

激光直写制备衍射光学元件的研究及应用

梁广磊^{1,2}, 孙树峰^{1,2*}, 王 津^{1,2}, 姜明明^{1,2}, 张丰云^{1,2}, 王 茜^{1,2}, 邵 晶^{1,2}, 曲志浩^{1,2}, 王萍萍^{1,2,3}

1. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520;
2. 青岛理工大学 山东省高校激光绿色智能制造技术重点实验室, 山东 青岛 266520;
3. 青岛黄海学院, 山东 青岛 266427)

摘要: 衍射光学元件作为一种典型的微光学元件,其体积小、质量轻、设计自由度多、成像质量良好,在光学成像、光学数据存储、激光技术、生物医学等领域具有广阔的应用前景。随着现代光学系统的不断发展,对衍射光学元件的加工效率和制备精度提出了更高的要求。激光直写技术凭借加工精度高、工艺简单、灵活性好等优势,成为制备高精密仪器中关键光学元件所必需的一种加工方式。针对不同的加工需求,开发了多种激光直写系统,并在应用过程中不断地改进升级。另外,突破衍射极限的飞秒激光微纳结构制造技术,能够获得更高的加工精度和更好的分辨率,为微光学元件的制备提供了新的方法。首先介绍了激光直写技术的特点;其次综述了衍射光学元件直写加工技术的研究进展,包括直写技术的影响因素、激光直写系统和多光束加工技术;接着介绍了衍射光学元件的典型应用,如红外成像、色差校正、光束整形、图像显示;最后,对激光直写技术制备衍射光学元件存在的问题和未来发展趋势做出了总结。

关键词: 激光直写技术; 衍射光学元件; 直写系统对比; 微纳制造; 光学元件应用

中图分类号: TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220567

0 引言

衍射光学元件 (Diffractive Optical Elements, DOE) 是一种十分重要的光学元件,基于光波衍射理论利用基片上刻蚀的连续浮雕型或台阶型结构,可以获得极高的衍射效率。自 19 世纪 70 年代研制出衍射光学元件^[1],到 20 世纪 80 年代二元光学元件理念^[2-3]的提出,衍射光学元件开始得到更多的关注并从此进入全速发展时期,而衍射光学也作为一门新兴学科受到学术界的深入研究。随着现代光学技术的发展,各类光电系统趋向于轻量化、微型化和集成化方面发展^[4],进而对衍射光学元件等光学组件的材料和加工工艺提出了更高的要求。

目前,用于制造衍射光学元件的常规技术有刻蚀

技术、灰度掩膜法、单点金刚石车削技术、二元光学法等,这些技术都具有各自的优势和缺陷。例如:干法刻蚀技术在去除材料时有着刻蚀速度快、刻蚀方向性好等优点,但是该方法需要昂贵的设备和复杂的刻蚀工艺,另外湿法刻蚀技术成本可控,但刻蚀精度不高,缺乏准确性和灵活性^[5-7];灰度掩膜法可一次性刻蚀出衍射光学元件表面,方法简便且无对准误差,但加工精度不易控制、对光源的均一性也有较高要求^[8-9];单点金刚石车削技术制备衍射光学元件的表面粗糙度小、加工精度高,但加工的材料、面型和最小尺寸受限,不易批量生产^[10-12];二元光学法是发展最成熟也是最常用的一种方法,其制作的二元光学元件极大地提高了衍射效率,但加工工序多、周期长且成本高,不能充分地适应行业需求^[13];模压法和复制

收稿日期:2022-08-10; 修订日期:2022-10-18

基金项目:国家自然科学基金(51775289);山东省自然科学基金(ZR2018ZB0524);山东省重点研发计划项目(2019GGX104097,2019JZZY010402);高等学校学科创新引智计划(D21017);青岛西海岸新区 2020 年度科技源头创新专项项目(2020-103)

作者简介:梁广磊,男,硕士生,主要从事激光精密加工及再制造方面的研究。

导师(通讯作者)简介:孙树峰,男,教授,博士,主要从事激光精密加工及再制造方面的研究。

技术虽然能大批量地制造衍射光学元件,但这些技术并不适合加工非常精细的光学结构^[14-15]。

激光自问世以来,以高亮度、强相干性、出色的方向性等突出特点在微纳加工领域得到了广泛应用。激光加工是一种非接触式的无磨损技术,为材料的精密微纳加工能力方面开辟了一条新途径^[16]。与其他制备方式相比,利用激光直写技术制备衍射光学元件,具有高精度、高灵活性、可加工复杂轮廓、环境友好且制作过程简单等特点,能够提高 DOE 的加工精度和衍射效率^[17],因此受到了国内外学者的广泛重视。

文中从影响制备的因素、直写系统和多光束加工

技术等方面介绍了激光直写技术制备衍射光学元件的研究进展,简述了衍射光学元件的重要应用,对激光直写技术制备衍射光学元件存在的问题进行了分析,并对未来的发展趋势进行了展望。

1 激光直写技术制备衍射光学元件

1.1 激光直写技术的影响因素

激光直写技术是一种快速制造技术,于 20 世纪 80 年代随着大规模集成电路的发展而兴起。如图 1(a)所示,这种技术在制备过程中不需要掩模版,首先在处理后的材料基板表面涂覆一层光刻胶,预先计算出光学元件各点的浮雕深度数据,然后利用计算机辅助

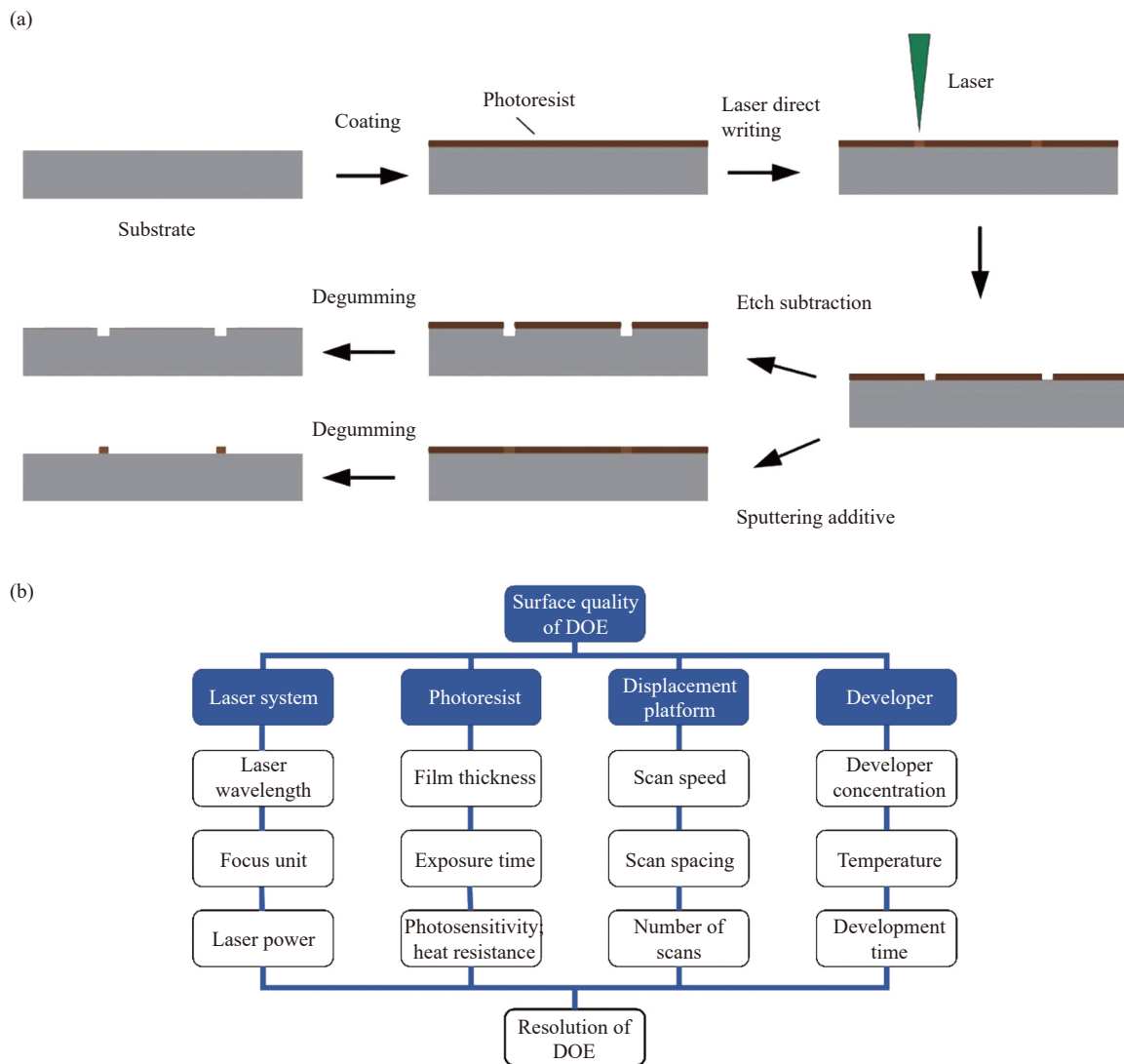


图 1 (a) 激光直写技术工艺过程示意图^[18]; (b) 影响 DOE 制备质量的主要因素

Fig.1 (a) Schematic diagram of laser direct writing technology process^[18]; (b) Main factors affecting the quality of DOE preparation

设计 (Computer Aided Design, CAD) 等软件绘制出所需图形, 导入程序软件输入参数, 之后通过控制激光束或者三维运动平台的移动, 在光刻胶层上直接扫描曝光, 最后经显影、化学蚀刻和去胶等步骤, 制备出微细的连续位相浮雕结构, 简化了步骤, 缩短了生产周期^[18-20]。经过几十年的发展为精密元器件的制备提供了新的途径, 可用于各种掩模版^[21-22]、二元光学元件^[23-24]的制作和非球面的检测^[25-26]等, 具有成本低、写入速度快、操作简单等优点, 被视为具有巨大发展潜力的光刻技术^[27]。影响 DOE 表面质量的主要因素如图 1(b) 所示, 因此, 考虑激光直写技术中工艺的合理性和设备的先进性对元件的加工质量具有重要意义, 文中将主要针对聚焦系统、激光能量、扫描速度阐述对制备衍射光学元件的影响。

1.1.1 激光聚焦

对于激光直写技术, 要获得高分辨率必须对焦点处的能量进行极端压缩, 使聚焦在样品上的光斑尺寸超过光学衍射极限, 从而实现亚波长光刻分辨率^[28-29]。直写光束的焦点位置对衍射光学元件的高

