

聚合物衬底上微纳物体的激光捕获及操控*

尹越 窦琳 沈天赐 刘家彤 谷付星†

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

(2024 年 11 月 28 日收到; 2025 年 2 月 15 日收到修改稿)

聚合物衬底克服了刚性平面衬底在空间形变场景下的局限, 并能结合光刻技术制备复杂三维异形空间结构. 光热冲镊技术实现了固体界面上对微纳物体的捕获和操控, 将该技术应用在聚合物衬底上可开发新的应用场景需求. 本文以常用的聚甲基丙烯酸甲酯和负性光刻胶作为聚合物衬底, 通过溶胶-凝胶法在其上制备 SiO_2 纳米薄膜, 能有效减轻光热冲击效应引起的热损伤, 从而实现微纳物体的激光捕获及操控. 实验表明, 在常用激光操控功率条件下, 当 SiO_2 纳米薄膜厚度大于 110 nm 时, 能够有效防止聚合物衬底因光热效应引起软化、膨胀和表面破坏. 理论计算也表明, 纳米薄膜能至少使聚合物表面温度降低 111 °C, 并使其产生最高温度的时间滞后 13.2 ns. 本文使用的纳米薄膜制备技术具有常温、大面积、低粗糙度且厚度均一的优点, 能普遍适用于柔性聚合物衬底以及异形结构. 本实验结果拓展了激光捕获物体的环境媒介, 为其在微纳操控、微纳机器人和微纳光电器件等领域的应用提供新的可能性.

关键词: 光捕获, 聚合物表面, 溶胶-凝胶法, 光热冲镊**PACS:** 87.80.Cc, 68.47.Mn, 81.15.-z, 42.50.Wk**DOI:** 10.7498/aps.74.20241654**CSTR:** 32037.14.aps.74.20241654

1 引言

激光捕获是非接触式操控微纳物体的强大工具^[1-7]. 基于光子动量形成光梯度力阱的原理, 传统光镊技术所产生的微/纳米尺度的光力 ($\sim\text{pN}$) 无法克服固体界面存在的范德瓦耳斯黏附力 ($\sim\mu\text{N}$), 因此通常用于真空/空气及液体环境^[8]. 谷付星课题组发明的光热冲镊技术, 实现了在固体界面上(干燥固体、固液混合)对微纳物体(如金属、少层石墨烯)的捕获, 结合深度学习图像反馈的闭环控制系统^[9], 进一步实现了对微纳物体运动的高精度智能控制^[10-14]. 光热冲镊技术核心原理在于利用脉冲激光局域激发微纳物体内部的光热冲击过程, 引发瞬时热膨胀并产生微牛量级的瞬态热应变梯度力阱, 从而突破固体界面摩擦力约束向光斑中心

移动. 当使用高斯光斑照射时, 物体能够持续向光斑中心移动并最终被光斑捕获.

目前光热冲镊技术应用的衬底主要为无机刚性 (SiO_2 , MgF_2 , Al_2O_3). 柔性光学衬底不受传统刚性物理状态限制, 可弯曲、可拉伸的特性使得微纳光学操控的应用场景得到极大拓展^[15]. 聚合物材料, 如: 聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 具有良好的机械柔韧性、光透明性和稳定性, 是柔性光学衬底材料的不二选择. 但由于聚合物的低耐热性和高热膨胀系数, 光热冲镊技术产生的瞬态光热效应会对聚合物衬底产生不可逆的影响(热熔化、永久形变)^[10,13,16], 这限制了该技术在聚合物衬底上的应用. 此外, 有机光刻胶(如负性光刻胶 SU-8 系列、正性光刻胶 S18 系列)具有良好的结构完整性与成型稳定性, 通过使用双光子聚合 (TPP) 技术, 可以加工成复杂多样的三

* 国家自然科学基金 (批准号: 62122054, 62075131) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gufuxing@usst.edu.cn

维异形空间结构, 目前已经被广泛应用于微纳光电子器件与微机械结构等精密制造领域^[17-19]. 但由于有机光刻胶聚合物的耐热性相对较低, 在一定程度上也限制了光热冲锪技术在其表面的应用.

SiO₂ 纳米薄膜具有低热导率能有效阻隔热传导, 因此通过将 SiO₂ 纳米非晶材料集成在聚合物衬底上, 可以有效地提高聚合物耐热性^[20]. 然而要实现在聚合物衬底上制备大面积、低粗糙度且厚度均匀的 SiO₂ 纳米薄膜, 选择合适的沉积技术尤为关键. 传统的沉积方法有化学气相沉积 (CVD)、利用蒸发或溅射的物理气相沉积 (PVD) 和等离子体增强化学气相沉积 (PECVD) 等技术^[21]. 其中, CVD 与 PVD 技术通常涉及较高的沉积温度, 会引起聚合物衬底中不饱和端基的热降解, 进而导致衬底变形和开裂; 虽然 PECVD 技术能够低温进行, 但其过快的等离子体沉积过程会使薄膜的表面粗糙度增大 ($R_q > 500$ pm). 这些沉积过程中引入的较大光学损耗不利于 SiO₂ 纳米薄膜在聚合物衬底上进行集成. 溶胶-凝胶法能够在常温下进行 SiO₂ 纳米薄膜的大面积制备, 沉积过程便于控制, 固化后薄膜表面粗糙度低 ($R_q < 500$ pm) 且厚度均一, 同时具有较高的弹性变形极限能够均匀地沉积在各类平面或异型衬底表面, 为聚合物衬底上非晶材料的沉积提供了极大的灵活性和广泛的应用前景^[22,23].

本文通过溶胶-凝胶法在聚合物衬底上制备 SiO₂ 纳米薄膜, 能够有效减轻光热冲锪技术的热损伤, 从而实现在聚合物衬底上对微纳物体的激光捕获及操控. 在 PMMA 和 SU-8 聚合物衬底上, 常温下制备了大面积、低粗糙度 ($R_q \sim 320$ pm) 且厚度均一的 SiO₂ 纳米薄膜. 通过大量实验验证, 发现在常用的激光操控功率条件下当 SiO₂ 纳米薄膜的厚度大于 110 nm 时, 能有效防止聚合物衬底因光热冲击效应而引起软化、膨胀和表面破坏. 理论计算也表明, SiO₂ 纳米薄膜能至少使 PMMA 表面温度降低 111 °C, 并使 PMMA 产生最高温度的时间较金纳米片最高温度的时间滞后 13.2 ns. 此外, 实验结果也同样适用于 TPP 技术制备的 SU-8 聚合物结构.

