材料、结构及工艺

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.20260211001

连续光和脉冲光在近紫外激光直写光刻中曝光特性差异研究

王树桐[1,2]，周　庆[1,2]，吴衍青[1,2]，王中阳[1,2*]，龙家丽[1,2*]

（1. 中国科学院上海高等研究院，上海 201210；2. 中国科学院大学，北京 100049）

摘　要： 针对近紫外激光直写光刻过程中正光刻胶在连续光与脉冲光下的曝光行为差异，研究搭建了基于405 nm连续光与中心波长为400 nm飞秒脉冲光直写系统，通过对比实验分析了二者在刻写方面的不同表现。结果表明，在相同曝光剂量下，飞秒脉冲光因功率密度较高，易出现互易性失效与吸收饱和现象，导致其刻写深度显著低于连续光，且刻写点直径增大、侧壁角减小，形貌更为平缓。相比之下，连续光在较低功率密度下遵循剂量互易原则，刻写点的直径更小、侧壁结构更陡峭。该研究揭示了近紫外波段下脉冲光与连续光在正性光刻胶响应机制上的区别，也为高精度激光直写工艺中的光源选型以及工艺参数的优化提供了部分理论指导与应用参考。

关键词： 激光直写光刻；曝光剂量；连续光；飞秒光

中图分类号： O439；TN305.7　**文章编号：** 1001－5868(2026)03－0514－07

Differences in Exposure Characteristics between Continuous-Wave and Pulsed Lasers in Near-UV Laser Direct Writing Lithography

WANG Shutong[1,2], ZHOU Qing[1,2], WU Yanqing[1,2], WANG Zhongyang[1,2], LONG Jiali[1,2]

（1. Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, CHN;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, CHN）

Abstract: To investigate the differences in the exposure behavior of positive photoresists under continuous-wave (CW) and pulsed lasers in near-ultraviolet (near-UV) laser direct writing lithography, we constructed direct writing systems utilizing a 405 nm CW laser and a femtosecond pulsed laser with a central wavelength of 400 nm and analyzed their distinct patterning performances through comparative experiments. The results demonstrated that, under identical exposure doses, the femtosecond pulsed laser, owing to its extraordinarily high power density, was highly susceptible to reciprocity failure and absorption saturation. Consequently, this led to a significantly shallower patterning depth compared with the CW laser, accompanied by an increased feature diameter, a reduced sidewall angle, and a flatter overall morphology. In contrast, the CW laser, operating at lower power densities, adhered to the principle of dose reciprocity, resulting in patterned features with smaller diameters and steeper sidewall structures. This study elucidates the distinct response mechanisms of positive photoresists to pulsed versus CW light in the near-UV regime, providing theoretical guidance and a practical reference for light source selection and process parameter optimization in high-precision laser direct writing processes.

Key words: laser direct writing lithography; exposure dose continuous light; femtosecond light

收稿日期：2026－02－11.

*通信作者：王中阳，龙家丽

0　引言

光刻技术因其高加工精度、高成品率在半导体制造、微纳加工等领域得到广泛应用。激光直写光刻作为一种高灵活性、高分辨率的无掩模光刻技术，已成为微纳结构制备与功能器件制造的重要方法。其通过聚焦激光束在光刻胶表面进行扫描曝光，直接“书写”出预设的图案，避免传统光刻中掩模版的制作与对准步骤，特别适用于原型开发、定制化器件及复杂三维结构的加工。随着激光技术的发展，激光直写光刻的分辨率不断提高，尤其是超快激光的引入，使其分辨率突破亚微米级别，甚至在结合超分辨光刻技术后达到 9 nm 的精度[1]。近年来，激光直写光刻的研究重点持续聚焦于实现复杂的三维功能结构[2]、突破衍射极限[3-4]，以及提升加工的智能化水平[5]。

早期，激光直写光刻研究多采用连续光，其曝光机理主要基于单光子吸收，并通常使用近紫外波段光源对光刻胶进行曝光[6-7]。而脉冲激光直写光刻主要是利用双光子吸收效应，使用近红外段光源对光刻胶进行曝光[8]。不同于常见的单光子吸收加工的精度受到衍射极限的限制，双光子吸收具有显著的阈值效应，只有在激光聚焦焦点中一个极小的区域内，能量密度达到一定的阈值才曝光，因此飞秒激光加工的精度可突破衍射极限限制的尺寸[9]。

