

飞秒激光在柔性材料内部直写加工

路尚润¹⁾ 赵宁¹⁾ 邓逸枫¹⁾

1) (中山大学物理学院, 广州, 中国 510275)

飞秒激光的脉冲宽度极短, 能够以极高的精度和极小的热损伤对材料进行加工。本实验研究了飞秒激光在热塑性聚氨酯 (TPU) 及聚氯乙烯 (PVC) 中的内部直写加工技术, 探索了激光波长、加工距离和功率对加工效果的影响。对于 TPU 材料, 在不同光强和速度下, 发现其不仅能够实现中空结构的刻写, 并且能够实现均匀的折射率变化。并且激光加工展现出对复杂图形的良好控制能力, 我们成功制造了高质量的折射率光栅, 验证了其在光学器件中的应用潜力。对于 PVC 材料, 我们探究了其不同激光功率下的极限加工深度, 对于内部加工机理有了更深的理解, 并得到了 PVC 材料的极限加工深度, 并且我们通过烧蚀 PVC 材料的方法得到了体布拉格光栅, 并讨论了其光栅水平间距对衍射光斑图案的影响。此研究为柔性材料的光学器件开发提供了新的方向。

关键词: 柔性材料, 飞秒加工, 光栅衍射

1 引言

飞秒激光的脉冲宽度极短, 有超高峰值功率, 主要优点之一是在热扩散发生前的超短时间尺度内将能量传递给材料, 能够以极高的精度和极小的热损伤对材料进行加工^[1], 这种技术在制备柔性电子器件方面展现出独特的优势和广泛的应用前景^[2,3]。

飞秒激光直写加工技术能够直接在柔性材料内部形成微纳结构, 无需传统的光刻掩模和复杂工艺流程, 从而简化了加工步骤, 提高了加工效率^[4], 这种技术在制备柔性电子器件方面具有显著的优势。

此外, 飞秒激光加工技术还具有加工精度高、适用材料范围广、能够实现复杂三维结构的直接写入等特点^[5]。通过飞秒激光加工, 可以在柔性材料表面或内部形成具有特殊浸润性质的微纳结构, 如超疏水、超疏油等, 这些结构在防水、防污、自清洁等方面具有重要应用^[6]。

飞秒激光直写加工技术在柔性材料加工中的应用包括但不限于柔性电子器件^[7]、生物传感器^[8]、光学器件^[9]等领域。随着材料科学、激光技术和光化学技术的不断进步, 飞秒激光直写加工技术有望在未来

的柔性电子和智能设备制造中发挥更加重要的作用。

综上，飞秒激光在柔性材料内部直写加工技术的研究和应用是一个多学科交叉的领域，涉及光学、材料科学、电子工程等多个学科，其发展前景广阔，对推动柔性电子器件的发展具有重要意义。

2 飞秒激光在柔性材料内部直写加工的原理

2.1 激光直写加工方法

激光直写加工方法是超短脉冲激光应用的重要领域之一，它主要包括加性方法、减性方法和改性方法三大类。

2.1.1 加性方法

加性方法通过激光的作用，使材料发生聚合、烧结或还原等反应，从而在材料表面或内部形成新的结构或图案。例如，激光烧结技术可以将粉末材料快速固化为实体，实现复杂三维结构的快速成型；光聚合技术则利用激光引发光敏材料的聚合反应，生成高精度的微纳结构。

(1) 激光烧结

激光烧结是一项分层加工制造技术，这项技术的前提是物件的三维数据可用。而后三维的描述被转化为一整套切片，每个切片描述了确定高度的零件横截面。激光烧结机器通过把这些切片一层一层的累积起来，从而得到所要求的物件。在每一层，激光能量被用于将粉末熔化。借助于扫描装置，激光能量被“打印”到粉末层上，这样就产生了一个固化的层，该层随后成为完工物件的一部分。下一层又在第一层上面继续被加工，一直到整个加工过程完成。

选择性烧结工艺（SLS）工艺，是一项由 C.R. Dechard 在 1928 年成功研发的技术。该工艺利用粉末状材料作为成型基础，通过一系列精密操作步骤，实现复杂三维结构的快速制造。

在 SLS 工艺中，首先会将一层材料粉末均匀地铺洒在已成型零件的上表面，并使用工具将其刮平以确保该层厚度一致。接着，高强度的 CO₂ 激光器会在新铺设的粉末层上按照预设的零件截面进行扫描。在激光的照射下，粉末材料会被迅速地烧结在一起，形成零件的当前截面，并与下方已成型的部分牢固粘接。完成一层截面的烧结后，系统会自动铺上一层新的粉末，并重复上述烧结过程，直至整个零件完全成型。SLS 工艺的一大显著优势在于其广泛的选材范围。尼龙、蜡、ABS、树脂裹覆砂、聚碳酸酯、金属和陶瓷粉末等多种材料均可作为烧结对象，从而满足了不同应用场景的需求。此外，由于粉床上未被烧结的

部分自然成为了烧结部分的支撑结构，因此 SLS 工艺在制造过程中无需额外的支撑系统，进一步简化了生产流程。

选择性激光烧结原理如图1所示

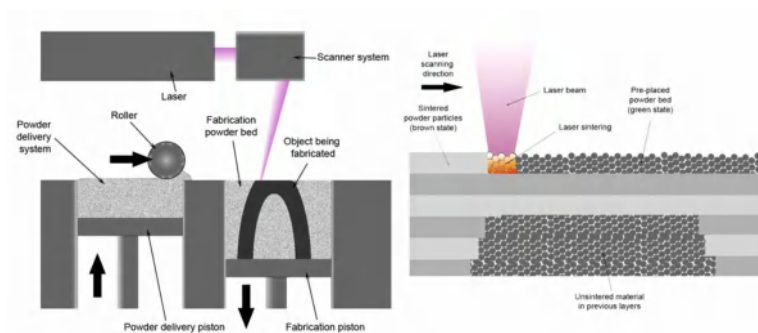


图 1 SLS 原理

Fig. 1. Selective laser sintering

(2) 光聚合技术

光聚合是自由基聚合的一种。单体分子借光的引发（或用光敏剂）活化成自由基而进行的连锁聚合。多种单体在紫外光照射下能迅速聚合。这种方法主要依赖于特定波长的光源，如激光，来激发光敏物质，从而引发聚合反应，使单体分子连接成高分子链，形成固态材料。光聚合反应可以通过两种方式实现：直接光激发和光敏剂/光引发剂介导的激发。在直接光激发中，单体分子直接吸收光能并转化为激发态，进而引发聚合。而在光敏剂或光引发剂介导的激发中，这些添加剂首先吸收光能，然后将能量传递给单体分子，或者自身分解产生自由基等活性中心，从而引发聚合。

激光加工中的光聚合技术有很多优点。首先，由于激光的光束可以精确控制，因此可以实现高精度的加工。其次，光聚合反应通常在较低的温度下进行，避免了热聚合可能带来的材料变形和降解问题。此外，光聚合反应的选择性高，可以针对特定区域进行加工，而不影响周围材料。在激光加工领域，光聚合技术被广泛应用于 3D 打印、光刻和光固化等领域。例如，在 3D 打印中，光聚合技术可以实现高精度的层层堆积，从而打印出复杂的三维结构。在光刻领域，光聚合技术被用于在硅片上形成微细图案，是半导体制造中的关键步骤。而在光固化领域，光聚合技术则用于将液态物质快速固化成固态材料，如涂料、胶水和油墨等。