2 样品制备

聚合物衬底选用 PMMA 与 SU-8 为研究对象. 本研究将 PMMA 粉末溶于苯甲醚溶液制备浓度

为 10% 的 PMMA 溶液, 通过旋涂法在 SiO₂ 基片上制得厚度为 1.5 μ m PMMA 薄膜. 利用 TPP 技术实现对 SU-8 光刻胶的三维微加工, 在 SiO₂ 基片上旋涂 SU-8 光刻胶, 经历前烘、曝光、后烘、显影等步骤完成 SU-8 聚合物结构的制备. 采用溶胶-凝胶法制备 SiO₂ 溶胶-凝胶, 选择盐酸 (HCL) 作为催化剂, 以硅酸四乙酯 (TEOS) 和去离子水 (H₂O) 做为反应物质, 无水乙醇 (ETOH) 作为溶剂, 按一定比例配置得到混合溶液, 密封后在微量振荡器中以 2000 rad/min 振荡 2 h, 最终形成 SiO₂ 溶胶-凝胶. 图 1(a) 所示为在聚合物衬底上制备 SiO₂ 纳米薄膜的流程示意图. 首先, 将商业熔融 SiO₂ 基底依次放入丙酮、乙醇、去离子水里超声清洗 20 min, 然后根据需求制备 PMMA 聚合物层或 SU-8 聚合物层. 随后, 将 SiO₂ 溶胶-凝胶以 6000 rad/min 转速滴加在聚合物层上, 形成均匀的 SiO₂ 纳米薄膜. 涂覆后, 样品静置 15 min 以自然干燥, 再置于 60 °C 的电热恒温加热台上干燥 1 h, 确保有机溶剂完全挥发.

SiO₂ 纳米薄膜沉积厚度与表面形貌分别会对隔热效果以及光热冲锪技术的捕获精度产生影响, 因此通过调整 ETOH 与 TEOS 的体积比 ($R = V_{\text{ETOH}}/V_{\text{TEOS}}$), 我们配制了 8 种不同的 SiO₂ 溶胶-凝胶, R 值为 3—10. 利用旋涂法将不同 R 值的 SiO₂ 溶胶-凝胶在 SiO₂ 基片上旋涂成 SiO₂ 纳米薄膜, 静置干燥 15 min 后 60 °C 恒温加热 1 h 以完成薄膜样品的制备. 利用原子力显微镜 (AFM, Cypher S) 对 SiO₂ 纳米薄膜厚度与表面粗糙度进行多次测量, 测量结果如图 1(b) 所示. SiO₂ 纳米薄膜沉积厚度可通过改变 R 值进行调控, 最小可达到 90 nm. 值得注意的是, 薄膜沉积厚度与 R 值之间的关系并非线性, 而是随着 R 值的增大, 沉积厚度逐渐趋于一个稳定值, 但是其表面粗糙度显著增大, 这为后续薄膜厚度的选取提供了参考.

根据图 1(b) 的结果, 选取 60 个 $R = 5$ 条件下 SiO₂ 纳米薄膜样品 (厚度 115 nm) 的表面粗糙度进行扫描测量, 扫描面积为 5 μ m $\times$ 5 μ m, 其他扫描参数均保持一致. 扫描结果如图 1(c) 所示, SiO₂ 纳米薄膜表面粗糙度分布在 240—400 pm 之间, 其中在 (320 $\pm$ 10) pm 范围内的分布比例较高, 扫描结果证实采用溶胶-凝胶法制备的 SiO₂ 纳米薄膜比商业熔融石英衬底 ($R_q \sim 550$ pm) 具有更优异的表面平整性.

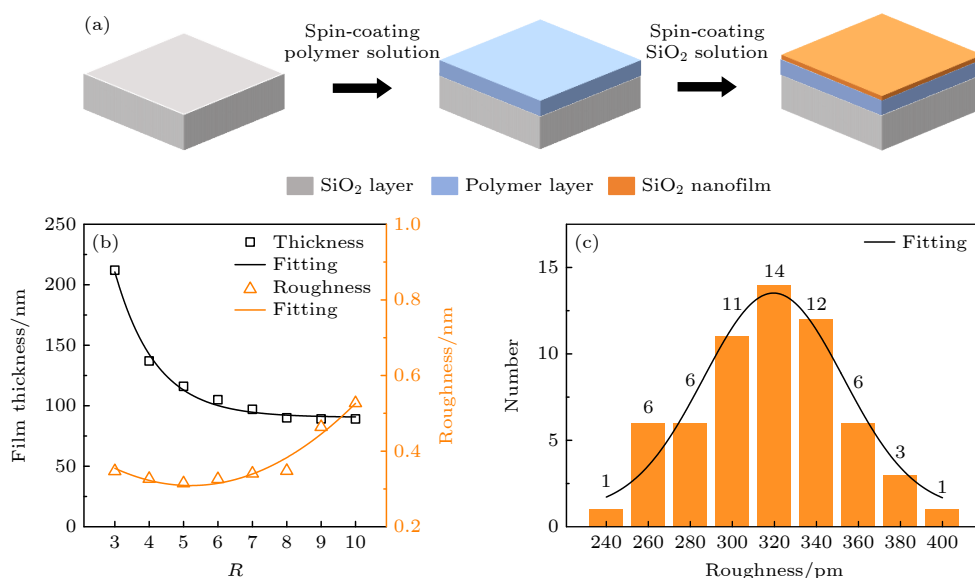


图 1 SiO_2 纳米薄膜的制备与表面特性 (a) 聚合物衬底制备 SiO_2 纳米薄膜流程图; (b) SiO_2 纳米薄膜厚度与表面粗糙度随 R 值的变化; (c) $R = 5$ 条件下 SiO_2 纳米薄膜表面粗糙度分布直方图

Fig. 1. Preparation and surface characteristics of SiO_2 nanofilms: (a) Preparation process of SiO_2 nanofilms on polymer substrates; (b) variation of SiO_2 nanofilm thickness and surface roughness with R values; (c) histogram of surface roughness distribution of SiO_2 nanofilms under the condition of $R = 5$.

3 实验结果

本实验利用光热冲锺实验平台捕获和操控微纳物体, 使用 532 nm 脉冲激光器 (重复频率为 6000 Hz、脉宽为 8 ns). 由于脉冲激光峰值能量较高, 因此首先研究脉冲激光直接照射衬底表面所产生的光热效应. 实验中先使用聚焦光斑在厚度 1.5 μm PMMA 衬底表面运动, 聚焦光斑参数为: 光斑直径 $D_{\text{spot}} = 8.8 \mu\text{m}$ 、平均功率 $P_{\text{ave}} = 126 \mu\text{W}$. 在图 2(a) 的光学显微镜照片中可看出, PMMA 表面无任何损伤痕迹, 但 AFM 扫描分析发现聚焦光斑运动的路径上有明显的深浅不一的凹坑, 如图 2(b), (c) 所示. 凹坑宽度约为 200 nm, 深度在 2—7 nm 之间不等, 说明脉冲激光会直接造成 PMMA 表面不可逆的热损伤.