大部分光刻胶在近紫外波段吸收较强，因此使用近紫外波段波长的光进行激光直写效率较高；同时，脉冲光具有强峰值功率、高加工精度，在激光直写中被大量应用。但正如前面提到，绝大部分脉冲光都利用了光刻胶的双光子吸收效应。在现有文献中，针对近紫外波段下连续光与脉冲光对光刻胶曝光行为的系统性对比研究仍较为有限。因此，本研究使用 405 nm 波长的连续光和中心波长为 400 nm 的飞秒光，从多个维度系统地分析了正光刻胶在近紫外波段下两种光进行激光直写的区别。

1　实验部分

1.1　实验装置

实验分别搭建 405 nm 连续光激光直写光刻系统及中心波长为 400 nm、重复频率为 1 kHz、脉冲时间为 100 fs 的飞秒光激光直写光刻系统。在飞秒光源参数选择上，选用该超短脉冲是为在较低平均功率下获得极高瞬时峰值功率密度，从而有效揭示光刻胶的非线性光化学响应机制。在波长 400 nm 和 405 nm 处，光刻胶的吸收度分别为 0.406 和 0.401，二者差异较小，因此可忽略波长差异带来的影响。

图 1 为激光直写光刻系统，采用了两束光源，分别为刻写光以及 532 nm 的定焦光束。飞秒脉冲光和连续光的激光直写系统仅在光源处有区别：连续光刻写系统直接使用 405 nm 波长的光源，飞秒脉冲光刻写系统使用 800 nm 飞秒激光器（重复频率为 1 kHz，脉冲时间为 100 fs），经 BBO 倍频晶体及低通滤波片输出中心波长为 400 nm 的光。将刻写光和 532 nm 的定焦光分别通过透镜进行扩束，通过二向色镜 DM 将两束光共线入射进入物镜（100×，N_A=0.95），样品台采用电动三维纳米位移台。调节 532 nm 定焦光的发散度使得刻写光与定焦光共焦，使用任意函数发生器进行时间控制，并通过 532 nm 波长的定焦光实时确定刻写光的聚焦状态。

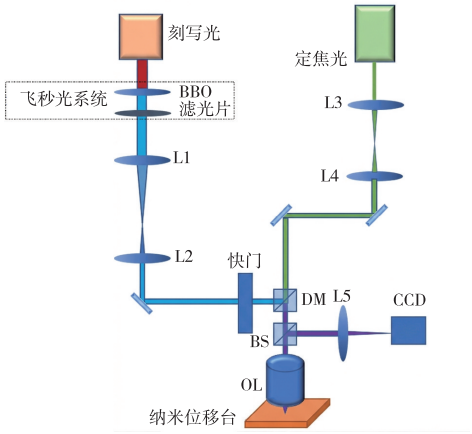


图 1　激光直写光路图

1.2　实验流程

实验采用的光刻胶旋涂基底为硅片，将其切割成 0.5 cm×0.5 cm 大小，分别使用异丙醇、无水乙醇、蒸馏水利用超声波清洗机进行清洗，并用纯净气体将其吹干。光刻胶选用正性光刻胶 AR-P 3120，稀释比例为 1∶3.5，旋涂在已清洁的硅片上，前烘温度为 100℃，烘烤时间为 1 min，可以使厚度稳定在 55 nm。曝光功率使用功率计在物镜出射口端测量，曝光结束后进行显影及后烘，最后使用原子力显微镜（AFM）进行表征。

2　实验结果及分析

2.1　定焦精度

由于本实验采用的物镜数值孔径较大，其有效

焦深约为500 nm，且制备的光刻胶膜层厚度仅为55 nm。为确保后续曝光实验严谨可靠，必须保证光束焦点精确锁定在极薄的光刻胶内部。分别使用连续光（CW）和飞秒脉冲光（PL）进行定焦测试，每次刻写点的Z方向移动距离为500 nm，离焦位置与刻写直径的关系为图2。从图中可以看出，在焦点处，即当Z=0时，刻写直径最小，随着离焦，刻写点直径逐渐变大。通过定焦光同步控制刻写光的位置误差可满足实验需求。

