

紫外飞秒脉冲与 PSO 技术结合实现高质量和高产量

超短脉冲 (USP) 激光器，尤其是飞秒激光器，能够干净利落地烧蚀材料，同时最大程度减少热效应和碎屑形成，因而成为眼科手术、医疗设备和植入物、先进微电子和平板显示器等领域中众多精密应用的理想光源。为了在提高产量的同时保持出色质量，无论何种应用，都迫切需要更高的功率、更短的波长和更先进的技术。为应对这一需求，MKS Spectra-Physics® 推出 IceFyre® FS UV50 激光器，可在 1.25 MHz 的重复频率下提供 50 W 紫外线 (UV) 波长的飞秒脉冲输出。

在较高的功率水平和脉冲频率下，要想在保持飞秒脉冲特有的低热影响区 (HAZ) 的同时实现高产量可能相当困难。要做到这一点，对于给定轨迹，光束扫描速度应尽可能快，同时工件上的激光脉冲间距应均匀，以确保加工均匀度。扫描振镜很常用，因为它们的加速度极高，能够在较长较直的线段上达到每秒几十米的速度。然而，随着几何形状弯曲和/或改变方向，扫描速度可能会大大减慢。

为了在保持加工质量的同时最大限度提高产量，激光源输出脉冲的频率必须可控并且与轨迹速度成比例变化，同时脉冲能量和光束参数保持不变。有一种能力可以发出能在任意时间点上触发的稳定一致脉冲，一般称为按需脉冲 (POD)。这种能力对于控制激光器的脉冲频率以保持这些脉冲在移动工件（或来自移动光束）上处于理想位置等工作是必要的，这类技术通常称为位置同步输出 (PSO)。PSO 既需要一套运动控制系统以与轨迹速度成比例的频率产生

电触发脉冲，又需要一个能够接受这种信号的激光源，以“按需”的方式提供稳定的光脉冲。图 1 以由低速圆角和高速直线段组成的轨迹为例，说明了 PSO 的原理。

结合多轴线性位移台运动和高速振镜，PSO 展现优异的性能，实现高产量。配用线性位移台后，PSO 的优势是整条轨迹的速度不必受限于圆角的速度。而对于振镜加工，优势是触发激光脉冲不需要将反射镜加速到最大速度。

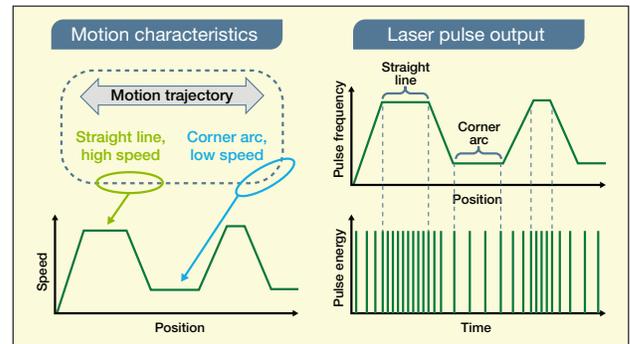


图 1. PSO 控制可使恒定能量激光脉冲在材料上沿整条变速轨迹（例如圆角矩形）保持恒定间距。

在运动控制方面，PSO 的性能优势在线性位移台系统中相对成熟，扩展到振镜扫描仪是最近的事。然而，与 PSO 兼容的先进激光技术却不那么完善，特别是在较短波长下工作的飞秒激光器。传统超快激光器的 MOPA（振荡器加功率放大器）结构对实现 PSO 操作需要的脉冲输出同步提出了挑战。这是由于系统的脉冲选择性质，即由自由

运行的振荡器定义一个基础频率，从中选择并放大脉冲。受到这种固定频率振荡器的影响，不可避免地会产生时间抖动，即请求（“触发”）脉冲和发射脉冲之间时间延迟的变化，这会导致脉冲在工件上出现空间定位误差（“空间抖动”）。即使采用先进的技术，例如将所选脉冲从默认位置转移到邻近脉冲以便最好地匹配到轨迹上所需的位置，结果仍然可能不尽人意。就其本质而言，传统的 USP 激光器结构可以在位置精度受限的前提下保持脉冲能量稳定，或者在降低脉冲能量稳定性的前提下改善脉冲位置，但两者不能兼得。不过，激光技术的进步已经在很大程度上克服了这个问题。现在，某些激光器设计架构能够在任意频率下进行脉冲生成、放大和谐波（波长）转换，同时保持良好的脉冲能量稳定性和光束质量。这样就能实现 POD 能力。

