

激光与光电子学进展

数字微镜无掩模光刻技术进展及应用

周子逸^{1,2}, 董贤子^{1**}, 郑美玲^{1*}

¹中国科学院理化技术研究所仿生智能界面科学中心, 北京 100190;

²中国科学院大学未来技术学院, 北京 101407

摘要 光刻技术在前沿科学与国计民生等领域发挥着重要作用。随着曝光光源、数字微镜器件(DMD)、投影镜头等光学元件的升级及计算机控制技术的飞速发展,基于DMD的无掩模光刻技术有可能在不久的将来与目前成熟的有掩模光刻技术齐头并进,并在特定应用领域中不可或缺。详细介绍了基于DMD的面投影光刻的曝光原理、系统组成和发展进程,重点介绍了提高面投影光刻分辨率的方法,以及突破光学衍射极限制备超细微结构的相关工作。同时阐述了基于DMD的面投影无掩模曝光技术在制备光子学器件、生物学支架、仿生结构等器件中的独特优势,特别是引入超快激光后其在新型加工领域所展现出的应用潜力。

关键词 光刻; 数字微镜器件; 分辨率; 超快激光; 投影曝光

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.0922030

Evolution and Application of Digital Micromirror Device Based Maskless Photolithography

Zhou Ziyi^{1,2}, Dong Xianzi^{1**}, Zheng Meiling^{1*}

¹CAS Key Laboratory of Bio-Inspired Materials and Interfacial Science, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²School of Future Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China

Abstract Lithography technology plays an important role in frontier science and national economy and people's livelihood. With the optimization of optical components such as the exposure light source, digital micromirror device, projection lens and the rapid development of computer control technology, maskless lithography technology based on digital micromirror devices may go hand in hand with the existing well-developed masked lithography technology in the near future, and it will be quite indispensable in certain application fields. In this paper, we introduce the exposure principle, system composition and development history of optical projection lithography based on digital micromirror devices in detail, and we emphasize the strategy for improving the projection lithography resolution as well as achieving ultrafine structures by breaking the optical diffraction limit. Meanwhile, we put forward the unique advantages of projection maskless exposure technology based on digital micromirror devices in achieving micro devices including photonics devices, biological scaffolds and bionic structures, especially its potential applications in novel processing fields by utilizing ultrafast laser.

Key words digital micromirror device; resolution; ultrafast laser; projection exposure

收稿日期: 2022-03-01; 修回日期: 2022-03-22; 录用日期: 2022-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(61975213, 61475164, 51901234)、国家重点研发计划项目(2016YFA0200501)、中奥国际合作项目(GJHZ1720)、中国科学院国际伙伴计划项目(GJHZ2021130)

通信作者: *zhengmeiling@mail.ipc.ac.cn; **dongxianzi@mail.ipc.ac.cn

1 引言

随着信息技术、电子器件技术和半导体工业等领域的快速发展,灵活高效的微纳结构与器件的光刻制备技术显得尤为重要。光刻是一种在待加工的导电或绝缘基底上涂制一层正性或负性的光致抗蚀剂(光刻胶),使用投影或扫描光场对其进行曝光,再经过显影、后烘等操作,最终在基底上形成特定的光致抗蚀剂图形的工艺^[1]。光刻技术首先出现于照相术以及其衍生的照相制版技术,之后逐渐被推广到微电子器件制作领域并发展成熟。传统光刻的主要步骤为:根据需要制备的目标结构,使用特定加工技术制作一张掩模版,然后将掩模版上的图样转换到基底上预先涂制的光致抗蚀剂中,经过显影等后续处理即可批量生产所需的微型器件。根据掩模版和基底之间的距离,有掩模光刻技术逐渐经历了3个发展阶段,分别为掩模版和光致抗蚀剂表面相接触进行直接曝光的接触式曝光技术^[2],将掩模版移动到预先设定的距离基底一段较近距离进行曝光的接近式曝光技术^[3],以及在掩模版和光致抗蚀剂之间插入一套光学系统使二者完全分离的投影式曝光技术^[4]。

传统光刻技术可通过制造高精度的掩模版达到极精细的分辨率,技术发展较为成熟,在微电子器件、半导体器件制备方面具有重要应用。但通过光学光刻^[5]、带电粒子直写和纳米压印^[6]等方法制备的掩模版制备过程复杂,且一旦制备完毕即为定型。在实际工艺中,器件的多样性和掩模版在刻制过程中的损耗要求制备包含多种掩模图形的多张掩模版,其低灵活性带来了较高的成本。

无掩模光刻技术不依赖实体掩模版,因此近年来备受关注。该技术主要分为两大类:第一大类为基于带电粒子的无掩模光刻技术;第二大类为基于调节入射光场分布的光学无掩模光刻技术。

基于带电粒子的无掩模光刻技术,是使用带电荷的大质量微粒粒子流代替入射光场与基底表面的物质进行反应并对其进行刻蚀的方法。根据使用的粒子流种类,该技术可分为电子束曝光技术^[7]和离子束刻蚀技术^[8]。电子束曝光技术,是通过计算机控制电磁场使入射电子束能够到达不同的目标点,与基底表面的抗蚀剂进行反应,从而在基底上出现刻蚀目标图形的技术^[7]。离子束曝光技术,则是使用大质量高能量的带电粒子入射至目标将

基底表面原子击落,从而在基底上得到刻蚀图形的方法,如聚焦离子束刻蚀技术^[8]。

光学无掩模光刻技术,则是通过调节空间光场,使其在光致抗蚀剂中形成对应的光场分布,从而得到所需目标图案的方法。根据调节光场方式的不同,该类技术主要包括激光干涉光刻技术^[9]、双光子直写技术^[10-11]和数字投影光刻技术^[12]。

激光干涉光刻技术,是利用光的干涉和衍射,使光束以不同的方式组合,以此可以有效调控干涉场内的光强分布并使其满足目标图案的要求,在此基础上进行曝光即可得到目标图案^[9]。双光子直写技术,通常使用飞秒激光光源在材料内部聚焦,使得光子数密度极高的中心区域发生双光子或多光子吸收,达到材料反应的阈值,从而可以有效地控制聚合反应的范围,结合逐点扫描的移动方式,可获得超精细微纳结构^[10-11]。数字投影光刻技术,则是在光路中加入可使用计算机系统控制的空间光调制器,通过程序设计控制器件的响应,从而实现空间光场的调制^[12]。

这几种无掩模光刻方法无需制作掩模版,降低了工艺成本,简化了操作步骤。其中,使用计算机控制的空间光调制器直接实时修改入射光场的方法最简单且有效。它既可以改变最终的光束入射状态,同时由于自身的实时响应特性,结合计算机控制技术后对复杂图形的转换非常迅速。目前运用最广泛的该类调制器被称为数字微镜器件(DMD)。本文详细介绍了基于DMD的面投影光刻的曝光原理、系统组成、发展进程及其在曝光分辨率方面的进展,分析了以超快激光作为曝光光源的面投影无掩模曝光技术在突破衍射极限、材料范围扩展与器件制备等领域的独特优势,并综述了面投影光刻在制备光子学器件、生物学支架、仿生结构等器件方面的重要进展。

2 数字微镜无掩模光刻的原理和系统组成

DMD是一种特殊的光场调制芯片。DMD面投影曝光技术通常采用汞灯作为光源,利用DMD芯片代替实体掩模版,可将计算机中的二维图像直接投影到样品表面,进行面曝光。

DMD面投影光刻系统如图1所示,光路主要构成部分包括光源、光束准直与匀化系统、DMD芯片与控制系统、投影成像镜头和移动控制台5个部分。

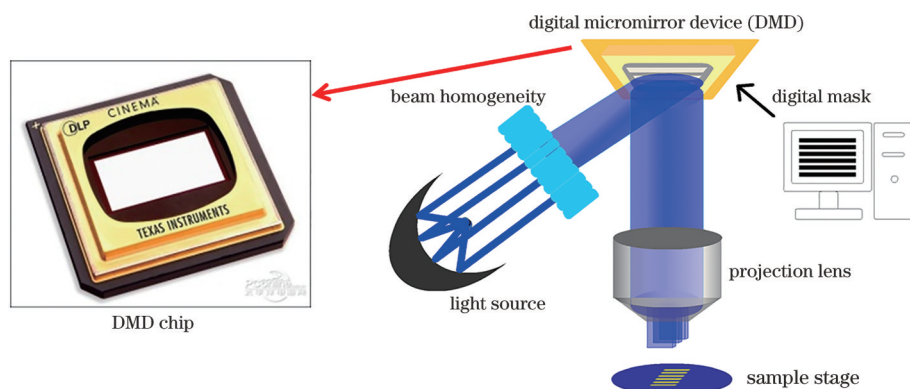


图 1 DMD 无掩模面投影光刻原理图

Fig. 1 Schematic diagram of DMD maskless projection lithography

通常以汞灯或 LED 作为光源, 经过光束均匀化处理, 以一定角度入射到 DMD 芯片, 反射光经过成像镜头投影至样品表面, 曝光图形由计算机二维图像直接输入, 配合大面积移动台可实现复杂图形的快速曝光。

2.1 光源

光源为全光路提供持续、稳定的光功率输入, 并为最终曝光提供足够的能量。常用的光源包括汞灯、LED 以及激光光源等。由于 DMD 的平面性, 在该系统中需要产生平行光束以便于调节, 而且光束横截面上各处能量必须相同, 因此需要对光源发出的光场进行光束均匀化处理。

2.2 光束准直与匀化系统

光源入射光由准直匀化系统进行调制, 并在输出端形成单向且在横截面上具有均匀能量分布的照明场。系统复杂性与光源情况相关。针对非相干光源, 通常采用蝇眼透镜阵列; 如果采用相干性好的激光作为光源, 可以通过采用针孔滤波器配合光束拦截法或直接采用光束整形器进行匀化。