精度制备有着至关重要的影响, 因此, 有必要对曝光焦平面进行精确检测和控制。Du 等^[30]研究了焦平面的检测方法, 利用环形 DOE 和四分之一挡板对入射激光束的光斑形状进行调制, 随着样品位置的改变, 由探测相机采集到反射激光束的信息 (能量和位置分布), 得出样品离焦量的大小和方向。该方法的线性检测范围至少可以达到 76 μm , 灵敏度可以达到 100 nm, 检测精度可以达到 100 nm。这项研究结果非常适合在激光直写过程中进行大范围焦平面的高精度检测。

通常激光直写系统在设计时也会引入自动对焦模块, 以消除环境振动的影响, 但直写系统中固有的离焦误差 (包括光源折射率差异和对准精度等) 仍然会对 DOE 的特征尺寸精度产生重要影响。针对此问题, Zhu 等^[31]利用像散聚焦技术原理开发了一种自动聚焦子系统, 见图 2(a)。光纤激光器 (波长为 650 nm) 发出的红色探测光束经扩束和偏振分束器 (PBS) 的反射后, 最终通过显微物镜聚焦于只可被蓝光写入的样品上; 利用光电探测器接收被样品反射的红色光

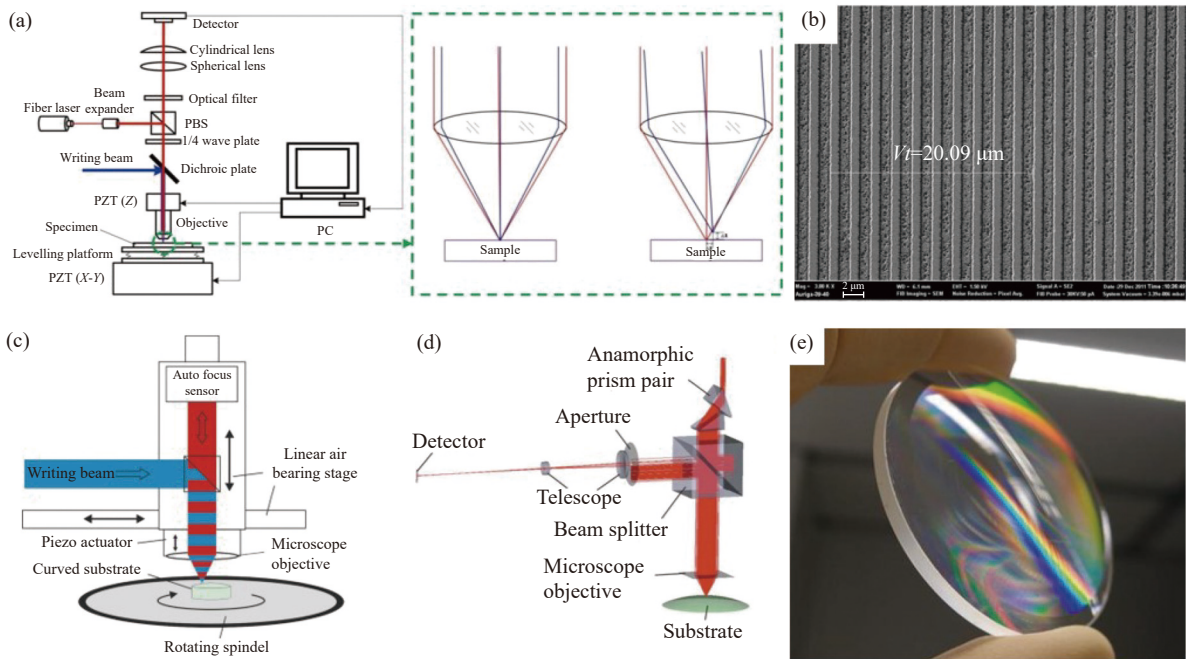


图 2 (a) 自动对焦子系统示意图 (左) 和焦点对准光束和倾斜光束放大图 (右)^[31]; (b) 周期为 2 μm 的铬光栅的 SEM 照片^[31]; (c) 激光直写制备曲面衍射结构系统示意图^[32]; (d) 自动对焦系统示意图^[32]; (e) 具有二元菲涅耳波带片结构的球面透镜^[32]

Fig.2 (a) Schematic diagram of the autofocus subsystem (left) and magnification of the in-focus and oblique beams (right)^[31]; (b) SEM photo of chromium grating with period of 2 μm ^[31]; (c) Schematic diagram of laser direct writing system for preparing curved diffraction structures^[32]; (d) Schematic diagram of autofocus system^[32]; (e) Spherical lens with binary Fresnel zone plate structure^[32]

束,随着试样与显微镜物镜 z 轴位置的变化,光电探测器上的焦点形状发生变化,并返回一个与距离相关的电压信号,输入到用于调整显微镜位置的闭环反馈电路。使用直写系统制备了尺寸 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$ 、周期为 $2\text{ }\mu\text{m}$ 熔融石英光栅,其分辨率可以达到亚纳米级,如图 2(b)所示,通过实验的误差确定和预补偿技术可以有效消除偏差,极大地提高了制造精度。

Häfner 等^[32]提出了一种改进型的激光直写系统,可以在旋转对称曲面上制备任意的衍射结构。图 2(c)显示了直写系统的示意图,该制备过程可概括为三个步骤,首先通过集成的线性空气轴承台进行直写点的定位,根据基板表面凹陷度不断调整直写头的高度;然后利用图 2(d)开发的自动对焦系统在倾斜表面上进行对焦;最后在垂直线性空气轴承平台上控制压电执行器不间断地曝光整个基板,制备了具有二元菲涅耳波带片结构的球面透镜,如图 2(e)所示,最小结构周期为 $2.4\text{ }\mu\text{m}$,这种自动对焦系统能够制备表面坡度高达 15° 的旋转对称曲面,显示了激光直写在制造复杂表面的技术优势。

Ai 等^[33]利用动态聚焦透镜研制了一种新型激光直写系统,其特点是聚焦透镜可以在 z 方向上连续线性地改变焦点位置,始终将激光聚焦在曲面上,可移动镜头的精度可以达到 $\pm 1\text{ }\mu\text{m}$ 。使用波长为 355 nm ,功率为 20 mW 的激光器,配合三维位移平台在 40 s 内制作了线宽和间距分别为 $12.5\text{ }\mu\text{m}$ 和 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的同心圆形光栅。表明开发的聚焦系统能够在不同曲率半径的基板上实现微米级精度的快速制造。因此,保证焦点位置的准确性是制备高质量表面微结构的重要前提,科学合理的自动对焦系统结合焦平面检测方法是保证 DOE 获得高分辨率的重要手段。

1.1.2 激光能量密度和扫描速度

激光直写制备衍射光学元件是将聚焦的激光束作用于光刻胶的表面,利用光刻胶的曝光显影特性获得设计的结构元件的过程。利用直写技术制造 DOE 时,所获得的结构分辨率不仅受复杂化学(光反应、暗反应、扩散和链生长)的影响,而且还与直写系统的选定参数有关,例如激光功率和写入速度^[34]。一方

面,光刻胶层需要吸收能量到达一定的阈值才可以进行有效的曝光,当能量密度低于曝光阈值时,直写图案就无法显现;但是随着激光功率的增大,由于激光的强度分布特性会使线宽也随之增大。另一方面,扫描速度也会对光刻胶的能量吸收产生重要影响。当扫描速度过快时,光刻胶的部分面积无法吸收充足的能量达到曝光阈值;而当扫描速度过慢时,在写入路径上会因为能量的累计而造成过烧蚀现象;通常写入速度至少为每秒几十微米。

Jwad 等^[35]研究了激光能量密度和扫描速度对制造不同纳米级厚度薄膜的影响,利用仿真和实验使用纳秒激光器在覆有钛涂层的基板上制备了二级相位型菲涅耳波带板(FZP)。通过控制扫描速度改变激光累积的能量密度,将 TiO_2 的厚度控制在纳米级,而且调节能量密度和扫描速度还能够有效提高生产效率。华中科技大学的艾俊^[18]研究了激光直写光刻的能量密度分布与光刻胶的作用关系,使用激光功率为 40 mW 、聚焦光斑半径为 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的 355 nm 紫外激光垂直入射到光刻胶表面,建立了光刻胶层内不同深度处的曝光能量密度分布,如图 3(a)所示(选择其中的 $z=0, 0.5, 1\text{ }\mu\text{m}$)。结果表明,不同深度处的曝光能量分布遵循高斯分布,且随着胶层内深度的增加,曝光能量急剧下降。因此对不同厚度的光刻胶,需要采用不同的曝光能量密度才能彻底曝光。

中国科学院长春光学精机械与物理研究所的李凤有^[36]对激光直写光刻中的激光功率和扫描速度进行实验探讨,研究了两者对直写线宽的影响。实验采用波长为 442 nm 的 He-Cd 激光器,在保持激光输出功率一定的情况下,如图 3(b)所示,发现随着扫描速度的增快,对应的曝光量逐渐减小,光刻得到的线条宽度也随之变小;保持扫描速度恒定,如图 3(c)所示,发现写入线宽随着激光输出功率的增加而变宽;当曝光量与光强的乘积值低于曝光阈值时,显影后的光刻胶将不会出现直写痕迹。事实上,不同种类和不同膜厚的光刻胶,需要的能量密度和刻写速度均是不同的,两者对光刻胶是共同作用的关系,在基于不同应用的特定结构制造中,需要对这两个参数进行综合分析和实验确定。

