

使用飞秒紫外激光器切割 OLED 智能手机显示屏

过去几年间，OLED（有机发光二极管）技术为显示屏行业带来了一场革命。随着这一技术的不断进步，OLED 显示屏在对比度、分辨率、色彩范围、使用寿命和电源效率方面持续取得改进，从电视和笔记本电脑到智能手机和可穿戴设备，各种设备中的现有显示技术正在迅速被取代。此外，由于轻薄、可折叠的柔性透明显示屏在市场上的占有率逐渐提升，对于新型制造工具的需求也随之水涨船高。由于 OLED 显示屏具有较高的分辨率和电路灵敏度，因此如何在几乎不形成热影响区 (HAZ) 的前提下实现窄切口宽度，成为制造商在生产此类显示屏时所面临的一个关键挑战。

OLED 显示屏可分为刚性（在玻璃基底上进行 OLED 叠层）和非刚性（在聚合物基底上进行 OLED 叠层）两种类型。重要的相关应用包括在发光 OLED 上切割出显示屏的轮廓，以及在由许多层（基底层、OLED 发光层、偏振片层、触摸传感器层和保护层）组成的完整 OLED 叠层上切割通孔。这些层大多由聚合物材料组成，最常见的是聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 和聚酰亚胺 (PI)。每一层的厚度从数 μm 到 $100 \mu\text{m}$ 不等，叠层的总厚度通常为 $300\text{--}500 \mu\text{m}$ 。有些层使用光学透明粘合剂 (OCA) 粘合在一起。由于一些层较为脆弱，用机械方式切割叠层会导致边缘损坏，并且工具的磨损也会进一步加剧这一问题。同样地，使用脉冲宽度较大的激光器切割会形成较大的 HAZ 或引发其他质量问题。此外，由于叠层内的各个层具有不同的光学特性，使用红外或绿光激光器进行切割——即使是在超短脉冲 (USP) 宽度范围内——也会带来问题。

考虑到 USP 和短波紫外线各自的特点，我们认为将两者结合起来，可能是切割这些薄膜的理想方案。除了与超短脉冲持续时间相关的低 HAZ 优势之外，紫外激光器的短波长可以使脉冲更易于被叠层中的各种材料所吸收，并且由于焦点光斑较小，可以实现更平滑的切割和更窄的切割宽度。此外，聚焦紫外光束的发散角比较小，这有助于切割更厚的 OLED 叠层，同时无需通过增加切割次数来拓宽切口。

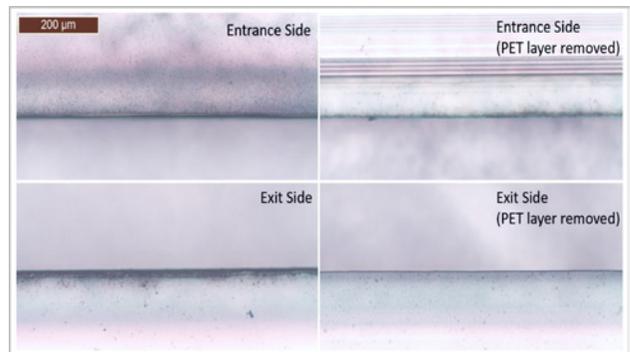


图 1. 使用 Spectra-Physics IceFyre FS UV50 飞秒激光器在多次加工模式下切割而成的 OLED 薄膜叠层（约 $375 \mu\text{m}$ 厚）的显微镜图像，实现约 133 mm/s 的净（有效）切割速度。

为了验证使用飞秒紫外激光器切割 OLED 薄膜的优势，MKS 工业应用实验室的工程师演示了使用 Spectra-Physics IceFyre® FS UV50 高功率飞秒紫外激光器切割厚度约为 $375 \mu\text{m}$ 的 6 英寸非刚性 OLED 手机显示屏。测试中使用的 OLED 材料是预切面板形式的完整显示屏，两面均有 PET 保护层，因此可以像制造移动设备那样，在预定的切

