

2023年02月08日

机械

行业深度分析

TOPCon 设备行业深度报告：TOPCon 大规模量产，PECVD 成为主流工艺

投资要点

- ◆ **行业转型，TOPCon 电池率先实现大规模量产：**随着 PERC 电池量产效率逐渐接近其理论效率，行业开始转向 TOPCon/HJT 等 N 型电池。而 TOPCon 电池以其电池效率高、设备投资成本低、与 PERC 产线兼容性高等优点，率先实现大规模量产。据不完全统计，截止目前，TOPCon 已投产 69.75GW，规划待建产能近 474GW。
- ◆ **TOPCon 存在工艺路线之争。**TOPCon 电池与 PERC 电池核心差异在于，新增隧穿氧化层，以及掺杂多晶硅层。以多晶硅层制备方法，TOPCon 工艺路线分为 LPCVD/PECVD/PVD 路线。从工业应用角度看，掺杂多晶硅层制备方法，要求工艺简单、产能大；隧穿氧化层因其对电池整体性能影响十分关键，要求工艺制备的膜层致密度高、均匀性好。
- ◆ **从技术角度看，PECVD 法能实现 LPCVD 法同等制备效果，且清洗绕镀简单，工艺精简、良率预期更高。**LPCVD 路线技术最成熟，但有严重绕镀、原位掺杂难等问题。因绕镀，LPCVD 设备需增加一倍设备；PVD 路线，根据 ISFH 研究观点，PVD 钝化效果略差。且实际运行中，维护频率高，开机率低；而 PECVD 路线轻微绕镀、且清洗容易，可原位掺杂、工艺精简，爆膜问题可通过电池背面微制绒解决。隧穿氧化层质量对电池效率影响至关重要。文献数据显示：从膜层密度角度看，PECVD 制备的氧化层密度（2.2g/cm³）要优于 LPCVD（2.15g/cm³）；从膜层均匀性角度看，PECVD 法制备的氧化层粗糙度 1.38nm，与 LPCVD 制备的氧化层粗糙度 1.36nm 相当。
- ◆ **从经济性角度看，PECVD 路线设备投资成本低、产能大、维护成本低、开机率高。**根据皇氏集团机构调研记录表，（1）PE 路线比 LP 路线设备采购成本少；（2）PE 路线工艺时间短，单台设备产能大，设备机台数量少，省空间，设备好布局；（3）维护成本对比：LP 路线石英管寿命平均 56 天，石英舟寿命 60 天，石英件消耗 162 万/台/年，PE 路线石英管寿命 1-2 年，只有正常的石墨舟消耗，LP 设备的石英件消耗比 PE 设备费用预计多出 3530 万/年（5GW 计）；（4）设备人员配置上，LP 路线估计是 PE 路线的一倍以上，每天在做维护换石英管，且设备利用率较低，更换石英管需要 3-4 小时，期间整台设备需停机。
- ◆ 因此，我们认为工艺稳定后，PECVD 成为 TOPCon 主流工艺，推动 TOPCon 大规模量产。建议关注：光伏整线设备龙头捷佳伟创（公司推出 PE-Poly，即采用 PECVD 路线）、光伏激光设备龙头帝尔激光。
- ◆ **风险提示：**光伏新增装机容量不及预期；市场竞争加剧风险；电池技术迭代对设备影响的风险；设备技术研发风险

投资评级

领先大市-B维持

首选股票

评级

300776.SZ	帝尔激光	买入-B
300724.SZ	捷佳伟创	买入-B

一年行业表现



资料来源：聚源

升幅%	1M	3M	12M
机械相对收益	4.7	-6.62	10.59
机械绝对收益	7.1	1.35	-1.45
光伏设备相对收益	-2.65	-22.21	35.5
光伏设备绝对收益	-0.26	-14.24	23.46

分析师

刘荆

 SAC 执业证书编号：S0910520020001
 liujing1@huajinsc.cn

报告联系人

何海霞

hehaixia@huajinsc.cn

相关报告

光伏设备：关注光伏电池片环节，关注新技术变革带来设备机会-行业点评 2023.1.6
 光伏设备：关注光伏电池片环节，关注新技术变革带来设备机会-行业点评 2023.1.6



内容目录

一、	行业转型，PERC 电池到 TOPCon 电池，道易且近	4
二、	TOPCon 优势明显：电池效率高、温度系数低、光衰减小等	6
三、	从技术角度看，PECVD 有望从 LP/PE/PVD 路线之争中胜出	9
(一)	制备多晶硅层，LPCVD 工艺成熟，PECVD 综合性能最佳	10
1.	LPCVD 成熟度最高，但有绕镀、原位掺杂难等难题	11
2.	PECVD 成熟度次之，但轻微绕镀、原位掺杂等优点突出	15
3.	PVD 为物理反应过程，无绕镀，但设备 Uptime 略低	17
(二)	LPCVD/PECVD 法制备隧穿层 SiO ₂ 膜，膜层致密度相当	18
(三)	总结：TOPCon 的工艺路线，PECVD 有望成为主流	19
(四)	TOPCon 各环节竞争格局及价值量拆分	22
四、	TOPCon 路线设备布局厂商，产能统计	25
五、	投资建议	27
(一)	捷佳伟创	27
(二)	帝尔激光	28
六、	风险提示	29

图表目录

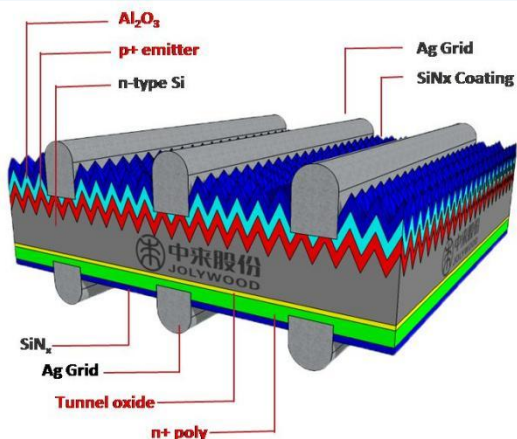
图 1: TOPCon 电池结构图	4
图 2: PERC 电池结构图	4
图 3: TOPCon 电池膜层示意图	4
图 4: PERC 电池膜层示意图	4
图 5: TOPCon 电池隧穿层能阻挡空穴通过，而允许电子通过	5
图 6: 根据 ISFH 计算，单面 TOPCon 电池理论极限效率为 27.1%	6
图 7: 目前，TOPCon 实验室最高转换效率已达到 26.40%	7
图 8: 晶科 N 型 TOPCon 组件双面率达 85%	7
图 9: 30 年，N 型 TOPCon 组件效率不低于出厂效率 87.4%	7
图 10: 温度系数越高，功率损失越多	8
图 11: N 型组件实时工作温度较 P 型组件低	8
图 12: N 型组件弱光效应更好	8
图 13: TOPCon 工艺与 PERC 工艺兼容性较高（TOPCon 以离子注入工艺路线为例）	9
图 14: TOPCon 产业化面临的主要技术问题	10
图 15: 制备多晶硅掺杂膜，LPCVD/PECVD/PVD 工艺对比	10
图 16: 对于多晶硅膜沉积，LPCVD/PECVD/PVD 三条路线对比	11
图 17: LPCVD 法可实现制备氧化层、本征多晶硅层“二合一”	11
图 18: LPCVD 设备示意图	11
图 19: LPCVD 绕镀现象（左侧为本征掺杂，右侧为非本征掺杂）	12
图 20: 湿法单面清洗示意图	13
图 21: 清洗绕镀的原理是基于刻蚀剂对各膜层刻蚀速度不同	13
图 22: LPCVD 原位掺杂中，掺杂浓度与沉积速度成反向关系	14
图 23: LPCVD 非原位掺杂，磷扩散的过程	14
图 24: 离子注入法及后续晶化示意图	14
图 25: PECVD 设备示意图	15

图 26: PECVD 法制备, 也可能出现轻微绕镀	16
图 27: 当硅片槽与硅片尺寸完美匹配时, 绕镀问题基本消除	16
图 28: 金字塔绒面硅片, 表面足够粗糙时, 没有爆膜问题	16
图 29: PVD 沉积膜原理简图	17
图 30: 酸刻蚀速度对比: PECVD<LPCVD<热氧化法	18
图 31: 制备 SiO ₂ 的致密度: 热氧法>PE>LP>ALD	18
图 32: SiO ₂ 膜层均匀性对比, PECVD/LPCVD 相当, ALD 与热氧法最佳	19
图 33: TOPCon 电池结构中, 各类膜主流制备方法	20
图 34: TOPCon 主要工艺路线流程 (LPCVD/PECVD/PVD)	21
图 35: LPCVD、PECVD、PVD 三条工艺路线对比	22
图 36: TOPCon 路线各设备主要供应商	23
图 37: 各家设备商技术路线	24
图 38: TOPCon 在建产能已超过 470GW	26

一、行业转型，PERC 电池到 TOPCon 电池，道易且近

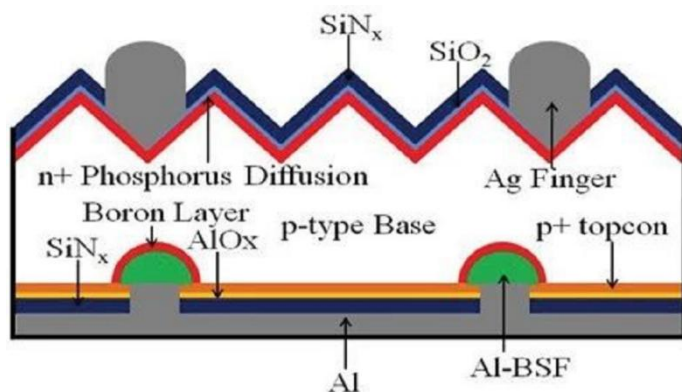
TOPCon 电池技术，是 2014 年由德国 Fraunhofer 太阳能研究所提出的一种新型钝化接触太阳能电池。德国 Fraunhofer 研究中心在电池背面利用化学方法制备一层超薄氧化硅（~1.5 nm），然后再沉积一层掺杂多晶硅，二者共同形成了钝化接触结构，这种技术被称为隧穿氧化层钝化接触（TOPCon）技术。

图 1：TOPCon 电池结构图



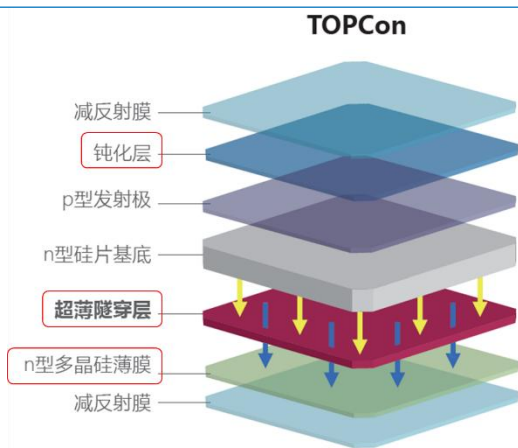
资料来源：中采股份，华金证券研究所

图 2：PERC 电池结构图



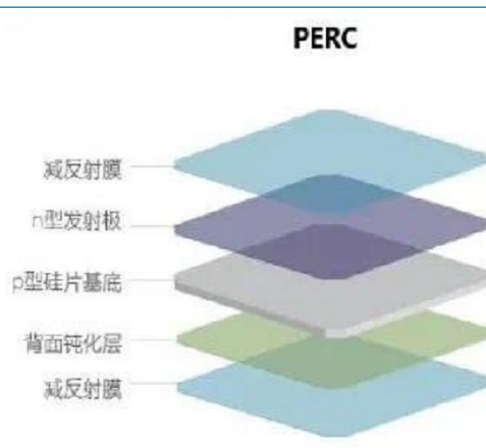
资料来源：摩尔光伏，华金证券研究所

图 3：TOPCon 电池膜层示意图



资料来源：晶科能源，华金证券研究所（加框注释：与 PERC 结构差异）

图 4：PERC 电池膜层示意图



资料来源：晶科能源，华金证券研究所

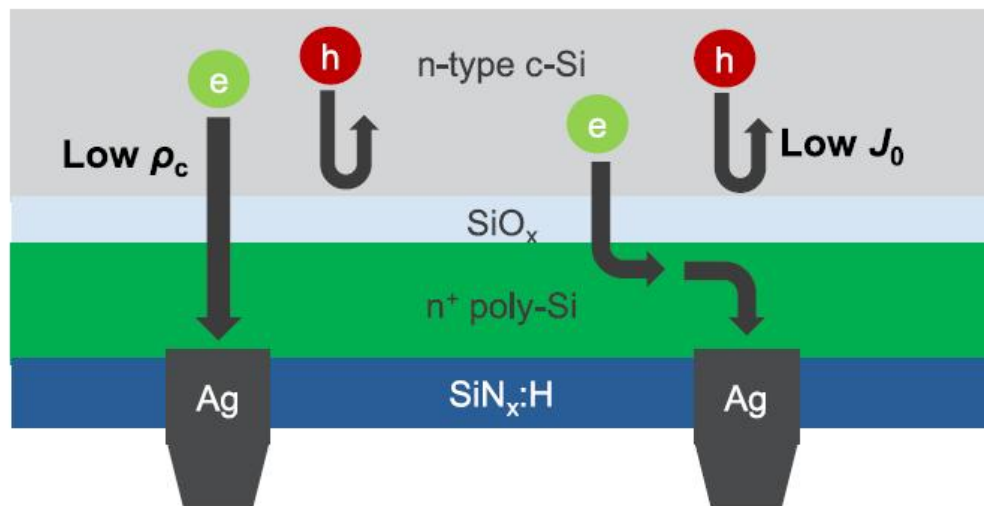
从电池结构正面看，PERC 电池从外及里，依次为 SiNx 膜、N 型发射极（n+）、P 型硅片基底；对比，TOPCon 电池由外到里，依次为 SiNx 膜、Al₂O₃ 膜、P 型发射极（p+）、N 型硅片基底。区别在于新增 Al₂O₃ 膜，以及改成 P+ 发射极、N 型硅片基底。

