用于铌酸锂集成光子学的超高速高分辨率激光光刻

Jinming Chen[a]、Zhaoxiang Liu[a]、Lvbin Song[a]、Chao Sun[a]、Guanhua Wang[a]和Ya Cheng[a, b, c, *]

[a]极端光电机电实验室（XXL）、华东师范大学物理与电子科学学院，中国上海200241 [b]强场激光物理国家重点实验室和中国科学院超强激光科学卓越创新中心、中国科学院上海光学精密机械研究所（SIOM），中国上海201800[c]精密光谱科学与技术国家重点实验室，华东师范大学，中国上海200062

摘要

光刻辅助化学机械刻蚀（PLACE）是一种专为在薄膜铌酸锂（TFLN）上制造高质量、大规模光子集成电路（PIC）而开发的技术，已实现一系列光子集成电路基础器件的制造，涵盖高品质因数（高Q值）微谐振器、低损耗波导、电光（EO）可调谐激光器和波导放大器。为实现光子集成器件和系统的高通量制造，我们开发了一套超高速高分辨率激光光刻制造系统，采用高重复频率飞秒激光器和高速多边形激光扫描器，在200纳米制备分辨率下实现了4.8厘米^2/小时的光刻效率。我们展示了基于薄膜铌酸锂的光子结构、光学相位掩模以及彩色打印的晶圆级制造。

关键词：薄膜铌酸锂、光子集成电路、光刻、飞秒激光微加工

1. 引言

高光学性能先进材料与微纳加工技术的不断进步相结合，为集成光子学开启了新篇章。近年来，薄膜铌酸锂（TFLN）作为下一代光子集成电路（PICs）的材料平台，受到广泛关注[1-8]，这主要得益于其从紫外到中红外的宽透明窗口、适中的高折射率（既能实现高密度光子集成，又能使单模铌酸锂脊形波导保持合适的模场尺寸），以及较大的电光（EO）和非线性光学系数，这些特性对于高速电光调谐和高效波长转换应用至关重要[9-11]。值得注意的是，利用光刻辅助化学机械刻蚀（PLACE）技术[12-20]，已实现多种高性能光子集成电路器件；该技术专为大规模光子集成电路的量产而开发。举例而言，我们利用PLACE技术制备了超高品质因子（Q~1.23×10^8）光学微谐振器[17,18]和米级长度的光学延迟线[16]。PLACE制备技术采用激光直写进行掩模图案化，突破了曝光区域的尺寸限制；并采用化学机械抛光（CMP），使制备的波导侧壁达到亚纳米级表面粗糙度，从而有效抑制传播光的散射损耗。同时，利用铌酸锂晶体作为稀土离子掺杂的基质材料已是一项成熟技术。通过掺铒3+ 薄膜铌酸锂[21-24]，我们已实现电光可调谐微激光器、单频超窄线宽微盘激光器和波导放大器。

由于PLACE具有直写特性，其制造效率本质上取决于紧聚焦飞秒激光的扫描速度。在我们此前的方案中，通过使用高精度XYZ运动平台在三维（XYZ）空间内移动样品，同时保持激光焦点光斑固定不动，实现直写。我们此前实验中采用精密XY平台所达到的最高扫描速度为80厘米/秒，但该平台必须频繁

*ya.cheng@siom.ac.cn；电话：+86-21-6991-8546；传真：+86-21-6991-8021

加速或减速，以实现复杂掩模图案的写入。当运动平台进行加速和减速时，为保持运动平台的高定位精度，激光直写过程必须减速，这反过来又降低了制造效率。为解决这一问题，我们最近开发了一种超高速高分辨率飞秒光刻系统，将多边形扫描器与高精度XYZ运动平台相结合。通过这种方式，运动平台的加速和减速过程得以消除，扫描速度可达到2米/秒，远高于高精度运动平台的最高速度，从而能够以200纳米的制备分辨率实现4.8厘米^2/小时的超高生产效率。我们展示了大规模光子结构和器件的制备，包括基于TFLN的真光学延迟线、晶圆级光学相位板（OPP）以及晶圆级激光彩色打印。

2. PLACE 制备技术

首先，我们介绍 PLACE 技术的制备流程，其示意图如图 1 所示。首先，利用飞秒激光烧蚀，将沉积在薄膜铌酸锂上的铬（Cr）金属薄膜图案化为预先设计的掩模形状。随后，对覆盖有 Cr 掩模的薄膜铌酸锂进行化学机械抛光（CMP）。由于 Cr 硬度较高，Cr 掩模可在 CMP 过程中保护其下方的 LN，从而将 Cr 掩模图案转移到薄膜铌酸锂上。最后，去除残留的 Cr 掩模，再进行额外的 CMP，以进一步平滑波导的上边缘。该技术能够使光子集成电路的占用面积几乎不受物理限制地扩展，因为制备分辨率仅由焦斑尺寸决定，而焦斑尺寸与用于聚焦飞秒激光束的物镜视场无关。此外，通过 CMP 制备的光子结构表面粗糙度可远低于 1 nm，使传播损耗接近 LN 的吸收极限。

