

激光接触开槽 (LCO) 结合电镀工艺：一种 TOPCON 太阳能电池的可持续解决方案

受更高效太阳能电池日益增长的需求所驱动，光伏产业正在经历一场重大的技术变革。因此，制造商正逐步摒弃 PERC（钝化发射极和背面接触）技术，转而采用性能更优的电池结构。其中，TOPCon（隧穿氧化层钝化接触）技术已成为未来十年及更长时期内主导晶体硅 (c-Si) 光伏制造的主要技术之一。根据最新预测，TOPCon 有望最终占据高达 60% 的市场份额（ITRPV – 国际光伏技术路线图）。

尽管 TOPCon 技术相比 PERC 技术在性能上有显著提升，包括更优的载流子收集效率、更低的能量损耗及更高的整体效率，但它也带来了新的挑战，尤其是在金属化工艺方面。作为长期以来用于形成太阳能电池正背面电极接触的行业标准，丝网印刷银浆工艺的可持续性日益受到质疑。这是因为银已是太阳能电池中成本第二高的材料（仅次于硅），而 TOPCon 技术对银的消耗量比 PERC 技术高出 50% 之多。

如此大量的银材料消耗，引发了关于长期材料供应及 TOPCon 技术经济可行性的双重担忧。这既推高了成本，又对全球银供应链施加了额外压力，进而可能引发价格波动。显然，业界亟需一种替代方案。

激光接触开槽与电镀工艺的结合（简称 LCO + 电镀工艺）正是在此背景下应运而生，成为一项极具吸引力的解决方案。该工艺摒弃了对昂贵银浆的依赖，转而采用短波长、超短脉冲 (USP) 激光器，在电池正背面的薄介电层上实现超精密开槽。随后，对这些暴露的硅区域进行镀铜处理，以制备高质量、低电阻的欧姆接触。铜本身还具备材料成本更低、电导率更高且可扩展性更强的优势。

