

## 微加工领域的佼佼者：超短脉冲激光器

在微加工领域，短脉冲、尤其是超短脉冲激光器正在取代传统的加工方法。对于超短脉冲激光器，得益于其冷烧蚀特性，因此其对所要加工的材料几乎没有任何限制。

在冷烧蚀过程中，材料的去除本质上只能通过化学键断裂来实现，因此其产生的热影响仅限于几微米的区域，并且相应的变形也最小。不幸的是，超短脉冲激光器的烧蚀速率仍然非常低，进而限制了其在工业领域的广泛应用。

金属材料的烧蚀阈值在  $0.2\text{J}/\text{cm}^2$  的范围内，而玻璃和陶瓷的烧蚀阈值则在几个  $\text{J}/\text{cm}^2$  的范围内。为了提高去除速率，可以使用具有较大聚焦口径的高脉冲能量，以在更大的区域内工作。在诸如玻璃或聚合物等透明材料加工应用中，可通过非线性效应（如多光子过程）来提高去除速率。此外，也可以提高重复频率。重复频率可以从  $100\text{kHz}$  到几兆赫兹，目前正在进行重复频率超过  $10\text{MHz}$  的研究。

尽管传统的光纤激光器已经在工业环境中植根多年，但是飞秒光纤激光器在市场上仍然属于新事物。德国耶拿大学的 Jens Limpert 博士使用的超快光纤激光器，平均功率接近  $1\text{kW}$ ，峰值功率在  $\text{GW}$  量级，重复频率在  $\text{kHz}$  到  $\text{MHz}$  的范围内。虽然超快光纤激光器已经能够达到上述较高的性能，但是其仍然具有很大的发展潜力。

除了单脉冲之外，另一种提高烧蚀速度的方式是采用所谓的脉冲猝发（burst）。以  $50\text{MHz}$  的脉冲序列为例，重复频率为  $500\text{kHz}$  的脉冲被提取出来并被放大。

“烧蚀效果与脉冲能量成对数关系。通过这种方式，可以将相同的总能量分配到几个脉冲中，然后通过脉冲叠加来达到更高的去除量。” Lumera Laser 公司的 Dirk Müller 介绍说。实验已经证明  $5\sim 10$  个脉冲的脉冲猝发是有效的，并且约为  $20\text{ns}$  的脉冲间隔也已被证明是有效的。然而，最终获得的去除质量在很大程度上依赖于所要处理的材料。

### 微结构的高效生产

在微加工领域享有盛名的方法包括 EDM（放电加工）、微模压加工和光刻技术。EDM 只适用于导电材料，并且速度缓慢；冲压模的制造成本较高；而光刻则需要高精密掩模，并且后续的刻蚀过程还对环境有很大的污染。相比之下，激光冷烧蚀加工不但能够实现与上述方法类似的加工精度，而且更具成本效益，同时也非常环保。最精细结构的冲压使得金属板材的加工更加容易，金属板材结构由模压辊制成。德国夫琅和费激光技术研究所（Fraunhofer-ILT）已经利用功率为  $100\text{W}$ 、重复频率为  $3\text{MHz}$  的皮秒激光器，获得了最佳的精细结构加工效果。

“在整个激光微加工过程中，CAD 数据得到了精确的再现，没有熔化物飞溅以及其他废弃物，并且表面粗糙度小于  $0.5\mu\text{m}$ 。” Fraunhofer-ILT 烧蚀与焊接部门主管 Arnold Gillner 博士说（见图 1 和图 2）。为了获得更好的加工效果，脉冲之间必须有 10%~15% 的重合，两条脉冲的刻线间则必须有 10% 的重合。



