

激光与光电子学进展

基于空间光调制器的并行微纳光刻技术研究进展

匡珺洁^{1,2}, 罗宁宁^{1,2*}, 张静雅^{1,2}, 王岩磊^{1,2}, 熊鑫^{1,2}, 孟庆旺^{1,2}

¹南昌航空大学江西省光电信息科学与技术重点实验室, 江西 南昌 330063;

²南昌航空大学江西省光电检测技术工程实验室, 江西 南昌 330063

摘要 并行微纳光刻技术是实现微结构快速制造的重要技术手段。在简要介绍并行微纳光刻技术原理和优势的基础上,重点对基于空间光调制器的并行微纳光刻技术进行了分析和论述。按照对入射光场的调制作用,分多焦点和投影并行微纳光刻两类综述了其技术原理和研究进展。最后对两类基于空间光调制器的并行微纳光刻技术的现状及存在问题进行了归纳总结,并对它们的发展前景进行了展望。

关键词 并行微纳光刻; 微结构; 空间光调制器; 多焦点; 投影并行

中图分类号 TN305.7

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1100009

Review on the Progress of Parallel Micro/Nano Lithography Based on Spatial Light Modulator

Kuang Junjie^{1,2}, Luo Ningning^{1,2*}, Zhang Jingya^{1,2}, Wang Yanlei^{1,2}, Xiong Xin^{1,2},
Meng Qingwang^{1,2}

¹Key Laboratory of Opto-Electronic Information Science and Technology of Jiangxi Province,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

²Jiangxi Engineering Laboratory for Opto-Electronic Measuring Technology, Nanchang
Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China

Abstract Parallel micro/nano lithography is essential for rapidly fabricating microstructures. This review briefly introduces the principle and advantages of parallel micro/nano lithography and then analyzes and discusses spatial light modulator (SLM)-based parallel micro/nano lithography. In terms of modulation to incident light, the principle and progress of SLM-based parallel micro/nano lithography (which is divided into two types, i. e., multifocus parallel lithography and projection parallel lithography) are reviewed. This review summarizes the current situation, existing problems, and future prospects of these two types of SLM-based parallel micro/nano lithography.

Key words parallel micro/nano lithography; microstructure; spatial light modulator; multi-focus; projection parallel

1 引 言

近年来,微纳结构元件因体积小、集成度高等优点受到广泛的关注。传统的微纳加工技术基于串行的加工方法,加工精度高,但逐行写入效率低,

且加工时间与物体尺寸的三次方成比例^[1],加工单个微纳结构通常需要几个小时甚至更长时间^[2-3],因此很难得到推广应用。

为突破串行加工方法效率低这一局限性,研究人员提出了并行微纳光刻技术,该技术通常直接在

收稿日期: 2022-01-28; 修回日期: 2022-03-31; 录用日期: 2022-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(61464008,61704070)

通信作者: *ningningluo2002@126.com

传统微纳加工光学系统中引入微透镜阵列或衍射光学元件^[4-6],将光源分成多束进行并行加工,但局限于制造特定形状或轮廓的周期性结构,灵活性较差。为此,研究人员提出了基于空间光调制器的并行微纳光刻技术,通过灵活控制并行光束的强度和相位,实现高分辨、高效率的微结构加工。该技术不仅可以显著提高加工效率,而且可用于复杂微纳结构的加工,大大提高了制造灵活性,因此得到了广泛的推广和应用。基于空间光调制器的并行微纳光刻技术根据其技术特点,可分为多焦点并行和投影并行光刻两大类。多焦点并行光刻技术根据多焦点产生方式,可分为微透镜阵列/波带片阵列多焦点调制和全息多焦点调制;投影并行光刻技术可分为直接投影和全息投影。本文对基于空间光调制器的并行微纳光刻技术进行归纳分析,总结了各类技术的原理、特点及应用,并对其发展趋势进行了预测。

2 基于空间光调制器的并行微纳光刻技术原理及特点

传统并行光刻技术如激光干涉光刻、微透镜阵列光刻等,局限于制造周期性微纳结构,灵活性较差。近年来,国内外研究人员对基于空间光调制器的并行光刻技术进行了广泛的研究。

空间光调制器是一种通过控制输入驱动信号,实现对空间光场的相位、振幅和偏振等光学特性进行调制的动态元器件,同时能够在空间光场中实现信息的同步,因其具有集成度高、易于控制等优点被广泛应用于微纳光刻技术领域。典型的空空间光调制器有硅基液晶空间光调制器(LCoS SLM)^[7]和数字微镜器件(DMD)^[8],两者都可实现光束的振幅调制和相位调制。LCoS通过改变入射光偏振态,配合系统光路中的起偏器与检偏器,实现振幅型调制;要想实现纯相位调制,必须保证入射光偏振方向与液晶分子取向方向相同,使光束在入射前后偏振方向不改变情况下进行纯相位调控^[9]。DMD振幅调制可分为二值化振幅调制与灰度振幅调制^[10]。简单控制每个微镜的开关,在垂直光轴平面上的图案是一幅经过DMD调制后由0、1组成的二维矩阵,即可实现二值化的振幅调制。通过单个像素在单位时间内的处于“开”状态占比控制灰度等级,即可实现灰度振幅调制。Goorden等^[11]设计了由两个透镜组成傅里叶谱面滤波系统,并在特定位置放入光阑的光学系统,成功将DMD用于相位调制。

典型的基于空间光调制器的并行微纳光刻系统原理图如图1所示^[12],通常由光源系统、成像系统和控制系统3部分组成。光源系统为并行微纳光刻提

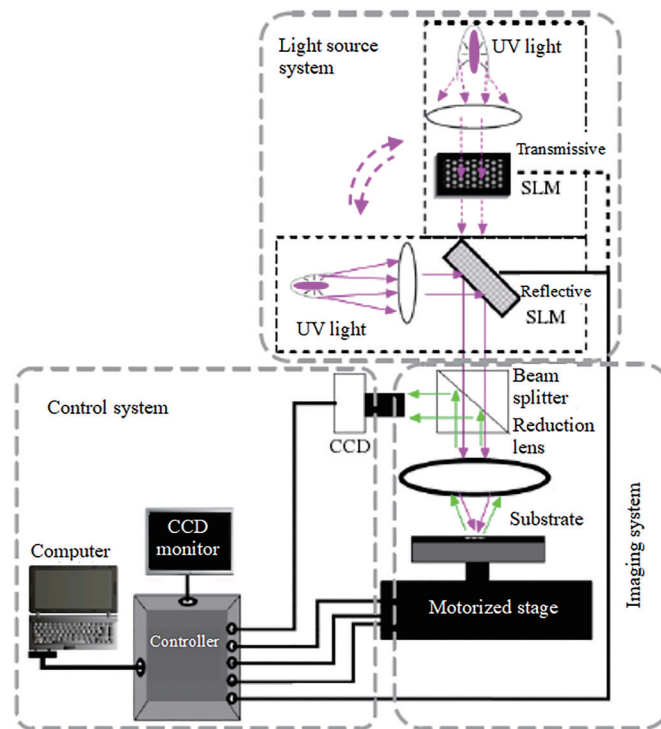


图1 典型的基于空间光调制器的并行微纳光刻系统原理图^[12]

Fig. 1 Schematic illustration of SLM-based parallel micro/nano lithography system^[12]

供稳定的均匀光场;成像系统通过空间光调制器将入射光场调制成聚焦在样品表面的预设光场,从而进行微纳光刻;控制系统用于统一协调并行微纳光刻中数字掩膜、曝光、调焦、工件台精确定位等工作流程。

与串行微纳加工技术相比,并行方式能够极大地提高加工效率,空间光调制器的使用能够实现光场的灵活调制,理论上可以实现任意图案的灵活调制,因此基于空间光调制器的并行微纳光刻技术具有高效率、低成本、设计灵活等优点,在复杂三维微纳功能器件的加工领域具有独特的优势。

根据其技术特点,基于空间光调制器的并行微纳光刻技术可分为多焦点并行和投影并行光刻两

大类,接下来将进行详细介绍。

3 基于空间光调制器的多焦点并行微纳光刻技术

基于空间光调制器的多焦点并行光刻技术,根据多焦点的产生方式不同,可以将其分为两类:1)空间光调制器结合微透镜阵列或波带片阵列^[13-15]实现多焦点的高效光刻;2)将计算全息图加载到空间光调制器上调制为预设的多焦点阵列,再通过精密物镜直接进行并行微纳光刻^[16-17]。