本文将探讨 MKS 的激光器和电镀技术如何助力 LCO + 电镀工艺的转型。

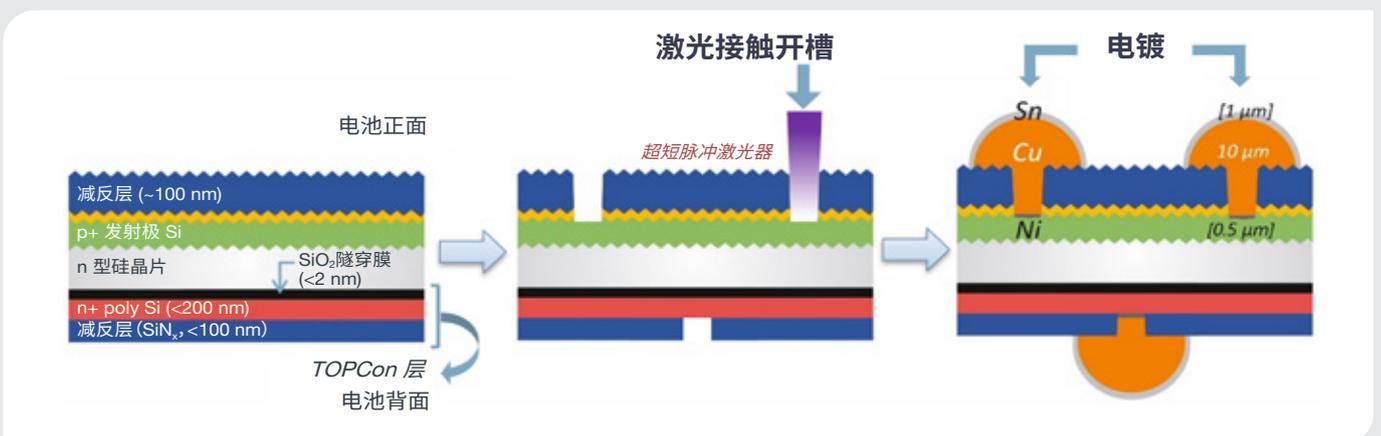


图 1. TOPCon 太阳能电池制造中的 LCO + 电镀金属化工艺流程

LCO + 电镀工艺的优势

尽管丝网印刷长期以来一直是硅太阳能电池金属化的标准工艺，但其局限性正日益凸显，在 TOPCon 技术背景下尤为显著。银浆不仅成本高昂，其印刷精细度也存在固有局限。更宽、更高的接触线意味着更严重的光遮挡、更小的电池有效面积及更高的电阻损耗，这些均会降低电池效率。此外，丝网印刷涉及较为严苛的物理处理过程。机械接触/压力以及高温炉烧结可能会对薄片和易损的 TOPCon 薄膜造成损伤。这些因素在不同程度上引发了生产中良率与产量之间的权衡取舍。

LCO + 电镀工艺可以精准应对这些技术痛点。通过使用激光在钝化介电层中开设精确定位的区域，制造商能够选择性地形成低电阻接触点，从而精确限定镀层沉积位置。随后，采用用量相对更少、成本效益更高的金属（镍、铜、锡）进行金属化处理，在不牺牲性能的前提下显著降低材料成本。

LCO + 电镀工艺可实现更细的金属线宽、更高的电导率、更低的接触电阻，以及更具可持续性的金属化策略。尽管该工艺在设备和工艺控制层面增加了复杂性，但经弗劳恩霍夫太阳能研究所（德国弗莱贝格）等机构验证的试验生产线初步结果表明，其性能可达到甚至超过传统的丝网印刷电池。因此，随着 TOPCon 技术的加速普及，LCO + 电镀工艺有望成为高效率、低成本太阳能制造的新标准。

LCO 工艺考量

LCO 工艺的核心目标在于，在去除减反射层和钝化介电层的同时，将对基底硅和 SiO_2 层的影响降至最低。然而，要在实践中实现这一目标，需要严格受控的高精度工艺。

短波长 USP 激光器，尤其是紫外 (UV) 皮秒 (ps) 和飞秒 (fs) 激光器，是满足这一需求的理想方案，其关键在于将短脉宽与紫外光的强吸收特性相结合。由于氮化硅 (SiN_x) 减反射涂层可透射大部分紫外激光，基底硅中的热和光学相互作用必须被限制在数十纳米内。在这种吸收能量的浅表层限制下，薄 SiN_x 层会因基底硅中产生的等离子体及快速加热效应而被剥离。这种精准可控的能量扩散对于维持下方隧穿氧化层与多晶硅堆叠层的完整性至关重要，而这一完整性又进而对 TOPCon 电池性能起着决定性作用。图 2 展示了光学显微镜下观测到的、使用皮秒和飞秒紫外激光器形成的 LCO 特征。

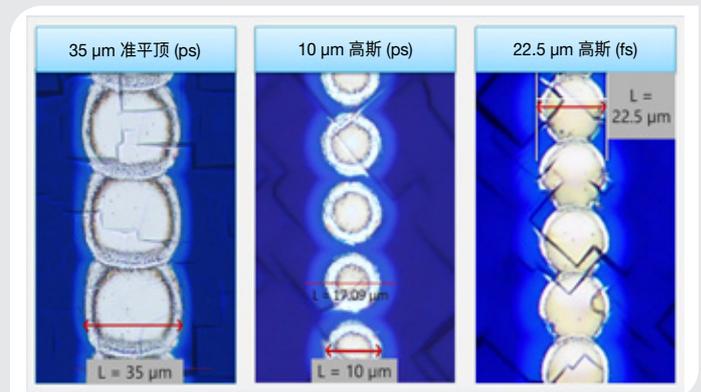


图 2. 采用皮秒和飞秒脉冲以及高斯和准平顶强度分布加工的 LCO 特征示例。

激光参数（如脉冲宽度、波长、光斑尺寸和能量密度）需经过精心优化，并与工艺产量进行平衡。对于大多数工艺而言，皮秒激光器在速度与质量之间实现了良好的平衡。不过，在 TOPCon 激光接触开槽等薄膜应用中，由于飞秒激光器具有更低的烧蚀阈值以及对层状材料更温和的相互作用，有时可实现更高的产量和更好的质量。光束整形（如采用准平顶强度分布）可进一步增强对烧蚀深度和均匀性的控制。