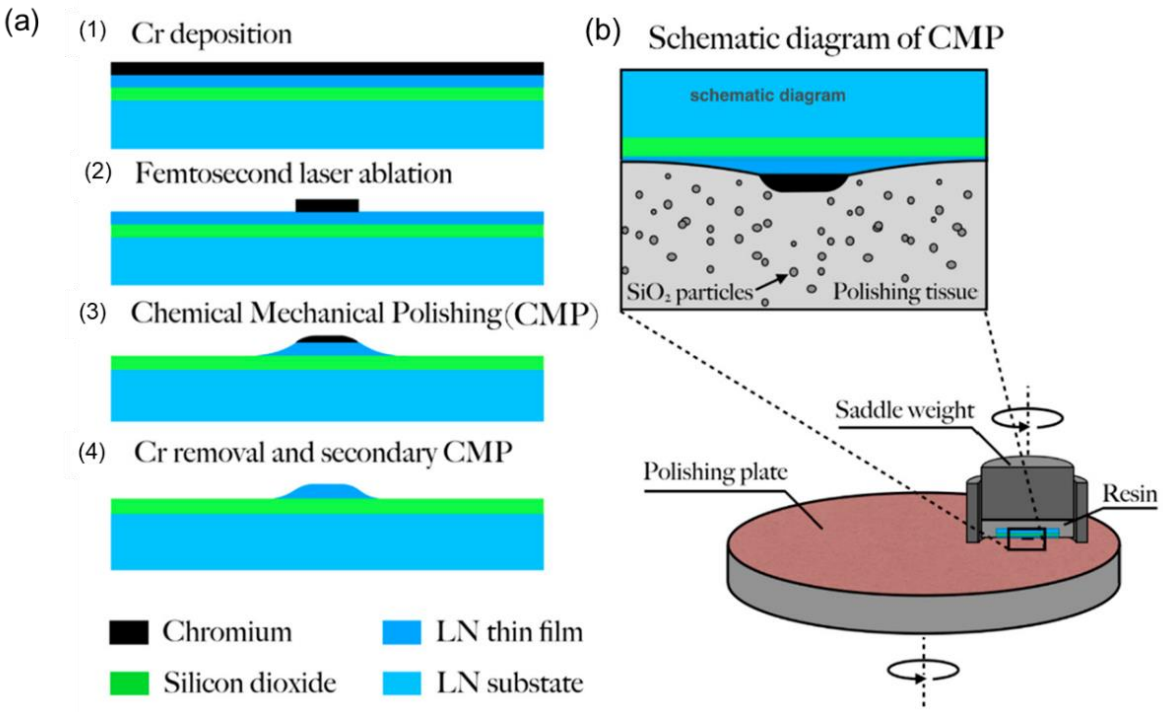


图1. (a) PLACE技术加工流程示意图。(b) 化学机械抛光流程。

为展示PLACE技术的高性能，我们制备了薄膜铌酸锂微盘[17] 和微环[18] 谐振器，分别如图2(a)-(b)所示，其表面极为光滑，平均表面粗糙度低于0.5 nm。微盘的实测透射光谱如图2(c)所示，本征品质因数为1.2×10^8。图2(d)展示了通过光子环方法测得的品质因数；该方法采用高速马赫-曾德尔调制器将激光波长反复扫描至目标谐振处。测得的光子寿命为64.3 ns，对应的品质因数为1.23×10^8，与图2(c)中的品质因数吻合良好。由于化学机械抛光工艺不涉及离子束刻蚀（IBE），因此能够实现超越离子束刻蚀工艺所能达到的表面光滑度

这很容易实现。图2(e)展示了采用PLACE技术[24]在铒$^{3+}$ 掺杂薄膜铌酸锂晶圆上制备的LN波导放大器。得益于低传播损耗和长达10 cm的波导长度，在~980 nm二极管激光器泵浦下，信号波长约为1532 nm时实现了超过20 dB的小信号增益。

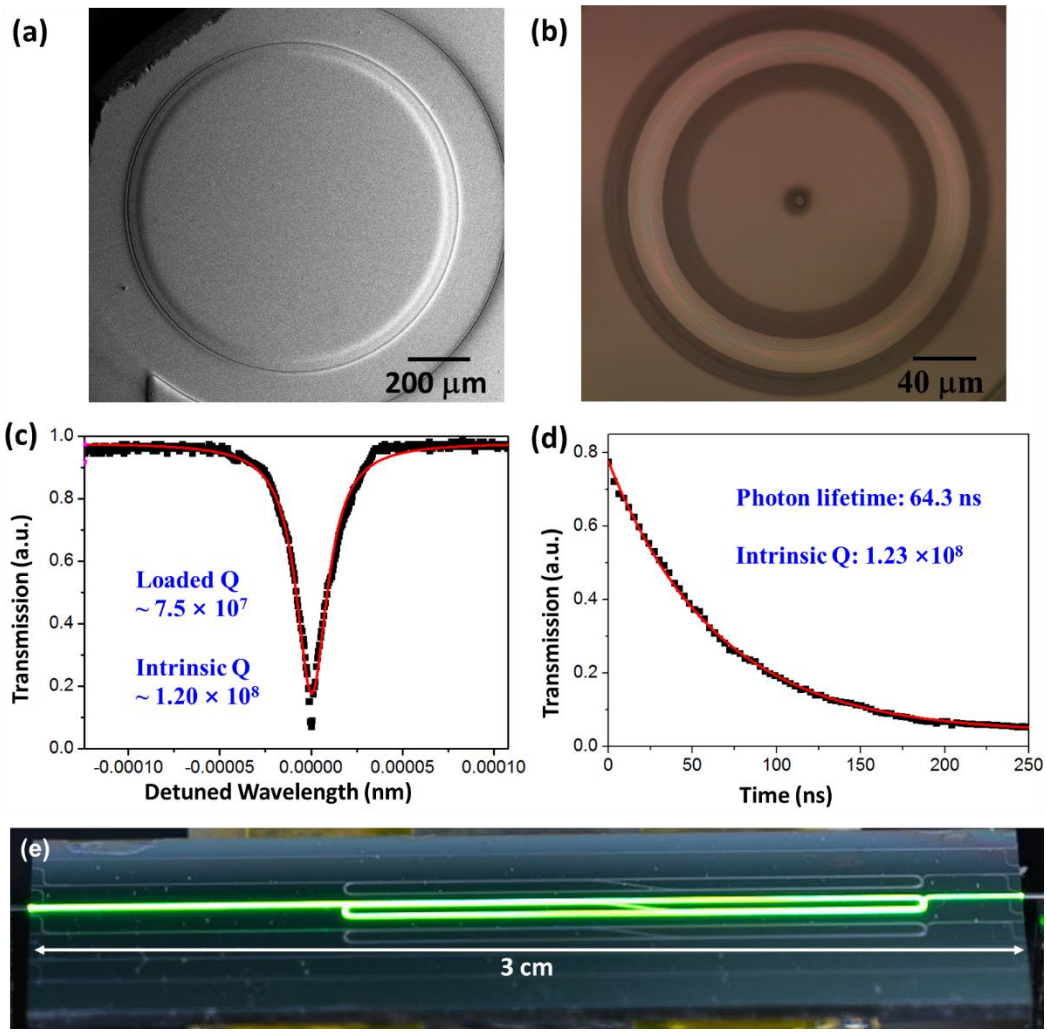


图 2. (a) 微盘谐振器的 SEM 图像。(b) 微环的光学显微镜图像。(c) 透射光谱。(d) 波长为 1551.52 nm 时的光子寿命测量。(e) 受激 Er3+-薄膜铌酸锂波导芯片的数码相机照片。