IceFyre FS UV50 激光器就具备 POD 能力，可“按需”提供能量和光束参数不变的脉冲。为了证明 PSO 能力的优势，MKS 的应用工程师进行了一系列实验，使用激光器与针对 PSO 操作配置的高速双轴振镜扫描系统配合。

图 2 所示为扫描速度为 1 m/s、5 m/s、10 m/s 和 15 m/s 时，使用 (a) 常规自由运行方法、(b) Skywriting 技术和 (c) PSO 方法处理的一系列 1×1 mm 方块一角的显微镜图像。

在常规方法和 Skywriting 方法中，针对每个速度对激光 PRF（脉冲重复频率）进行调整，以保持 25 μm 的恒定脉冲间距。在 PSO 方法中，则通过对控制软件进行编程来保持脉冲间距为 25 μm 且整个轨迹上的脉冲能量始终一致，不受实际速度影响。

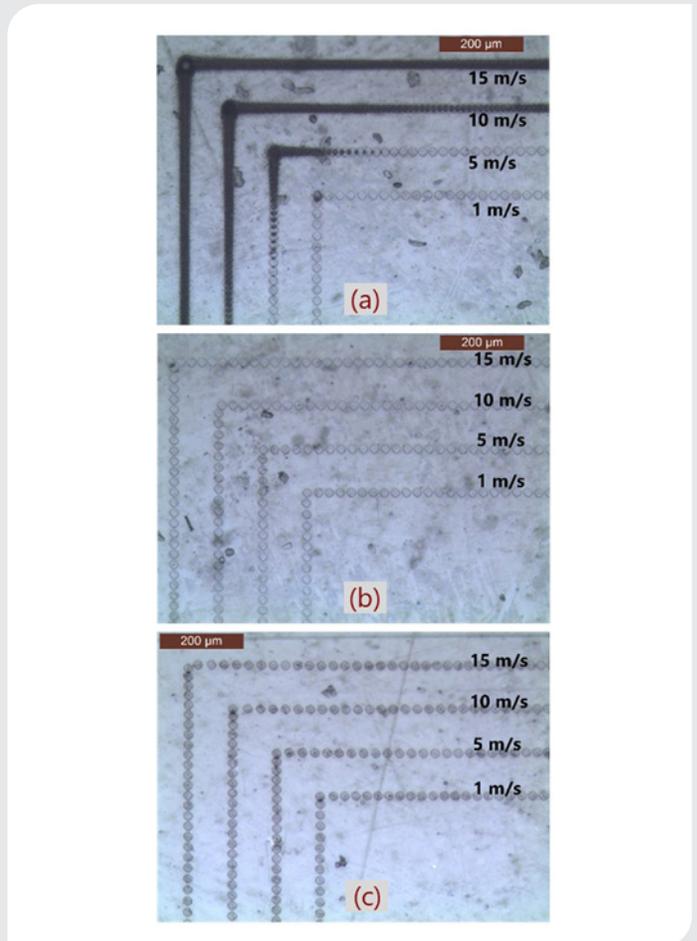


图 2. 采用了 (a) 自由运行、(b) Skywriting 和 (c) PSO 技术，使用超快紫外激光器加工的 1×1 mm 方形一角的显微镜图像。

结果总结如下：

- 图 2(a)：显示使用自由运行方法时，扫描仪反射镜加速和减速的边角处光斑间距更密。因此，使用这种技术加工会导致光斑间距不均匀，从而产生热效应，降低加工质量。对于许多应用而言，这种边角质量完全不能接受，而且这个过程必须以大约 1 m/s 的低扫描速度执行，远远低于激光器和扫描仪的能力。
- 图 2(b)：所示为使用 Skywriting 技术产生的结果，从质量的角度来看可以接受。然而，在 skywriting 技术中，会在轨迹路径里增加引入和引出线段，在这些线段里激光会关闭，直到振镜达到对应的目标速度。因此，尽管能够实现光斑间距的均匀度和总体质量目标，但需要更长时间来完成轨迹，从而导致产量降低。
- 图 2(c)：最后，通过实施 PSO，在所有速度下均可保持光斑间距和脉冲能量不变，从而获得出色的质量和高产量。

