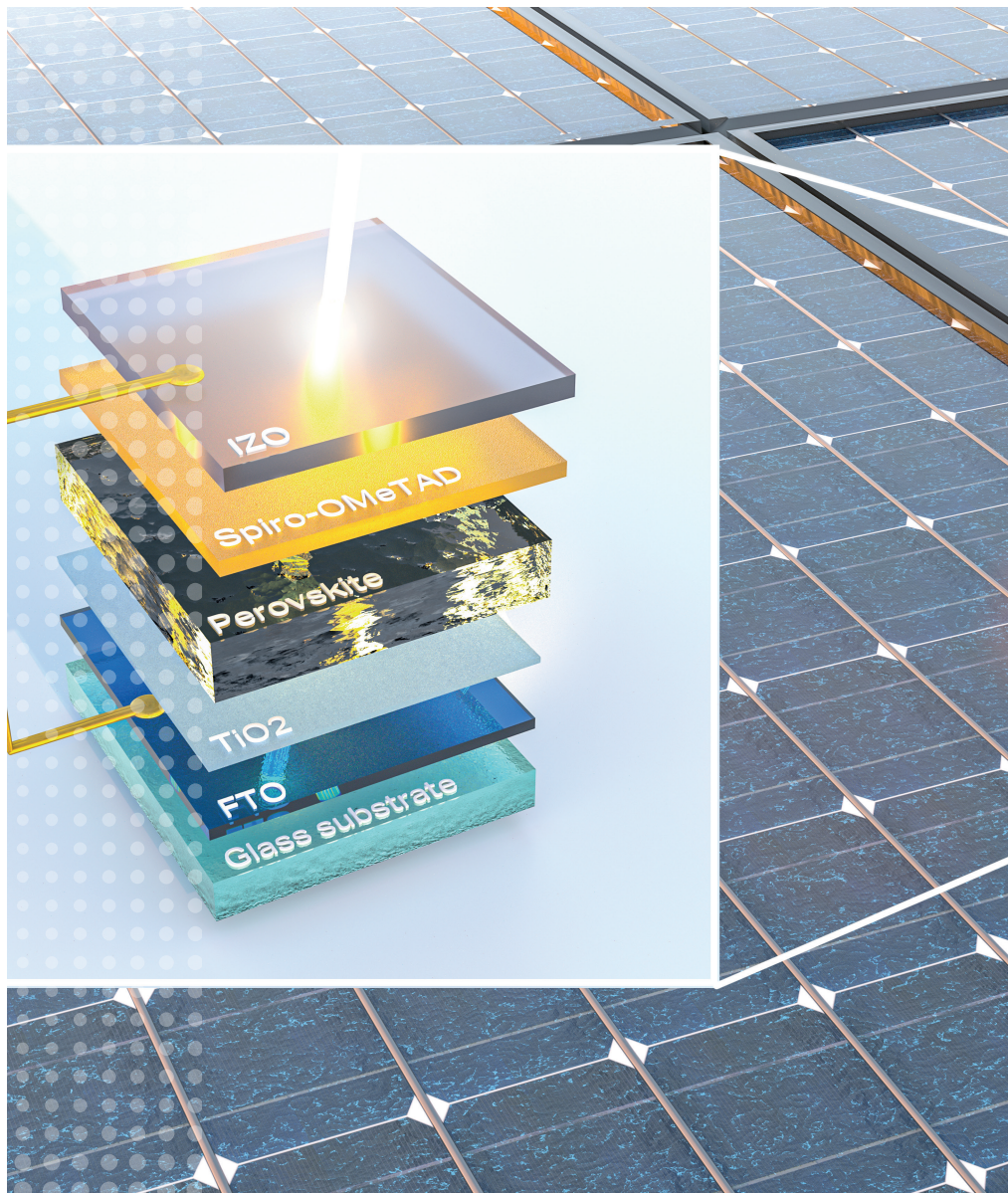


加快钙钛矿太阳能电池制造





光伏技术迎来新突破

在过去的几十年间，世界各地对清洁能源的需求日益增长。太阳能光伏(PV)作为清洁能源的一种形式，已经在全球范围内拥有相当大的装机容量。我们看到周围有越来越多的太阳能电池板，它们遍布在房屋和建筑物的屋顶上、太阳能发电厂，以及用于照明、安全摄像头、电器和移动电子设备等各种应用。根据国际能源署的数据，2022年，光伏发电贡献了全球电力需求量的6%以上^[1]。预计在未来的几十年内，这一贡献比例将大幅增长。