3. 高速飞秒光刻系统

PLACE制备技术采用高速飞秒激光直写系统，在铬薄膜上进行掩模图案化。新开发的基于多边形扫描器的飞秒光刻系统示意图如图3(a)所示，其中高速旋转镜将激光脉冲反射至物镜，使其在基底上表面形成一个沿水平方向快速移动的微小焦点光斑。同时，利用低速运行的XY运动平台实现垂直方向扫描，从而在XY平面内进行同步二维扫描。为在铬薄膜上形成预先设计的图案，自制控制器会在光束扫描过程中快速切换激光脉冲的开关。图3(b)展示了自制系统的照片，该系统主要由高重复频率飞秒激光系统、XYZ运动平台和多边形扫描器组成。此外，多边形扫描器可设定为3000线/秒的高速扫描。通过同步激光脉冲、旋转扫描器和运动平台，我们实现了无限视场（IFOV）加工，即基底上用于制作掩模的图案区域不再受物镜视场的限制，而仅受XY平台运动范围的限制。在我们的实验中，XY平台的运动范围为200 mm×200 mm。为实现高

分辨率制备性能，采用高数值孔径（NA）物镜进行光刻工艺，加工速度为~2 m/s，制造效率为~4.8 cm2/h，制备分辨率为~200 nm。本研究中，制备分辨率由200纳米厚铬薄膜上形成的激光烧蚀沟槽宽度确定。表面平整度误差通过自制实时聚焦模块解决。使用自制的超高速飞秒激光光刻制造系统，通过连续制备工艺在一片4英寸晶圆上制备了1960个马赫-曾德尔干涉仪（MZI）结构阵列，如图3(c)所示。我们选择MZI作为测试系统的示例，因为MZI是基于薄膜铌酸锂（TFLN）的高速电光调制器的核心。实验确认，每个总长度为10 mm的MZI仅需4.3秒即可完成图案化，表明该系统具有很高的制造效率，非常适合工业规模的大批量生产。

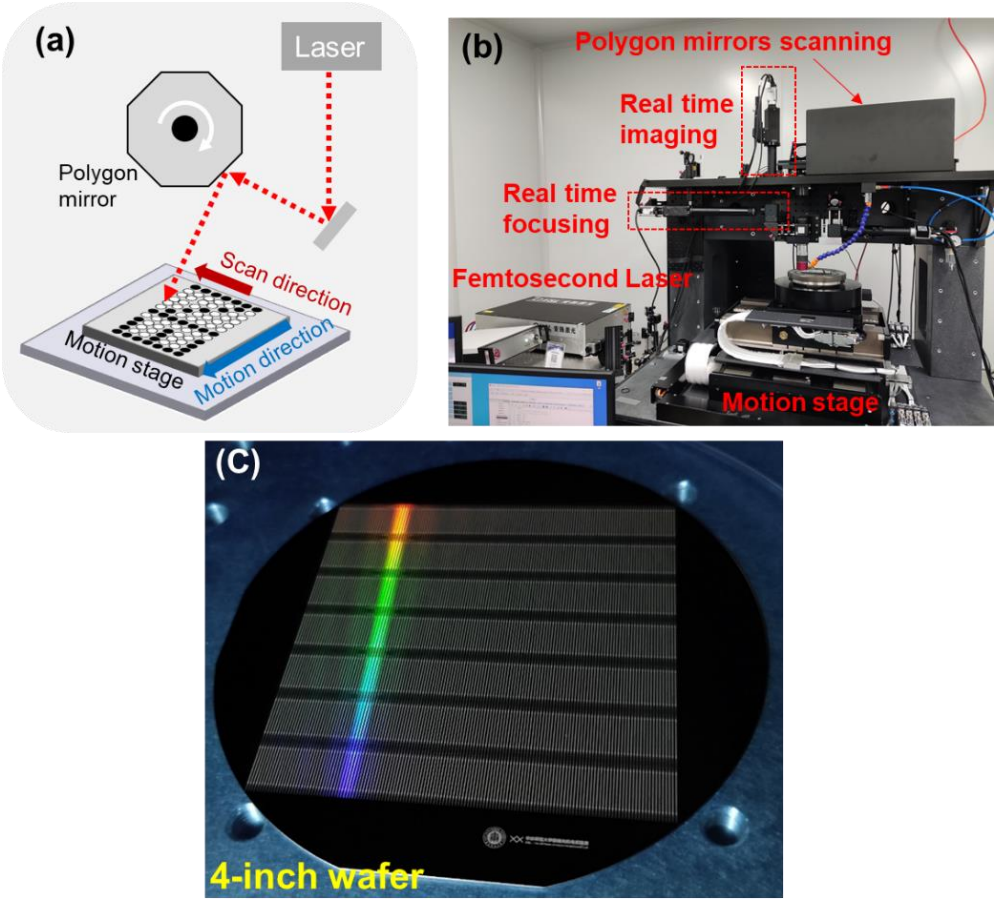


图 3. (a) 超高速多边形激光扫描器的原理。(b) 基于多边形扫描器的飞秒激光光刻系统实物图。(c) 4英寸晶圆上的 1960 个 MZI结构。

4. 晶圆级纳米加工的应用

4.1 在薄膜铌酸锂上快速制造大型光子结构

利用高速飞秒激光光刻系统，我们成功制备了占地面积较大且传播损耗适中的光子结构。尤其是，对于光子集成电路应用至关重要的波导传播损耗，应以足够高的精度进行表征。为此，我们使用高速 PLACE 制造系统在铌酸锂绝缘体衬底上制备了一个非平衡MZI。如图 4(a) 所示，两臂的长度差为 10 cm。由于在 MZI 两端附近使用了两个分束比为 50:50 的 1×2 多模干涉仪（MMI），因此可通过测量功率计记录的透射干涉信号消光比（ER）随波长的变化来确定波导传播损耗。图 4(a) 的插图展示了1×2 MMI以及绕曲波导欧拉弯曲的放大光学显微图，箭头标出了相应位置。我们

