

激光与光电子学进展

基于数字微镜器件的无掩模数字光刻技术研究进展

谢芳琳, 王雷, 黄胜洲*

安徽工程大学机械工程学院, 安徽 芜湖 241000

摘要 无掩模光刻技术具有无需物理掩模、成本低、适合大批量生产的优点,在微结构制作中得到了广泛应用。基于数字微镜器件(DMD)的无掩模数字光刻技术具有分辨率高、灵活性好、加工精度高等优势,成为近年来数字光刻领域的研究热点。综述了DMD数字光刻技术的研究进展,包括基于DMD的扫描光刻技术、步进式光刻技术以及灰阶光刻技术,介绍了该方法在集成电路、微光学、三维打印等领域的应用,并总结了目前DMD光刻技术存在的问题及其未来发展趋势。

关键词 光学设计; 无掩模; 数字微镜器件; 扫描光刻技术; 步进式光刻技术; 灰阶光刻技术

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1100010

Research Progress of Maskless Digital Lithography Based on Digital Micromirror Device

Xie Fanglin, Wang Lei, Huang Shengzhou*

School of Mechanical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, Anhui, China

Abstract Maskless lithography has a wide range of applications in microstructure fabrication due to its advantages of no physical mask, low cost and suitability for mass production. Maskless digital lithography based on digital micromirror device (DMD) has the advantages of high resolution, good flexibility and high processing accuracy, which has become a research hotspot in the field of lithography in recent years. This paper reviews the research progress of DMD digital lithography, including DMD-based scanning lithography, stepping lithography and gray-scale lithography, and introduces the applications of the method in integrated circuit, micro-optics, three-dimensional printing and other fields, the paper also summarizes the current problems of DMD lithography and its future development trend.

Key words optical design; maskless; digital micromirror device; scanning lithography; stepper lithography; gray-scale lithography

1 引 言

光刻技术在集成电路的发展中发挥的作用越来越重要。传统光刻技术虽然能达到较高的精度,但掩模板的制造成本高、周期长、灵活性差,不适合

大规模生产,且传统光刻技术随着器件特征尺寸的减小很难提高光刻分辨率。因此,无需物理掩模板的无掩模数字光刻技术得到了人们的广泛研究,常用的无掩模数字光刻技术包括电子束光刻、聚焦离子束光刻、干涉光刻以及激光直写技术等。电子束

收稿日期: 2021-07-22; 修回日期: 2021-08-08; 录用日期: 2021-09-08

基金项目: 安徽省自然科学基金(2008085QE258, 1808085QA12, 1808085ME117)、安徽省自然科学基金重点研究项目(KJ2019A0156)、安徽工程大学增材制造研究项目(2020ybxm08)、安徽工程大学人才引进科研基金(2018YQQ027)

通信作者: *1024739781@qq.com

光刻具有分辨率高、焦深长的特点,可以轻松制作出特征尺寸为 10 nm 的微纳结构,但其光刻效率低,不适合进行大批量工业生产;聚焦离子束光刻具有较高的分辨率,但随着曝光效率的提高,曝光图形的边缘会越来越粗糙;干涉光刻作为一种新兴的光刻技术,可以制造大面积、高分辨率的微纳结构,但干涉条纹的相对光强和相对相位难以控制,且存在高频损耗,给微结构的制作带来了巨大挑战^[1];激光直写技术需要极其复杂和昂贵的设备,且单片写入时间较长,少则十几小时,多则几天,不适合大规模生产制造^[2]。

基于数字微镜器件(DMD)的无掩模数字光刻技术是将传统光刻技术与数字光处理技术相结合的一种微结构制作技术^[3]。DMD由美国德州仪器公司于1977年制作,其工作原理:单微镜具有 $+12^\circ$ 和 -12° 的转角,转角为 $+12^\circ$ 时,微镜处于开启状态,光照射到微镜表面被反射到投影物镜上,最终照射到基片上;转角为 -12° 时,微镜处于关闭状态,光照射到微镜表面被反射到投影物镜外^[4]。在每个反射镜下方,有一个由双互补金属氧化物半导体(CMOS)存储元件组成的存储单元,其状态可以控制反射镜的机械位置,使DMD通过反射的空间光调制特性将预定的“虚拟掩模”投射到光刻衬底上,将计算机绘制的数字图案实时转化为空间光场分

布,配合光学投影镜组实现光场信息向光敏介质的高精度传递,从而实现复杂微纳结构的高效灵活加工。目前,基于DMD的数字光刻技术已成功制备出了亚微米结构,未来有望用该方法构建纳米结构^[5]。

本文先综述了DMD光刻技术及其在该领域的最新发展情况,总结了无掩模数字扫描光刻技术、无掩模数字步进式光刻技术以及无掩模数字灰阶光刻技术的发展现状;然后,介绍了DMD光刻技术在集成电路、微光学、三维(3D)打印等领域的应用;最后,分析了目前DMD数字光刻技术存在的问题及其未来发展趋势。

2 无掩模光刻技术

基于DMD无掩模光刻系统的总体设计框架如图1所示。该系统主要由照明系统、投影系统、DMD控制系统和平台运动控制系统四部分组成,DMD是该系统的核心部件,由多个相同的微小反射镜(单微镜)构成,其结构相当于二维微镜阵列。DMD芯片主要由微镜片、扭臂梁、金属层和COMS存取器层四部分组成^[6],其结构如图2所示。自光刻技术出现以来,无掩模光刻技术依次经过了分步投影式光刻、扫描投影式光刻和灰度光刻三个阶段。