图 1：由超快脉冲激光器加工的一个工具的局部图。

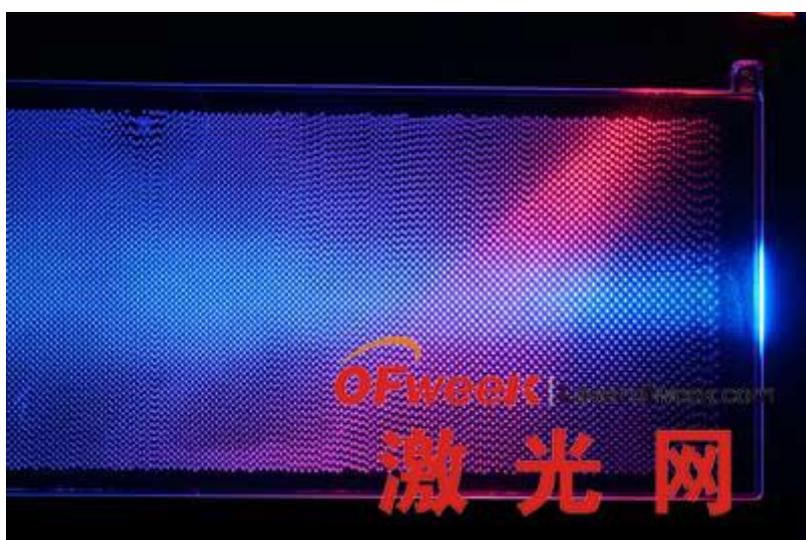


图 2：用于 LED 照明的导光结构。用于部件注塑成型所使用的工具是通过超短脉冲激光器加工而成的。

由于具备冷烧蚀特性，因此超快激光也可以用于加工塑料。几乎生产有机发光二极管（OLED）的所有加工设备都是独一无二的。由于有机光伏电池（OPV）和 OLED 的制造工艺相似，德国夫琅和费光子微系统研究（Fraunhofer-IMPS）的工程师们已经开发出了用于 OLED 和 OPVs 的 Gen2 试验性生产线。OLED 的层系统是通过 OVPD（有机气相沉积）或者 VTE（真空热蒸发）技术，在塑料薄膜上沉积

ITO（铟锡氧化物）层形成的。对于这样的微型结构制造，使用激光器是最理想的选择，因为它们的工作速度快，并且安装时间可以忽略不计。

“这种无需光刻技术的加工过程提供了与光刻工艺相同的优良质量，而且由于其在部署和成本方面的优势，因此这种方法更加灵活。” Fraunhofer-IMPS 的 Christian May 博士说。

德国 3D-Micromac 公司也针对相同的问题展开了工作。该公司已经开发出了一种模块化系统，其能够在普通的环境条件下，利用卷对卷制程实现有机、可弯曲的太阳能电池和 OLED 的全自动化生产（见图 3）。

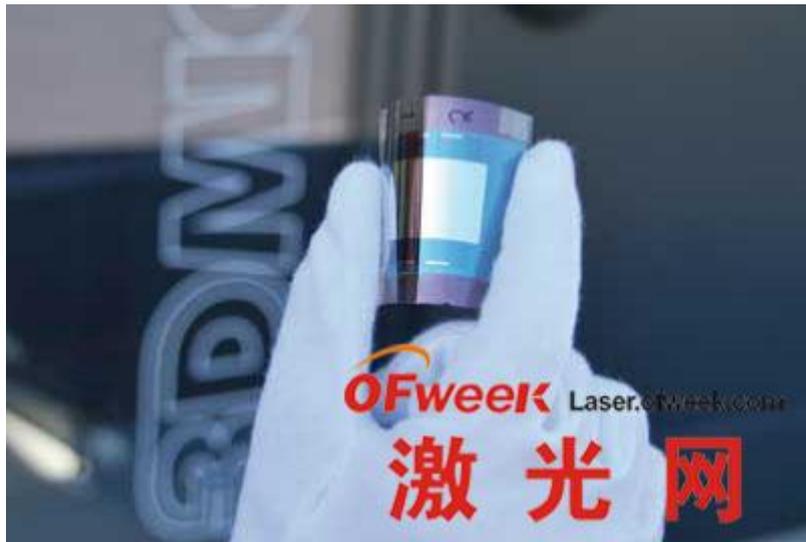


图 3：由超短脉冲激光加工的有机太阳能电池的膜层。

利用超短脉冲激光器进行卷对卷激光微加工的另一个应用领域是汽车玻璃。由于汽车的车窗越来越大，在日光照射下车内会越来越热，而汽车玻璃的膜层则会形成法拉第笼，对通讯有屏蔽作用。为了改善这种情况，必须在不影响“美观”的前提下去除部分膜层。

“皮秒激光可以在薄膜的背面工作，并且光束能在不破坏基底的情况下通过它。” 3D-Micromac 公司的 Christian Scholz 报道说。目前该项目尚处于仿真阶段。

对于工业生产，与可能的扫描速度相比，去除速率不是个大问题。为了实现高效生产，需要达到约 200m/s 和更高的扫描速度。采用相控阵偏转器可以满足速度要求，能够获得超过 500m/s 的速度，但是目前这些系统仍处于研发阶段，尚且不适合工业应用。