从电池结构背面看，PERC 电池由外及里，依次为 SiNx 膜、Al₂O₃ 膜；对比，TOPCon 电池由外至里，依次为 SiNx 膜、N 型多晶硅薄膜、SiO₂ 膜。区别在于，去除 Al₂O₃ 膜、新增 N 型多晶硅薄膜、SiO₂ 膜。

各膜层的作用：

1. 正面 SiN_x 薄膜（约 75nm）：由于 SiN_x 富含氢原子，可以在热处理过程中对表面和体内的缺陷进行化学钝化，从而降低表面电子的复合。同时由于 SiN_x 的光学特性，还可以实现电池正面和背面减反效果；
2. 背面 SiN_x 薄膜：为了避免后续金属化烧结过程浆料对膜层的破坏， SiN_x 依靠其化学稳定性，主要用于背部膜层的保护；同时实现减反效果；
3. Al_2O_3 （ $\leq 5\text{nm}$ ）由于具备较高的负电荷密度，可以对 P 型半导体如 PERC 电池背面和 TOPCon 电池的正面提供良好的场效应钝化，即在近表面处增加一层具有高度稳定电荷的介质膜在表面附近造一个梯度电场，减少表面电子浓度从而降低表面电子空穴的复合速率。
4. 超薄隧穿层 SiO_2 （ $< 2.0\text{nm}$ ）及 N 型多晶硅薄膜（100~200nm）：两者共同形成钝化接触结构作为电池背面钝化层，高掺杂的多晶硅（Poly-Si）层与 N 型硅基体之间功函数差异引起的界面处能带弯曲，使电子隧穿后有足够的能级可以占据，更易于隧穿；而空穴占据的价带边缘处于 Poly-Si 的禁带，不易隧穿，因此超薄氧化层可允许多子电子隧穿而阻挡少子空穴透过，从而使电子和空穴分离，减少了复合，在其上沉积一层金属作为电极就实现了无需开孔的钝化接触结构。

图 5：TOPCon 电池隧穿层能阻挡空穴通过，而允许电子通过



资料来源：《In situ phosphorus-doped polycrystalline silicon films by low pressure chemical vapor deposition for contact passivation of silicon solar cells》（Meric Firat, et al., 2021），华金证券研究所

因此，TOPCon 太阳电池的主要优点包括：（1）优良的界面钝化性能；（2）全面积收集载流子有利于提高 FF；（3）结构简单无需光刻开孔；（4）可兼容现有产线工艺，适用于企业化生产。

二、TOPCon 优势明显：电池效率高、温度系数低、光衰减小等

N 型 TOPCon 双面电池效率可达到 **28.7%**，提供了广阔发展空间。根据 ISFH 计算，PERC 电池理论效率为 24.5%，P 型 TOPCon 电池理论效率为 24.9%；P 型晶硅电池转为 N 型晶硅电池，电池效率有明显提升。其中，N 型单面 TOPCon 电池理论效率为 27.1%，HJT 电池理论效率为 28.5%，N 型双面 TOPCon 电池理论效率则达到 28.7%。

图 6：根据 ISFH 计算，单面 TOPCon 电池理论极限效率为 27.1%

			Electron selective		P-diffused n+		a-Si:H(i)/a-Si:H(n)		Thermal/PECVD SiO _x /poly-Si(n+)		Thermal/LPCVD SiO _x /poly-Si(n+)		Chemical/LPCVD SiO _x /poly-Si(n+)	
			Hole selective		J _{0,e}	ρ _{c,e}	J _{0,e}	ρ _{c,e}	J _{0,e}	ρ _{c,e}	J _{0,e}	ρ _{c,e}	J _{0,e}	ρ _{c,e}
					109	0.26	2	0.017	5	0.016	2.7	0.0013	10	0.0001
PERC	Al-doped p+	J _{0,h}	550	11.7	56.5%	12.9	34.6%	12.8	23.4%	12.9	8.5%	13.0	1.2%	
		ρ _{c,h}	0.005	3.5%	24.5	1.2%	27.0	1.2%	26.9	1.2%	27.1	1.2%	27.1	
	a-Si:H(i)/a-Si:H(p)	J _{0,h}	2	11.9	45.6%	14.0	24.4%	14.0	14.9%	14.6	5.5%	14.6	0.8%	
		ρ _{c,h}	0.055	97.9%	24.9	43.9%	28.5	27.6%	28.6	26.2%	28.9	26.0%	28.9	
P型 TOPCon	Chemical/PECVD SiO _x /poly-Si(p+)	J _{0,h}	16	11.9	46.7%	14.0	23.0%	13.8	15.5%	14.2	5.7%	14.2	0.8%	
		ρ _{c,h}	0.008	21.4%	24.9	5.9%	28.5	6.1%	28.4	5.8%	28.7	5.7%	28.7	
							HJT							

资料来源：《On the limiting efficiency for silicon heterojunction solar cells》(Wei Long, et al., 2021)，华金证券研究所

实验室效率方面，晶科 182N 型 TOPCon 实现 26.4% 转换效率；而天合光能 210N 型 TOPCon 电池转换效率达 25.5%；此外，隆基实现 P 型 TOPCon 电池转换效率达 25.19%；而国外实验室 Fraunhofer ISE 在面积仅 4cm² 的电池片上实现电池转换效率 25.8%。

量产效率方面，规模投产企业量产效率已达到 25%。根据各公司公告，一道新能浙江衢州约 6GW TOPCon 产能，量产效率突破 25.2%；晶科浙江海宁 8GW、合肥一期 8GW 产线，电池量产效率达到 25% 以上；中来股份山西太原一期 4GW 项目投产，电池量产效率可达到 24.8%；

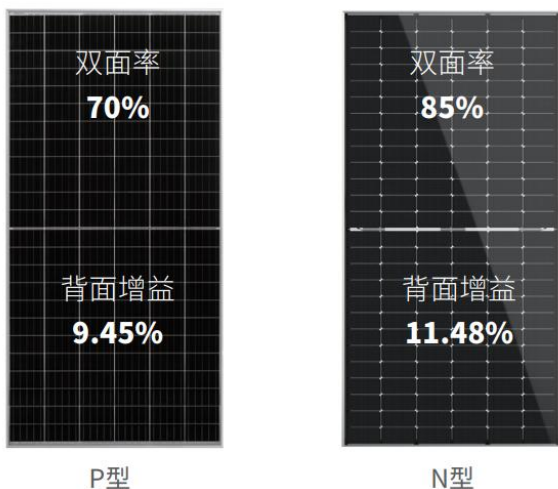
图 7：目前，TOPCon 实验室最高转换效率已达到 26.40%

研发机构	转换效率	开路电压 Voc(mV)	短路电流密度 Jsc(mA/cm ²)	填充因子 FF	电池面积cm ²	时间
晶科	26.40	-	-	-	331.24	2022.12.08
晶科	26.10	-	-	-	331.24	2022.10.14
天合	25.50	-	-	-	441	2022
晶科	25.41	719.1	42.24	83.7	235.79	2021
中来	25.40	-	-	-	330.15	2021
隆基	25.19 (P型)	-	-	-	242.97	2021
隆基	25.21	721.6	41.64	83.9	242.97	2021
晶科	24.90	712.8	41.68	83.8	235.8	2021
晶科	24.40	713.2	41.47	82.5	267.5	2020
阿特斯	23.81	708.7	40.88	82.3	246.44	2020
天合	24.58	716.8	40.57	84.5	244.31	2020
中来	23.19	701	39.9	83	246.21	2019
Fraunhofer ISE	25.80	724	42.9	83.1	4	2017
Fraunhofer ISE	24.50	713	41.4	83.1	100	2017
Fraunhofer ISE	23.40	697	41.1	81.2	200	2018

资料来源：各公司公告，中国知网，《基于隧穿氧化物钝化接触的高效晶体硅太阳能电池的研究现状与展望》（任程超等，2021），华金证券研究所

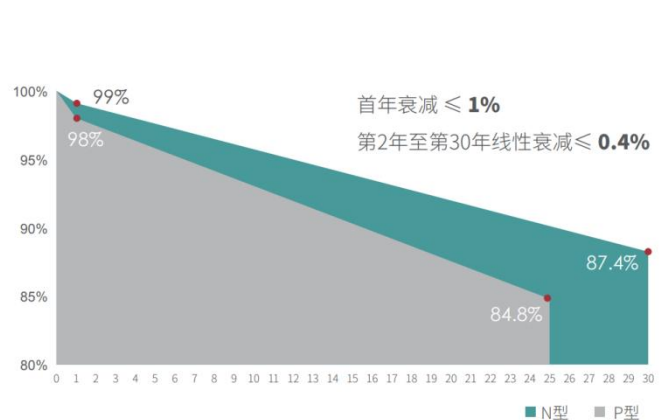
高效率之外，TOPCon 电池相比于 PERC 电池，具有双面率高、衰减低、温度系数低、弱光效应好等优势。根据晶科能源产品手册，P 型电池双面率仅 70%，而 N 型电池双面率能达到 85%。N 型高双面率能带来发电增益约 2.03%；N 型组件功率质保可达 30 年，首年衰减小于 1%，保证 30 年后输出功率不低于原始输出功率的 87.40%。而 P 型电池 30 年输出功率不低于原始输出功率的 84.8%，两者差距 2.6pct；电池发电量受温度系数影响，温度系数越高，发电量越低。根据实验数据，相同环境下，N 型电池的温度更低，意味着光的转换效率更高、发电量损失更低。N 型电池弱光效应更好，因为 N 型电池，更高的内阻，更长的少子寿命，天然具有更优的弱光响应，即相比于 PERC 电池，N 型电池在弱光环境下即可开始实现光电转换，早晚发电市场延长 1 小时左右。

图 8：晶科 N 型 TOPCon 组件双面率达 85%



资料来源：晶科能源产品手册，华金证券研究所

图 9：30 年，N 型 TOPCon 组件效率不低于出厂效率 87.4%



资料来源：晶科能源产品手册，华金证券研究所

图 10：温度系数越高，功率损失越多

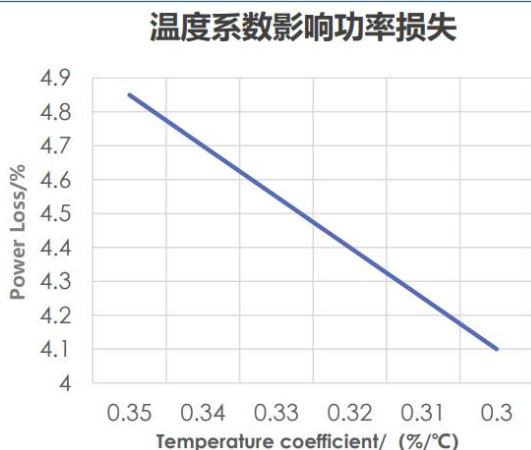
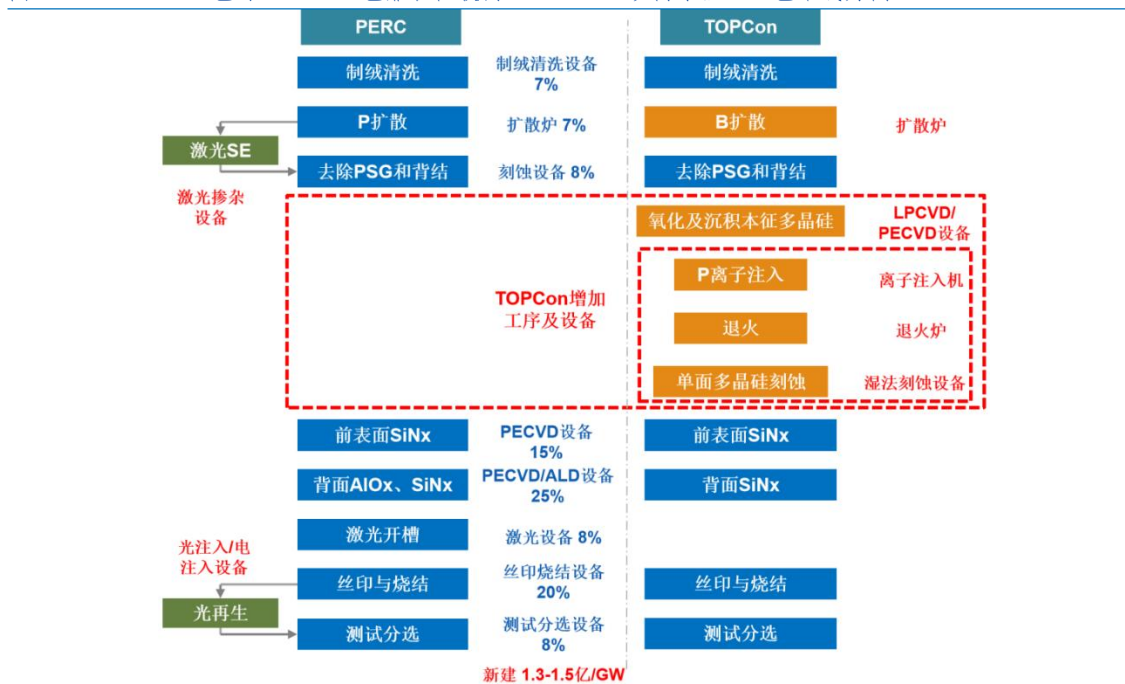