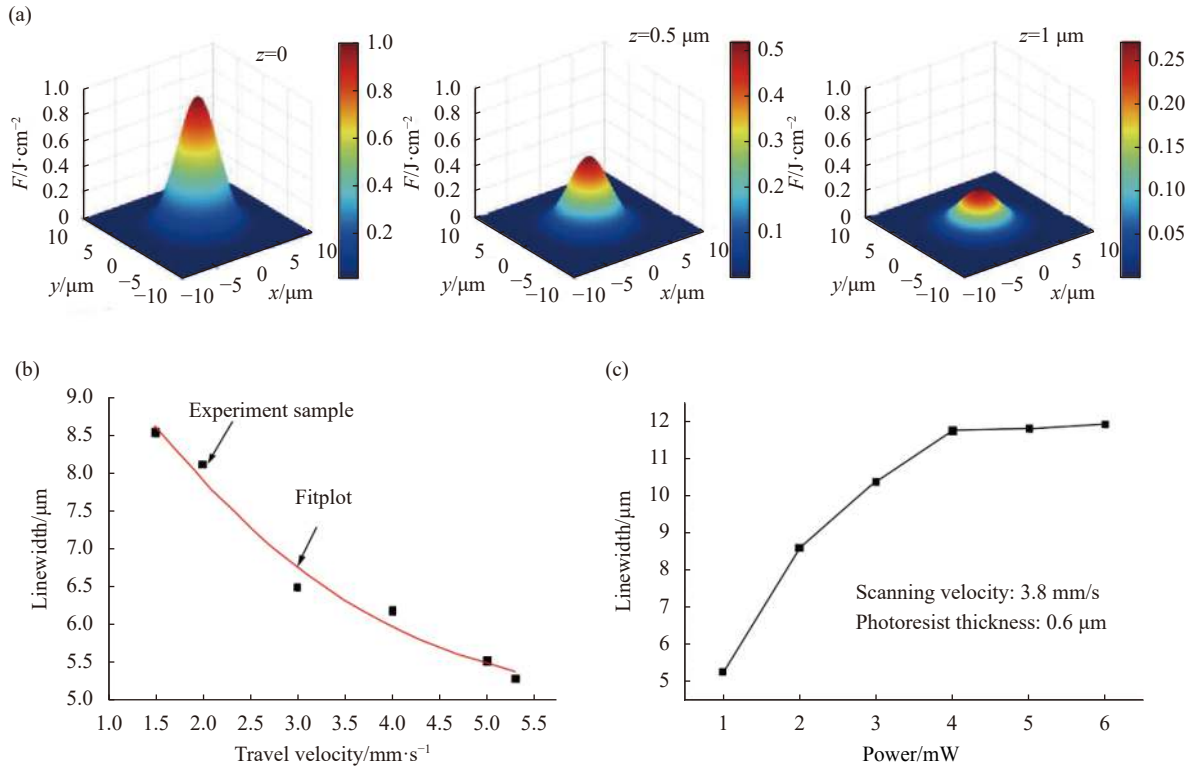


图 3 (a) 光刻胶层内不同深度处的曝光能量密度分布图^[18]; (b) 扫描速度与扫描线宽关系图^[36]; (c) 激光功率与扫描线宽关系图^[36]

Fig.3 (a) Exposure energy density distribution at different depths in the photoresist layer^[18]; (b) Schematic diagram of the relationship between scanning speed and scanning line width^[36]; (c) Schematic diagram of the relationship between laser power and scan line width^[36]

1.2 飞秒激光直写技术的工艺及系统

随着光学产业的不断发展,人们对光学元件在尺寸、结构和加工精度等方面提出了更高的要求,普通的激光直写技术已经满足不了精细化的现代需求,而飞秒激光的出现为微光学元件的制备提供了新的工具。飞秒激光是指脉冲宽度极窄的超短脉冲激光,与材料发生作用时可利用多光子吸收特性将加工区域精确地控制在激光焦点处,在极短的时间内诱导材料快速电离,产生的热影响小,加工边缘整齐,可以实现微纳结构的高精度制备^[37-39]。

高斯等^[40]针对蓝宝石难加工的问题,提出利用飞秒激光双光子吸收效应对蓝宝石衬底进行精细加工,并系统研究了激光功率和扫描速度对加工分辨率的影响。在激光功率为 0.96 mW 、扫描速度为 0.1 mm/s 的参数下制备了单条线宽约为 61 nm 的直线结构,实

现了超越光学衍射极限的加工分辨率,为高硬度材料的微纳结构制备提供了参考。

刘培元等^[41]利用飞秒激光搭建的双光子聚合系统,在直径为 6.9 μm 的微纳光纤上制作了 8 个周期约为 95 μm 、平均厚度和宽度约为 2.9 μm 和 4 μm 的光栅块,成功获得了长周期光纤光栅,制造误差均在要求的范围内。王荣荣^[42]、廖常锐^[43]、苏亚辉^[44]等人纷纷研究了基于飞秒激光的双光子聚合技术在微纳器件制备中的应用,结果均表明,这项技术不仅可以实现三维微结构的加工,还可以达到高效精准的快速制备目的。文中对不同结构类型的飞秒激光直写系统进行了总结比较,如表 1 所示,下文将对基于直角坐标系和极坐标系的飞秒激光直写系统进行重点介绍。

表 1 不同类型飞秒激光直写系统的比较

Tab.1 Comparison of different types of femtosecond laser direct writing systems

Femtosecond laser direct writing system	Substrate surface structure	Platform movement direction	Processing characteristics	
Based on cartesian coordinate system	Piezo platform	Linear symmetry plane structure	Linear motion in X/Y/Z direction	High machining accuracy; Low processing efficiency
	Scanning mirror	Linear symmetry plane structure; Centrosymmetric surface structure	Linear motion in Z direction	High processing efficiency; High machining accuracy (with high numerical aperture objective)
	Linear motor	Linear symmetry plane structure	Linear motion in X/Y/Z direction	Large processing range; Low processing efficiency
	Scanning mirror Linear motor	Linear symmetry plane structure; Centrosymmetric surface structure	Linear motion in X/Y/Z direction	High processing efficiency; Large processing range
Based on polar coordinate system	Centrosymmetric surface structure	Linear motion in X/Y direction Rotational movement in the Z direction	High machining accuracy and efficiency; Large processing range	

1.2.1 基于直角坐标系的飞秒激光直写系统

飞秒激光直写系统主要有两种类型：一是基于直角坐标系，二是基于极坐标系。目前，基于直角坐标系的飞秒激光直写系统应用最为广泛。图 4(a) 所示为飞秒激光直写加工系统示意图^[45]，基本原理是将激光焦点固定，三个压电平台构成三维直角坐标系，样品基板固定在平台上，通过计算机控制驱动器实现压电平台的移动完成激光的直写扫描。

基于压电平台的激光直写系统是直角坐标系中常用的加工技术之一。Ma 等^[46]利用基于压电平台的直写系统在硫系玻璃内部制作了体相位光栅 (VPG)，如图 4(b) 所示，实验采用波长为 800 nm 的飞秒激光器，移动平台的位移精度为 0.1 μm，以 150 μm/s 的移动速度在玻璃内部制造了宽度为 1000 μm 的 VPG，周期为 5 μm。结果表明，基于压电平台的飞秒激光直写技术可以制备出具有清晰衍射图案和高衍射效率 (评价 DOE 性能的重要指标) 的光栅结构。Tian 等^[47]在压电平台上进行了混合折衍射元件 (HOVML) 的制备实验研究。实验使用波长为 780 nm、功率为 6 mW 的飞秒激光，经 NA=1.4 的物镜聚焦到光刻胶中，在压电平台的移动下通过控制双电流镜组进行扫描，利用原子力显微镜测量样品，如图 4(c) 所示，观察到样品表面光滑，粗糙度小于 10 nm。如图 4(d) 所示，从绿色箭头开始到黄色箭头结束，相位逐渐减少 2π，该系统所加工的元件可以独立产生光学涡旋，展现了在聚焦

方面的独特光学特性。Liu 等^[48]提出一种将飞秒激光直写与离子刻蚀技术相结合的方法。通过 60 倍放大物镜将波长为 790 nm 的飞秒激光聚焦到聚合物中，利用压电平台和双电流镜组控制激光的焦点，制备了高度为 2.1 μm、周期为 10 μm 的闪耀光栅，此闪耀光栅可以将激光强度分布调整为不同的衍射级，这种方法为加工具有更复杂结构的微型光学器件提供了基础。

基于压电平台的激光直写技术加工精度高，但是加工尺寸受压电平台的行程限制，不能制备大尺寸的衍射光学结构^[49-50]。基于直线电机的飞秒激光直写系统加工范围大 (可达到厘米级)，可以加工大尺寸三维结构^[51]，但是位移平台存在较大的惯性，会影响加工的效率和精度。因此，研究人员开发了基于扫描振镜的飞秒激光直写系统，该系统是通过控制两个相互垂直反射镜的偏转角度和压电平台的升降来实现对样品基板的三维扫描，利用这种方法可以有效地提高加工效率和精度，但是受到聚焦物镜的放大倍数和数值孔径的影响，加工范围有限^[52-53]，而且使得光路更加复杂。

针对此类问题，吉林大学的研究团队^[54]提出利用高速扫描振镜系统与气浮平台相配合的方法，将气浮平台与数字扫描振镜集成到一个系统。加工系统如图 5(a) 所示，进行加工时，振镜在 XY 平面内负责扫描加工阵列中点每个微结构，直线电机驱动气浮平台三

轴移动来扩大加工范围, 最终拼成阵列。使用波长为 780 nm 的飞秒激光经 100 倍物镜 ($NA=1.35$) 聚焦于光刻胶, 成功制得填充因子接近 100% 的非涅耳波带板 (FZPA), 如图 5(b) 所示, 制造面积超过了物镜的视场角, 其衍射效率达到 89%。该团队进一步利用直写系统在 9 mW 的激光功率下, 制备了直径为 100 μm , 每

层衍射层的微结构高度为 4000 nm、1064 nm 和 4000 nm 的多层衍射光学元件^[45], 获得结果如图 5(c) 所示, 用此系统制备的多层衍射光学元件都具有很好的加工精度, 微结构也得到了很好的表征, 通过此方法改善了线性平台小范围加工时由于系统振动造成的加工误差, 同时实现了单元结构面积大的高精密微

