

# 基于空间光调制器的超快激光加工原理及应用

刘思垣<sup>1,2</sup>, 张静宇<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430074;

<sup>2</sup>华中科技大学信息存储系统教育部重点实验室, 湖北 武汉 430074

**摘要** 近年来,空间光调制器被广泛应用到超快激光加工像差校正、多焦点平行加工、二维面加工、三维体加工、脉冲时空整形、结构光加工等不同领域。对空间光调制器的原理进行了介绍,阐述了空间光调制器的全息图生成算法,并着重介绍了空间光调制器在超快激光加工领域中的应用。

**关键词** 激光光学; 超快激光加工; 空间光调制器; 全息图

中图分类号 O437 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.111431

## Principles and Applications of Ultrafast Laser Processing Based on Spatial Light Modulators

Liu Siyuan<sup>1,2</sup>, Zhang Jingyu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Information Storage System, Ministry of Education, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

**Abstract** In recent years, spatial light modulators have been widely applied to aberration compensation in ultrafast laser processing, multi-focus parallel machining, two-dimensional surface machining, three-dimensional bulk machining, pulse temporal and spatial shaping, and structured light machining. Here the working principle of spatial light modulators is introduced. Hologram generation algorithms of spatial light modulators are explained. The applications of spatial light modulators to the ultrafast laser processing field are elaborated.

**Key words** laser optics; ultrafast laser processing; spatial light modulator; hologram

**OCIS codes** 140.7090; 070.6120; 140.3390; 090.1760

## 1 引言

超快激光加工技术作为一种冷加工方式,其超短的脉冲宽度降低了热效应对加工区域的影响,大幅提升了加工质量;超快激光加工技术也是一种超强加工方式,激光聚焦后极高的峰值功率引起非线性光学现象,几乎能够在任意材料上实现加工;超快激光加工还是一种超精加工方式,利用高数值孔径物镜聚焦,利用多光子吸收效应可在亚微米尺度的焦点区域进行材料改性。因为这些特性,超快激光加工技术被广泛应用到激光切割<sup>[1]</sup>、激光焊接<sup>[2]</sup>、

3D 打印<sup>[3]</sup>、激光手术<sup>[4]</sup>、超表面结构制造<sup>[5]</sup>、微流体<sup>[6]</sup>、光存储<sup>[7]</sup>、材料表面改性<sup>[8]</sup>、量子点<sup>[9]</sup>等领域。

尽管拥有这些优势,单焦点的超快激光直写加工技术仍存在加工区域小、效率低的问题,并不适用于材料的大面积加工、体加工、结构一次成型加工、矢量光加工等应用场景。虽然引入扫描振镜系统可以满足部分应用场景,但当要实现高精度加工时,振镜的光学扫描范围受限于高数值孔径物镜较短的工作距离,使得超快激光加工陷入一个大幅面和高精度加工二选一的两难局面。空间光调制器的出现使得上述问题很大程度上得以解决,空间光调制器可

收稿日期: 2020-03-02; 修回日期: 2020-03-30; 录用日期: 2020-04-01

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体项目(61821003)、国家自然科学基金重点基金项目(61432007)

\* E-mail: jy\_z@hust.edu.cn

以对超快激光光束的振幅、相位或者偏振等光学参数进行调控,配合一定光路设计即可以在材料加工区域得到任意的光场强度分布。例如,运用空间光调制器及全息图技术的优势包括:1)可以把单个焦点调制成强度近乎相同的多焦点进行并行加工,千倍提升加工效率<sup>[10]</sup>;2)可以改变聚焦体积内的光场强度分布,实现并行面加工、体加工、一次成型加工,极大地提升了加工精度、缩短了加工时间<sup>[11-12]</sup>;3)可以生成不同的结构光场,实现并行加工的同时引入基于矢量光的材料改性<sup>[13]</sup>。本篇综述先对空间光调制器的原理进行概述,对各种全息图生成算法进行介绍,最后对空间光调制器在超快激光二维和三维加工中的部分应用进行了介绍,希望这些内容能对相关领域的研究者有所帮助。

## 2 空间光调制器

空间光调制器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,有着易操控、易集成、低损耗、刷新频率高的特点。在超快激光并行加工应用中,常见的空间光调制器有调整振幅的数字微镜器件(DMD)以及调制相位的液晶空间光调制器(LC-SLM)。本节将对这两种器件的原理进行介绍。