图 13: TOPCon 工艺与 PERC 工艺兼容性较高 (TOPCon 以离子注入工艺路线为例)



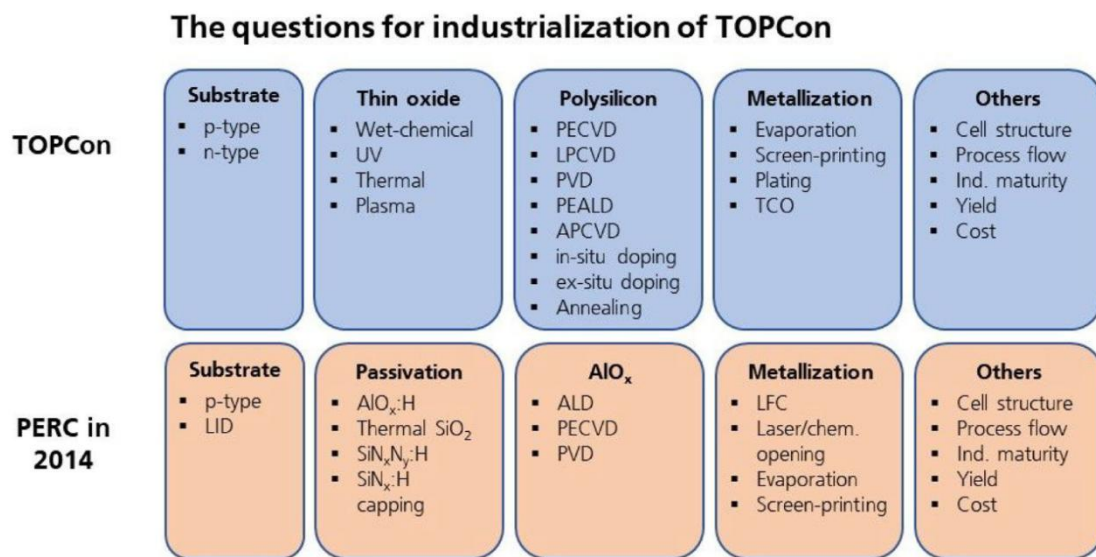
资料来源: Continuously Evolving Tech, 拉普拉斯, 华金证券研究所(蓝底表示: 技术、设备相同)

三、从技术角度看, PECVD 有望从 LP/PE/PVD 路线之争中胜出

TOPCon 电池工艺一般为: 先正面制绒、硼扩, 再进行背面隧穿层、掺杂多晶硅层制备, 之后再正面 Al_2O_3 膜层制备、正反面 SiNx 膜制备, 最后金属化。与 PERC 时代时工艺路线之争相似, TOPCon 工艺路线同样存在诸多争议与分歧。

整体看, TOPCon 工艺的核心争议在掺杂多晶硅层的制备方法上, 分为 LPCVD/PECVD/PVD 路线。隧穿层 SiO_2 膜的制备方法可以是 LPCVD、PECVD、ALD 等方式; 多晶硅层制备, 从工序角度可分为原位掺杂、非原位掺杂。原位掺杂, 即在同一工步完成多晶硅层沉积、多晶硅层磷掺杂; 非原位掺杂, 即在多晶硅层沉积后, 通过扩散炉或者离子注入的方法进行磷掺杂。从制备方法上, 多晶硅层制备可分为, LPCVD/PECVD/PVD/APCVD 等;

图 14: TOPCon 产业化面临的主要技术问题



资料来源:《Silicon - based passivating contacts The TOPCon route》(GLUNZ, et al., 2021), 华金证券研究所

(一) 制备多晶硅层, LPCVD 工艺成熟, PECVD 综合性能最佳

对于掺杂硅层, 一般有三种制备方法. 其中有两种属于化学气相沉积(chemical vapor deposition, CVD) 方法: 低压化学气相沉积(low pressure chemical vapor deposition, LPCVD) 法和 PECVD 法. 还有一种溅射法是属于物理气相沉积(physical vapor deposition, PVD) 方法。

- 1) LPCVD 法: 主要应用硅烷 (SiH_4) 的热分解来完成, 反应温度约 600°C ;
- 2) PECVD 法: 硅烷 SiH_4 在电离下, 分解生产 Si。反应温度较低, 400°C 以下, 压力仅 100Pa;
- 3) PVD 法: 物理过程, 反应温度在室温到 500°C 之间。

图 15: 制备多晶硅掺杂膜, LPCVD/PECVD/PVD 工艺对比

No.	方法	化学式	反应条件	优点	缺点
1	LPCVD	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{Si} + 2\text{H}_2$	$600\text{-}1000^\circ\text{C}$	产量高, 可以直接制备 n 型的多晶硅层	会产生绕镀, 效率相对较低
2	PECVD	$\text{SiH}_4 \rightarrow \text{SiH}_x \rightarrow \text{Si} + \text{H}_2$	$250\text{-}350^\circ\text{C}$, 100Pa	可以进行单面制备, 效率高	产量低, 对设备要求高, 且对环境有污染
3	PVD	N/A	室温 $\sim 500^\circ\text{C}$	无污染, 操作简单且安全	均匀性相对较差, 退火温度想对较高

资料来源:《基于隧穿氧化物钝化接触的高效晶体硅太阳能电池的研究现状与展望》(任程超等, 2021), 华金证券研究所

LPCVD 技术最成熟, PECVD 技术综合性能最强。从工业技术成熟度看, LPCVD 技术最成熟, 无论是量产设备成熟度, 还是实验室验证程度上看, LPCVD 技术相比其他两条路线更为成熟; 而 PECVD 技术仅次于其后; 从单面沉积角度看, LPCVD 沉积技术是无方向性的, 导致严重绕镀, 而 PVD 技术可实现单面沉积, 无绕镀现象; 从原位掺杂角度看, PECVD 最适合原位掺杂, 而 LPCVD、PVD 技术原位掺杂能力较弱, 即掺杂难度大、或者掺杂后浓度不达标;

图 16：对于多晶硅膜沉积，LPCVD/PECVD/PVD 三条路线对比

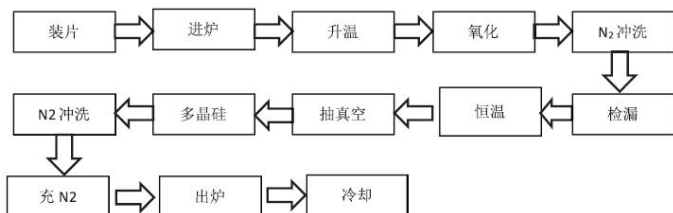
性能	LPCVD	PECVD	PVD
单面沉积	×	√	√ √
原位掺杂	√	√ √	√
工业有现成设备	√ √ √	√ √	√ √
实验室验证	√ √ √	√ √ √	√ √
工业量产	√ √ √	√ √	N/A
沉积模式	Batch	Batch/Inline	Inline

资料来源：《TOPCon-Technology Options for cost efficiency industrial manufacturing》（Bishal Kafle et al., 2021），华金证券研究所

1. LPCVD 成熟度最高，但有绕镀、原位掺杂难等难题

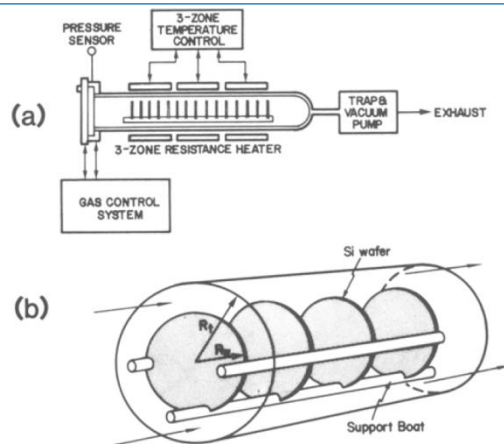
LPCVD 能同时实现氧化层、本征非晶硅层，工业应用技术非常成熟。LPCVD 法均适用于氧化层 SiO_2 、本征非晶硅层的制备，且两者反应温度相近，均在 600°C 左右。以 LPCVD 法制备氧化层 SiO_2 ，以及本征非晶硅层 a-Si 工艺为例，实践中仅需要在两者反应中间，加入 N_2 清洗、检漏、抽真空等操作，即可在同一工步完成 SiO_2 /本征非晶硅膜的制备。

图 17：LPCVD 法可实现制备氧化层、本征多晶硅层“二合一”



资料来源：《TOPCon 生产用 LPCVD 尾排设计》（王杨阳，2021），华金证券研究所

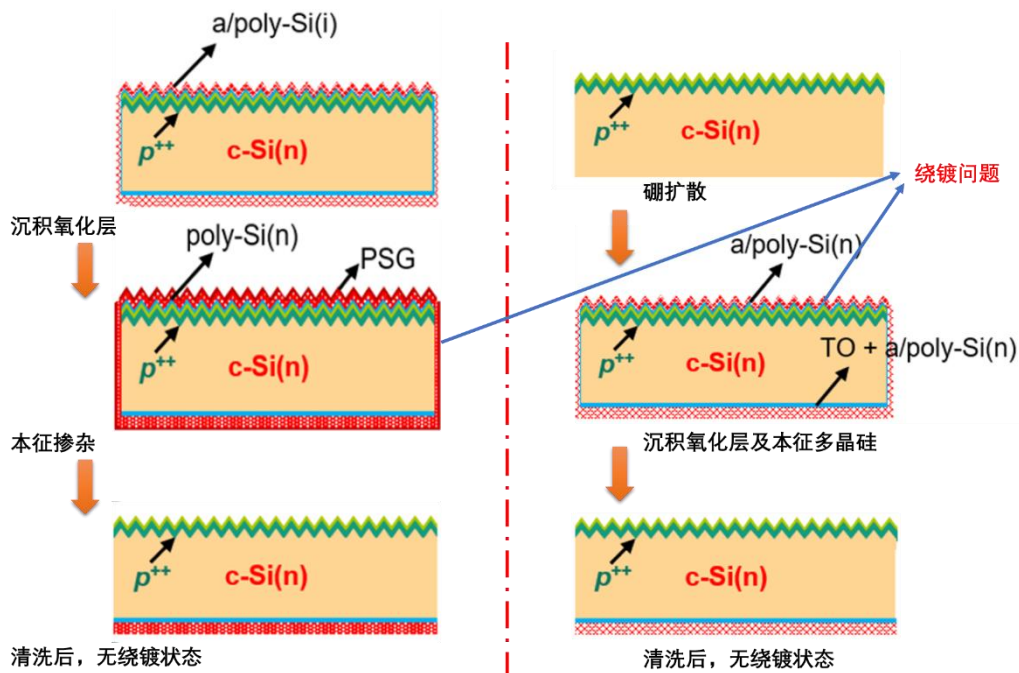
图 18：LPCVD 设备示意图



资料来源：《Analysis of Multicomponent LPCVD Processes》（Karl F. Roenigk et al., 1985），华金证券研究所

LPCVD 沉积膜不具备方向性，因电池片立于石英舟之上，氧化层及本征多晶硅层也同样会附着在电池片的侧面及正面，形成包裹，即“绕镀”现象。多余的隧穿层、掺杂多晶硅层必须被去除，因此后续需要引入“去绕镀”工艺，但 LPCVD 绕镀成为痛点的根本原因在于去绕镀较难控制，影响电池良率。