非相干光源可采用蝇眼透镜阵列作为积分匀化器对光源能量进行重新分配并输出均匀平行的出射光^[13-14]。图 2(a) 所示的蝇眼透镜在截面上各处对于入射光进行截获, 于出射端将每一点光能量均分到全截面上, 可保证出射光场各处的能量匀化^[13]。

激光光源具有极佳的相干性, 使用积分匀化器时, 会在出射时产生各种干涉现象, 影响各处能量分布, 因此, 需使用其他方式进行均匀化处理。激光光源强度通常满足高斯分布, 较简单的做法是使用针孔滤波法^[15], 使用小直径光阑进行低通滤波, 然后进行扩束并截取所需出射的光斑区域, 通过损失较大光源能量换取平行近均匀能量分布的光束

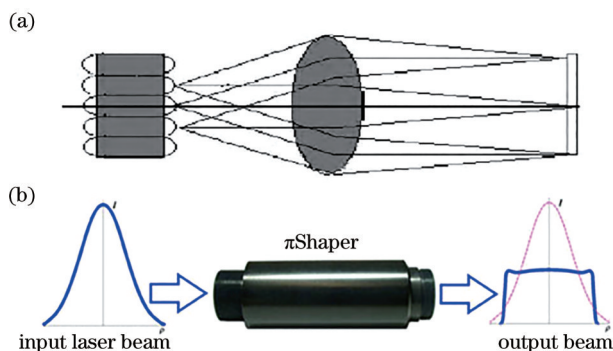


图 2 蝇眼透镜和光束整形器的匀化原理

Fig. 2 Principle of fly-eye lens and beam homogenizer

输出。另一种均匀化高斯光场能量分布的方式是利用光束整形器等特殊透镜组将高斯光场分布转变为平顶光场能量分布, 如图 2(b) 所示是由德国 AdlOptica GmbH 公司制造的 IIShaper6_6_NUV 的光束整形器, 可对 335~560 nm 波段内满足高斯能量分布的光束进行平顶化整形, 且输入光斑直径需要准确到 6 mm。

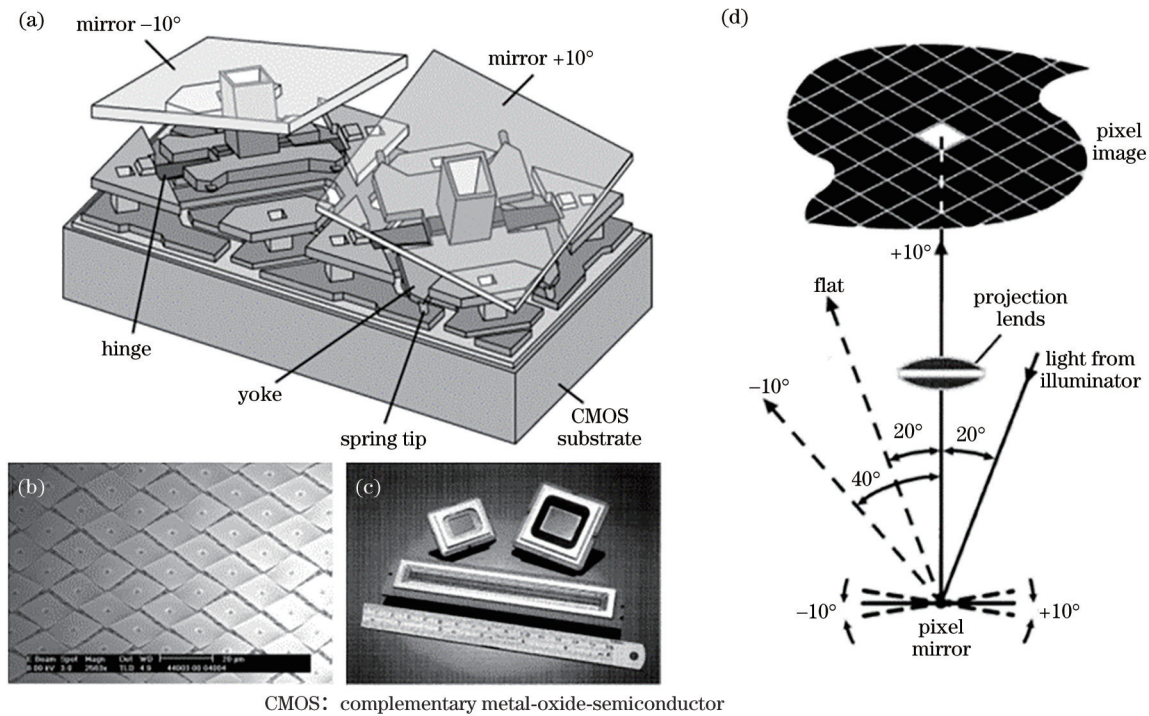
2.3 DMD 芯片与控制系统

DMD 芯片与控制系统是数字投影光刻系统的核心部分, 它可以对每个单元像素上的光场进行开关, 从而起到类似于常规投影光刻系统中掩模版的效果, 并将所成的图像直接输入到投影镜头。该芯片为数字控制部件, 通过连接端口和电脑控制系统进行通信。

早在 1983 年, 就有人提出了 128×128 周期性排布镜片组的概念并将其称为应变型微镜器件^[16]。之后它由美国德克萨斯州仪器公司进行改进设计, 并在 1987 年正式发布。其主要设计基础是周期性排布的双稳态镜面装置, 即可调节开关状态的微镜器件。

DMD 的一个可开关微镜单元如图 3(a)^[17]所示, 由一个铰链控制其上的微镜单元进行旋转, 在不同的信号下具有不同的偏转状态, 微镜单元具备一个最大旋转角度 θ , 其大小与 DMD 型号有关。当信号为“开”时, 微镜旋转角度为 $+\theta$; 当信号为“关”时, 角度将为 $-\theta$; 无信号输入时, 微镜角度保持为 0。保持入射到 DMD 表面的光场方向不变, 调节芯片上每个

微镜单元, 使得其仅在特定状态下才能将入射光指向光学系统的下一个部分(如成像系统), 即可便捷调控光场。例如在图 3(d)^[18]所示的 10° 旋转 DMD 单镜部件中, 仅在输入电信号为“开”并调整微镜旋转在 $+10^\circ$ 时入射光才会经由反射进入成像物镜。当周期性排列的多个微型反射镜都能单独进行开关时, 即可达到常规光学器件无法实现的调控效果。



CMOS: complementary metal-oxide-semiconductor

图 3 微镜或微镜阵列的工作原理。(a)微镜单元的结构示意图^[17]; (b)微镜阵列的扫描电子显微镜(SEM)照片^[17]; (c)集成的不同型号 DMD 芯片的照片^[18]; (d)微镜在光路中控制光出射方向的示意图^[18]

Fig. 3 Working principle of micromirror or micromirror array. (a) Structural diagram of single micromirror^[17]; (b) scanning electron microscope image of micromirror array^[17]; (c) photos of integrated DMD chips of different models^[18];

(d) schematic diagram of micromirror controlling light exit direction in optical path^[18]

第一个商用的 DMD 是一维的, 由直线排布的 840 个微镜构成。之后 DMD 的设计逐渐得到优化, 微镜排布拓展到了二维, 同时每个微镜单元也逐渐缩小。现在制造的 DMD 各个镜片边长已经可以缩小至 $10\ \mu\text{m}$ 左右, 最小可达略大于 $5\ \mu\text{m}$ ^[17]。每个二维的 DMD 芯片呈现为长方形, 沿长边和短边都有数百至上千个微镜进行周期性排布, 随着 DMD 芯片制造技术的不断进步, 其分辨率由最初的 $640\ \text{pixel} \times 480\ \text{pixel}$ 逐渐提高至 $800\ \text{pixel} \times 600\ \text{pixel}$ 、 $1024\ \text{pixel} \times 768\ \text{pixel}$ 、 $1280\ \text{pixel} \times 1024\ \text{pixel}$ 、 $1920\ \text{pixel} \times 1080\ \text{pixel}$ 及 $2716\ \text{pixel} \times 1528\ \text{pixel}$, 即一块 DMD 芯片中的微镜数目已经超过 400 万片, 因此计算机中的二维图像设计的分辨率随之提高, 已经满足各种复杂微纳结构的设计精

度。如图 3(b)所示, 在电子显微镜下可以清晰地看到 DMD 微镜单元根据输入信号差异展现的不同偏转角度^[17]。集成后的微镜组外表为数平方厘米大小的芯片, 一维微镜组呈现长条状, 二维微镜组则集成为一个长方形区域[图 3(c)]^[18]。

如此巨大数量的微镜阵列需要使用计算机系统进行控制, 因此, 所有的微镜单元都与处于互补金属氧化物半导体(CMOS)基底中的集成电路相连接, 并进一步连接至计算机的控制系统。为有效表示输入信号, 需要一种二维形式且在每个单元上能具有不同状态的计算机数据块, 即计算机中的位图(bitmap)文件。位图中包含全套的信息结构和阵列结构, 而且在字节阵列中, 每行的每个像素都由相应行的一个对应字节来表示^[19], 与 DMD 芯片上的

阵列排布完全吻合。只要绘制和 DMD 芯片上具有相同数量像素阵列的位图,使用计算机载入并且转换为对应的信号,即可立即在 DMD 芯片上出现相同的图案,并且进行直接调节。