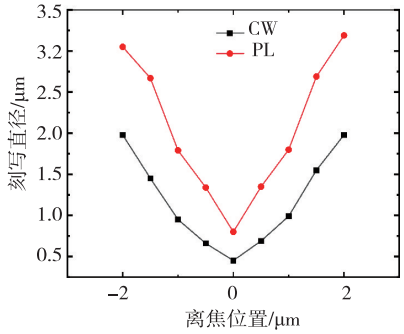


图2 离焦位置与刻写深度的关系图

2.2 相同剂量下不同功率刻写研究

2.2.1 实验

曝光剂量（D）、曝光时间（t）及曝光功率（E）的关系为：

$$D = Et \tag{1}$$

由公式（1）可知，通过改变时间可得到相同剂量下的不同功率。表1展示了在固定曝光剂量（90 mJ/cm²）下，通过调整曝光时间所对应的不同功率条件下的刻写深度。可知，在连续光实验中，刻写深度基本不随功率变化，维持在约39.5 nm左右；而在飞秒光实验中，刻写深度随功率升高由约4 nm下降至接近0 nm，表现出明显的功率依赖特性。

表1 在90 mJ/cm²曝光剂量下连续光和飞秒光在不同功率下的刻写深度

P/μW	连续光刻写深度/nm	飞秒光刻写深度/nm
0.1	39.50	4.11
0.2	39.48	2.12
0.3	38.98	0.95
0.4	39.12	0.05

为系统比较连续光与飞秒光在不同曝光条件下的刻写特性，选取5种不同剂量，并在每种剂量下分别设置多个功率进行刻写实验，所获得的刻写深度结果如图3和图4所示。当使用连续光进行刻写实验时，在相同的剂量下刻写深度几乎不会因为激光功率的变化而变化。由图3可知，当刻写剂量为140 mJ/cm²，使用50 nW至400 nW功率时，刻写深度均为42 nm左右。但当使用飞秒光进行刻写时，在多种曝光剂量下刻写的深度均随着功率的增大而减小。由图4可知，同样以140 mJ/cm²剂量进行曝光时，刻写深度由功率为50 nW的9 nm降至功率为300 nW的2 nm。

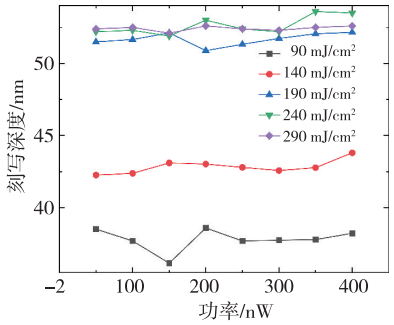


图3 5种不同剂量下使用连续光的刻写深度随功率的变化

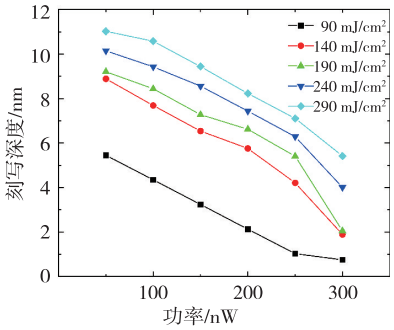
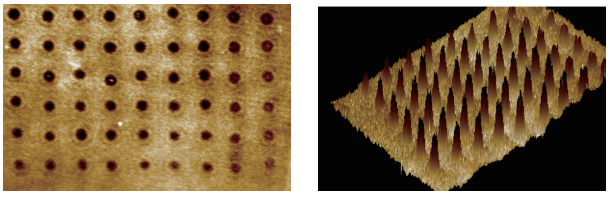


图4 5种不同剂量下使用飞秒光的刻写深度随功率的变化

如图5是以飞秒光为光源，使用多种剂量，分别在不同功率下的刻写结果。其中每行使用相同的曝光剂量，从下至上逐渐增加，每列使用相同的功率，从左至右逐渐增加。可以发现，从左至右随着功率的增加，刻写的深度逐渐降低。



（a）AFM二维图像 （b）AFM三维图像

图5 以飞秒光为光源使用多种剂量在不同功率下的刻写的AFM二维和三维图像

在剂量和功率完全相同的情况下，使用连续光刻写的深度明显高于飞秒光。在曝光剂量为140 mJ/cm²，功率为300 nW时进行曝光，使用连续光的刻写深度为42 nm，但使用飞秒光进行刻写时