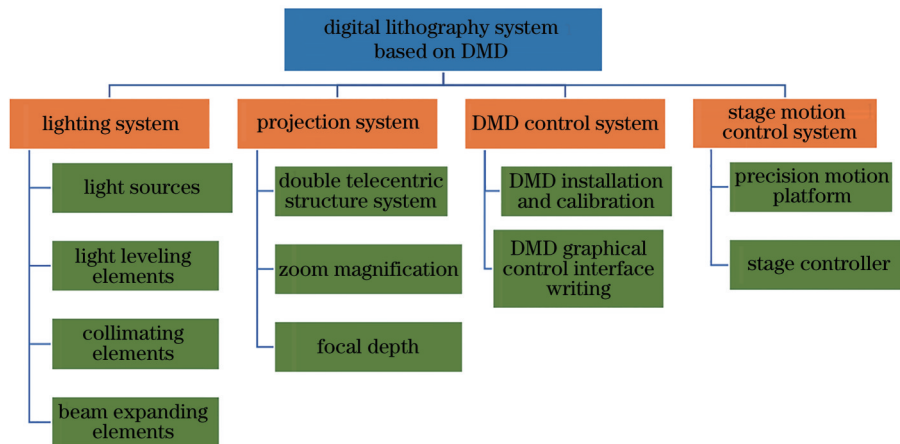


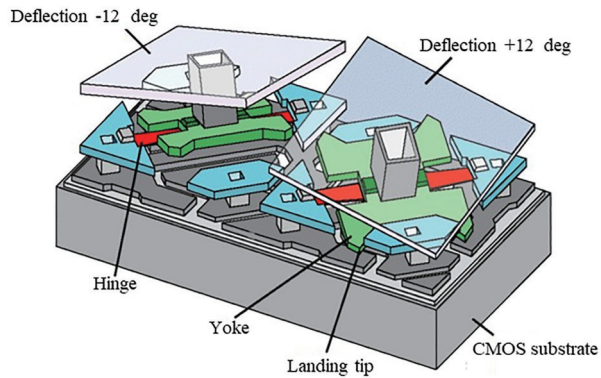
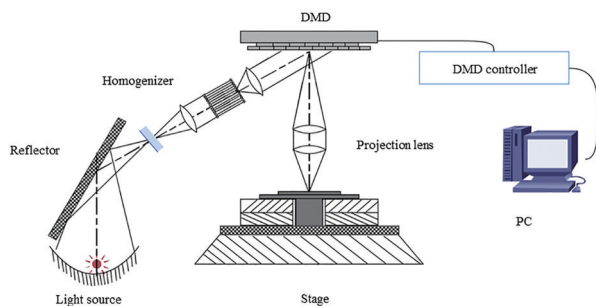
图1 基于DMD无掩模光刻系统的总体设计框图

Fig. 1 Overall design block diagram of maskless lithography system based on DMD

2.1 无掩模数字扫描光刻技术

随着集成电路技术的发展,人们对信息容量和功能以及光刻技术的要求也越来越高。基于DMD的无掩模数字扫描光刻曝光系统主要由光源、DMD芯片、DMD控制器、投影物镜和高精度位移台组成,曝光系统的结构如图3所示^[7]。曝光光源通常

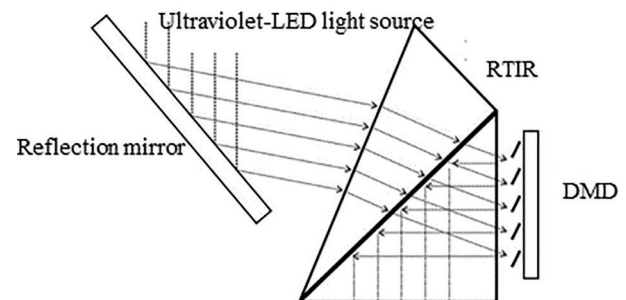
采用高压汞灯或紫外发光二极管(UV-LED),同时使用激光均匀器提高光的均匀性^[8]。光刻过程中,激光器发出的光通过匀光元件,由反射镜照射到DMD表面,同时用计算机软件绘制出需要刻写的图形,将图形信息输入到CMOS存储芯片上,以控制DMD的开关,进而形成实时虚拟光学图形。光

图 2 DMD 结构的原理图^[6]Fig. 2 Schematic diagram of the DMD structure^[6]图 3 基于 DMD 的无掩模数字扫描光刻曝光系统结构^[7]Fig. 3 Structure of the DMD-based maskless digital scanning lithography exposure system^[7]

刻平台每运动一个微镜成像距离,就会形成一个同步触发信号给 DMD, DMD 进行帧频切换,形成新图形,且该图形与前一帧图形密切相关。在基片上,将 DMD 帧频显示的图形与平台运动相匹配,实现动态数字化无掩模扫描光刻。虽然传统激光直接成像无掩模光刻技术的分辨率较高,但该系统受光学设计的限制,无法满足图案多样化的发展趋势;而基于 DMD 的无掩模扫描光刻系统可以显示大成像面积且光刻速度较快,被广泛应用于高需求的印刷电路板制造生产线中。此外,该系统还可用于各种光刻工艺,如微机电系统、平板、激光标记和微流体通道。2016 年, Kuo 等^[9]设计了基于场跟踪技术的点阵列扫描光刻光学模块参数,可以提高曝光平面上空间图像的质量。之后的研究可以通过 DMD 的时间控制特性改变光束的相位,从而产生潜在的曝光补偿,进一步提高光刻图像的分辨率。2018 年, Kuo 等^[10]以 DMD 为核心,利用点阵列扫描技术成功在斜面上定义了图案,相比其他在斜面上定义图案的方法,该技术更适合应用在印刷电路板行业。将基于点阵的扫描曝光方法与智能算法相