进一步地, 采用同样的聚焦光斑在制备了 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 衬底 (PMMA 厚度 1.5 μm , SiO_2 纳米薄膜厚度 115 nm) 上运动, 并对聚焦光斑运动后的衬底表面进行分析. 图 2(d) 的光学显微图和图 2(e), (f) 的 AFM 扫描结果均证明同样的聚焦光斑在衬底上运动后对衬底表面没有产生任何损伤, 这与图 2(b) 中的热损伤形成了鲜明的对比, 表明 115 nm 厚的 SiO_2 纳米薄膜对 PMMA 衬底起到了一定的保护作用.

为了进一步探究 SiO_2 纳米薄膜厚度对 PMMA 衬底的隔热效果, 我们使用 COMSOL 软件模拟了单次光热冲击驱动金纳米片时金纳米片、PMMA 衬底和 SiO_2 纳米薄膜的温度场分布. 首先对金纳米片与 PMMA 衬底直接接触进行单次光热冲击时, 各层最高温度分布进行模拟, 结果如图 3(a) 所示. 驱动金纳米片时其中心温度最高为 272 $^{\circ}\text{C}$, 远超 PMMA 的软化温度 140 $^{\circ}\text{C}$, 因此会导致 PMMA 衬底产生永久性破坏.

由于本研究通过溶胶-凝胶法制备 SiO_2 纳米薄膜的最薄厚度约为 90 nm, 因此对金纳米片在制备了 90 nm 厚的 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 衬底上进行单次光热冲击时, 各层最高温度分布进行模拟. 结果如图 3(b) 所示, 可以明显看到 SiO_2 纳米薄膜的存在不仅极大地降低了 PMMA 的表面温度, 还使 PMMA 产生最高温度的时间滞后于金纳米片产生最高温度的时间 13.2 ns, 这一时间段正好对应于金纳米片降温速率最快的阶段. 当 PMMA 达到表面最高温度 146 $^{\circ}\text{C}$ 后, 仅用时 23 ns 就极速降温至 136 $^{\circ}\text{C}$, 低于 PMMA 软化温度, 然而 PMMA 表面最高温度高于软化温度, PMMA 仍然可能发生软化. 同时, 对该条件下脉冲时间为 44.8 ns 时金纳米片表面温度分布进行模拟, 如图 3(c) 所示. 金纳米片在 Gaussian 光斑照射下, 其温度分布呈中心高温、向四周温度递降的高斯分布.

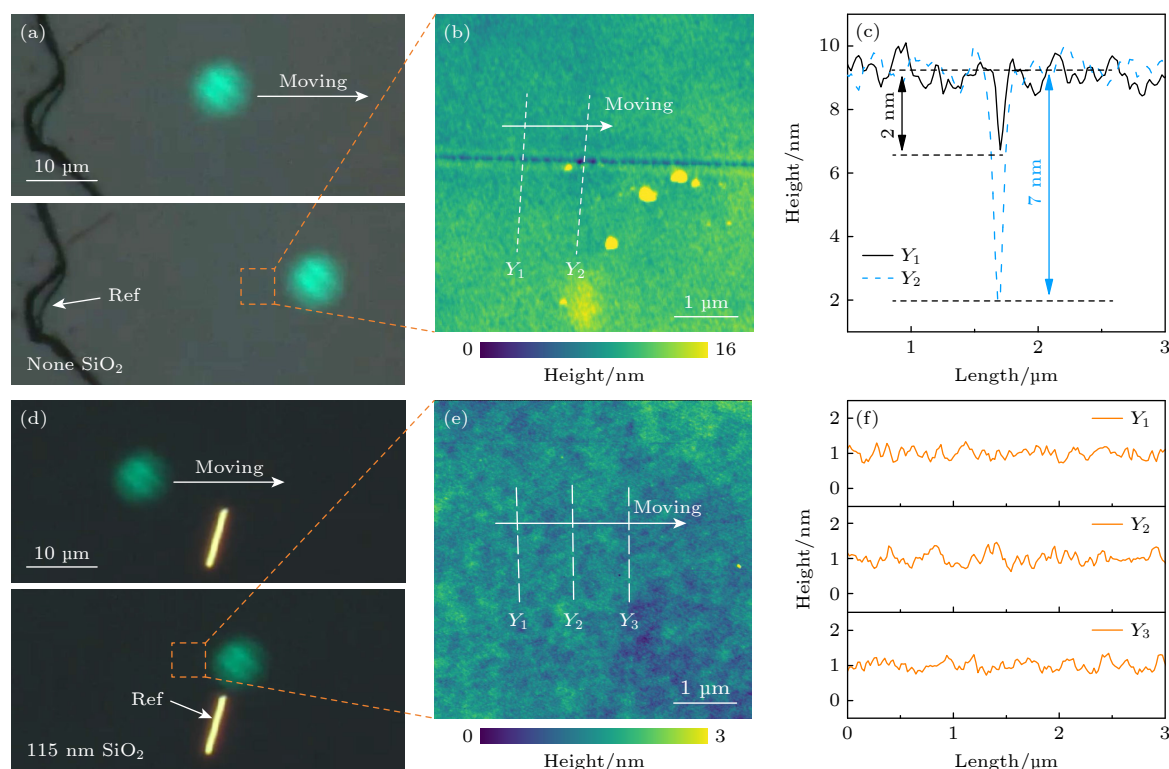


图 2 有/无 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 上的运动痕迹比较 (虚线参量 Y 代表数据测量位置): (a)–(c) 无 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 上运动的光学显微图与 AFM 扫描结果; (d)–(f) 115 nm 厚的 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 上运动的光学显微图与 AFM 扫描结果

Fig. 2. Comparison of motion traces on PMMA with/without SiO_2 nanofilms (the dashed parameter Y denotes the location of data measurement): (a)–(c) Optical micrographs and AFM scanning results of motion traces on PMMA without SiO_2 nanofilm; (d)–(f) optical micrographs and AFM scanning results of motion traces on PMMA with a 115 nm-thick SiO_2 nanofilm.