刻写深度仅为 2 nm。

连续光和飞秒光的刻写深度均随着曝光剂量的增加而变大，当连续光剂量达到 190 mJ/cm^{2}时光刻胶已经实现完全曝光，但此时飞秒光的刻写深度仍然很小。

2.2.2　分析

由以上实验可知，当使用飞秒脉冲激光进行刻写时，相同剂量、不同功率的刻写深度不相同，表明此时实际的有效曝光剂量不再依赖于时间与功率的乘积。Albers 等通过光化学反应动力学模型，利用光刻胶曝光过程中的互易失效现象解释了这一现象，并提出基于两步光化学反应动力学“模型”[10]：

$$\mathrm{M} \underset{k_2}{\overset{k_1}{\rightleftharpoons}} \mathrm{M}^* \xrightarrow{k_3} \mathrm{P} \tag{2}$$

光活性分子（M）吸收光子后被激发至中间态（M*），随后可返回基态或发生化学反应生成最终产物（P）。其中，k_1是光激发速率常数，k_2是激发态衰减的总速率常数，k_3是激发态转化为最终产物 P 的化学反应速率常数。

$$k_1 = k_f I \tag{3}$$

$$k_2 = k_f I + k_s + k_q \tag{4}$$

模型指出，在持续光照下，光活性分子的激发态（M*）与基态（M）的浓度比例为：

$$\frac{\mathrm{M}^*}{\mathrm{M}} = \frac{k_f I}{k_f I + k_s + k_3} \tag{5}$$

式中，k_f是受激发射系数，k_s是激发态自发辐射衰减的速率常数，k_q是猝灭速率常数。

在高功率密度（I）下，会达到一个动态平衡，导致反应速率不再随光强线性增加，从而破坏了曝光量 $D=Et$ 确定反应程度的互易原理。估算互易失效的临界功率密度约为 5×10^3 W/cm^2，对应曝光时间不超过 10 μs。而实验中所用的飞秒光的功率密度最低为 10^9 W/cm^2，远超互异性失效的临界值，因此此时的曝光剂量不再依赖于时间与功率的乘积。但该模型未考虑猝灭效应，是一个保守估计，其准确性受限于模型假设。在飞秒极高峰值功率下，猝灭效应会使大量激发态分子无辐射返回基态，导致实际的有效产酸量更低。因此，真实的互易性失效比该理论预测得更为显著，这进一步从光化学层面佐证了本文中飞秒刻写深度随功率增大反而变浅的实验现象。

同时，当使用飞秒脉冲激光进行刻写时，刻写的深度远小于连续光，并随着功率的增大逐渐变小。通过实验发现，当功率较高时除了互异性失效，还有可能出现吸收饱和的现象。当吸收饱和时，透过率接近于 1，可以通过透过率与单个脉冲入射剂量的关系来推断吸收饱和发生时的功率密度。在单个脉冲曝光下，透过率 T 与曝光剂量 F 的关系为[11]：

$$T(F) = \exp\left[-N\sigma L \cdot \exp\left(-2\frac{\sigma}{h\nu}F\right)\right] \tag{6}$$

$$N = \frac{(\rho \times w) \times N_A}{M} \tag{7}$$

$$\sigma = \frac{\alpha}{N} \tag{8}$$

式中，N为光刻胶的数密度，σ为吸收截面，L为光刻胶的厚度，$h\nu$为光子能量，ρ为光刻胶的密度，w为光刻胶有效成分的质量分数，N_A为阿伏伽德罗常数，M为光刻胶的分子量，α为吸收系数。

实验使用的参数对应值如表 2 所示，图 6 由表 2 对应数值及公式（5）计算得出。在输入剂量达到 20 mJ/cm^{2}后，随着输入剂量的增加吸收度趋近于 0，透过率趋近于 1，此时达到吸收饱和。

表 2　光刻胶相关参数的对应值

参数	数值
ρ	1.15 g/cm^3
w	0.85
α	3.38×10^4 cm^{-1}
$h\nu$	4.966×10^{-19} J
L	55 nm
M	260 g/mol