结合,通过及时修正曝光参数实现光刻参数的优化,提高光刻图形的质量,并用非平面光刻技术成功实现曝光线宽小于 $10\ \mu\text{m}$ 的工艺。

为了提高无掩模扫描光刻系统的速度,2019 年, Peng 等^[8]通过优化曝光工艺,提出了一种基于 DMD 无掩模数字扫描光刻系统的高速曝光方法,可以有效提高光刻效率,降低了无掩模扫描光刻的实际应用成本。2021 年, Chien 等^[11]提出了一种用经验导出的失真模型调整工作的 DMD 图像以提高紫外线图案化精度的方法,通过调整倾斜扫描过程的倾斜角度,进一步减少了由光学失真引起的图案化误差。基于倾斜扫描的 DMD 无掩模光刻系统示意图如图 4 所示,光源发出的紫外光由 DMD 调制并由微透镜阵列收集,经过投影透镜成像并投影到感光层的表面上,随后以小倾斜角扫描。在基板表面上以小倾斜扫描投影 DMD 图像,使 DMD 各个数字微镜投射的光在水平或垂直于扫描方向上均匀分布,将多个扫描到的紫外线(UV)图案横向拼接,得到一个完整的 UV 曝光图案。相比其他方法,这种方式能提高重构图像的分辨率并获得大的构图面积,且不需要高质量的图像投影透镜系统,只需调整倾斜扫描过程的倾斜角度,就可减小由光学失真引起的图案化误差。2019 年, Dinh 等^[12]构建并通过实验验证了一种基于 DMD 的新型无掩模光刻系统,该系统不仅可以投射二维以及三维复杂图案,还可以协同 DMD 的开/关操作和扫描台的移动实现任意图案化操作。未来有望将基于 DMD 的无掩模光刻系统应用于具有较小线宽的二维图案化和大面积复杂三维表面结构的三维图案化中,进而通过提高投影透镜系统的质量继续提高曝光图案的质量。

图 4 基于倾斜扫描的 DMD 无掩模光刻系统^[11]Fig. 4 DMD maskless lithography system based on oblique scanning^[11]

2.2 无掩模数字步进式光刻技术

步进式光刻可用于大面积 PCB 板的加工,与扫

描光刻技术不同,步进式光刻技术的原理比较简单,只需在光刻前将待曝光图像切割成与 DMD 大小相同的多幅图形,然后将每幅图形边缘相连即可。每完成一次曝光后,需要移动平台或 DMD 镜头依次完成下一个曝光动作,从而实现整个图像区域的曝光,如图 5 所示。其中,曝光图形被切割成了 12 幅图形(P1~P12)。步进式曝光指在 DMD 运动期间,当一幅曝光图像经过投影物镜投影后,会产生一些横向移动距离 W 。对于一行曝光图像,经过投影物镜投影后,将物镜向下移动距离 H ,之后以 S 型曲线样式展开下一行的投影处理。

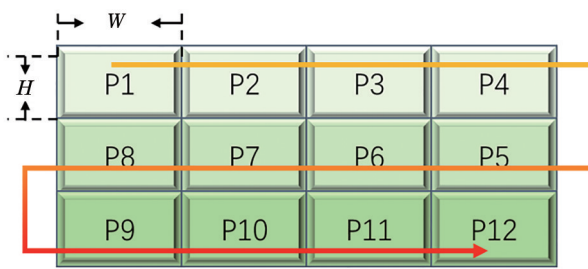


图 5 步进式光刻原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the stepping lithography

传统的大面积光刻设备照明系统采用折射/反射式光学系统、大功率紫外光源、大包容角椭球反射镜及蝇眼透镜系统,结构复杂、体积大、成本高。为了解决该问题,2003年,赵立新等^[13]提出了一种利用恒功率的小面积均匀扫描单元,通过步进扫描拼接得到大面积的均匀照明光源,从而实现单次曝光面积达 $30\text{ mm} \times 40\text{ mm}$ 、扫描面积达 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 、光刻分辨率达 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的大面积接近/接触式光刻。该方法在无掩模光刻领域表现出了较好的优越性,且相比传统大面积曝光方法,具有体积小、视场面积灵活可变等优势。

在 DMD 光刻设备中,机械装调产生的机械误差会导致曝光图像间产生拼接误差,进而使曝光图像出现错位、交叠等问题,改善步进式光刻曝光精度的一个重要途径是提高图像拼接精度。2008年,严伟等^[7]构建了一种基于 DMD 的步进式数字无掩模曝光方法,能曝光出亚微米级的线条且线条拼接效果良好,为实现大面积数字曝光提供了新思路。在一定条件下,该方法理论上可以实现任意面积的光刻,适用于小批量、多品种、柔性加工的生产模式。2014年开始,朱江平等^[14-16]先后提出了基于数字灰度渐变模板调制的曝光图像处理方法,其基本思想都是将待曝光的大面积图形分割成小单元,通过增

加相邻小单元拼接冗余的方式提高图像的拼接精度,在一定程度上弥补了步进式光刻由于工作平台对位失准对图形拼接的影响,实现了图形平滑过渡拼接。工作平台不连续移动导致的加工效率不高以及图形拼接问题一直是步进式光刻的固有缺陷,现有技术的加工精度仍难以满足微细加工的要求。2020年,姜旭等^[17]采用步进式曝光方式,从全新的角度提出了一种利用运动补偿校正倾角误差的方法,与以往使用千分表调整曝光平台和 DMD 的位置关系减小倾角误差的打表工艺法或在曝光前对输入 DMD 的图像进行反向位移的图像预处理补偿法不同,该方法无需对曝光图像进行处理,只需分别进行两次曝光,基于首次曝光得到的误差模型进行二次曝光,通过校正误差参数提高曝光图像的拼接精度,大大节约了图像预处理的时间,且避免了由打表工艺法调整精度受限和人工操作精度导致的曝光图像效果不佳问题,提高了曝光精确度和曝光效率。基于运动补偿的 DMD 光刻系统倾角误差校正的方法,在微米级图像曝光过程中,至少可将曝光误差减小 80%,DMD 曝光中心偏移距离由 $175\text{ }\mu\text{m}$ 减小为 $21\text{ }\mu\text{m}$,满足大面积曝光图像高质量、高精度的要求。