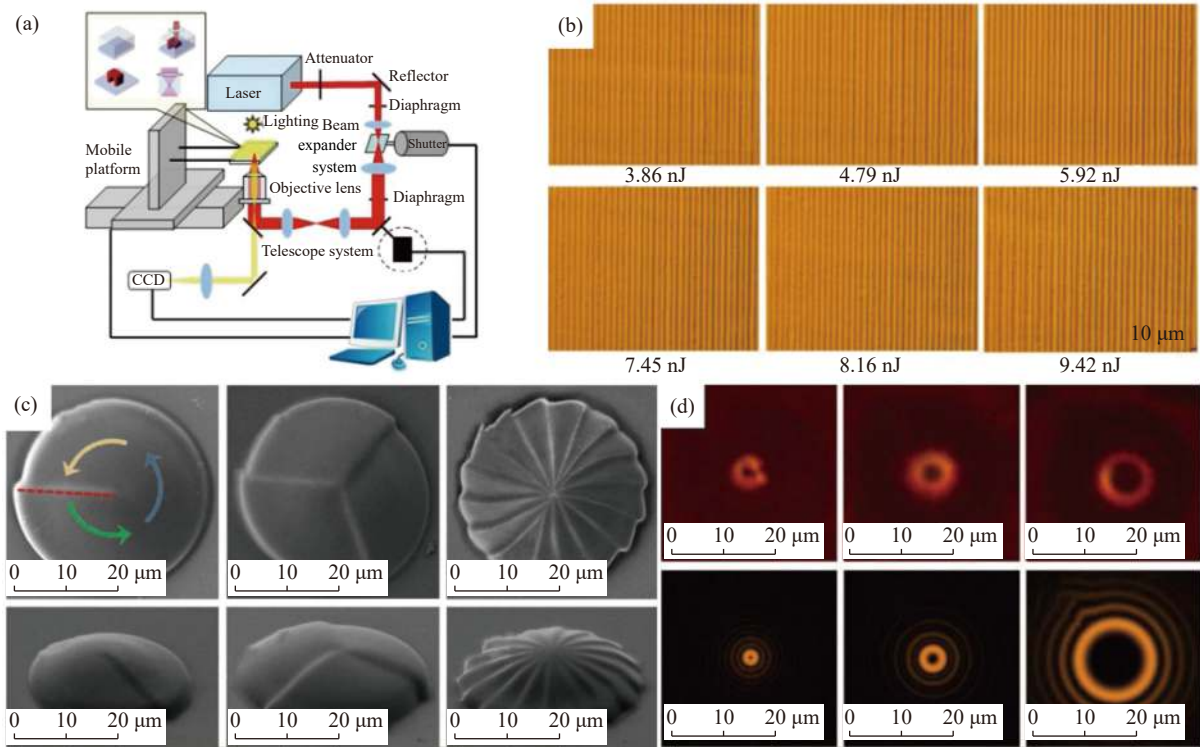


图 4 (a) 飞秒激光直写微纳加工系统示意图^[45]; (b) 不同脉冲能量下获得的 VPG 显微放大图像^[46]; (c) 拓扑电荷数分别为 1、3、16 的 HOVML 的 SEM 图^[47]; (d) 不同拓扑数下 HOVML 的聚焦特性^[47]

Fig.4 (a) Schematic diagram of the femtosecond laser direct writing micro-nano processing system^[45]; (b) VPG microscopic magnification images obtained under different pulse energies^[46]; (c) SEM images of HOVML with topological charge numbers of 1, 3, and 16, respectively^[47]; (d) Focusing properties of HOVML under different topological numbers^[47]

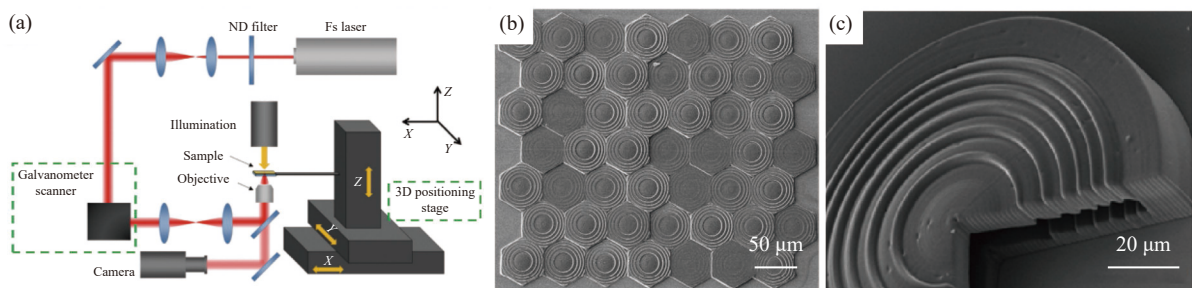


图 5 (a) 带有扫描振镜的飞秒直写系统示意图^[54]; (b) 非涅耳波带板的 SEM 图像^[54]; (c) 多层衍射光学元件的 SEM 图像^[45]

Fig.5 (a) Schematic diagram of femtosecond direct writing system with scanning galvanometer^[54]; (b) SEM image of a Fresnel zone plate^[54]; (c) SEM image of multilayer diffractive optical element^[45]

结构加工。

1.2.2 基于极坐标系的飞秒激光直写系统

上文所述的激光直写系统由于移动平台本身的结构特点,衍射元件的加工效率和加工范围总会受到限制。配合扫描振镜和直线电机的激光直写系统虽然在元件尺寸和加工效率方面有所改善,但系统的结构变得复杂。将极坐标系引入激光直写系统是一种更加灵活的方法,极坐标式飞秒激光直写系统改进了位移平台,集成了直线运动和回转运动,加工范围和加工效率与直角坐标式相比有了极大的改善^[18,55]。

姜俊等^[56]搭建了一种由水平位移台和高速旋转

台组成的极坐标飞秒激光直写系统,如图 6(a)所示。采用中心波长为 800 nm、功率为 13 mW 的飞秒激光,扫描速度控制为 20 mm/s,加工了单层高为 5 μm、宽为 10 μm 的四阶台阶结构,扫描时间约为 10 min,并在曲面透镜上制备了直径为 10 mm、周期为 5 μm 的衍射圆光栅结构,扫描过程约为 45 min,制作的衍射结构和观察的图案如图 6(b)所示。这项工作有效解决了直角坐标式直写系统在加工范围、加工精度以及加工效率三者间的矛盾,可以实现飞秒激光直写技术大尺寸、高精度、高效率地制备三维结构。

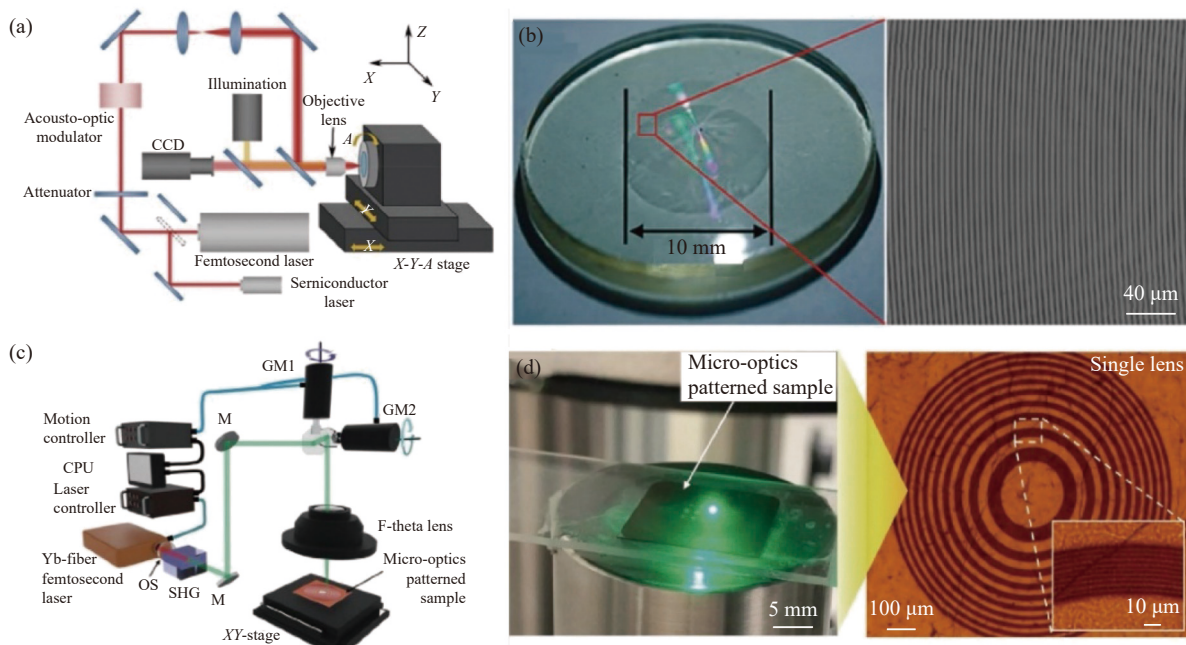


图 6 (a) 极坐标飞秒激光直写系统示意图^[56]; (b) 透镜曲面上圆光栅图像与激光扫描共聚焦显微镜图像^[56]; (c) 衍射微光学元件图案化的系统配置^[57]; (d) 超薄衍射光学阵列的图案化程序^[57]

Fig.6 (a) Schematic diagram of polar femtosecond laser direct writing system^[56]; (b) Image of the circular grating on curved surface of the lens and LSCM image of the circular grating^[56]; (c) System configuration for patterning of diffractive micro-optics^[57]; (d) Patterning procedure for ultra-thin diffractive optics array^[57]

Low 等^[57]提出了一种不同的极坐标飞秒激光直写系统,利用扫描仪路径的改变进行角度的变换扫描,如图 6(c)所示,并研究了直写系统的平均功率、脉冲重复频率和扫描速度三种参数对制备的影响,成功制备了具有更佳光学性能的超薄衍射光学元件,如图 6(d)所示。表明飞秒激光直写系统拥有更高的设计自由度和灵活性,同时该系统还为超薄衍射光学阵

列的简单高效制备提供了一种实用方法,对微光学器件的广泛应用提供了有力支持。Hua 等^[58]借助基于气浮旋转平台的飞秒激光直写系统制备了混合折衍射透镜(HDRL)。结果表明,这种衍射元件具有优异的消球差聚焦和成像性能,此研究为实现飞秒激光直写系统制造 HDRL 提供了新的途径。因此基于极坐标系的飞秒激光直写系统在制备衍射光学元件方面

具有很大的应用空间。

1.3 激光直写技术的多光束并行加工

近年来,随着激光技术的不断发展,其在材料加工领域的应用越来越广泛,上文所述的激光直写技术大多是以单光束形式进行扫描,优点是光束更容易控制。然而大多数激光器特别是飞秒激光器输出的能量过大而不适合直接进行加工,需要经过衰减才能进入光路,因此存在能量利用率低和加工效率差的问题,对此研究者提出了基于激光直写技术的多光束并行加工方法。

Sola 等^[59]采用双光束激光直写技术在聚合物中成功制得了周期性衍射光栅图案,其装置如图 7(a)所示。结果表明,这种双光束并行加工的方法不仅可以制备高衍射效率的光学元件,也使得加工效率与单光束相比提高了两个数量级以上,在柔性材料的高效率

制备方面有着潜在的应用。Poleshchuk 等^[60]通过与干涉光刻法比较,提出利用达曼光栅将写入激光束分为多光束形成光点阵列的新方法,实验使用五光点阵列成功制备了周期为 1.6 μm 的具有规则圆形结构(衍射轴棱锥)的衍射光学元件。根据达曼光栅的结构不同,光点的数量可以从几个到几十个或几百个不等。与干涉图案法相比,这种方法在制备 DOE 时可以按照光点数量成倍地提高加工效率,同时还可以生成更高质量的光束,从而实现 DOE 的高效精细加工。Winfield 等^[61]提出可以采用多点双光子聚合的方法,通过衍射光学元件将激光束转换为由四个等强度光点组成的线性阵列,一次性制备了周期性的透射光栅。结果表明,这种制造方法将单光束分为等强度的多光束,不仅可以提高激光能量的利用率,同时也显示了多点双光子聚合技术在扫描效率上的显著优势。