MKS 的应用工程师已开展深入研究，专门表征 TOPCon 太阳能电池材料烧蚀过程中不同激光工艺参数的相互作用机制。这项研究的目的是确定可稳定实现以下效果的参数组合：

- 完全去除厚度 70 至 120 nm 的 SiN_x 减反射层。
- 目标层间均匀烧蚀。
- 控制并尽量减少对周围材料的热影响。
- 对基底多晶硅层 (<200 nm) 的影响极小。
- 不损伤多晶硅下方的薄 SiO_2 隧穿/钝化层（厚度 1-2 nm）。

图 3 展示了 MKS 一项测试的结果。通过扫描透射电子显微镜 (STEM)，该测试详细揭示了 TOPCon 太阳能电池对激光的响应机制。在此处图像中，测试区域被三个略有重叠的皮秒激光脉冲烧蚀。图中同时提供了同一加工区域的俯视图和横截面图像。

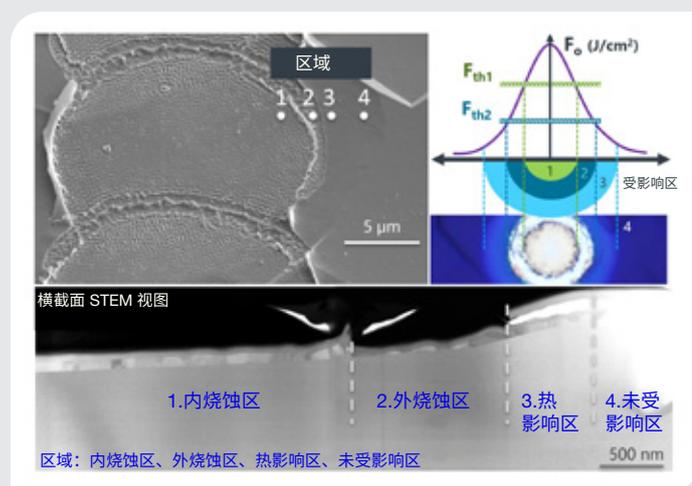


图 3. 此处所示的激光加工区域可划分为四个不同区域：内烧蚀区 (AZ)、外烧蚀区、热影响区 (HAZ) 和未受影响区 (UAZ)。图中已对这些区域进行标注。

值得注意的是，尽管激光光斑中心附近的强度更高，但外烧蚀区域（图中标记为区域 2 的沟槽）的材料去除量多于内烧蚀区域（图中标记为区域 1 的区域）。一种可能的解释是，激光束边缘的强度不足以引发表层 (SiN_x) 的非线性吸收。因此，穿过光束边缘该层的激光能量比预期更多，从而导致额外的硅材料被去除。USP 辐照引起的快速加热与冷却效应形成了区域 3，其中部分 $p+$ 多晶硅已转化为非晶硅。这需要额外的加热循环使其重新转化为多晶形态。

镀层金属化

当 TOPCon 太阳能电池通过 LCO 工艺形成通孔后，下一个关键步骤是金属沉积。为实现高效且具成本效益的金属化，镀层工艺是首选方法。与依赖昂贵银浆的丝网印刷不同，镀层工艺使用铜作为主要导体。铜不仅具备优异的导电性，还能显著降低材料成本。

TOPCon 电池的标准铜基金属化流程通常包括三个步骤：

1. 镀镍 (Ni)：形成欧姆接触，并作为铜与硅之间的扩散阻挡层。
2. 镀铜 (Cu)：建立主要导电通路。
3. 锡 (Sn) 或银 (Ag) 镀层：提高耐腐蚀性和可焊性。