第一代太阳能电池板是基于硅晶圆制造的，晶体硅(c-Si)仍然是光伏发电中使用的主要材料。但自从第一代太阳能电池板被部署以来，人们一直在不断寻求更高效率和更低成本的电池板。第二代电池板材料——碲化镉(CdTe)，是一种薄膜半导体，这种材料已经开始取得商业上的成功。虽然碲化镉不如硅那么高效，但是其成本更低。

第三代电池板材料——钙钛矿，可能会改变游戏规则。相比于晶体硅和碲化镉，钙钛矿具有更高的效率和更低的成本。这种材料也可用于构建串联太阳能电池，从而能更有效地覆盖更广泛的吸收光谱。然而，目前钙钛矿电池仍然基于实验室研究，尚未达到完全的商业可行性。尽管如此，钙钛矿材料所展示的效率增长速率，明显快于晶体硅和碲化镉的效率增长速率。

相比于晶体硅，钙钛矿的另一个主要优势是它更容易制造，因为它使用基于油墨的低成本工艺，不需要高成本的工厂和设备。此外，钙钛矿可以从常见的可回收化学物质合成，而这些化学物质的供应相当丰富。

钙钛矿技术有望成为一种突破性技术。预测表明：未来十年，钙钛矿太阳能电池市场的复合年均增长率(CAGR)将超过30%^[2]。

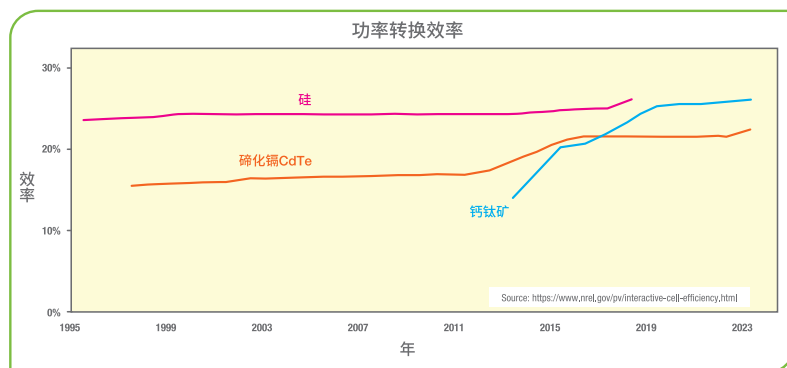


图1: 硅、碲化镉、钙钛矿这三种材料的功率转换效率增长情况。

[1] https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2023/04/IEA_PVPS_Snapshot_2023.pdf

[2] <https://www.precedenceresearch.com/perovskite-solar-cell-market>

光伏钙钛矿制造的挑战

钙钛矿太阳能电池制造是一种卷对卷 (roll-to-roll) 加工过程, 其中有一部分工艺需要去除多层堆叠的薄膜材料层中非常窄的一部分, 并且不能产生分层或碎屑。这个过程通常被称为“图案化”(patterning) 或“划线”(scribing), 其目的是实现与相邻电池单元的串连。传统的机械划线方法, 如使用刀片以及湿法化学蚀刻都有一定的局限性, 并且可能引发不希望出现的问题。幸运的是, 激光为钙钛矿太阳能电池制造提供了一种更好的解决方案。