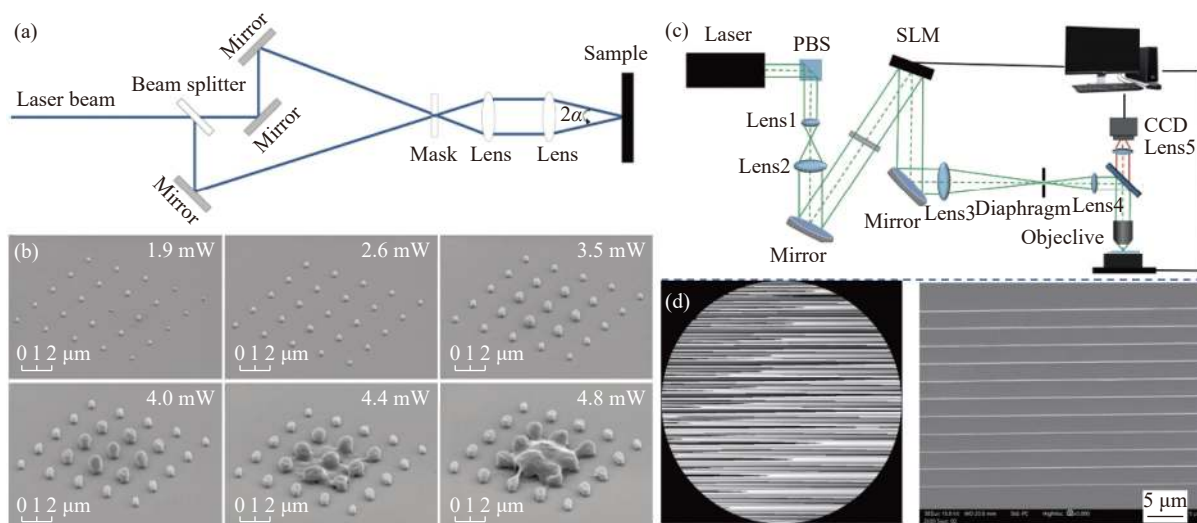


图 7 (a) 双光束激光直写干涉装置示意图^[59]; (b) 不同激光功率下制造的 5×5 光斑 DOE 邻近效应示意图^[62]; (c) 飞秒激光加工系统光路图^[63]; (d) 1×11 光栅阵列的相位全息图和 CCD 观测图^[63]

Fig.7 (a) Schematic diagram of the double-beam laser direct writing interference device^[59]; (b) Schematic diagram of the proximity effect of 5×5 spot DOE fabricated under different laser powers^[62]; (c) Light path diagram of femtosecond laser processing system^[63]; (d) Phase hologram of 1×11 grating array and CCD observation image^[63]

多光束激光直写技术是快速制备光学元件的有利工具,但在写入空间相近的结构时会产生“邻近效应”,最终会影响光学成像质量^[64]。Arnoux 等^[62]研究了多点并行加工制备 DOE 时邻近效应的依赖性,如图 7(b)所示,展示了不同数量的点和间距下的邻近效应结果,研究发现使用更大的写点间距来规避这些邻近效应是可能的,为大规模并行双光子激光直写提供

了新的见解。

空间光调制器 (Spatial Light Modulator, SLM) 是一种可以在外部信号的控制下改变入射光振幅、偏振以及相位的动态元器件^[65],可以把单个焦点调制成强度近乎相同的多焦点,实现并行多点加工,也可以改变光场强度分布实现并行面加工,极大地提升了加工效率和加工精度^[66-67],在制备微结构时更加灵活。闫

高宾^[68]将空间光调制器引入到激光直写系统中,通过逐面积曝光方法,制备了菲涅耳透镜,利用 SLM 制备的衍射光学元件的分辨率可达微米级,证明该系统可以满足微光学结构的加工制作要求。周立强等^[63]利用空间光调制器加载全息图将入射光束调制成多焦点阵列,如图 7(c)所示为结合 SLM 的加工系统光路图,利用此加工系统可以同时制备 11 条纳米级宽度的光栅结构,如图 7(d)所示,结果表明使用 SLM 的直写系统可以有效提高光栅的加工效率和加工精度。使用 SLM 的加工系统其加工效率可根据相位全息图的设计进行控制,这为研究飞秒激光制备大规模光栅的效率问题提供了新的思路。需要注意的是,目前基于空间光调制器的多光束并行加工系统基本使用的是三维位移平台,因此设计加工的光学元件也多为线型光栅结构,导致加工环形对称结构的 DOE 位移平台系统还需进一步的优化,同时还要考虑光路的设计和调节问题,在之后的应用过程中还需要进一步地研究。

2 衍射光学元件的应用

研究衍射光学元件制备方法的目的是尽可能制造出满足尺寸精度要求并具有高衍射率的衍射结构。作为一类光学元件,DOE 的工作原理是依靠基片表面刻有深浅不一的特定连续浮雕结构对光的振幅和相位进行调制,当光束入射到 DOE 时,这些表面结构会将光束进行整形或分束,从而实现各种不同的光学功能。振幅型菲涅耳波带板是首个成像用的衍射光学元件,具有透光和不透光结构,可以实现单色光的聚焦成像,但衍射效率很低,不能应用于成像系统中;相位型菲涅耳波带板采用全透光的设计,在相邻的半周期结构之间引入一定相位差用于提高衍射效率,相比振幅型波带板,成像质量得到很大的改善;二元光学元件具有两级或多级的浮雕结构,根据衍射光学的原理对波前进行变换,产生所需要的波面形状;当位相光栅的位相级数趋于无穷时,衍射微结构由台阶型结构变为连续表面结构,此二元光学元件称为衍射光学元件;由连续面型浮雕结构设计而成的单层衍射光学元件,其在设计波长处的衍射效率理论上能够达到 100%,但是随着波长逐渐偏离设计波长,衍射效率呈现出一个逐渐下降的变化趋势,会影响折衍

射混合光学系统的成像质量;多层衍射光学元件由多个衍射微结构表面组合而成,不仅提高了宽波段范围的衍射效率,而且减轻了整体结构的质量,进而提高了折衍混合光学系统整体的成像质量。衍射光学元件具有质量轻^[69]、结构紧凑^[70]、设计自由度高^[71]以及色散性能独特^[72]等优点,将 DOE 用于光学系统中可以实现色差校正^[73]、光束整形^[74]、光谱优化^[75]和消热差^[76]等多种功能。如今,衍射光学元件已广泛应用于红外成像、技术检测、激光加工、视觉显示以及医疗健康等领域,下面将针对一些典型应用领域的研究进行分类介绍。

2.1 在红外成像领域的应用

现代成像技术的发展使其在军事和民用领域得到重要应用,因此对红外成像系统的光学元件精度和成像质量要求越来越高^[77],而如何优化光学系统结构和提升光学成像质量一直是光学领域的研究重点。衍射光学元件具有独特的负色散特性和负温度特性,有研究指出,DOE 的色散强弱仅与波长有关,与材料的特性无关,同时其与折射元件的色散特性相反,因此采用折衍混合方式设计的光学系统可以很好地消除系统色差^[78];另外,研究发现,DOE 的热差系数仅与材料的膨胀系数有关,与其折射率无关,所以具有更好的热稳定性^[79]。因此这种独特的消色差和消热差性质可以在红外波段的光学系统中得到广泛的应用,由 DOE 组成的红外光学系统不仅能够满足光学成像系统的尺寸要求,同时也能够显著减小质量^[80-82],尤其是在中/长波红外和太赫兹光谱区域,衍射光学元件的表现异常出色^[83]。

利用多层衍射光学元件 (MLDOE) 代替单层衍射光学元件组成的红外双波段混合成像光学系统,具有更佳的衍射效率,可以实现色差校正、简化结构的作用,从而提高探测和识别的能力^[84]。有研究者提出了一种中波红外/长波红外双波段变焦镜头设计方法,由多层衍射光学元件组成的 5 倍混合双波段红外变焦系统不仅可以用于双波段色差校正并简化光学结构,而且在中波红外和长波红外都可以实现高画质^[85]。Zhang 等^[86]将大口径 DOE 作为主透镜,反衍射透镜作为色度补偿器组建了一种舒普曼补偿衍射望远镜,如图 8(a)所示,实现了衍射望远镜系统的色散校正。另外,提出将中继透镜引入光学系统,搭建

了一种紧凑型的衍射望远镜,如图 8(b)所示,通过中继透镜可以更好地汇聚光线,在保证成像质量的同时,缩短了光学系统的长度,而且有效消除了空气湍流效应。Feng 等^[87]研究了温度变化对红外光学系统成像质量的影响,提出在系统中加入双层谐波衍射透

镜的概念。结果表明,谐波衍射元件不仅能满足两个波段成像质量的要求,而且受温度变化影响小,随着温度的不断升高,成像质量仍然保持稳定;也证明了衍射光学元件在红外光学系统的散热和多波段系统的设计方面具有更大的应用空间。

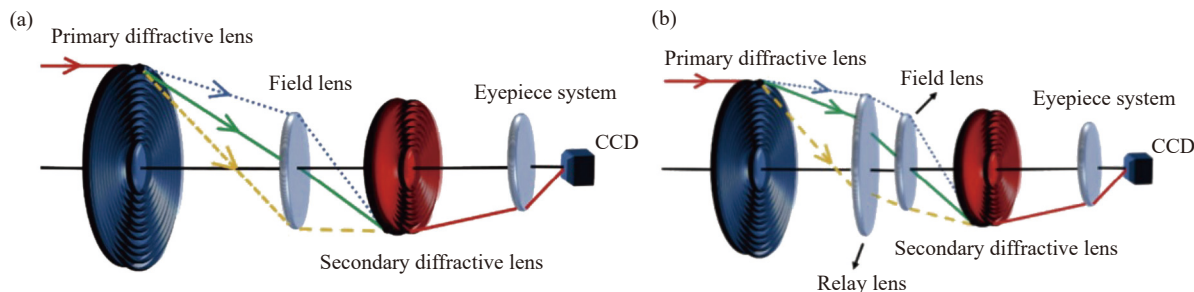


图 8 (a) 舒普曼补偿衍射望远镜系统; (b) 通过插入中继透镜的紧凑型舒普曼衍射望远镜系统^[86]

Fig.8 (a) Schupmann compensation diffractive telescope system; (b) Compact Schupmann diffractive telescope system by inserting a relay lens^[86]