2.3 无掩模数字灰阶光刻技术

无掩模数字灰阶光刻技术是近年来发展起来的一种三维微结构制作技术,可以通过改变灰度比分布控制曝光剂量的分布,从而精准控制三维微结构的表面轮廓^[18]。曝光剂量的大小直接决定微透镜阵列等光学元件的表面轮廓精度,从而影响元件的光学特性。基于 DMD 无掩模数字灰阶光刻技术的原理是当曝光光源发出的光照射到 DMD 表面时,每一个像素点都会在光刻胶表面产生相对应的像点,像点的灰度值越高,在相同时间内获得的曝光能量就越多,相应的显影深度也越深。通过建立曝光深度与曝光剂量之间的关系,可以将待加工的三维模型转化为可调控的三维曝光剂量模型,从而进行三维微结构的光刻。

国内外许多公司、大学和科研机构相继开展了光刻技术的探索,提出了各种基于 DMD 的无掩模灰度光刻技术,并从理论上验证了基于 DMD 的数字光刻系统在三维制造中的优越性。其中,DMD 作为数字掩模板,利用控制系统对照明面不同区域的光进行空间调制,通过调制入射光的二元脉冲宽度实现像素的灰阶控制,进而形成所需的灰度图

案^[19]。2011年,Gao等^[20]提出了一种动态渐变灰度数字光刻技术,可以精确控制光学元件,获得连续平滑的轮廓。但该方法的光刻效率低、耗时长,不适合大规模生产。2014年,Zhong等^[21]提出了利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)一步制作微透镜阵列的简单方法,先利用数字灰度无掩模光刻技术在光刻胶中制作微透镜阵列模型,进而利用PDMS复制微透镜阵列。该方法为制备大面积、任意形状的凹凸微透镜阵列提供了一种简单、低成本、快速高效的方法,在光电领域具有广泛的应用前景。2015年,Ma等^[22]提出了一种基于DMD灰度光刻的多重图案化方法,为提高整个目标三维结构的制造精度提供了一种解决方案。此外,Ma等^[23]还提出了一种基于三维光刻模拟和灵敏度分析的DMD灰度光刻工艺优化方法,解决了基于DMD的灰度光刻技术在三维微结构制造中的不足,且能显著减少许多应用的设计时间,提高制造精度和质量,为未来的三维光刻技术带来新的可能性。由于DMD是由无数个微镜组成的反射装置,进行光刻时存在显著的光学邻近效应,一定程度上降低了光刻质量。因此,2020年,Liu等^[24]提出了一种基于DMD无掩模光刻的灰度调制方法,可以优化光刻过程中由于设备自身缺陷导致的不良光学邻近效应。通过逐点修正方式调制紫外光的强度分布,使其更接近预期效果,将曝光图案与掩模图案的匹配率从78%提高到91%,该方法具有成本低、易于操作等优点,为解决光学邻近优化问题提供了有效指导。

3 DMD无掩模数字光刻技术的应用

3.1 集成电路领域

3.1.1 PCB制版

随着电子元件尺寸的不断减小和对更多元件特征需求的增加,以DMD为中心的无掩模光刻系统由于避免了制造物理掩模而节约了大量时间与成本,在印刷电路板的制作中得到了广泛应用^[25]。PCB制版行业传统上依赖于基于聚酯掩模的光刻工艺,容易造成PCB制版失真,很难得到高分辨率的PCB制版。为了提高线宽分辨率,应对印刷电路板制造的未来趋势,2011年,美国加利福尼亚州的一家PCB制版公司基于DMD的光学系统生产了一种同时满足成本低廉、打印速度快、配准精度高要求的PCB数字印刷机。将多个基于DMD的光学系统并行放置,同时处理扫描基板,为大面积

PCB制版(45.72 cm×60.96 cm)和特征尺寸大于50 μm的PCB制版提供了极高的打印速度和套准精度。近年来,基于DMD的无掩模光刻技术在PCB制版领域得到了广泛应用,但依然存在PCB曝光面积小及曝光像素尺寸外线距、线宽精度低的问题。2018年,刘清源^[26]采用扫描式曝光的改进模型完成大面积PCB的曝光需求、采用灰阶调制的改进模型完成高精度PCB的曝光需求,为PCB大面积、高精度的项目指标提供了可行性方案;Lee等^[27]提出了一种基于高速GPU加速路径绘制和CPU并行计算的光栅化方法,通过将图案信息与PCB对准提高曝光精度,大大提高了曝光图像质量。

3.1.2 物理掩模板

无掩模光刻技术具有无需物理掩模板且可以刻蚀多阶相位甚至连续表面的微浮雕结构特点,为制作单件的二元或多阶相位元件的连续轮廓提供了极大方便,在集成电路领域得到了广泛应用。但对于制作复杂轮廓且大批量生产的元件,掩模板的质量显得至关重要。传统方法如激光束直写及离子束刻蚀物理掩模板的速度较慢、成本高昂且刻蚀的曲线光滑度很难满足集成光学系统的要求。为了解决该问题,2010年,颜丽华等^[28]提出了一种基于DMD数字光刻系统制作掩模板的方法,只要事先将所需图案绘制好即可在DMD上曝光刻蚀,该方法一次曝光形成掩模的面积相当于激光束直写系统数小时完成的工作量,大大缩短了衍射微光学器件掩模的制作周期,且制作成本低、曲线的平滑度良好。此外,基于DMD的无掩模光刻技术也给液晶显示器中导光板的制作带来了希望。2009年,李晓建等^[29]提出了一种基于DMD微光刻导光模板的制作方法,由DMD输入导光板的网点单元图形,经过缩微光学成像系统缩微后进行曝光、显影、微电铸,得到导光板模板,在PC薄板材上用微纳米压印技术制成的导光板厚度仅有0.381 mm。该方法解决了传统导光板制作方法效率低、精度不高且导光效果差的问题。随着光刻技术的发展,基于DMD的无掩模光刻技术将在该领域发挥更大的优势。

