

使用红外皮秒激光器切割用于增强现实眼镜的高折射率玻璃

虽然增强和混合现实技术已在某些工业应用中得到采用，但普通消费者的使用仍然有限。有一些应用正在受到关注，例如直接叠加到用户视野的复杂视觉辅助。然而，如果希望在更广阔的市场推动增长，技术和审美方面还需要改进。一些增强现实 (AR) 应用可以在智能手机上使用，但由于设备需要手持，显示尺寸相对较小，又需要将注意力从手头的任务转移到其他地方，这些应用还是受到限制。相比之下，AR 眼镜可以提供干扰最小的无缝显示，不会占用用户的双手和注意力。正如本篇应用重点探讨的主题，AR 眼镜镜片材料的激光切割技术有望将这些产品推向消费市场。

AR 眼镜提出的挑战是将传统眼镜的功能与基于情境的图形所带来的优势结合起来。要做到这一点，首先是由离散的微型显示器生成图形内容，然后结合到透明镜片中并由其引导，最后投射到人眼上。由于设计复杂，需要在体积和视野 (FOV) 之间进行权衡，AR 眼镜的普及受到限制。高折射率玻璃材料的不断发展为基于波导的设备提供了更大的 FOV 和更薄、更轻的镜片，从而避免了这种权衡，为更广泛的消费者普及铺平了道路。图 1 说明了 AR 眼镜的基本

设计概念，并总结了使用高折射率玻璃的优势。但是，这类玻璃切割时很难保证边缘质量良好，即便使用常规眼镜常用的红外皮秒激光器也是如此。

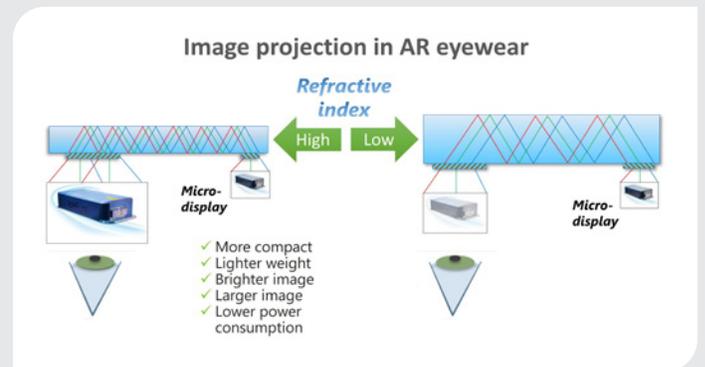


图 1. AR 眼镜中的图像投射和使用高折射率玻璃的优势。

MKS 工业激光应用工程师采用 IceFyre® IR50 超短脉冲 (USP) 红外 (IR) 激光器结合贝塞尔光束技术，为 AR 眼镜加工高折射率玻璃。此前的工作 (应用说明 46、54) 采用 TimeShift ps 脉冲可编程技术切割标准和超薄玻璃，这次我们在此基础上，将这项工艺扩展到切割高折射率玻璃的小半径圆角。我们还展示了如何利用 TimeShift ps 更先进的功能进一步提高切割质量。

切割厚度 0.7 mm、折射率约 1.8 的玻璃所使用的工艺参数来自我们此前的工作，只需要进行微小调整（例如材料上的脉冲间距）。在 50 kHz 的脉冲重复频率 (PRF) 下操作，设计参数以 200 mm/s 的速度进行直线切割。如果在较高 PRF 下使用全功率激光，这一速度可扩展到 >1.6 m/s。处理小半径曲线时，按比例降低转台速度和激光 PRF 以适应运动系统性能，同时保持正确脉冲间距。对参数进行微调后，使用约 0.3 w 的功率和 2.5 kHz 的 PRF，在 10 mm/s 的速度下加工出 0.5 mm 圆角半径。图 2 所示为以机械方式从玻璃晶片上分离前和分离后的加工圆角。