使用覆盖电信波段波长范围的可调谐激光器作为测量波导损耗的光源。可调谐激光器通过透镜光纤耦合至铌酸锂脊形波导。另一根透镜光纤收集铌酸锂波导的输出信号，并将其导入光电探测器。示波器用于分析 MZI 输出光转换得到的电信号。图 4(b) 绘出了 1563.84 nm 附近的透射光谱，显示自由光谱范围（FSR）为 0.0116 nm，消光比（ER）为~-5 dB。光程差可表示为 $\frac{\lambda^2}{FSR}$ 21 cm，这与非平衡MZI两臂的 10 cm 长度差乘以铌酸锂脊形波导中 2.1 的群折射率所得结果吻合。设短臂和长臂的输出功率分别为 P1 和 P2，两臂长度差为 L，则 ER 可表示为 $ER = \frac{P1-P2}{P1+P2}$，这表明传播损耗 $\alpha = -\frac{10}{L}\log\left(\frac{P2}{P1}\right)$ $= -10\log\left(\frac{[1-ER]}{[1+ER]}\right)/L$。根据实验测得的 -5 dB ER，我们得出所制波导的传播损耗为 0.3 dB/cm。该损耗约为采用 PLACE 技术制备的铌酸锂波导典型损耗的一个数量级，这是因为此前采用了不同的扫描方案：沿波导轮廓移动聚焦飞秒激光束的光斑，以确保生成边缘光滑的铬硬掩模[19,20]。而在当前的高速飞秒激光光刻制造中，采用了光栅扫描方案，虽提高了制造效率，但边缘粗糙度略有增加。尽管如此，0.3 dB/cm 的传播损耗仍与采用电子束光刻（EBL）制备的铌酸锂脊形波导的典型损耗相当，对于占地面积达厘米尺度的铌酸锂光子器件而言已经足够低。大规模光子集成电路通常要求更低的传播损耗，可通过进一步缩短激光开关时间并改善多边形扫描器与高速快门之间的同步来实现，因为这些是导致铬掩模残留边缘粗糙度的主要因素。

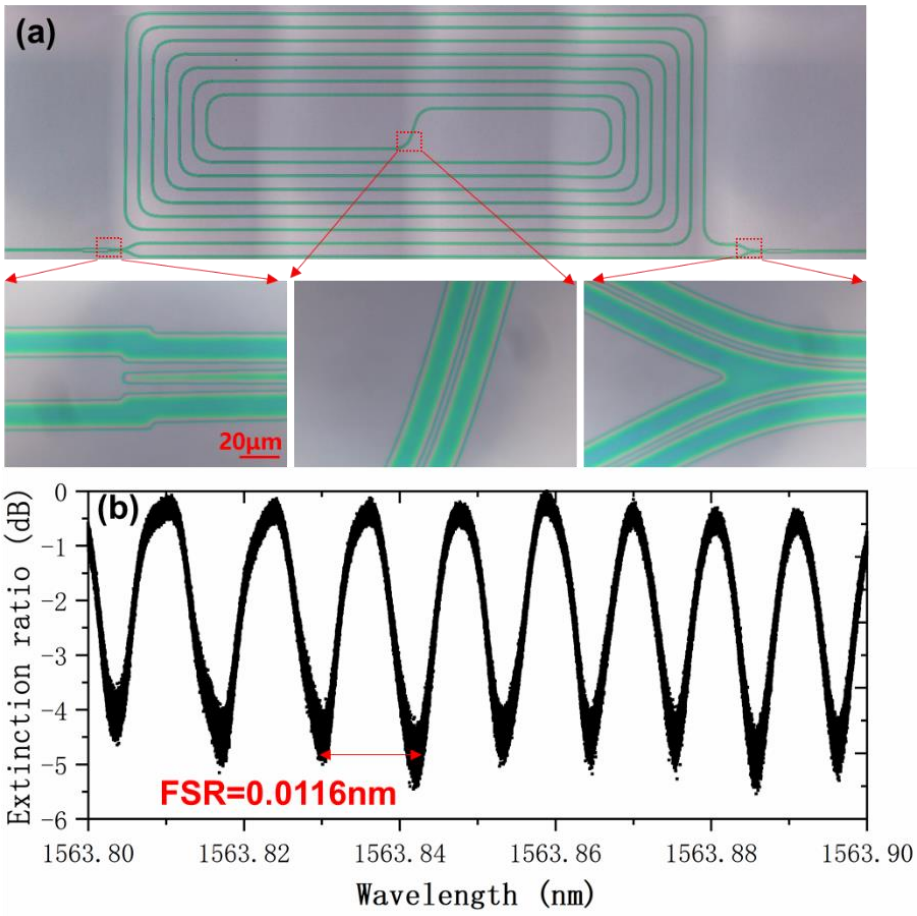


图 4. (a) 绝缘体上铌酸锂上长度差为 10 cm 的非平衡MZI显微图。插图：1×2多模干涉耦合器和欧拉弯曲波导的放大显微图。(b) 1563.84 nm 附近的透射光谱，用于表示消光比。

4.2 晶圆级光学相位板的快速制备

高速飞秒激光光刻系统是一种极具价值的制备工具，适用于在各种材料上进行大面积、高于亚微米级制备分辨率的加工，其应用并不局限于薄膜铌酸锂光子集成电路。下面，我们展示晶圆级光学相位板的制备，这类器件是光场整形与调控的基础。首个尺寸为 1 cm × 1 cm 的晶圆级光学相位板由棋盘格光栅构成，其中包含 1-μm 单元，如图 5(a)-(b) 所示。从图 5(b) 中所示光学相位板的数码相机照片可以看到，由光衍射产生的结构色。为了检验其衍射性能，我们使波长为 632 nm 的连续波（CW）激光穿过该光学相位板，然后用电荷耦合器件相机记录，以呈现衍射图样。如图 5(c) 所示，CW 光束被分成四束衍射光，分布在正方形的四个角上。图像中央可以看到未发生衍射的零级光束。四束衍射光在光束强度和空间轮廓方面均具有良好的一致性，这清楚地表明所制备的光学相位板结构均匀。同样，我们采用相同的制备流程制备了图 5(d)-(e) 所示的涡旋光栅。如图 5(f) 所示，波长为 632 nm 的 CW 激光束被均匀分成八束，并沿环形等间距排列。