图 19: LPCVD 绕镀现象（左侧为本征掺杂，右侧为非本征掺杂）



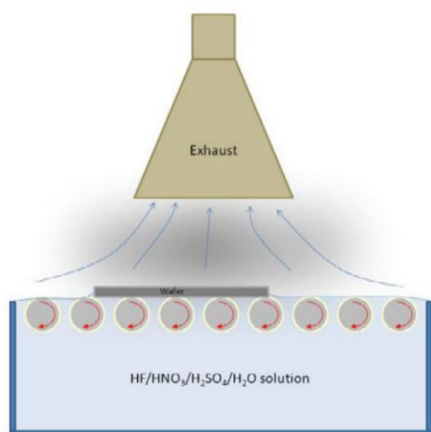
资料来源：《Atmospheric Pressure Dry Etching of Polysilicon Layers for Highly Reverse Bias - Stable TOPCon》（Bishal Kafle et al., 2021），华金证券研究所

LPCVD 问题之一：清洗绕镀，可能导致去除不完全、或者掺杂多晶硅层遭刻蚀，影响电池效率；LPCVD 法制备隧穿氧化层及掺杂多晶硅层，一般在磷掺杂后，再进行清洗绕镀。LPCVD 去绕镀的典型工艺流程：

- 1) HF 酸单面清洗，去除绕镀区域内的磷硅玻璃 PSG（即正面、侧面）；
- 2) KOH 碱液双面清洗，去除绕镀区域内的掺杂多晶硅（即正面、侧面）。背面 PSG 层起到保护隧穿氧化层及掺杂多晶硅层作用；
- 3) HF 酸双面清洗，去除绕镀区域内的 SiO_2 （即正面、侧面）、背面 PSG；

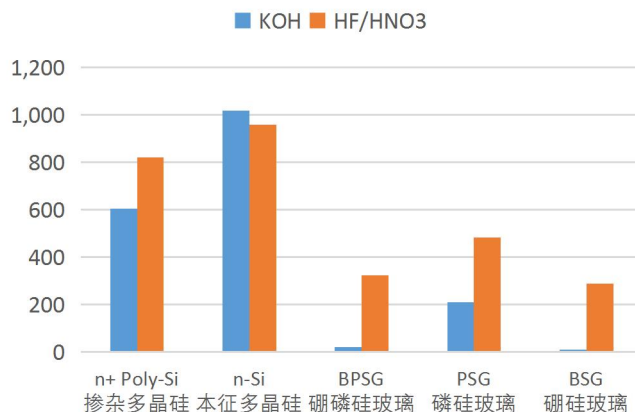
去绕镀“难”的根本原因：在第 2 步中，KOH 双面清洗，去除绕镀区域多晶硅。因 KOH 碱液刻蚀掺杂多晶硅速度 604nm/min ，大于刻蚀磷硅玻璃 PSG 的速度，后者为 210nm/min 。背面磷硅玻璃 PSG 能保护背面掺杂多晶硅层。但两者反应时间差很难有效控制，实际生产中可能导致：掺杂多晶硅层去除不完全，或背面起保护作用的磷硅玻璃被去除，导致背面掺杂多晶硅层被侵蚀，影响电池效率。

图 20：湿法单面清洗示意图



资料来源：《Integration of inline single-side wet emitter etch in PERC cell manufacturing》(E. Cornagliotti et al., 2012)，华金证券研究所

图 21：清洗绕镀的原理是基于刻蚀剂对各膜层刻蚀速度不同



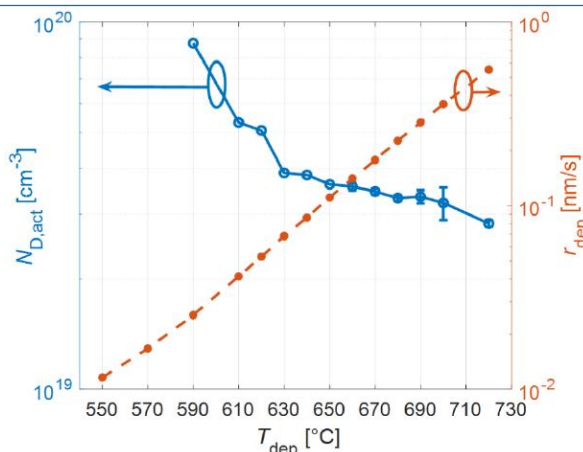
资料来源：《Study on the cleaning process of n+-poly-Si wraparound removal of TOPCon solar cells》(Qinqin Wang et al., 2020)，华金证券研究所

LPCVD 问题之二：LPCVD 原位掺杂较难，主要问题在于：1）难以实现大于 10^{20} cm^{-3} 高活性的掺杂浓度 ($N_{D, \text{act}}$) ;2）掺杂层沉积速度慢，产量低；3）膜厚度不够，且均匀性差；

LPCVD 原位掺杂中，掺杂浓度与膜的沉积速度是相制约的关系。根据 Kamins 研究，多晶硅层中磷的活性掺杂浓度需达到 10^{20} cm^{-3} ，才能实现较低的复合电流密度 J_0 、及较低的接触电阻 ρ_c 。而磷的活性掺杂浓度 $N_{D, \text{act}}$ 与沉积速度成反向关系，即随着反应温度升高，膜的沉积速度增大，而磷的活性掺杂浓度降低。**根本原因在于，当反应温度越高时，硅烷 SiH_4 分解速度越快，而 PH_3 从膜表面的解析速度越快，两者共同作用下，则生成的掺杂层中，磷的活性掺杂浓度 $N_{D, \text{act}}$ 越低。**

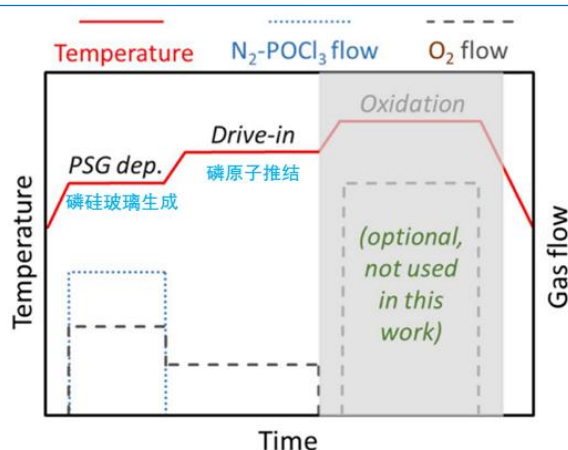
LPCVD 本征掺杂多晶硅工艺，膜均匀性差。根据 Waqar Ahmed 研究，LPCVD 制备掺杂多晶硅层均匀性在 $\pm 40\%$ ，远不及制备本征非晶硅层的均匀性。**LPCVD 制备掺杂多晶硅层时，沉积过程不受晶片表面上化学反应动力学的限制，而是受反应物向表面传输的限制时，导致膜层均匀性大大下降。硅片表面的反应物浓度差异，导致膜层均匀性问题。根据 Waqar Ahmed，可以通过定制硅片的反应舱室去制备掺杂多晶硅层，但该定制化方法完全不能适用于量产。**

图 22: LPCVD 原位掺杂中，掺杂浓度与沉积速度成反向关系



资料来源：《In situ phosphorus-doped polycrystalline silicon films by low pressure chemical vapor deposition for contact passivation of silicon solar cells》(Meric Firat et al., 2022)，华金证券研究所

图 23: LPCVD 非原位掺杂，磷扩散的过程

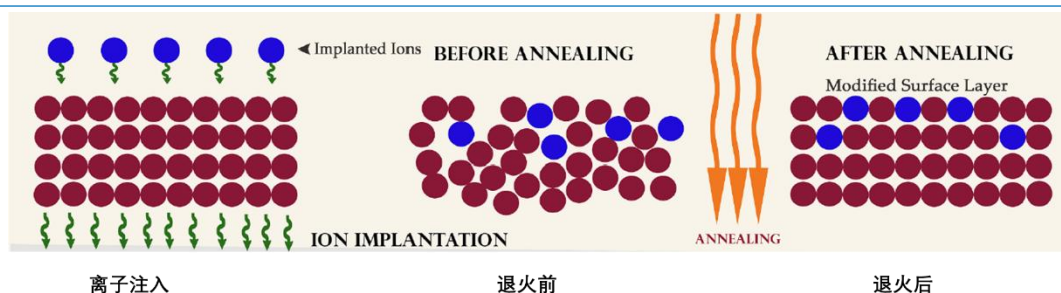


资料来源：《Development of ultra-thin doped poly-Si via LPCVD and ex-situ tube diffusion for passivated contact solar cell applications》(Xia Yan et al., 2020)，华金证券研究所

因此，LPCVD 一般采用先沉积本征多晶硅层，再通过磷扩散或者离子注入的方式，进行多晶硅层的磷掺杂。磷扩散的方法是以 POCl_3 为气源，在 $700\text{--}850^\circ\text{C}$ 温度下实现分解、形成 PSG，再在 $850\text{--}900^\circ\text{C}$ 、 N_2 环境下中，保持 30 分钟，完成磷原子扩散。多晶硅层在高温扩散炉中，能同步实现多晶硅的晶化处理，形成原子的规则排列，不需要后续退火工步。

离子注入技术指真空中一束离子束射向一块固体材料，受到固体材料的抵抗而速度慢慢减低，并最终停留在固体材料中的现象。实际运用中，采用等离子辅助法，以 PH_3 为气源，经过电离，实现 P 原子注入多晶硅层。需要加入退火的工艺，进行多晶硅的晶化处理。

图 24: 离子注入法及后续晶化示意图



资料来源：《Ion-implantation and photovoltaics efficiency: A review》(Mandeep Kaur et al., 2022)，华金证券研究所

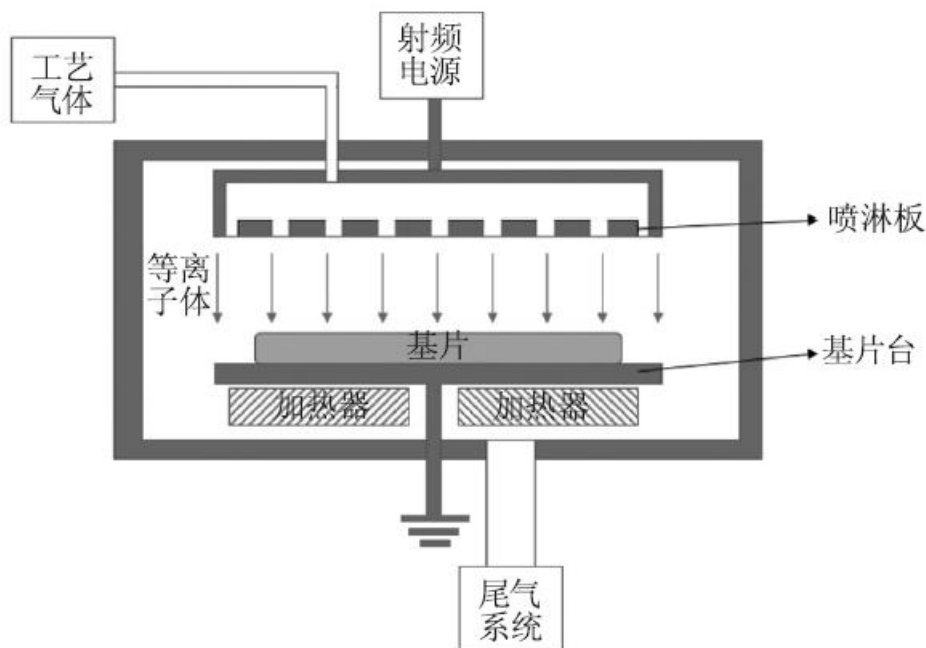
LPCVD 问题之三：LPCVD 石英管出现炸裂，需要每 15 天清洗维护一次；在淀积过程中石英管和石英舟都会淀积上一层薄膜。随着工艺生产的增多，这些薄膜越来越厚，当其达到一定厚度时，便会出现硅裂现象，从而导致淀积薄膜中出现颗粒物，或使石英管某端出现一定程度的下沉，造成淀积的膜厚出现不均匀现象。因此，必须定期清洗石英管。通常用两套石英管和石英舟轮换使用，以缩短维护时间。**LPCVD 石英管清洗方法：**把反应管从设备上卸下来，采用 HF 酸或 HF 酸加 HNO_3 腐蚀，还要用大量去离子水冲洗，然后烘干，过程负杂。并且反应管较长，一般都长达 1.5-2.5 米，在清洗或装卸过程中稍不注意，就易损坏。**根据拉普拉斯数**