因为 DMD 使用位图进行调制的方式极其直观,而且微镜开关状态进行改变也非常快速灵活,因此已经成为了最常用的数字空间光调制器。目前 DMD 在光路中主要发挥 3 种作用:在光纤通信系统中^[20],DMD 作为一种光开关,通过不同镜面旋转状态的切换,使得接收端仅在部分位置可以接收到入射光信号;在频谱调制系统中^[21],DMD 作为一种可调节的编码孔阵列,对于入射图像进行编码后,在特定位置使用该阵列进行调制和筛选,达到重新调节光路中的各个频率通道以及光场空间分布的目的;而在本文涉及的无掩模光刻系统中,DMD 作为一种数字掩模置于成像系统前,通过调节芯片表面状态将入射平行光束转化为可接收的图像,最终直接得到所需的图形。

2.4 投影成像镜头系统

投影成像物镜对于 DMD 反射的光场进行收集,通过精确的设计,保证其在基底上可以呈现良好的目标图形样式并进行曝光。除基础成像功能外,投影镜头的设计还需考虑系统中可能存在的各种像差与畸变并进行一定程度的校正。如 Messaoudi 等^[22]在成像系统中加入了 $4f$ 系统,在频谱面进行空间频率调制对于畸变进行处理和校正;赵立新等^[23]通过使用较厚负透镜补偿近轴与远轴点的光程差,从而大幅减少系统的像差、场曲与畸变等。

2.5 移动控制台

移动控制台可用于精密控制样品台的三维坐标位置,使光场可以在指定位置对光刻胶进行曝光。经过投影镜头后的光场聚焦区域较小,制备大尺度结构需要通过多子场拼接进行,配合 DMD 微镜尺寸以及投影成像系统的参数可以计算出像方的单像素大小,结合单张图片的长宽像素数量计算子场面积,进行周期性平移拼接,可实现大面积二维结构加工^[24-25]、三维结构曝光^[26]等。结构拼接精度受到移动台移动精度的限制,通常移动台可移动范围越大,精度越低。因此,需要考虑曝光结构的尺寸和精度选择合适的位移台。

3 DMD 面投影曝光分辨率发展进程

初期 DMD 的概念为“应变型微镜器件”,于

1983 年被提出^[16],之后它被改进为“数字微镜器件”并于 1987 年被设计完成。在 2000 年前,人们对它的定位仅限于将其运用在各类数码投影成像系统中;在 2000 年左右,研究人员开始注意到它在投影曝光中的潜力并开始进行相关研制。在此后的 20 年中,DMD 面投影曝光得到了长足的发展。

在光刻系统中衡量极限制备精度的最重要标准之一是系统的曝光分辨率。在本节中将对国内外的早期实验进行阐述,并介绍 DMD 面投影光刻系统分辨率的发展。

3.1 基于 DMD 的投影光刻技术的早期实验

国外对于 DMD 的研究可追溯到 1999~2000 年。Takahashi 和 Setoyama^[27]意识到了 DMD 在光刻系统中的应用可能性,搭建了一套初级的紫外投影光刻系统,对于负性光刻胶进行了一次试验性光刻。结果表明,芯片上一个像素的宽度可以得到 $50\ \mu\text{m}$ 的投影线宽,而最终图像分辨率极限为 $5\ \mu\text{m}$ ^[27]。该项实验提出的新型曝光方案在当时无疑是具有开创性的。

在此之后,研究人员注意到了 DMD 的独特性质,开始尝试搭建更完善的光学曝光系统。Ishikawa^[28]在 2002 年使用点阵直写的方法成功制备了线宽 $10\sim 20\ \mu\text{m}$ 的二维大面积线结构。经过扫描得到的线阵列边缘平滑度高且不需要使用掩模版,证明了使用 DMD 进行较高质量曝光的可行性。该成果很快被 Chan 等^[29]注意到,并在 2003 年 1 月份的国际会议中提及。Chan 等^[29]对于该开创性的无掩模点阵直写扫描法进行了重复实验并且加以改进,使用了较高数值孔径的成像物镜系统,得到了最细线宽 $1.5\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 的线阵列结构,曝光倾斜线结构时还可具备更细的线宽。此后 DMD 协助光刻制备微型器件的功能很快被各地研究人员所重视,越来越多的研究小组开始对 DMD 无掩模曝光进行设计和优化。

国内对于 DMD 协助光刻的相关运用开展的研究相对较晚,初期文献在 2006 年由陈劲松、陈铭勇等^[30-31]发表。陈劲松^[30]结合国外早期研究以及 DMD 在投影技术中的用途,搭建了一套由光源、准直系统、DMD 芯片与控制系统、物镜系统和样品台 5 部分构成的投影系统,成功制备了多种微型结构,最细线宽可达 $2.2\ \mu\text{m}$ 。陈铭勇等^[31]则是注意到了国外对于灰度曝光技术的早期理论,参考进行了相关实验,成功制备了渐变式结构。之后,国内主要

对于灰度曝光技术进行研究,国外则是在缩小线宽、改善光学系统等方面进行研发。随着研究的不断深入和国内外的交流,国内的DMD面投影曝光技术研究开始和国外齐头并进,现在总体上处于平行水平。

随着DMD面投影曝光技术的潜力被不断发掘,国内外相关文献的数量逐渐从每年数篇增加到每年十几至数十篇。当前国内对DMD的研究仍层出不穷,包括通过优化信号数据存储方式改进DMD数字控制系统^[32],使用DMD制备红外转换薄膜^[33]与柔性光电子器件^[34]等。相关文献的数量和内容充分展示了以DMD投影为代表的数字掩模光刻这一新兴领域的蓬勃发展。

3.2 DMD 投影光刻系统分辨率发展

半导体和微纳器件制备行业对微纳制备的线宽要求现已到达数十纳米的精度。传统的有掩模光刻技术可以使用超小线宽掩模版制备超精细结构,如在接触式光刻过程中,使用薄膜状的数十纳米分辨率的精密掩模版可以做到30~50 nm的最终曝光线宽^[35]。但DMD能够提供的原始线宽精细程度受限于每一个微镜单元的边长,并且很难对自身硬件进行改进,所能提供的调制在高精细微纳结构的制备中无疑受到了严重限制。目前商用的DMD芯片较常见的单镜边长为13~17 μm,更精细的微镜具有5~10 μm的边长,而5 μm边长以下的可控微镜尚未出现。虽然通过DMD面投影曝光可将非常复杂的二维结构快速、大面积、无需实体掩模地转移至光刻胶中,但对复杂微纳结构曝光时,目前基于DMD的数字无掩模光刻技术难以获得300 nm以下的线宽分辨率。同时由于该系统使用投影曝光,当线宽缩小至接近亚微米级别,分辨率会受到光学系统衍射极限的制约^[36-37]。

对于使用特定波长光源的投影光刻系统,如果考虑物镜的数值孔径并结合物镜的孔径角,经过消像差运算,系统的最小可分辨线宽^[36]可表示为

$$s = \frac{1.22\lambda}{2n_1 \sin \alpha} = \frac{0.61\lambda}{\text{NA}}, \quad (1)$$

式中: s 是系统最小可分辨线宽; n_1 是像方的介质折射率; α 为物镜孔径角的一半;NA是物镜系统的数值孔径; λ 是入射光的波长。不过,投影镜头的放大率并非总会使聚焦直径小于衍射极限。对于具有孔径光阑的系统(在当前投影系统中其最小值为DMD单镜边长),根据几何光学,假设入射场前经过光阑时为平行光,经过至少一个物镜后聚焦的光斑直径为

$$d = \frac{D}{\prod_{i=1}^n m_i}, \quad (2)$$

式中: m_i 代表第*i*个物镜的放大倍率; n 为成像系统中物镜的总个数(不小于1); d 为像面光斑的直径; D 为孔径光阑的直径。根据式(1)和式(2),如果想要在受到衍射极限限制的情况下得到更小的线宽,为了尽可能接近极限,可以考虑使用高倍率的放大物镜;如果想要降低衍射极限宽度,可以考虑使用更短波长的光源或者设法使用更大数值孔径的物镜系统。

20年来,DMD面投影曝光技术不断得到优化,随着物镜系统的数值孔径和放大倍率的增加,投影曝光分辨率也逐渐提高。在2000年Kohrou Takahashi等^[27]的实验中,使用17 μm单镜边长DMD芯片进行初期实验得到了50 μm长的最小线宽[图4(a)~4(b)];在2003年,Chan等^[29]在会议报告中使用时点阵直写法,配合405 nm激光光源、17 μm单镜边长DMD芯片并使用1:3放大透镜和5:1缩小透镜组合形成的投影镜头系统进行多方向直写,在横向、纵向与斜向得到了1.5~1.8 μm镜线宽的阵列,当进行斜向点阵直写时甚至可以将线宽减少到1 μm[图4(c)~4(e)];2005年,Sun等^[38]使用365 nm紫外光源,使用5:1缩放倍数投影镜头和13.68 μm单镜边长DMD芯片进行调制,制备出了多种三维结构,最细线宽达600 nm[图4(f)];2010年,颜丽华等^[39]尝试使用13.68 μm DMD芯片、14:1缩放的投影镜头和365 nm紫外光源制作铬掩模,得到的直线阵列最细线宽达0.67 μm[图4(g)];同年,陆锦洪等^[40]使用了31.1倍缩倍数、0.673像方数值孔径的成像系统,同时使用单镜边长为13.68 μm的DMD芯片,配合532 nm波长激光光源,成功在整个曝光区域得到了最小周期900 nm、最细线宽450 nm的点阵结构[图4(h)~4(i)];在2013年,Mills等^[41]使用800 nm飞秒激光光源、7.6 μm单镜边长DMD芯片和70:1最终缩放倍率的投影镜头系统,使用长波光光源成功制备出了最细特征线宽400 nm的螺旋形结构[图4(j)~4(k)];在2020年,Kang等^[42]使用5.4 μm单镜边长DMD芯片、190:1放大倍率、0.9数值孔径的投影镜头与405 nm LED光源在平面上制备方形网格,在714 nm周期点阵内得到357 nm的特征线宽[图4(l)]。