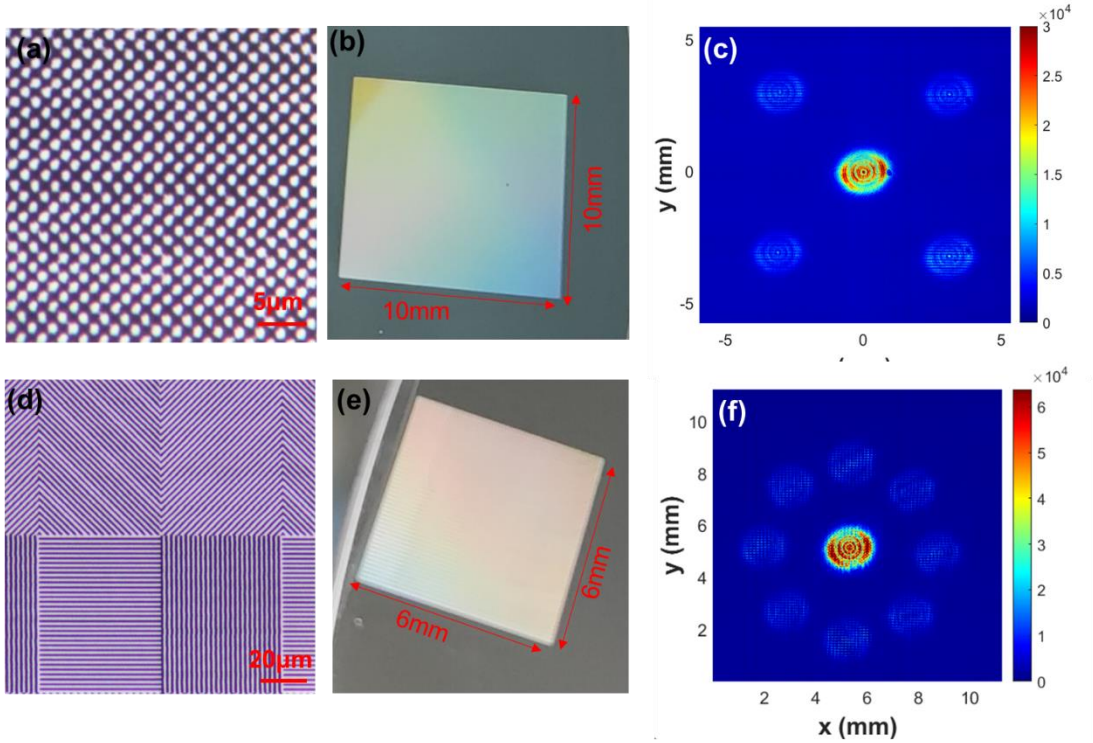


图 5。（a）具有 1 μm 单元像素的棋盘格光栅显微图。（b）图 6（a）的数码相机照片，尺寸为 10 mm×10 mm。（c）经过棋盘格光栅后的光斑分布。（d）具有 1 μm 线宽的涡旋光栅显微图。（b）图 6（d）的数码相机照片，尺寸为 6 mm×6 mm。（f）经过涡旋光栅后的光斑分布。

4.3 晶圆级快速彩色印刷

快速制备具有微米级像素尺寸且覆盖晶圆尺度范围的精细光栅结构的能力，使得基于光栅衍射效应的晶圆级彩色打印成为可能。如图 6(a) 所示，以这种方式产生的结构色强烈依赖于衍射角和光栅周期。对于固定的观察角（即固定的衍射角），通过调节光栅周期，可以产生可见光范围内的完整光谱。此处，我们选择在镀有铬薄膜的熔融石英晶圆上制备反射光栅，其结构与第 4.2 节所述的光栅结构类似。不过，在彩色打印中，每个尺寸为 20 μm ×20 μm 的彩色像素内的光栅都采用各自的光栅周期进行制备，以对应像素所呈现的颜色。此处，观察角（与彩色打印样品的衍射角相同）设定为 30 度，这是观看者手持样品时较为方便的角度。根据这一衍射角，我们可以利用著名的方程 $d\sin\theta = m\lambda$，计算光栅周期 d 随衍射波长 λ 的变化关系。计算结果见图

6(b)：选择衍射级次 m=4，以便在可见光波长范围内获得相对较大的光栅周期（即 3.2–6.2 μm）。为验证图 6(b) 中的计算结果，我们制备了一组不同颜色的样品（下文称为色板），用于表征彩色打印的质量。如图 6(c) 所示，在白光源照射下拍摄的已制备色板的数码照片，其颜色与图 6(b) 中对应光栅周期所示的颜色完全一致。如图 6(d) 所示，色板反射的光束呈现出一系列颜色，在 CIE 1931色度图中形成宽色域。这表明，得益于基于多边形扫描器的飞秒激光光刻系统具有较高的制造效率和制备分辨率，所提出的光栅衍射效应可用于晶圆级彩色打印。图 6(e)–(f) 对比了华东师范大学校园的原始纸质照片（图 6(e)）与使用我们的飞秒激光光刻系统打印在 4英寸晶圆上的同一图像经白平衡处理后的数码照片（图 6(f)）。可以看出，尽管两幅图像确实存在一些差异，但原始图像在彩色打印样品上得到了良好再现；通过进一步优化光栅设计参数和图像转换算法，还可以改善这些差异。得益于 4.8 cm^2/h 的超高制造效率，打印图 6(f) 所示面积为 32.7 cm2 的完整图像总共耗时约 ~6.8 小时。