据，石英舟清洗周期为 15 天，且石英管寿命 4-12 个月，现阶段需要每年更换炉管 2-3 次，石英件成本在 200 万/GW。

2. PECVD 成熟度次之，但轻微绕镀、原位掺杂等优点突出

PECVD 设备的工作原理，等离子增强化学气相沉积（PECVD）利用射频频率为 13.56MHz 的辉光放电装置中产生的热电子、正离子的能量使高纯 SiH_4 气体分解，生成硅原子、氢原子或原子团。如果是原位掺杂的情景下，则需加入磷烷 PH_3 ，同时反应。

图 25：PECVD 设备示意图

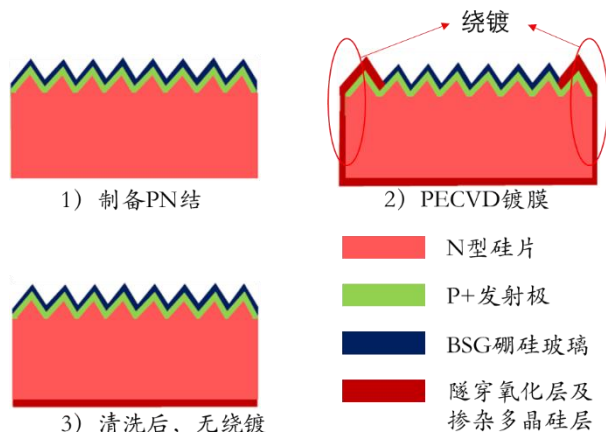


资料来源：《PECVD 法制备 SiO_2 膜均匀性研究》（龙长林等，2021），华金证券研究所

PECVD 镀膜，也会产生轻微绕镀问题，但清洗绕镀容易：根据 PECVD 沉积膜原理，硅片置于基片台上，侧边也暴露在反应气体内，因此 PECVD 法制备多晶硅薄膜也会出现轻微绕镀现象，但仅在侧边及硅片正面边缘处。根据 Fraunhofer 研究所 Stefan W. Glunz 研究，当采用凹槽设计基片台，且凹槽尺寸与硅片尺寸完美匹配时，绕镀现象即可消除。

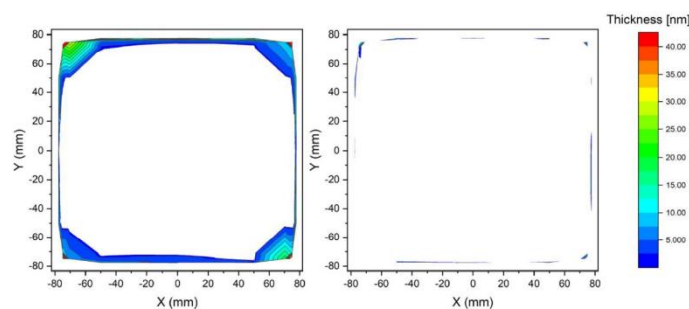
实际生产中，侧边及正面绕镀的轻微掺杂多晶硅可用 KOH 碱液去除。因为 KOH 碱液对掺杂多晶硅层的刻蚀速度约 604nm/min，远大于对 BSG 硼硅玻璃的刻蚀速度，后者约 11.4nm/min。因此，采用 KOH 碱液单面清洗去除掺杂多晶硅层时，KOH 碱液对 BSG 的刻蚀可以忽略，BSG 硼硅玻璃可对 p+ 发射极起保护作用。剩余的 BSG 硼硅玻璃及绕镀的 SiO_2 层，可用 HF 酸双面清洗去除。

图 26: PECVD 法制备, 也可能出现轻微绕镀



资料来源: 《Silicon-based passivating contacts: The TOPCon route》
(GLUNZ, et al., 2021), 华金证券研究所

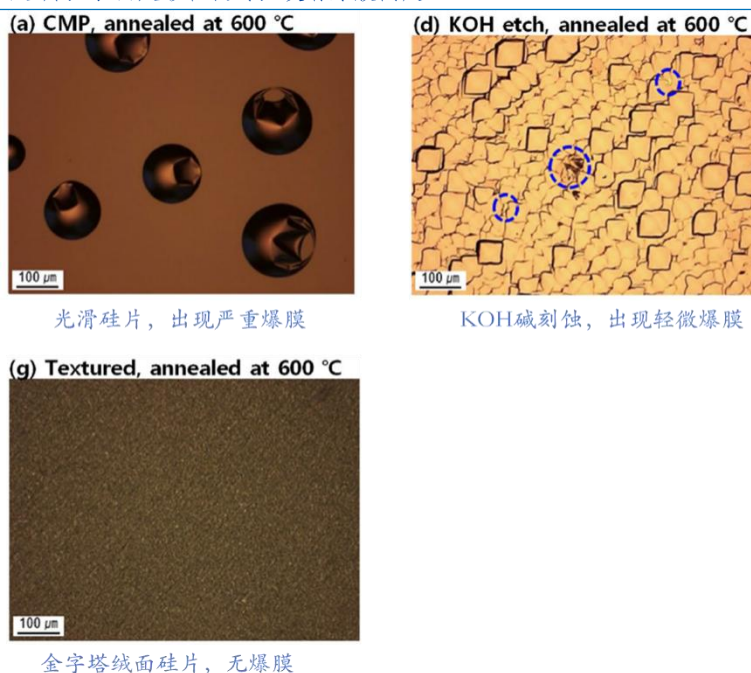
图 27: 当硅片槽与硅片尺寸完美匹配时, 绕镀问题基本消除



资料来源: 《Silicon-based passivating contacts: The TOPCon route》
(GLUNZ, et al., 2021), 华金证券研究所

PECVD 爆膜问题, 可以通过背面微制绒效果解决。PECVD 镀膜温度约 200℃, 镀膜后需高温退火, 退火温度在 600~850℃。高温退火过程中, 多晶硅层富含 H 原子, 浓度达到 $10^{20} \sim 10^{22} \text{cm}^{-3}$ 。高温退火会出现“H 原子渗出”, 富集在多晶硅层与 SiO_2 界面处, 即爆膜现象。爆膜可能导致膜层不均匀、横向传输通道增加、甚至膜层脱落, 严重影响电池效率。根据 Sungjin Choi 研究, 爆膜现象与硅片表面粗糙度直接相关。粗糙度越大, 表面黏附力越大, 爆膜概率越低。当采用光滑硅片、碱刻蚀后的硅片、金字塔绒面的硅片实验时, 相同条件下, 碱刻蚀的硅片爆膜现象明显改善, 而金字塔绒面的硅片则完全没有爆膜问题。因此, 实际生产中, 可以在硅片正面制绒的同时, 将电池背面进行微制绒, 实现不增加工艺步骤, 而解决 PECVD 的爆膜问题。

图 28: 金字塔绒面硅片, 表面足够粗糙时, 没有爆膜问题



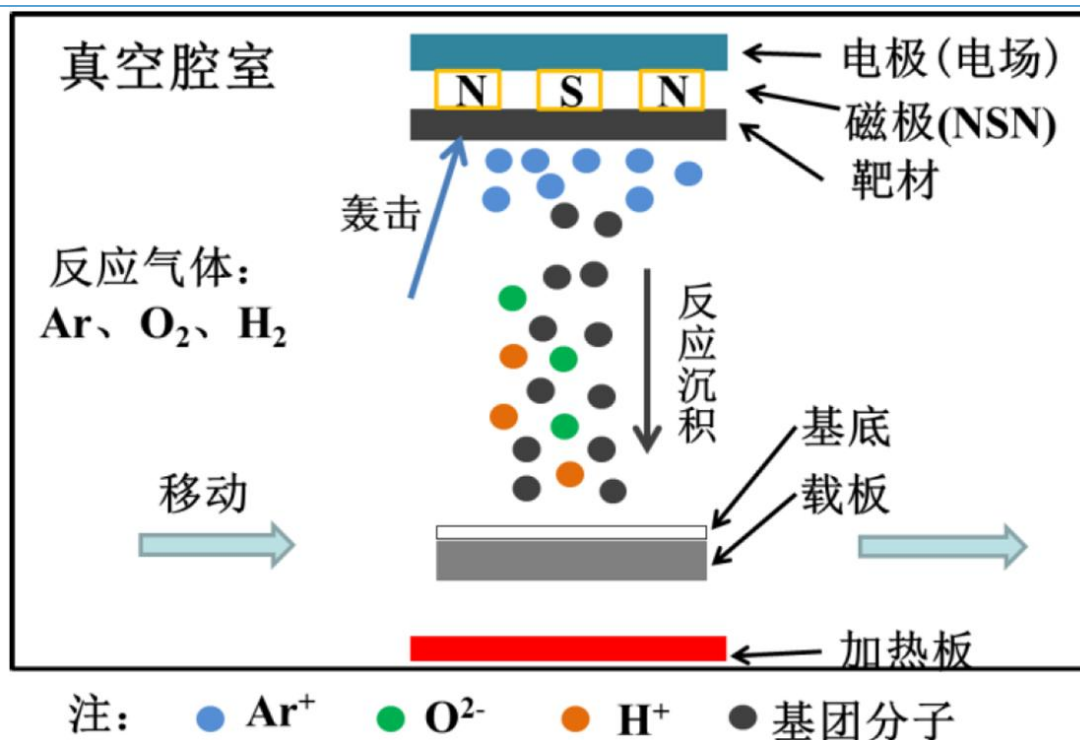
资料来源: 《Formation and suppression of hydrogen blisters in tunnelling oxide passivating contact for crystalline silicon solar

cells》(SungjinChoi et al., 2020)，华金证券研究所

3. PVD 为物理反应过程，无绕镀，但设备 Uptime 略低

PVD 原理：磁控溅射为外加电场和磁场同时作用，电场产生的电场力给电子加速、同时磁场的洛伦兹力对其有束缚，使电子由单一电场作用的直线运动变成复合场的摆线运动，可以大幅提高氩原子的电离效果。电子与氩原子发生碰撞后生成 Ar^+ 和二次电子， Ar^+ 获得电子的大部分能量后，且在电场作用下获得更高速度，轰击靶材表面，使靶材表面原子或分子脱离原晶格溅射出靶材表面而沉积到基片上。

图 29：PVD 沉积膜原理简图



资料来源：《a-Si_H_c-Si 异质结太阳能电池 ITO 薄膜研究-屈庆源》(屈庆源, 2021)，华金证券研究所

PVD 技术的优点明显：1) 没有绕镀问题，因为硅片置于硅片槽内，侧面不接触反应气体；2) 原材料硅基靶材便宜；3) 不使用危险气体，如硅烷 SiH_4 、磷烷 PH_3 等；4) 反应温度更低，甚至在室温下反应；5) 可有效控制沉积膜层内 H_2 含量；

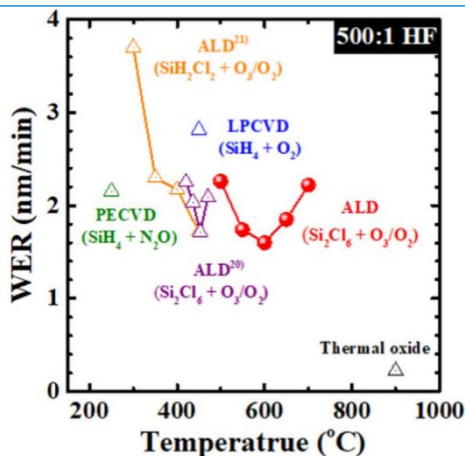
PVD 技术目前的缺点：1) 投资成本大；2) 占地面积大；3) 板式 PVD 设备 uptime 低，根据拉普拉斯数据，板式 PVD 设备保养周期 30 天，保养时间 2 天，换靶材需要 3 天。

(二) LPCVD/PECVD 法制备隧穿层 SiO₂ 膜，膜层致密度相当

光伏领域，最主要的隧穿层制备方法：

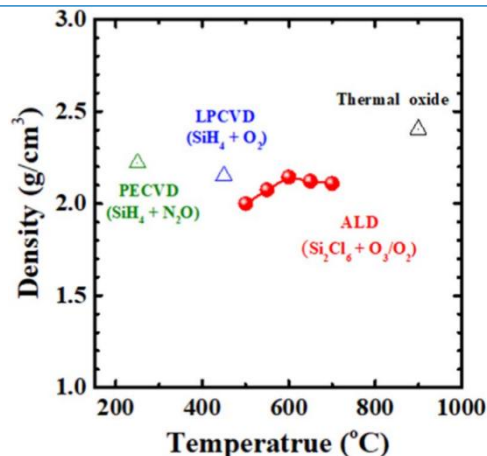
- 1) **LPCVD 也属于热氧法**，其反应原理、反应条件不同：高温热氧法，是指 900℃ 环境下，Si 直接被氧化成 SiO₂。而 LPCVD 法是指：硅烷 SiH₄ 与氧气 O₂，约 450-600℃ 高温下，反应生成 SiO₂。
- 2) **等离子体辅助 N₂O 氧化法 (PECVD)**：在 PECVD 中等离子体电子的能量驱动下，N₂O（笑气）会发生电离或分解作用，进而产生的游离 O 作用在硅片表面，发生氧化反应；
- 3) **ALD 法**也被用来制备 SiO₂，反应机理：氯化硅 Si₂Cl₆ 在 O₃/O₂ 的环境下，反应生成 SiO₂。

