

## 使用飞秒激光器进行聚合物的高质量切割

聚合物在各种技术领域发挥着至关重要的作用。它们具有良好的机械强度和灵活性、电气绝缘以及耐热和耐化学性。特别值得注意的两种聚合物：聚酰亚胺 (PI) 和聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET)。聚酰亚胺因其机械强度和耐热/耐化学性高而闻名，在柔性印刷电路板市场中占据着主导地位，用作控制电流流动的稳定介电材料。树脂形态的 PI 也用于热固性碳纤维结构体，以及高温纤维涂层和集成电路钝化层。另一方面，PET 是一种通用的聚合物，应用范围从医疗器械到食品包装。在作为基体材料时，PET 因其出色的强度重量比和总体抗断裂性能而颇具吸引力；而在纤维形态下，它具有耐久、防水和无皱的结构。然而，PI 和 PET 这两种材料有一个共同的重要应用领域：OLED 平板显示器。相对于其他低成本聚合物，PET 具有良好的温度耐性，历来都是常用的基底材料，但也用于别处。在要求更高的应用中，PI 一流的强度、热和电气良好属性能够带来各种好处。对于这两种材料，在整个平板或 OLED 显示器中使用的厚度可从几微米的薄膜到数十微米或者更厚的薄片。随着设备和显示器变得更轻便且柔性/可折叠，总体厚度很可能会降低。

多年以来，激光器一直在诸多行业中用于加工聚合物。尽管可能难以避免熔化和形成其他热影响区 (HAZ)，但是众所周知，超短脉冲 (USP) 激光器能够经受住挑战。为了进一步了解 PI 和 PET 的 USP 加工，研究人员在我们的应用实验室使用 Spirit 100 W 高功率飞秒激光器，在红外 (IR) 基波 (1030 nm) 和绿光二次谐波 (515 nm) 波长 (50 W 平均功率) 下进行了全面的烧蚀现象研究。研究包括确定单脉冲和多脉冲照射的烧蚀阈值 (包括确定所谓的“累积

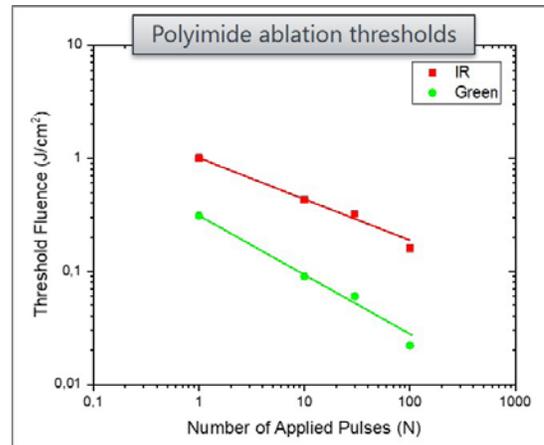


图 1：聚酰亚胺的单脉冲和多脉冲烧蚀阈值。

系数”），以及应用此信息来开发并优化采用单次和多次方法的全切割工艺。我们使用两种波长  $\sim 17 \mu\text{m}$  ( $1/e^2$  直径) 的焦点光斑大小，确定了 1-100 个脉冲的固定光束（冲击）照射的阈值。用于确定和分析单脉冲及多脉冲阈值的方法分别来自 Liu<sup>1</sup> 和 Jee 等人<sup>2</sup>。为了区分任何阈值对热积聚的依赖性，我们还在各种脉冲重复频率 (PRF) 下进行了试验，从 1 kHz 到 2 MHz。实验中使用的样品是从 Creative Global Services Inc. (加拿大安大略省纽马基特) 采购的各种厚度的 PI 和 PET 薄片。图 1 中标绘了在 Spirit 激光器的 1 MHz 标称 PRF 下，1-100 个红外和绿光波长脉冲的 PI 烧蚀阈值。

对于两种波长，我们发现，随着施加的脉冲数量增加，烧蚀阈值急剧下降。这是激光材料加工中的一种已知现象，原因是由较低能量脉冲形成的材料缺陷。在单脉冲烧蚀研究中，此类缺陷通常不是可见的对材料的真实“损伤”，但是它们确实会细微地修改材料，以至于后续同样（低）能量的脉冲能够造成损伤，即可检测的烧蚀特征。阈值下降的幅度与施加的脉冲数量以累积系数为特征，更低的值对应于更急剧的阈值下降。下表 1 总结了 Spirit 激光器在两种波长下的 PI 和 PET 的阈值和累积系数。