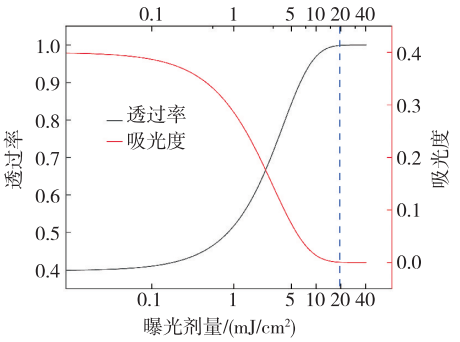


图 6　透过率、吸收度随曝光剂量增加的变化曲线

当单个脉冲入射剂量为 20 mJ/cm^{2}时，对应的脉冲激光功率密度为：

$$E = \frac{20\ \mathrm{mJ/cm^2}}{100\ \mathrm{fs}} = 2\times10^{11}\ \mathrm{W/cm^2}$$

由飞秒激光的频率为 1 kHz，对应实际刻写光

斑半径为350 nm，可计算此时功率计测得的激光平均功率应为0.1 μW。

对于正性光刻胶，曝光过程本质上是光致产酸剂吸收光子后分解产酸的过程[12]。然而，在如此高的峰值功率密度下，材料易进入吸收饱和状态—即光致产酸剂分子被激发至激发态的速率达到上限，导致光子吸收效率不再随光强增加而线性提升，实际参与反应的产酸剂数量受到限制。因此，尽管峰值功率极高，有效产酸量并未同比增加，这直接影响后续酸催化反应的程度与显影形貌的形成。

由计算可知，当使用本实验的飞秒光系统时，光强大于0.1 μW则会发生吸收饱和效应。为验证上述计算所预测的吸收饱和效应，分别使用连续光和飞秒光在0.1～0.3 μW的光强进行实验，设置时间为5～200 ms得到的刻写结果如图7所示。当曝光时间为5 ms时，功率从0.1 μW增至0.3 μW，刻写深度仅变化约0.5 nm。该结果表明，在吸收饱和状态下，有效光强趋于饱和值，此时实际有效曝光剂量主要取决于曝光时间，刻写深度不再随功率上升而显著增加。然而，随着曝光时间延长，在较高功率密度下，激光与硅片之间发生烧蚀作用，导致光刻胶结构损伤或功能失效。

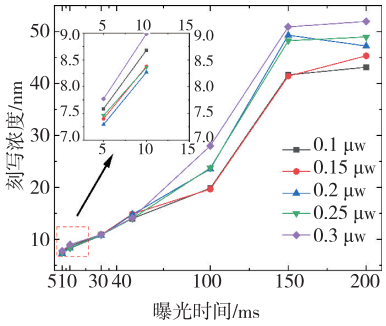


图7 在飞秒光功率较高时不同功率和时间刻写深度的变化

2.3 不同功率密度下刻写点直径及侧壁角的研究

激光聚焦时的强度分布遵循高斯分布，即在中间强，随着偏移中心成指数型降低至接近于零。然而，当光强足够高以至于引发吸收饱和时，这种高斯分布会因非线性响应而发生畸变。假设饱和光强为光实际强度的一半，如图8所示，高于此饱和光强的实际光强在光化学反应中也只是会无限接近于饱和光强的数值。这种现象会造成高斯光顶部的区域被“削平”，从而导致在功率密度比较大时，在中心处的曝光和边缘处的曝光差别变小。

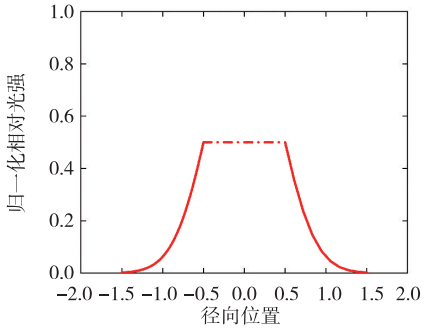
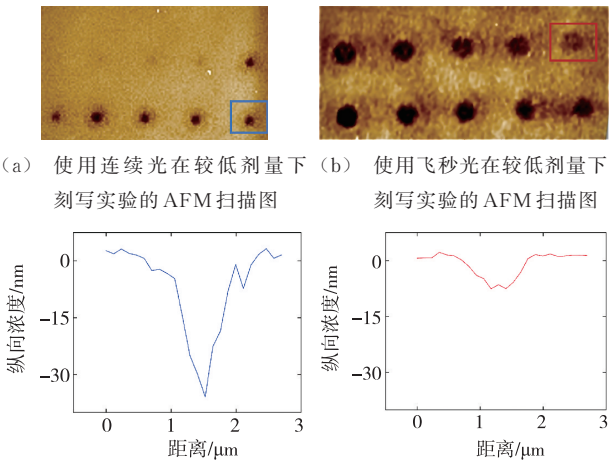


