产生的损耗仍然很高, 这会导致电池效率下降。因此, 浆料生产商必须改善接触区的形成并减少消耗。硼扩散是另一个需要优化的过程, 这是一个漫长的过程, 因为涉及高

**第十六届(2022)国际太阳能光伏与智慧能源(上海)大会暨展览会**  
SNEC 16th (2022 International Photovoltaic Power Generation and Smart Energy Conference & Exhibition)

**2022** | **5月24-26日**  
**中国·上海**

地点：上海浦东新国际博览中心

Venue: Shanghai New International Expo Center (SNIEC)



SNEC 网站

◎主办单位：上海新能源行业协会 / 上海伏勒密展览服务有限公司

◎承办单位：上海伏勒密展览服务有限公司

地址：上海市徐汇区宜山路425号光启城办公楼905-907室 邮编：200235

电话：+86-21-33685117 / 33683167

◎For exhibition: [info@snec.org.cn](mailto:info@snec.org.cn) For conference: [office@snec.org.cn](mailto:office@snec.org.cn)

资本支出和运营支出。

**TaiyangNews:** 您认为到今年年底、2022 年底以及 5 年后，TOPCon 的全球产能将是多少？

**陈嘉:** 今年年底，我们应该有 5GW- 10GW 的 TOPCon 产能。不仅其他公司有提高产能的计划，中来光电本身也会为此做出很大贡献。至于明年，这主要取决于其他生产商的计划成功与否。在主流生产商取得成功时，大家都会追随他们的脚步，那么 TOPCon 的产能将很大。不过，这也取决于客户的接受程度和供应链的发展。明年，TOPCon 产能可能会在 20 GW 到 50GW 之间，这取决于包括供应链发展在内的几个因素。我个人相信 TOPCon 产能将会很快上升。

**TaiyangNews:** 我们来谈谈 TOPCon 结构的双面率。双面率对于 TOPCon 结构有多重要？您是否认为有很大的改进潜力？

**陈嘉:** 双面技术有利于电池背面发电，提高太阳能光伏系统的发电量。当然，双面发电的重要性对于不同应用环境的电站来说也所有不同。例如，中来光电的产品在中东很受欢迎，因为很多大型项目都在沙漠中，反射率很强。因此，双面技术很有意义。这也是为什么中来光电双面率为 80% 的组件十分受欢迎的原因。

实际上，双面率就是电池背面和正面的效率之比。如果只是改进电池的正面，虽然整体上有改进，但它会降低双面率。同样，单独改进背面会使双面率提高，但这可能无法完全有助于实际发电量的改进。作为电池制造商，当我们试图提高电池的性能时，我们通常会关注正面，因为大部分光线来自正面，因此非常重要。我们希望提高双面率，但不能以牺牲正面效率为代价。

**TaiyangNews:** 目前公司 TOPCon 电池的平均效率和最高效率是多少？

**陈嘉:** 目前量产平均效率超过 24%，最高量产效率为 24.5%，最高电池效率达到 25.4%。

**TaiyangNews:** 您认为 TOPCon 技术的商业化量产平均效率极限是多少？

**陈嘉:** 平均量产效率在一年或一年半内可达 25%。为了进一步使效率超过 25%，我们需要一些突破性的技术。目前，最大的损耗发生在正面，这意味着必须在正面采用选择性发射极技术，甚至还必须实施钝化接触结构。然而，这些技术在生产层面上都没有非常成熟。不过，这也意味着 TOPCon 技术的潜力非常大。如果电池正面有真正的突破，量产效率可以提高 25% 以上。

**TaiyangNews:** 贵公司的 TOPCon 组件的主要目标应用场景是什么——高端住宅或是电站项目？

**陈嘉:** TOPCon 具有高效率和高组件功率，因此非常适合应用于住宅。然而，我们中来光电相信如果成本足够低——与 PERC 非常接近——加上 TOPCon 的所有其他额外优势，TOPCon 在大型电站的应用中也非常具有竞争力。正如我们在几次会议和公告中所强调的那样，我们已在电站领域成功应用了该技术。

**TaiyangNews:** 您能否详细说明公司关于 TOPCon 技术的路线图 - 以及其他电池技术（如 IBC 技术）？

**陈嘉:** 如您所知，我们正在生产的 TOPCon 和 IBC 电池，并且非常了解这两种技术的优势。我们的主要生产的是 TOPCon 电池。当然以后我们可能会考虑 IBC 或者 TOPCon+IBC——我们称之为 TBC 结构。然而，对于所有的单晶硅太阳能电池，最终的效率极限都在 29% 左右。我们相信通过串联结构，我们可以进一步提高效率。因此，在未来我们希望将 TOPCon 与其他结构堆叠在一起，或许可能会尝试钙钛矿。

**TaiyangNews:** 您认为 TOPCon 可以击败 HJT，成为 PERC 的继承者吗？

**陈嘉:** 我知道大多数行业都将 TOPCon 和 HJT 视为竞争对手。但我们中来光电从未真正将 HJT 视为竞争者。不知道你是否了解，我们其实也在学习 HJT 取得的一些进展，POPAID 就是一个例子。其实无论是 TOPCon 还是 HJT，这两者都是钝化接触，只是方式不同。每种技术的追随者总是可以从其他人那里学到一些东西。这两种技术都将带来更高的效率。归根结底，必须由投资者做出选择，而成本将在此类决策中发挥重要作用。

**TaiyangNews:** 5 年后，您认为中来会是一家以背板为主的公司，还是成为 TOPCon 电池 / 组件生产为主的厂商？能否解释一下原因？

**陈嘉:** 正如你知道的，截至 2021 年上半年，我们是全球最大的背板供应商。同时，对于 TOPCon 技术我们一直处于领先地位。理想情况下，我们在这两个领域都处于领先地位，而放弃这两个领域中的任何一个都是不容易的。

**TaiyangNews:** 谢谢您能接受我们的采访。

(注：本专访完成与 2021 年九月)



上海市太阳能学会成立于1980年，主管单位为上海市科学技术协会，具有社会团体法人资格。主要业务有太阳能等新能源领域的四技服务、学术交流、科技评价、刊物编辑及培训等。



学会开展的国际交流&学术研讨会精彩瞬间

[www.shses.org](http://www.shses.org)

## CSPV

## 中国太阳级硅及光伏发电研讨会

China SoG Silicon and PV Power Conference

中国太阳级硅及光伏发电研讨会是我国硅材料及光伏发电方面最重要的学术会议之一，每年举办一次，至今已连续举办十七届。通过学术会议，展示我国在光伏产业和硅材料领域的最新研究成果和发展动态。

扫一扫，关注2022 CSPV !



大会秘书处：  
021-62933549，61553118  
E-Mail: [cspv@vip.163.com](mailto:cspv@vip.163.com)

<http://cspv.shses.org>

请访问 TaiyangNews 网站及公众号下载 《TOPCon 电池技术报告》 完整版

[www.taiyangnews.info](http://www.taiyangnews.info)



微信公众  
号



Follow us in LinkedIn or  
subscribe our Newsletter  
to get our latest update.

**TAIYANGNEWS**

ALL ABOUT SOLAR POWER

© TaiyangNews 2021. All rights reserved