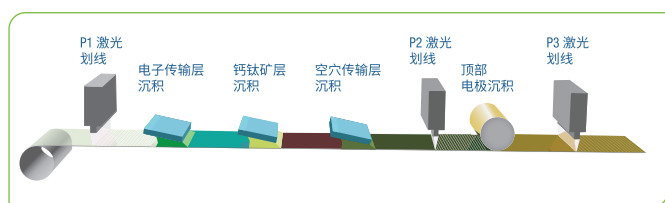


图2: 使用激光/机械划线实现钙钛矿太阳能电池的卷对卷加工。

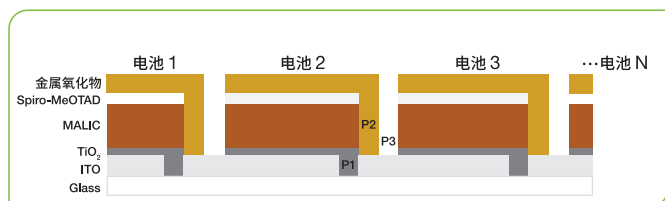


图3: 使用激光进行钙钛矿电池图案化和选择性去除材料层，以构建最终的电池单元，并与相邻电池单元实现串连。

首先, 激光器是具有极高精度的设备, 可以在微米量级上准确、可重复地进行加工。这有助于提高制造产量。相比之下, 传统的机械工具无法可靠地在微米尺度上进行加工。除了高精度外, 与机械工具相比, 激光器还提供了更加多变和复杂的划线图案, 这有可能实现更复杂、更高效的钙钛矿太阳能电池设计。

激光器相比于机械加工的另一个明显优势是加工质量。与机械划线和机械切割相比, 激光划线产生的毛刺更少, 对周围区域的热损伤也更少。这进一步减少了材料的浪费, 提高了产量。此外, 激光划线还能大量避免最终组装中出现的问题。从而提高产品的质量和可靠性。

激光划线是一种非接触式加工, 没有工具磨损。因此, 与机械方法相比, 激光划线方法因更换工具而停机的情况非常少见。

湿法化学蚀刻通常用于薄膜的去除。然而, 这种方法的一个特别值得关注的问题是: 由此产生的废物管理带来了额外成本和复杂性。相比之下, 激光则是一种更“绿色”、不产生环境垃圾的技术。此外, 湿法化学蚀刻工艺很难控制化学蚀刻线的深度和宽度, 导致其产量低于激光划线。

总的来说, MKS 认为, 将激光器引入钙钛矿太阳能电池制造中, 将有助于加速其商业化进程。

MKS 在钙钛矿太阳能电池制造方面的优势

MKS 了解设计和制造钙钛矿太阳能电池所面临的挑战。我们将这些知识转化为独特的产品特性, 使得这些产品在钙钛矿太阳能电池制造中独具优势。

超短脉冲激光器

激光材料加工所面临的挑战之一是, 仅去除不想要的材料 (通常是通过局部加热), 同时又要保证对周围任何剩余材料的热影响区 (HAZ) 最小化。由于在钙钛矿太阳能电池上创建的图案可能只有几微米宽, 以最小化“死区”, 增加“填充系数”, 以最大限度地提高单位面积的效率, 因此 HAZ 必须尽可能接近于零。

Spectra-Physics® IceFyre® 和 IceFyre FS 激光器分别提供皮秒和飞秒范围的超短脉宽, 有利于实现更高质量的加工结果, 因为它们产生强大的峰值功率会在样品处产生非线性吸收, 使材料瞬间汽化, 只有非常小的热量会传递到材料中, HAZ 几乎可以忽略不计。结果是实现快速、高精度、高质量的加工, 从而实现更高的生产量和更少的不合格零件。此外, 激光器的稳定性 (尤其是能量、波长、脉冲宽度和脉冲频率), 对于确保在生产环境中连续划线薄膜时, 对划线深度的精确和准确控制至关重要。

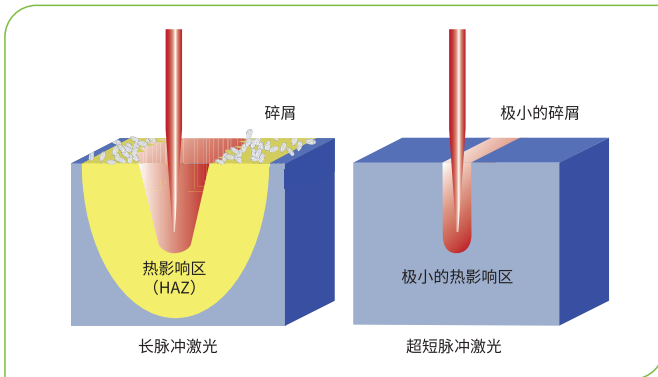


图4: 长脉冲激光器(左)与超短脉冲激光器(右)的激光脉冲宽度对加工质量的影响。

激光波长的选择

激光波长的选择将对加工质量产生巨大影响, 因为材料以特定的方式吸收不同的波长。这对于由多层(每层的厚度在微米或更小的数量级)不同的薄膜材料堆叠而成的钙钛矿太阳能电池尤为重要。表 1 中总结了钙钛矿太阳能电池中常用的材料类型, 以及用于这些材料图案化的首选激光波长。MKS Spectra-Physics 激光器能够提供表 1 中的所有波长。