2.2 在技术检测领域的应用

非球面光学元件因具有良好的光学性能而成为光学元件中一个重要分支,其制造条件苛刻,若存在表面缺陷将会降低光束质量或造成元件的损伤,因此表面缺陷检测对工艺的优化改进和元件的质量把控尤为重要^[88]。然而,使用传统方法对非球面光学元件进行高精度测量既复杂困难,且成本高。因此,需要一种曲面高精检测仪器对制备的元件进行简便又精准的测量。衍射光学元件的任意位相分布特性可使其应用到检测设备或者传感器中,实现高精度的检测。由衍射光学元件和 Zygo 干涉仪相搭配的测试系统可用于检测大孔径凸面误差,具有更高的测量精度和更低的非球面测试成本^[89]。基于衍射光学元件的光泽度测量计可通过扫描物体表面并在扫描区域收集图像数据来获得光泽度信息,并进行分析,以稳定的测量系统和较低的成本就可以完成高精度测量复杂表面结构的工作^[90]。另外,由衍射光学元件组成的检测仪器也可以用于测量温度数据。有研究提出基于体积相位全息光学元件的数字全息干涉仪,可以测量微宏观火焰中的温度变化和温度不稳定性,具有高衍射效率的体相位全息光栅可以去除杂散光和提高干涉条纹的对比度,获得更高质量的温度场干涉图^[91]。

2.3 在激光加工领域的应用

随着激光技术的不断发展,激光在材料加工领域也得到了更多人的关注,然而常用的激光束多为高斯分布光束,其中心峰值强度明显高于四周光强,这在实际加工过程中会造成能量的浪费,而且不利于用高斯光束加工质量要求高的边界结构。在激光加工中,技术人员希望使用强度分布均匀的或者具有特定形状的激光束对材料进行加工,因此需要光束整形技术重新分配光束辐照度和相位来获得想要的高质量光束^[92-93]。随着光束整形元件的制作工艺愈加成熟,整形技术也得到快速发展^[94]。Račiukaitis 等^[95]利用衍射光学元件将圆形高斯光束整形为方形平顶光束后应用于激光微加工。实验使用的 DOE 将大约 95% 的激光能量以近乎完美的矩形形状耦合在主光束中,整形后的激光束可直接烧蚀玻璃基板上的金属薄膜、或在硅片上钻孔和划线。如图 9 所示,这种新的 DOE 光束整形器件 (Fundamental Beam-mode Shaping, FBS) 使激光束生成均匀的辐照度继而在焦平面中整形为矩形平顶强度分布的光束,在进行划线时可提供几乎平滑的划线边缘,在激光材料加工中显示出明显的优势。

Hilton 等^[96]将衍射光学元件加入到激光切割系统,有效解决了激光束切割材料时存在的过切问题,

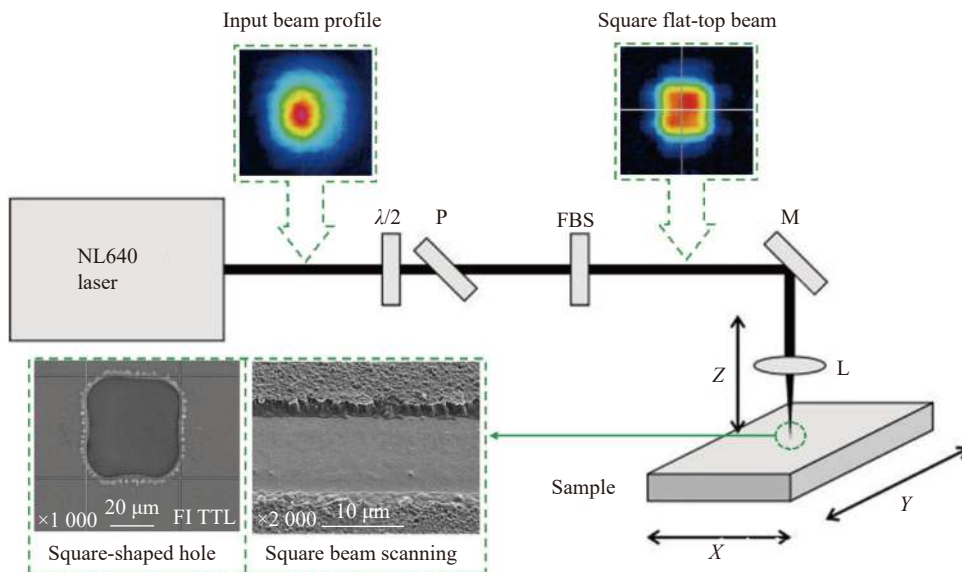


图 9 使用 FBS 型衍射光学元件整形单脉冲激光在玻璃基片上烧蚀方形孔和光束扫描示意图^[95]

Fig.9 Schematic diagram of ablating square holes and beam scanning on a glass substrate using FBS type diffractive optics to shape a single pulse laser^[95]

使激光束既获得了长焦距镜头的切割性能,还具有短焦距镜头的光束发散角,适用于厚材料的切割加工。Kang 等^[97]研制了一种新型激光焊接系统,利用衍射光学元件调制激光束的空间强度分布,以探究调制后的激光束在焊接铝合金时的焊接特性。结果表明,调制后的激光束使能量分散而更有效地形成稳定熔池,减少了焊接缺陷;同时,由于激光能量分散使得温度分布更加均匀,这也有助于提升焊缝质量。衍射光学元件通过改变激光束的复振幅分布完成对激光束的整形,实现聚焦光束的长焦深、小焦斑等特殊功能^[98],使激光可以更加灵活高效地进行刻线、打孔、焊接和切割工作,也拓展了激光在材料加工领域中的应用。

2.4 在图像显示方面的应用

头戴显示器 (HMD) 是一种显示虚拟信息的近眼显示器,需要在满足系统结构紧凑、质量轻的基础上实现高分辨率成像,已广泛应用于科研、军事、医疗、生活娱乐等领域。近几年,头戴显示器正朝着小型化、轻量化、全彩色和大视场角的方向发展,因此对系统结构尺寸和质量、显示分辨率和亮度等提出了更高的要求^[99]。衍射光学元件具有轻型化和集成化的特点,同时提供一些传统折射光学器件难以实现的独特功能,能够在头戴式显示器领域发挥关键作用。以折衍射混合透镜代替传统显示系统中的双胶合透镜,

利用 DOE 的负色散和任意位相分布特性消除系统的色差并改善波前像差,使头戴显示器实现更高的成像分辨率^[100]。

Mi 等^[101]提出了一种基于视网膜扫描的增强现实型近眼显示器,该显示器由激光扫描投影仪和衍射光学元件等组成,代替了原来的透镜系统,使设备结构更加紧凑,并且显示图像不受眼睛屈光度和瞳孔大小变化的影响,使增强现实的透视效果更好。Hua 等^[102]研发的一种由菲涅耳型衍射光学元件 (FDOE) 阵列组成的全息 3D 显示器,其 FDOE 呈非周期性排列,用于重新分配发散光线并塑造垂直扩展视图。这种结构具有更大的扩展视场,便于重建收敛视图和虚拟 3D 场景,有效解决了垂直方向上的有限视角和低衍射效率问题,在移动电子产品和头戴式 3D 显示器等设备上具有一定的潜在应用。谢豪等^[103]提出了一种由闪耀光栅及体全息光栅直接耦合组成的新型输入耦合光栅结构。将这种新型结构作为头戴显示器的输入耦合光栅可以有效提高系统的能量利用率,同时该结构具有更大的角带宽以及视场角,在波导显示领域具有一定的应用价值。采用 DOE 设计的目视光学显示系统取代了原有的透镜,减少了镜片的数量,简化了系统结构,减轻了系统的质量,也缩小了系统的成本。

3 结束语

3.1 存在的问题

在光学领域中,随着微光学加工技术及微电子技术的逐步升级,现代光学设计理论也同步前进,不断推动着衍射光学理论的发展及应用。激光直写技术作为一种高精度、可编程、周期短和灵活性高的加工方式,在制备衍射光学元件时具有其他加工方法不可比拟的优势,然而在实际的加工过程中仍存在如下一些问题。

(1) 普通激光直写技术可选择的加工材料有限,并且加工过程中有较大的热影响区,所制备出的衍射光学元件与超快激光相比加工精度较低,衍射效率往往只能达到最低要求。

(2) 飞秒激光直写技术可以进行突破衍射极限的高分辨率加工,然而整个加工系统对飞秒激光的能量利用率不足,造成了激光能量的浪费,同时飞秒激光器价格昂贵,使得成本上升,因此限制了其实际的使用。

(3) 目前的激光直写系统基本采用逐点逐线加工,在平面基板制备衍射光学结构时较为容易,元件的尺寸和结构基本满足要求,但是在曲面基板上制备衍射光学结构时需要额外的对准系统,加工系统更加复杂,而且在实际加工过程中对准的技术难度较大,加工耗时长,所以需要优化和改进制作工艺。

(4) 逐点逐线加工方式都有待进一步提升加工效率和提高能量利用率,利用多光束的并行加工技术是一种有效方法,结合光学元件或者空间光调制器进行激光分束的直写技术有望实现高效率的加工制备,但是与之对应的加工系统还需要进一步研究。

3.2 未来发展趋势

随着科学技术与现代光学的发展,光学元件的设计和制造将向超精细和效率的趋势发展,而衍射光学元件因其诸多独特优势会在未来的多个领域势必得到更进一步的应用。因此,研究衍射光学元件的制备方法将是微光学领域持续不断的重要课题。

(1) 新材料:目前常用的材料基板为熔融石英或者有机玻璃,在加工材料的选择上应该不断的丰富,例如蓝宝石、树脂塑料等。此外,光刻胶的性能对衍射光学元件的制备有着的重要影响,需要拓展光刻胶的种类,以适应不同结构的衍射光学元件的制备。

(2) 新设备:针对激光直写制备衍射光学元件对焦困难的问题,可以研发新型加工系统,将激光器、光路和对焦模块集成于一体,或者研发新一代可灵活调节的对焦设备。另外,研发新一代“高效低功率”激光器和五轴联动气浮位移平台,可以提高激光的能量利用率和加工效率,扩大行业应用规模。

(3) 新工艺:多场协同作用的复合加工具有独特的优势,可针对不同的加工需求灵活调控加工方式;配合五轴平台开发逐面加工或者复合加工的新工艺,可有效解决激光直写逐点逐线加工效率慢的问题。对于影响衍射光学元件性能的关键因素也需要进一步研究,从而进一步改善加工工艺。

(4) 新应用:多层衍射光学元件应用于可见波段宽光谱成像系统的前景十分广阔,其光学特性接近完美,现如今混合光学受到的重视程度越来越大,混合折衍射光学系统在工业、民用与国防领域的应用将不断得到扩展。衍射光学元件可以根据其结构的不同来实现各种功能,因此人们通过设计特定结构实现其他功能的衍射光学元件,寻求更多的应用方向。