为了研究能够有效保护 PMMA 衬底不会发生软化的 SiO_2 纳米薄膜最低厚度, 在保持 PMMA 衬底厚度与光斑参数不变的情况下通过调整 SiO_2 纳米薄膜厚度, 得到了 T_1 (SiO_2 纳米薄膜表面最高温度)、 T_2 (PMMA 衬底表面最高温度) 和 Δt (PMMA 衬底表面达到最高温度较金纳米片达到最高温度滞后的时间) 与 SiO_2 纳米薄膜的厚度关系, 见图 3(d). 随着 SiO_2 纳米薄膜厚度的增大, T_1 , T_2 均下降, 且 T_2 比 T_1 下降速率更快, 而 Δt 呈上升趋势, 说明 SiO_2 纳米薄膜的存在有效隔绝了金纳米片传导到 PMMA 衬底表面热量并延缓了其传导时间. 数据表明, 增大 SiO_2 纳米薄膜的厚度能有效降低 PMMA 衬底表面温度, 当薄膜厚度从 90 nm 增至 110 nm 时, PMMA 衬底表面降低的温度从 111 °C 提升至 122 °C.

为确保 SiO_2 纳米薄膜能有效保护 PMMA 衬底, 选取 90 nm ($R = 8$) 和 115 nm ($R = 5$) 厚度的纳米薄膜进行实验验证. 实验先使用激光 ($D_{\text{spot}} = 7.6 \mu\text{m}$, $P_{\text{ave}} = 105 \mu\text{W}$) 捕获边长 7 μm , 厚度 125 nm 的正三角形金纳米片, 在制备了 90 nm

厚的 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 衬底上进行运动. 图 4(a) 为金纳米片运动的光学显微图, 从图中可以看出捕获路径上并无损伤. 利用 AFM 对运动路径进一步扫描分析, 可以明显观察到金纳米片运动对衬底表面产生的热损伤痕迹, 如图 4(b), (c) 所示. 捕获路径损伤痕迹表现为在路径中心及距中心分别 3 μm 和 2.8 μm 的地方产生约 3 nm 的凹陷, 其他地方为凸起, 最高凸起高度为 8.3 nm. 由于驱动金纳米片时其表面热分布为高斯型, 即中心温度最高, 四周温度递减, 且根据前面模拟可知降温时间很短, 因此凸起是由于中心区域的高温导致 PMMA 聚合物发生不可逆膨胀. 此外, 金纳米片运动路径上除了中心凹陷外, 两侧还各有一个凹陷, 两侧凹陷距路径中心凹陷的距离与金三角纳米片两个角距中心的距离很接近, 因此衬底上的凹陷是由于金纳米片 3 个角区域的低温引起的聚合物回缩而产生. 由此证明, 90 nm SiO_2 纳米薄膜不足以完全保护 PMMA 衬底不受光热效应的影响, 也进一步说明 SiO_2 纳米薄膜可以适应柔性聚合物衬底的微小变化而不被破坏.

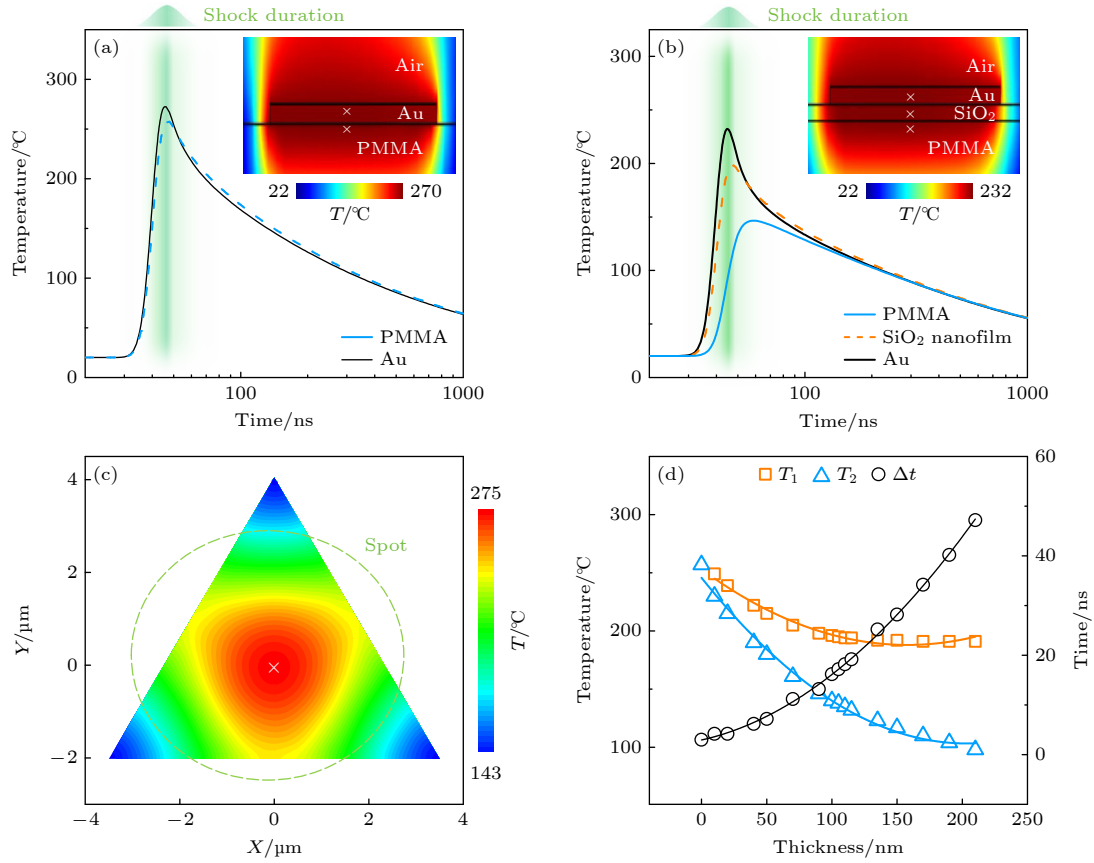


图3 金纳米片单次光热冲击时衬底各层温度场分布仿真(白色十字准线和绿色虚线圈分别代表物体质心和光斑) 金纳米片在无 SiO₂ 纳米薄膜 (a) 和 90 nm 厚的 SiO₂ 纳米薄膜 (b) 的 PMMA 上进行单次光热冲击时衬底各层温度分布模拟图和表面最高温度分布图; (c) 脉冲时间 44.8 ns 时金纳米片表面的温度分布模拟图; (d) SiO₂ 纳米薄膜的厚度与 T_1 , T_2 , Δt 的关系图, 其中 T_1 为 SiO₂ 纳米薄膜表面最高温度, T_2 为 PMMA 衬底表面最高温度, Δt 为滞后的时间

Fig. 3. Simulation of the temperature field distribution across substrate layers during a single photothermal shock of gold nanosheets (the white crosshairs and the green dotted circles denote the object's center of mass and the light spots, respectively): Simulation of temperature distribution across substrate layers and surface peak temperature distribution during a single photothermal shock of a gold nanosheet on PMMA without SiO₂ nanofilms (a) and with a 90 nm-thick SiO₂ nanofilm (b); (c) simulated temperature distribution on the surface of the gold nanosheet at a pulse duration of 44.8 ns; (d) relationship diagram between the SiO₂ nanofilm thickness and T_1 , T_2 , Δt , where T_1 represents the maximum temperature on the surface of the SiO₂ nanofilm, T_2 represents the maximum temperature on the surface of the PMMA, and Δt represents the time delay.

