

采用 ICEFYRE® FS IR200 飞秒激光脉冲串模式 增强聚晶金刚石（PCD）消融效果

在我们此前关于利用飞秒激光对聚晶金刚石（PCD）进行微加工的研究中（参见 Application Focus 50: 《使用飞秒脉冲串加工聚晶金刚石》），我们展示了利用 Spectra-Physics® Spirit 1030-100 激光系统进行脉冲串模式（burst-mode）操作的优势。这些结果表明，将单个高能脉冲分裂成脉冲串包中的多个低能量脉冲，可以在保持优异加工质量的同时显著提升材料去除速率。具体而言，与单脉冲操作相比，使用 9 个子脉冲的脉冲串时，材料烧蚀速率提高了两倍，这凸显了脉冲串模式在超硬材料加工中的高效率。



图 1. Spectra-Physics IceFyre FS IR200 高能工业飞秒激光器。

基于这些发现，我们进一步开展研究，以评估新一代 Spectra-Physics IceFyre FS IR200 激光器（见图 1）的性能，这是一个提供更高平均功率、从而适用于工业应用高通量加工的下一代飞秒系统。该激光器在

1030 nm 波长下提供 >200 μJ 脉冲能量、>200 W 平均功率以及 <500 fs 脉宽，并具备 TimeShift™ 脉冲串模式操作功能，使其非常适用于高通量的精密材料加工应用。

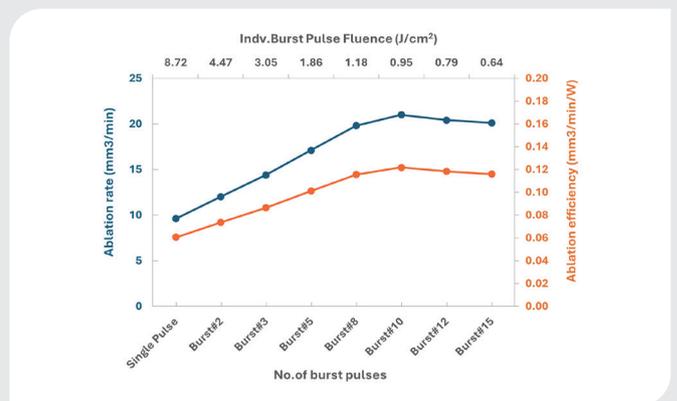


图 2. 使用 IceFyre FS IR200 激光器实现的材料去除速率，展示了相较于单脉冲操作，脉冲串模式带来的性能提升。

我们在与前期研究相同的实验条件下，对 IceFyre FS IR200 激光器实现的体积烧蚀速率进行了表征。新的结果汇总见图 2，显示其材料去除峰值速率超过 $21 \text{ mm}^3/\text{min}$ ，相比上一代激光系统显著提升了加工通量。数据明确显示，即使在更高功率水平下，脉冲串模式仍能大幅提升烧蚀效率。与之前研究一致，我们再次观察到：使用 10 个子脉冲的脉冲串相比单脉冲，其烧蚀速率约提升两倍。

脉冲串能量密度 (burst-fluence) 优化方法再次展现出价值：通过增加子脉冲数量，而非降低入射（单）脉冲能量，即可找到工艺所需的最佳能量密度。通过有效管理每个脉冲串内的能量分布，可在工件上维持最佳能量密度，从而在不损害表面完整性、且无热效应的情况下实现更高的材料去除率。由此获得的高质量与大体积烧蚀效果，如图 3 的数码相机微距照片所示。

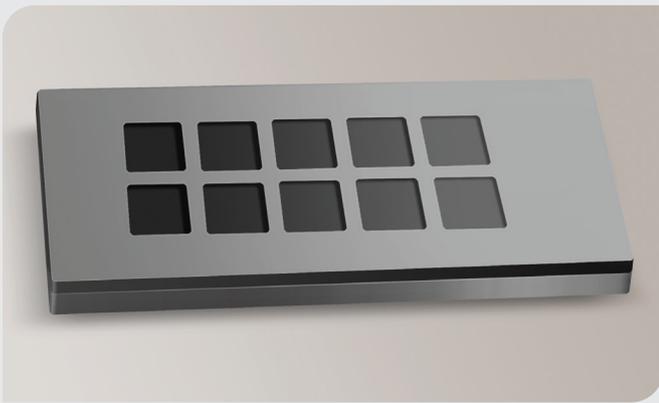


图 3. 使用 IceFyre FS IR200 激光加工形成的 PCD 槽结构。

此外，在无需调整焦点尺寸或脉冲重复频率的前提下，既能使用激光器全部平均功率，又能精准定位理想加工能量密度，这一能力对缩短工艺开发时间、提高工艺稳定性具有重要价值。

总而言之，IceFyre FS IR200 的高平均功率与优化后的脉冲串模式使其实现了超过 $21 \text{ mm}^3/\text{min}$ 的卓越材料去除率，进一步验证了脉冲串策略作为下一代超硬材料超快微加工关键技术价值。

因此，脉冲串模式在显著提高烧蚀效率的同时，每个子脉冲所需能量却更低。这一结果支持这样的观点：将高能量脉冲分裂成更小、更易管理的子脉冲，可使超短脉冲脉冲串加工实现更可控、更高效的能量传递。

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