光束分析

即使激光器具有优于传统工具的优势, 但激光系统仍然会随着时间的推移而衰减。衰减的一些原因包括: 激光系统内部组件的热效应, 保护玻璃上的碎屑、蒸汽和飞溅物, 以及振动或冲击。这些问题可能会以多种方式影响激光器的性能。首先, 输出功率可能会降低, 导致激光器的效率降低。另外, 可能引发的另一个问题是光束的焦点或其他轮廓的变化, 这可能导致烧蚀偏离目标、深度不够、质量降低或可能损坏材料的另一部分。

对于钙钛矿太阳能电池制造这样的精细加工, 从一开始就需要完美的激光束, 以确保最高的加工质量和最大限度地减少碎屑的产生。因此, 使用优质的计量仪器(如 Ophir® 功率传感器、功率计和光束分析仪)频繁地监测激光束至关重要, 这些仪器可以在激光器的输出波长下运行, 同时也能承受激光器的最大输出功率。此外, 这种监测必须快速完成, 以确保高吞吐量。

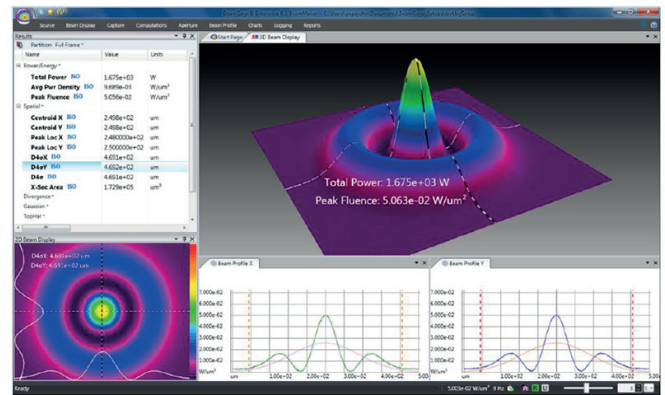


图5: 光束分析图形用户界面。

太阳能电池板材	示例材料	优选激光波长
光吸收活性层	Perovskite	紫外或者绿光
空穴传输层	Spiro-MeOTAD, NiO _x	紫外或者绿光
电子传输层	TiO ₂ , ZnO	紫外或者绿光
顶部电极/背面接触	Ag, Pt, Au	紫外或者绿光
玻璃表面涂层	Indium tin oxide (ITO), fluorine-doped tin oxide (FTO)	红外

MKS 用于钙钛矿太阳能电池制造的产品

MKS 提供许多产品,可广泛用于钙钛矿太阳能电池制造中。

皮秒激光器



Spectra-Physics IceFyre 皮秒激光器, 为皮秒微加工设立了新标准, 并且能够为钙钛矿太阳能电池的图案化提供最终解决方案。其紫外、绿光和红外版本的输出功率高达 50 W, 典型的超短脉冲宽度小于 15 ps, IceFyre 可以实现快速烧蚀, 且 HAZ 可以忽略不计。此外, IceFyre 的独特设计使其具备了光纤激光器的灵活性以及 Spectra-Physics 独家的功率放大器能力, 以实现 TimeShift 可编程脉冲串模式, 用于最快、最高质量的加工。基于 Spectra-Physics 的 *It's in the Box* 设计, IceFyre 将激光器和控制器集成在一个紧凑的封装中, 能够提供 24/7 的工业可靠性。

- 输出功率 >50 W
- <15 ps 的典型脉宽
- 紫外、绿光和红外波长
- 专有的 Time Shift 可编程脉冲串技术, 实现前所未有的脉冲控制

飞秒激光器



Spectra-Physics 的 IceFyre FS 激光器, 是 24/7 全天候工业微加工的一次非凡飞跃, 它提供了优异的性能、多功能性和可靠性。它是实现关键材料高产量、高质量微加工的理想选择, 这些材料包括钙钛矿太阳能电池中使用的材料。高达 50 W 的紫外功率或高达 200 W 的红外功率, 小于 500 fs 的典型超短脉冲宽度, 使得 IceFyre FS 能够提供最高质量的激光刻图, 以及比皮秒激光器更小的热影响区。IceFyre FS 激光器也包括了我们专有的 TimeShift 可编辑脉冲串技术, 用于最全面的脉冲控制。基于 Spectra-Physics 的 *It's in the Box* 设计, IceFyre FS 将激光器和控制器集成在一个紧凑的封装中, 旨在提供 24/7 的工业可靠性。

