

使用皮秒紫外激光器 切割全新可折叠 OLED 显示器材料

尽管处理能力和无线数据通信的发展明显是移动设备市场持续增长的主要推动力，但显示器技术的重要性也不应被忽视。作为主要的人机交互界面，触摸屏平板显示器在塑造用户的体验中发挥着至关重要的作用。最近几年，OLED（有机发光二极管）显示器已经在移动设备市场中崛起。它们以轻薄、柔软、轻便和节能的封装提供出色的图像质量，非常适合当前和未来的可折叠移动设备。

紧凑型可折叠手机的关键挑战是在显示器的所有组件（OLED 显示器、触摸传感器、偏振片、覆盖窗口）中实现较小的弯曲半径。为此，制造商不断开发在可见波长下极其透明的材料，例如超薄玻璃（UTG），以及一种相对较新的聚酰亚胺，即无色聚酰亚胺（CPI）。尽管 UTG 与生俱来更抗划伤，但它也很脆，并且难以在所需的厚度下（~50-200 μm ）制造和搬运。PI 天生就很柔软，并且在可制造性方面存在优势，但它必须覆盖一层很薄的硬涂层（HC）以提升其抗划伤性。此涂层还可设计为具有防眩光和防指纹属性。两种材料在可折叠显示器市场应该都会有很好的发展前景。对于 UTG 玻璃切割，使用皮秒红外激光器进行贝塞尔光束加工很可能是一种可行的选择；而对于 CPI + HC，则需要烧蚀切割。



图 1. 左 - 柔性显示器实现折叠手机，移动设备技术的革新发展。右 - 本应用说明中研究的材料叠层的结构图。

在本应用说明中，我们展示使用高功率皮秒 355 nm 混合光纤激光器 (IceFyre® 355-50) 为可折叠显示器覆盖窗口应用进行 CPI 基底多层叠层的烧蚀切割的结果。叠层由 50 μm 厚的 CPI 薄膜构成，一面覆有 12 μm 厚的 HC 层。附着在 HC 层上的是 50 μm 厚的聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 保护层（后面会去除）。此外，PET 薄膜具有压敏黏合剂 (PSA) 涂层 (~4 μm)，以便附着在 CPI 的硬涂层表面上。尽管高质量对 CPI+HC 层至关重要，但它对 PET + PSA 薄膜而言是重要因素，而非关键因素。

我们的最初几次实验是对 PI 薄膜、HC 层和 PET 保护片这三种主要材料各自的烧蚀行为进行独立的表征。我们确定了单脉冲烧蚀阈值，结果如图 2 中所示。

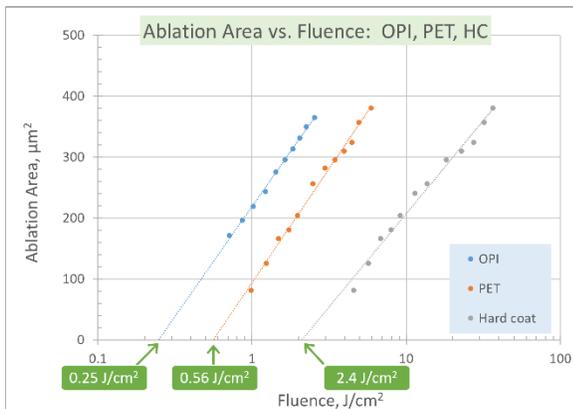


图 2. 烧蚀区域与激光能量密度图显示要切割的叠层中三种材料的阈值差异。

这些阈值存在巨大的差异。CPI 的阈值非常低，仅为 0.25 J/cm^2 ；而 HC 为 2.4 J/cm^2 ，高出将近 10 倍；PET 则介于两者之间，为 0.56 J/cm^2 。CPI 的低烧蚀阈值与我们观察到的非常洁净的浅烧蚀坑相符合，原因很可能是紫外波长下的强吸收（类似于传统的聚酰亚胺）。HC 薄膜的高阈值类似于各种玻璃的阈值。同样，薄层表现出脆性以及容易出现破裂和碎屑，如下图 3 中各种工艺条件的显微镜照片所示。