3.1 微透镜/波带片阵列多焦点调制光刻研究现状

[图 2(a)]为微透镜/波带片阵列多焦点调制原理,光源经过扩束准直光路入射到被用作数字掩膜

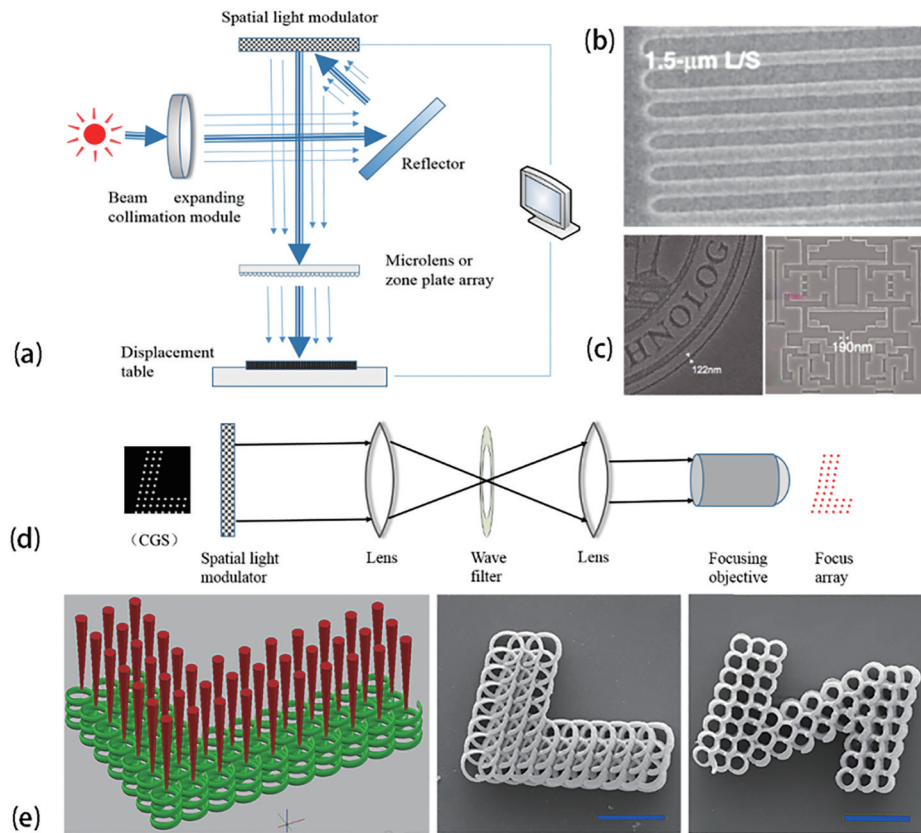


图 2 并行微纳光刻产生多焦点阵列原理及实验结果。(a)空间光调制器结合微透镜/波带片阵列的多焦点调制光刻系统原理图;(b)多焦点并行光刻制作的特征尺寸为 1.5 μm 的微结构^[14];(c)基于空间光调制器的波带片阵列光刻系统制作的复杂几何形状和光子器件^[15];(d)基于空间光调制器的全息多焦点调制光刻原理图;(e)多焦点阵列并行制造螺旋光子结构示意图、45 焦点制造的“L”型结构、60 焦点制造的“Z”型结构^[18]

Fig. 2 Principle and experimental results of multi-focus array produced by parallel micro/nano lithography. (a) Schematic diagram of multifocal modulation lithography system with spatial light modulator combined with micro-lens or zone plate array; (b) microstructure with characteristic size of 1.5 μm fabricated by multifocal parallel lithography^[14]; (c) complex geometry and photonic devices fabricated by lithography^[15]; (d) schematic diagram of holographic multifocal modulation lithography based on spatial light modulator; (e) schematic diagram of spiral photonic structure for parallel manufacturing of multifocal array, 45 focus fabricated “L” structure, 60 focus fabricated “Z” structure^[18]

的空间光调制器上,调制之后的光束经微透镜阵列/波带片阵列聚焦滤波形成多焦点阵列,用于扫描/曝光加工。

许多国内外研究机构对此技术进行了深入的研究,Dinh等^[13]采用基于空间光调制器的多焦点并行微纳光刻系统,结合倾斜扫描方式,进行二维、三维光刻,实现了最小线宽为 $3.36\ \mu\text{m}$ 的复杂结构。Ball半导体公司设计了一种基于空间光调制器的多焦点、高分辨光刻系统,以 $10\ \mu\text{m/s}$ 的扫描速度,实现了 $1.5\ \mu\text{m}$ 特征尺寸的微结构制作^[14],如[图 2(b)]所示。基于该技术能够控制与微透镜或波带片阵列一一对应的微小单元,加工灵活,麻省理工学院 Smith等^[15]采用基于空间光调制器的波带片阵列光刻系统,加工出了如[图 2(c)]所示的复杂几何形状和光子器件。

3.2 全息多焦点调制光刻研究现状

因微透镜阵列或波带片阵列的制作难度高,成本较高,而且并行光刻时会对分辨率产生一定的影响,故国内外研究人员提出了基于空间光调制器的全息多焦点调制光刻技术。[图 2(d)]为基于空间光调制器的全息多焦点调制光刻原理图,空间光调制器上加载的全息图经投影物镜调制,在物镜焦平面上产生光焦点阵列,进行多焦点并行微纳光刻,大大减少了处理时间,如[图 2(e)]所示。

国内外研究机构为了实现高分辨率、高效率的

光刻,从光源选择、光路设计到计算全息图的算法优化与曝光剂量的控制等方面入手,开展了大量的研究工作,以提高微纳光刻的质量和效率。国内如中国科学技术大学、香港中文大学、北京大学、吉林大学、国外一些研究机构等都对基于空间光调制器的全息多焦点调制光刻进行了深入的研究,通过搭建并优化基于空间光调制器的全息多焦点并行微纳光刻系统,获得了精确的相位图案和多焦点阵列,实现了高效率、高精度加工微纳结构。

中国科学技术大学 Yang等^[16-21]对多焦点并行系统的加工效率进行了深入研究,对多焦点阵列分布的非均匀性进行补偿。香港中文大学 Geng等^[22]对复杂三维结构的制造技术进行了对比,基于 DMD 的多焦点光刻在精确控制焦点位置和曝光剂量方面具有显著效率优势。北京大学 Zhang等^[23]用调制出的三维焦点制造了高分辨率的三维微纳结构。吉林大学樊华等^[24-25]结合湿法腐蚀技术,一次曝光就得到了高质量微纳光学元件。

国外研究机构证明了该技术能够并行光刻不同复杂形状的三维结构,[图 3(a)]为获得的振幅为 $5\ \mu\text{m}$ 、周期为 $20\ \mu\text{m}$ 的平滑正弦曲线聚合线^[26]。在保证分辨率的前提下,北卡罗来纳大学 Gittard等^[27]采用多光束并行,在 $45\ \text{s}$ 内形成的 16 个金星结构如[图 3(b)]所示,对比多光束与单光束光刻同一结

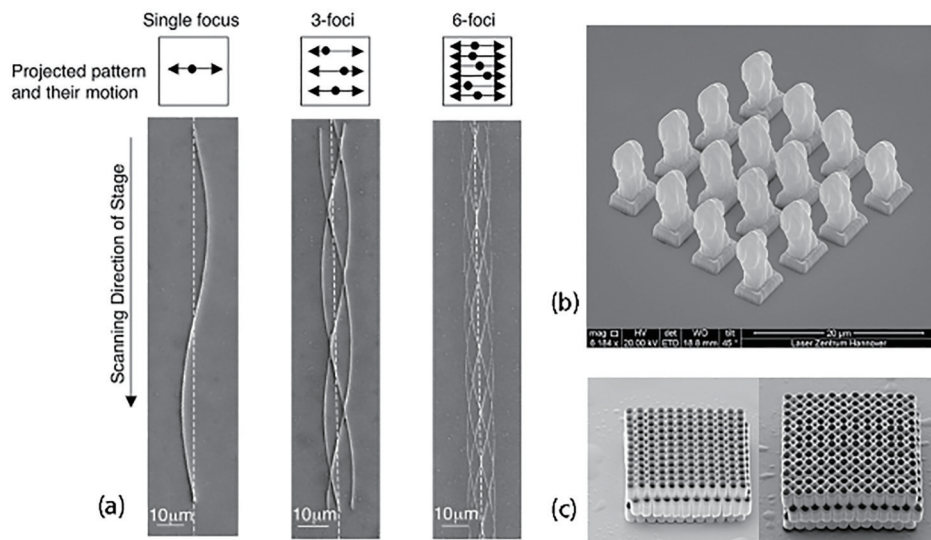


图 3 多焦点并行微纳光刻优化处理。(a) 单焦点、三焦点、六焦点并行制造的正弦曲线结构^[26]; (b) $45\ \text{s}$ 内形成的 4×4 阵列微结构^[27]; (c) 单光束和多光束制造的相同组织支架结构^[27]