以上研究中,研究人员尝试通过提高投影镜头的放大倍数得到更细的线宽。随着放大倍率从较

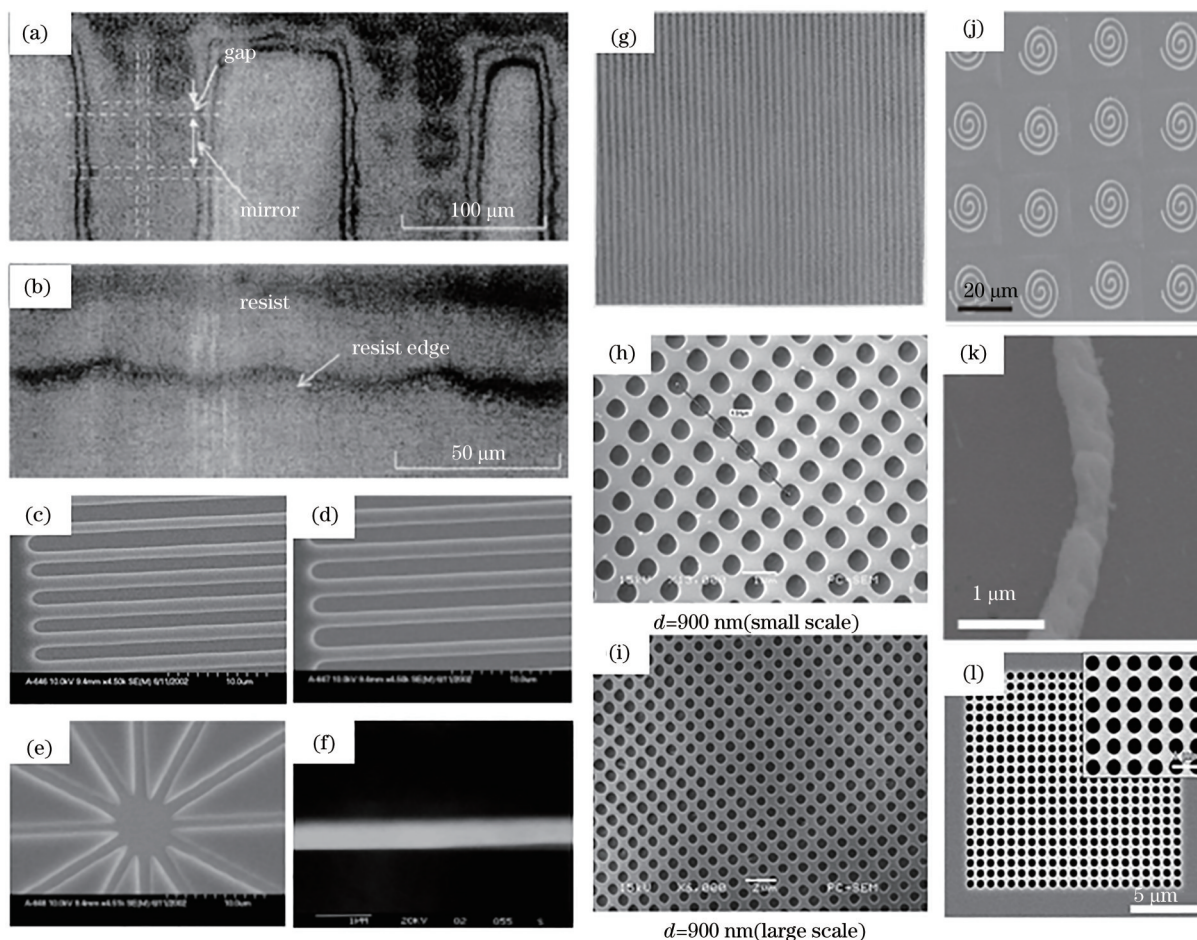


图 4 DMD 无掩模投影光刻分辨率的发展历程。(a)~(b)2000 年的利用 DMD 无掩模投影曝光得到的 $50\ \mu\text{m}$ 线宽^[27];
 (c)~(e)2003 年使用点阵直写扫描制备的 $1.5\sim 1.8\ \mu\text{m}$ 线宽横向线阵列与最细线宽 $1\ \mu\text{m}$ 的斜向扫描线^[29];
 (f)2005 年得到的 $600\ \text{nm}$ 线宽^[38];(g)2010 年得到的 $0.67\ \mu\text{m}$ 宽度的线阵列^[39];(h)~(i)2010 年得到的周期 $900\ \text{nm}$
 的点阵列^[40];(j)~(k)2013 年制备的螺旋线结构与最小 $400\ \text{nm}$ 的线宽^[41];
 (l)2020 年使用高数值孔径高放大倍数物镜得到的最小 $357\ \text{nm}$ 特征线宽结构^[42]

Fig. 4 Development history of resolution of DMD maskless projection lithography. (a)~(b) $50\ \mu\text{m}$ line width obtained by DMD maskless projection lithography experimentally in 2000^[27]; (c)~(e) $1.5\sim 1.8\ \mu\text{m}$ horizontal scanning line width and $1\ \mu\text{m}$ diagonal scanning line width obtained by point array technique projection in 2003^[29]; (f) $600\ \text{nm}$ line width obtained in 2005^[38]; (g) line array of $0.67\ \mu\text{m}$ width obtained in 2010^[39]; (h)~(i) dot array with $900\ \text{nm}$ period obtained in 2010^[40]; (j)~(k) helix structures with $400\ \text{nm}$ minimum linewidth in 2013^[41]; (l) $357\ \text{nm}$ feature line width obtained by introducing high NA and big magnification projection lens in 2020^[42]

小的 5:1 提升至最终的 190:1, 衍射带来的线宽限制越来越明显, 如在 Kang 等的实验中, 理论投影后单像素对应线宽仅数十纳米, 但由于受到衍射极限制约, 最终线宽仍达到了 $300\ \text{nm}$ 。以上实验都未能制备出明显小于光学衍射极限的结构。考虑到当今微型器件加工的精度要求已到达数十纳米, 必须继续改进制备的精细程度, 这就需要设法对于衍射极限进行突破。

3.3 飞秒激光非线性面投影光刻技术

超快激光的脉宽可达飞秒量级甚至更短^[43]。

飞秒激光由于其飞秒(fs)级的极短单脉冲宽度和纳秒(ns)级的长脉冲间隔, 能在极短时间内输入高能量的同时, 大幅减少每轮脉冲产生的冲击波、热能与对材料带来的损伤, 不仅具备更高的加工精度, 还能更有效地向物质输出光能。其高能量在物质表面或内部可引发独特的光学非线性效应, 甚至可以烧蚀高硬度材料的表面原子^[43-44], 相较于普通激光光源具备独特优势, 有利于提升 DMD 面投影光刻技术的分辨率。

在 2018 年, 中国科学院理化技术研究所郑美

玲研究团队利用 3 种较高倍率的物镜进行了面投影光刻研究,在使用 400 nm 波长的飞秒激光作为光源时,分别使用了 20 倍 0.4 数值孔径、50 倍 0.8 数值孔径和 100 倍 1.45 数值孔径的物镜对光刻胶进行数字投影。当 DMD 芯片微镜边长为

13.68 μm 时,3 种不同放大倍数的物镜下获得的理论线宽依次为 418、308、152 nm。同时,该团队直接利用单像素阵列曝光了 150 nm 宽度的线条以示可行性,最终得到的最细线宽已经略小于衍射极限[图 5(a)]^[45]。