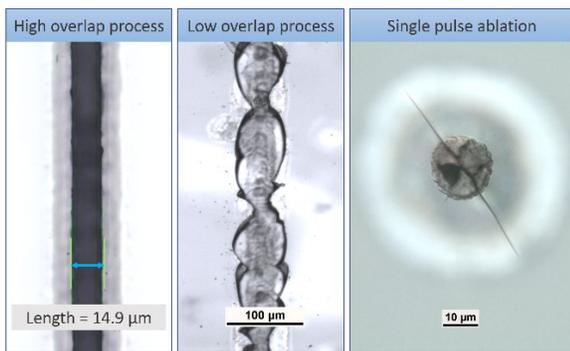


图 3. 在 $12 \mu\text{m}$ 硬涂层薄膜中，使用间隔紧密脉冲的高重叠工艺带来显著的质量改进。

在图 3 中，左边的显微镜图像显示在为材料中的能量密度和脉冲重叠而精心优化参数之后，非常洁净的划线通过 HC 层。图 3 中间的图像显示非最佳结果，整个划线上存在严重的碎屑。令人惊讶的是，这种低质量的结果是在中等能量密度下使用低脉冲重叠而产生的，这通常被视为更温和的加工领域，因此应该产生更好的质量。确实，通过仅仅单脉冲照射而产生的表面上的破裂（图 3，右）展示了对非传统方法的需求。

在了解三种材料各自的阈值和总体烧蚀行为之后，我们为穿透完整叠层的切割开发了一项工艺。我们需要微调每个层的参数，尽管激光束在整个切割工艺中仅指向叠层 (CPI) 的一面。对于每个连续的层，我们应用了脉冲能量、PRF 和扫描速度的独特组合。皮秒紫外脉冲的烧蚀行为非常可重复，因此不需要实时监控烧蚀深度等参数。确切地说，我们可以为最终的切割工艺预先编程激光脉冲能量和 PRF、重复扫描数量等参数，这得益于激光器接受“实时”脉冲能量和 PRF 调整的能力。使用 $3\text{-}10 \text{ m/s}$ 范围的各种扫描速度，以及高达 3 MHz 的激光 PRF，我们以 $>400 \text{ mm/s}$ 的净速度实现了高质量的完整切割。图 4 显示 CPI、HC 和 PET 层中的切口。

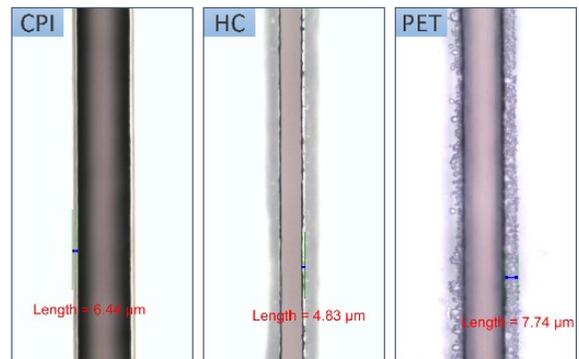


图 4. 显微镜照片显示总体（净）切割速度为 $>400 \text{ mm/s}$ 的层特定切割工艺的 CPI（左）、HC（中）和 PET（右）中的皮秒紫外激光器切口。

切割的高质量显而易见，而所有的热影响区 (HAZ) 均低于 $10\ \mu\text{m}$ 。值得注意的是，更具挑战性的 HC 层的边缘碎屑/粗糙度低于 $5\ \mu\text{m}$ 。PET 略大的 HAZ 在很大程度上无关紧要，因为它只是保护性覆盖膜，最终会去除，露出起作用的防划伤 HC 层。切口的侧壁质量也很重要，因为这可能是将完工的显示器安装到设备时的接口表面。图 5 中的显微镜图像显示侧壁的横截面视图。