Fig. 3 Optimized processing by multifocal parallel micro/nano lithography. (a) Single focus, 3 foci, 6 foci parallel manufacturing of sine curve structure diagram^[26]; (b) formation of a 4×4 micrograph within 45 seconds^[27]; (c) fabrication of same tissue scaffold structure using single beam and multiple beams^[27]

构,在光源功率和材料限制下制造同一脚手架,4×4 焦点阵列要快 2.5 倍,如[图 3(c)]所示。国外研究机构在原有多焦点并行基础上对加工分辨率进行优化,得到了细胞培养基质^[28-29]。Kelemen 等^[30]对多焦点全息光刻的优缺点进行了分析,并对扫描速度和加工功率进行了优化。

相比单焦点光刻,多焦点光刻大大减少了加工时间。文献[31]采用基于空间光调制器的并行微纳光刻技术加工 Data Matrix(DM)码,将光束调制为 62 束在石英玻璃内部进行并行加工,总共用时 0.1 s,若采用传统单光束进行加工,则需要 6.2 s,在此应用中,基于空间光调制器的并行微纳光刻技术的加工效率是单光束加工的 62 倍。显而易见,采用多焦点并行微纳光刻技术,加工效率得到显著提升。由于光源的功率是一定的,随着焦点数量的增加,单个焦点携带的能量就会随之减少,因此焦点数不能无限制增加。尽管单个焦点的能量降低,扫描速度降低了,但是与单焦点光刻相比,加工效率还是明显提升了。目前基于空间光调制器的全息多焦点调制光刻技术能够同时加工 1000 束以上的光束^[32],这将大大提升加工的效率。然而,相比单焦点光刻,多焦点并行光刻的分辨率有一定损失。光刻分辨率在很大程度上受聚焦光斑在轴向的尺寸和聚焦光斑的形貌影响。多焦点并行光刻情况下,单点经物镜聚焦后的焦斑在光轴方向的尺寸比传统情况下的焦斑要大,光斑拉得更长,会导致单点轴向分辨率有一定的损失;并行光刻得到的单点并非均匀的椭球状,而是局部呈现不规则的形状,说明并行光刻情况下,单点聚焦光场有别于传统高斯光束单点聚焦光场,这也会对分辨率造成一定影响^[18]。

3.3 全息多焦点阵列均匀性技术研究现状

在用多焦点阵列进行并行光刻的过程中,焦点阵列的均匀性对加工结果的一致性有较大影响。多焦点的能量分布通常是不均匀的,而且呈现出一定的光强分布特性,如位于中心的单点尺寸较大,对应的焦斑光强较强,越往边缘,单点尺寸越小,对应的焦斑光强越弱^[19]。影响多焦点阵列均匀性的原因主要有三类:计算全息算法的近似性、空间光调制器带来的偏差、高数值孔径物镜引入的焦点能量偏差。诸多研究工作也是围绕这三方面展开的。

3.3.1 基于计算全息算法的均匀性改进技术

计算全息算法种类很多,最经典、用得最多的是 Gerchberg-Saxton(GS)算法,后续很多算法都是

由 GS 算法演变而来的。GS 算法是一种迭代近似算法,通过傅里叶变换和逆变换不断比较输出光场和目标光场,优化计算全息,从而输出多焦点阵列相对应的相位图。苏亚辉等^[33]针对 GS 算法数值运算容易陷入局部最优解、从而不能获得很好的一致性分布这一情况,研究了 GS 算法计算全息图时的多焦点均一性问题,并获得了均一性几乎达到 100% 的三焦点阵列,用于半球状微结构的加工。陈波等^[34]在传统 GS 算法的基础上,加入实时图像处理技术进行反馈计算,利用 GS 反馈算法生成了高均匀性的 Quick Response Code(QRC)多光束全息图。Weighted Gerchberg-Saxton(GSW)算法是基于 GS 算法的一种改进算法,它在每个像素位置引入了一个权重系数,并且该系数随每次迭代动态更新,权重系数的引入可以抑制强度高于平均强度的像素点,增加强度低于平均强度的像素点。张骆等^[35]运用 GSW 算法计算多焦点阵列全息图,获得了均匀性超过 0.89 的多光束阵列,用于柔性电路板的微孔阵列加工。

其他较常用的算法如 Optimal Rotation Angle(ORA)算法综合考虑了全息平面的每个像素点对目标光场的影响,像平面的每一个焦点都对应着一个权值,每个焦点的权重值会随着迭代过程而变化,当焦点能量超过均值时,权重值会下降,反之亦然,最终实现各个焦点能量分布的均匀性。曹小文^[25]用 ORA 算法进行迭代运算,设计了 4×4 矩形排列的光点阵列全息图,实测获得了均一性为 92.19% 的光点阵列,并采用 ORA 算法获得了光点能量独立可控的二维光点阵列全息图,用于三维微透镜阵列的多焦点并行制备^[36]。

此外,Random Mask Encoding Technique(RM)、Generalized Adaptive Additive(GAA)、Direct Search(DS)等算法的理论效率和均一性都相对较低,因此在多焦点并行微纳光刻中应用较少。

3.3.2 基于空间光调制器偏差的均匀性改进技术

除了算法问题所带来的影响,空间光调制器对入射光的调制存在一定的缺陷,会导致焦点阵列能量分布不均,如像素之间存在一定的间隙,又被称为“死区”,死区对光强和相位产生了调制作用,使其存在一定的相位误差,从而产生了零级还有其他杂散衍射级次,降低了调制光场的均匀性;空间光调制器在生成连续图形化光场时会受到比较严重的斑点噪声影响,引起微结构中毛刺和缺口。为了抑

制零级光, Wang 等^[37]在空间光调制器载入了辅助的全息图,如闪耀光栅和发散球波面因子,将零级光与目标光场分离,提高光场的效率和均匀性。针对计算全息图生成光场中的斑点噪声, Zhang 等^[38]采用多张全息图多次曝光的方法将斑点噪声带来的影响平均化,从而消除其对结构产生的影响。

3.3.3 基于高数值孔径物镜引入的焦点能量偏差的均匀性改进技术

实验用的高数值孔径的物镜也会对多焦点阵列能量分布均匀性造成影响,这是因为高数值孔径的物镜存在去极化效应,会导致物镜焦平面光场的相位分布发生改变。对于高数值孔径的物镜来说,要准确得到物镜聚焦后的光场分布,需要采用矢量计算。基于传统 GS 迭代优化相位的算法大多采用标量场的焦点阵列进行设计,没有考虑入射光的偏振状态和高数值孔径物镜下的光场分布特性,因此聚焦之后的多焦点阵列的焦点能量分布不均匀。针对此问题,史志勇等^[39]充分研究入射光场的偏振特性及物镜的聚焦参数后,提出了一种基于矢量聚焦场分布的 GS 迭代优化相位算法,基于该算法可以制备具有高均匀度的多焦点阵列,且阵列中每个焦点的空间位置可精确调控。德国 Waller 等^[40]利用空间光调制技术对聚焦光斑形貌进行了调制,以减小多焦点阵列并行加工时光子晶体的光学各向异性。澳大利亚斯威本大学 Lin 等^[41]在这方面进行了一定的研究工作。

4 基于空间光调制器的投影并行微纳光刻技术

通过空间光调制器将光源调制为空间多焦点阵列进行并行微纳光刻,显著提高了加工效率,研

究人员再次对此技术进行深入探究,提出了基于空间光调制器的二维光场投影并行光刻,进行一次曝光成型,以期进一步提升加工效率。文献[20]采用基于空间光调制器的二维光场投影并行光刻,在使用多次曝光方法加工达曼光栅时, 2×2 衍射光栅所需加工时间为 25 s, 5×5 光栅所需加工时间为 32 s。在相同条件下,采用传统单点扫描加工所需时间大于 30 min,即使采用多焦点并行扫描加工,所需时间也在 1 min 以上。由此可见,与传统单点扫描加工相比,基于空间光调制器的并行投影光刻的加工效率提升了 70 倍以上,优势显著;即使与多焦点扫描并行加工相比,加工效率也提升了 2~4 倍,在加工效率上也更胜一筹。