### 2.1 数字微镜器件

DMD是一种被广泛使用的对入射光的振幅进行调制的空间光调制器<sup>[14-15]</sup>,其每个像素都是一个可以独立控制的微反射镜,可处于开、关、静态三个状态,通过切换每个微反射镜的方向可以单像素控制出射光的角度。如图1(a)所示,每个像素的微反射镜偏转至不同方向,将入射光反射至不同方向(一个方向反射至后续光路,对应于“开”的状态;另一个方向将光反射到吸收平面,对应于“关”的状态),从而实现对输出光振幅的调制<sup>[15]</sup>。DMD具有切换速度快、易于控制的优点。目前DMD的工作波长范围已经涵盖紫外、可见光以及红外波段,以DLP6500FYE型号为例,其阵列衍射效率可达86%,填充因子可达92%,像素间距为7.56  $\mu\text{m}$ 。这种基于微机电系统(MEMS)的DMD响应时间仅需数十微秒,刷新频率可达数千赫兹;基于压电陶瓷的DMD响应时间为数毫秒,刷新频率在百赫兹量级。当微透镜处于“开”或“关”状态时,数字微透镜阵列就形成了两个不同方向的闪耀衍射光栅结构,有着较大的角色散,会对超快激光应用产生影响,因此往往需进行校正,该特性在时空同步聚焦应用中可被

直接利用。

### 2.2 液晶空间光调制器

基于液晶的空间光调制器的每一个像素单元由液晶分子构成,根据液晶种类可分为铁电型和向列型两种,根据使用方式可分为反射式和透射式两种。液晶因为其双折射的特性而广泛应用于空间光调制器中,绝大多数液晶的光学特性类似于正单轴晶体,其分子长轴即为慢轴方向。在电控双折射效应情况下,向列型液晶分子的长轴统一平行于 $y$ 轴排列[图1(b)]<sup>[16]</sup>,在电光效应下,当电压处于Fréedericksz转变阈值与光学阈值之间时,随电场强度的改变,液晶分子的长轴会沿着电场方向发生不同角度的倾斜,从而引起介质折射率的改变,导致光程差发生改变,入射光经过各液晶像素后会产生不同的相位延迟,从而实现对入射光的相位调制[图1(b)]<sup>[17]</sup>。如今,已经有大量适用于可见光和近红外波段的液晶空间光调制器,填充因子通常在90%以上,像素间距可以达到4  $\mu\text{m}$ 左右,相位调制范围覆盖 $0\sim 2\pi$ ,16相位步长下的一级衍射效率通常在85%以上。LC-SLM具有易于使用、操作灵活、分辨率高等诸多优势,但是其使用受到入射光波长、入射光偏振的影响,并且刷新频率相对较低。受限于向列液晶的松弛特性,LC-SLM的响应时间在10 ms左右,该时间和液晶材料、液晶层厚度、温度以及控制电路有关,常见的刷新频率有60 Hz和120 Hz两种。为了克服向列液晶空间光调制器刷新频率低的使用缺陷,又出现了基于铁电液晶的空间光调制器,其响应时间仅需数微秒,刷新频率可以达到上千赫兹<sup>[18]</sup>。

### 2.3 用于空间光调制器的光学系统

空间光调制器的使用形式多种多样,十分灵活,不同的超快激光加工场景会用到不同的光学系统。利用物镜聚焦加工时,光场的前焦面与后焦面为傅里叶变换的关系,利用空间光调制器在物镜的前焦面加载相位调制信息,即可在后焦面生成所需的光场分布。但通常光路中空间光调制器和物镜间的距离远大于物镜的焦距,因此需要一个系统将经过空间光调制器调制后的光场投影到物镜的前焦面。最常用的系统是 $4f$ 成像系统,其光路设计为:空间光调制器位于第一个透镜的前焦面(相距 $f$ ),第一个透镜与第二个透镜的距离为 $2f$ ,像平面位于第二个透镜的后焦面,物平面与像平面正好相距 $4f$ 。使用 $4f$ 系统时,通常会在第一个透镜的后焦面添加光阑或者其他滤波装置以去除零级衍射光的影响,并且