这些步骤可通过电化学沉积 (ECD) 或化学镀实现。对于敏感的 TOPCon 结构，化学镀镍具有独特优势，因其无需电接触即可引发沉积反应且支持双面镀。这可以减少搬运次数和施加在脆弱晶片上的机械力。

然而，尽管化学镀在流程简化与成本优化方面潜力显著，但其尚未在大规模生产中广泛应用。相比之下，ECD 是一种更成熟的方法，尽管初始投入较高，但可提供更优异的工艺控制、更均匀的厚度和更高的材料纯度。聚焦离子束 (FIB) 可用于切片去除和镀层界面的细致观察，如图 4 所示的 ECD 镀层情况。

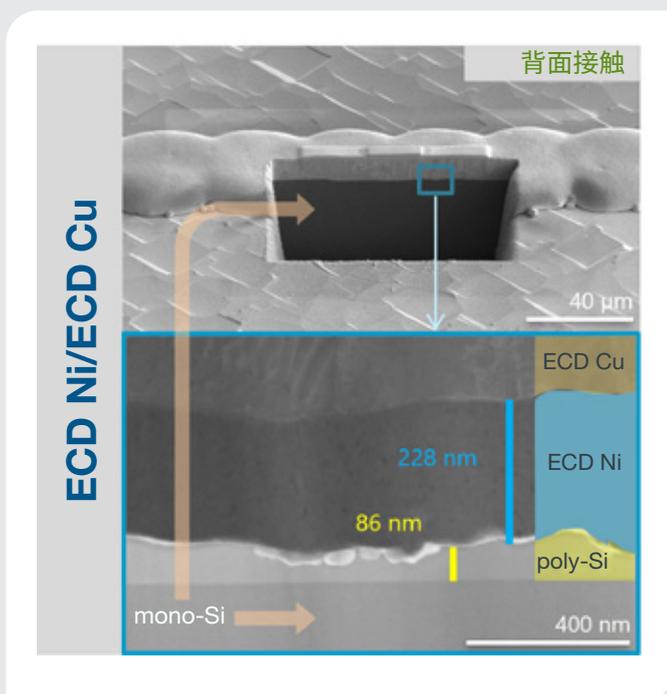


图 4. 对 ECD 镀层横截面的细致观察显示，各层之间形成了紧密而连续的联系。

无论选择哪种金属化方法，工艺整合都是关键。激光加工的开槽必须经过精心优化，以匹配电镀工艺的要求，从而确保低接触电阻和强附着力。需要关注的因素包括 LCO 开槽尺寸、光斑重叠率和残留表面质量，所有这些都影响镀层的均匀性、附着力和性能。

电池性能

通过优化的 LCO + 电镀生产工艺，实际可达到怎样的电池性能？为探究这一点，研究团队采用 Spectra-Physics 激光系统与 Atotech 电镀化学品制备了 TOPCon 电池。

这项研究由弗劳恩霍夫太阳能研究所合作完成。需要指出的是，本研究使用的晶片前驱体并未针对 LCO 进行优化，且电镀采用的是实验室级工具。

在这些条件下，我们实现了最高 23.3% 的电池效率，开路电压 (VOC) 约为 693 mV，填充因子超过 82%。这一效率与丝网印刷金属化工艺的结果 (24%) 基本持平，而晶片是专为丝网印刷工艺设计的。

其他团队的测试同时优化了晶片前驱体、激光工艺和化学品，将效率提升至 26.7%。这一数值已接近可量产 TOPCon 电池的实际效率上限。

结论

TOPCon 有望在未来十年引领硅光伏制造的发展，但其长期成功取决于能否超越基于银浆的丝网印刷工艺。LCO + 电镀工艺提供了一种可扩展且可持续的替代方案。尤其是 Spectra-Physics 激光器与 Atotech 电镀工艺的结合，已展现出能够制造出兼具高效性能和量产可行性的金属化 TOPCon 电池。该工艺可通过多组高速加工头并行作业以实现规模化，产量可达每小时 35,000 片晶片。这使 LCO + 电镀工艺成为 TOPCon 太阳能电池商业化生产的可行路径。