- 输出功率 >200 W (IR) 和 >50 W (UV)
- <500 fs 的典型脉宽
- 脉冲重复率范围: 单脉冲至 50 MHz
- 专有的 Time Shift 可编程脉冲串技术, 实现前所未有的脉冲控制

高功率紫外纳秒激光器



如果处理速度是优先考虑因素, 则可以考虑选用 Talon® Ace 高功率纳秒紫外激光器。该激光器提供 >100 W 的紫外输出功率, 在同类产品中具有低的拥有成本和使用成本。如同 IceFyre 系列一样, Talon Ace 激光器也采用我们专有的 TimeShift 可编程脉冲技术, 实现全面的脉冲控制。Talon Ace 能够以恒定的重复频率产生 50 ns 及以上的脉冲宽度, 或者用户能够在单发脉冲到 5 MHz 的不同重复频率下, 保持恒定的脉冲宽度。这将实现更有效的材料去除或修复, 并且热影响区非常小。Talon Ace 将激光器和控制器集成在一个紧凑的封装中, 旨在提供 24/7 的工业可靠性。

- >100 W 的紫外功率
- 可编程脉冲宽度从 50 ns 开始
- 脉冲重复率范围: 单脉冲至 50 MHz
- 专有的 Time Shift 可编程脉冲技术, 实现前所未有的脉冲控制

DPSS 调 Q 激光器



另一种提供快速加工性能的激光器是 Spectra-Physics Talon 半导体泵浦固态 (DPSS) 调 Q 激光器系列。Talon 可产生高达 45 W 的紫外输出或 70 W 的绿光输出, 脉冲宽度为 ns 级, 非常适合在钙钛矿太阳能电池堆叠中图案化所有材料 (玻璃表面的涂层除外)。所有的 Talon 激光器均采用我们专有的 *E-Pulse* 技术, 该技术能在较宽的重复频率范围内, 保持脉冲能量和脉冲宽度恒定, 以确保出色的过程控制。基于 Spectra-Physics *It's in the Box* 的设计, Talon 将激光器和控制器集成在一个紧凑的封装中, 其坚固的工业设计可以提供 24/7 精密制造工具所必备的性能。

- 功率高达 >45 W (紫外) 和 >70 W (绿光)
- ns 级典型脉宽
- 重复频率: 0~500 kHz 或 0~700 kHz
- 专有的 *E-Pulse* 技术, 实现卓越的过程控制

紧凑型 DPSS 调 Q 激光器



对于空间受限的应用, 则 Spectra-Physics Explorer One 紧凑型 DPSS 调 Q 纳秒激光器是理想选择。紫外型号的输出功率从 60 mW 开始, 绿光型号的输出功率从 2 W 开始; 这样的功率水平已经足够用于许多钙钛矿太阳能电池的图案化加工。如果需要更高的功率, 可以选择 Explorer One 版本, 其紫外输出功率高达 6W, 绿光输出功率高达 5W。基于 Spectra-Physics 的 *It's in the Box* 设计, 这是同类产品中较为紧凑的激光器, 重量只有几公斤, 可以连续使用多年, 性能可靠。

- 输出功率 60 mW~6 W
- 脉冲宽度
- 紫外和绿光波长
- 同类产品中体积最紧凑

激光热功率传感器



MKS Ophir 提供全面的激光热功率传感器产品组合, 其中几种能够测量短脉冲和超短脉冲激光器 (如 IceFyre 和 IceFyre FS) 的输出功率。这些传感器具有非常高的损伤阈值, 可以承受每个脉冲所