目前基于空间光调制器的投影并行微纳光刻技术主要分为两种:1)将计算机生成的待制作微纳结构数字掩膜输入空间光调制器,经投影物镜直接投影光刻;2)把计算全息图加载到空间光调制器上,将入射光场调制为特定形状(线型、面型、特殊形状)光场,聚焦投影到物镜的焦平面上,进行并行微纳光刻。基于空间光调制器的投影并行微纳光刻技术具有很多优势,如一次曝光便可成型二维或三维结构,更适合高效率、大规模的微结构加工;成本低、操作简单,无需使用昂贵的物理掩膜,只需刷新加载到空间光调制器上的计算全息图或掩膜图就可以实现光刻图案的动态切换。

4.1 基于空间光调制器的直接投影并行微纳光刻技术研究现状

基于空间光调制器的直接投影并行微纳光刻技术将数字掩膜加载到空间光调制器上,载有掩膜信息的调制光场通过精缩物镜直接投影实现微纳光刻。图 4 为微立体光刻原理图^[42],通过控制数字

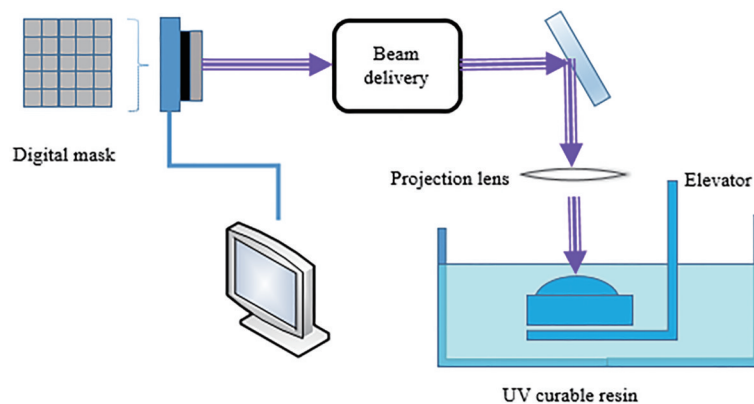


图 4 基于空间光调制器的直接投影微立体光刻原理^[42]

Fig. 4 Principle of SLM-based direct projection micro-stereoscopic lithography^[42]

掩膜的变换和升降平台的位置,实现单层快速投影并行加工。在微立体光刻中,将空间光调制器作为高速可切换投影掩膜,以 $1024 \text{ pixel} \times 768 \text{ pixel}$ 为例,能够并行产生近 80 万个像素,提高了设计的灵活性,降低加工的难度,为快速加工高质量微纳结构提供了新的研究思路。该技术制造效率高、成本低,通过控制像素的个数可以确定曝光区域的大小,结合高分辨率精缩投影系统,可实现高精度的微结构制造^[43-46]。

国内外诸多研究机构针对该技术进行了研究和探索,并将其应用到微光学、微机械以及生物医学等领域。研究人员利用空间光调制器进行直接投影微纳光刻^[47-49],采用动态数字掩膜方式,逐层依次曝光,每次投影曝光成型一层,层层叠加完成三维微结构制作。釜山国立大学 Choi 等^[50]通过控制固化深度实现了复杂三维微结构的制作。德国 Erdmann 等^[51]提出了一种基于空间光调制器与 MOEMS 相结合的制作微光学元件的方法,该方法降低了加工复杂度,提高了设计灵活性,并能推广应用于其他领域的三维微结构快速制造。为了进

一步研究光刻参数和方法对加工效率和结构质量的影响, Li^[52]提出了一种时空聚焦技术,结合 DMD 投影微纳光刻,该技术可以使制造速度提高 2~3 倍,快速制造出了各种形状的微结构。南安普敦大学 Mills 等^[53]在其基础上继续深入探索,通过 DMD 灰度调制,在几分钟内完成了毫米级结构的制造。浙江大学 Zhang 等^[54]采用该技术在 12 s 内完成了细胞外微环境制造,如[图 5(a)]所示,在单个芯片上制造了阶梯式、螺旋式、胚状、花状四种微孔,如[图 5(b)~(e)]所示。釜山国立大学 Choi 等^[55]制作了具有悬垂微特征的三维复杂微结构,验证其三维制造能力,如[图 5(f)~(g)]所示。广东理工大学 Chen 等^[56]采用低功率光源进行多次曝光的方法制作微纳结构,解决了因单次曝光造成的单层顶部和底部曝光不均匀的问题,在微流控领域具有广阔的应用前景。中国科学技术大学丁翔宇^[57]则将投影并行微纳光刻应用于微流控芯片的制备。烟台大学武传祥等^[58]在微凝胶上实现了微结构的并行光刻,制造了如[图 5(h)]所示的单个微齿轮,为微纳器件的制造和应用提供了新的思路。

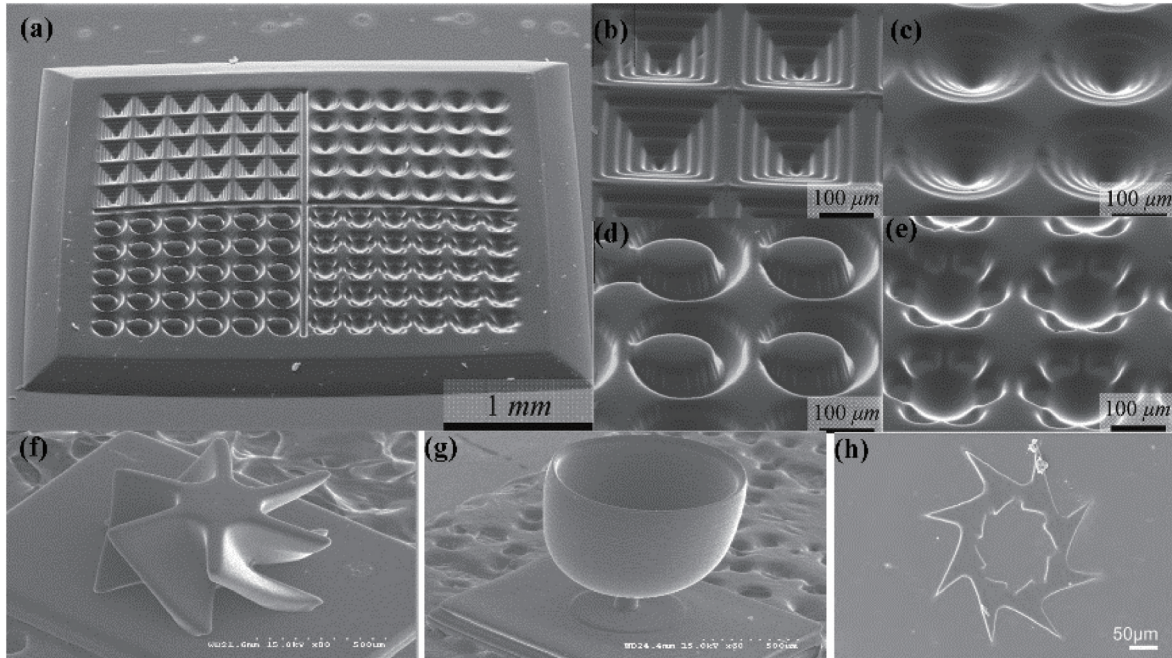


图 5 基于空间光调制器的直接投影并行光刻形成的微结构。(a)细胞外微环境的构建,单个芯片上制造了四种微孔^[54]; (b)阶梯式微孔; (c)螺旋式微孔; (d)胚状微孔; (e)花状微孔; (f)高度为 50 层、层厚为 $10 \mu\text{m}$ 的微风扇结构; (g)高度为 300 层、层厚为 $4 \mu\text{m}$ 的微杯结构^[55]; (h)水凝胶上制造的单个微齿轮结构^[58]