随着技术的不断进步和应用需求的不断扩大,以飞秒激光为主的超快激光加工系统与更多技术相结合以满足不同的应用领域,将是未来研究者们探索的方向之一,笔者相信激光加工技术在制备微纳米结构方面会有更大的发展空间。

参考文献:

- [1] Wood R W. Physical Optics [M]. 3rd ed. New York: Macmillan Co, 1934.
- [2] Swanson G J, Veldkamp W B. Binary lenses for use at 10.6 micrometers [J]. *Optical Engineering*, 1985, 24(5): 791-795.
- [3] Swanson G J, Veldkamp W B. Diffractive optical elements for use in infrared systems [J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(6): 605-608.
- [4] Xie C Q. Research progress on complete fabrication technology of diffractive optical elements [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(15): 1815-1827. (in Chinese)
- [5] Shang Y Q, Qi H, Ma Y L, et al. Study on sapphire microstructure processing technology based on wet etching [J]. *International Journal of Modern Physics B*, 2017, 31(7): 1741004.
- [6] Liu X Q, Bai B F, Chen Q D, et al. Etching-assisted femto-

- second laser modification of hard materials [J]. *Opto-Electronic Advances*, 2019, 2(9): 09190021.
- [7] Chen J L, Lu X Z, Wen Q L, et al. Review on laser-induced etching processing technology for transparent hard and brittle materials [J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 117(9-10): 2545-2564.
- [8] Suleski T J, Oshea D C. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(32): 7507-7517.
- [9] Pawlowski E. Thin film deposition: an alternative technique for the fabrication of binary optics with high efficiency[C]//4th International Conference on Holographic Systems, Components and Applications, 1993: 54-59.
- [10] Karlsson M, Nikolajeff F. Fabrication and evaluation of a diamond diffractive fan-out element for high power lasers [J]. *Optics Express*, 2003, 11(3): 191-198.
- [11] Blough C G, Rossi M, Mack S K, et al. Single-point diamond turning and replication of visible and near-infrared diffractive optical elements [J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4648-4654.
- [12] Davies M A, Evans C J, Vohra R R, et al. Application of precision diamond machining to the manufacture of microphotronics components[C]//Lithographic and micromachining techniques for optical component fabrication II, 2003: 94-108.
- [13] Jin G F, Yan Y B, X W M. Binary Optics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998. (in Chinese)
- [14] Li Y X. New method for mass replication of diffractive optical elements [J]. *Yanguang Technology*, 2004, 36(2): 33-37. (in Chinese)
- [15] Tsai K M. Effect of injection molding process parameters on optical properties of lenses [J]. *Applied Optics*, 2010, 49(31): 6149-6159.
- [16] Jia X S, Chen Y Q, Liu L, et al. Combined pulse laser: Reliable tool for high-quality, high-efficiency material processing [J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 153: 108209.
- [17] Qiao W, Pu D, Chen L S. Nanofabrication toward high-resolution and large area[C]//2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2021: 42-46.
- [18] Ai J. Study on key technologies of high-efficiency laser direct writing lithography on curved surfaces [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2018. (in Chinese)
- [19] Gale M T, Rossi M, Schütz H, et al. Continuous-relief diffractive optical elements for two-dimensional array generation [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(14): 2526-2533.
- [20] Gale M T, Rossi M, Pedersen J, et al. Fabrication of continuous-relief micro-optical elements by direct laser writing in photoresists [J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3556-3566.
- [21] Hou D S, Du C L, Qiu C K, et al. Model ISI-2802 laser direct write system and its applications [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1997(S1): 26-30. (in Chinese)
- [22] Wang M R, Su H. Laser direct-write gray-level mask and one-step etching for diffractive microlens fabrication [J]. *Applied Optics*, 1998, 37(32): 7568-7576.
- [23] Salgueiro J R, Roman J F, Cuevas V M. System for laser writing to lithograph masks for integrated optics [J]. *Optical Engineering*, 1998, 37(4): 1115-1123.
- [24] Smuk A Y, Lawandy N M. Direct laser writing of diffractive optics in glass [J]. *Optics Letters*, 1997, 22(13): 1030-1032.
- [25] Burge J H, Anderson D S, Milster T D, et al. Measurement of a convex secondary mirror using a holographic test plate [J]. *Advanced Technology Optical Telescopes V*, 1994: 193-198.
- [26] Burge J H, Fehniger M J, Cole G C. Demonstration of accuracy and flexibility of using CGH test plates for measuring aspheric surfaces[C]//Optical Manufacturing and Testing II, 1997: 379-389.
- [27] Swa B, Mzza C, Mbla B, et al. Progresses on new generation laser direct writing technique [J]. *Materials Today Nano*, 2021, 16: 100142.
- [28] Stoian R, Colombier J P. Advances in ultrafast laser structuring of materials at the nanoscale [J]. *Nanophotonics*, 2020, 9(16): 4665-4688.
- [29] Xu S J, Duan Y Z, Yu Y H, et al. Machine vision-based high-precision and robust focus detection for femtosecond laser machining [J]. *Optics Express*, 2021, 29(19): 30952-30960.
- [30] Du J L, Li F X, Peng F P, et al. Large-range and high-precision autofocus method based on an annular DOE for a laser direct writing system [J]. *Optics Express*, 2022, 30(5): 6981-6990.
- [31] Zhu F, Zhou C, Ma J. Calibration and pre-compensation of direct laser writing system[C]//Holography, Diffractive Optics, and Applications V, SPIE, 2012, 8556: 193-199.
- [32] Häfner M, Reichle R, Pruss C, et al. Laser direct writing of diffractive structures on curved surfaces[C]//DGO Proceedings, 2012.
- [33] Ai J, Du Q, Qin Z, et al. Laser direct-writing lithography equipment system for rapid and μm -precision fabrication on curved surfaces with large sag heights [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20965-20974.
- [34] Wu Z L, Qi Y N, Yin X J, et al. Polymer-based device fabrication and applications using direct laser writing technology [J]. *Polymers*, 2019, 11(3): 553.

- [35] Jwad T, Deng S, Butt H, et al. Fabrication of TiO₂ thin film based fresnel zone plates by nanosecond laser direct writing [J]. *Journal of Micro and Nano-Manufacturing*, 2017, 6(1): 011001.
- [36] Li Fengyou. Study on technology laser direct writing[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2002. (in Chinese)
- [37] Lee K S, Ran H K, Yang D Y, et al. Advances in 3D nano/microfabrication using two-photon initiated polymerization [J]. *Progress in Polymer Science*, 2008, 33(6): 631-681.
- [38] Liu Y Q, Sun H B. Progress and application of nonlinear laser manufacturing (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(1): 20220005. (in Chinese)
- [39] Wang X, Yu H, Li P, et al. Femtosecond laser-based processing methods and their applications in optical device manufacturing: A review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2021, 135(3): 106687.
- [40] Gao S, Wang Z H, Hua J G, et al. Sub-diffraction-limit fabrication of sapphire by femtosecond laser direct writing [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(14): 147901. (in Chinese)
- [41] Liu P Y, Liu Z X, Cao Y Y, et al. Microfiber long-period grating based on two-photon polymerization technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2306006. (in Chinese)
- [42] 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. (in Chinese)
- [43] Liao C R, Li B Z, Zou M Q, et al. Optical fiber integrated micro/nano-structured device fabricated by femtosecond laser induced two-photon polymerization and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(13): 1306005. (in Chinese)
- [44] Su Y H, Qin T T, Xu B, et al. Patterned microlens processed using two-photon polymerization of femtosecond laser and its imaging test [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2629-2635. (in Chinese)
- [45] Jiang T. The fabrication and performance characterization of micro-optical components based on femtosecond laser direct writing[D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese)
- [46] Ma W, Zhang P, Zhou W, et al. Femtosecond-laser direct-writing volume phase gratings inside Ge-As-S chalcogenide glass [J]. *Ceramics International*, 2020, 46(11): 17599-17605.
- [47] Tian Z N, Cao X W, Yao W G, et al. Hybrid refractive-diffractive optical vortex microlens [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(21): 2299-2302.
- [48] Liu X Q, Cheng R, Zheng J X, et al. Wear-resistant blazed gratings fabricated by etching-assisted femtosecond laser lithography [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, 39(14): 4690-4694.
- [49] Mizoshiri M, Arakane S, Sakurai J, et al. Direct writing of Cu-based micro-temperature detectors using femtosecond laser reduction of CuO nanoparticles [J]. *Applied Physics Express*, 2016, 9(3): 036701.
- [50] Zhang H, Tang M, McCoy J, et al. Deposition of tungsten nanogratings induced by a single femtosecond laser beam [J]. *Optics Express*, 2007, 15(10): 5937-5947.
- [51] Jiang J. Study of diffraction optical element fabricated by polar coordinate femtosecond laser direct writing on curved surface[D]. Changchun: Jilin University, 2017. (in Chinese)
- [52] Wang H, Liu S, Zhang Y L, et al. Controllable assembly of silver nanoparticles induced by femtosecond laser direct writing [J]. *Science and Technology of Advanced Materials*, 2015, 16(2): 024805.
- [53] Ma Y C, Wang L, Guan K M, et al. Silicon-based suspended structure fabricated by femtosecond laser direct writing and wet etching [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 28(15): 1605-1608.
- [54] Yu Y H, Tian Z N, Jiang T, et al. Fabrication of large-scale multilevel phase-type Fresnel zone plate arrays by femtosecond laser direct writing [J]. *Optics Communications*, 2016, 362: 69-72.
- [55] Xu B, Wei G J, Chen L S. Research advances in technology of laser direct writing [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2004, 17(6): 1-5. (in Chinese)
- [56] Jiang J, Liu J Q, Xu Y, et al. Laser direct writing technique of diffraction optical element on curved-surface substrate [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(6): 0602002. (in Chinese)
- [57] Low M J, Lee H, Lim C H J, et al. Laser-induced reduced-graphene-oxide micro-optics patterned by femtosecond laser direct writing [J]. *Applied Surface Science*, 2020, 526: 146647.
- [58] Hua J G, Hu Z Y, Xu S J, et al. Centimeter-sized aplanatic hybrid diffractive-refractive lens [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, 31(1): 3-6.
- [59] Sola D, Alamri S, Lasagni A, et al. Fabrication and characterization of diffraction gratings in ophthalmic polymers by using UV direct laser interference patterning [J]. *Applied Surface Science*, 2019, 476: 128-135.
- [60] Poleshchuk A, Sametov R, Sedukhin A. Multibeam laser writing of diffractive optical elements [J]. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2012, 48(4): 327-333.
- [61] Winfield R, Bhuian B, O'Brien S, et al. Fabrication of grating structures by simultaneous multi-spot fs laser writing [J].

