

## 紫外纳秒与红外飞秒激光技术 烧蚀碳化硅的效率对比

碳化硅 (SiC) 在电动汽车 (EV) 系统、电力电子和清洁能源领域的应用持续增长。这主要归功于 SiC 材料卓越的导热性和宽禁带特性, 使得由该材料制成的器件能够承受更高的温度、提供更快的开关速度并以更高的效率运行。

SiC 的另一个特性是高机械硬度, 这对于传统的机械加工方法构成了一项挑战。

激光加工能够为 SiC 加工提供可行的解决方案。与任何材料的激光加工一样, 激光加工 SiC 必须仔细考虑 SiC 的独特性质以及其对划线、切割和一般烧蚀等激光工艺所带来的挑战。因此, 需要仔细且深得要领的工艺优化以获得最佳加工效果。

关键的第一步, 是研究材料在不同能量密度下的烧蚀速率和效率。这些参数代表了特定激光技术对给定材料的基本去除能力。因此, 比较不同激光器之间的这些参数, 将有助于为特定的工艺和应用确定最佳激光类型。

本篇应用笔记介绍了使用两种不同的激光平台——紫外 (UV) 纳秒脉冲 (ns) 激光器和红外 (IR) 飞秒脉冲 (fs) 激光器, 对 SiC 进行烧蚀的效率对比。我们探讨了能量密度、脉冲宽度和脉冲串定制如何影响烧蚀效率和去除速率, 为选择最适合精密 SiC 加工的激光器提供了有价值的指导。

### UV 纳秒激光烧蚀

测试了使用两种不同的 ns UV 激光器烧蚀 4H 晶体 SiC。一种激光器是 MKS Spectra-Physics® Talon® UV 15, 这是一款传统的二极管泵浦固体 (DPSS) 调 Q 激光器, 输出约 20 ns 的脉冲。另一种是 MKS Spectra-Physics Talon Ace™ UV 100, 这是一款具有 TimeShift 脉冲定制功能的混合光纤激光器, 可以编程输出持续时间从 2 ns 到 50 ns 的单脉冲以及脉冲串。

在所有情况下, 均采用使用二维扫描振镜的凹槽铣削方法。扫描速度保持在 2~4 m/s 之间, 光斑重叠率约为 60%, 所有实验均在 50 kHz 重复频率下进行。测试了三种不同的脉冲配置: 20 ns 单脉冲 (Talon)、2 ns 单脉冲 (Talon Ace) 和 5x2 ns 脉冲串 (Talon Ace)。

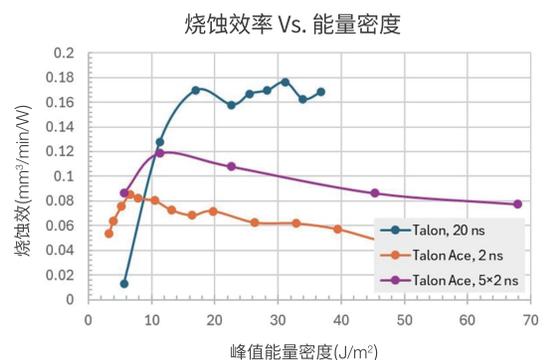


图 1: 使用不同的 ns UV 脉冲对 SiC 进行烧蚀, 烧蚀效率和最佳能量密度存在明显差异。

图 1 总结了 UV 激光测试的结果，显示了烧蚀效率（单位时间、每瓦激光功率去除的材料量）与峰值能量密度之间的函数关系。该数据在本质上揭示了激光能量消耗有效去除材料的能力，通常称为比烧蚀速率。

最长的脉冲（在本例中为 20 ns）提供了最高的烧蚀效率，并且能在较高的能量密度水平下保持该效率。这一结果可能反映了激光与材料之间更长的相互作用时间，而这会产生一些有利于材料去除的热量。

2 ns 脉冲表现出较低的峰值烧蚀效率，其所需要的能量密度也明显更低。这在热管理至关重要的应用中，应该能提供一定的性能（质量）优势，因为它不太可能引起材料的整体加热。

使用 5×2 ns 脉冲串模式烧蚀，在最大烧蚀效率和相应的能量密度这两个极端之间，取得了平衡。这表明，在需要的情况下，使用（可变的）脉冲串和单脉冲输出，可以调节烧蚀吞吐量和热负荷。

## 红外飞秒激光烧蚀

使用 MKS Spectra-Physics IceFyre® FS IR200 激光器进行超短脉冲（USP）烧蚀加工。该激光器输出小于 500 fs 的脉冲，输出功率超过 200 W，重复频率范围从单脉冲到 50 MHz。该激光器具备 Spectra Physics TimeShift 可编程脉冲功能，可以实现高度灵活的脉冲串操作模式。