光刻技术是半导体微电子器件与芯片等信息领域开展前沿科学研究不可或缺的关键核心技术之一。传统光刻利用紫外光的单光子吸收效应进行平面曝光生成图案化结构，因此其加工分辨率收到经典光学衍射极限的限制，最小加工尺寸在半个波长左右。要想实现更加精细的极限尺度结构加工，传统光刻技术使用

的光源波长不断减小，同时加工方法及能量源的更迭衍生出了 X 射线光刻，电子束光刻，离子束刻蚀等技术。虽然这些技术可以将加工分辨率提高到纳米尺度，但无法实现任意可设计的，复杂形状的三维微纳结构加工。

飞秒激光双光子聚合三维微纳结构加工技术，是一种结合了非线性光学、超快脉冲激光、显微成像、高精度纳米定位、三维图形 CAD 建模及光化学材料于一体的新兴三维光刻技术^[10]。与传统光刻技术缩短波长的技术路线不一样，该技术采用可见光到近红外波段的超快激光作为光刻光源，利用激光与物质相互作用的非线性光学效应，突破光学衍射极限。飞秒脉冲激光经过显微镜在空间中被紧聚焦之后，焦点中心位置的光子数密度极高，可诱发材料发生双光子吸收效应，进而引发光聚合反应使得材料固化。用过计算机控制激光聚焦在材料内的三维运动，就可以实现任意三维结构的制造。相比而言，飞秒脉冲激光与材料作用时间远低于热弛豫时间，可避免光热效应的影响，精度可达到 100nm 以内，是高精度三维微纳结构制备中较为理想的一个加工手段。

双光子聚合加工过程如图2所示

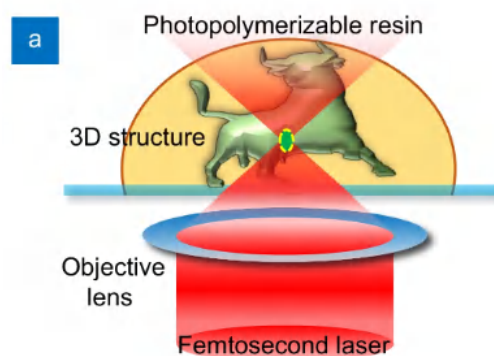


图 2 双光子聚合加工示意图

Fig. 2. Schematic diagram of the TPP

2.1.2 减性方法

激光烧蚀在现代材料加工中有广泛的应用，其利用强激光束与物质相互作用的热效应或其他物理效应从固体中去除物质原子，来改变材料的形貌和性质。比如激光烧蚀金属或者金刚石产生空洞，薄膜、纳米颗粒材料的制备，材料表面的微纳加工等。

用于烧蚀材料的激光分为连续激光和脉冲激光两种。连续激光是指无间歇的激光输出，而脉冲激光则为每间隔一定时间的周期性的激光输出。对于连续激光或较长脉冲激光，烧蚀靶材是利用热熔性效应。靶材吸收激光束的能量，有一部分靶材的粒子热运动极为剧烈，以致摆脱周围粒子的束缚，从靶面逃逸出去，

形成气态粒子，即升华。对于短脉冲激光，由于激光注入材料的时间极短，能量来不及扩散就使得被加工区域的材料快速达到汽化温度，并从材料表面喷出。从微观机制来看，其脉冲持续时间远小于材料中受激分子、原子、电子等通过移动和转动等形式的能量释放时间，避免了激光的线性吸收、热扩散的存在和影响，此类加工过程表现为非热熔性。

在 18 世纪 60 年代，人们发现激光束照射固体材料时，有电子、离子和中性原子从固体表面跑出来，并且在固体表面附近形成一个发光的等离子体区，温度达到 10^3K - 10^4K 。这些激光烧蚀的产物在基片上凝结，可以得到薄膜，即激光镀膜，发展为后来的脉冲激光沉积（PLD）技术^[11]。由于激光波长较长，烧蚀中靶材的熔融液体层较深，易产生溅射，使得沉积过程中出现较多的微滴，由此得到的薄膜质量较差。激光烧蚀技术在材料加工中的应用逐渐由热效应转为非热物理效应，飞秒激光技术是制备纳米颗粒材料和大面积规整的纳米光栅的有效途径，开创了激光加工材料的崭新时代。进入 21 世纪以来，飞秒激光与固态材料相互作用在材料表面会诱导纳米结构，诱导表面周期性结构表现出入射激光波长大小的凹槽结构，并垂直于入射激光的极化方向。

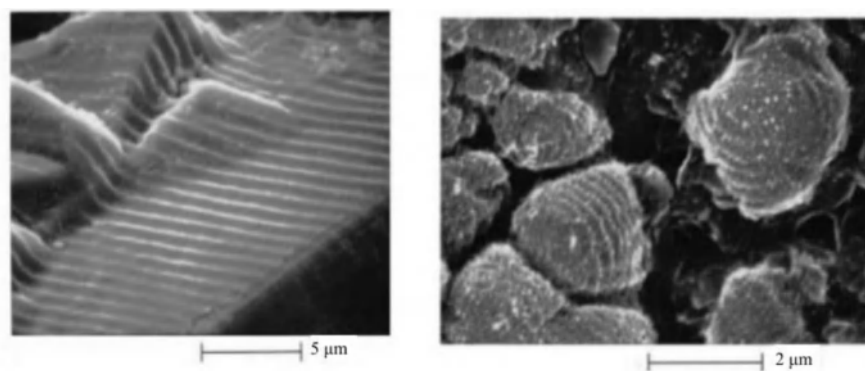


图 3 飞秒激光在单晶体（左）和多晶体（右）表面诱导的三维周期性波纹示意图

Fig. 3. Three-dimensional periodic ripples induced by femtosecond laser on single-crystal and polycrystalline diamond surfaces

2.1.3 改性方法

激光改性的原理主要是利用激光高能束对材料表面进行处理，进而改变材料表面的化学成分、组织结构、物理性能和应力状态等，以达到改善材料表面性能（如耐磨、耐腐蚀、抗氧化和抗疲劳性等）的目的。

具体来说，当激光束照射到材料表面时，材料会吸收光子的能量并将其转化为热量，导致表层温度升高并向内部传热。随着温度的升高，材料表层会发生一系列物理和化学变化。当温度升高到相变点以上时，材料会发生固态相变，如激光表面淬火技术就是利用这一原理使材料表面硬化。当温度进一步升高到熔点

之上时，材料会熔化并形成熔池，此时可以通过激光熔凝、激光熔覆或激光表面合金化等技术对材料表面进行改性处理。在激光熔覆过程中，预先涂敷在材料表面的涂层与基体表面一起熔化后迅速凝固，形成与涂层成分基本一致的熔覆层。而激光表面合金化则是将合金化粉末和基材一起熔化后迅速凝固，在表面获得合金层。

激光改性技术具有热源能量密度高、非接触式加热、热影响区小、工艺可控性强和环保等优点，已在航空航天、石油化工、能源、交通和冶金等领域得到广泛应用。

2.2 飞秒激光在透明材料内部实现三维加工

具有足够高脉冲峰值强度的飞秒激光在透明材料内部实现三维加工的过程中，激光通过物镜聚焦在材料表面或内部的焦点位置，此时光能被转移到材料中，并诱导材料发生多光子吸收，使得大量的电子电离^[12]。由于电离效应，材料可以发生相位或结构的改变，产生局部的永久的折射率变化，或者产生一个中空区域，最终在焦点位置形成直写痕迹或通道。