3.2 微光学领域

3.2.1 非球面微透镜的制作

随着光电子器件小型化需求的不断增加,微透镜阵列受到了人们极大的关注,成为微光学领域的重要器件^[30-31]。非球面微透镜阵列具有较高的填充因子,其信噪比和光学性能均优于球面微

透镜,构成的光学系统具有尺寸小、质量轻、成像质量好的特点。但传统方法如反应离子刻蚀、热回流都难以制造出具有高填充因子和非球面表面轮廓微透镜阵列,常用来制备高填充因子非球面微透镜阵列的技术如飞秒激光诱导双光子聚合方法耗时长且表面精度有限,而基于DMD的无掩模光刻技术不仅能成功制造出非球面微透镜阵列,且成本低、产量高。2017年,Zhong等^[32]提出了一种基于数字无掩模光刻技术制作高填充因子非球面微透镜阵列的方法,每个微透镜周边都没有间隙,大大提高了微透镜阵列的光学性能,其原理如图6所示。2019年,Zhu等^[33]介绍了一种剂量调制DMD光刻与低温热回流相结合的高性价比方法,可以制备出接近100%填充因子、高形状精度和高表面质量的非球面微透镜,为快速制作高质量、高填充因子的非球面微透镜提供了一种具有发展前景的新方法。

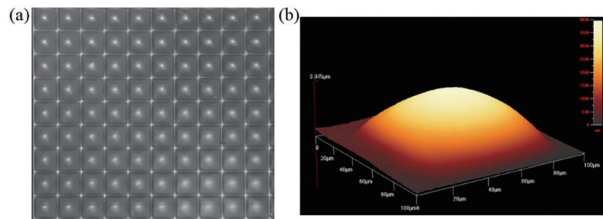


图6 非球面微透镜。(a)放大图像;(b)一个微透镜的三维图像^[32]

Fig. 6 Aspheric microlens. (a) Magnifying image; (b) three-dimensional image of one microlens^[32]

3.2.2 仿生复眼透镜的制作

受昆虫和甲壳类动物中微小的独立光接收单元小眼的启发,仿生复眼是从经典成像概念走向更紧凑光学成像系统的一种方法,具有视野大、灵敏度高等优点,基于DMD的光刻系统能解决其他方法在弯曲基底上加工时存在的生产周期长和成本高的缺陷。2016年,Zhang等^[34]提出了一种基于DMD无掩模光刻技术快速制作弯曲微透镜阵列的方法,可以灵活且高效地获得任意弯曲的微透镜阵列,为制作仿生复眼提供了简单高效的方法。2017年,Huang等^[35]将无掩模投影光刻技术与热回流工艺相结合,成功在弯曲基板上制作了仿生复眼,该方法的灵活性强、成本低廉,可应用于各种弯曲基底微光学元件的制造,为发光二极管照明系统和内窥镜成像系统中仿生复眼的应用提供了参考。

3.3 3D打印领域

3.3.1 3D打印质量的改善

基于数字光处理(DLP)的3D打印是一种高分辨率、高吞吐量和低成本的制造技术,该技术的核心元件是DMD芯片,能创建几何形状复杂的3D结构,是一种能用于微观到介观尺度的理想制造方法。3D打印技术已普遍应用于生物医学、组织工程和微电子器件中,但由于打印系统的光学特性,投射到打印平面上的光通常是不均匀的,容易造成固化缺陷,导致打印出的3D结构表面粗糙度较大,不能满足光学元件10 nm以下表面粗糙度的要求,很难成功打印出合格的微透镜等光学器件。针对该问题,2019年,Yuan等^[36]提出了一种基于振荡辅助DLP的3D打印方法,通过对投影透镜施加机械振荡,涂抹离散像素、消除由离散像素引起的光强波动以及由相邻微透镜间小间隙形成的暗网格,成功制造出了表面粗糙度约1 nm的微透镜阵列,振动投影下制作的微透镜结构如图7所示。相比现有微透镜制造技术,该方法具有速度快、灵活性好等显著优势,为超光滑表面中具有较高要求的大规模生产领域提供了新思路,也为光学元件的高质量、快速3D打印铺平了道路。2020年,Wang等^[37]提出了一种基于投影的连续3D打印方法,该方法在灰度显示的基础上,利用DMD具有的低光衰减和小像素尺寸等优势实现了较高的打印分辨率,再由特定算法生成灰度掩模样本,优化

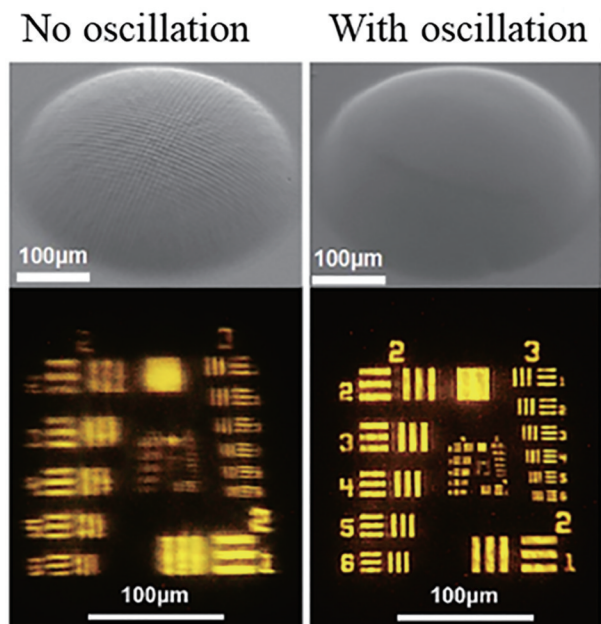


图7 非振动和振动投影下制作的微透镜阵列^[36]