图8 达到吸收饱和阈值后光强随径向距离的变化曲线

为考察吸收饱和效应对刻写点形貌的影响，采用原子力显微镜对两类光源的刻写点进行表征。图9(a)和(b)分别为使用连续光和飞秒光在功率为0.2 μW且未使得光刻胶完全曝光时的较低剂量下进行刻写的AFM扫描图，图9(c)和(d)分别对应剂量为150 mJ/cm²时红蓝框内刻写点的纵向深度随径向距离的变化曲线。从图9(c)可以看到，在连续光曝光下，即使曝光剂量较低，也不会发生“削平”效应，只会在中心区域内达到较高的剂量累计，从而使得刻写点的直径较小，且刻写形状较为“陡峭”。但当使用功率较高的飞秒光进行刻写时，材料的吸收过程达到饱和阈值，这种“削平”效应导致边缘和中心的曝光效果接近，当中心开始发生反应时，四周也会发生反应。从图9(d)可以看出，相较于连续光，飞秒光所形成的刻写点直径更大，且轮廓也更平缓。



(a) 使用连续光在较低剂量下刻写实验的AFM扫描图 (b) 使用飞秒光在较低剂量下刻写实验的AFM扫描图

(c) 对应蓝框内扫描点的纵向深度随径向位置的变化 (d) 为对应红框内扫描点的纵向深度随径向位置的变化

图9 两类光源的刻写点的表征结果

连续光的功率密度通常较低，但脉冲光因为将能量在时间上进行了极度的“压缩”，使得峰值功率极高，从而导致刻写时的实际功率密度极高。为进

一步定量分析刻写点的形貌特征，在多种曝光剂量与功率密度条件下，系统测量了刻写点的直径与侧壁角。其中连续光选取功率密度为 1～1×10³ W/cm²，飞秒脉冲光选取功率密度为 1×10⁹～1×10¹² W/cm²，实验结果如图 10 与图 11 所示。

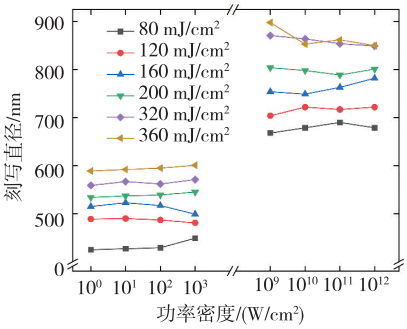


图 10　使用多种曝光剂量在不同功率密度下刻写点直径变化

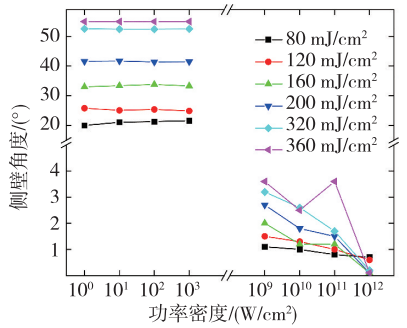


图 11　使用多种曝光剂量在不同功率密度下刻写点侧壁角变化

由图 10 可知，在相同曝光剂量下，连续光刻写点的直径显著小于飞秒脉冲光。以 120 mJ/cm²为例，连续光刻写点直径约为 500 nm，而飞秒光刻写点的直径则达到约 700 nm。但两者均未随功率密度的变化产生明显改变，这一现象可归因于二者不同的曝光响应机制：连续光系统遵循剂量互易原理，在相同累积剂量下光强分布及光刻胶的响应区域相对稳定，因此直径未出现明显波动；飞秒光则因吸收饱和效应导致光强分布在中心区域趋于平坦，其有效曝光区域在饱和阈值以上对光强变化不敏感，故直径亦保持相对恒定。侧壁角是考察刻写点形貌的重要参数，侧壁角越大刻写形貌越“陡峭”，相反则越平缓。由图 11 可知，同样当曝光剂量为 120 mJ/cm²时，连续光刻写点的侧壁角可达 25°，呈现陡峭的轮廓；而飞秒光刻写点的侧壁角仅约 1°，且随功率密度增加进一步趋近于 0°，形貌极为平缓。