激光束以 5 m/s 的速度扫描，略快于 UV 实验中使用的速度。然而，IceFyre FS IR 200 激光器更高的脉冲重复频率（1 MHz）导致了更大的光斑重叠率——约为 90%，而 ns 测试中的重叠率为 60%。

这种高重叠率是有意而为的。由于超短脉冲的能量沉积非常快，它们不会在材料中产生明显的热

量积聚。因此，可以使用高重叠率而不会引入熔化或其他热损伤；更高的重叠意味着去除一定量的材料所需要的扫描次数更少，从而能够减少在加速 / 减速周期中所浪费的时间。

图 2 显示了 IR USP 激光器的烧蚀效率（橙色曲线）和烧蚀速率（蓝色曲线），它们随着脉冲串中脉冲数量的增加而变化。在所有测试中，平均激光功率约为 200 W。为了确定最佳能量密度，只需增加脉冲串中的脉冲数量（从而降低每个脉冲的能量），而不是调节整体平均功率。



图 2: 使用越来越大的脉冲串可以优化烧蚀效率，这会降低施加到材料上的单个脉冲的能量密度。

图 2 中的数据显示了脉冲串操作的明显优势。从单脉冲操作开始，直到脉冲串中的子脉冲数量增加到 15 个，烧蚀效率呈现出稳步提高，然后基本趋于平稳。此时，该工艺在子脉冲能量密度仅为 0.4~0.6 J/cm² 时，达到约 0.27 mm³/min/W 的最大烧蚀效率。

值得注意的是，单脉冲烧蚀效率在大约 9 J/cm² 的能量密度下，约为 0.12 mm³/min/W。在先前调整平均功率的单脉冲烧蚀速率研究中，在 1~2 J/cm² 的能量密度下，获得了 0.12 mm³/min/W 的最大烧蚀效率。这仍然远高于脉冲串模式下发现的大约 0.5 J/cm² 的最佳能量密度。

因此，脉冲串模式将烧蚀效率提高了一倍以上，并且每个脉冲使用的能量要少得多。这支持了这样的观点：USP 脉冲串加工通过将高能量脉冲分成更小、更易于管理的子脉冲，实现了更可控、更高效的能量利用。从更广泛的角度来看，该数据也证明了脉冲串能量密度优化技术的优势，它提供了一种简单直接的快速工艺优化方法。

## 质量

对于本研究中的所有激光器，加工质量都非常出色。所加工的大型凹槽铣削特征均显示出光滑的加工底面，没有熔化、裂纹或其他不规则现象。在重叠率较低的 ns 特征组中，单个烧蚀坑清晰可辨；而对于重叠率较高的 USP 特征中，光滑连续的烧蚀线条显而易见。

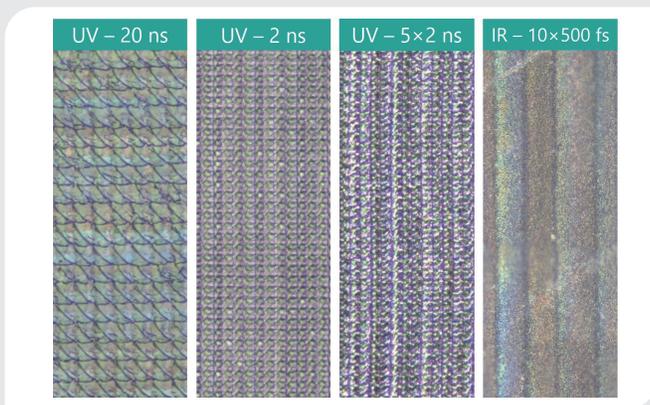


图 3：测试的所有激光输出类型在各自最佳能量密度下加工的工件表面，均展现出优异的表面质量。

## 比较和结论

这里展示的烧蚀效率结果提供了有价值的见解，但它们只说明了部分情况。这是因为实际的材料去除速率，是（烧蚀效率）×（平均功率）的乘积，这意味着使用效率较低、但功率更高的激光器，可以

实现更高的材料去除速率。因此，在为特定应用选择光源时，必须考虑每种激光器类型可用的最大功率。表 1 基于输出功率，总结了 MKS Spectra-Physics 提供的部分激光器实际能够实现的真实最大去除速率。这些产品是当前市售的纳秒 UV 激光器和飞秒 IR 激光器的代表产品。

激光器	脉冲输出	最大功率 (W)	最大效率 (mm <sup>3</sup> /min/W)	最大烧蚀速率 (mm <sup>3</sup> /min)
Talon UV45	20 ns	45	0.17	7.65
Talon Ace UV100	2 ns	100	0.085	8.5
Talon Ace UV100	5×2 ns burst	100	0.12	12
IceFyre FS IR200	500 fs	200	0.12	24
IceFyre FS IR200	25×500 fs burst	200	0.28	56