Fig. 7 Microlens arrays fabricated under non-vibrational and vibrational projections^[36]

光的分布、提高光的均匀性,缓解了光过固化/欠固化带来的缺陷,将打印面积从 54% 增加到 89%;通过协调掩模序列的曝光时间和升降平台的移动,消除了逐层印刷带来的阶梯效应。该方法通过改善光场分布、打印分辨率、扩充打印区域,实现了更有效地高分辨率、大面积连续 3D 打印。

3.3.2 制造支架

传统的支架加工技术如冷冻干燥、溶剂浇铸都不能精确控制支架的孔径、几何形状和互连性。基于 DMD 的无掩模光刻技术能设计和制造出具有高复杂度和高精度的微纳米级特异性支架,但现有技术很难治疗大面积的骨缺损,且设计和制造出有利于细胞功能、细胞生存力和机械完整性的支架一直是该领域的难点^[38]。2017 年, Tam 等^[39]采用无掩模

光刻技术逐层制作支架,在微米级对支架微结构和组成进行空间控制,所需时间更短、效率更高,且无需掩模和 3D 打印机,成本较低。2012 年, Zhang 等^[40]展示了一种基于 DMD 的新型 3D 生物制造方法,可用于复杂三维细胞外微环境的生物制造。相比仅限于简单几何形状的 DMD 生物制造方法,该方法对体外三维几何以及为体内植入复杂三维支架的研究具有重要意义。2020 年, Zhang 等^[41]基于 DLP 的 3D 打印技术成功制备了具有整合的分级哈弗氏骨模拟支架,其结构如图 8 所示。该方法可以通过改变哈弗氏骨模拟结构的参数精确控制支架的抗压强度和孔隙率,从而根据不同患者的需求优化设计出各种强度的支架,为支架的临床应用提供了有益参考。

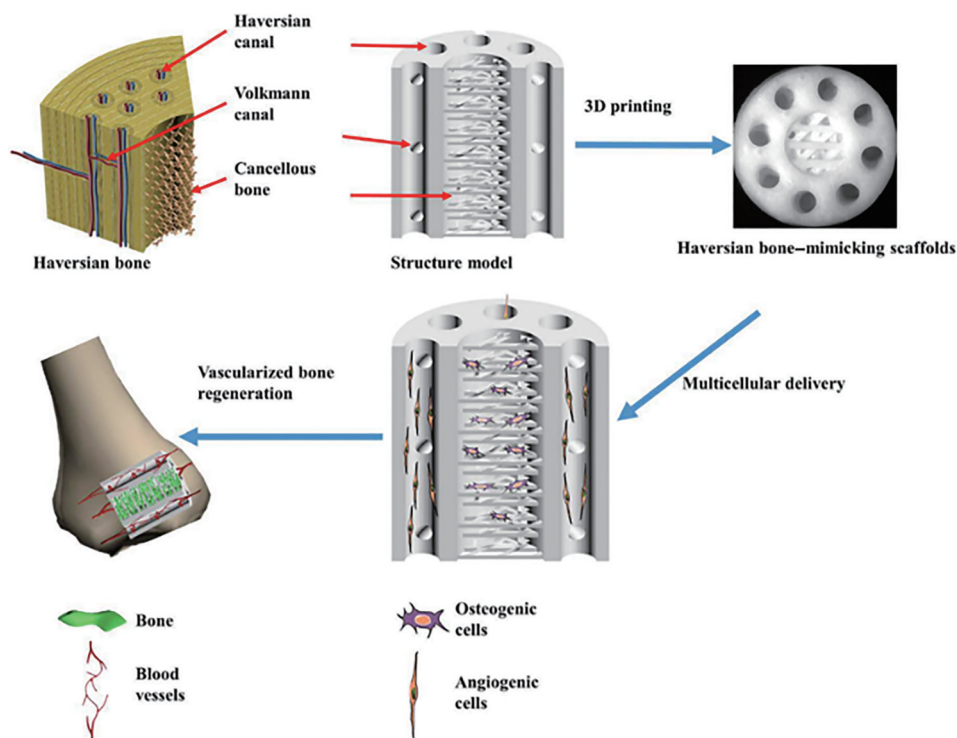


图 8 3D 打印得到的哈弗斯骨-模拟支架^[41]

Fig. 8 Haversian bone-mimicking scaffolds obtained by 3D printing^[41]

3.3.3 微流控芯片

为体内细胞和组织的生长建立合适的生理微环境对医学研究至关重要,微流控芯片可用于微环境的构建和细胞体外行为的分析,在生物领域显示出巨大的应用潜力。传统方法如激光烧蚀、软光刻技术用于长期、连续和动态观察的微流控芯片时会增加芯片的复杂性和成本,给芯片的生产工艺和操作带来了一定的挑战。2019 年, Ge 等^[42]结合光流控无掩模光刻和新型微流控芯片设计了一个基于

DMD 的光学投影光刻系统,如图 9 所示。该系统由计算机、紫外激光器、电荷耦合器件照相机、载物台和微流控芯片的放大模块组成。设计的结构可以投射到芯片的衬底上。经过 UV 固化、未固化聚乙二醇二丙烯酸酯(PEGDA)去除、明胶甲基丙烯酰基(GelMA)注射、细胞溶液注射四个步骤建立了一个简单的细胞共培养模型,解决了传统方法设计、制造微流控芯片复杂和耗时的缺点。2020 年, Sun 等^[43]基于 DMD 的光学投影光刻技术制作了一种微

