基于化学前驱体的二维TMDC衍射器件激光制造

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/41444.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

基于化学前驱体的二维TMDC衍射器件激光制造。 导读

过渡金属硫族化合物（TMDCs）因大折射率和光学各向异性成为片上光子元件的重要材料，但传统聚焦离子束（FIB）刻蚀单晶薄片的方法通量低、大面积拼接易引入相位误差。针对这一工艺挑战，来自俄罗斯斯科尔科沃科学技术研究院的Arina O. Kalganova等人，以Laser printing of 2D transition metal dichalcogenide diffractive optical elements为题，于Light: Advanced Manufacturing提出了一种基于化学前驱体的激光微纳加工技术。该方法通过在基底表面旋涂无机硫代盐前驱体薄膜，利用其在可见光和紫外光谱区的局部光致反应实现高分辨率图案化，能够直接合成或通过两步工艺获取高对比度的衍射光栅和全息图，为大面积二维光子器件的柔性跨平台制造提供了可扩展的新工艺方案。

一、激光辐照机理与低强度前驱体图案化

研究阐明并量化了激光辐照硫代盐前驱体时，随着入射激光强度变化而表现出的三种截然不同的结构转变区域。实验表明，在 532
nm连续激光辐照下，Mo前驱体薄膜随激光强度进入不同转化区间：0.2 – 0.5 MW/cm2时可以获得显影后的轨迹，但拉曼光谱中没有MoS2的特征峰，说明此时形成的是可保留的非晶中间产物；0.6 – 0.9 MW/cm2时，在383 cm-1和 408
cm-1位置出现特征峰并持续存在，说明形成晶态MoS2；当强度升至1 MW/cm2
时，拉曼特征峰消失，研究团队将其归因于激光诱导减薄。