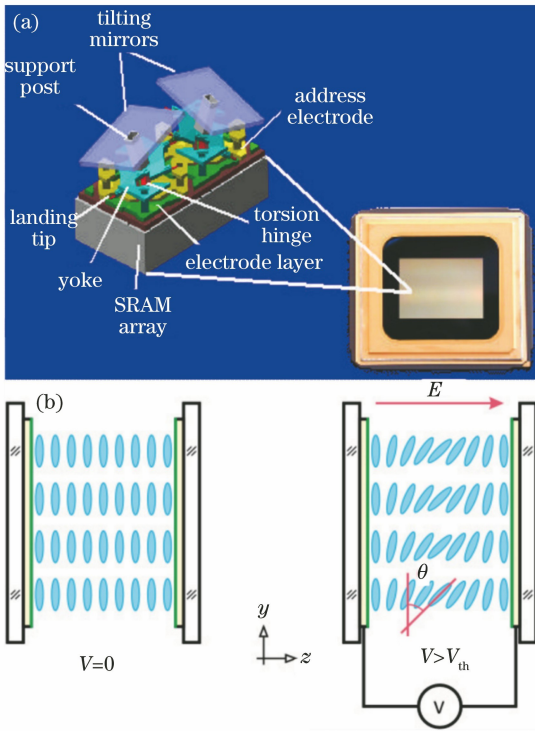


图 1 空间光调制器原理示意图。(a) DMD 原理图<sup>[15]</sup>；(b) 液晶空间光调制器示意图，无电压(左)和电压高于阈值(右)<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Schematics of spatial light modulators. (a) Principle of DMD<sup>[15]</sup>; (b) diagrams of LC-SLM without voltage (left) and with applied voltage higher than threshold (right)<sup>[17]</sup>

两个透镜的焦距可以不同,这样可以对光斑进行缩放,从而满足实际的光路需求。此外  $4f$  系统还可以应用于脉冲整形,由于透镜前后焦平面互为傅里叶变换的关系,可以在第一个透镜的前焦平面放置衍射光栅使入射光产生色散,各个频率的光得以分离,然后在第一个透镜的后焦面放置空间光调制器以对各个频域分量的振幅或者相位进行调制,最后

在第二个透镜的后焦面放置另一个光栅使得各个频率的分量重新组合,从而实现对超快激光的脉冲整形。当不进行调制时,入射脉冲与出射脉冲完全相同,这种系统也被称作零色散  $4f$  脉冲整形系统。除  $4f$  系统外,还会针对不同场景设计各种不同的光路,这将在后续的应用部分根据不同的运用场景进行更加详细的介绍。

### 3 全息图的计算

由于物镜前后焦平面的光场复振幅满足傅里叶变换的关系,即物镜后焦面的复振幅是前焦面复振幅的傅里叶变换。在使用空间光调制器进行激光加工时,需要在物镜的后焦面得到加工所需要的光场强度分布,而光场的相位信息通常不会对加工造成影响而被忽略。为了生成所需要的光场强度分布,空间光调制器将对入射的激光光束进行相位调制,这个相位调制的分布图被称为全息图。

全息图是通过空间光调制器加载到入射激光上的相位分布图,通过加载不同的全息图,可以生成多光束阵列、二维面光场强度分布、三维体光场强度分布等,从而满足不同的应用需要。为生成对应的全息图,人们探索出了多种全息图计算方法,本节将对这些计算方法进行介绍。

#### 3.1 二维光场全息图生成算法

通过全息图技术可以在焦点处产生所需的二维光场强度分布。此类算法有多种,其中较为经典的是 GS (Gerchberg-Saxton) 算法,该算法是由 Gerchberg 和 Saxton<sup>[19]</sup> 在 1972 年提出的一种计算全息图的迭代算法,该算法得到的全息图随着迭代次数的增加而向局部最优解收敛。后续的很多算法都是由 GS 算法演变而来。

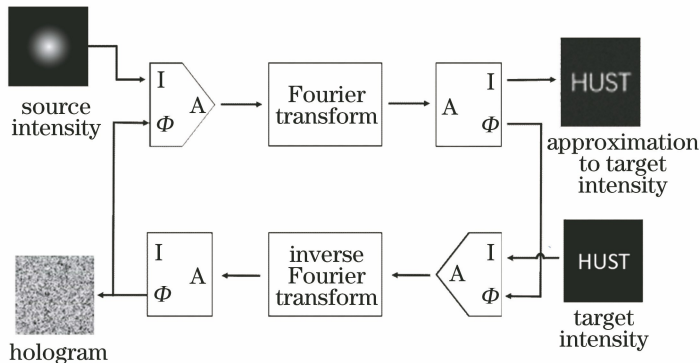


图 2 GS 迭代算法流程图<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Flowchart of the GS iteration algorithm<sup>[19]</sup>



如图 2 所示,GS 算法是一个迭代算法,首先,将激光的光源场强分布和随机相位组合作为输入的复振幅,经过傅里叶变换之后得到焦点处的复振幅,将其相位信息保留,强度信息用目标光场的强度替换,得到新的复振幅分布。然后进行傅里叶逆变换得到前焦面的复振幅分布,同样保留相位信息,强度信息用激光光源的场强分布替换,接着进行下一轮的计算,如此迭代一定次数后,傅里叶逆变换之后得到的相位分布就是 GS 算法生成的全息图。