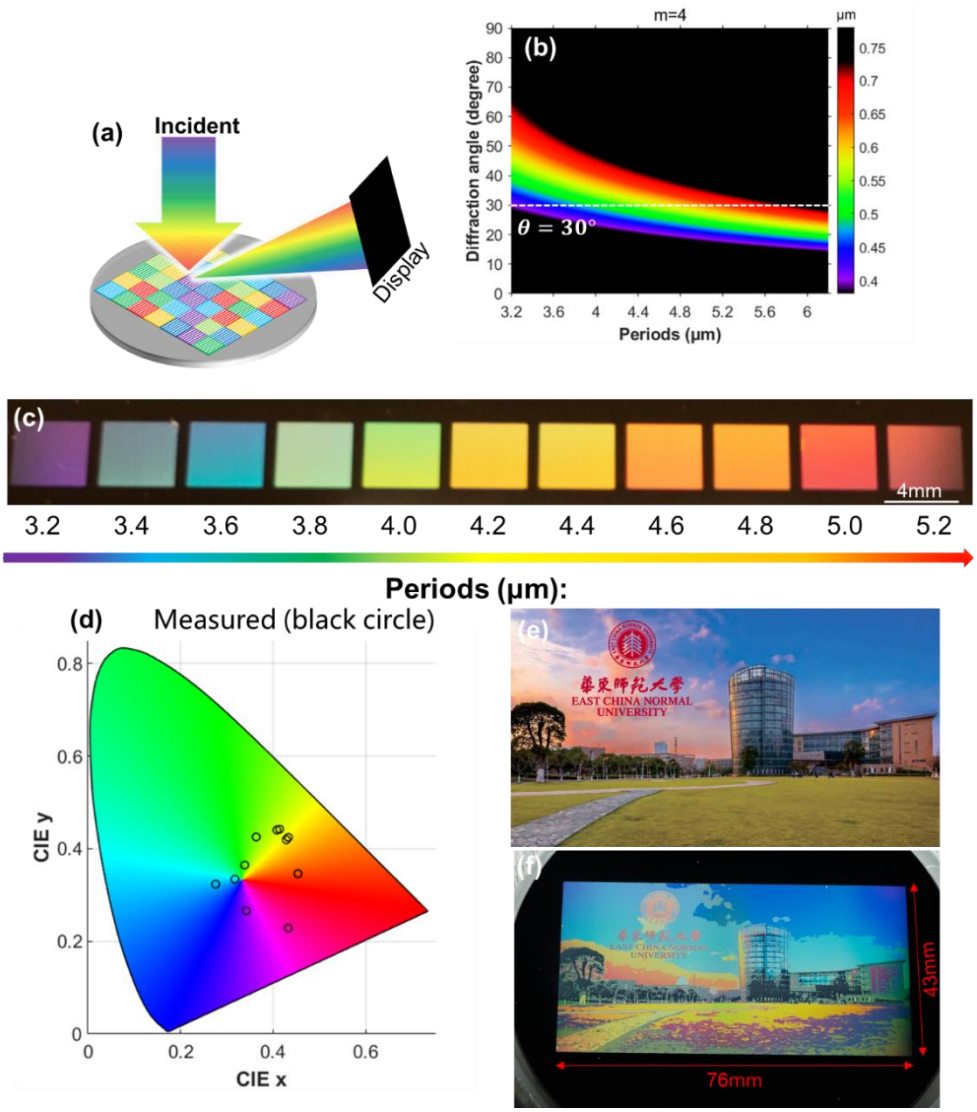


图6。（a）基于光栅衍射效应的结构色原理。（b）四阶衍射中理论计算的衍射角随光栅周期的变化。（c）不同光栅周期下色板的数码相机照片。（d）测得的反射颜色（黑色圆点）在CIE 1931色度图中的分布。华东师范大学校园的（e）原始图片和（f）4英寸晶圆彩色打印。