综上所述，在形貌特征上，连续光得益于其线性的能量沉积，易于形成直径小、深度大、侧壁陡峭的刻写点；而飞秒脉冲光则因互易性失效与吸收饱和，导致能量沉积趋于饱和与扁平化，最终产生直径大、深度浅、侧壁平缓的刻写结构。这一鲜明的形貌对比，直观印证了二者在光刻胶中截然不同的光化学响应机制。

3　结论

本研究通过搭建 405 nm 连续光与中心波长为 400 nm 飞秒脉冲光的激光直写系统，对比分析了两者在正性光刻胶曝光行为中的关键差异。结果表明，在相同曝光剂量下，连续光刻写深度显著大于飞秒脉冲光，且其响应基本遵循剂量互易定律，刻写效果主要由累积能量密度决定；而飞秒脉冲光具有高峰值功率密度，易引发互易性失效与吸收饱和现象，导致有效曝光效率降低，刻写深度随功率升高反而下降。在形貌特征上，连续光在较低功率密度下产生直径小、深度大、侧壁陡峭的刻写点，而飞秒脉冲光则因互异性失效及吸收饱和效应，使光强分布在中心区域趋于“削平”，导致刻写点直径增大、深度变浅、侧壁平缓，形貌呈现扁平化特征。这一差异源于脉冲光高功率密度引起的光化学动态平衡与吸收饱和机制，限制了光刻胶对更高光强的线性响应。本研究为光刻工艺中光源类型与工艺参数的选择提供了部分参考。

参考文献：

[1] Gan Z, Cao Y, Evans R A, et al. Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size [J]. Nature Communications, 2013, 4: 2061.

[2] Spiegel C A, Hackner M, Bothe V P, et al. 4D printing of shape memory polymers: from macro to micro [J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(51): 2110580.

[3] Alkaisi M M, Blaikie R J, McNab S J. 70 nm Features on 140 nm period using evanescent near field optical lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2000, 53(1/4): 237-240.

[4] Yang X, Zeng B, Wang C, et al. Breaking the feature sizes down to sub-22 nm by plasmonic interference lithography using dielectric-metal multilayer[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21560-21565.

[5] Mohanavel V, Gandhimathi G, Bhardwaj D, et al. Deep learning-guided femtosecond laser processing in optical materials and devices for nano fabrication advancements [J]. Optical and Quantum Electronics, 2023, 56(2): 210.

[6] 沈亦兵，周光亚，侯西云，等. 用于二元光学掩模制作的激光直接写入系统研究[J]. 科技通报，1998, 14(3): 170-

173, 179.
Shen Yibing, Zhou Guangya, Hou Xiyun, et al. Polar coordinate laser direct writing system for binary optical masks [J]. Bulletin of Science and Technology, 1998, 14(3): 170-173, 179.

[7] 赵为党, 沈亦兵, 刘玉玲, 等. 准直小孔法自动调焦在激光直写入系统中的应用[J]. 光子学报, 1998, 27(8): 753-756.
Zhao Weidang, Shen Yibing, Liu Yuling, et al. Auto focusing in ldws by using collimating eyelet method[J]. Acta Photonica Sinica, 1998, 27(8): 753-756.

[8] Fischer J, Wegener M. Three-dimensional optical laser lithography beyond the diffraction limit[J]. Laser & Photonics Reviews, 2013, 7(1): 22-44.

[9] Mohr-Weidenfeller L, Häcker A V, Reinhardt C, et al. Two-photon direct laser writing beyond the diffraction limit using the nanopositioning and nanomeasuring machine [J]. Nanomanufacturing and Metrology, 2021, 4(3): 149-155.

[10] Albers J, Novotny D B. Intensity dependence of photochemical reaction rates for photoresists[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1980, 127(6): 1400-1403.

[11] Allam S R, Sharan A. One, two and three photon absorption of two level system in femto-second laser excitation [J]. Journal of Optics, 2017, 46(4): 486-491.

[12] Sheats J R. Reciprocity failure in novolak/diazoquinone photoresist with 364-nm exposure[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1988, 35(1): 129-131.

作者简介：

王树桐(1999—),男,山东省德州市人,硕士研究生,主要研究方向为光刻技术;

王中阳(1969—),男,浙江省安吉县人,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向为超分辨光刻、超分辨成像及超快光谱技术;

龙家丽(1974—),云南省宣威市人,博士,副研究员,主要研究方向为EUV干涉光刻、X射线成像及高能物理等。