由于入射光子的能量不等于两能级之间差值，电子跃迁无法发生，故光在透明材料中的多光子吸收是非线性的。非线性吸收要求激光脉冲中的电场强度必须近似等于束缚原子中价电子的电场强度。紧密聚焦和吸收的非线性使得多光子吸收可以限制在材料的焦点体积内，而不会引起其他部位的多光子吸收，保证了其在极小尺度上进行微加工。飞秒激光入射到玻璃上的过程如图4所示

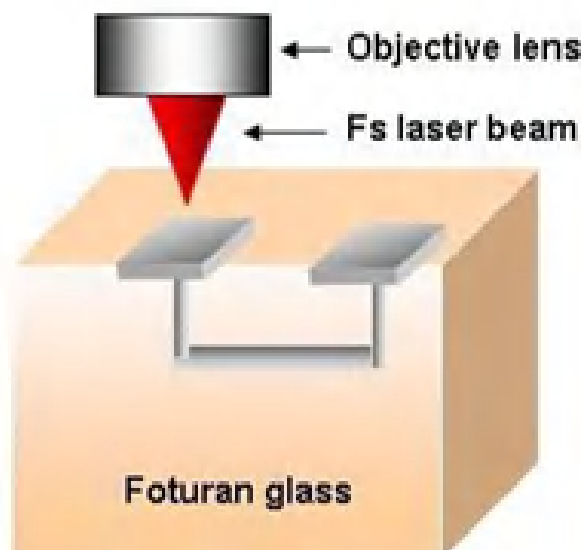


图 4 飞秒激光辐照到玻璃上

Fig. 4. femtosecond laser irradiated on the glass

3 实验装置

我们使用的是实验室已经搭建好的超短脉冲激光直写加工系统，该系统由两条光路组成，第一条光路从飞秒激光器发射具有可调脉冲宽度（60-150fs）、1KHz 频率的 800nm 脉冲序列，依次经过可变光阑、缩束系统等光学元件，且最终通过物镜聚焦在 TPU 样品的表面上。第二条光路从 CCD 出发，经过半透半反镜，再通过物镜聚焦在样品表面，样品表面的反射光返回后又被 CCD 接受，反向传输到计算机系统中，在计算机窗口上可以实时观察样品图像，检测加工区域形貌。

在激光加工完成后，对加工区域进行表征时，我们使用了光学显微镜来观测材料内部的图像，结合 CCD 可以灵活拍摄下我们需要的表征结果用于实验分析。

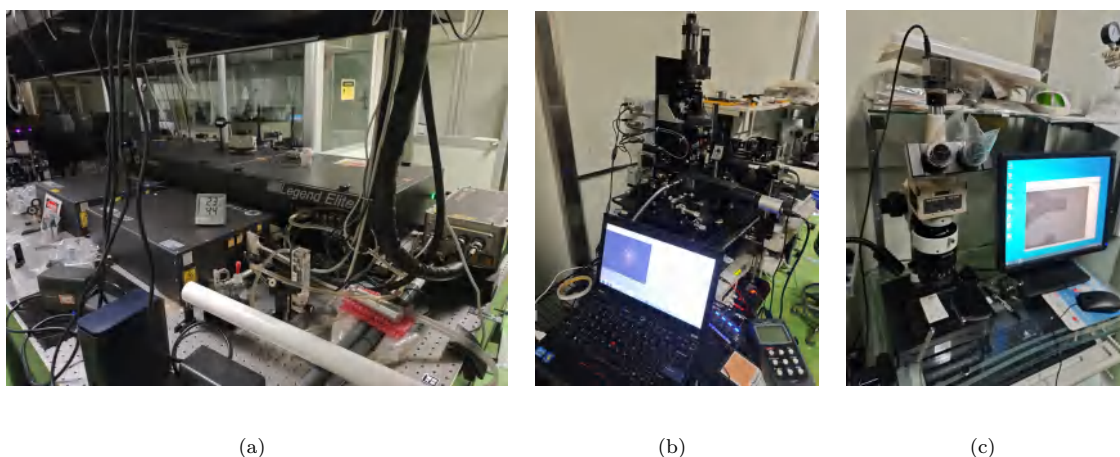


图 5 实验装置 (a) 飞秒激光系统 (b) 加工系统 (c) 显微成像系统

Fig. 5. Experiment Equipments

4 实验内容及结果

4.1 TPU 内部直写加工

在 TPU 的加工中，我们使用的是 10 放大倍数、0.25 数值孔径的物镜，激光波长为 800nm。

4.1.1 初步加工

由于视场光波长和加工激光波长不一致，因此其焦点会有一定的间隔。在实验中，我们先对加工条件进行了摸索。最终发现，空气中的加工距离为视场聚焦外的 0.03mm，而内部刻蚀的加工距离为视场焦距

外的 0.02mm。

同时，我们也探究了加工速度和激光功率的影响。在固定功率为 $400\mu\text{W}$ 下，其可以产生较好的内部直写加工效果。对于速度，我们发现在 $20\mu\text{m/s}$ 下会产生步进的效果，而 $10\mu\text{m/s}$ 则会加工出均匀的线条。我们利用此条件对 TPU 材料进行了初步加工，包括随意刻写和光栅直写，分别如图6(a)和6(b)所示。

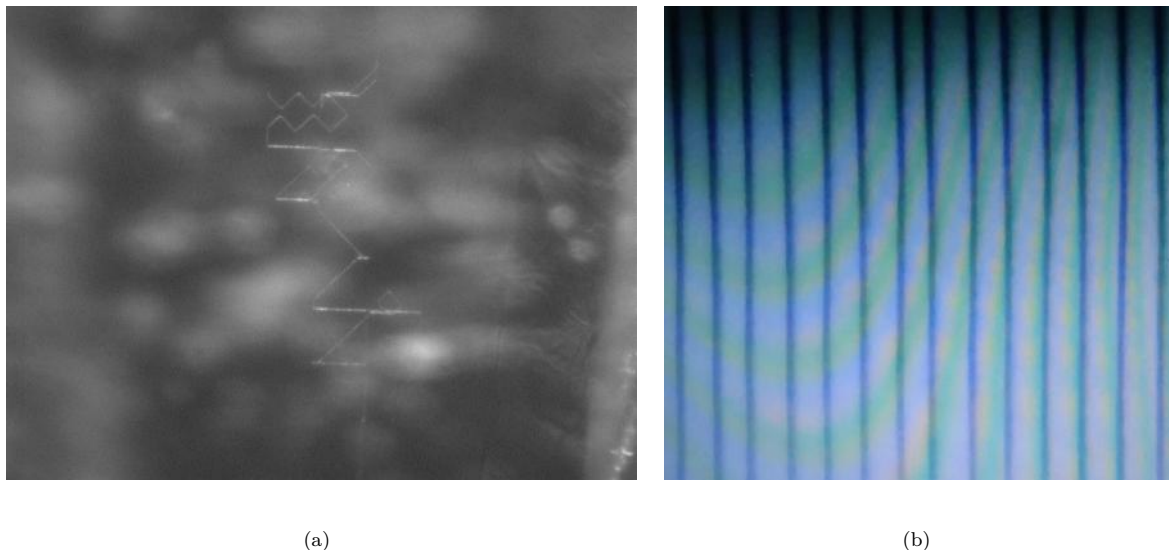


图 6 初步内部加工 (a) 随意刻写 (b) 光栅直写

Fig. 6. Preliminary Internal Processing(a) Random Writing(b) Grating Direct Writing