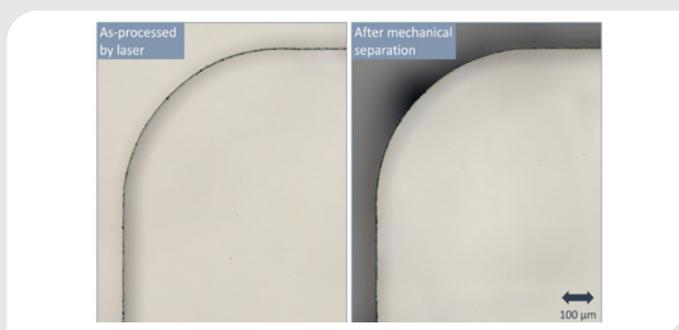


图 2. 在高折射率玻璃上加工的 0.5 mm 半径圆角的显微镜图像。(左) 手动分离前的顶面视图，(右) 分离后的顶面视图。

图 2 中的图像显示，加工沿直线部分保持连续，经过边角，然后再退出。分离后，测量得出的边缘粗糙度约为 $0.6 \mu\text{m} R_a$ ，入射面和出射面处的碎屑小于 $5 \mu\text{m}$ 。

尽管上述结果已经展示出贝塞尔光束切割弯曲路径的优越性，但切割质量仍有进一步提高的潜力和需求，特别是在降低侧壁粗糙度方面。为实现这一目标，我们采用 TimeShift 技术来改变串内子脉冲的间隔时间和串内子脉冲的相对能量。在这项工作中，将组成脉冲串的子脉冲数

量保持为两个，实践已证明这是大多数情况下的最佳选择。脉冲串的子脉冲间隔时间从 10 纳秒（此前工作中曾使用）到 100 纳秒不等。其他参数保持不变，包括转台速度 200 mm/s、PRF 50 kHz、平均功率约 5.5 W。将加工后的样品手动分离，测量边缘粗糙度 (R_a)，生成图 3 中的曲线。

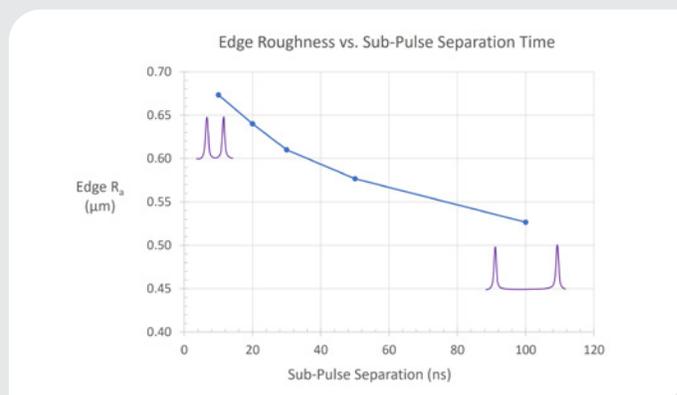


图 3. 边缘 R_a 与串内子脉冲间隔时间的关系曲线，粗糙度明显随间隔时间的增加呈降低趋势。

从图 3 中可以看到，通过增加串内子脉冲间隔时间，可以将边缘粗糙度从间隔 10 ns 时的 $0.67 \mu\text{m} R_a$ 降低到间隔 100 ns 时的 $0.53 \mu\text{m} R_a$ 。这相当于将粗糙度降低了大约 20%。

在进一步的测试中，我们研究了改变串内两个子脉冲之间能量比的影响，将尾部子脉冲的能量从 100% 逐步调整到第一个子脉冲的 30%（我们此前工作中使用的默认值是约 70%）。除了平均功率外，其他所有参数均保持不变，平均功率根据需要进行调整，以保持约 $500 \mu\text{m}$ 的固定修改深度。在图 4 中对结果数据绘制曲线，显示了边缘粗糙度与尾部脉冲相对能量之间的关系。此外，还针对选定的数据点标出了成型所需的平均功率 (P_{avg})。