Fig. 5 Microstructure formed by direct projection parallel lithography based on spatial light modulator. (a) Extracellular microenvironment was constructed, and four kinds of micro-pores were made on a single chip^[54]; (b) stepwise; (c) spiral; (d) embryo-like; (e) flower-like; (f) micro-fans structure with 50 layers high and $10 \mu\text{m}$ thick; (g) micro-wineglass with 300 layers high and $4 \mu\text{m}$ thick^[55]; (h) single micro-gear structure fabricated on hydrogel^[58]

4.3 基于空间光调制器的全息投影并行微纳光刻技术研究现状

为了更好地利用光源的能量并实现更短的处理时间,同时考虑不同微结构的特殊需求或应用,采用基于空间光调制器的全息投影并行微纳光刻技术,可将入射光场调制为不同形状分布的光刻光场,最典型的为线型光场、面型光场及特殊形状光场,接下来将详细介绍这三种光刻技术的研究现状。

4.3.1 线型全息投影光场微纳光刻技术研究现状

中国科学技术大学 Yang 等^[59]对线型全息投影光场微纳光刻进行了一系列研究,将入射光调制为线型光场,采用一次曝光成型的方法,在较短时间内得到如图 6 所示的字母、三角形及圆形的光刻结果,同时分析并验证了计算全息图案、曝光时间和剂量对微结构表面的影响。通过对比不同曝光时间得到的“T”形微结构发现,随着曝光时间的缩短,制作的微结构出现如图 7 所示变化。

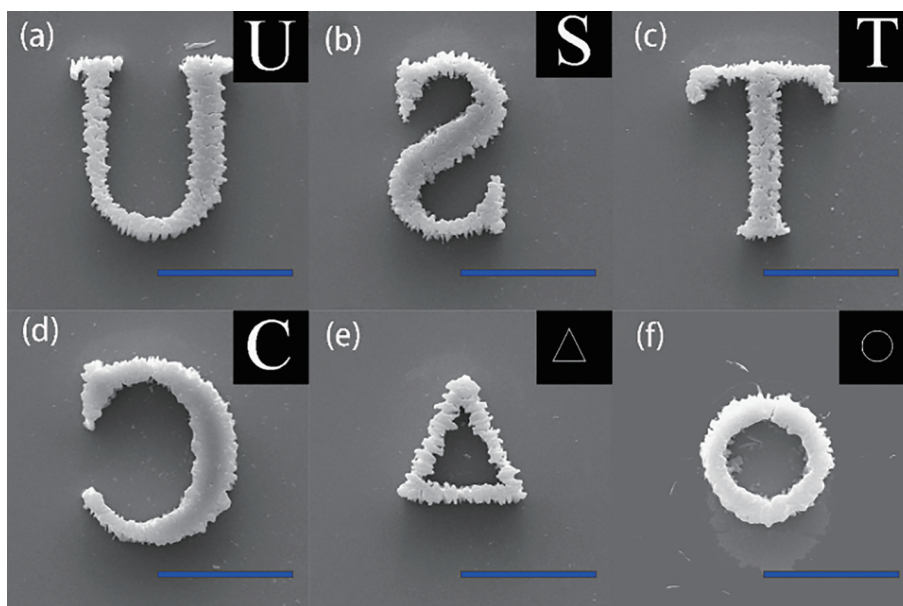


图 6 采用线型全息投影光场微纳光刻技术成型的字母、三角形、圆形^[59]

Fig. 6 Letters, triangle, and circles formed by linear holographic projection light field micro/nano lithography^[59]

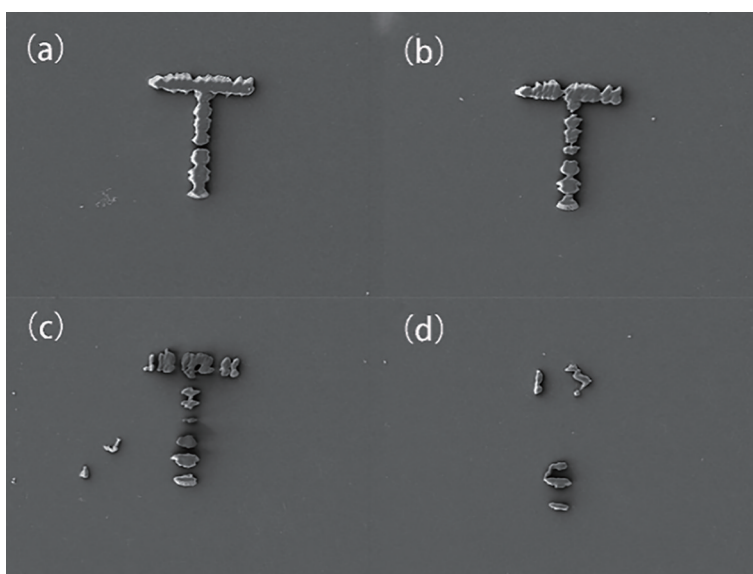


图 7 将入射光场调制为“T”形光场制作的微结构,光源功率为 560 mW。(a)曝光 5 s;(b)曝光 1 s;(c)曝光 0.5 s;(d)曝光 0.2 s^[59]
Fig. 7 Microstructure fabricated by modulating the incident light field into a “T” shaped light field, and the light source power is 560 mW. (a) 5 s; (b) 1 s; (c) 0.5 s; (d) 0.2 s^[59]

为了进一步提升光刻速度,中国科学技术大学 Zhang 等^[60]将环形菲涅尔透镜加载到空间光调制器

上,将光场调制为直径可控的均匀环形图案,15 s 内就制造了管状微结构阵列,如图 8 所示。

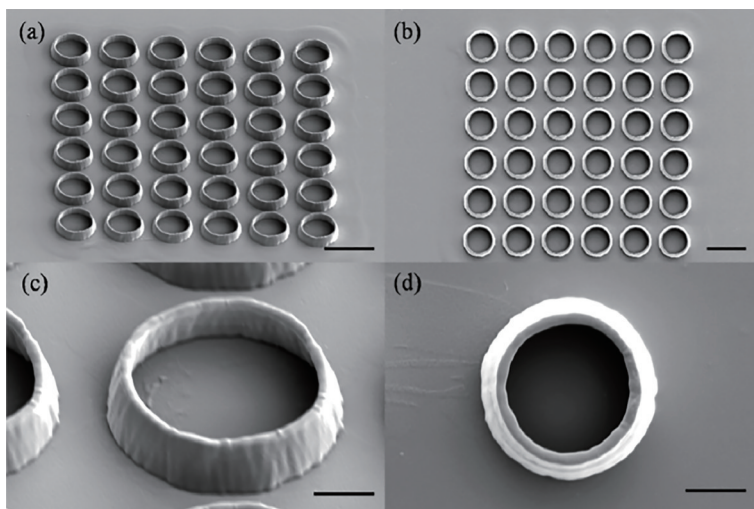


图 8 将入射光场调制为直径可控的均匀环形光场制作直径为 25 μm 的管状结构阵列,制作时间 15 s^[60]
 Fig. 8 Incident light field is modulated into a uniform annular light field with controllable diameter, and the diameter is 25 μm tubular structure array, fabrication time is 15 s^[60]

4.3.2 面型全息投影光场微纳光刻技术研究现状

全息投影并行微纳光刻除了可以利用线型光场,还可以利用面型光场,一次曝光成型二维或三维微结构,进一步提高制造效率。

调制后的二维面型光场经过投影物镜后,存在焦平面光强分布不均这一问题,产生原因主要有两个:1)非理想光学系统引入的像差;2)全息算法的局限性,如常用的高斯算法是一种数值逼近算法。针对上述问题,中国科学技术大学 Yang 等^[59]对面型全

息投影技术的光刻参数进行了进一步的研究,设计面型光场时对比使用连续像素和不连续像素改变像素间距和曝光时间,得到如图 9 所示的优化前后微结构对比图。且该实验室^[61]通过优化面型全息投影光刻参数,在微型芯片实验室应用中快速集成了高质量、高分辨率的功能器件,单次曝光 200 $\mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 区域,约用时 240 ms,不仅提高了并行制造的速度,也保证了光刻的质量,为快速制造三维大面积功能性微器件和集成微系统提供了新的思路。