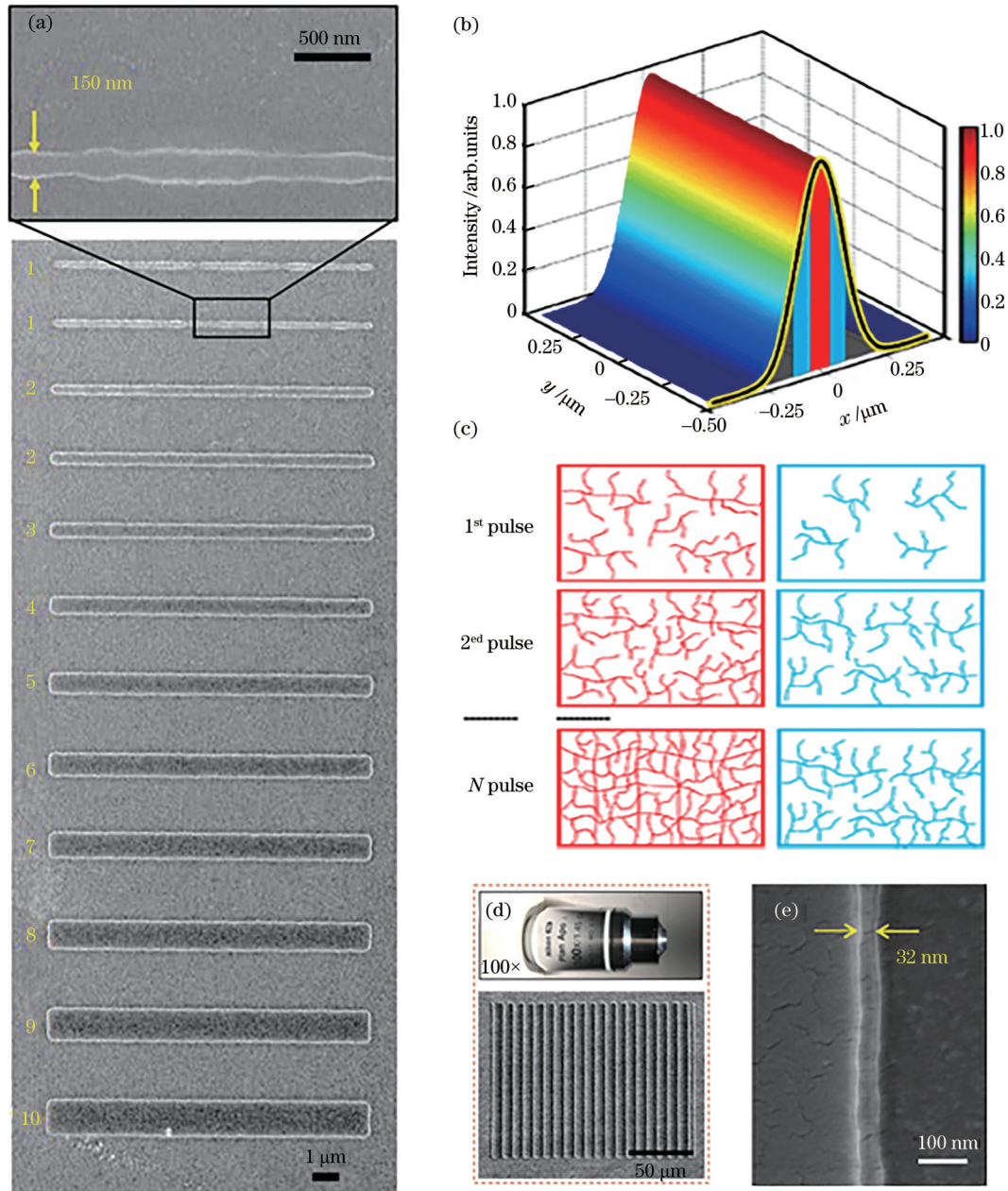


图 5 飞秒激光无掩模面投影曝光获得的线宽分辨率。(a)使用高倍数值孔径物镜和飞秒激光光源得到最细 150 nm 特征线宽的结构^[45]; (b)单像素宽度投影线条的光场分布示意图^[46]; (c)化学非线性效应示意图,左列和右列图像依次对应(b)中的高光场强度和低光场强度区域^[46]; (d)放大倍率 100 \times ,数值孔径 1.45 的物镜与曝光得到的细线阵列^[45]; (e)突破衍射极限至 $\lambda/12$ 的 32 nm 线宽结构^[46]

Fig. 5 Linewidth resolution obtained by femtosecond laser maskless surface projection exposure. (a) 150 nm feature linewidth obtained by introducing high NA objective lens and femtosecond laser^[45]; (b) light field distribution diagram of single pixel width's projection line^[46]; (c) schematic diagram of chemical nonlinear effect, where left column and right column images correspond to high and low light field intensity regions in (b)^[46], respectively; (d) objective lens with 100 \times magnification and NA of 1.45^[45], and obtained fine line array; (e) 32 nm linewidth structure which breaks through diffraction limit to $\lambda/12$ ^[46]

此后该团队对曝光工艺进行了部分改进,进一步探索突破光学衍射极限的途径。2021年,在使用100倍1.45数值孔径的高倍物镜和波长400 nm飞秒激光光源的条件下,他们采用了一种非化学放大光刻胶,充分利用了飞秒激光光源短脉冲长间隔的优势,在飞秒激光的作用下进行光与物质相互作用,获得了更高的分辨率。

光刻胶中的分子在飞秒激光脉冲作用下,由于光学非线性效应,吸收两个光子达到激发态,荧光寿命为0.363 ns,而在双脉冲之间的无能量输入时间间隔为12.5 ns,因此单次脉冲仅能使少量分子发生反应且两个脉冲间不会互相影响。通过DMD投影到目标面的线条光强呈现高斯分布,因此在接近中心处激发态分子以指数级增长速度形成不溶聚合物,而在较远处的三维网络难以成型,显影后会被去除,从而增强聚合反应时的化学非线性过程[图5(b)~5(c)]。最终得到的曝光线宽可突破光学衍射极限^[46]。

该团队通过对曝光条件进行优化,探索了单像素线宽结构的曝光。由于充分结合了光学非线性效应和化学非线性效应,最终线宽达到了小于100 nm的尺度。在最细处,甚至可以达到32 nm即激发波长1/12的极细线宽[图5(e)]^[46]。利用该方法可以批量制备最细线宽不大于100 nm的微纳器件,如微型晶体管。该工作证明使用超快激光光源突破衍射极限不仅是可行的,而且能达到极小的最终特征宽度。随着DMD面投影精度的进一步提升,该技术势必会在高精度微纳结构制备方面发挥独特的作用。

4 DMD面投影光刻技术的应用

鉴于DMD的快速响应特性与光场调制灵活性,目前基于DMD的面投影光刻技术已具备多种应用。例如,研究人员利用微镜可独立快速响应的性质,在单次曝光内向平面不同区域输出不同总能量,开发出了灰度光刻技术^[34,47];又如,尝试对曝光的步骤进行优化,使用多光束或多步曝光以达到数百纳米级高分辨率、小误差高平整度的图案等^[48];再如,由于DMD倾向于在一个薄层上进行投影且图像样式可随时调节,可以使用逐层曝光的方式快速方便地制备较复杂的微型三维结构^[26,49]。DMD低成本、快速可逆的调制方式使研究人员可以制备多种不同小型器件,以下对其可能的应用领域进行总结。

4.1 光子学器件制备

使用光子作为信息载体需要大量的光子学器件集成的系统。部分光子学器件以二维的形式贴合在基底平面上,使用DMD芯片进行面投影曝光即可快速便捷地对这种器件进行制备。若需要对器件进行集成,它们的尺寸必须足够微小,并且需要能通过二维拼接的方式互相连接。

在2021年,中国科学院理化技术研究所研究团队尝试对多种微型光子学器件进行了制备,包括阵列波导光栅结构[图6(a)~6(c)]、微流控芯片抗刻蚀结构[图6(d)~6(e)]以及梳齿型微谐振器抗刻蚀结构[图6(f)~6(h)]。SEM照片表明器件窄线宽区域的线条质量良好,全器件曝光缺陷少,证明当DMD面投影系统线宽足够小时可直接曝光制备高质量的微纳光子学器件。由于DMD投影系统还可进行大面积拼接,相邻的器件在曝光后可通过拼接过程直接相连,组成可以存储信息的光学回路[图6(l)~6(m)]^[46]。

另一种器件是微型菲涅耳波带片。制备波带片阵列的一般方法为电子束光刻或X射线光刻,不过其成本较高,加工过程也较为繁琐。如果直接将波带片设计图案输入DMD芯片并进行面投影曝光,可以直接得到一幅波带片微结构,通过在相邻位置多次曝光并进行拼接可得到周期性的菲涅耳波带片阵列。2010年,颜丽华等^[39]将波带片图样输入DMD并直接进行曝光,成功得到了波带片结构。经过后续处理,制备了环形的菲涅耳铬掩模。2018年,中国科学院理化技术研究所研究团队利用飞秒激光DMD面投影曝光方式快速曝光出一幅菲涅耳波带片,并测试其聚焦特性[图6(i)],结果表明该波带片对532 nm激光响应良好,在约114 μm 远处可将入射激光聚焦为特征宽度1.57 μm 的光斑[图6(j)~6(k)]^[45],充分表明了DMD面投影曝光结果的精确度。

4.2 三维生物支架与仿生结构

生物支架在生物医学与细胞学研究方面具有不可忽视的作用。DMD芯片作为二维数字掩模,可以通过先将三维结构逐层分解,然后将该结构所有的横截面输入DMD曝光系统,并且从下往上进行逐层打印的方式,逐层制造出该三维目标结构。该方法通过对生物支架结构进行分解,并使用光刻胶进行逐层曝光,即可快速塑形。