进一步,在制备了 115 nm 厚的 SiO₂ 纳米薄膜的 PMMA 衬底上使用相近参数的激光 ($D_{\text{spot}} = 7.8 \mu\text{m}$, $P_{\text{ave}} = 98 \mu\text{W}$) 捕获尺寸为 7.1 μm , 厚度为 100 nm 的正三角形金纳米片. 图 4(d) 为金纳米片运动的光学显微图,从图中可以看出捕获路径上无损伤. 图 4(e), (f) 为利用 AFM 对运动路径的扫描结果,更进一步证明金纳米片运动对衬底表面未产生任何痕迹. 因此,相较于 90 nm SiO₂ 纳米薄膜, 115 nm SiO₂ 纳米薄膜能够对 PMMA 衬底起到很好的保护作用,这与仿真结果一致.

上述模拟和实验均证明在利用光热冲镊捕获操控金纳米片时,厚度为 115 nm 的 SiO₂ 纳米薄膜可以有效保护 PMMA 衬底不被破坏,从而保证

金纳米片被稳定捕获操纵. 基于此,本研究进一步对比在常用的激光操控功率条件下,光热冲镊技术捕获不同金纳米结构(金纳米线与金纳米片)路径前后的表面粗糙度,深入分析激光捕获技术对制备了 115 nm 厚的 SiO₂ 纳米薄膜的 PMMA 衬底表面性能的影响. 通过计算捕获金纳米结构前路径表面粗糙度 (R_1) 与捕获后路径表面粗糙度 (R_2) 得到表面粗糙度的绝对变化量 (ΔR), 图 5(a) 展示了 12 个金纳米结构的 R_1 与 ΔR 数据统计. ΔR 最大为 39 pm, 最小为 23 pm, 数据分析表明激光对金纳米结构的捕获运动会导致衬底表面粗糙度的增大.

由于不同的金纳米结构在形状和厚度上存在一定差异,则需使用不同的 D_{spot} , P_{ave} 进行捕获,

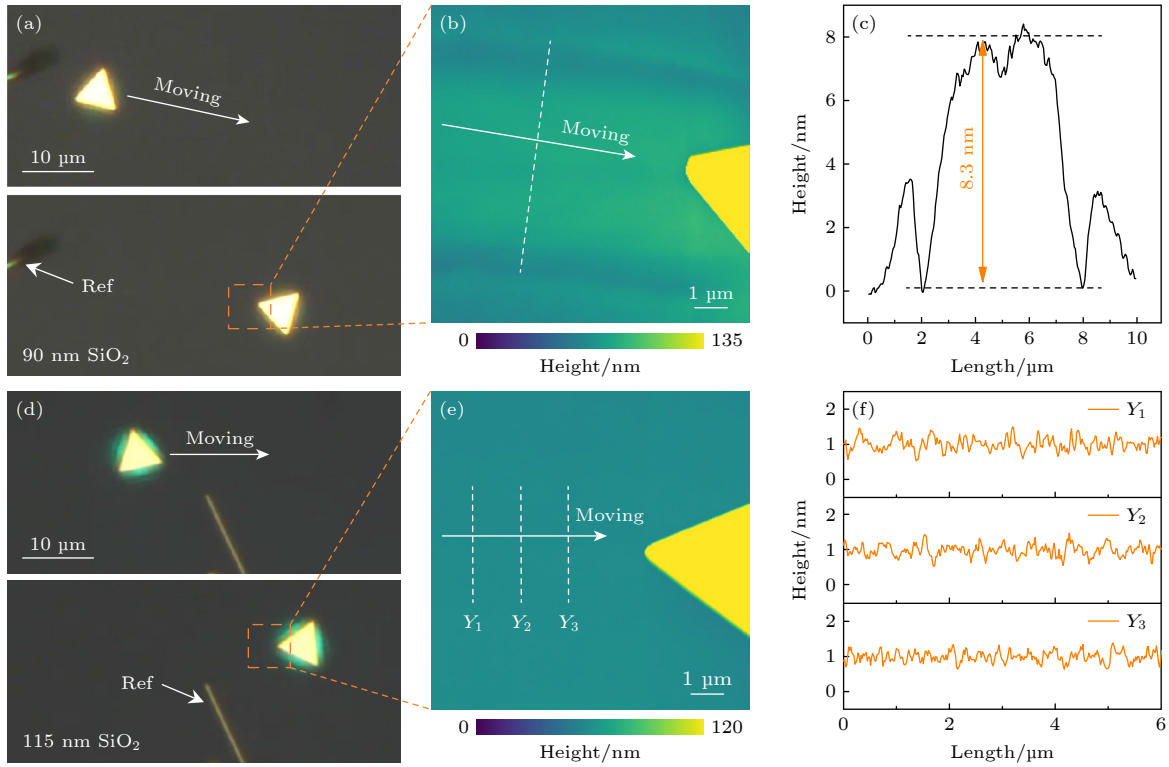


图 4 不同厚度 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 上金纳片的运动痕迹比较 (虚线参量 Y 代表数据测量位置): (a)–(c) 90 nm 厚的 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 上金纳片运动痕迹的光学显微图与 AFM 扫描结果; (d)–(f) 115 nm 厚的 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 上金纳片运动痕迹的光学显微图与 AFM 扫描结果

Fig. 4. Comparison of motion traces of gold nanosheets on PMMA with SiO_2 nanofilms of different thicknesses (the dashed parameter Y denotes the location of data measurement): (a)–(c) Optical micrographs and AFM scanning results of motion traces of a gold nanosheet on PMMA with a 90 nm-thick SiO_2 nanofilm; (d)–(f) optical micrographs and AFM scanning results of motion traces of a gold nanosheet on PMMA with a 115 nm-thick SiO_2 nanofilm.