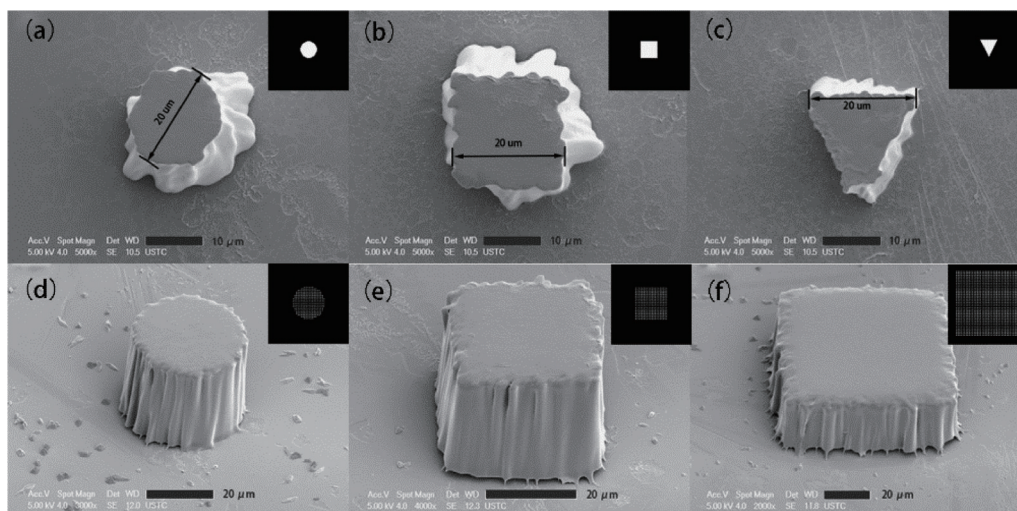


图 9 光场分别被调制为圆形、正方形、三角形的微结构光刻结果^[59]。(a)~(c)优化前光刻结果;(d)~(f)优化后光刻结果
 Fig. 9 Light field is modulated into circular, square, and triangular microstructure lithography results^[59]. (a)~(c) Lithography results before optimization; (d)~(f) optimized lithography results

4.3.3 特殊形状全息投影光场微纳光刻技术研究现状

空间光调制器能够通过计算全息的方法对入射光进行调制,调制为任意光场分布,而对于一些特定性状或者轮廓的微纳结构,空间光调制器可以作为普通的衍射光学元件,将光场调制为特殊形状进行并行微纳光刻^[62-63]。该技术在制造特殊形状轮廓应用中具有极强的优势,如贝塞尔光束的无衍射特性使其具有长景深,能够在非平面或凹凸不平的表面上制造统一的特征;环形光在减小特征尺寸方面具有优势。

目前应用最为广泛的贝塞尔光束,因具有无衍射光学特性,使得其在一定范围之内,光强分布不会发生变化,提高了微纳结构光刻的稳定性。香港中文大学 Cheng 等^[64]设计了一种基于 DMD 的光束整形系统,将光束整形为特殊形状光束,同时对相位和振幅进行控制,大大提高了微纳光刻的速度,如图 10 所示。中国科学技术大学 Yang 等^[65]提出了一种基于空间光调制器的光束整形系统,该系统将光束调制为贝塞尔光束,几秒内即可成型不同直径的圆柱微结构,加工灵活性和制造效率显著提高,如图 11 所示。

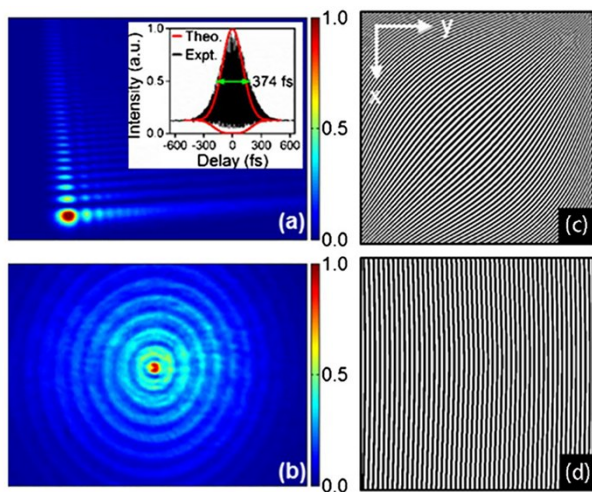


图 10 光束整形为不同图案时的强度分布图以及在 DMD 上的对应图形^[64]。(a)艾里光束强度分布;(b)贝塞尔光束强度分布;(c)艾里光束对应的 DMD 显示图;(d)贝塞尔光束对应的 DMD 显示图

Fig. 10 Intensity distribution diagram when the beam is shaped into different patterns and the corresponding figure on DMD^[64]. (a) Airy beam intensity distribution; (b) Bessel beam intensity distribution; (c) DMD display of the airy beam; (d) DMD display of the Bessel beam

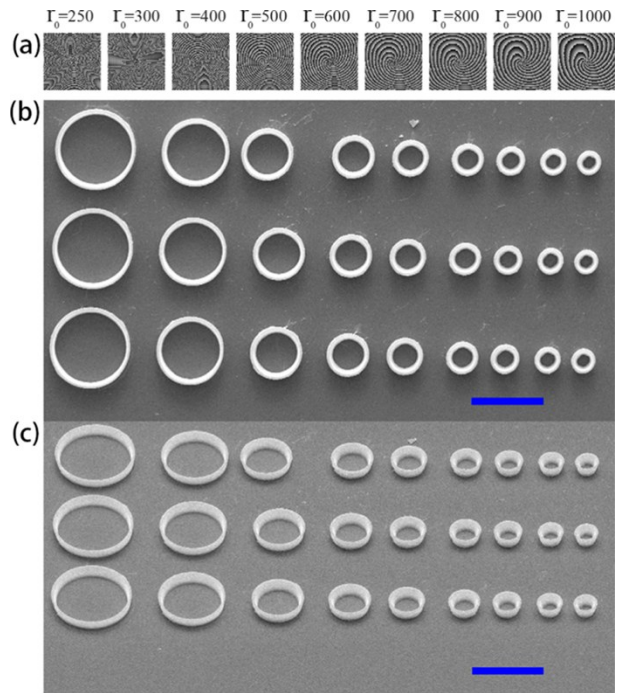


图 11 不同参数贝塞尔光束光刻成型的圆柱微结构^[65]。(a)产生贝塞尔光束的全息图;(b)不同直径的圆柱微结构光刻结果

Fig. 11 Cylindrical microstructure formed by Bessel beam lithography with different parameters^[65]. (a) Hologram generating Bessel beam; (b) lithography results of cylindrical microstructure with different diameters

5 结 论

基于空间光调制器的并行微纳光刻技术是近些年来蓬勃发展的微纳结构制造技术,与传统微纳光刻技术相比,基于空间光调制器的并行微纳光刻技术展现出更多的优势,实现了快速、高效率的微结构制造。该技术广泛应用于功能性器件、传感、超材料等领域的表面处理和加工,对生物医学、微流控、光学和微机械等领域的发展具有重要意义,发展前景诱人。目前,该技术正朝着特定需求的复杂微结构制造、更高效快速成型、不同相位/振幅分布的多光束光刻等方面发展。

基于空间光调制器的并行微纳光刻技术充分利用空间光调制器对光场的灵活调制,将入射光场调制为满足各种特定需求分布。按照对入射光场的调制作用,基于空间光调制器的并行微纳光刻技术分为多焦点并行和投影并行两大类。多焦点并行微纳光刻技术按照焦点产生的方式分为微透镜阵列/波带片阵列多焦点调制和全息多焦点调制;投影并行微纳光刻技术也可分为两类,一类是空间

光调制器直接投影光刻,另一类是空间光调制器全息投影光刻,将光调制为特定形状(线型、面型、特殊形状)光场,进行一次曝光成型。表 1 总结了各类技术的分辨率、加工效率和优缺点。随着制造分辨率的提高以及处理时间的缩短,多焦点并行光刻技术在生物医学、微光学和光子器件领域应用最为广

泛;由于特殊形状光束在制造周期性或特殊形状的微结构及高纵横比结构时极具优势,投影并行光刻技术更适用于组织工程及细胞领域应用探索;而直接投影光刻、线型光场、面型光场光刻技术易于实现微结构的大规模生产,因此在微机械等研究领域应用中应用较为广泛。