Ablation Threshold Fluence- $F_{th}(N)$ -(J/cm <sup>2</sup> )	N=1	N=10	N=30	N=100	Incubation Coefficient (S)
Polyimide- IR	1.00	0.43	0.32	0.16	0.63±0.02
Polyimide - Green	0.31	0.09	0.06	0.022	0.47±0.02
PET - IR	1.09	0.40	0.32	0.16	0.60±0.02
PET - Green	0.73	0.04	0.02	0.008	0.32±0.06

表 1: 不同波长和照射脉冲下的 PI 和 PET 的阈值摘要。

我们发现，与红外波长相比，绿光波长在脉冲数量增加时的阈值下降幅度更大，特别是在 PET 的情况下，从 1 到

100 个脉冲时，阈值下降了 9 倍。同样值得注意的是，对于所有脉冲，两种材料的红外阈值都非常相似。

考虑到聚合物的隔热性，我们可以想像（甚至预计）到，在更高的 PRF 下，脉冲之间的热积聚可能会有效地降低多脉冲烧蚀阈值。为了检验这一点，我们在 1 kHz 到 2MHz 的 PRF 下确定了 30 个脉冲照射的阈值，聚酰亚胺的结果如图 2 所示。

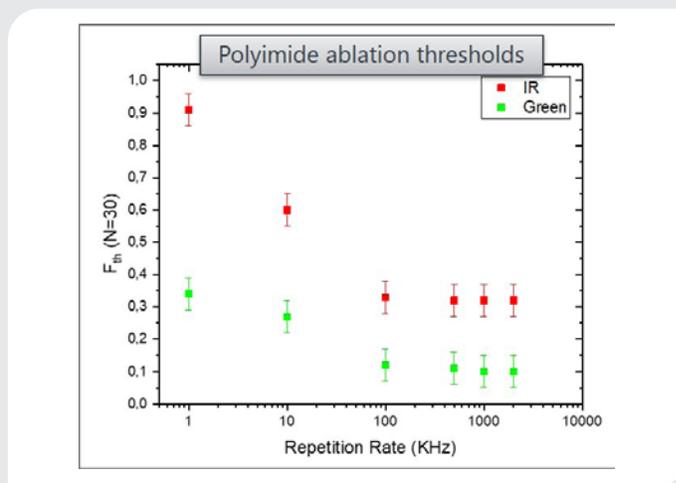


图 2: 施加 30 个脉冲时聚酰亚胺的阈值下降取决于 PRF。

数据表明，将激光 PRF 从 1 kHz 增加到 100 kHz，会显著降低阈值，而 100 kHz 以后的阈值相对保持不变。值得注意的是，我们没有观察任何阈值增加的情况，而如果存在与等离子体和/或碎片屏蔽激光脉冲相关的问题，可能会发生这样的情况。众所周知，某些材料会发生这种现象，妨碍通过更高的 PRF 按比例扩展产量。因此，从这个角度来看，在 Spirit 提供最高输出功率的极高 PRF 下进行加工，不会有任何不利后果。在确定各种脉冲照射和频率的烧蚀阈值行为之后，我们为两种波长开发了 75 和 125  $\mu\text{m}$  厚

Cutting Speed (mm/s) (2 MHz PRF)	75 $\mu\text{m}$ (3 mil)		125 $\mu\text{m}$ (5 mil)	
	Single-pass cutting	Multi-pass cutting	Single-pass cutting	Multi-pass cutting
Polyimide – IR, 70 W	540	400	390	363
Polyimide – Green, 42 W	540	363	420	307
PET – IR, 70 W	900	800	470	400
PET – Green, 42 W	880	666	510	363

表 2：使用 2 MHz PRF 的 Spirit 激光器实现各种切割速度。

PET 和 PI 薄膜的全切割工艺。表 2 中列出了单次和多次工艺在 2 MHz PRF 下的切割速度。

我们可以在数据中观察到各种趋势。例如，所有材料、波长和厚度的单次切割速度都高于多次切割。至于波长的影响，红外波长在所有多次切割场景中都比绿光波长要快，而绿光波长在单次切割中与红外波长的速度相同或者更快。考虑到红外波长的平均功率显著高于绿光波长，在所有情况下，更短的波长在每单位功率产量（即 mm/s/W）方面效率更高。