割路径中执行测试。图 1 所示的切口显微镜图像展示了出色的表面质量。

在多次加工切割模式下，当激光器功率 >40 W 且频率为 2 MHz 时，薄膜的有效切割速度达到约 133 mm/s。值得注意的是，即使激光器在两倍于额定工作频率的 1 MHz 下运行，仍然可以保证足够的功率输出，这对于同时优化产量和质量具有重要意义。切口干净利落，HAZ 的宽度仅为 5-10 μm （在出射面甚至更低），这表明 IceFyre FS UV50 激光器非常适合用于切割具有挑战性的多层薄膜叠层。

图 2 所示为切口的横截面图像。可通过该视图确认所有层的切割工艺质量。侧壁平滑，各个层均匀切割，没有 OCA 融化、分层或渗漏的迹象，这表明 IceFyre FS UV50 激光器是切割 OLED 叠层的理想选择。

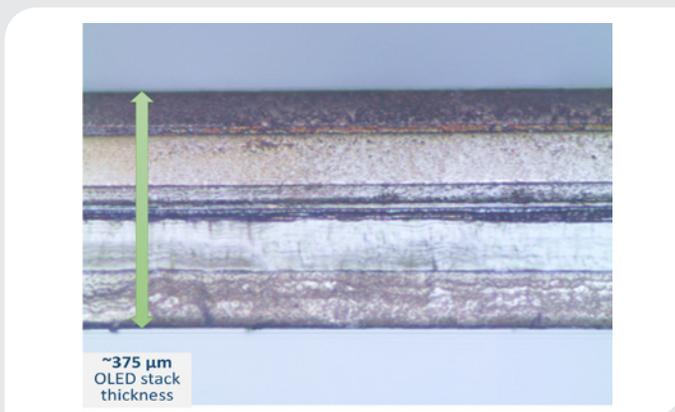


图 2. 使用 Spectra-Physics IceFyre FS UV50 飞秒激光器在多次加工模式下切割而成的 OLED 薄膜叠层（约 375 μm 厚）的横截面显微镜图像。

虽然这些初步测试受限于较小的切割长度，但获得的结果非常振奋人心。在总结经验之后，研究人员使用双轴扫描检流计系统开展进一步的测试，这套系统焦距更长，扫描区域尺寸更大，能够涵盖整条切割路径，因此可以通过高速多次工艺切割出整块 OLED 显示屏，从而充分利用激光

在高 PRF 下的高功率。此外，还可以根据一系列能量密度确定切割速度，这对于从系统设计的角度进一步优化产量非常有用，例如利用分束器提升切割效率。图 3 所示为切割速度和表面 HAZ 随能量密度的变化情况。

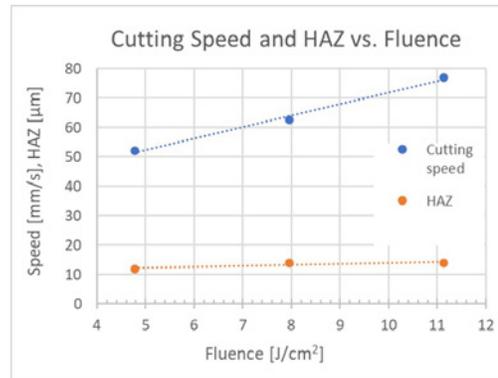


图 3. OLED 叠层切割速度和 HAZ 随紫外光束能量密度的变化情况。

数据显示，虽然切割速度会随着能量密度的增高而提升，但二者不呈正比例关系。事实上，当能量密度提高 2.3 倍时，切割速度只提升了大约 1.5 倍。因此，激光器在较低的能量密度下工作效率更高，而且有一点很明确，那就是采用分束系统设计可以实现总体产量最大化。此外，HAZ 测量结果体现出质量随能量密度降低呈下降趋势，这进一步说明使用多个低功率光束进行加工是更为理想的选择。根据这些测试得出的数据，使用多个低功率光束有助于大幅提高产量，如图 4 所示。

从图 4 中可以看到，从单一高功率光束改为三光束配置后，总体切割速度达到约 160 mm/s。在整个切割过程中保持良好的切割质量也是极其重要的。如图 5 所示，表面 HAZ 很小并且均匀分布在切割边缘周围，这一现象在去除 PET 保护层后的成品显示屏表面更加明显。