表 1 基于空间光调制器的并行微纳光刻技术对比

Table 1 Technical comparison of SLM-based parallel micro/nano lithography

Classification	Method	Resolution	Processing efficiency	Advantages	Disadvantages
Multi-focus parallel	Multi-focus based on microlens array/zone plate array	Micrometer	Higher (several times of single-focus lithography)	Suitable for periodic microstructure	High cost, less flexible
	Multi-focus based on holography	Submicrometer	Higher (several times of single-focus lithography)	Suitable for periodic microstructure and capable of controlling the focus position and exposure dose precisely	Energy inhomogeneity for multi-focus array
Projection parallel	Direct projection	Submicrometer	High(Dozens of times of single-focus lithography)	Suitable for non-periodic microstructure	Limitation from SLM pixel and refresh rate
	Holography projection	Submicrometer	High(Dozens of times of single-focus lithography)	Suitable for special application and mass production	Limitation from holography optimization and SLM modulation defect

虽然基于空间光调制器的并行微纳光刻技术的研究已经取得很多进展,但是在实际的生产过程中还面临着诸多挑战。多焦点并行微纳光刻技术中,焦点会受到散斑噪声的影响,导致微结构在一定程度上出现缺陷,且空间光调制器刷新率会影响焦点移动的速度,因此需要深入研究空间光调制器图像重建更新计算能力,提高集成及高级实时反馈控制,实现精确、均匀的焦点阵列控制。投影并行微纳光刻技术中,直接投影光刻受到分辨率和图形速率的限制,全息投影光刻受到调制之后的二维投影图案能量分布不均匀的影响,均会引起微结构的变形;曝光时间和剂量等参数会影响制造的微结构的表面粗糙度,因此需要深入研究制造参数间的相互影响规律,优化工艺参数和计算全息图形,提高制造分辨率。此外,特殊形状光场在实际制作应用中,还不能光刻任意形状的微结构,因此仍需继续探究结构光场以及定制光特性的新方法,为工艺的开发和优化提供新的研究方向。

本综述中涉及的并行微纳光刻技术从加工效率和加工精度上看,在微纳制造领域已极具竞争

力,对推动微纳加工设备的发展具有重大影响。然而,面对实际的微纳加工产线,要推动上述技术的装备化,仍然存在一些亟待解决的技术难题,如基于空间光调制器的并行微纳光刻技术对图形化光场的均一性、边缘质量要求极高,即使很少量的噪声也会导致加工结构质量的急剧下降,而全息优化算法和空间光调制器的固有缺陷极易引入噪声。此外,面对产线的大面积加工需求,空间光调制器受限于尺寸大小,单次曝光面积通常难以满足常规光刻尺寸的要求。希望本综述能够给从事相关领域的研究人员带来一些帮助,在实际应用时,探索更优的全息算法、引入改善空间光调制器调制光缺陷的软件硬件设计,在高精度、高效率、大面积微纳加工技术的探索中,推动并行微纳光刻设备的发展,实现微纳结构加工的产业化。

参 考 文 献

- [1] Park S H, Yang D Y, Lee K S. Two-photon stereolithography for realizing ultraprecise three-dimensional nano/microdevices[J]. Laser & Photonics Reviews, 2009, 3(1/2): 1-11.

- [2] Fischer J, von Freymann G, Wegener M. The materials challenge in diffraction-unlimited direct-laser-writing optical lithography[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(32): 3578-3582.
- [3] Xiong W, Zhou Y S, He X N, et al. Simultaneous additive and subtractive three-dimensional nanofabrication using integrated two-photon polymerization and multiphoton ablation[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(4): e6.
- [4] Dong X Z, Zhao Z S, Duan X M. Micronanofabrication of assembled three-dimensional microstructures by designable multiple beams multiphoton processing[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(12): 124103.
- [5] Kato J I, Takeyasu N, Adachi Y, et al. Multiple-spot parallel processing for laser micronanofabrication [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(4): 044102.
- [6] Formanek F, Takeyasu N, Tanaka T, et al. Three-dimensional fabrication of metallic nanostructures over large areas by two-photon polymerization[J]. *Optics Express*, 2006, 14(2): 800-809.
- [7] Hu L F, Xuan L, Liu Y J, et al. Phase-only liquid crystal spatial light modulator for wavefront correction with high precision[J]. *Optics Express*, 2004, 12(26): 6403-6409.
- [8] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4985: 1-12.
- [9] 覃朗. 应用于近红外波段的 LCoS 相位调制器特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2020: 11-12.
Qin L. Study on characteristics of LCoS phase modulator applied in near infrared wavelength[D]. Nanjing: Southeast University, 2020: 11-12.
- [10] 谢熙伟. 基于数字微镜器件的相位恢复方法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 24-26.
Xie X W. Research of phase retrieval problem based on digital micro-mirror device[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021: 24-26.
- [11] Goorden S A, Bertolotti J, Mosk A P. Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 17999-18009.
- [12] 张志敏. 曲面 3D 微结构数字掩模光成型关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016: 14.
Zhang Z M. Study on the key technique for fabricating curved 3D micro-structure using digital mask lithography[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016: 14.
- [13] Dinh D H, Chien H L, Lee Y C. Maskless lithography based on digital micromirror device (DMD) and double sided Microlens and spatial filter array[J]. *Optics & Laser Technology*, 2019, 113: 407-415.
- [14] Chan K F. High-resolution maskless lithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2003, 2(4): 331.
- [15] Smith H I, Menon R, Patel A, et al. Zone-plate-array lithography: a low-cost complement or competitor to scanning-electron-beam lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2006, 83(4/5/6/7/8/9): 956-961.
- [16] Yang L, El-Tamer A, Hinze U, et al. Parallel direct laser writing of micro-optical and photonic structures using spatial light modulator[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 70: 26-32.
- [17] Hu Y L, Chen Y H, Ma J Q, et al. High-efficiency fabrication of aspheric Microlens arrays by holographic femtosecond laser-induced photopolymerization[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(14): 141112.
- [18] 杨亮. 基于空间光调制器的飞秒激光并行加工技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015: 62-63.
Yang L. Research on parallel femtosecond laser fabrication technologies with spatial light modulator [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015: 62-63.
- [19] Xu B, Du W Q, Li J W, et al. High efficiency integration of three-dimensional functional microdevices inside a microfluidic chip by using femtosecond laser multifoci parallel microfabrication[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19989.
- [20] 张晨初. 基于空间光调制技术的高速高分辨飞秒激光加工[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016: 76-78.
Zhang C C. High efficiency and high resolution femtosecond laser fabrication based on spatial light modulation technique[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016: 76-78.
- [21] 吴培超, 张晨初, 杨亮, 等. 基于空间光调制器的飞秒激光双模式快速加工[J]. *中国激光*, 2018, 45(10): 1001005.
Wu P C, Zhang C C, Yang L, et al. Femtosecond laser dual-mode rapid fabrication based on spatial light modulator[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(10): 1001005.
- [22] Geng Q, Wang D, Chen P, et al. Ultrafast multi-focus 3-D nano-fabrication based on two-photon polymerization[J]. *Nature Communications*, 2019,