- Applied Surface Science*, 2007, 253(19): 8086-8090.
- [62] Arnoux C, Pérez-Covarrubias L A, Khaldi A, et al. Understanding and overcoming proximity effects in multi-spot two-photon direct laser writing [J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 49: 102491.
- [63] Zhou L Q, Zhu L W, Shi Q. Grating parallel fabrication based on the multifocal spots [J]. *Journal of Ludong University (Natural Science Edition)*, 2021, 37(4): 320-325. (in Chinese)
- [64] Du J L, Shi R Y, Cui Z, et al. Proximity effects during mask fabrication [J]. *Micronanoelectronic Technology*, 2002(11): 36-40. (in Chinese)
- [65] Liu S Y, Zhang J Y. Principles and applications of ultrafast laser processing based on spatial light modulators [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(11): 111431. (in Chinese)
- [66] 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(1): 1-9.
- [67] Yang D, Liu L, Gong Q, et al. Rapid two-photon polymerization of an arbitrary 3D microstructure with 3D focal field engineering [J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2019, 40(8): 1900041.
- [68] Yan G B. The development of multifunction digital holographic laser interference direct writing system[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2015. (in Chinese)
- [69] Zhou K, Li D J, Wang Y F, et al. Target detection performance of infrared spectrum with diffractive optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(8): 20200371. (in Chinese)
- [70] Huang H, Zhai T, Song Q, et al. Wide angle 2D beam splitter design based on vector diffraction theory [J]. *Optics Communications*, 2019, 434: 28-35.
- [71] Lin Y. Design of diffractive optical elements for laser beam shaping[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [72] Yang H T, Yang X F, Mei C, et al. Design of hybrid refractive-diffractive infrared dual-band zoom optical system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(10): 20200036. (in Chinese)
- [73] Zhu J Y, Xie Y J. Large aperture lidar receiver optical system based on diffractive primary lens [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0518001. (in Chinese)
- [74] Qu W D, Gu H R, Tan Q F, et al. Precise design of two-dimensional diffractive optical elements for beam shaping [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(21): 6521-6525.
- [75] Zhang W. Design and applications of large aperture diffractive optical elements in "Shen Guang" device[D]. Hefei: University of Science & Technology of China, 2007. (in Chinese)
- [76] Zhang F Q, Fan X, Zhu B, et al. Athermal design of long-wave infrared optical system with hybrid refractive/diffractive [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(4): 1158-1163. (in Chinese)
- [77] Liu R Q, Chen X M, Zhao J Q. Applied research of diffractive optical elements in IR imaging systems [J]. *Infrared Technology*, 2009, 31(6): 327-330. (in Chinese)
- [78] Cheng X M. The design fabrication and testing of diffractive element in the infrared optical lens[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electrics, Chinese Academy of Sciences, 2015. (in Chinese)
- [79] Ma T. Design theory of multilayer diffractive optical element and its application in hybrid optical system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [80] Swanson G J, Veldkamp W B. Infrared applications of diffractive optical elements[C]//Holographic optics: Design and Applications, 1988: 155-162.
- [81] Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats [J]. *Applied Optics*, 1988, 27(14): 2960-2971.
- [82] Buralli D A, Morris G M, Rogers J R. Optical performance of holographic kinoforms [J]. *Applied Optics*, 1989, 28(5): 976-983.
- [83] Soskind Y. Diffractive optics technologies in infrared systems[C]//Infrared Technology and Applications XLI, 2015: 465-472.
- [84] Zhao X, Guo Y, Zhang P, et al. Design of infrared dual-band optical system with double-layer diffraction optical element [J]. *Electronics Optics & Control*, 2017, 24(10): 85-89. (in Chinese)
- [85] Zhang B, Cui Q F, Piao M X, et al. Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements [J]. *Applied Optics*, 2019, 58(8): 2058-2067.
- [86] Zhang H, Liu H, Xu W B, et al. Large aperture diffractive optical telescope: A review [J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 130: 106356.
- [87] Feng B, Yang M. Athermalization design for infrared dual-band double-layer harmonic diffractive optical system [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2021, 227: 166097.
- [88] Li M Z, Hou X, Zhao W C, et al. Current situation and development trend of aspheric optical surface defect detection technology (invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(9): 20220457. (in Chinese)
- [89] Liu H, Lu Z, Li F. Using diffractive optical element and Zygo interferometer to test large-aperture convex surface [J]. *Optics*

- & *Laser Technology*, 2005, 37(8): 642-646.
- [90] Myller K, Juuti M, Peiponen K-E, et al. Quality inspection of metal surfaces by diffractive optical element-based glossmeter [J]. *Precision Engineering*, 2006, 30(4): 443-447.
- [91] Rastogi V, Agarwal S, Kumar V, et al. Holographic optical element based digital holographic interferometer for the study of macro flames, micro flames and their temperature instability [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 122: 29-36.
- [92] Shealy D L, Hoffnagle J A. Laser beam shaping profiles and propagation [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(21): 5118-5131.
- [93] Shealy D L. Historical perspective of laser beam shaping[C]// *Laser Beam Shaping III*, 2002: 28-47.
- [94] Lin Y, Hu J S. Laser beam shaping techniques [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(6): 1-4. (in Chinese)
- [95] Račiukaitis G, Stankevičius E, Gečys P, et al. Laser processing by using diffractive optical laser beam shaping technique [J]. *Journal of Laser Micro/Nanoengineering*, 2011, 6(1): 37-43.
- [96] Hilton P A, Lloyd D, Tyrer J R. Use of a diffractive optic for high power laser cutting [J]. *Journal of Laser Applications*, 2016, 28(1): 012014.
- [97] Kang S, Shin J. Laser beam oscillation welding of aluminum alloy using the spatially modulated beam by diffractive optical element (DOE) [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 66: 387-396.
- [98] Katz S, Kaplan N, Grossinger I. Using diffractive optical elements: DOEs for beam shaping –fundamentals and applications [J]. *Optik & Photonik*, 2018, 13(4): 83-86.
- [99] Yang X J, Wang Z Q, Fu R L. Hybrid diffractive-refractive 67-diagonal field of view optical see-through head-mounted display [J]. *Optik*, 2005, 116(7): 351-355.
- [100] Yang L L. Studies on diffraction efficiency of multilayer diffractive optical elements[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)
- [101] Mi L, Chen C P, Lu Y, et al. Design of lensless retinal scanning display with diffractive optical element [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 20493-20507.
- [102] Hua J, Yi D, Qiao W, et al. Multiview holographic 3D display based on blazed fresnel DOE [J]. *Optics Communications*, 2020, 472: 125829.
- [103] Xie H, Huo F R, Xue C X. Optimal design and analysis of a new coupled grating structure for head-mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1405001. (in Chinese)

Research and application of diffractive optical element fabricated by laser direct writing

Liang Guanglei^{1,2}, Sun Shufeng^{1,2*}, Wang Jin^{1,2}, Jiang Mingming^{1,2}, Zhang Fengyun^{1,2},
Wang Xi^{1,2}, Shao Jing^{1,2}, Qu Zhihao^{1,2}, Wang Pingping^{1,2,3}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

2. Shandong Research Center of Laser Green Efficient Intelligent Manufacturing Engineering and Technology, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China;

3. Qingdao Huanghai University, Qingdao 266427, China)

Abstract:

Significance Micro-optics theory is a new discipline for the study of the design and manufacturing of micron-sized and nano-sized optical components, as well as the use of such components to achieve the theory and technology development of light waves. As a research field of optics, diffractive optics is based on the diffraction principle of light waves developed microoptics. Diffractive optical technology is of great significance in realizing lightweight, miniaturization, integration, high efficiency and low cost of optoelectronic systems, and the development of diffractive optical technology has also become one of the important ways to develop modern optical systems. As a typical micro-optical element, diffractive optical elements have broad application prospects in industrial and civil fields such as optical imaging, laser technology, and biomedicine due to their small size, light weight, multiple degrees of design freedom and good imaging quality. The processing methods of optical element can be summarized into two types of mechanical processing and optical processing, both of which have

their own advantages and disadvantages. The advent of laser provides a new idea for the preparation of diffractive optical elements. Laser processing is a non-contact wear-free technology with high precision and high flexibility, which can process complex contours and has the characteristic of environmental friendliness and simple production process, so the study of laser processing technology in the application of diffractive optical elements is of great significance.

Progress With the continuous development of modern optical systems, higher requirements are put forward for the processing efficiency and preparation accuracy of diffractive optical elements. Laser direct writing technology does not need mask plate in the process of preparing diffractive optical elements, simplifies the steps, shortens the production cycle (Fig.1(a)). There are many factors affecting the preparation quality of diffractive optical elements, the article summarizes the main factors affecting the surface quality of diffractive optical elements (Fig.1(b)), and explains the influence of focusing system (Fig.2), laser energy (Fig.3) and scanning speed on the preparation of diffractive optical elements, which is very important for improving the preparation accuracy and surface quality of optical components. Different types of laser direct writing systems should also be considered in the preparation of diffractive optical element with different structures (Tab.1). From the aspects of process and system, the research progress of femtosecond laser direct writing system based on Cartesian coordinate system and polar coordinate system in processing diffractive optical element is discussed (Fig.4, Fig.6). Besides, in order to solve the problems of low energy utilization and poor processing efficiency in the process of laser preparation of diffractive optical element, a multi-beam parallel processing method based on laser direct writing technology is proposed (Fig.7). Diffractive optical elements have a variety of functions in optical systems due to their unique characteristics, and the article summarizes the typical applications of diffractive optical elements, such as infrared imaging (Fig.8), chromatic aberration correction, beam shaping, laser processing (Fig.9), image display, etc.

Conclusions and Prospects In the field of optics, the development of micro-optics theory technology continues to promote the advancement of diffractive optics theory. The application of diffractive optical element has also been expanded in more fields. As a high-precision, programmable, short cycle and flexible processing method, laser direct writing technology has incomparable advantages in the preparation of diffractive optical element. But in the actual processing process, there are problems of limited processing materials, insufficient utilization of laser energy, and the complexity of the system caused by the alignment mechanism in the preparation of curved element, so the research on expanding materials, simplifying equipment, optimizing processes and seeking applications is a continuous and important topic.

Key words: laser direct writing technology; diffractive optical elements; comparison of direct writing systems; micro-nano fabrication; application of optical components

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (51775289); Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2018ZB0524); Key Research and Development Project of Shandong Province (2019GGX104097, 2019JZZY010402); Discipline Innovation and Intelligence Introduction Program for Colleges and Universities (D21017); Qingdao West Coast New Area 2020 Science and Technology Source Innovation Special Project (2020-103)