2006年,Choi等^[49]将三维结构模型逐层进行分

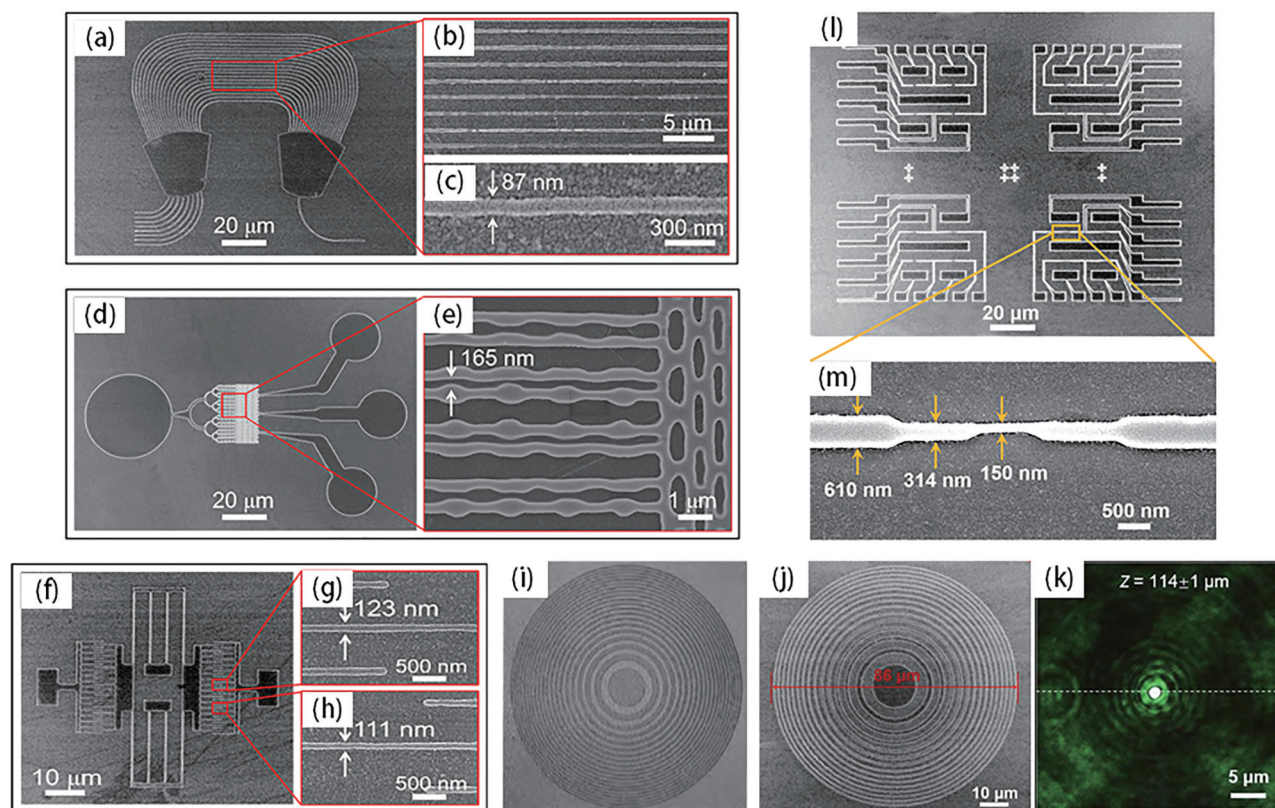


图6 利用DMD无掩模投影光刻技术制备多种光子学器件。(a)~(c)阵列波导光栅结构^[46];(d)~(e)微流控芯片抗刻蚀结构^[46];(f)~(h)梳齿型微谐振器抗刻蚀结构^[46];(i)通过曝光直接制备铬掩模菲涅耳波带片^[39];(j)~(k)数十微米级大小的菲涅耳波带片,在114 μm左右具有响应^[45];(l)~(m)单次曝光获得的高精细、大面积结构^[46]

Fig. 6 Photonics devices manufactured by DMD maskless projection lithography. (a)~(c) Arrayed waveguide grating pattern^[46]; (d)~(e) micromanofluid device pattern^[46]; (f)~(h) electrostatic comb micro-resonators^[46]; (i) chromium Fresnel zone plate fabricated with single exposure^[39]; (j)~(k) Fresnel zone plate with diameter of tens of micrometers, which has response at about 114 μm^[45]; (l)~(m) large area structure with high precision obtained by single exposure^[46]

解,在高压汞灯光源的DMD曝光系统中调整基底位置逐层进行曝光,得到了包括微金字塔、微型针、微型风扇在内的多种三维结构。之后该团队对该光刻工艺不断进行改进,发展出了逐层沉降曝光制备工艺,即将基底浸没于液体中,制备完毕一层后进行沉降,等液面平静后再制备下一层[图7(a)],所得结构具备更高的精细度,成本也相对较为低廉^[26]。该工艺现已有较完善的工业化应用,可被安装为整台机器,并且已经可以快速制备多种功能繁多的小型结构,如使用商用树脂在系统中进行低成本、快速的曝光制备尺度达毫米级的肾脏形生物学支架[图7(b)]^[26]。

生物支架在组织工程中发挥着重要作用。例如,对工程中常用的柔性水凝胶,三维生物支架可以对其进行固定。Cha等^[50]在2014年使用DMD逐层曝光了一个三维支架结构,之后将其置于预凝胶溶液中并让溶液凝胶化,得到了内嵌三维支架加固

的水凝胶块。对该凝胶的测试表明其机械结构非常稳定,显著优于一般的水凝胶[图7(c)~7(d)]。同时凝胶的生物相适性仍处于高水平,细胞在凝胶内可形成组织结构,充分证明了使用DMD逐层曝光制备的生物支架加固的水凝胶结构可在组织工程中发挥重要作用。

除生物支架、生物水凝胶等结构外,也可以使用DMD面投影曝光系统制备三维仿生结构。Kuang等^[51]在面投影曝光时采用了灰度曝光与三维制备相结合的方式,除了制备网格状支架外,还成功得到了三维仿生小腿肌腱结构。它和真正的小腿肌腱一样具备椭圆形横截面,并具有优良的力学性质,可横向挂载1 kg重物并不发生明显形变[图7(e)]。使用该方法还可以制备包括仿生机臂在内的多种部件^[51],在机械加工、仿生机器人研究等方面表现出巨大的应用潜力。

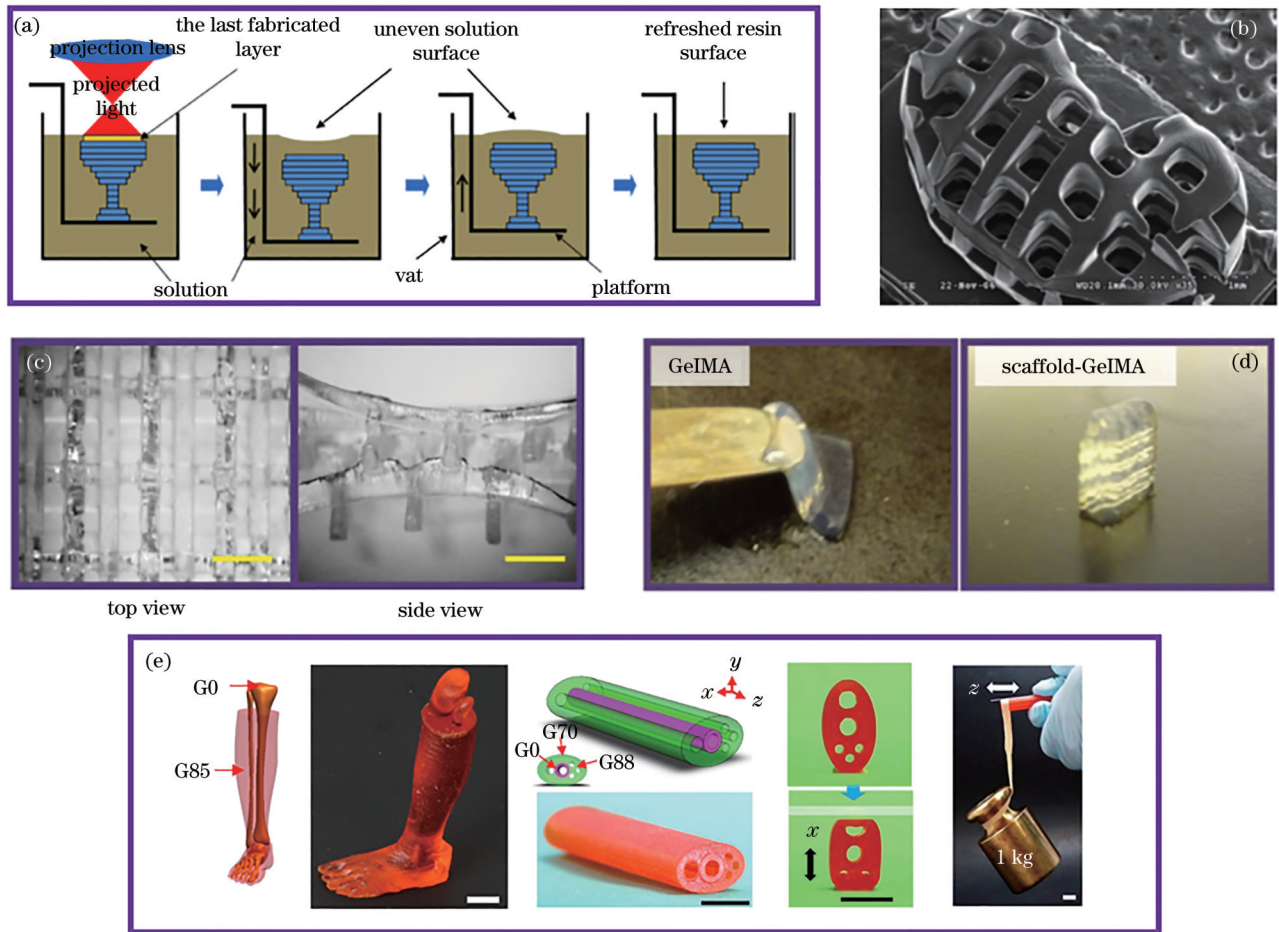


图 7 利用 DMD 无掩模投影光刻技术制备生物支架和仿生结构。(a) 逐层沉降制备三维结构的过程^[26]；(b) 肾脏形三维生物支架^[26]；(c) 使用支架加固的水凝胶的俯视和侧视照片^[50]；(d) 支架加固的水凝胶机械结构增强且能立在平面上^[50]；(e) 可吊起 1 kg 重物的仿生肌腱结构，设计来自于小腿肌肉结构^[51]

Fig. 7 Biological scaffolds and bionic structures fabricated by DMD maskless projection lithography. (a) Process of 3D layer-by-layer sinking fabrication^[26]; (b) kidney-shaped 3D scaffold^[26]; (c) top view and side view photographs of hydrogel enhanced by scaffold^[50]; (d) scaffold enhanced hydrogel's mechanical capabilities and now it can 'stand' on surfaces^[50]; (e) bionic tendon structure inspired from human calf, capable of lifting 1 kg weight^[51]

4.3 飞秒激光面投影用于特殊材料

DMD 面投影曝光系统通常使用汞灯、LED 或普通激光光源，光场能量仅足够与各种高分子的光致抗蚀剂进行反应。为了拓展可加工材料范围，部分研究人员在光路中引入了飞秒激光作为光源，可以瞬时向材料表面输入大量能量，与硬材料表面原子进行相互作用，并对其进行烧蚀，导致其脱落，从而使曝光系统具有加工硬材料的能力^[43-44]，能进行更广泛材料的加工。