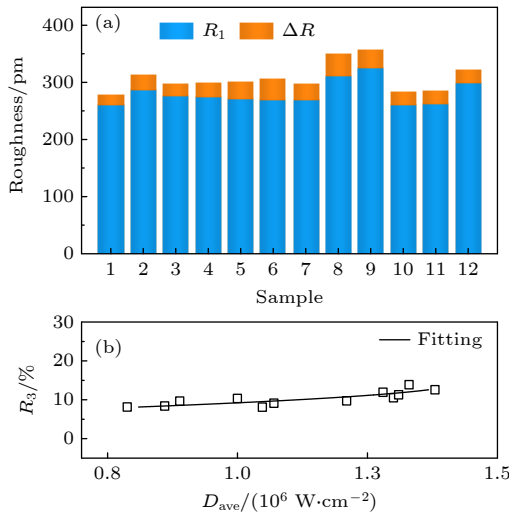


图 5 金纳米结构运动路径前后的表面粗糙度对比 (a) 金纳米结构的 R_1 与 ΔR 数据统计; (b) 激光平均功率密度与衬底表面粗糙度相对变化量的关系图

Fig. 5. Comparison of surface roughness before and after the motion path of gold nanostructures: (a) Statistical data of R_1 and ΔR for gold nanostructures; (b) relationship diagram between the average laser power density and the relative variation in the substrate surface roughness.

采用 12 个样品所使用的平均功率密度 (D_{ave}) 为统一指标. 图 5(b) 展示了衬底表面粗糙度的相对变化量 ($R_3 = \Delta R/R_1$) 与 D_{ave} 的关系, 可以看出 R_3 会随着 D_{ave} 的增大而增大, 但增长趋势较平缓. 鉴于 AFM 技术可实现亚纳米分辨率, 因此可能存在低于 40 pm 量级的测量偏差. 从粗糙度变化的微小幅度来看, 在常用的激光操控功率条件下, 激光捕获金纳米结构在制备了 115 nm 厚的 SiO_2 纳米薄膜的 PMMA 衬底表面运动时, 提升 D_{ave} 对衬底表面形貌影响可以忽略不计.

接下来本研究使用 SU-8 代替 PMMA, 在其表面制备 115 nm 厚的 SiO_2 纳米薄膜. 首先使用激光 ($D_{\text{spot}} = 8.7 \mu\text{m}$, $P_{\text{ave}} = 135 \mu\text{W}$) 捕获边长为 $7.2 \mu\text{m}$, 厚度为 310 nm 的正三角形金纳米片在没有 SiO_2 纳米薄膜的 SU-8 衬底表面进行运动. 从图 6(a) 的光学显微图和图 6(b) 的 AFM 扫描形貌图都能明显观察到光热冲锲技术产生的光热效应会在 SU-8 衬底表面留下明显痕迹. 当在 SU-8 衬

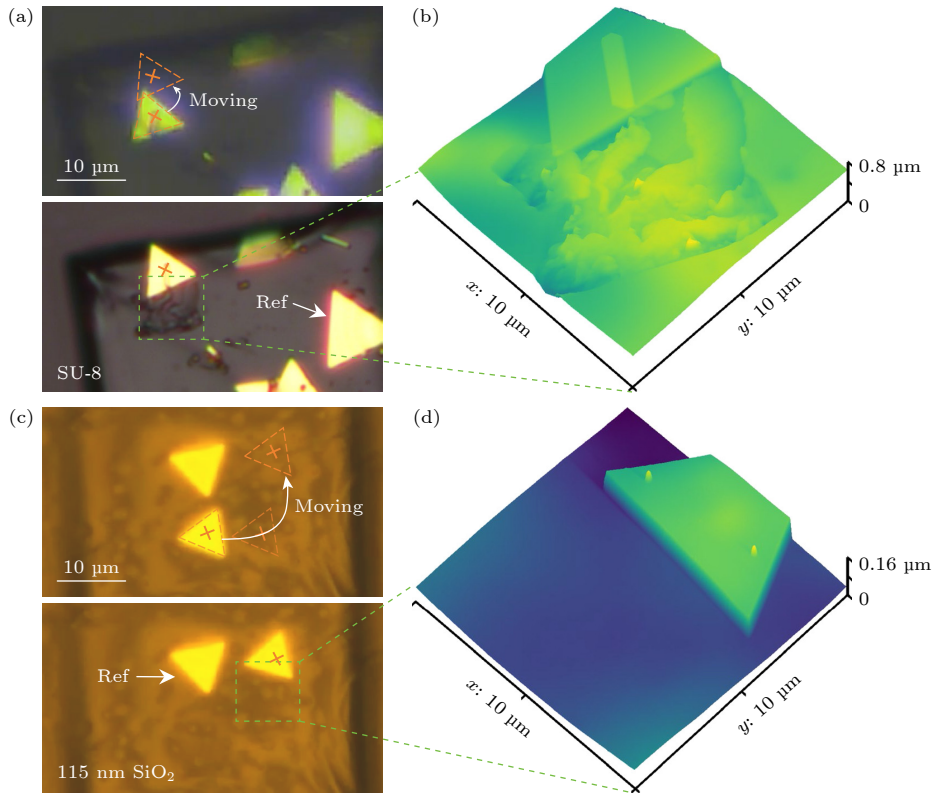


图6 有/无 SiO_2 纳米薄膜的 SU-8 上金纳米片的运动痕迹比较 (橙色十字准线和橙色虚线三角形分别代表物体质心和金纳米片) (a), (b) 无 SiO_2 纳米薄膜的 SU-8 上金纳米片运动痕迹的光学显微图与 AFM 表面形貌图; (c), (d) 115 nm 厚的 SiO_2 纳米薄膜的 SU-8 上捕获金纳米片运动痕迹的光学显微图与 AFM 表面形貌图

Fig. 6. Comparison of motion traces of gold nanosheets on SU-8 with/without SiO_2 (The orange crosshair and the orange dashed triangle represent the centroid of the object and the gold nanosheet, respectively): (a), (b) Optical micrographs and AFM surface morphology of motion traces of a gold nanosheet on SU-8 without SiO_2 nanofilms; (c), (d) optical micrographs and AFM surface morphology of motion traces of a gold nanosheet on SU-8 with a 115 nm-thick SiO_2 nanofilm.

底上制备厚度为 115 nm 的 SiO_2 纳米薄膜后, 使用激光 ($D_{\text{spot}} = 12.5 \mu\text{m}$, $P_{\text{ave}} = 271 \mu\text{W}$) 捕获边长为 $7.1 \mu\text{m}$, 厚度为 100 nm 的正三角形金纳米片在衬底表面进行运动. 从图 6(c) 的光学显微图和图 6(d) 的 AFM 扫描形貌图均可以看出 SU-8 衬底表面并无损伤. 实验证明, 厚度为 115 nm 的 SiO_2 纳米薄膜能够有效防止激光捕获对 SU-8 聚合物产生热损伤.