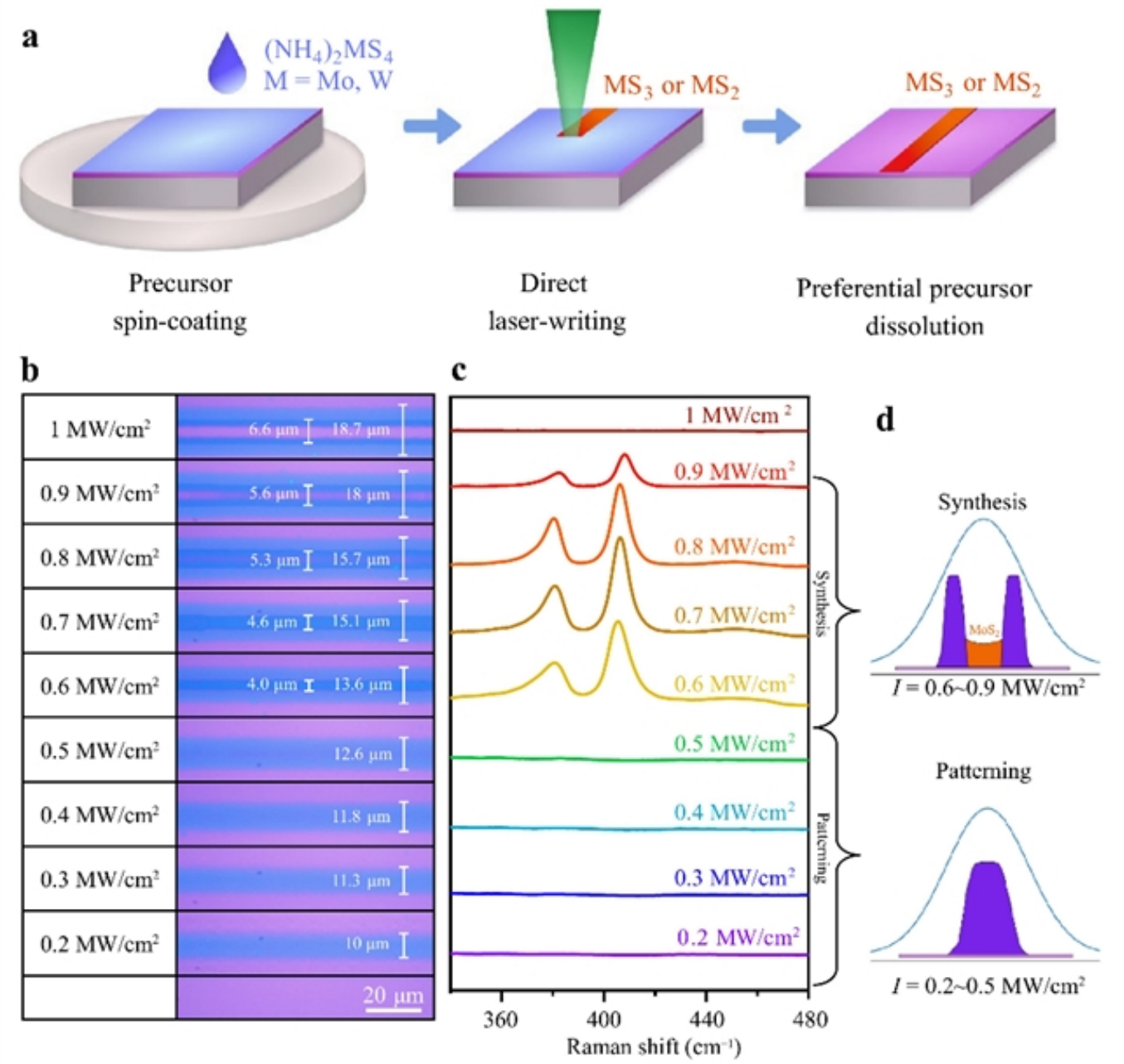


图1：激光强度调控硫代盐前驱体的图案化、晶化与减薄过程

透射电子显微镜（STEM）和能量色散X射线光谱（EDS）证实0.5 MW/cm2的激光直写下，中间产物为厚度8 nm且硫钼比（S/Mo）约为3的均匀非晶层，退火后得到2.5 nm层厚的MoS2，S/Mo比约为2，通过两步法完成材料转化

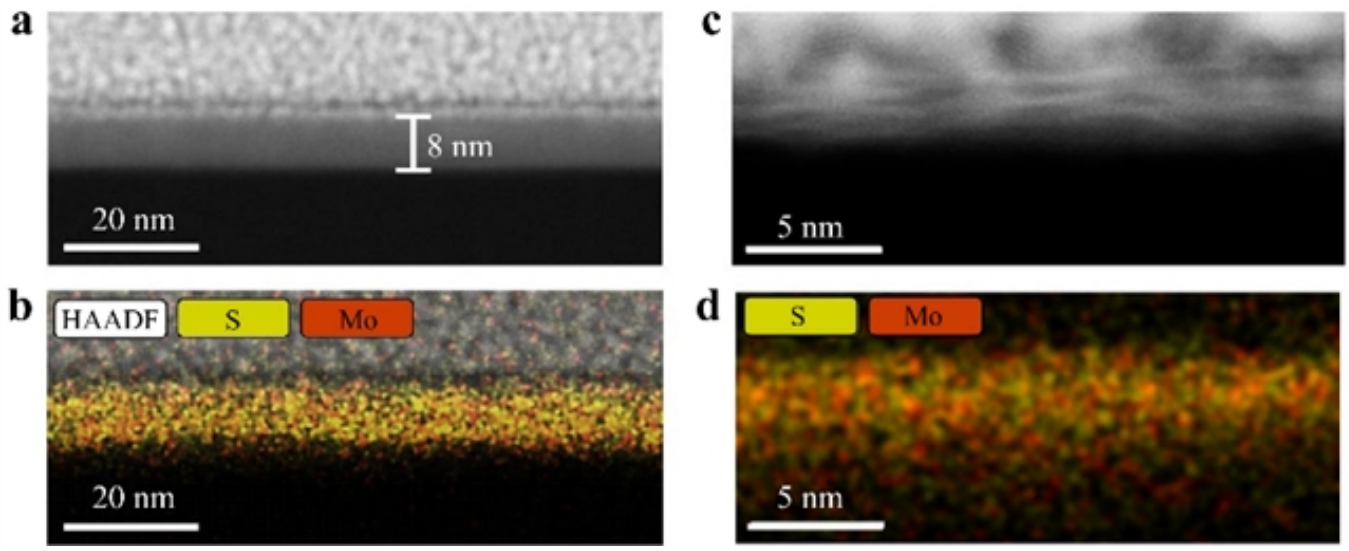


图2：两步法实现非晶前驱体向少层 MoS2的结构与成分转化

激光强度对比实验可以看出：直接高强度合成会受到高斯光斑温度分布影响，导致轨迹中间和边缘的厚度、结晶状态不均一；低强度预图案化可以先生成较均匀的非晶结构，再通过750 °C惰性气氛退火完成转化，降低了图案质量对单次热过程的依赖。这种制备工艺不是单纯追求直接激光合成晶态TMDC，而是利用硫代盐前驱体的选择性溶解特性，将图案形成和晶化合成分成两个可调步骤。