对于随意刻写，可以看出，仪器可以很好地实现任意图形刻写，只是对速度和位移的调控要求比较精准。仪器也可以利用代码进行编辑刻写，这对之后的复杂加工可能会提供帮助。

光栅直写的参数为：长 $400\mu\text{m}$ ，间距 $10\mu\text{m}$ ，单层刻写。可以看出，加工间隔的调控并非是均匀的，这可能与步进电机的标定有关，会导致光栅的衍射级次不均匀，但这总可以通过人工调控实现均匀刻写。因为这是初步刻写，我们并未仔细对其进行表征，仅仅用激光对其进行了简单照射，结果如图7所示。

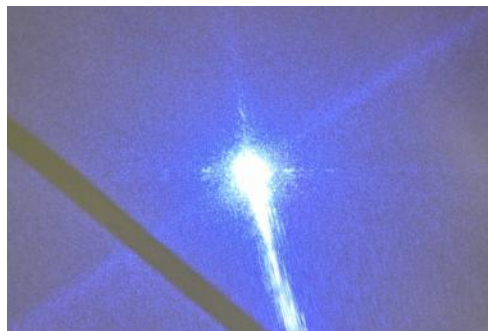


图 7 初步加工光栅衍射效果

Fig. 7. Preliminary Grating Diffraction Effects

可以看出，其横向方向上出现了一级级次的衍射光，并且能初步观测到二级及以上的级次，有一定的

效果。这是在预料之中的，因为此时只刻写了单层的结果，入射光无法得到较为充分的衍射，因此只能观测到微弱的效果，并且中央 0 级衍射光占据绝大部分。

4.1.2 诱导折射率转变-光强调控

根据我们的初步加工，飞秒激光已经能对 TPU 实现较好的内部直写功能，并且具有良好的调控性质。实际上，光强较弱时，此时虽然无法进行直接刻写，但可以诱导折射率的变化。而折射率变化产生的热效应较弱，刻写会更加均匀。同时，如今许多新奇的器件构造基本上都是利用折射率，比如光子晶体、超表面等光学器件。

因此，研究折射率诱导变化是十分关键的，其不仅具有良好的加工条件，并且还有着广泛的应用场景。首先我们对光强进行调控，探究诱导折射率变化的临界条件。

实验中，固定刻写速度为 $10\mu\text{m/s}$ ，通过调控光强，实现折射率的调控，一共加工了 8 条线，其对应的光强分别为

表 1 光强调控大小

Table 1. Light Intensity Regulation

线序号	1	2	3	4	5	6	7	8
光强/ μW	500.5	480.8	460.9	440.9	419.7	400.2	380.5	360.3

即以 $20\mu\text{W}$ 为间隔，进行内部直写加工，查看加工结果判断折射率加工的临界条件。光强调控的实验结果如图8(a)和8(b)所示。

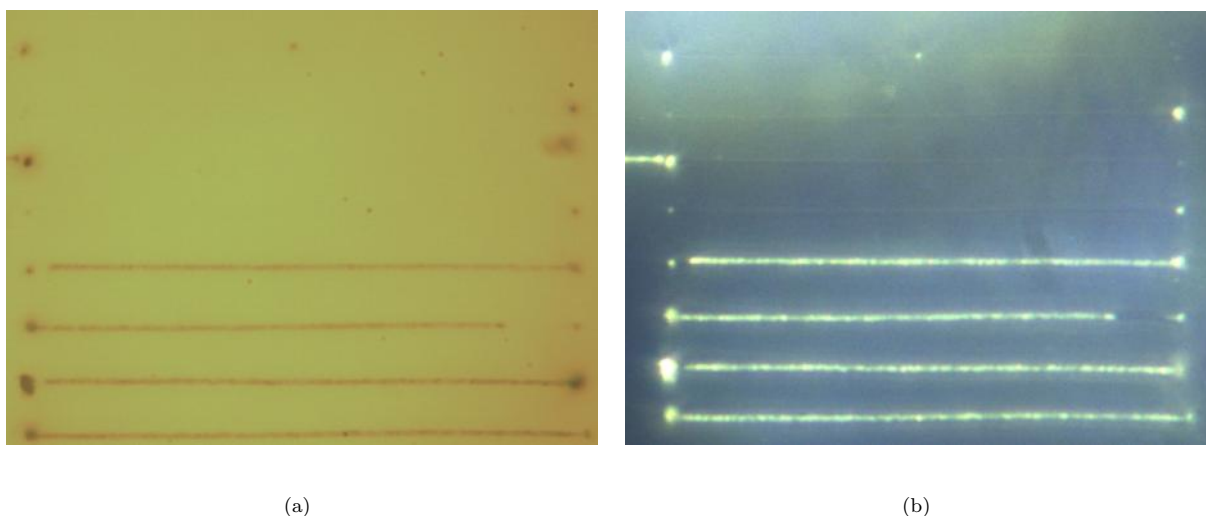


图 8 光强调控 (a) 结果 1(b) 结果 2

Fig. 8. Light Intensity Control(a) Result 1(b) Result 2

在图8(a)中, 折射率变化的纹理几乎不可见, 这可能是因为光源的单色性不足, 导致衍射效果不明显。然而, 在图8(b)中, 随着光强的降低, 我们观察到加工纹理不再进行刻蚀, 而是转变为折射率变化。这种变化产生的纹理更加均匀, 没有毛躁现象。这种特性对于制造折射率光栅来说是一个显著优势, 因为它能够带来更好的衍射效果。

由于在这些实验中使用的是自然光或白光, 其衍射效果相对较弱。因此, 我们考虑改用激光照射, 以期获得更清晰的折射率变化纹理。图9(a)和9(b)展示了使用激光照射后的结果。

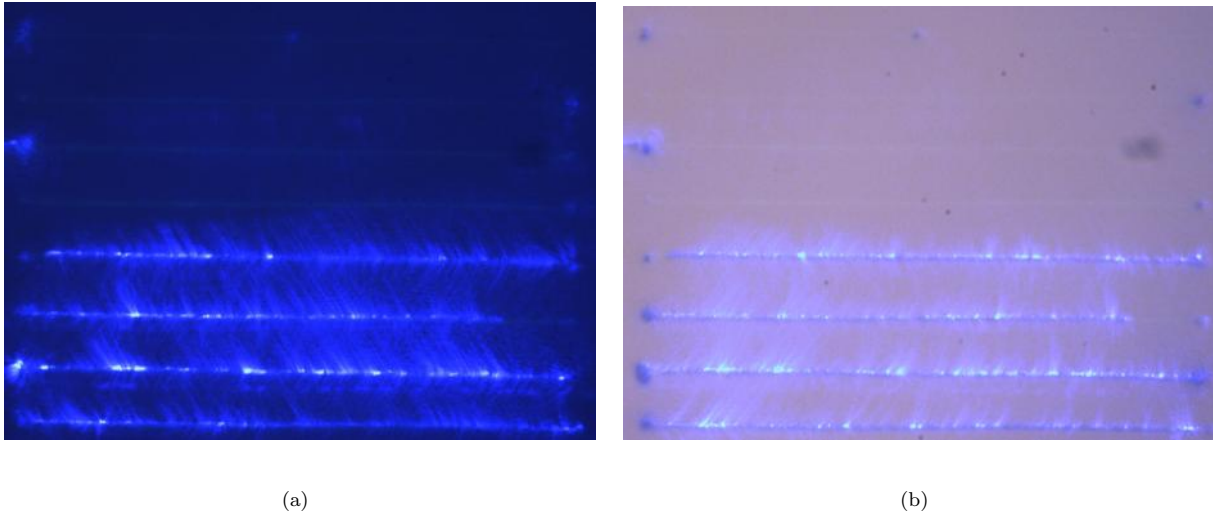


图 9 激光照射观察 (a) 结果 1(b) 结果 2

Fig. 9. Laser Irradiation Observation(a) Result 1(b) Result 2

在激光技术的应用下, 无论是刻蚀出的中空结构还是折射率变化产生的纹理, 都能被清晰地观察到。通过对比分析, 我们发现中空结构的衍射效果表现出明显的不均匀性, 这可能是由于热效应等因素导致的加工不均匀。这种不均匀性可能会影响光学器件的性能。相比之下, 折射率变化的纹理加工则显示出良好的均匀性, 这对于构建高性能的光学器件是非常有利的。