传递的高峰值功率。Ophir 传感器和测量仪符合 ISO/IEC 17025 标准,适用于校准设备,并且可以定制并嵌入到激光系统中。

- 光谱范围: 从紫外到中红外
- 功率范围高达几百瓦
- 可定制并嵌入到激光系统中
- 几秒钟或更短的响应时间
- 各种冷却方法

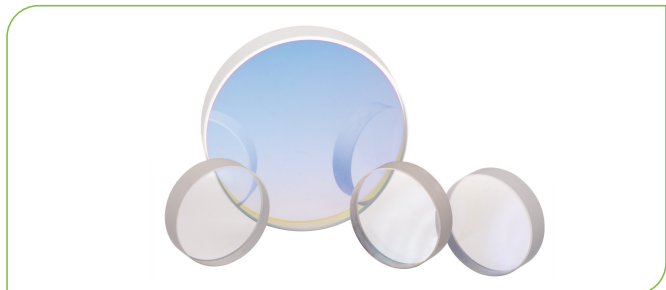
光束分析仪



光束分析仪的一种有效的方法是使用基于相机的系统。Ophir 允许以高分辨率实时观察和测量激光束的结构。基于相机的系统还可以测量激光束的横截面强度,并提供激光模式的完整二维视图。

- 光谱范围: 从紫外到中红外
- 高分辨率, 实时查看
- 高精度测量
- 用户友好的应用软件, 包括广泛的分析功能

高能激光光学元件



数十种 Newport 标准目录光学元件, 专门为高能激光器而设计, 如钙钛矿太阳能电池制造中使用的激光器。提供各种尺寸和形状的反光镜、透镜、分光镜和波片, 其基板材料和涂层针对紫外、绿光和红外波长进行了优化。这些高性能的光学元件可以承受高激光能量密度, 为钙钛矿太阳能电池制造提供多种解决方案。

- 最小损伤热剂量 (LIDT) 高达 45 J/cm^2
- 适用于紫外、绿光和红外波长的光学元件
- 针对超快激光优化的光学元件选择指南
- 反射镜、透镜、分光镜、波片

太阳能电池测试



为了确切了解太阳能电池的性能以及与其他太阳能电池的比较, 必须对其进行测试。MKS 提供 Oriel 太阳能模拟器和光伏测量系统, 长期以来它们被公认为是优异的产品。为了在实验室探索太阳辐射的效应, Oriel 太阳能模拟器提供了与太阳辐射最接近的光谱匹配, 包括适用于最苛刻应用的 AAA 级型号。与 Oriel 太阳能模拟器兼容的完整光伏 I-V 测试站, 也可用于各种 PV 电池配置的可靠、准确测量。此外, MKS 还提供完整的交钥匙型 Oriel 量子效率测量系统, 可以同时测量几乎任何光电转换器件的 EQE 和 IQE。

- AAA、ABA、ABB 和 UV 弧光灯太阳能模拟器
- AAA 级和 ABA LED 太阳能模拟器
- 用于太阳能电池效率测量的 PV I-V 测试系统
- 完整的交钥匙型的量子效率测量解决方案

为什么选择 MKS ?

关键技术

独特的技术
和出众的工艺
开发能力



值得信赖的合作伙伴

公认的引领者
为客户复杂的问题
提供创新可靠的解决方案



卓越运营

在我们业务的
所有方面
保持一致



全面组合

为我们服务的市场
提供广泛的产品和
服务解决方案



理波光电科技（无锡）有限公司

中国江苏省无锡市新吴区
综合保税区T3地块8号厂房
电话：400 799 8000
邮箱：china@mksinst.com
www.newport.com.cn

MKS Instruments, Inc.集团总部

2 Tech Drive Suite 201
Andover, MA 01810
电话：(978) 645-5500
热线电话：(800) 227-8766（美国）
www.mks.com

Newport、Ophir 和 Spectra-Physics 是 MKS Instruments Photonics Solutions 旗下的品牌。我们提供全方位的解决方案，包括用于精密工业和科研应用的激光器、激光和 LED 测量、光束分析、精密运动控制、光学平台和振动隔离系统、光子学仪器、温度传感、光机械器件和光学元件。MKS Photonics Solutions 致力于增强客户在半导体、电子和封装以及特种工业市场的能力和生产力。如需了解更多信息，请访问 www.newport.com.cn，www.spectra-physics.cn，www.ophiropt.com 和 www.mksinst.com。

BR-022401 Pervoskite Brochure_05/24, © 2024 MKS Instruments, Inc. 如有更改，恕不另行通知。
MKS 产品须遵守美国出口法规。禁止违反美国法律的转移或转让。mksinst™ 和 Newport™ 是位于美国马萨诸塞州安多弗市的 MKS Instruments, Inc. 旗下商标。