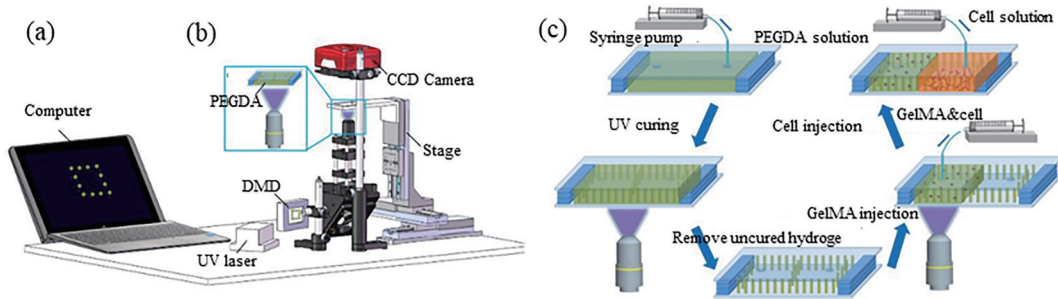


图9 系统的组成与设计。(a)基于DMD的光学投影光刻系统示意图;(b)微流控芯片的扩增;(c)多维细胞共培养系统的设计^[42]

Fig. 9 System composition and design. (a) Schematic illustration of the DMD-based optical projection lithography system; (b) amplification of the microfluidic chip; (c) design of the multi-dimensional cell co-culture system^[42]

柱阵列微流控芯片,实现了粒子分离的需求,对未来芯片制造、细胞行为和临床前药物筛选的研究具有重要意义。

4 结 论

随着光掩模板的制造和维护成本不断上升,无掩模光刻领域取得了快速进展,就成本效率、数字传输能力和吞吐量而言,基于数字微镜器件的光学无掩模数字光刻在平板显示器、印刷电路板等行业迎来了飞快发展,成为光刻行业的研究热点。介绍了无掩模数字扫描光刻、无掩模数字步进式光刻和无掩模数字灰阶光刻的原理和发展现状,并对该技术在集成电路、微光学、3D打印领域的应用进行了概述。

目前,基于DMD的无掩模数字光刻技术已经有了一定的发展,但在实际应用中仍然存在一些不足:1)光刻分辨率到达光学极限,还需进一步研制出满足极紫外光刻的DMD;2)在大面积三维光刻方面主要依赖于系统对准精度和图形拼接精度,大大增加了光刻系统的构建成本;3)DMD的像素量化误差难以完全消除,现有方法只是不同程度地减弱该影响。尽管基于DMD的数字光刻技术还存在一些不足,但随着DMD芯片和控制系统的升级,有望在光刻分辨率、制造效率以及光刻介质等方面有所突破,从而将其广泛应用于集成电路、光通信、生物医学等领域,推动交叉学科的进步,促进国民经济的发展、提升国家的科技实力。

参 考 文 献

[1] Pang S W, Goodhue W D, Geis M W. Submicrometer structures fabricated by masked ion beam lithography and dry etching[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1988, 135(6): 1526-1529.

[2] 陈林森, 乔文, 叶燕, 等. 面向柔性光电子器件的微纳光制造关键技术与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(8): 0823018.
Chen L S, Qiao W, Ye Y, et al. Critical technologies of micro-nano-manufacturing and its applications for flexible optoelectronic devices[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(8): 0823018.

[3] Ryoo H, Kang D W, Hahn J W. Analysis of the line pattern width and exposure efficiency in maskless lithography using a digital micromirror device[J]. Microelectronic Engineering, 2011, 88(10): 3145-3149.

[4] 孙彦杰, 刘华, 李金环, 等. 自由曲面光学透镜平滑DMD扫描光刻图形边缘[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0411002.
Sun Y J, Liu H, Li J H, et al. Smoothing the edge of DMD scanning pattern by free surface lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(4): 0411002.

[5] Diez S. The next generation of maskless lithography [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9761: 976102.

[6] 刘江辉. 基于空域能量积分编码调制的微结构数字光刻方法研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2021.
Liu J H. Digital lithography method for the fabrication of micro structures based on spatial energy integral coded modulation[D]. Chengdu: Institute of Optics And Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2021.

[7] 严伟, 胡松, 唐小萍, 等. 基于DMD的步进式无掩模数字曝光方法及装置[J]. 电子工业专用设备, 2008, 37(10): 14-19.
Yan W, Hu S, Tang X P, et al. The method and equipment of maskless step digital lithography based on DMD[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2008, 37(10): 14-19.