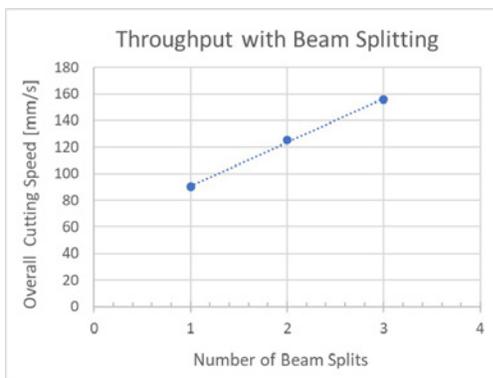


图 4. 将分束技术与基于大视场扫描检流计的切割系统相结合，可显著提高整体产量。

对边角和直线部分的检查表明，之前在切割长度较小时实现的出色质量在较大的全尺寸 OLED 切割中再次重现。外部 PET 保护层上的 HAZ 通常在 10-20 μm 的范围内。去除 PET 层后可以看到，HAZ 均匀分布在显示屏外表面上，宽度在 5-10 μm 之间甚至更小。这些测量的对象是激光器入射面，这里的 HAZ 通常最大，而出射面的 HAZ 明显较小。

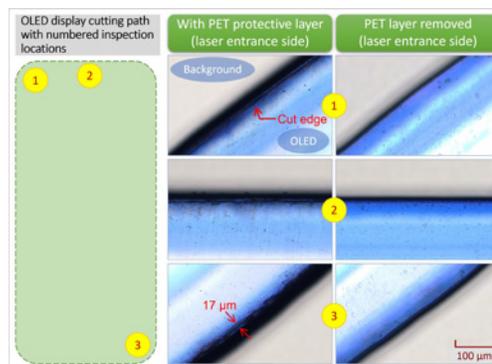


图 5: OLED 显示屏切割路径的整个周边均实现了出色质量。

OLED 显示屏由许多材料组成，这些材料的热学、光学和机械特性差异很大，因此对其进行高速高质量切割并非易事。然而，过往历史表明，即使是最为艰巨的制造挑战，性能出色的激光器也可以将其一一化解，这一次也毫不例外。我们用事实证明，通过将超短脉冲宽度与短波紫外线进行有机组合，IceFyre FS UV50 激光器可以高效地切割全尺寸的智能手机 OLED 显示面板，同时实现高产量和高质量。

产品

IceFyre® FS UV50

IceFyre FS UV50 激光器是工业飞秒紫外激光器技术的巨大飞跃，不仅具有优异性能，而且用途广泛，稳定可靠，经济实惠。IceFyre FS UV50 是市面上表现优异的飞秒紫外激光器，在 1 MHz 时提供 >50 W 的紫外输出功率，脉冲宽度 <500 fs。该激光器用途广泛，工艺性能出色，具有从单脉冲到 3 MHz 的可调整重复频率、按需脉冲 (POD) 和位置同步输出 (PSO) 触发以及 TimeShift™ 可编程脉冲功能，可实现灵活的脉冲串模式

操作。凭借其超短脉冲持续时间和出色的光束质量，客户可在几乎不产生热影响区 (HAZ) 的情况下，以最高的精度对高难度复杂部件进行微加工，并实现超高的产量和质量。IceFyre FS UV50 激光器专为工业用途而设计，以优异性价比实现稳定可靠的全天候运行。IceFyre FS UV50 基于 Spectra-Physics 的 *It's in the Box* 设计，将激光器和控制器集成到极小的封装中。

	IceFyre FS UV50
波长	343 ±2 nm
功率	1 MHz 和 1.25 MHz 时 >50 W
最大脉冲能量	1 MHz 时 >50 μJ
重复频率范围	单脉冲到 3 MHz
脉冲宽度, FWHM	<500 fs
脉冲对脉冲能量稳定性	<2.0% rms
功率稳定性 (预热后)	8 小时 <1% rms