图 30：酸刻蚀速度对比：PECVD<LPCVD<热氧化法



资料来源：《Ozone based high-temperature atomic layer deposition of SiO₂ thin films》(Su Min Hwang et al 2020 Jpn. J. Appl. Phys.)，华金证券研究所

图 31：制备 SiO₂ 的致密度：热氧法>PE>LP>ALD



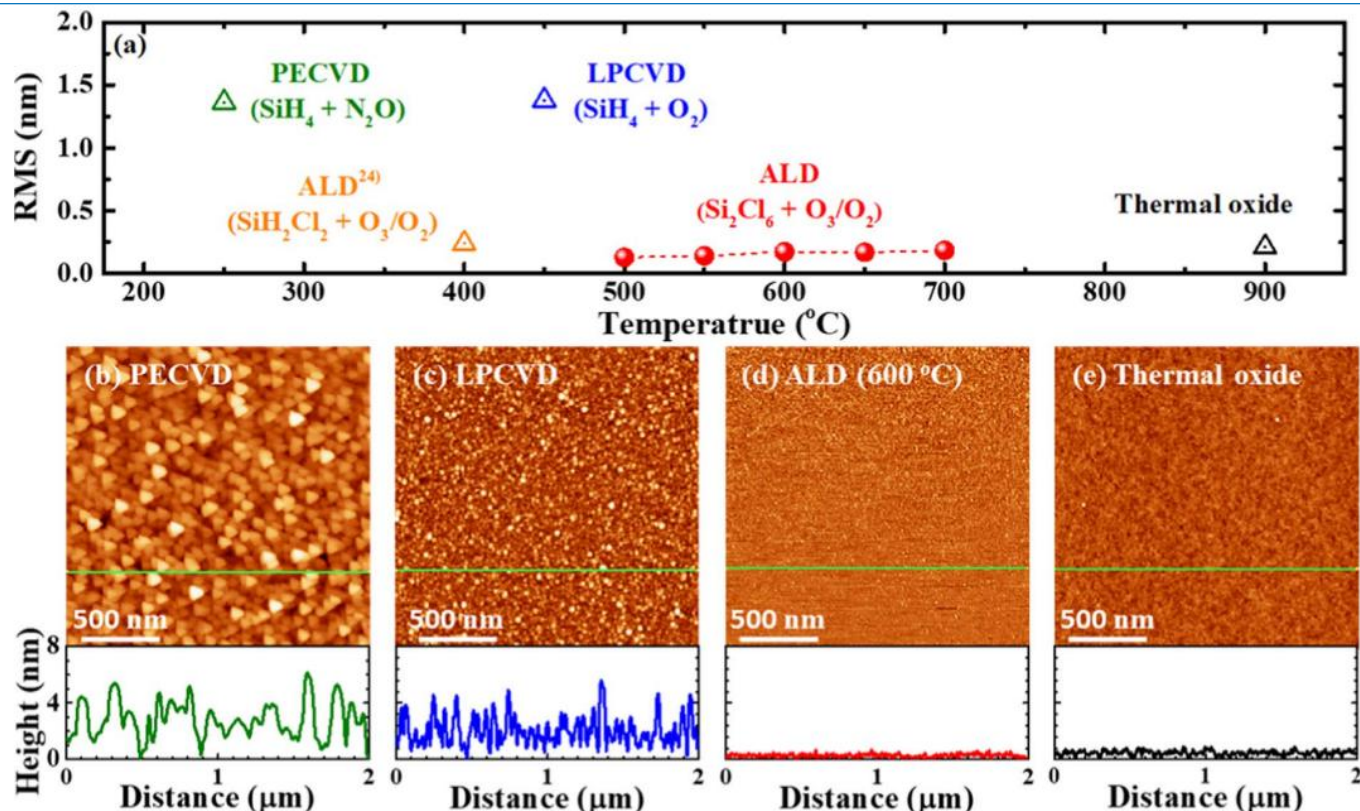
资料来源：《Ozone based high-temperature atomic layer deposition of SiO₂ thin films》(Su Min Hwang et al 2020 Jpn. J. Appl. Phys.)，华金证券研究所

SiO₂ 膜层制备更看重膜层质量，工艺精度要求高。掺杂多晶硅膜厚更高（100-200nm），在电池中起到弯曲能带作用；而 SiO₂ 层膜层厚度约 2nm，且要起到隧穿作用，阻隔空穴、通过电子。因此，掺杂多晶硅层制备对工艺精度要求不高，更看重工艺精简、工艺产能大、维护成本低。而 SiO₂ 的致密性直接影响隧穿效果，影响电池效率，因此更看重 SiO₂ 膜层质量。当 SiO₂ 膜层致密性较差时，即膜层孔隙较大，阻挡空穴通过的能力低，隧穿效果大大降低。

LPCVD/PECVD/ALD 路线制备的 SiO₂ 膜层质量对比：从膜层致密度角度看，**PECVD>LPCVD>ALD**；根据 Su Min Hwang 的实验结果，相同实验条件下，PECVD 制备的 SiO₂ 膜层密度为 2.2 g/cm³，LPCVD 制备的 SiO₂ 膜层密度为 2.15g/cm³，不及 PECVD。ALD 制备的 SiO₂ 膜层密度与温度影响大，在 600℃ 时，制备的 SiO₂ 膜层密度为 2.15g/cm³，与 LPCVD 相当。与之相对应，从酸刻蚀速度看，LPCVD>PECVD>热氧化法。

从膜层均匀性角度看，ALD>PECVD>LPCVD；从膜层均匀性角度看，ALD 法属原子沉积法，膜层由原子沉积一层一层生长的，因此 ALD 制备的 SiO₂ 膜层均匀性最好，膜层粗糙度仅 0.12~0.18nm。而 LPCVD/PECVD 制备的 SiO₂ 膜层粗糙度分别为 1.36nm、1.38nm。

图 32: SiO₂ 膜层均匀性对比, PECVD/LPCVD 相当, ALD 与热氧法最佳



资料来源: 中国知网, 《Ozone based high-temperature atomic layer deposition of SiO₂ thin films》(Su Min Hwang et al 2020 Jpn. J. Appl. Phys.), 华金证券研究所

(三) 总结: TOPCon 的工艺路线, PECVD 有望成为主流

综上, TOPCon 电池各膜层制备方法: 对于正面 Al₂O₃ 膜层, 主要的制备方法为 PECVD、ALD。实际生产中, ALD 制备 Al₂O₃, 膜层致密性、均匀性最好, 为最佳制备方法, 代表企业是江苏微导、理想、松煜。正反面 SiNx 膜的制备方法, 工艺成熟, 实际生产中主要是用 PECVD 法, 代表企业捷佳伟创、北方华创、红太阳等。

对于 TOPCon 背面, SiO₂ 膜层, LPCVD、PECVD、ALD 均可实现。而掺杂多晶硅层的制备方法, PECVD 可以容易实现原位掺杂, 绕镀、爆膜等问题有有效解决途径, 并且维护成本低。而 LPCVD 法虽然工业应用成熟, 但清洗绕镀可能导致电池损伤、非原位掺杂工艺流程不符合“精益”生产要求, 石英管炸裂等导致维护成本较高。

图 33: TOPCon 电池结构中, 各类膜主流制备方法

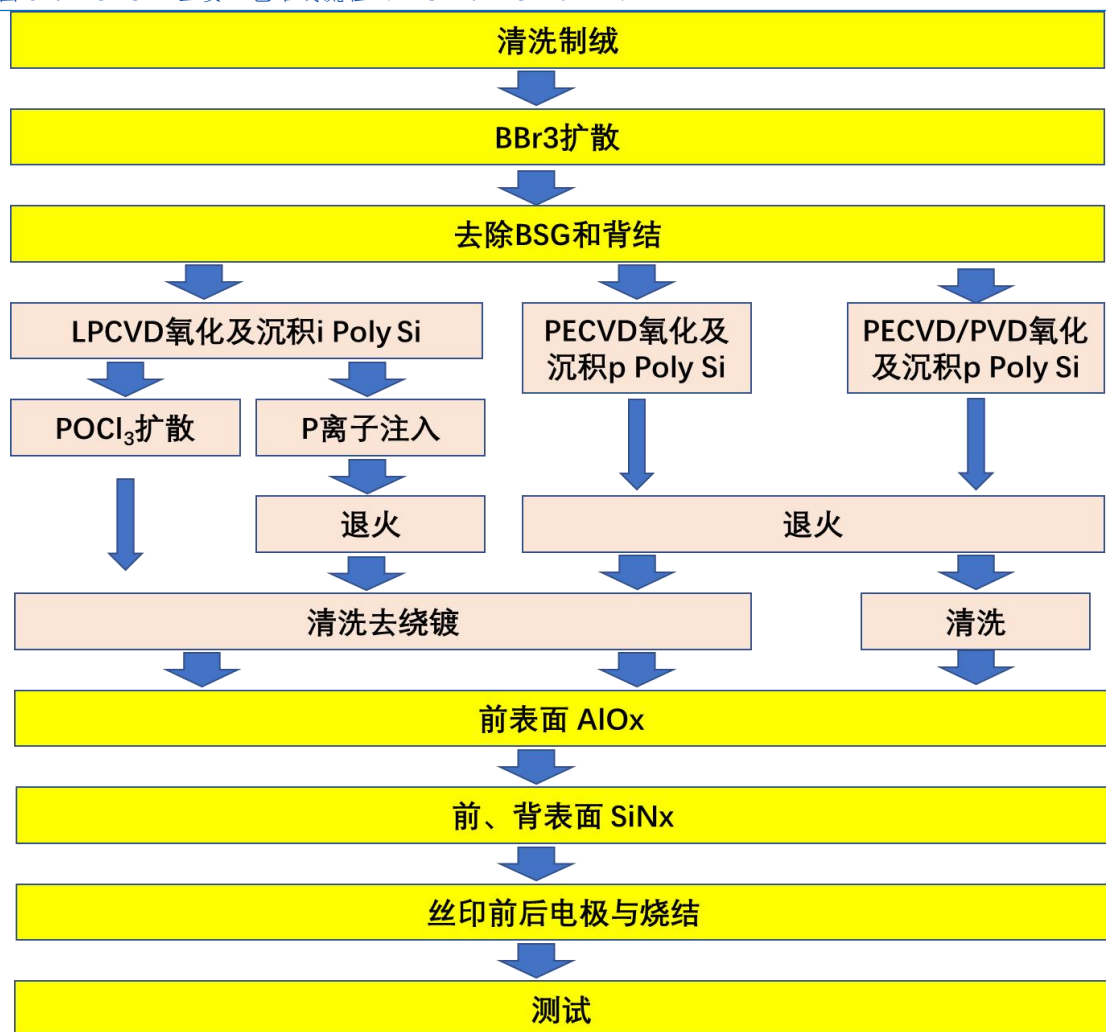
位置	膜层	LPCVD	PECVD	PVD	ALD	PEALD
正面	Al ₂ O ₃		√		Best	
正/背面	SiNx		Best			
背面	SiO ₂	√	√			√
背面	Poly Si	√	√	√		

资料来源: 江苏微导招股书, 《TOPCon 生产用 LPCVD 尾排设计》(王杨阳, 2021), 华金证券研究所

相对应, TOPCon 主要工艺路线有 4 条, 以多晶硅制备方法, 分为 LPCVD/PECVD/PVD。LPCVD 路线中, 主要采取非原位掺杂的方法。其中磷掺杂方式, 包括磷扩、离子注入; PECVD 路线中, SiO₂、掺杂多晶硅层均由 PECVD 设备完成; 在 PVD 路线中, SiO₂ 层由 PECVD 完成, 掺杂多晶硅层由 PVD 完成。LPCVD+离子注入路线、PECVD、PVD 路线均需采用退火, 完成晶化处理。

除了主流的三大工艺路线外, 江苏微导提出 PEALD 设备用于制备隧穿层 SiO₂ 和掺杂多晶硅层。公司开发的 PEALD 二合一平台, 集成了 PEALD 和 PECVD 两种工艺, 分别用于制备隧穿层 SiO₂ 和多晶硅层, 能够弥补 LPCVD 技术存在的不足。

图 34：TOPCon 主要工艺路线流程（LPCVD/PECVD/PVD）



资料来源：《Topcon 与 HJT 电池的量产前景分析》（王文静），一道新能，华金证券研究所

LPCVD/PECVD/PVD 各路线对比：**LPCVD** 工艺最成熟，应用最快，且膜层质量较高。但它不足之处体现在：1）原位掺杂难，需分两步走，即先沉积本征多晶硅层，再进行磷扩或离子注入法进行掺杂；2）绕镀严重，LPCVD 绕镀是在电池正面、侧面全部镀上 SiO_2 膜跟掺杂多晶硅膜，有效产能减半、且清洗可能导致电池损坏；3）石英管维护问题，LPCVD 内石英管上全部沉积上所镀的膜层，需要定期停机替换、清洗，带来石英管替换成本、以及机床维护费用；