产品

IceFyre® 工业皮秒激光器

IceFyre UV50 是市面上表现优异的紫外皮秒激光器，在 1.25 MHz (>40 μJ) 时提供 >50 W 的紫外输出功率，脉冲串模式下的脉冲能量为 100 μJ，脉冲宽度为 10 ps。IceFyre UV50 设定了从单次激发到 10 MHz 的功率和重复率的新标准。IceFyre UV30 提供 >30 W 的典型紫外输出功率，脉冲能量 >60 μJ (脉冲串模式下脉冲能量更大)，具有从单次激发到 3 MHz 的优异性能。IceFyre IR50 在 400 kHz 单脉冲时提供 >50 W 的红外输出功率，具有从单脉冲到 10 MHz 的优异性能。

IceFyre 激光器的独特设计利用光纤激光器的灵活性和独有的功率放大器能力，实现 TimeShift™ ps 可编程脉冲串模式技术，可提供业内较高的多功能性。每台激光器均配备一组标准波形；可选的 TimeShift ps GUI 可用于创建自定义波形。该激光器的设计可为高扫描速度的优质加工（例如使用多面扫描镜）实现同类激光器中时间抖动极其低的按需脉冲 (POD) 和位置同步输出 (PSO) 触发功能。

	IceFyre UV50	IceFyre UV30	IceFyre GR50	IceFyre IR50
波长	355 nm		532 nm	1064 nm
功率	1250 kHz 时 >50 W	500 kHz 时 >30 W, 典型值 800 kHz 时 >25 W 1 MHz 时 >20 W, 典型值	500 kHz 时 >50 W	400 kHz 时 >50 W
最大脉冲能量, 典型值 (TimeShift ps 可实现更高的脉冲串能量)	1250 kHz 时 >40 μJ	500 kHz 时 >60 μJ, 典型值 800 kHz 时 >31 μJ 1 MHz 时 >20 μJ, 典型值	500 kHz 时 >100 μJ	200 kHz 时 >200 μJ
重复频率范围	单脉冲至 10 MHz			
脉冲宽度, FWHM	<12 ps (10 ps 典型值)		<15 ps (13 ps 典型值)	
TimeShift ps	是			
脉冲能量稳定性	<2.0%, 1 σ			<1.5%, 1 σ
功率稳定性	<1%, 1 σ, 8 小时以上			

MKS Atotech

在太阳能电池上电镀接触指可在显著降低材料成本的同时提高电池效率。电镀的镍/铜/锡接触优于传统丝网印刷接触。

镀镍：薄镍种子层作为界面层，与硅建立欧姆接触。Nimate® PV（电解镀镍）或 EXPT PV EN 4（化学镀镍）可作为种子层和/或扩散阻挡层。

镀铜：提供具有高导电性且电气性能优异的铜指。其低应力、延展性成分还能承受机械冲击。Cupracid® PV 系列专为在 2 至 25 ASD 的电流密度范围内运行而设计。

镀锡：确保可靠的电池连接可焊性，并保护铜免受环境影响。Stannacid® PV 是标准镀锡工艺，而 Niveostan® PV 20 提供高速镀锡工艺。

	镀镍		镀铜		镀锡	
	EXPT PV EN 4	Nimate PV	Cupracid PV 70	Cupracid PV 5-2	Niveostan PV 20	Stannacid PV
应用	无钡活化化学镀镍工艺	ECD 硫酸镍工艺	中速镀铜工艺应用	高速镀铜工艺应用	高速镀锡工艺	标准硫酸基镀锡工艺
特性	磷含量 1 - 6%	高镍纯度	<ul style="list-style-type: none"> 低内应力 高深宽比 		<ul style="list-style-type: none"> 无氟硼酸盐和无铅电解液 	<ul style="list-style-type: none"> 优异的均镀能力
电镀速度	0.1 - 0.3 nm/min	0.5 - 5 ASD	5 - 10 ASD	10 - 50 ASD	5 - 40 ASD	1.2 - 3 ASD