[8] Peng C, Zhang Z Z, Zou J X, et al. A high-speed

- exposure method for digital micromirror device based scanning maskless lithography system[J]. *Optik*, 2019, 185: 1036-1044.
- [9] Kuo H F, Huang Y J. Resolution enhancement using pulse width modulation in digital micromirror device-based point-array scanning pattern exposure[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 79: 55-60.
- [10] Kuo H F, Kao G H, Zhu L X, et al. Printing line/space patterns on nonplanar substrates using a digital micromirror device-based point-array scanning technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 101: 106-112.
- [11] Chien H L, Chiu Y H, Lee Y C. Maskless lithography based on oblique scanning of point array with digital distortion correction[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2021, 136: 106313.
- [12] 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.
- [13] 赵立新, 陈兴俊, 胡松, 等. 光源步进扫描实现大面积光刻[J]. *电子工业专用设备*, 2003, 32(3): 52-54. Zhao L X, Chen X J, Hu S, et al. Technique of achieving big area lithography by using step & scan of light source[J]. *Equipment for Electronic Products Manufacturing*, 2003, 32(3): 52-54.
- [14] 朱江平. 基于叠栅条纹的纳米光刻对准理论与应用研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014. Zhu J P. Study on the theory and application of nano lithography alignment based on moire fringe[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.
- [15] 王亚飞. 数字无掩膜光刻技术及其大面积曝光方案研究[D]. 西安电子科技大学, 2015. Wang Y F. Study of digital maskless lithography technology and large area exposure method[D]. Xian: Xidian University, 2015.
- [16] 吴晨枫. 基于DMD无掩膜光刻系统中的关键技术研究[D]. 西安电子科技大学, 2018. Wu C F. Key techniques research for maskless lithography system based on DMD[D]. Xian: Xidian University, 2018.
- [17] 姜旭, 杨絮, 刘红, 等. 基于运动补偿的DMD无掩膜光刻拼接误差校正[J]. *光电工程*, 2020, 47(6): 190387. Jiang X, Yang X, Liu H, et al. DMD maskless lithography stitching error correction based on motion compensation[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(6): 190387.
- [18] Smith M A, Berry S, Parameswaran L, et al. Design, simulation, and fabrication of three-dimensional microsystem components using grayscale photolithography[J]. *Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2019, 18(4): 043507.
- [19] 赵立新, 严伟, 王建, 等. 数字灰度投影光刻技术[J]. *微纳电子技术*, 2009, 46(3): 181-185. Zhao L X, Yan W, Wang J, et al. Digital gray-tone projection lithography[J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2009, 46(3): 181-185.
- [20] Gao Y Q, He S, Luo N N, et al. Research on dynamical-gradual greyscale digital mask lithography[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(7): 573-579.
- [21] Zhong K J, Gao Y Q, Li F, et al. Fabrication of PDMS microlens array by digital maskless grayscale lithography and replica molding technique[J]. *Optik*, 2014, 125(10): 2413-2416.
- [22] Ma X, Kato Y, Kempen F, et al. Multiple patterning with process optimization method for maskless DMD-based grayscale lithography[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 120: 1091-1094.
- [23] Ma X X, Kato Y, van Kempen F, et al. Experimental study of numerical optimization for 3-D microstructuring using DMD-based grayscale lithography[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2015, 24(6): 1856-1867.
- [24] Liu J H, Liu J B, Deng Q Y, et al. Intensity modulation based optical proximity optimization for the maskless lithography[J]. *Optics Express*, 2020, 28(1): 548-557.
- [25] Horiuchi T, Koyama S, Kobayashi H. Simple maskless lithography tool with a desk-top size using a liquid-crystal-display projector[J]. *Microelectronic Engineering*, 2015, 141: 37-43.
- [26] 刘清源. PCB激光制版系统的图形转移关键技术研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2018. Liu Q Y. Research on key technology of graphic transfer in PCB laser plating system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2018.
- [27] Lee J, Lee H, Yang J. A rasterization method for generating exposure pattern images with optical maskless lithography[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, 32(5): 2209-2218.
- [28] 颜丽华, 徐冉冉, 龚勇清. 利用数字光刻系统制作铬掩模的工艺[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, 47(12): 120501.

- Yan L H, Xu R R, Gong Y Q. Technology of making chromium mask using digital photolithography system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(12): 120501.
- [29] 李晓建, 朱冀梁, 申溯, 等. 基于 DMD 微光刻的导光板模板的制作方法[J]. *应用光学*, 2009, 30(4): 669-673.
- Li X J, Zhu J L, Shen S, et al. Method of fabricating light guide plate template based on DMD micro-lithography[J]. *Journal of Applied Optics*, 2009, 30(4): 669-673.
- [30] Hou T, Zheng C, Bai S, et al. Fabrication, characterization, and applications of microlenses[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7366-7376.
- [31] Tumbleston J R, Shirvanyants D, Ermoshkin N, et al. Continuous liquid interface production of 3D objects[J]. *Science*, 2015, 347(6228): 1349-1352.
- [32] Zhong K J, Zhang H L, Gao Y Q. Fabrication of high fill-factor aspheric microlens array by digital maskless lithography[J]. *Optik*, 2017, 142: 243-248.
- [33] Zhu J J, Li M J, Qiu J F, et al. Fabrication of high fill-factor aspheric microlens array by dose-modulated lithography and low temperature thermal reflow[J]. *Microsystem Technologies*, 2019, 25(4): 1235-1241.
- [34] Zhang Z M, Gao Y Q, Luo N N, et al. Fast fabrication of curved microlens array using DMD-based lithography[J]. *AIP Advances*, 2016, 6(1): 015319.
- [35] Huang S Z, Li M J, Shen L G, et al. Flexible fabrication of biomimetic compound eye array via two-step thermal reflow of simply pre-modeled hierarchic microstructures[J]. *Optics Communications*, 2017, 393: 213-218.
- [36] Yuan C, Kowsari K, Panjwani S, et al. Ultrafast three-dimensional printing of optically smooth microlens arrays by oscillation-assisted digital light processing[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(43): 40662-40668.
- [37] Wang Y C, Xue D, Mei D Q. Projection-based continuous 3D printing process with the grayscale display method[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2020, 142(2): 021003.
- [38] Zhang L, Yang G J, Johnson B N, et al. Three-dimensional (3D) printed scaffold and material selection for bone repair[J]. *Acta Biomaterialia*, 2019, 84: 16-33.
- [39] Tam J, Yasar O. Multi material 3D scaffold printing with maskless photolithography[J]. *MRS Advances*, 2017, 2(24): 1303-1308.
- [40] 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.
- [41] Zhang M, Lin R C, Wang X, et al. 3D printing of Haversian bone-mimicking scaffolds for multicellular delivery in bone regeneration[J]. *Science Advances*, 2020, 6(12): eaaz6725.
- [42] Ge Z X, Yu H B, Yang W G, et al. Development of multi-dimensional cell co-culture via a novel microfluidic chip fabricated by DMD-based optical projection lithography[J]. *IEEE Transactions on NanoBioscience*, 2019, 18(4): 679-686.
- [43] Sun L J, Yang W G, Chu H H, et al. Dynamic fabrication of microfluidic systems for particles separation based on optical projection lithography[J]. *Biomedical Microdevices*, 2020, 22(4): 80-86.