例如，金属由于其不透光性和较高硬度，通常无法被投影曝光系统直接处理，但引入飞秒激光后，超精细微纳三维金属结构的制备成为可能。香港大学 Wang 等^[52]在 2017 年的研究中尝试使用 DMD 投影曝光系统结合逐层沉积并曝光烧蚀的制

备方法获得多种高精度三维金属结构[图 8(a)]。在使用飞秒激光配合高数值孔径物镜加工后，最终结构横向精度达到了 800 nm，而每层垂直厚度完全可以通过调节沉积的时间和输入粒子流进行精细控制，最终分辨率相比于同期类似工艺甚至达到了其一百倍左右^[52]。超快激光的高能量使得它既可以对硬材料进行刻制和塑形，又能在金属层沉积后平滑表面。DMD 的直观调制也使得生产复杂形状的微型三维硬材料结构成为可能，在之后的制备中，Wang 等^[52]除木堆结构外，还成功制备了包括微齿轮、纳米线桥在内的多种超精细三维金属结构[图 8(b)~8(c)]。

又如，石墨烯是一种具有良好电化学性质且可由化学气相沉积法于特定物质表面制备的单层碳

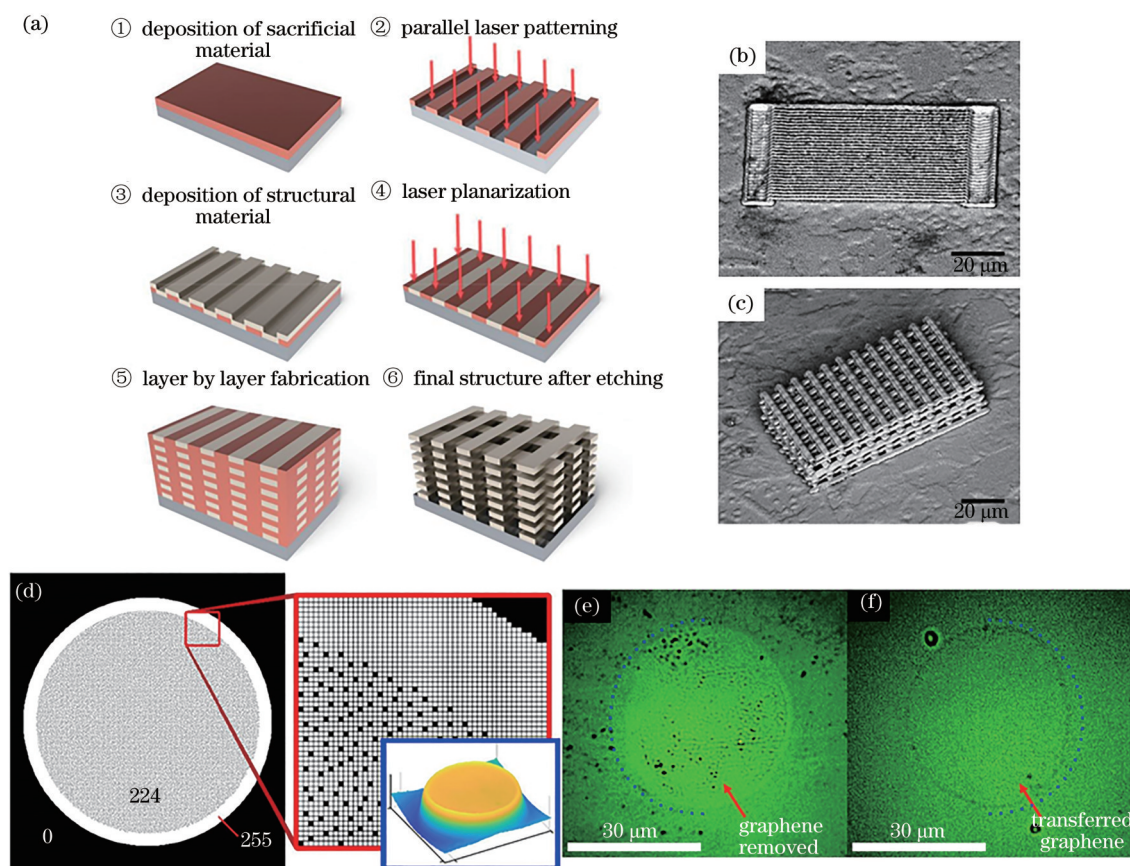


图 8 飞秒激光的引入使得 DMD 无掩模投影光刻技术可以实现特殊材料的曝光。(a) 逐层沉积加工硬材料结构的过程^[52]; (b)~(c) 逐层沉积制备的微型金属木堆结构和金属纳米线桥^[52]; (d) 按空间均匀排布点阵密度表示灰度的示意图和 DMD 反射光场经过衍射平滑的模拟分布^[53]; (e) 曝光后催化基底上被移除的石墨烯^[53]; (f) 曝光后器件基底上转移的石墨烯^[53]

Fig. 8 Introduction of femtosecond laser can realize exposure of special materials using DMD maskless projection lithography. (a) Processing hard material structure with layer-by-layer fabrication^[52]; (b)~(c) micro metal woodpile structure and nano metal wire bridge fabricated by layer-by-layer process^[52]; (d) schematic diagram of gray level represented by dot matrix density arranged uniformly in space, and simulated distribution of DMD reflected light field smoothed out by diffraction^[53]; (e) graphene removed on catalysis substrate after exposure^[53]; (f) graphene transferred to device substrate after exposure^[53]

原子材料,但将它从催化基底转移至器件基底上需要多步繁杂的过程。Praeger 等^[53]在 2020 年尝试使用 800 nm 飞秒激光光源的 DMD 无掩模光刻系统解决该问题。飞秒激光的高能量可以激发生长基底上的碳原子并开始朝向器件基底的转移过程,各处反应速率和转移碳原子数量比例使用灰度来表示。与传统灰度曝光通过调整各处光场输入总时间表示灰度不同,实验中各处转移时间必须保持一致,无法使用常规方法,该研究组使用了新的灰度区分方式:由较大面积上“开”状态和“关”状态像素点比例来表示不同区域灰度,灰度值较高处“开”状态像素点占比高,输入光功率高,转移过程更剧烈。在灰度值相同的全区域中,两种状态像素点均匀混合排列[图 8(d)]。系统中 DMD 成像像素点理论边长

小于衍射极限,但伴随的衍射效应反而有助于能量的均匀分布,因此不同灰度区域经过相同时间后将均匀转移不同数量的碳原子^[53]。经过曝光他们成功通过单步制备即得到了传统工艺中需要多步才能完成的石墨烯转移图样[图 8(e)~8(f)],而且在不同区域可使用灰度对反应速率进行可控调节,在微型电子器件方面具有可观的应用前景。

5 总结和展望

详细阐述了基于 DMD 的无掩模光刻技术的系统构成,并对光源、光束准直与匀化系统、DMD 芯片与控制系统、投影成像镜头和移动控制台部分的功能进行了说明,重点描述了 DMD 通过双稳态镜片阵列对空间光场进行调制的工作原理。概括了

通过对 DMD 曝光系统进行优化以提高其分辨率的阶段性进展。DMD 微镜阵列可独立响应并快速组合出二维图样,使其在灰度光刻、二维微器件、三维结构快速制备等方面具备独特优势,可制备包括微型光波导、菲涅耳波带片、生物支架、仿生肌腱在内的多种器件。通过引入超快激光光源还可使数字面投影曝光技术拓展其应用材料的范围,如制备高精度三维金属结构、协助进行石墨烯碳原子转移等。在过去 20 年里,基于 DMD 的面投影曝光技术不断被完善,也得到了充分的应用,但仍然具备很大的开发空间。在今后的研究中,研究人员也可以通过利用超快超强光源、大数值孔径投影镜头、计算机智能控制等对数字掩模光刻系统进行优化设计,进一步优化曝光质量并满足微型器件制备行业的新需求。如在灰度曝光系统中引入超快激光,通过超快激光的烧蚀特性,可在硬材料表面得到灰度图案或进行灰度刻蚀。综上所述,基于 DMD 投影的无掩模技术作为新兴的空间光场调制曝光手段,势必会带来更多样的功能和更广阔的应用。