高质量金属雕刻是 USP 激光器为人所熟知的一项应用。然而，如果希望使用现有的高功率激光源实现优异质量和产量，就需要 PSO 的性能优势。为证明这一点，使用上述三种加工技术（自由运行、Skywriting 和 PSO），在不锈钢上雕刻 $1 \times 1 \text{ mm}^2$ 方形，扫描器运行速度为 7.5 m/s。将参数调整为使光斑间重叠和交叉线重叠均为 50%。使用 3D 共聚焦显微镜对激光铣削的特征进行分析，结果如图 3 所示。

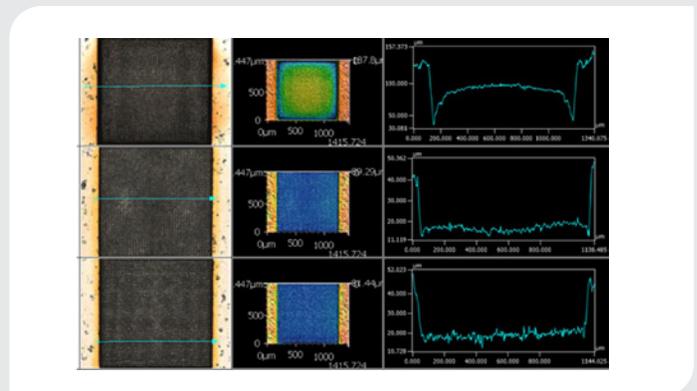


图 3. 使用自由运行（上）、Skywriting（中）和 PSO（下）技术进行不锈钢雕刻的 3D 共聚焦图像和分析。

使用传统自由运行技术时，由于扫描仪运动中重复加速和减速阶段的重叠率高，图案边缘雕刻过度。使用 Skywriting 和速度触发技术得到的结果质量接近。不过，使用 PSO 的加工速度明显快于 Skywriting (>40%)，展示出这项技术的明显优势。

更高的激光功率自然会带来更高的加工产量，但配套设备必须满足任务要求。高速振镜扫描仪和精密运动位移台提供的能力可以在激光脉冲与加工工件的轨迹之间实现精确的时空同步。IceFyre FS UV50 激光器的紫外波长和飞秒脉冲宽度与先进的 PSO 脉冲控制技术结合时同样能实现出色加工质量，同时还可以最大程度提高产量。

产品

产品：IceFyre FS UV50 与 IR200 激光器

IceFyre FS UV50 是当前市场性能最高的紫外飞秒激光器，提供 >50 W 紫外输出功率、>50 μJ 脉冲能量，并在高达 3 MHz 的重复频率下保持 <500 fs 脉宽。IceFyre FS IR200 在红外波段实现高平均功率 (>200 W) 与高脉冲能量 (>200 μJ)，并提供从单发到 50 MHz 的宽重复频率范围。高平均功率 (>200 W) 与高脉冲能量 (>200 μJ) 结合高达 50 MHz 的重复频率，使飞秒微加工应用在保持最低使用成本的同时达到最高吞吐量。

IceFyre FS 平台为获得最佳工艺性能提供了卓越的灵活性。该平台提供灵活的脉冲串模式操作，可调重复

频率、按需触发 (POD)、位置同步触发 (PSO)，以及 TimeShift 可编程脉冲能力，以实现灵活的脉冲串模式操作。

基于 MKS 深厚的经验与技术，IceFyre FS 系列激光器 (已申请专利) 通过了广泛的环境可靠性测试，以确保高可靠性和低使用成本。激光器实现全面自动化与计算机控制，并在 24/7 连续运行期间保持功率、光束参数与光束指向的卓越稳定性，从而满足严格应用中的高精度与高重复性要求。

	IceFyre FS UV50	IceFyre FS IR200
波长	343 \pm 2 nm	1030 \pm 6 nm
输出功率	>50 W (@1 MHz 与 1.25 MHz)	>200 W (@1-50 MHz)
最大脉冲能量	>50 μJ (@1 MHz)	>200 μJ (@1 MHz)
重复频率范围	单发至 3 MHz	单发至 50 MHz
脉宽 (FWHM)	<500 fs	
脉冲间能量稳定性	<2% rms	
功率稳定性 (预热后)	8 小时内 <1% rms	
空间模式	TEM ₀₀ ($M^2 < 1.3$)	
偏振	垂直, >100:1	
出射光斑直径	5.0 mm \pm 0.5 mm	4.0 mm \pm 0.5 mm
光束发散角 (全角)	<0.20 mrad	<1.0 mrad