二、亚波长周期光栅与二维衍射结构制备

研究团队将这种低强度图案化工艺与干涉光刻相结合，实现高分辨率高纵横比的多层TMDC衍射光栅的精密制造。团队采用Michelson干涉结构调节两束光夹角，从而控制干涉条纹周期，并分别使用532 nm可见光和244 nm紫外光进行图案化。结果显示，MoS2线性光栅的最短周期达到150 nm，条纹宽度为90 nm，长度约为800 μm，对应长宽比接近10?；同一方法还制备了周期为540 nm的WS2光栅，以及通过两次曝光和90 °样品旋转得到的周期为630 nm的MoS2二维方形光栅。这些结果说明，该方法不是只能写入单条轨迹，而是可以形成规则周期结构，并能扩展到不同TMDC材料和二维图案。透射电镜（TEM）截面成像显示，生成的MoS2顺应基底轮廓紧密生长，平均侧向晶粒尺寸约为30 nm。在532 nm和633 nm的可见光波长下，一级衍射效率实测约处在0.1-1%区间，需要说明的是，由衍射效率反推得到的折射率调制量（633 nm处6.8±0.4、532 nm处4.6±0.1，对应2.5 nm厚光栅）因未计入薄膜吸收损耗而偏高约30%；论文用椭偏仪独立测得的更可靠折射率为3.2 – 4.4（10 nm厚薄膜，400 – 900 nm波段），与文献中体相MoS2的数值吻合。该结果验证了这种激光图案化工艺可以用于制备具有光学功能的少层TMDC衍射结构。