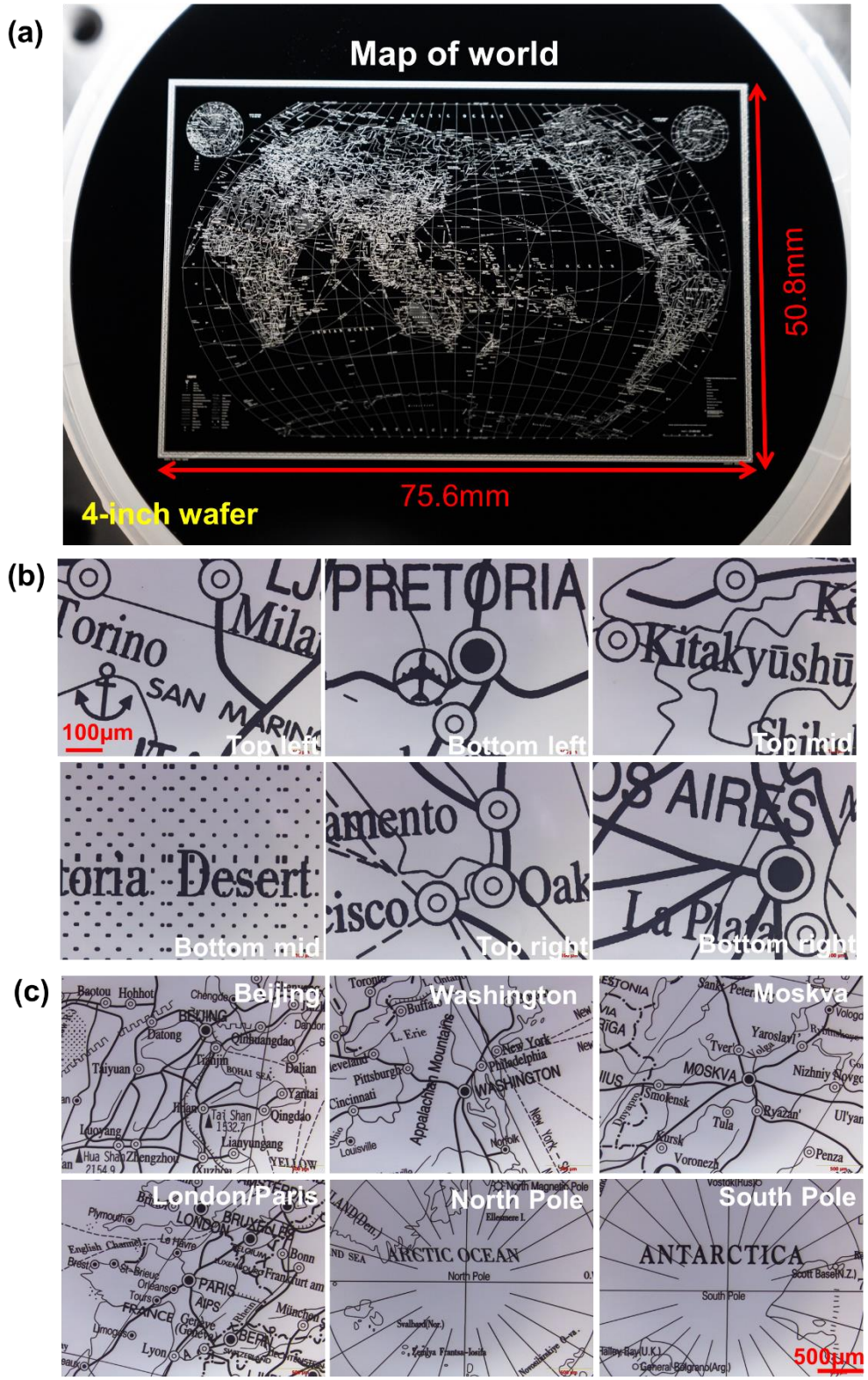


图 7 （a）世界地图的数码相机照片。（b）世界地图左上、左下、中上、中下、右上和右下位置的显微图。（c）不同城市（北京、华盛顿、莫斯科、伦敦和巴黎）以及北极/南极地图的显微图，用于展示全球视图。

4.4 超高分辨率和高均匀性的晶圆级微打印

我们的基于多边形扫描器的飞秒激光光刻系统最大的优势，在于其本质上具备无限视场，并且在整个晶圆区域内具有极高的均匀性。这是因为采用这种策略时，制备分辨率仅由聚焦系统（即物镜）产生的焦点光斑尺寸决定。同时，加工区域仅由高精度平台的运动范围决定；原则上，借助当今的商用产品，该范围可以扩展至米级范围。因此，构建一种能够在大视场内确保高且均匀的空间分辨率的光学成像系统这一难题得以解决。为展示这种利用无限视场实现高分辨率和高均匀性掩模图案化的能力，我们在一片涂覆铬薄膜的4英寸熔融石英晶圆上连续打印了一幅世界地图。如图7(a)所示，世界地图的总面积为75.6 mm×50.8 mm。值得注意的是，该地图总共由864亿像素组成。为验证加工均匀性，我们分别检查了地图左上、左下、上中、下中、右上和右下等不同区域的打印质量，如图7(b)所示。图7(b)所有面板中，由飞秒激光直写产生的图案边缘均十分清晰，线条也保持笔直，这清楚表明了我们的光刻系统具有很高的均匀性。图7(c)展示了包括北京、华盛顿、Moskva、伦敦/巴黎以及南/北极在内的不同城市的显微图，这些图案具有复杂的交通网络，再次证明了我们的基于多边形扫描器的飞秒激光光刻系统能够生成任意图案。

5. 结论

光刻是一项重要的微纳制造技术，可用于制造微型化器件和系统，应用领域涵盖电子学、光子学、化学、生物学和医学等。基于飞秒激光直写的光刻技术具有空间分辨率高、制造效率高等优势；与电子束光刻和聚焦离子束写入相比，该技术还能够通过飞秒激光烧蚀或飞秒激光改性处理多种衬底材料，因而具有更高的灵活性。对于工业应用而言，高吞吐量至关重要，这要求光刻系统具备较高的扫描速度。我们基于多边形扫描器搭建的制造系统为实现这一目标提供了一个实例。利用该系统，我们展示了在薄膜铌酸锂衬底上制造低损耗波导的能力，可用于大规模光子集成电路应用。我们还展示了一系列晶圆级微加工应用，例如 OPP 和激光打印。目前，在最高制备分辨率 200纳米下，我们已实现 4.8 cm^2/小时的制造效率，从而能够在几小时内于整片4英寸晶圆范围内生成万亿像素级图案。预计随着高重复频率飞秒激光器以及高速电子快门/控制器的不断发展，制造效率还可进一步提升 1~2 个数量级，最终实现几分钟内完成一片4英寸晶圆的图案化。这将产生深远影响，因为微型化将在未来社会中发挥核心作用。

致谢

本研究获得上海市科学技术委员会（编号：21DZ1101500）和上海市科技重大专项（Grant 编号：2019SHZDZX01）的资助。

参考文献

[1] Cheng, Y., 《铌酸锂纳米光子学》, Taylor & Francis，纽约，第1版，（2021年）。[2] Zhang, M., Wang, C., Cheng, R., Shams-Ansari, A., and Lončar, M., “单片超高Q铌酸锂微环谐振器”, Optica 4(12), 1536-1537 (2017). [3] Wang C., Zhang, M., Chen, X., Bertrand, M., Shams-Ansari, A., Chandrasekhar, S. Winzer, P. and Lončar, M., " “工作于兼容CMOS的电压下的集成铌酸锂电光调制器," 《自然》, 562, 101- 104 (2018年).[4] Wang, C., Zhang, M., Yu, M., Zhu, R., Hu, H., and Lončar, M., “用于克尔频率梳生成与调制的单片铌酸锂光子电路”, 《自然·通讯》, 10, 978 (2019年).