4 结 论

本文利用溶胶-凝胶法制备 SiO_2 纳米薄膜作为聚合物衬底隔热层, 能够有效防止聚合物衬底因光热效应受损, 实现了光热冲镊技术在聚合物衬底上的无损激光捕获和微纳物体的精确操控. 采用柔性衬底的代表性材料 PMMA 和三维微加工的传统紫外光刻胶 SU-8 作为聚合物衬底, 利用能够常温下进行沉积的溶胶-凝胶法在聚合物衬底表面制备大面积、低粗糙度且沉积厚度均一的 SiO_2 纳米

薄膜作为隔热层. 实验证明, 相较于激光直接作用于聚合物界面, 在常用的激光操控功率条件下, 制备厚度大于 110 nm 的 SiO_2 纳米薄膜能够对聚合物层起到优异的隔热、保护作用. 理论计算表明, 在金纳米片被捕获达到最高温度时, 制备的 SiO_2 纳米薄膜不仅能起到延迟对 PMMA 表面热传导的作用, 同时至少能降低 PMMA 表面温度 111°C , 且随着 SiO_2 纳米薄膜厚度增大, 延迟热传导的时间也相应延长并隔绝更高的温度.

本文的实验结果有望在固体界面上与更多光操控技术相结合以实现多维度的精确操控^[8]. 通过将 SiO_2 纳米薄膜的制备理念与基于聚合物的超构表面相结合, 并利用结构光 (奇点光) 的特性, 有望进一步扩大光热冲镊技术的应用场景^[6,24-26]. 本文提出的衬底制备技术能够适用于非生物类柔性聚合物衬底以及三维打印制备的异形聚合物结构, 实验结果为微纳操控^[5,10-14]、微纳机器人^[27-30]和微纳光机电器件^[19]等领域的应用提供了新的可能性.

参考文献

- [1] Li N, Zhu X M, Li W Q, Fu Z H, Hu M Z, Hu H Z 2019 *Front. Inform. Technol. Electron. Eng.* **20** 655
- [2] Wang H C, Li Z P 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 144101 (in Chinese) [汪涵聪, 李志鹏 2019 物理学报 **68** 144101]
- [3] Han X, Chen X L, Xiong W, Kuang T F, Chen Z H, Peng M, Xiao G Z, Yang K Y, Luo H 2021 *Chin. J. Lasers* **48** 0401011 (in Chinese) [韩翔, 陈鑫麟, 熊威, 邝腾芳, 陈志洁, 彭妙, 肖光宗, 杨开勇, 罗晖 2021 中国激光 **48** 0401011]
- [4] Gieseler J, Gomez-Solano J R, Magazzù A, Pérez Castillo I, Pérez García L, Gironella-Torrent M, Viader-Godoy X, Ritort F, Pesce G, Arzola A V, Volke-Sepúlveda K, Volpe G 2021 *Adv. Opt. Photonics* **13** 74
- [5] Yu S L, Lu J S, Ginis V, Kheifets S, Lim S W D, Qiu M, Gu T, Hu J J, Capasso F 2021 *Optica* **8** 409
- [6] Xu X H, Gao W Y, Li T Y, Shao T H, Li X Y, Zhou Y, Gao G Z, Wang G X, Yan S H, Wang S M, Yao B L 2024 *Acta Opt. Sin.* **44** 0500001 (in Chinese) [徐孝浩, 高文禹, 李添悦, 邵天骅, 李星仪, 周源, 高歌泽, 王国玺, 严绍辉, 王澈明, 姚保利 2024 光学学报 **44** 0500001]
- [7] Yang J H, Deng R P, Wang X Y, Zhang Y Q, Yuan X C, Min C J 2024 *Chin. J. Lasers* **51** 62 (in Chinese) [杨嘉豪, 邓如平, 汪先友, 张聿全, 袁小聪, 闵长俊 2024 中国激光 **51** 62]
- [8] Jia Q, Lyu W, Yan W, Tang W, Lu J, Qiu M 2023 *Photonics Insights* **2** R05-1
- [9] Liu H J, Liu Y F, Gu F X 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 104207 (in Chinese) [刘鸿江, 刘逸飞, 谷付星 2024 物理学报 **73** 104207]
- [10] Gu Z Q, Zhu R L, Shen T C, Dou L, Liu H J, Liu Y F, Liu X, Liu J, Zhuang S L, Gu F X 2023 *Nat. Commun.* **14** 7663
- [11] Zhang Y Z, Liu H J, Zhu R L, Liu Y F, Gu F X 2024 *Chinese Journal of Lasers* **51** 1507403 (in Chinese) [张尹峥, 刘鸿江, 朱润琳, 刘逸飞, 谷付星 2024 中国激光 **51** 1507403]
- [12] Shi Z X, Shen T C, Dou L, Gu Z Q, Zhu R L, Dong X Y, Gu F X 2024 *Laser. Photonics. Rev.* **18** 2400384
- [13] Zhu R L, Shen T C, Gu Z Q, Shi Z X, Dou L, Liu Y F, Zhuang S L, Gu F X 2024 *ACS Nano* **18** 23232
- [14] Gu Z Q, Dou L, Linghu S Y, Zhu R L, Gu F X 2024 *Phys. Rev. Appl.* **22** 054066
- [15] Song J K, Kim M S, Yoo S, Koo J H, Kim D H 2021 *Nano Res.* **14** 2919
- [16] Tan W S, Zhou J Z, Huang S, Sheng J, Xu J L 2016 *Infrared and Laser Engineering* **45** 67 (in Chinese) [谭文胜, 周建忠, 黄舒, 盛杰, 徐家乐 2016 红外与激光工程 **45** 67]
- [17] Tang F, Pan D, Yu F, Huang K J, Hu Y L, Wu D, Li J W 2024 *Chin. J. Lasers* **51** 1202401 (in Chinese) [唐枫, 潘登, 俞飞, 黄锟境, 胡衍雷, 吴东, 李家文 2024 中国激光 **51** 1202401]
- [18] Bian P, Hu Z Y, An R, Tian Z N, Liu X Q, Chen Q D 2024 *Laser Photonics Rev.* **18** 2300957
- [19] Wang Y X, Liao C R, Zou M Q, Bao W J, Liu D J, Zhang L, Wang Y P 2024 *Chin. J. Lasers* **51** 1202409 (in Chinese) [王裕鑫, 廖常锐, 邹梦强, 包维佳, 刘德军, 张立, 王义平 2024 中国激光 **51** 1202409]
- [20] Lee J, Kim J, Lee B J, Lee J, Lee H W, Hong M H, Park H H, Shim D Il, Cho H H, Kwon K H 2018 *Thin Solid Films* **660** 715
- [21] Tang T T, Wang Z H 2010 *The Science of Micro- and Nano-fabrication* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p312 (in Chinese) [唐天同, 王兆宏 2010 微纳加工科学原理 (北京: 电子工业出版社) 第312页]
- [22] Xing A, Gao Y, Yin J G, Ren G J, Liu H T, Ma M J 2010 *Appl. Surf. Sci.* **256** 6133
- [23] Kim S H, Hwang G S, Koo D, Seo D H, Kwon Y P, Lee H, Park H, Jeon E C, Kim J Y 2022 *Nano Res.* **15** 7476
- [24] Li T Y, Kingsley-Smith J J, Hu Y H, Xu X H, Yan S H, Wang S M, Yao B L, Wang Z L, Zhu S N 2023 *Opt. Lett.* **48** 255
- [25] Li T Y, Xu H H, Panmai M, Shao T H, Gao G Z, Xu F, Hu G W, Wang S N, Wang Z L, Zhu S N 2024 *Ultrafast Sci.* **4** 0074
- [26] Li T Y, Liu M J, Hou J H, Yang X, Wang S B, Wang S M, Zhu S N, Tsai D P, Wang Z L 2024 *Chip* **3** 100109
- [27] Guo J K, Sandaruwan W D N, Li J W, Ling J Z, Yuan Y, Liu X, Li Q, Wang X R 2024 *Micromachines* **15** 337
- [28] Liang Z S, Zhang B L, Yi S H, Sun K Y, Pei G H, Shang Y, Liu X Y, Ren S X, Liu P F, Zhao J J 2024 *Nano Mater. Sci* (In press)
- [29] Cheng Q L, Lu X Q, Tai Y H, Luo T T, Yang R H 2024 *ACS Biomater. Sci. Eng.* **10** 5562
- [30] Hou J Y, Liu H T, Huang L T, Wu S B, Zhang Z L 2024 *Chem. Eng. J.* **498** 155135