因此, 我们可以推断, 在加工速度为 $10\mu\text{m/s}$ 的条件下, 诱导折射率变化的临界光强大约为 $420\mu\text{W/}$ 。这个参数可能还与加工深度有关, 但由于时间限制, 我们未能记录这一数据。我们将在后续的折射率光栅部分提供包括加工深度在内的更多参数信息。

4.1.3 诱导折射率转变-速度调控

除了光强之外, 加工速度也是影响激光直写加工效果的关键参数。为了深入理解加工速度对加工质量的具体影响, 我们在实验中固定了激光的加工功率为 $501.6\mu\text{W}$, 并系统地调整了加工速度。

实验的起始点是 $10\mu\text{m/s}$ 的加工速度, 并且每次增加 $10\mu\text{m/s}$, 以此对 TPU 柔性材料进行纹理加工。

通过这种方式，我们能够细致地观察不同速度下加工出的纹理特征。实验结果，如图10(a)和10(b)所示，揭示了加工速度对加工效果的显著影响。在图示中，右侧的刻蚀速度快于左侧，加工速度的增加应当会导致加工纹理的变化。

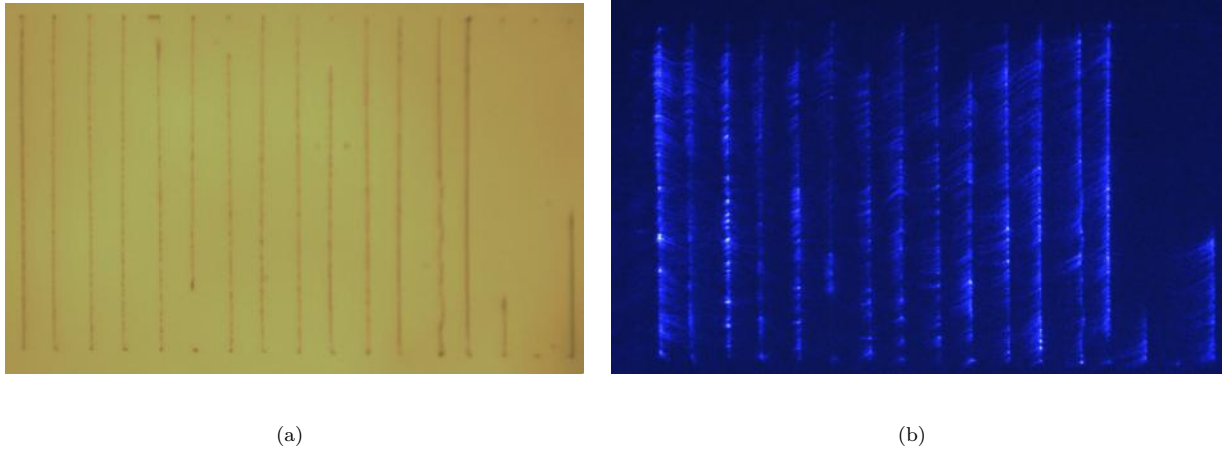


图 10 速度调控 (a) 结果 1(b) 结果 2

Fig. 10. Speed Control(a) Result 1(b) Result 2

从图像分析中可以明显观察到，通过调整加工速度所得到的结构均匀性并不理想。具体来说，结构中不仅出现了不连续的断点，还伴随着明显的步进现象，这些特征表明加工过程中存在不稳定性。

进一步观察，在预期中，较高的加工速度应该能够产生更精细的中空结构，并可能伴随折射率的变化。然而，实验结果与我们的预期相悖。随着加工速度的提高，我们注意到一些中空结构意外地变得更加粗糙，而在本应形成中空结构的区域，折射率的改变也并未如预期那样发生。

基于这些观察，我们推测折射率的改变可能需要在一個稳定且缓慢的加工环境中才能被有效诱导，这可能是由热效应和其他相关机制共同作用的结果。在加工速度较快时，热效应可能不足以产生显著影响，导致我们未能观察到预期的折射率变化。因此，加工速度的稳定性和控制对于实现理想的折射率改变至关重要，而高速加工可能由于热效应的不足而无法达到这一目的。这些发现强调了在激光加工中精确控制加工参数的重要性，以及进一步研究不同加工条件下材料响应的必要性。

4.1.4 折射率光栅

在完成了对折射率加工临界条件的深入研究之后，我们进一步探索了利用折射率变化进行光栅加工的可能性，而不是采用传统的内部纹理刻写方法。我们精心选择了特定的加工参数，以期达到最佳的加工效果。具体来说，我们设定了光强为 $280.5\mu W$ ，加工速度为 $10\mu m/s$ ，加工深度为 $0.37mm$ 。对于光栅的设计参数，我们设定了光栅的长度为 $0.2mm$ ，间距为 $0.02mm$ ，厚度为 $0.02mm$ ，即在 $0.02mm$ 的厚度内刻

写了三层光栅。得到的折射率光栅如图11(a)和图11(b)所示。

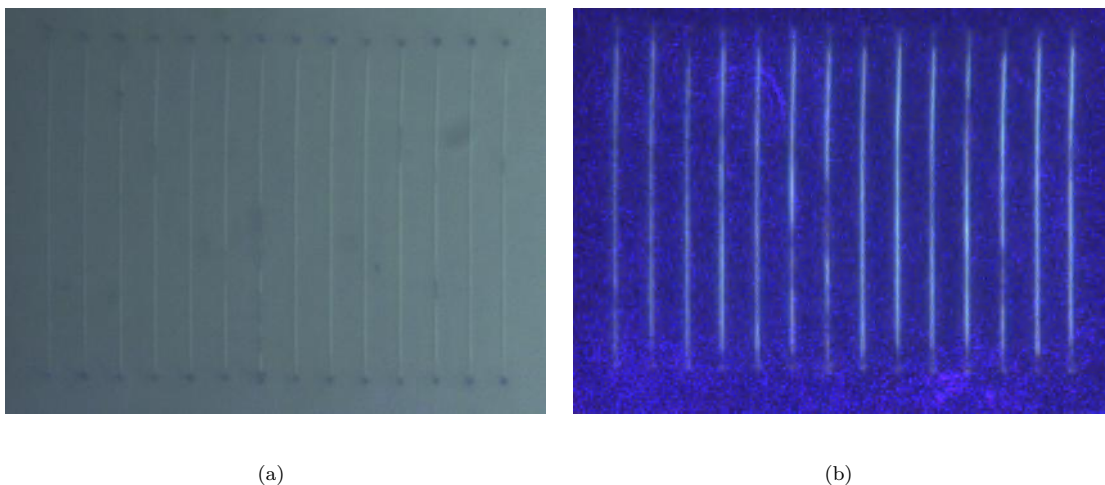


图 11 折射率光栅 (a) 结果 1(b) 结果 2

Fig. 11. Refractive Index Grating(a) Result 1(b) Result 2

可以看出，三层的加工效果极好，相比于单层的基本必须借助激光进行观察，三层结果已经可以通过白光进行观察。同时，其加工纹理十分均匀，只有极个别点发生了灼烧刻蚀，形成一小段的中空结构。