PECVD 工艺成熟度仅次于 **LPCVD** 路线，其优点明显：1）可以加入磷烷 PH_3 ，进行原位掺杂；2）轻微绕镀，清洗容易。PECVD 绕镀出现在电池侧面及正面边缘，清洗时正面 BSG 对碱液起保护作用，清洗过程简单可控；3）沉膜速度快，原位掺杂时，沉膜速度在 10nm/min 之上；PECVD 路线缺点，主要是爆膜问题，但根据研究，通过背面微制绒，可有效解决爆膜问题。

PVD 工艺成熟度最低，但其优点体现在：1）可原位掺杂；2）无绕镀；3）不使用危险气体，如硅烷、磷烷等；4）原材料硅基靶材成本低。但 **PVD** 路线缺点主要体现在：1）设备成本高；2）占地面积大；3）根据 ISFH 观点，**PVD** 方法可能有钝化效果差、接触电阻高等劣势。

图 35: LPCVD、PECVD、PVD 三条工艺路线对比

	LPCVD	管式PECVD	板式PVD
工作原理	将一种或数种气态物质，在较低压力下，用热激活能，使其发生热分解反应，沉积在衬底表面形成所需薄膜	借助微波或射频等使含有薄膜组成原子的气体，在局部形成等离子体，而等离子体化学活性很强，很容易发生反应，在基片上沉积出所期望的薄膜	在真空条件下，用物理的方法（真空溅射镀膜），使材料沉积在被镀工件上的薄膜制备技术
成膜速率	5-8 nm/min (intrinsic) 1-3 nm/min (in-situ doping)	>10 nm/min (in-situ doping)	>10 nm/min (in-situ doping)
WPH/台	单插：4300pcs，双插：8000pcs	4200pcs	8000pcs
掺杂方式	P扩散/离子注入 原位掺杂（增加退火）	原位掺杂（增加退火）	原位掺杂（增加退火） PVD硅（靶材），PECVD磷（PH3）
隧穿氧化层生长方式	原位/热氧化	PEALD（甲基硅烷）、O ₂ plasma、N ₂ O plasma	连续O ₂ plasma、N ₂ O plasma
绕镀情况	LAPLACE水平插片：四周均匀、10mm以内（已解决，年底推广）	绕镀面积较小，边缘2mm以内	取决于上下镀膜方式以及载板设计，边缘2mm以内或边缘无膜
运行成本（石英件维护）	石英舟寿命>6个月/清洗周期15天 石英管寿命4-12个月（不清洗+涂层） 个别厂家使用金属套管存在掉渣风险	石英舟清洗周期20-30run	板式运行方式，容易掉片，开腔维护保养时间长，uptime低 保养周期30天，保养时间2天，换靶材需要3天
效率	GW量产效率24.9% 研发实验室最高效率25.7%	待GW级量产验证	量产效率24.5%
良率	GW量产良率>97%	无批量数据，无良率数据	95%
技术成熟度	已有50+GW规模交付 研发储备充足，技术路线明确	已有厂家选择，16GW待规模量产	6GW量产
优势	1、热氧化、原位生长氧化质量高； 2、氧化层厚度与温度线性关系较好； 3、Poly生长质量高，钝化效果高	1、绕镀速率快、单机台产能大、投入成本低 2、绕镀<2mm，清洗容易	1、无绕镀、清洗方式简单
劣势	现阶段每年需要更换炉管2-3次； 石英件成本200万/GW	1、氧化层生长不均匀、效率离散性较高 2、原位掺杂会导致陶瓷环导电，石墨舟维护周期短； 3、存在掉粉问题； 4、PH3耗量高	1、设备uptime低，下镀膜碎片清理较难，故障率高； 2、设备价格昂贵； 3、边缘无膜、清洗需要单独处理，影响效率

资料来源：拉普拉斯官微，华金证券研究所

（四）TOPCon 各环节竞争格局及价值量拆分

TOPCon 工艺各环节中，传统工艺环节（丝网印刷除外）竞争较为激烈，隧穿层及掺杂多晶硅层制备环节竞争相对放缓。TOPCon 工艺环节包括制绒、扩散制结、刻蚀、隧穿层及多晶硅层沉积、清洗、正反面钝化层、金属化。根据迈为招股书资料，在制绒、扩散制结、刻蚀、湿法刻蚀清洗、PECVD 镀 SiNx 膜等环节均呈现厂家相对较多、竞争相对激烈的特点。TOPCon 在隧穿层、掺杂多晶硅层制备环节竞争相对放缓。按多晶硅制备工艺路线分为 LPCVD、PECVD、PVD。LPCVD 厂商主要包括：拉普拉斯、红太阳、赛瑞达、北方华创等；PECVD 厂商主要包括：捷佳伟创、红太阳、金辰股份、北方华创等。PVD 路线厂商主要是江苏杰太；另外，江苏微导提出 PEALD 二合一设备，可用于制备隧穿层及掺杂多晶硅层。

图 36: TOPCon 路线各设备主要供应商

工序	内容	设备	主要设备商	竞争情况
1	制绒	制绒机	捷佳伟创、尚德、聚晶；Schmid、RENA	厂商相对较多，竞争相对激烈
2	硼扩	扩散炉	拉普拉斯、捷佳伟创、赛瑞达、北方华创、Schmid	厂商相对较多，竞争相对激烈
3	刻蚀	刻蚀机	捷佳伟创、北方华创；Schmid、RENA	厂商相对较多，竞争相对激烈
4	SiO ₂ /Poly-Si LP/PE/PVD	LPCVD	拉普拉斯、红太阳、赛瑞达、北方华创、SEMCO	厂商相对较多，竞争相对激烈
		PECVD	捷佳伟创、金辰股份、红太阳、理想、CT、MB	
		PVD	江苏杰太	
		PEALD	江苏微导	
6	磷掺杂	扩散炉	捷佳伟创、丰盛、红太阳、北方华创、拉普拉斯、48所、Tempress、Centrotherm	厂商相对较多，竞争相对激烈
		离子注入机	凯世通、Intevac、日本真空	应用厂家不多
7	退火	退火炉	捷佳伟创、江苏微导等	厂商相对较多，竞争相对激烈
8	清洗	湿法设备	常州捷佳创、上海思恩、张家港超声、上海釜川、北方华创	厂商相对较多，竞争相对激烈
9	正面Al ₂ O ₃	ALD	江苏微导、松煜、理想	
10	正反面SiNx膜	PECVD	捷佳伟创、北方华创、丰盛装备、48所、Tempress、Centrotherm、Roth&Rau	厂商相对较多，竞争相对激烈
11	印刷烧结	丝网印刷及分选等	迈为、东莞科隆威	国内竞争者少

资料来源：捷佳伟创招股书、迈为招股书、Taiyang News、PVInfolink，华金证券研究所

图 37：各家设备商技术路线

供应商	隧穿氧化层	掺杂Poly-Si	特点
中来（杰太）	PECVD	PVD（掺杂Poly-Si）+退火	成膜速度快，无绕镀
红太阳	热氧	LPCVD（掺杂Poly-Si）+退火	LPCVD原位掺杂绕镀易清洗，但镀膜速率较慢，膜层均匀性差
	PECVD	PVD（掺杂a-Si）+退火	轻微绕镀，镀膜速率快，H含量高，易爆膜
宁波材料所（金辰）	热氧/PECVD	PECVD（掺杂Poly-Si）+退火	轻微绕镀，镀膜速率快，H含量高，易爆膜
拉普拉斯	热氧	LPCVD（本征a-Si）+磷扩 LPCVD（掺杂a-Si）+退火	LPCVD+磷扩技术成熟，钝化性能优异，单槽单片工艺成熟，但产能低，单槽双片工艺良率略低 LPCVD原位掺杂绕镀易清洗，但镀膜速率较慢，膜层均匀性差
	PECVD	PECVD（掺杂a-Si）+退火	轻微绕镀，镀膜速率快，H含量高，易爆膜
微导	PEALD	PECVD（掺杂Poly-Si）+退火	氧化层均匀性易控制，轻微绕镀，镀膜速率快，H含量高易爆膜
赛瑞达	热氧	LPCVD（本征Poly-Si）+磷扩 LPCVD（掺杂Poly-Si）+退火	LPCVD+磷扩技术成熟，钝化性能优异，单槽单片工艺成熟，但产能低，单槽双片工艺良率略低 LPCVD原位掺杂绕镀易清洗，但镀膜速率较慢，膜层均匀性差
理想晶延	热氧/PECVD	PECVD（掺杂Poly-Si）+退火 PECVD（本征Poly-Si）+退火	轻微绕镀，镀膜速率快，H含量高，易爆膜
北方华创	热氧	LPCVD（本征a-Si）+磷扩 LPCVD（掺杂a-Si）+退火	LPCVD+磷扩技术成熟，钝化性能优异，单槽单片工艺成熟，但产能低，单槽双片工艺良率略低 LPCVD原位掺杂绕镀易清洗，但镀膜速率较慢，膜层均匀性差
CT	热氧	PECVD（掺杂Poly-Si）+退火	轻微绕镀，镀膜速率快，H含量高，易爆膜

资料来源：PVinfolink，华金证券研究所

从经济性角度看，**PECVD** 路线设备投资成本低、产能大、维护成本低、开机率高。根据皇氏集团机构调研纪录表：

（1）PE 路线比 LP 路线设备采购成本少；

（2）PE 路线工艺时间短，单台设备产能大，设备机台数量少，省空间，设备好布局；

（3）维护成本对比：LP 路线石英管寿命平均 56 天，石英舟寿命 60 天，石英件消耗 162 万/台/年，PE 路线石英管寿命 1-2 年，只有正常的石墨舟消耗，LP 设备的石英件消耗比 PE 设备费用预计多出 3530 万/年（5GW 计）；

（4）设备人员配置上，LP 路线估计是 PE 路线的一倍以上，每天在做维护换石英管，且设备利用率较低，更换石英管需要 3-4 小时，期间整台设备需停机。

四、TOPCon 路线设备布局厂商，产能统计

从已建成产能看，根据不完全统计，当前 TOPCon 已建产能约 **69.75GW**。其中，晶科目前已投产产能 **24GW**，为 TOPCon 产能最大的企业。其次，中来股份目前共建成产能 **7.6GW**，分为江苏泰州 **3.6GW** 产能，山西太原 **4GW**。江苏泰州 **3.6GW** 中，最先建成的 **2.1GW** TOPCon 产能，公司采用 LPCVD 路线。后续建成的所有产能均采用 PVD 路线。此外，天合光能、钧达已投产产能达到 **8GW**，一道新能已投产产能达到 **6.25GW**。

从远期规划产能看，据不完全统计，目前 TOPCon 规划代建总产能超 **470GW**。其中，包括晶澳 **27.3GW**，晶科待建 **11GW**，天合光能待建 **33GW**，钧达规划 **23GW**，一道新能待建 **14GW** 产能，协鑫规划 **30GW**。跨界 TOPCon 玩家包括沐邦高科、皇氏集团、仕净科技等。