另一种解决速度缓慢问题的方式是让几部分光束并行工作。用于分光的衍射光学元件仅仅操纵光束的光学相位，并且具有非常大的透射率。这些光学元件由石英玻璃制成，生产成本较低，这一点也要归功于超短脉冲激光的冷烧蚀特性。

另一种制造周期性纳米结构的方法是使用干涉。这意味着所有的材料都可以通过这种方法加工，包括叠加一个短波长超短脉冲激光的几部分光束，从而产生具有高分辨率的干涉图样（见图 4）。

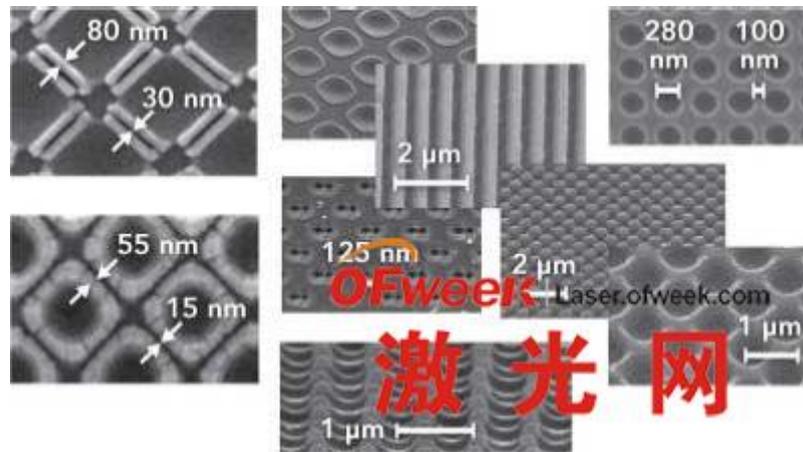


图 4：叠加一个短波长超短脉冲激光的几部分光束，产生高分辨率的干涉图样。

“实验已经证明了这种方法的可靠性，目前我们正在改进这种方法以满足工业应用的需求。” Laser-Laboratorium Göttingen e. V. 的 Peter Simon 博士说。

### 激光烧蚀法切割

利用传统的激光器切割金属箔，必须采用气体喷嘴来吹出熔化物，并且需要专门的轮廓匹配的切割工具。除了工具方面的成本外，用于熔化金属的气体流动还能够引起金属箔变形，相对较高的能量输入也会使金属箔弯曲，并且会在切割边缘形成脊状突起。利用短脉冲激光器切割金属箔，其激光束多次经过切割路径，逐渐作用于被切割的材料上。另外，在工件的固定方面，只需要将金属箔吸附在穿孔的板上就足以固定金属箔了。“利用短脉冲激光切割的唯一限制就是工作区域较小、定位精度较低，这依赖于聚焦位置和扫描装置的校准。” Günter-Köhler-Institut Jena 的 Daniel Hubert 指出。对于厚度超过  $100\mu\text{m}$  的膜层，该过程由于需要较长的加工时间而降低了经济实用性。

超短脉冲激光器具有小而窄的聚焦点，可用于切割小于  $20\mu\text{m}$  的宽度。利用激光器切割芯片可以获得高得多的封装密度，使得它与传统技术相比，有可能在每个晶圆上获得大约两倍数量的芯片。皮秒激光也给支架切割带来了利好。与传统的生产工艺相比，皮秒激光不但能节省昂贵的材料和涂饰费用，并且还减少了浪费。超短脉冲激光已经可以成功地切割硅晶圆，这使得获得更轻更薄的晶圆成为可能。

有了这些短脉冲和超短脉冲激光器，使得激光加工几乎对材料已经没有任何限制，并且能够获得最高的加工精度。未来，超短脉冲潜在的应用领域非常广泛，从生物组织到材料堆栈和复合材料的加工，尤其是加工 CFRP（碳纤维增强塑料）这种不容易处理的材料。在激光微加工研究方面，德国 3D-Micromac 公司是一家积极的推进者。2010 年，该公司曾邀请了微加工领域的专家们参加其举办的“第

三届激光微加工国际研讨会”，与业内同人共同分享激光微加工的最新进展（见图 5）。为了展示近期内业界在激光微加工领域所取得的新成果，该公司表示下届大会将于 2012 年举办。



图 5：德国 3D-Micromac 公司举办的“ISL 2010 激光微加工国际研讨会”现场。