在加工中我们也发现，中空结构具有一定的诱导连续性，即从中空结构开始加工，原本应当诱导折射率改变的条件此时变成刻蚀出中空结构。因此在加工中我们时刻观察加工效果，一旦出现微小的中空结构需要停止加工并在短时间内再次启动。但整体来说，折射率光栅加工效果较好，在激光衍射下加工纹理也十分均匀，可见度很高，说明三层应当能够大幅度提高折射率光栅的品质。

为评估折射率光栅的效果，我们利用 He-Ne 激光器聚焦后进行照射，实验演示如图12(a)和12(b)所示。

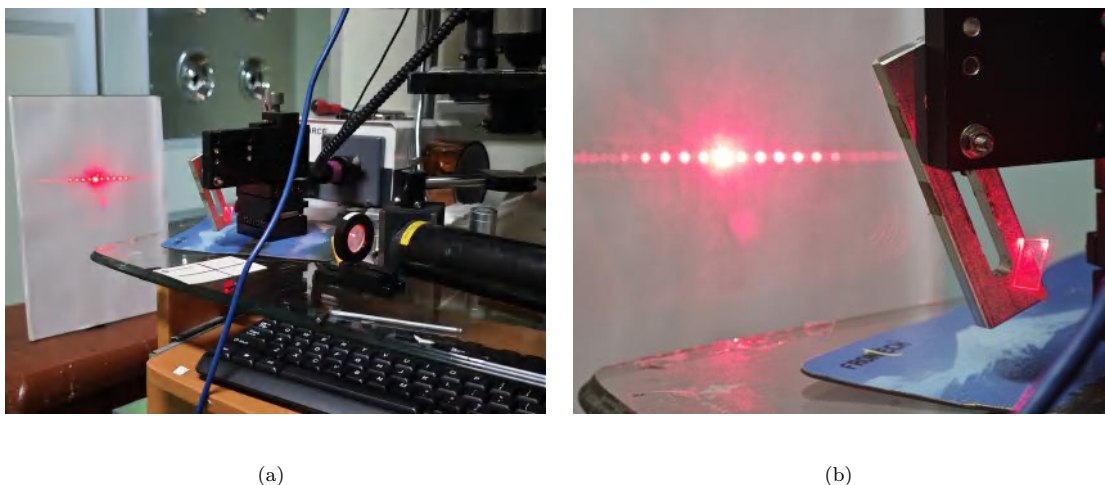


图 12 实验演示 (a) 全局 (b) 局部

Fig. 12. Experimental Demonstration(a) Global(b) Local

其衍射结果如图13(a)和13(b)所示

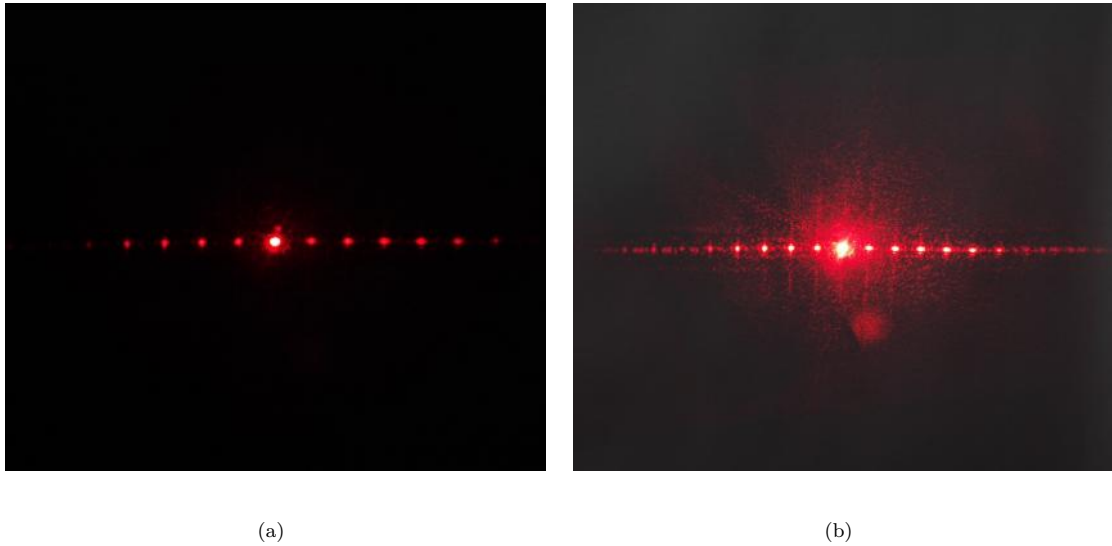


图 13 衍射结果 (a) 暗 (b) 亮

Fig. 13. Diffraction Results(a) Dark(b) Bright

可以看出，此时衍射结果十分明显，衍射高级次的结果也可以观测到，并且光强都较高，能够观测到 5 级衍射级次。同时衍射毛刺也并不多，这与折射率光栅的加工状态较好是密不可分的。证明了诱导折射率变化能够很好地制造光学器件。

除了横向的衍射级次，在提高光强后我们也能观测到竖向的一个较小周期的衍射级次，经过推测，这可能是由于光栅两侧均匀的斑点（此斑点是人为刻写，为找到光栅位置）所连成的线产生的，其并不均匀且较弱，与结构的不均匀和对称性较差相吻合。但此结果对横向观测并没有影响，折射率光栅仍然能够很好地实现衍射。

4.2 PVC 内部直写加工

除了探究 TPU 材料性质之外，我们还对 PVC 材料的特性进行了研究。PVC 即聚氯乙烯，是最常见的柔性塑料之一，其具有良好的柔性和较低的熔点，非常适合内部激光直写。我们主要对其加工深度和内部烧蚀特性进行了探究，并且利用其烧蚀特性制作了不同周期的布拉格光栅。实验中我们使用 20 放大倍数 0.4 数值孔径的物镜，并利用波长 800nm 的激光进行刻蚀。

4.2.1 加工条件探究

从前文可以看出，对于柔性材料内部激光直写加工，控制激光光强和速度可以做到改变材料折射率甚至刻蚀出单槽。一般而言激光光强越大，直写速度越慢，越容易刻蚀出单槽，对于 PVC 也不例外。故对