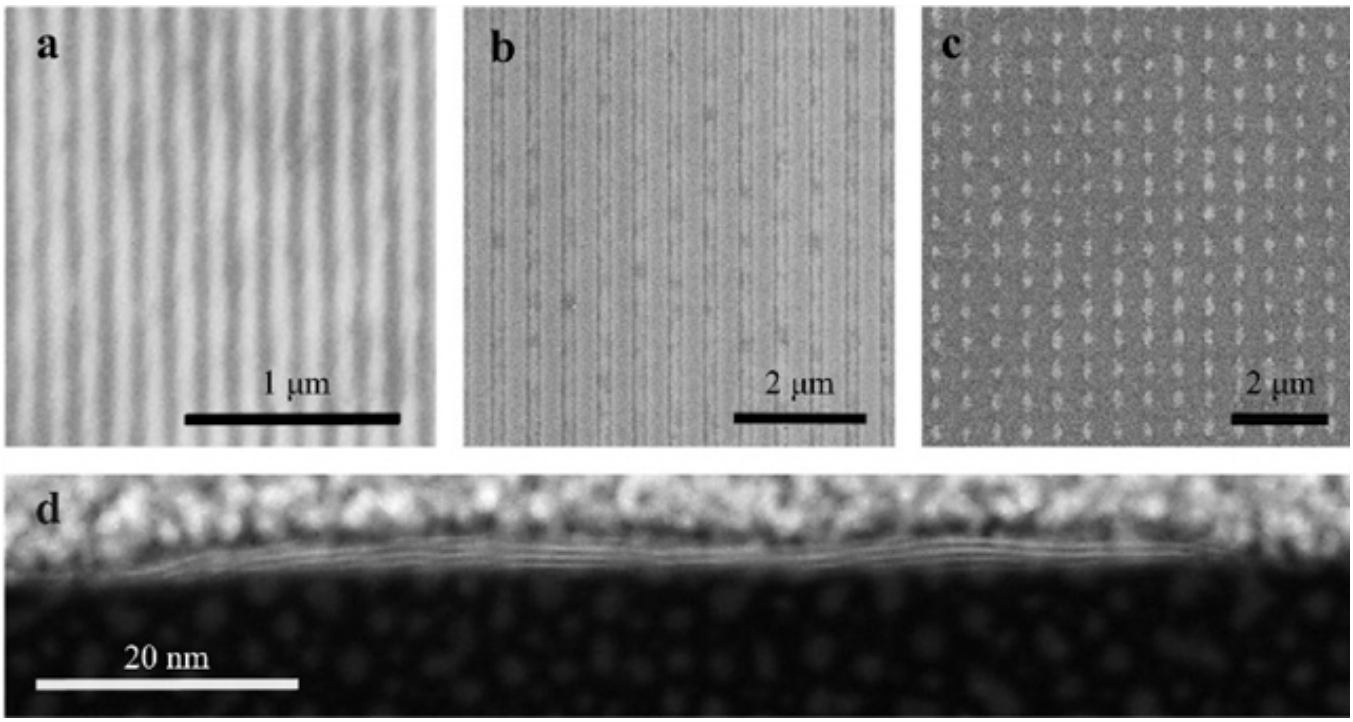


图3：激光干涉光刻制备亚波长TMDC一维与二维光栅结构

三、二维衍射全息器件与集成薄膜波导元件的原位集成

研究的另一个核心进展在于实现了平面衍射功能器件在多种基底上的原位全息打印与集成应用验证。研究人员采用干涉法，直接在单晶铌酸锂（LiNbO3）表面集成了MoS2菲涅尔全息图。该器件在532 nm和633 nm波长下的设计焦距分别为170 mm和150 mm，在633 nm波长照明下测得焦平面处的横向聚焦斑点直径约为60 μm，轴向瑞利长度约为15.7 mm，其实测斑点比理论计算的物理衍射极限直径（52.7 μm）增大约12%，聚焦效率范围为0.1-0.4%，展现出优异的光学性能。