该横截面视图确认整个材料叠层中都保持了切割工艺的质量。各个层清晰可辨（包括非常薄的 PSA），叠层中没有任何熔化、污迹或分层的迹象。

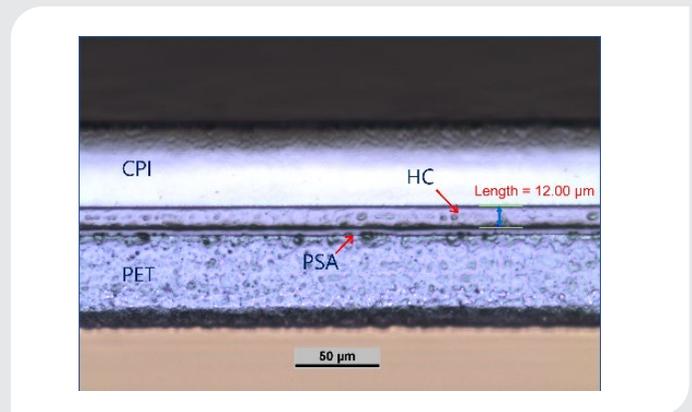


图 5. $50\ \mu\text{m}$ CPI 和 PET、 $12\ \mu\text{m}$ HC 以及 $\sim 4\ \mu\text{m}$ PSA 中的高质量切口的横截面视图。

新的技术通常需要新的材料及其加工。对于可折叠显示器，切割具有迥异的光学、热学和机械属性的各种材料的单个紧凑叠层，其中的挑战非同小可。对于具有保护性 PET 薄膜的硬涂层 CPI 的情况，我们将层特定优化技术与高功率、灵活的 IceFyre 皮秒紫外激光器相结合，产生了在产量和质量方面都非常有价值的结果。

产品

IceFyre® 工业皮秒激光器

IceFyre 355-50 是市面上表现优异的皮秒紫外激光器，在 1.25 MHz (>40 μJ) 时提供 >50 W 的紫外输出功率，脉冲串模式下的脉冲能量为 100 μJ，脉冲宽度为 10 ps。IceFyre 355-50 设定了从单次激发到 10 MHz 的功率和重复率的新标准。IceFyre 355-30 提供 >30 W 的典型紫外输出功率，脉冲能量 >60 μJ (脉冲串模式下脉冲能量更大)，并提供从单次激发到 3 MHz 的优异性能。IceFyre 1064-50 在 400 kHz 单脉冲时提供 >50 W 的红外输出功率，并提供从单脉冲到 10 MHz 的优异性能。IceFyre 激光器的独

特设计利用光纤激光器的灵活性和 Spectra-Physics 独有的功率放大器能力，实现 TimeShift™ ps 可编程脉冲串模式技术，实现业内较高的多功能性。每台激光器均配备一组标准波形；可选的 TimeShift ps GUI 可用于创建自定义波形。该激光器的设计可为高扫描速度的优质加工（例如使用多面扫描镜）实现同类激光器中时间抖动极其低的按需脉冲 (POD) 和位置同步输出 (PSO) 触发功能。

	IceFyre 1064-50	IceFyre 355-30	IceFyre 355-50
波长	1064 nm	355 nm	
功率	400 kHz 时 >50 W	500 kHz 时 >30 W, 典型值 800 kHz 时 >25 W 1 MHz 时 >20 W, 典型值	1250 kHz 时 >50 W
最大脉冲能量, 典型值 (TimeShift ps 可实现更高的每突发脉冲能量)	200 kHz 时 >200 μJ 单脉冲	500 kHz 时 >60 μJ, 典型值 800 kHz 时 >31 μJ 1 MHz 时 >20 μJ, 典型值	1250 kHz 时 >40 μJ
重复频率范围	单脉冲到 10 MHz	单脉冲到 3 MHz	单脉冲到 10 MHz
脉冲宽度, FWHM	<20 ps (15 ps 典型值)		<12 ps (10 ps 典型值)
TimeShift ps	是		
脉冲对脉冲能量稳定性	<1.5% rms, 1 σ	<2.0% rms, 1 σ	
功率稳定性 (预热后)	<1%, 1 σ, 8 小时以上		