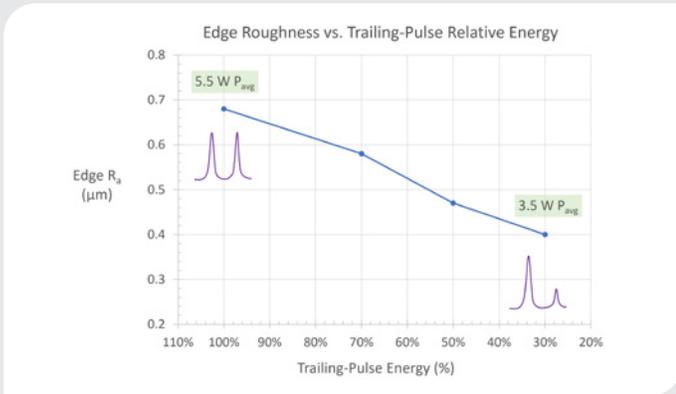


图 4. 关系曲线显示出边缘粗糙度随着尾部子脉冲相对能量的减少而改善。

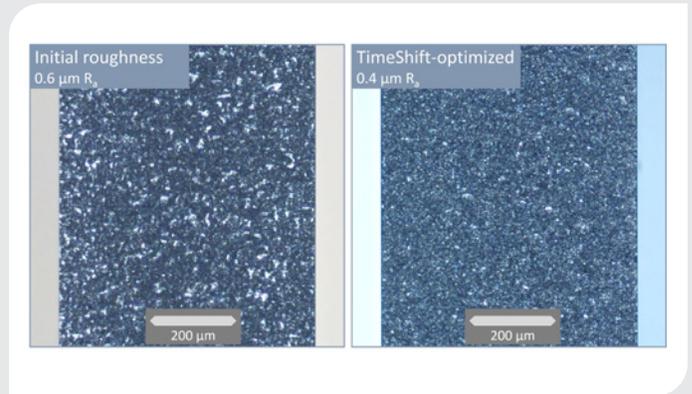


图 5. 粗糙度值分别为 $0.6 \mu\text{m } R_a$ (左) 和 $0.4 \mu\text{m } R_a$ (右) 的侧壁表面的视觉比较，整个玻璃厚度全长成型。

从这些结果中我们看到，通过将尾部子脉冲的能量从 100% 减少到 30%，边缘粗糙度从约 $0.7 \mu\text{m } R_a$ 降低到约 $0.4 \mu\text{m } R_a$ ，大约 40%。更值得注意的是，粗糙度降低时，平均功率水平也在降低 (3.5 W 相对 5.5 W)，这意味着能够在提高质量的同时实现更高的总产量。对边缘视图进行并排比较，可以很明显地看到表面粗糙度的差异，视图清楚地显示出，随着测得的粗糙度降低，表面外观整体更加细密 (图 5)。

本文介绍的工作表明，IceFyre IR50 的贝塞尔光束加工技术在切割用于 AR 眼镜的高折射率玻璃时表现出色，并且能够适应半径很小的弯曲形状加工。此外，使用 TimeShift ps 可编程脉冲串包络内的脉冲强度时，切割质量明显提升，减少了对昂贵且耗时的后处理的需要。这些技术可以实现精细玻璃加工，在达成高质量结果的同时保持最高产量，从而使消费者 AR 眼镜的大批量生产成为可能。

产品

IceFyre® 工业皮秒激光器

IceFyre UV50 是市面上表现优异的紫外皮秒激光器，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 UV50 设定了从单次激发到 10 MHz 的功率和重复率的新标准。IceFyre UV30 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），具有从单次激发到 3 MHz 的优异性能。IceFyre IR50 在 400 kHz 单脉冲时提供 >50 W 的红外输出功率，具有从单脉冲到 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 IR50
波长	1064 nm
功率	400 kHz 时 >50 W
最大脉冲能量，典型值（TimeShift ps 可实现更高的每脉冲串能量）	200 kHz 时 >200 μJ
重复频率范围	单脉冲到 10 MHz
脉冲宽度，FWHM	<15 ps（13 ps 典型值）
TimeShift ps	是
脉冲对脉冲能量稳定性	<1.5%，1 σ
功率稳定性（预热后）	<1%，1 σ，8 小时以上
空间模式	TEM ₀₀ (M ² <1.3)
光束直径 (D4σ)	3.0 mm ± 0.3 mm
发散角，全圆角	<0.75 mrad
极化	>100:1，垂直