尽管单次切割的速度更快，但是通过多次切割的更低脉冲重叠，可以更全面地实现最高质量 USP 加工的优势。图 3



图 3：使用红外和绿光波长进行 125  $\mu\text{m}$  厚 PI 多次切割的出色质量和最小 HAZ。

是 125  $\mu\text{m}$  厚 PI 切口的显微镜照片，红外和绿光波长的出色质量显而易见。

两种波长都几乎或者完全没有 HAZ。尽管红外波长切口在边缘上确实存在一些细小颗粒的碎片，但是轻微的加工后清洁就能轻松去除。对于绿光波长，尤其值得注意的是没有 HAZ 和碎片。这也给绿光波长的更窄切口带来了更多好处，在某些应用中可能很重要。对于 PET 的多次切割，我们发现了相似但不相同的结果（图 4）。

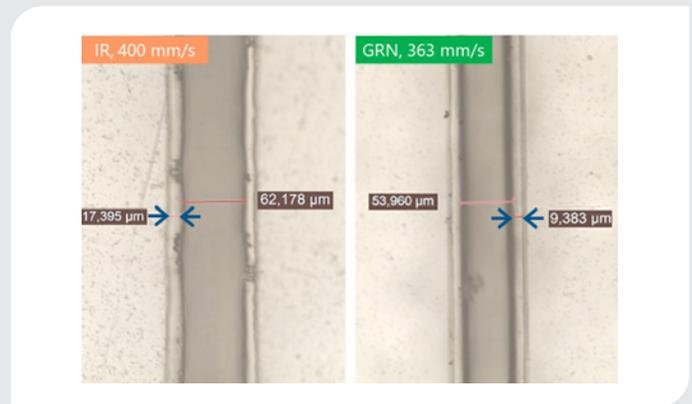


图 4：125  $\mu\text{m}$  厚 PET 多次切割的红外与绿光波长对比照片。

一个关键的观察结果是，切口边缘存在细微的膨胀，绿光和红外波长都有，很可能是因为 PET 的软化/熔化温度比 PI 低得多。这种熔化效应导致红外与绿光波长之间的质量差异不如 PI 那样显著。然而，绿光波长加工仍然具有更少残留碎片的优势。

从医疗器械到 OLED 显示器，PET 和 PI 薄膜在关键的应用中发挥着越来越重要的作用。本文中列出的烧蚀阈值数据描绘了在使用红外或绿光波长、高或低脉冲照射以及低到高 PRF 进行加工时，预期的加工优势和/或权衡的特征。在使用这些数据来得出全切割工艺时，通过 Spirit 飞秒激光器能够实现的出色质量和高产量已经得到证实。

#### 参考文献：

1. J. Liu, 1982. "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes," *Opt. Lett.* 7, 196-198.
2. Y. Jee., M. Becker., and R. Walsler., 1988. "Laser-induced damage on single-crystal metal surfaces," *J. Opt. Soc. Am. B* 5, 648-659 (1988).

## 产品

### Spirit 1030-100 和 515-50

Spirit 1030-100 和 515-50 激光器设定了高精度工业制造的飞秒激光器新标准。这些激光器提供高平均功率、高脉冲能量和高重复频率，实现更高产量。客户得益于工业上可获得的最短脉冲宽度和一流的光束质量，转而能够以最高产量在几乎不产生热影响区 (HAZ) 的情况下加工具有最高精度的复杂而挑战性的部件。Spirit 1030-100 和 515-50 为工业用途而设计，以最低的购置成本实现稳定可靠的全天候运行。

	Spirit 1030-100	Spirit 515-50
波长	1030 nm ±5 nm	515 nm ±3 nm
输出功率	>100 W	>50 W
脉冲能量	>100 μJ	>50 μJ
重复频率	1-30 MHz	
脉冲选择	使用集成式脉冲选择器 (AOM) 单次激发到 2 MHz	
脉冲宽度	<400 fs	
功率稳定性	100 小时 <1% rms	
脉冲对脉冲稳定性	<2% rms	
空间模式	TEM <sub>00</sub> (M <sup>2</sup> <1.2)	
光束直径	2.5 mm ± 0.5 mm	
发散角, 全圆角	<1 mrad	<0.5 mrad
脉冲串模式	>100 μJ/脉冲串, 最多 12 个子脉冲	不适用
前脉冲对比率	>250:1	
偏振特性	横向	
冷启动时间	<30 分钟	
热启动时间	<15 分钟	