图 38：TOPCon 在建产能已超过 470GW

公司	产地	项目状态	已建 (GW)	在建/待建 (GW)	备注
国电投	西安	投产	0.4		
韩华	韩国	投产	0.6	2.5	
鸿禧能源		募资		2	
晶澳科技	河北宁晋	投产	1.4		
	河北宁晋	在建		6	公司2022-02-12公告、2022-07-20公告，未明确投产时间
	云南曲靖	规划		10	公司2022-05-19公告；曲靖和扬州各10GW于2023上半年投产，预计2023年n型产能超过27GW
	江苏扬州	规划		10	公司2022-06-23公告，未明确投产时间
晶科能源	鄂尔多斯	规划		30	2023-01-19公告
	浙江海宁	投产	8		
	安徽合肥	投产	8		
	安徽合肥二期	投产	8		2022年8月1日官方微信公告；22年底，产能达到24GW，预计到2022年底将达35GW
尚德	浙江海宁（尖山）	在建		11	2022年7月28日公告，建设周期18个月
	江苏泰州	投产	2		2022年1月投产
苏州路能	张家港	在建		1	预计2022年底投产
腾辉		环评通过		1	通过环评，尚未开工
天合光能	江苏常州	投产	0.5		
	江苏宿迁	投产	8		天合光能官微消息，12月30日，天合光能宿迁基地8GW 210+N型-TOPCon电池成功下线
	青海西宁	规划		10	TOPCon为优选技术路线，计划2025年底建成
通威	江苏淮安	规划		15	一期5GW在12个月内建成，二期10GW看一期情况而定
	四川眉山	投产	1	8	二期，金堂；通威太阳能眉山基地三期高效晶硅电池薄片电池片顺利下线，此项目为N型TOPCon
	四川眉山	规划		8.5	2022年11月底眉山三期8.5GW TOPCon投产；2023年新增的30GW产能大概率采用TOPCon技术
同创新能源	江苏高邮	在建	3		2022年底全部投产
	江苏高邮	规划		3	
一道新能源	浙江衢州	投产	1.25		
	江苏泰州	投产	5		2022年2月投产
	浙江衢州	在建		14	预计2022年投产
	山西太原	规划		10	未来其将计划30GW
中采	江苏泰州	投产	2.1		
	江苏泰州	投产	1.5	4	
	山西太原	在建	4	4	二期项目，预计2023年投产
	山西太原	规划		8	二期项目，预计2024年投产；一期首批4GW项目将在年内投产，一期后续4GW和二期的8GW正在逐步规划建设中
钧达股份（捷泰）	安徽滁州	在建	8		已投产，产能爬坡中
	安徽滁州	在建		10	2023年上半年达产
	江苏淮安	签约		13	2023年投产
	江苏淮安	签约		13	11月28日，总投资约130亿元；2023年投产
润阳能源	江苏盐城	在建		10	2023年上半年建成投产
沐邦高科	广西梧州	规划		10	2022年7月20日公告，建设周期15个月
豆辉光能	湖北鄂州	规划		10	2022年8月17日公告
协鑫集成	江苏盐城	签约		2	2022年5月签约
大恒能源	四川乐山	在建		10	一期5GW，2022年1月公告
	安徽芜湖	签约		20	一期10GW
	安徽庐阳	签约		2	
正泰新能源	安徽巢湖	签约		3	2023年春节后投产
	浙江海宁	签约		12	6月份签约，未明确时间
	浙江海宁	投产	4		海宁三期高效电池项目
聆达股份（嘉悦）	安徽金寨	募资		5	
皇氏集团	安徽阜阳	签约		20	2022年8月17日公告
英利能源	河北保定	开工		10	2022年8月16日，5GW电池材料产业园项目开工。2022年8月，英利电池产能将达到10GW
亿晶光电	安徽滁州	规划		10	预计2023年6月投产
泰恒新能源	四川宜宾	开工		5	
中清集团	江苏新沂	投产			
华耀光电	常州金坛	开工			2022年6月30日，10GW N型高效光伏组件
	呼和浩特	签约		10	2022年8月，N型电池片
英发德耀	四川宜宾	开工		10	22年11月18日，英发德耀20GW高效晶硅太阳能电池项目总投资110亿元，分两期建设，一期、二期项目各10GW
阿特斯	江苏宿迁	在建		10	
东方日升		规划		10	2022年4月22日，10GW奠基仪式；采用新一代N型TOPCon电池技术，预计2022年12月将正式投产
上机数控	江苏徐州	规划		24	12月21日，刚成立三个多月的安徽皇氏绿能与东方日升成功签订10GW TOPCon电池片销售合作框架协议，双方拟在光伏组件、TOPCon电池上形成长期战略合作伙伴关系
海源复材	安徽滁州	规划		10	12月23日，发布公告23M1启动，一期建设10GW TOPCon高效光伏电池项目（一期分为1-1期4GW TOPCon光伏电池生产线项目及1-2期6GW TOPCon光伏电池项目）
中环控股	安徽淮南	规划		2	22年7月18日，与凤台县人民政府及江苏中清光伏订立框架协议；分三期，一期2GW，二期3GW，三期5GW
横店东磁	四川宜宾	规划		6	22年11月29日，一期、二期计划均为年产6GW，其中一期项目将于2023年底基本建成
太一光伏	江苏徐州	签约		5	7月25日，徐州空港项目一期5GW
晶优光伏	山东泰安	签约		10	2022年7月25日，重点项目签约仪式；分两期
赛拉弗	安徽蚌埠	签约		5	2022年8月30日签约
中科云网&深圳普乐	江苏徐州	在建		1	第一阶段22年12月31日前完成1GW设备调试、试生产，最终实现5GW产能
林洋能源	江苏南通	在建		20	一期规划12GW，预计2023年6月份投产；二期规划8GW，预计2024年5月份投产
仕净科技	安徽宣城	规划		18	一期规划18GW，2023年4月份开工，预计11月份投产，二期6GW等一期结束后适时建设
合计			66.75	474	

资料来源：各公司公告，华金证券研究所（备注：标蓝底为跨界 TOPCon 厂家）

五、投资建议

TOPCon 规模量产，下游设备商将大为受益。据不完全统计，目前 TOPCon 规划及在建产能达 474GW。TOPCon 新增产能巨大，下游设备商将大为受益。

（一）捷佳伟创

公司是国内电池片设备龙头，主要产品包括清洗设备、制绒设备、扩散炉、刻蚀设备、PECVD 设备和自动化设备等晶体硅太阳能电池生产设备。并且在 TOPCon、HJT、IBC、钙钛矿等新技术路线上进行了全面布局。

在 TOPCon 技术路线上公司已具备整线设备交付能力，PE-Poly 设备已累计获得超 50GW 订单。公司核心设备 PE-Poly 和硼扩散设备已成功交付客户量产运行。PE-Poly，即采用 PECVD 技术，实现了隧穿层、Poly 层、原位掺杂层的“三合一”制备，不仅解决了传统 TOPCon 电池生产过程中绕镀、能耗高、石英件高损耗的固有难点，而且大大缩短了原位掺杂工艺时间，提高了生产效率，有效提升 TOPCon 的转换效率和良率，进一步加快 TOPCon 电池的大规模产业化。同时，公司是行业内为数不多能提供 TOPCon SE 设备的厂商，助力客户进一步提升 TOPCon 量产效率。

HJT 路线也完成 GW 级产线设备出货。在 HJT 技术路线上，公司为满足新设备、新材料、新工艺的验证，打造高效 HJT 技术全流程交钥匙解决方案，在下属子公司常州捷佳创建立了 HJT 中试线，并于 2021 年 7 月 HJT 中试线高效电池首片下线。伴随着首片下线，HJT 制绒、非晶硅镀膜、TCO、丝网印刷等四道工序的主机及自动化全线贯通，该项目所有工艺设备及自动化设备由公司自主研发，具有完全知识产权，标志着公司 HJT 电池技术和设备研发再上新台阶。公司创新性的管式 PECVD 已进入工艺匹配和量产化定型；公司自主研发的 PAR 持续优化，稳定性能，助力异质结再创新高，其转换效率的显著优势已在客户端得到了充分的验证。

在钙钛矿电池技术路线上，公司 RPD 设备取得了钙钛矿中试线的订单，同时钙钛矿的整线设备也进入了研发阶段。

（二）帝尔激光

公司是光伏激光设备，全面布局各电池路线激光技术应用。在 PERC 时代，公司 PERC 消融、PERC SE 产品市占率持续保持 80% 左右。目前，公司全面布局各电池路线的激光应用，包括 TOPCon SE 设备、HJT LIA 修复设备、IBC 激光开槽等，并拓展显示面板新领域的激光设备，未来有望受益于研发技术持续落地。

TOPCon SE 具有广阔发展空间。根据上海交通大学教授沈文忠 2022 年 1 月在 SCI 发表文章观点，TOPCon 光伏电池的 SE 技术成熟后，在大规模生产中可以提升 1% 的电池转换效率。TOPCon 激光 SE 成熟后可提高 1% 电池效率，或将成为行业标配，公司有望率先受益：帝尔激光作为光伏激光 SE 设备龙头，与客户有深入合作交流，客户在新建设 TOPCon 产线时选择预留激光的接口。

激光转印节省 33% 浆料，有望全面替代细栅的丝网印刷：PTP 技术由 Utilight Ltd 公司（帝尔以色列）开发，已成为公司的全球专利。帝尔激光转印在 PERC 产线上已完成论证：激光转印的栅线更细，可达到 18 微米以下，实现节省浆料 30%；印刷一致性高，误差在 2 微米，同时适用于低温银浆；激光转印为非接触式印刷，可以避免挤压式印刷存在的隐裂、破片、污染、划伤等问题，更符合未来硅片薄片化趋势。并且，激光转印技术适用于 TOPCon、HJT、IBC 电池路线。激光转印大幅降低银浆消耗量、有效避免隐裂问题，将极大助力电池片厂商降本增效，目前样机已经交付给头部客户做量产测试。未来激光转印有望全面替代细栅的丝网印刷，公司有望凭激光转印实现再次腾飞。

六、风险提示

1. 光伏新增装机容量不及预期

如果光伏行业需求减少，新增装机量不及预期，则直接影响新增产能量，随即对设备的需求量降低，因此对设备商产生不良影响。

2. 市场竞争加剧风险

随着越来越多厂商加入 TOPCon 路线，TOPCon 设备市场空间随即扩大。可能引入新的设备商进入市场，导致市场竞争可能进一步加剧，设备商的市场份额、利润空间遭受挤压。

3. 电池技术迭代对设备影响的风险

当前节点，TOPCon、HJT、IBC、钙钛矿电池热度均极高，TOPCon 路线之外，HJT 电池效率高、工序少，也有众多厂商选择，规划产能可观。IBC 电池路线上，隆基、爱旭都有大产能布局，且 IBC 电池在分布式场景应用上潜力巨大，前景向好；钙钛矿电池担负着电池效率超 30% 的希望，是未来高效电池发展的必然方向。如其中任一路线进展超预期，将对 TOPCon 路线设备商产生一定的不利影响。

4. 设备技术研发风险

TOPCon 路线上，以隧穿层及掺杂多晶硅层制备为例，其工艺有多种，如 LPCVD/PECVD/PVD/PEALD 等，如果其他路线进展顺序，比如 LPCVD 绕镀、维护等问题，行业内突破，有很好解决途径，可能极大削弱 PECVD 的竞争力，可能造成对 PECVD、PVD 等路线的设备商不利影响。

行业评级体系

收益评级：

领先大市—未来 6 个月的投资收益率领先沪深 300 指数 10%以上；

同步大市—未来 6 个月的投资收益率与沪深 300 指数的变动幅度相差-10%至 10%；

落后大市—未来 6 个月的投资收益率落后沪深 300 指数 10%以上；

风险评级：

A—正常风险，未来 6 个月投资收益率的波动小于等于沪深 300 指数波动；

B—较高风险，未来 6 个月投资收益率的波动大于沪深 300 指数波动；

分析师声明

刘荆声明，本人具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格，勤勉尽责、诚实守信。本人对本报告的内容和观点负责，保证信息来源合法合规、研究方法专业审慎、研究观点独立公正、分析结论具有合理依据，特此声明。

本公司具备证券投资咨询业务资格的说明

华金证券股份有限公司（以下简称“本公司”）经中国证券监督管理委员会核准，取得证券投资咨询业务许可。本公司及其投资咨询人员可以为证券投资人或客户提供证券投资分析、预测或者建议等直接或间接的有偿咨询服务。发布证券研究报告，是证券投资咨询业务的一种基本形式，本公司可以对证券及证券相关产品的价值、市场走势或者相关影响因素进行分析，形成证券估值、投资评级等投资分析意见，制作证券研究报告，并向本公司的客户发布。

免责声明：

本报告仅供华金证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因为任何机构或个人接收到本报告而视其为本公司的当然客户。

本报告基于已公开的资料或信息撰写，但本公司不保证该等信息及资料的完整性、准确性。本报告所载的信息、资料、建议及推测仅反映本公司于本报告发布当日的判断，本报告中的证券或投资标的价格、价值及投资带来的收入可能会波动。在不同时期，本公司可能撰写并发布与本报告所载资料、建议及推测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息及资料保持在最新状态，本公司将随时补充、更新和修订有关信息及资料，但不保证及时公开发布。同时，本公司有权对本报告所含信息在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。任何有关本报告的摘要或节选都不代表本报告正式完整的观点，一切须以本公司向客户发布的本报告完整版本为准。

在法律许可的情况下，本公司及所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务，提请客户充分注意。客户不应将本报告为作出其投资决策的惟一参考因素，亦不应认为本报告可以取代客户自身的投资判断与决策。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议，无论是否已经明示或暗示，本报告不能作为道义的、责任的和法律的依据或者凭证。在任何情况下，本公司亦不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。

本报告版权仅为本公司所有，未经事先书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表、转发、篡改或引用本报告的任何部分。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许范围内使用，并注明出处为“华金证券股份有限公司研究所”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

华金证券股份有限公司对本声明条款具有惟一修改权和最终解释权。

风险提示：

报告中的内容和意见仅供参考，并不构成对所述证券买卖的出价或询价。投资者对其投资行为负完全责任，我公司及其雇员对使用本报告及其内容所引发的任何直接或间接损失概不负责。

华金证券股份有限公司

地址：上海市浦东新区杨高南路 759 号（陆家嘴世纪金融广场）31 层

电话：021-20655588

网址：www.huajinsc.cn