参 考 文 献

- [1] 王凤秀. 光刻的现状与动向[J]. 微电子学, 1973, 3(1): 53-56.
Wang F X. The present situation and trend of lithography[J]. Microelectronics, 1973, 3(1): 53-56.
- [2] K.Jain, C.G.Willson, B.J.Lin, 等. 利用激光激光器进行超快、高分辨率接触式光刻[J]. 半导体设备, 1983, 12(2): 51-59.
Jain K, Willson C, Lin B, et al. Conduct ultrafast, high-resolution contact lithography with plasmon laser [J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 1983, 12(2): 51-59.
- [3] 李霖, 周庆奎, 宫晨. 接触接近式曝光机曝光方式浅析及实例[J]. 电子工业专用设备, 2012, 41(6): 24-25, 30.
Li L, Zhou Q K, Gong C. The simple analysis and example on exposal mode of the mask aligner[J]. Equipment for Electronic Products Manufacturing, 2012, 41(6): 24-25, 30.
- [4] Horiuchi T, Fujii H, Yasunaga K. Lithography onto surfaces of fine-diameter pipes using rotary scan-projection exposure[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2015, 28(2): 273-278.
- [5] 宋登元, 王小平. 光学光刻技术的研究进展[J]. 半导体技术, 1998, 23(2): 2-5, 10.
Song D Y, Wang X P. Advance of optical lithography technology[J]. Semiconductor Technology, 1998, 23(2): 2-5, 10.
- [6] 邢飞, 廖进昆, 杨晓军, 等. 纳米压印技术的研究进展[J]. 激光杂志, 2013, 34(3): 1-3.
Xing F, Liao J K, Yang X J, et al. Research progress of the nanoimprint technology[J]. Laser Journal, 2013, 34(3): 1-3.
- [7] 陈广璐, 唐波, 唐兆云, 等. 用于纳米器件的电子束与光学混合光刻技术[J]. 微纳电子技术, 2013, 50(6): 386-390.
Chen G L, Tang B, Tang Z Y, et al. Mixed E-beam and optical lithography for nanoscale devices[J]. Micronanoelectronic Technology, 2013, 50(6): 386-390.
- [8] Lian J, Wang L M, Sun X C, et al. Patterning metallic nanostructures by ion-beam-induced dewetting and Rayleigh instability[J]. Nano Letters, 2006, 6(5): 1047-1052.
- [9] 王友旺, 鹿凯. 激光干涉光刻技术的分析[J]. 电子技术与软件工程, 2013(21): 149.
Wang Y W, Lu K. Analysis of the laser interference lithography[J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2013(21): 149.
- [10] 张维彩, 郑美玲. 高效双光子引发剂及水相中制备水凝胶微结构的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202007.
Zhang W C, Zheng M L. Research progress of two-photon initiator with high efficiency and preparation of hydrogel microstructure in aqueous phase[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202007.
- [11] 王荣荣, 张维彩, 金峰, 等. 双光子聚合制备聚苯胺微结构[J]. 中国激光, 2021, 48(2): 0202006.
Wang R R, Zhang W C, Jin F, et al. Fabrication of polyaniline microstructure via two-photon polymerization [J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(2): 0202006.
- [12] 陈劲松. 用于衍射微光学元件制备的无掩模光刻技术[J]. 微纳电子技术, 2006, 43(7): 351-354.
Chen J S. Non-mask lithograph technology for manufacturing diffractive micro-optical devices[J]. Micronanoelectronic Technology, 2006, 43(7): 351-354.
- [13] 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.
- [14] 张恒煦, 董连和, 王丽, 等. 基于 DMD 光刻制作微

- 柱透镜阵列分模曝光的研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(12): 1441-1445.
- Zhang H X, Dong L H, Wang L, et al. Novel multiple exposure in fabrication of micro hemicylindrical lens array by digital micro mirror lithography[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(12): 1441-1445.
- [15] Lee M P, Cooper G J T, Hinkley T, et al. Development of a 3D printer using scanning projection stereolithography[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 9875.
- [16] Hornbeck L J. 128×128 deformable mirror device[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1983, 30(5): 539-545.
- [17] Douglass M. DMD reliability: a MEMS success story[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4980: 1-11.
- [18] Hornbeck L J. Digital Light Processing and MEMS: reflecting the digital display needs of the networked society[J]. Proceedings of SPIE, 1996, 2783: 2-13.
- [19] 孙传灼, 孙文生. 调用 Microsoft Windows BMP 文件存储的位图的方法[J]. 计算机应用研究, 1994, 11(6): 29-31.
- Sun C Z, Sun W S. Method of calling bitmaps stored in Microsoft Windows BMP files[J]. Application Research of Computers, 1994, 11(6): 29-31.
- [20] Miles A, Lynn B, Blanche P A, et al. 7 × 7 DMD-based diffractive fiber switch at 1550 nm[J]. Optics Communications, 2015, 334: 41-45.
- [21] Wu Y H, Mirza I O, Arce G R, et al. Development of a digital micromirror device-based Multishot Snapshot Spectral Imaging system[J]. Optics Letters, 2011, 36(14): 2692-2694.
- [22] Messaoudi H, Thiemicke F, Falldorf C, et al. Distortion-free laser beam shaping for material processing using a digital micromirror device[J]. Production Engineering, 2017, 11(3): 365-371.
- [23] 赵立新, 张雨东, 王建, 等. 球面投影光刻物镜的设计[J]. 光电工程, 2009, 36(1): 93-97.
- Zhao L X, Zhang Y D, Wang J, et al. Design of spherical surface imaging projection lithography lens[J]. Opto-Electronic Engineering, 2009, 36(1): 93-97.
- [24] 高文, 郑美玲, 金峰, 等. 飞秒激光快速制备大面积二维微纳结构[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(11): 111421.
- Gao W, Zheng M L, Jin F, et al. Fast fabrication of large-area two-dimensional micro/nanostructure by femtosecond laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(11): 111421.
- [25] 姜旭, 杨絮, 刘红, 等. 基于运动补偿的 DMD 无掩模光刻拼接误差校正[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.
- [26] Choi J W, Wicker R, Lee S H, et al. Fabrication of 3D biocompatible/biodegradable micro-scaffolds using dynamic mask projection microstereolithography[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(15/16): 5494-5503.
- [27] Takahashi K, Setoyama J. A UV-exposure system using DMD[J]. Electronics and Communications in Japan (Part II: Electronics), 2000, 83(7): 56-58.
- [28] Ishikawa A. Diversion of exposure technology, born from development of spherical semiconductor. the maskless exposure apparatus[J]. Journal of Photopolymer Science and Technology, 2002, 15(4): 707-711.
- [29] Chan K F, Feng Z Q, Yang R, et al. High-resolution maskless lithography by the integration of micro-optics and point array technique[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 4985: 37-43.
- [30] 陈劲松. 数字掩模技术[J]. 液晶与显示, 2006, 21(6): 700-703.
- Chen J S. Digital mask technology[J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2006, 21(6): 700-703.
- [31] 陈铭勇, 郭小伟, 马延琴, 等. 用 DMD 灰度曝光法产生连续面形微结构[J]. 微细加工技术, 2006(6): 18-21.
- Chen M Y, Guo X W, Ma Y Q, et al. DMD-based gray-tone lithography for fabrication of continuous profile microstructure[J]. Microfabrication Technology, 2006(6): 18-21.
- [32] 张林, 胡丹峰, 朱鹏飞, 等. 激光直写系统中 DMD 控制方法的设计与改进[J]. 半导体光电, 2021, 42(5): 741-746, 759.
- Zhang L, Hu D F, Zhu P F, et al. Design and improvement of DMD control methods in direct laser writing system[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(5): 741-746, 759.
- [33] 张晓乐, 李卓, 高彦泽, 等. MEMS 红外转换薄膜光驱动技术研究[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1531001.
- Zhang X L, Li Z, Gao Y Z, et al. Light-driven technology based on MEMS infrared conversion films[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1531001.
- [34] 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.
- [35] Jeong S J, Kim J E, Moon H S, et al. Soft graphoepitaxy of block copolymer assembly with disposable photoresist confinement[J]. *Nano Letters*, 2009, 9(6): 2300-2305.
- [36] 章志鸣, 沈元华, 陈惠芬. 光学[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- Zhang Z M, Shen Y H, Chen H F. *Optics*[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 陆锦洪, 谢向生, 张培晴, 等. 基于数字微镜器件亚微米制备技术研究[J]. *光子学报*, 2010, 39(4): 600-604.
- Lu J H, Xie X S, Zhang P Q, et al. Submicron-sized optical fabrication with DMD based lithography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, 39(4): 600-604.
- [41] Mills B, Feinaeugle M, Sones C L, et al. Sub-micron-scale femtosecond laser ablation using a digital micromirror device[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2013, 23(3): 035005.
- [42] Kang M S, Han C, Jeon H. Submicrometer-scale pattern generation via maskless digital photolithography[J]. *Optica*, 2020, 7(12): 1788-1795.
- [43] Sommer A, Bothschafter E M, Sato S A, et al. Attosecond nonlinear polarization and light - matter energy transfer in solids[J]. *Nature*, 2016, 534(7605): 86-90.
- [44] 魏超, 马玉平, 韩源, 等. 飞秒激光加工超硬材料的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(19): 190003.
- Wei C, Ma Y P, Han Y, et al. Femtosecond laser processing of ultrahard materials[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(19): 190003.
- [45] Liu Y H, Zhao Y Y, Dong X Z, et al. Multi-scale structure patterning by digital-mask projective lithography with an alterable projective scaling system[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(6): 065317.
- [46] Liu Y H, Zhao Y Y, Jin F, et al. $\lambda/12$ super resolution achieved in maskless optical projection nanolithography for efficient cross-scale patterning[J]. *Nano Letters*, 2021, 21(9): 3915-3921.
- [47] Liang J Y, Wu S Y, Kohn R N, et al. Grayscale laser image formation using a programmable binary mask[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(10): 108201.
- [48] 沈易, 吴翌旭, 邢燕冰, 等. 多光束无掩模光刻系统[J]. *应用光学*, 2010, 31(4): 537-539.
- Shen Y, Wu Y X, Xing Y B, et al. Multi-beam maskless lithograph system[J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4): 537-539.
- [49] Choi J W, Ha Y M, Lee S H, et al. Design of microstereolithography system based on dynamic image projection for fabrication of three-dimensional microstructures[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2006, 20(12): 2094-2104.
- [50] Cha C Y, Soman P, Zhu W, et al. Structural reinforcement of cell-laden hydrogels with microfabricated three dimensional scaffolds[J]. *Biomaterials Science*, 2014, 2(5): 703-709.
- [51] Kuang X, Wu J T, Chen K J, et al. Grayscale digital light processing 3D printing for highly functionally graded materials[J]. *Science Advances*, 2019, 5(5): eaav5790.
- [52] Wang D E, Wen C Y, Chang Y N, et al. Ultrafast laser-enabled 3D metal printing: a solution to fabricate arbitrary submicron metal structures[J]. *Precision Engineering*, 2018, 52: 106-111.
- [53] Praeger M, Papazoglou S, Pesquera A, et al. Laser-induced backward transfer of monolayer graphene[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 533: 147488.