[5] Yu, M., Barton, D., Cheng, R., Reimer, C., Kharel, P., He, L., Shao, L., Zhu, D., Hu, Y., Grant, H., Johansson, L. Okawachi, Y., Gaeta, A., Zhang, M., and Lončar, M., " 薄膜铌酸锂上的集成飞秒脉冲发生器, "《自然》, 612, 252-258 (2022年).[6] Li, M., Chang, L., Wu, L., Staffa, J., Ling, J., Javid, U., Xue, S., He, Y., Lopez-rios, R., Morin, T., Wang, H., Shen, B., Zeng, S., Zhu, L., Vahala, K., Bowers, J., and Lin, Q., " 集成普克尔斯激光器," 《自然·通讯》, 13, 5344 (2022年).[7] Pohl, D., Escale, M., Madi, M., Kaufmann, F., Brotzer, P., Sergeyev, A., Guidimann, B., Giaccari, P., Alberti, E., and Meier, U., "薄膜铌酸锂上的集成宽带光谱仪", 《自然·光子学》, 14, 24-29 (2020年).[8] Zhang, Y., Shao, L., Yang, J., Chen, Z., Zhang, K., Shum, K., Zhu, D., Chan, C., Lončar, M., and Wang, C., "薄膜铌酸锂中毫米波光调制性能的系统研究", 《光子学研究》, 10(10), 2380 (2022年).[9] Boyd, G. D., Miller, R. C., Nassau, K., Bond, W. L., and Savage, A., "$LiNbO_3$：一种高效的相位匹配非线性光学材料", 《应用物理快报》 5(11), 234-236 (1964年). [10] Weis, R. S., and Gaylord, T. K., "铌酸锂：物理性质与晶体结构概述", 《应用物理A》 37(4), 191-203 (1985年).[11] Jin, H., Liu, F., Xu, P., Xia, J., Zhong, M., Yuan, Y., Zhou, J., Gong, Y., Wang, W., and Zhu. S., "基于可重构铌酸锂波导电路的片上纠缠光子产生与操控", 《物理评论快报》 113(10),103601 (2014年). [12] Wu, R., Lin, J., Wang, M., Fang, Z., Chu, W., Zhang, J., Zhou, J., and Cheng, Y., "采用飞秒激光辅助化学机械抛光在绝缘体上铌酸锂上制备多功能光子集成芯片", 《光学快报》 44(19), 4698-4701 (2019年). [13] Wu, R., Gao, L., Liang, Y., Zheng, Y., Zhou, J., Qi, H., Yin, D., Wang, M., Fang, Z., and Cheng, Y., "采用光刻辅助化学机械刻蚀（PLACE）高产率制备低损耗铌酸锂电光调制器", 《微型机械》, 13 (3), 378 (2022年). [14] Fang, Z., Luo, H., Lin, J., Wang, M., Zhang, J., Wu, R.,Zhou, J.,Chu, W., Lu, T., and Cheng, Y., "单片集成高Q值铌酸锂微盘上光频微梳的高效电光调谐", 《光学快报》 44(24), 5953-5956 (2019年). [15] Fang, Z., Haque, S., Farajollahi, S., Luo, H., Lin, J., Wu, R., Zhang, J., Wang, Z., Wang, M., Cheng, Y., and Lu, T., "用于高效二次谐波、光机械和频率梳生成的弱扰动回音壁微谐振器中的多边形相干模式", Phy. Rev. Lett. 125, 173901 (2020年). [16] Zhou, J., Gao, R., Lin, J., Wang, M., Chu, W., Li, W., Yin, D., Deng, L., Fang, Z., Zhang, J., Wu, R., and Cheng, Y., "采用光刻辅助化学机械刻蚀在绝缘体上铌酸锂上制备的米级长度电光可切换光学真时延线," Chin. Phys. Lett., 37, 084201 (2020年)[17] Gao, R., Zhang, H., Bo, F., Fang, W., Hao, Z., Yao, N., Lin, J., Guan, J., Deng, L., Wang, M., Qiao, L., and Cheng, Y., "Q因子高于10^8,的片上集成铌酸锂微盘谐振器中的宽带高效非线性光学过程," 《新物理学杂志》, 23, 123027 (2021年).[18] Gao, R., Yao, N., Guan, J., Deng, L., Lin, J., Wang, M., Qiao, L., Fang, W., and Cheng, Y., "Q因子高于10^8,的铌酸锂微环," 《中国光学快报》, 20, 011902 (2022年).[19] Wu, R., Zhang, J., Yao, N., Fang, W., Qiao, L., Chai, Z., and Cheng, Y., "品质因数高于10^7,的铌酸锂微盘谐振器," 《光学快报》, 43(17), 4116-4119 (2018年).[20] Wu, R., Wang, M., Xu, J., Qi, J., Chu, W., Fang Z., Zhang, J., Zhou, J., Qiao, L., Chai, Z. Lin, J., and Cheng, Y., "具有亚纳米级表面粗糙度的长低损耗绝缘体上铌酸锂波导", 《纳米材料》, 8(11), 910 (2018年). [21] Yin, D., Zhou, Y., Liu, Z., Wang, Z., Zhang, H., Fang, Z., Chu, W., Wu, R.,Zhang, J., Chen, W., and Cheng, Y., "单片集成于绝缘体上铌酸锂的电光可调谐微环激光器", 《光学快报》 46(9), 2127-2130 (2021年). [22] Lin, J., Farajollachi, S., Fang, Z., Yao, N., Gao,R., Guan, J., Deng, L., Lu, T., Wang, M. Zhang, H., Fang, W., Qiao, L., and Cheng, Y., "单频超窄线宽微盘激光器的电光调谐", 《先进光子学》, 4, 036001 (2022年).[23] Zhou, J., Liang, Y., Liu, Z., Chu, W., Zhang, H., Yin, D., Fang, Z., Wu, R., Zhang, J., Chen, W., Wang, Z., Zhou, Y., Wang, M., and Cheng, Y., "掺铒薄膜绝缘体上铌酸锂上的片上集成波导放大器," 《激光与光子学评论》, 15, 2100030 (2021年).

[24] Liang, Y., Zhou, J., Liu, Z., Zhang H., Fang, Z., Zhou, Y., Yin, D., Lin, J., Yu, J., Wu, R., Wang, M., 和 Cheng, Y., “采用光刻辅助化学机械刻蚀制备的掺铒薄膜铌酸锂高增益包层波导放大器”, 《纳米光子学》11(5), 1033–1040（2022年）。