表 1：各激光平台在使用最大可用平均功率时，能够实现的真实烧蚀速率。

表 1 揭示了这些实际激光源在整体工艺效率方面的排名。例如，虽然 Talon UV 15 (20 ns) 在 UV 激光测试中表现出最高的烧蚀效率，但该平台可用的相对较低的最大功率 (45 W, Talon UV 45)，将去除速率限制在约 7.65 mm<sup>3</sup>/min。然而，Talon Ace 在 100 W 功率下运行时，去除速率可以达到约 12 mm<sup>3</sup>/min——尽管其效率较低。同时，IR 飞秒 IceFyre 系统在约 200 W 功率下运行，可提供高达 56 mm<sup>3</sup>/min 的去除速率，这反映了其高功率和卓越的脉冲串模式下的烧蚀效率。

然而，表 1 中并未详细说明另一个实际的工艺因素——热影响区 (HAZ)。虽然所有激光器都表现良好（具有优异的加工表面质量、无边缘崩缺、碎屑生成最少），但使用较低的能量密度以及较短的脉冲宽度，通常会生成较小的热影响区。因此，本研究中具有较高整体烧蚀速率的激光器，由于其较短的脉冲宽度，也应该能够提供最佳的整体加工质量。

基于所有这些信息，我们可以从这项针对 SiC 烧蚀的 UV ns 和 IR fs 激光器研究中，得出以下结论：

- UV ns 激光器是可行且具有成本效益的工具，可以为许多应用提供高表面质量和足够的吞吐量。20 ns 脉冲在高能量密度下提供最佳效率。更短的脉冲（2 ns, 5x2 ns）成本更高，但减少了热量输入，因此在芯片级加工或相邻电路存在风险时具有优势。

- IR fs 激光器，尤其是脉冲串模式，能提供最高的效率、吞吐量和质量，但系统更复杂且成本更高。
- 脉冲串控制（在任何激光器中）提供了一个有价值的调谐参数，让用户无需降低平均功率或改变光斑尺寸，即可优化效率。

## 产品

### 紫外纳秒和红外飞秒激光器

#### 紫外和绿光激光器

Talon 激光器平台是一个 UV 和绿光二极管泵浦固体（DPSS）调 Q 激光器系列，可提供前所未有的性能、可靠性和成本组合。Talon 基于 Spectra-Physics 的 “It’s in the Box” 设计，激光器和控制器组合在一个紧凑的封装中。Talon 在数万小时的工作时间内表现出高脉冲串稳定性和出色的 TEM<sub>00</sub> 模式质量。Talon 激光器专为 24/7 制造环境中的微加工应用而设计，其中系统正常运行时间至关重要。

#### Ace UV100 激光器

Talon Ace UV100 是一款强大的纳秒脉冲激光器，在小尺寸封装中提供业界领先的 >100 W 的 UV 功率，具有极具吸引力的性价比。这款新型激光器提供了前所未有的灵活性，包括 TimeShift 可

编程脉冲能力和宽脉冲重复频率范围，可实现微加工工艺优化。Talon Ace UV100 是先进电子封装、印刷电路板、光伏、陶瓷、半导体以及其他材料和组件微加工中高速、高质量制造的理想选择。

#### FS UV 和 IR 飞秒激光器

IceFyre FS 系列是工业飞秒激光技术的一次超凡飞跃，提供业界领先的性能、多功能性、可靠性和拥有成本。IceFyre FS 飞秒激光器是以高吞吐量、最高质量微加工关键材料（包括玻璃、聚合物、金属、半导体、薄膜和复合材料）的理想选择，适用于要求严苛的消费电子、清洁能源、医疗设备和工业应用。基于 Spectra-Physics 的 “It’s in the Box” 设计，IceFyre FS 将激光器和控制电子设备集成为一个易于安装的封装中。

	Talon UV45	Talon Ace UV100	IceFyre FS IR200
波长	355 nm	343 nm	1030 ± 6 nm
功率	>45 W @ 150 kHz	>100 W	>200 W @ 1-50 MHz
重复频率范围	0-500 kHz	0-5.0 MHz	Single shot to 50 MHz
脉冲能量	>300 μJ	>500 μJ	>200 μJ
脉冲宽度	<35 ns @ 150 kHz	<2 to >50 ns	<500 fs
脉冲-脉冲间的能量稳定性	<2% rms @ 150 kHz <3% rms up to 300 kHz <5% rms above 300 kHz	<3%, 1σ	<2% rms