于 PVC 材料我们主要希望探究加工深度与激光光强的关系。探索内部加工深度不仅可以研究柔性材料加工的内部物理过程，也可以知道 PVC 材料能够加工的大致范围。

实验中我们使用 $300\mu\text{W}$ 激光功率，以 $10\mu\text{m/s}$ 的直写速度得到加工深度极限的结果如14(a)、14(b)所示

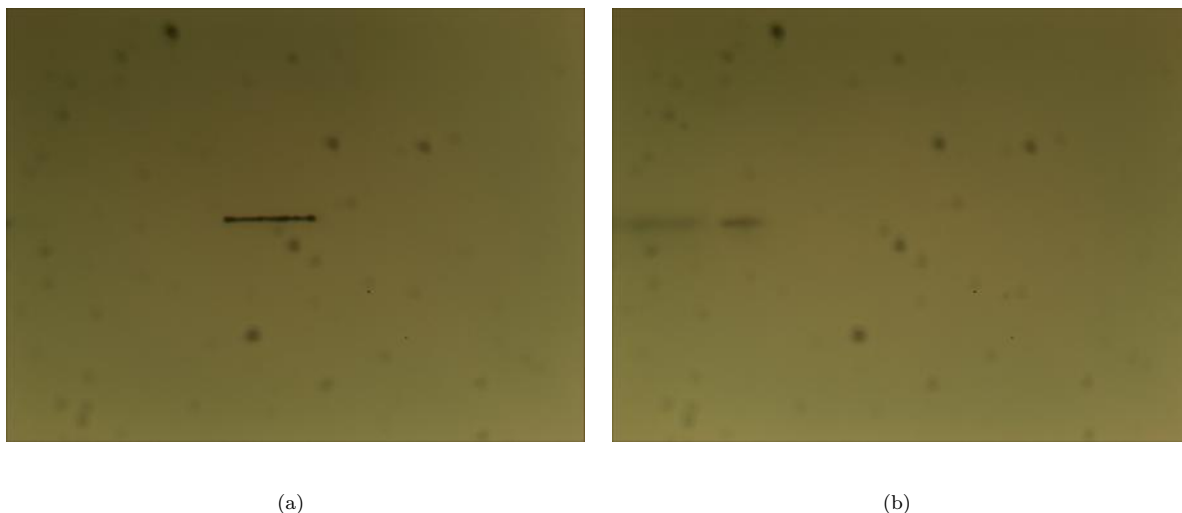


图 14 $300\mu\text{W}$ 功率激光直写加工结果 (a)0.97mm 深度加工结果 (b)0.98mm 深度加工结果

Fig. 14. $300\mu\text{W}$ Power laser direct writing processing results (a) 0.97mm deep machining results (b) 0.98mm deep machining results

可见 $300\mu\text{W}$ 功率在深度为 0.98mm 处已达到极限。

同样方法得到其余功率下加工深度如图15所示

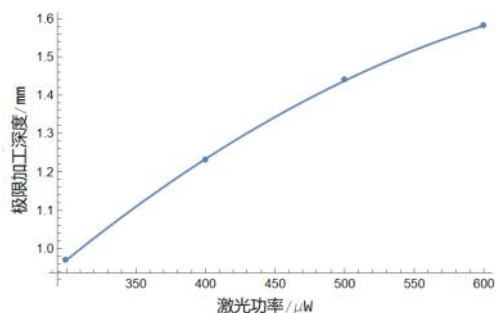


图 15 不同激光功率加工深度极限关系曲线

Fig. 15. Curve of Depth Limitation in Relation to Different Laser Power

图中利用二次函数进行拟合，拟合函数为 $-3.01 \times 10^{-6}x^2 + 0.00474x - 0.183$ 。从图中可见加工深度与激光功率关系并非线性，而是大致以二次函数的趋势变化。

在 $600\mu\text{W}$ 功率时，我们发现加工过程中不再刻蚀出单槽，而是出现烧蚀出从激光中心点向四周膨胀

的球状图案，如图16所示

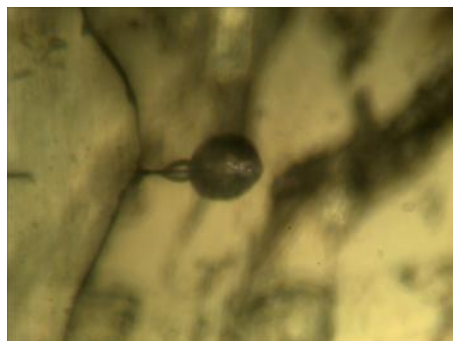


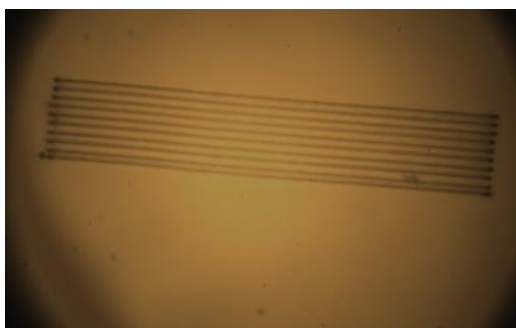
图 16 激光烧蚀球状图案

Fig. 16. Laser ablation of spherical patterns

对于该现象出现原因，推测是由于激光加工深度过深，导致激光在 PVC 内部传输过程中被材料大量吸收，热效应的积累引起 PVC 材料局部折射率特性的改变，故在透镜聚焦范围外出现该球状图案。由此可见对于 PVC 材料，控制直写速度为 $10\mu\text{m}/\text{s}$ 时，其极限加工深度大约在 1.59mm 附近，超过该加工深度容易出现球状图案的折射率改变，对于器件的刻蚀较为不利。

4.2.2 刻蚀体布拉格光栅

通过烧蚀的方法，我们可以在 PVC 内部材料中刻蚀各种结构，实验中我们使用 $700\mu\text{W}$ 功率激光，以 $20\mu\text{m}/\text{s}$ 的直写速度在深度为 0.3mm 处刻蚀出体布拉格光栅，其本质上是折射率周期性变化的透明器件，其烧蚀处折射率为空气折射率 1，而为烧蚀处为 PVC 折射率 1.54。实验中所刻光栅条纹长度为 0.5mm，水平方向间距为 $10\mu\text{m}$ ，竖直方向间距为 $20\mu\text{m}$ ，水平条纹数为 10，竖直条纹数为 3。得到的布拉格光栅如图17(a)、17(b)所示



(a)



(b)

图 17 (a) 布拉格光栅示意图 (b) 注入激光得到的光栅形状

Fig. 17. (a) Bragg Grating Schematic (b) Grating Shape Obtained from Injected Laser

可以看出光栅条纹在显微镜下清晰可见，条纹刻蚀均匀，有良好的区分度，证明 PVC 非常适合内部烧蚀加工。

通过 He-Ne 激光器我们可以对光栅的衍射效应进行更进一步的探究，实验中得到的衍射光斑如图18所示

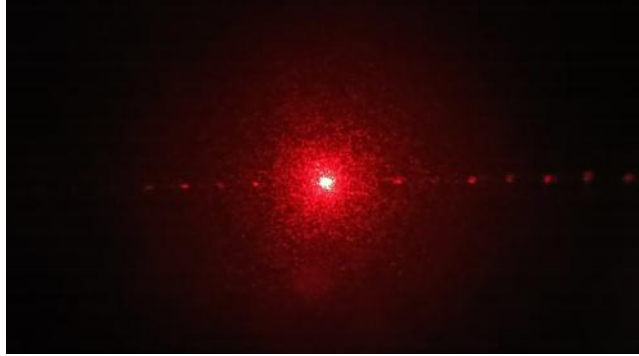


图 18 衍射光斑 1

Fig. 18. Diffraction spot 1

可见衍射效应十分明显，光强集中在中心，且可以看到较高级次的衍射光斑。但光斑光强分布明显不均，推测是刻蚀条纹与 PVC 材料表面并不完全平行使得两侧吸收光强不均所致。

更进一步我们探究了光栅常数对衍射光斑的影响，实验中我们以同样的条件刻蚀了条纹长度为 0.5mm，水平方向间距为 $20\mu\text{m}$ ，竖直方向间距为 $20\mu\text{m}$ ，水平条纹数为 10，竖直条纹数为 3 的体布拉格光栅，其相比于上述光栅水平方向间距增大了一倍，得到衍射光斑图案如图19所示