Laser trapping and manipulation of micro/nano-objects on polymer substrates*

YIN Yue DOU Lin SHEN Tianci LIU Jiatong GU Fuxing[†]

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

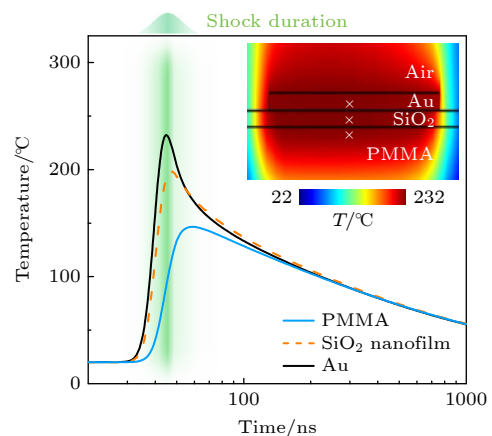
(Received 28 November 2024; revised manuscript received 15 February 2025)

Abstract

Polymer substrates break through the limitations of rigid planar substrates in spatial deformation scenarios and can be combined with photolithography to fabricate complex, three-dimensional irregular polymer structures. Photothermal-shock tweezer is a laser trapping technique based on the photothermal shock effect. Photothermal-shock tweezer uses pulsed laser induced transient photothermal shock to generate micro-newton-scale thermomechanical strain gradient force, enabling the trapping and manipulation of micro/nano-objects at solid interfaces. Integrating this technique with polymer substrates can meet the demands of new application scenarios. In this work, commonly employed polymethyl methacrylate (PMMA) and negative photoresist (SU-8) are used as polymer substrates, on which SiO₂ nanofilms are prepared using the sol-gel method. This method effectively mitigates thermal damage caused by photothermal shock effects, enabling laser trapping and manipulation of micro/nano-objects.

The SiO₂ nanofilms, characterized by low thermal conductivity, effectively inhibit heat transfer. The nanofilm fabrication technique utilized in this study enables the synthesizing of large-area SiO₂ nanofilms with large-area coverage, low surface roughness ($R_q \sim 320$ pm) and uniform thickness, making them broadly applicable to flexible polymer substrates and irregular structures. Direct contact between the polymer layer and micro/nano-objects during manipulating the photothermal shock tweezer can induce irreversible substrate degradation due to transient photothermal shock effects. Experimental results demonstrate that depositing an SiO₂ nanofilm thicker than 110 nm on the polymer substrate can significantly enhance thermal insulation and protection, effectively mitigating laser-induced damage under typical optical manipulation conditions.

Additionally, by analyzing the temperature field distribution of the gold nanosheet, PMMA substrate, and SiO₂ nanofilm during a single photothermal shock trapping of a gold nanosheet, it is found that the SiO₂ nanofilm can reduce the PMMA surface temperature by at least 111 °C and delay the time for PMMA to reach its peak temperature by 13.2 ns compared with the the gold nanosheet. The experimental results expand the environmental medium for laser trapping of objects, providing new possibilities for applications in micro/nano-manipulation, micro/nanorobotics, and micro/nano-optoelectronic devices.



Keywords: laser trapping, polymer surface, sol-gel method, photothermal-shock tweezer

PACS: 87.80.Cc, 68.47.Mn, 81.15.-z, 42.50.Wk

DOI: 10.7498/aps.74.20241654

CSTR: 32037.14.aps.74.20241654

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62122054, 62075131).

† Corresponding author. E-mail: gufuxing@usst.edu.cn

聚合物衬底上微纳物体的激光捕获及操控

尹越 窦琳 沈天赐 刘家彤 谷付星

Laser trapping and manipulation of micro/nano-objects on polymer substrates

YIN Yue DOU Lin SHEN Tianci LIU Jiatong GU Fuxing

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 74, 088703 (2025) DOI: 10.7498/aps.74.20241654

CSTR: 32037.14.aps.74.20241654

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241654>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

利用全息法在偶氮聚合物薄膜中记录涡旋光场

Recording optical vortices in azo polymer films by applying holographic method

物理学报. 2021, 70(5): 054204 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201496>

共轭聚合物链中光激发过程的无序效应

Effects of intrachain disorder on photoexcitation in conjugated polymer chains

物理学报. 2021, 70(11): 117201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201801>

基于微纳光纤双模式干涉的亚波长聚焦光场及光捕获应用

Sub-wavelength focused light and optical trapping application based on two-mode interference from an optical micro-/nanofiber

物理学报. 2024, 73(10): 100401 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240181>

软体机器人用多孔聚合物水凝胶的摩擦接触非线性行为

Nonlinear frictional contact behavior of porous polymer hydrogels for soft robot

物理学报. 2021, 70(12): 120201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202134>

导热高分子聚合物研究进展

Research progress of polymers with high thermal conductivity

物理学报. 2022, 71(2): 023601 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211876>

空间调制的驱动外场下活性聚合物的动力学行为

Dynamic behavior of active polymer chain in spatially-modulated driven field

物理学报. 2022, 71(24): 240501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221367>