- 10: 2179.
- [23] Zhang S J, Li Y, Liu Z P, et al. Two-photon polymerization of a three dimensional structure using beams with orbital angular momentum[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(6): 061101.
- [24] 樊华. 基于飞秒激光光场调制技术的硬脆材料微纳加工技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020: 35-45.
Fan H. Study of femtosecond laser micro/nano-fabrication for hard and brittle materials based on SLM[D]. Changchun: Jilin University, 2020: 35-45.
- [25] 曹小文. 基于空间光调制器的飞秒激光加工微光学元件技术研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019: 36-43.
Cao X W. Study of femtosecond laser fabrication of micro-optical components based on SLM[D]. Changchun: Jilin University, 2019: 36-43.
- [26] Obata K, Koch J, Hinze U, et al. Multi-focus two-photon polymerization technique based on individually controlled phase modulation[J]. Optics Express, 2010, 18(16): 17193-17200.
- [27] Gittard S D, Nguyen A, Obata K, et al. Fabrication of microscale medical devices by two-photon polymerization with multiple foci via a spatial light modulator[J]. Biomedical Optics Express, 2011, 2(11): 3167-3178.
- [28] Zandrini T, Shan O, Parodi V, et al. Multi-foci laser microfabrication of 3D polymeric scaffolds for stem cell expansion in regenerative medicine[J]. Scientific Reports, 2019, 9: 11761.
- [29] Vizsnyczai G, Kelemen L, Ormos P. Holographic multi-focus 3D two-photon polymerization with real-time calculated holograms[J]. Optics Express, 2014, 22(20): 24217-24223.
- [30] Kelemen L, Valkai S, Ormos P. Parallel photopolymerisation with complex light patterns generated by diffractive optical elements[J]. Optics Express, 2007, 15(22): 14488-14497.
- [31] 翟中生, 李梦雨, 刘春利, 等. 激光并行加工 DM 码实验研究[J]. 应用光学, 2021, 42(6): 1115-1121.
Zhai Z S, Li M Y, Liu C L, et al. Experimental study on laser parallel processing of DM code[J]. Journal of Applied Optics, 2021, 42(6): 1115-1121.
- [32] Hasegawa S, Ito H, Toyoda H, et al. Massively parallel femtosecond laser processing[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 18513-18524.
- [33] 苏亚辉, 汪金礼, 杨亮, 等. 飞秒激光全息并行加工中的多焦点均一性[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 1936-1941.
Su Y H, Wang J L, Yang L, et al. Uniformity of multi-foci for holographic femtosecond laser parallel fabrication[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(8): 1936-1941.
- [34] 陈波, 翟中生, 高添, 等. 基于空间光调制器的 QR 二维码并行加工技术研究[J]. 应用激光, 2021, 41(4): 853-859.
Chen B, Zhai Z S, Gao T, et al. Research on parallel processing technology of QR two-dimensional code based on spatial light modulator[J]. Applied Laser, 2021, 41(4): 853-859.
- [35] 张骆, 翟中生, 吕清华, 等. 飞秒激光高效并行微孔加工技术研究[J]. 湖北工业大学学报, 2018, 33(4): 18-21, 32.
Zhang L, Zhai Z S, Lyu Q H, et al. Research on efficient parallel femtosecond laser micro-drilling technique[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2018, 33(4): 18-21, 32.
- [36] Cao X W, Chen Q D, Zhang L, et al. Single-pulse writing of a concave Microlens array[J]. Optics Letters, 2018, 43(4): 831-834.
- [37] Wang C W, Su Y H, Wang J L, et al. Method for holographic femtosecond laser parallel processing using digital blazed grating and the divergent spherical wave[J]. Optical Engineering, 2015, 54(1): 016109.
- [38] Zhang C C, Hu Y L, Li J W, et al. An improved multi-exposure approach for high quality holographic femtosecond laser patterning[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(22): 221104.
- [39] 史志勇, 周立强, 张立春, 等. 基于多焦点阵列的动态激光并行加工[J]. 光学学报, 2020, 40(10): 1014004.
Shi Z Y, Zhou L Q, Zhang L C, et al. Dynamic laser parallel fabrication based on multifocal array[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(10): 1014004.
- [40] Waller E H, Renner M, von Freymann G. Active aberration- and point-spread-function control in direct laser writing[J]. Optics Express, 2012, 20(22): 24949-24956.
- [41] Lin H, Gu M. Creation of diffraction-limited non-Airy multifocal arrays using a spatially shifted vortex beam[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(8): 084103.
- [42] Sun C, Fang N, Wu D M, et al. Projection micro-stereolithography using digital micro-mirror dynamic mask[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 121(1): 113-120.
- [43] 刘玉环, 赵圆圆, 董贤子, 等. 数字掩模投影光刻的极限分辨率研究[J]. 量子电子学报, 2019, 36(3):

- 354-359.
- Liu Y H, Zhao Y Y, Dong X Z, et al. Limit resolution of digital mask projection lithography[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2019, 36 (3): 354-359.
- [44] 熊峥. 基于 DMD 的数字光刻技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2016: 12-29.
- Xiong Z. Research on DMD-based digital photolithography[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2016: 12-29.
- [45] Kim J B, Jeong K H. Batch fabrication of functional optical elements on a fiber facet using DMD based maskless lithography[J]. Optics Express, 2017, 25 (14): 16854-16859.
- [46] Kang M S, Han C, Jeon H. Submicrometer-scale pattern generation via maskless digital photolithography [J]. Optica, 2020, 7(12): 1788-1795.
- [47] 刘志涛. PCB 数字光刻投影光学设计及其扫描与控制技术研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2015: 36-41.
- Liu Z T. Research on PCB digital lithography projection optics design as well as scanning and its control technology[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015: 36-41.
- [48] 王亚飞. 数字无掩膜光刻技术及其大面积曝光方案研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2015: 39-57.
- Wang Y F. Study of digital maskless lithography technology and large area exposure method[D]. Xi'an: Xidian University, 2015: 39-57.
- [49] 王佳荣, 韩太林, 冯驰. 基于数字微镜器件的激光光刻技术[J]. 科技资讯, 2017, 15(29): 60-62.
- Wang J R, Han T L, Feng C. Laser lithography based on DMD[J]. Science & Technology Information, 2017, 15(29): 60-62.
- [50] Choi J W, Wicker R B, Cho S H, et al. Cure depth control for complex 3D microstructure fabrication in dynamic mask projection microstereolithography[J]. Rapid Prototyping Journal, 2009, 15(1): 59-70.
- [51] Erdmann L, Deparnay A, Maschke G, et al. MOEMS-based lithography for the fabrication of micro-optical components[J]. Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2005, 4 (4): 041601.
- [52] Li Y C, Cheng L C, Chang C Y, et al. Fast multiphoton microfabrication of freeform polymer microstructures by spatiotemporal focusing and patterned excitation[J]. Optics Express, 2012, 20 (17): 19030-19038.
- [53] Mills B, Grant-Jacob J A, Feinaeugle M, et al. Single-pulse multiphoton polymerization of complex structures using a digital multimirror device[J]. Optics Express, 2013, 21(12): 14853-14858.
- [54] Zhang A P, Qu X, Soman P, et al. Rapid fabrication of complex 3D extracellular microenvironments by dynamic optical projection stereolithography[J]. Advanced Materials, 2012, 24(31): 4266-4270.
- [55] Choi J W, Irwin M D, Wicker R B. DMD-based 3D micro-manufacturing[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7596: 75960H.
- [56] Chen Q M, Zhou J Y, Hu Y M, et al. Tradeoff control of multi-exposure lithography for SU-8 photochemical reaction channel formation[J]. BioChip Journal, 2020, 14(4): 369-380.
- [57] 丁翔宇. 基于数字微镜芯片的无模光刻微加工技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014: 25-32.
- Ding X Y. The research of maskless microscopic lithography micromachining with digital micro-mirror device[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014: 25-32.
- [58] 武传祥, 蔡树向, 杨文广. 数字微镜阵列微立体光刻系统光路仿真与应用[J/OL]. 烟台大学学报(自然科学与工程版): 1-10[2021-11-12]. DOI: [10.13951/j.cnki.37-1213/n.210503](https://doi.org/10.13951/j.cnki.37-1213/n.210503).
- Wu C X, Cai S X, Yang W G. Optical path simulation and applications of micro stereolithography system based on digital micromirror device[J/OL]. Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition): 1-10[2021-11-12]. DOI: [10.13951/j.cnki.37-1213/n.210503](https://doi.org/10.13951/j.cnki.37-1213/n.210503).
- [59] Yang L, Li J W, Hu Y L, et al. Projection two-photon polymerization using a spatial light modulator [J]. Optics Communications, 2014, 331: 82-86.
- [60] Zhang C C, Hu Y L, Li J W, et al. A rapid two-photon fabrication of tube array using an annular Fresnel lens[J]. Optics Express, 2014, 22(4): 3983-3990.
- [61] Zhang C, Hu Y, Du W, et al. Optimized holographic femtosecond laser patterning method towards rapid integration of high-quality functional devices in microchannels[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 33281.
- [62] 郭恒, 闫剑锋, 李欣, 等. 空间整形飞秒激光图案化加工氧化石墨烯[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202018.
- Guo H, Yan J F, Li X, et al. Patterned graphene oxide by spatially-shaped femtosecond laser[J].

- Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202018.
- [63] 梁密生, 李欣, 王猛猛, 等. 空间整形飞秒激光加工金属微细槽实验研究[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202003.
- Liang M S, Li X, Wang M M, et al. Spatially-shaped femtosecond laser manufacturing of microgrooves in metals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202003.
- [64] Cheng J Y, Gu C L, Zhang D P, et al. High-speed femtosecond laser beam shaping based on binary holography using a digital micromirror device[J]. Optics Letters, 2015, 40(21): 4875-4878.
- [65] Yang L, El-Tamer A, Hinze U, et al. Two-photon polymerization of cylinder microstructures by femtosecond Bessel beams[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(4): 041110.