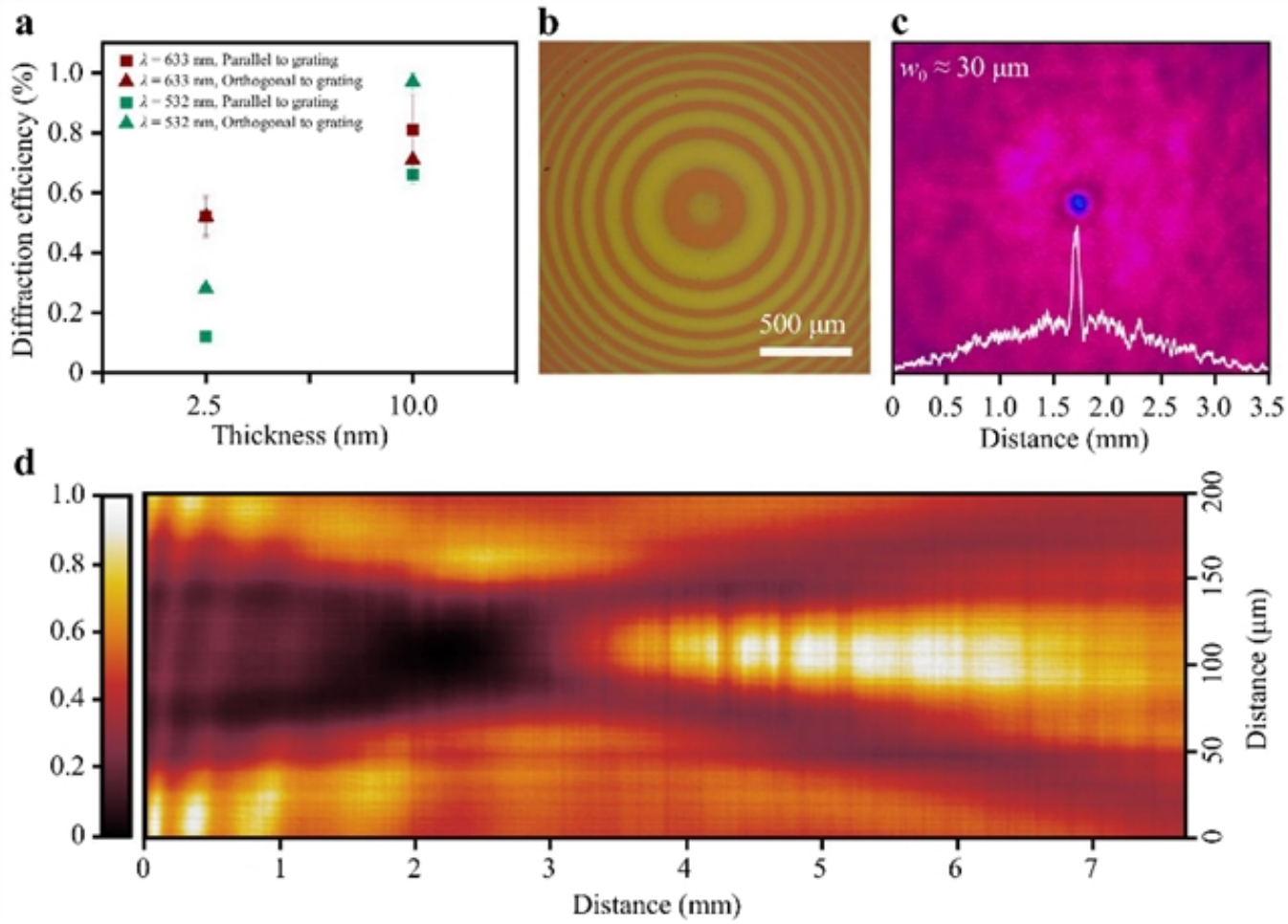


图4：TMDC光栅和Fresnel全息元件功能验证

为了进一步探索在片上集成领域的实用前景，团队在由0.7 μm厚的薄膜LiNbO3与10 μm厚的SiO2基底层构成的复合波导平台上，制造了结构周期为3 μm的MoS2集成光栅耦合器。借助CCD相机观察到633 nm的He-Ne激光被该光栅有效导入铌酸锂薄膜内并转变为内部导模传播，随后在波导系统的另一侧边缘观察到明显的输出光，成功实现了功能器件的集成性能验证。

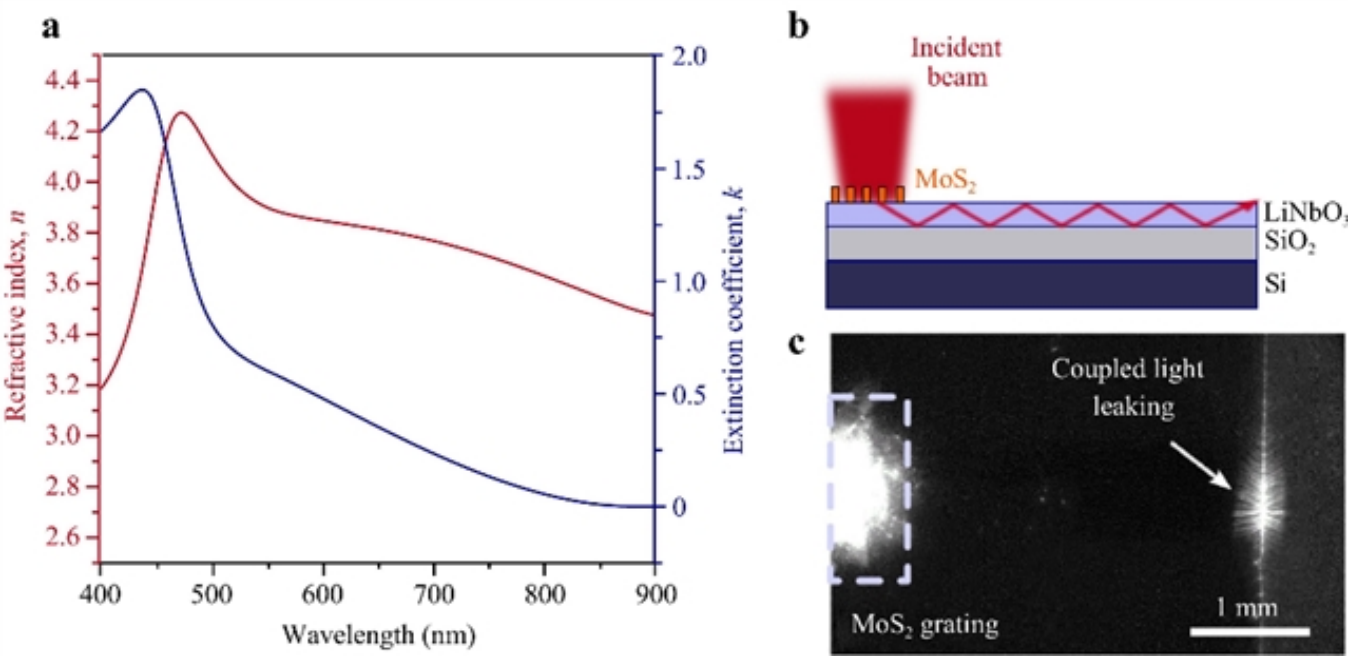


图5：MoS2光学常数测量及其在LiNbO3波导耦合中的应用验证

四、总结与展望

本研究提出了基于激光光刻的TMDC衍射光学元件制备方法，可在SiO2/Si、LiNbO3等基底上制备高质量一维光栅、二维周期结构及集成波导衍射元件。该两步工艺通过低强度预图案化与后续转化相结合，摆脱了传统单晶薄片或CVD薄膜依赖FIB后加工时在尺寸、通量和拼接精度上的限制，加工面积主要取决于位移台行程或激光束斑大小，具备进一步向工业级大面积制造扩展的潜力，并为柔性主动调谐器件和光电混合集成架构提供了新的制备路径。（来源：先进制造微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.37188/lam.2026.063

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费等事宜，请与我们接洽。
作者：Arina O. Kalganova 来源：《光：先进制造》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发