图 19 衍射光斑 2

Fig. 19. Diffraction spot 2

可见水平方向间距为 $20\mu\text{m}$ 时其次级光斑强度明显变亮，且间距明显变小。根据实验数据计算得到的

其各级衍射角如下表所示

表 2 水平间距 $10\mu\text{m}$ 光栅所成光斑发散角

Table 2. Divergence Angle of the Light Spot Formed by a Grating with a Horizontal Spacing of $10\mu\text{m}$

光斑级次	1	2	3	4	5
发散角/ $^\circ$	4.25	6.39	8.62	10.57	12.88

表 3 水平间距 $20\mu\text{m}$ 光栅所成光斑发散角

Table 3. Divergence Angle of the Light Spot Formed by a Grating with a Horizontal Spacing of $10\mu\text{m}$

光斑级次	1	2	3	4	5
发散角/ $^\circ$	2.11	3.95	5.81	7.98	9.77

可见随着光栅水平间距增加，衍射光斑各级发散角明显减小，其各级间距也有所减小。

5 结论

在本次实验中，我们对飞秒激光的柔性材料加工进行了探索，研究充分且分析到位。

首先我们利用 TPU 材料，采用了 10mm 焦距和 0.25 孔径的物镜，使用 800nm 波长的激光进行实验。经过初步摸索，确定了最佳加工距离和条件，空气中加工距离为焦点外 0.03mm ，内部刻蚀为 0.02mm 。在固定功率 $400\mu\text{W}$ 的条件下， $0.01\mu\text{m/s}$ 的速度能够实现均匀线条的刻写，而 $0.02\mu\text{m/s}$ 则产生步进效果。初步加工结果显示，仪器能有效刻写复杂图形，光栅的加工间距虽然不均匀，但可通过调控实现改进。

接着通过光强调控，我们探讨了诱导折射率变化的临界条件。在固定速度 $10\mu\text{m/s}$ 下，不同光强下的加工结果表明，当光强降低至 $420\mu\text{W}$ 左右时，能够实现均匀的折射率改变，而非直接刻蚀。相比于使用自然光，激光照射下的折射率变化表现更为显著，能够有效观察到条纹。这一发现为折射率光栅的制造提供了新的思路。

同时，在固定功率下改变加工速度的实验中，发现速度调控导致的中空结构不均匀且可能影响折射率的诱导变化。加工速度过快时，无法有效实现折射率变化，可能是由于热效应等原因。因此，稳定的加工条件对诱导折射率改变至关重要。

在 TPU 材料中，最终我们成功利用诱导折射率改变的技术制造了光栅，其加工效果显著。三层光栅

的均匀性和可见性较高，通过 He-Ne 激光照射，观测到清晰的衍射结果，验证了折射率光栅的良好性能。这一研究为光学器件的制造提供了新的方法和方向，表明诱导折射率变化在实际应用中具有广阔前景。

我们还研究了 PVC 材料的加工特性。实验中，我们利用了 20mm 焦距，0.4 孔径的物镜，波长 800nm 的激光，对不同激光功率下直写加工的极限加工深度进行了探究，得到了加工深度与激光功率关系曲线，同时在 1.59mm 处发现烧蚀出圆形图案的现象，确定了 PVC 材料的极限加工深度为 1.59mm 附近。

最后我们通过激光烧蚀的方式刻蚀出条纹长度为 0.5mm，水平方向间距为 $10\mu\text{m}$ ，竖直方向间距为 $20\mu\text{m}$ ，水平条纹数为 10，竖直条纹数为 3 的体布拉格光栅，并得到其衍射光斑图案，最后我们改变水平方向间距为 $20\mu\text{m}$ 再次以相同方式制作一光栅，并与原光栅图案对比，得到其发散角与光栅常数的关系。

参考文献

- [1] Balling P ,Schou J .Femtosecond-laser ablation dynamics of dielectrics: basics and applications for thin films[J].Reports on Progress in Physics,2013,76(3):036502.
- [2] Liao J N, Zhang D S, Li Z G. Advance in femtosecond laser fabrication of flexible electronics[J]. Opto-Electron Eng, 2022, 49(2): 210388.
- [3] Wang X, Yu H, Li P, et al. Femtosecond laser-based processing methods and their applications in optical device manufacturing: A review [J]. Optics and Laser Technology, 2021, 135: 106687.
- [4] Yong J L, Chen P, Li H, et al. Femtosecond laser direct writing of porous network microstructures for fabricating super-slippy surfaces with excellent liquid repellence and anti-cell proliferation [J]. Advanced Materials Interfaces, 2018, 5(6): 1701250.
- [5] Zhao Y Y, Jin F, Dong X Z, et al. Femtosecond laser two-photon polymerization three-dimensional micro-nanofabrication technology[J]. Opto-Electron Eng, 2023, 50(3): 220048.
- [6] 韵建鹏. 超疏水表面的制备技术及应用 [J]. 工程研究与实用, 2020, 1(6): 1-5.
- [7] Wang S, Yang J, Deng G, Zhou S. Femtosecond Laser Direct Writing of Flexible Electronic Devices: A Mini Review. Materials. 2024; 17(3):557.
- [8] 吴志军. 飞秒激光在生物学方面的应用情况 [J]. 光电子, 2016, 6(2): 66-74.
- [9] 董彬, 张娟, 王达伟, 等. 飞秒激光加工微纳光学器件 [J]. 光电工程, 2023, 50(3):74-99.
- [10] 赵圆圆, 金峰, 董贤子, 等. 飞秒激光双光子聚合三维微纳结构加工技术 [J]. 光电工程, 2023, 50(3): 220048. doi: 10.12086/oe.2023.220048
- [11] Minhua He,Li Guan, Duanming Zhang Advances in Condensed Matter Physics 凝聚态物理学进展, 2013, 2, 42-50
- [12] 燕超月, 孙盛芝, 刘小峰, 等. 飞秒激光减材法制备透明材料内部三维微纳连通结构研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21):2100001.DOI:10.3788/LOP223126.

Femtosecond Laser Internal Direct Writing Processing in Flexible Materials

Shangrun Lu¹⁾ Ning Zhao¹⁾ Yifeng Deng¹⁾

¹⁾ (*Sun Yat-sen University, School of Physics, Guangzhou 510275, China*)

Abstract

Femtosecond lasers have extremely short pulse widths, allowing for material processing with very high precision and minimal heat damage. This experiment studied the internal direct writing technology of femtosecond lasers in thermoplastic polyurethane (TPU) and polyvinyl chloride (PVC), exploring the effects of laser wavelength, processing distance, and power on the processing results. For TPU material, it was found that under different light intensities and speeds, not only could it achieve the writing of hollow structures, but it could also achieve uniform refractive index changes. Moreover, laser processing demonstrated good control over complex patterns, and we successfully manufactured high-quality refractive index gratings, verifying their potential application in optical devices. For PVC material, we explored its limit processing depth under different laser powers, gained a deeper understanding of the internal processing mechanisms, and obtained the limit processing depth of PVC material. Additionally, by ablating PVC material, we obtained volume Bragg gratings and discussed the impact of grating horizontal spacing on the diffraction spot pattern. This study provides a new direction for the development of optical devices in flexible materials. For PVC materials, we explored the ultimate processing depth under different laser powers, had a deeper understanding of the internal processing mechanism, and obtained the ultimate processing depth of PVC materials, and we obtained the volume Bragg grating by ablating the PVC material, and discussed the influence of the horizontal spacing of the grating on the diffraction spot pattern. This research provides a new direction for the development of optical devices with flexible materials.

Keywords: Flexible Materials, Femtosecond Processing, Grating Diffraction