在 GS 算法的基础上,新的迭代算法,即 AA (Adaptive-Additive)算法被提出<sup>[20]</sup>,AA 算法是对 GS 算法的一种改进,它与传统 GS 算法的最大区别是:在进行快速傅里叶逆变换之前,它的振幅为傅里叶变换得到的振幅与目标光场的振幅按一定比例的相加,其比例系数可以根据实际情况进行调整<sup>[21-22]</sup>。

GSW (Weighted Gerchberg-Saxton)算法也是基于 GS 算法的一种改进算法<sup>[23]</sup>。GSW 算法相较于 GS 算法的区别在于它在每个像素位置引入了一个权重系数,并且该系数随每次迭代进行动态更新。具体而言,新的权重系数是上一轮迭代中所有目标位置像素点强度的均值与单个像素点强度的比值再乘以权重系数,权重系数的引入可以抑制强度高于平均强度的像素点,增加强度低于平均强度的像素点。基于 GSW 算法模拟和实验得到的全息图强度分布均匀性都能达到 GS 算法的 1.5 倍<sup>[23]</sup>。该算法也可以应用于多阶强度的目标光场全息图生成,只需要分别对每个强度等级单独引入权重系数即可。在 GSW 算法的基础上发展了 DWGS (Doubly Weighted Gerchberg-Saxton)算法和 GSW-DIA (Weighted Gerchberg Saxton Double Iterative Algorithm)算法。DWGS 算法的原理与 GSW 算法类似,不过其对权重函数进行了修改,并且可以补偿探测器的噪声和像差的影响<sup>[24]</sup>。GSW-DIA 算法利用二次迭代,实现了多全息图生成的不同点阵之间离散的各强度等级保持一致<sup>[25]</sup>。

在 GS 算法的基础上衍生的杨顾算法也是工业中经常使用的一种算法。GS 算法只能局限于幺正变换的系统,而杨顾算法较 GS 算法增加了一层循环,可以运用于非幺正变换的系统,可计算非对称的基于衍射光学的相位分布,并且对初始相位的设定不敏感,有着更加广泛的应用范围<sup>[26]</sup>。此外通过在原杨顾算法的基础上进行改写,发展出加权杨顾算法<sup>[27]</sup>。

ORA (Optimal Rotation Angle)算法也是工业

上常使用的一种全息图迭代算法,由 Bengtsson<sup>[28]</sup>提出。由于物镜前后焦平面互为傅里叶变换的关系,后焦面任一个位置的复场强可以看作是前焦平面每个位置对这一位置贡献的复场强之和。将前焦面的每一像素点对后焦面的某一像素点复场强的贡献写成一个向量,将这些向量首尾连接起来就可以构成一条链,这条链的模即为这个后焦面像素点光场的振幅。当计算全息图时,改变全息图某一像素点相位的值,相当于对链上某一小段的向量进行了旋转,整条链的模即发生了改变,对应后焦面的光场的振幅随之发生改变。ORA 算法通过反复迭代找到最佳的全息图,使得所有链的长度之和最大,即后焦面的光场强度分布变为预设的目标光场强度分布。

此外,使用矢量德拜衍射理论可以计算得到全息图,实现对不同矢量方向的光场强度分布的调制<sup>[29]</sup>。另一方面,以上迭代算法往往需要消耗较长的时间,为减少计算时间,非迭代的全息图算法也被开发并应用,可以在保证一定全息图质量的同时提高生成效率<sup>[30-31]</sup>。

### 3.2 三维光场全息图生成算法

通过二维的全息图算法可以得到二维的目标光场,结合扫描的方法可以加工得到三维结构,但是如果直接使用全息图生成的目标三维光场进行加工,将进一步提升效率,加工出更加精细的结构,甚至一次加工成型出一些通过扫描无法加工实现的结构。因此,研究三维光场的全息图生成算法有着广泛的应用需求。

计算三维光场所需全息图时可以分为两个过程:一个是快速傅里叶变换,对进行了相位调制的入射光进行聚焦得到在后焦面的光场强度分布;另一个是非涅耳衍射过程,利用菲涅耳衍射积分正向计算聚焦体积内的三维光场强度分布<sup>[32]</sup>。使用 GS 算法计算三维光场全息图的方法与计算三维光场全息图类似,不同之处就是需要根据菲涅耳衍射计算聚焦体积内沿着轴向不同位置的光场,用目标光场的振幅替换计算得到的光场的振幅,然后再进行反向计算,将得到的每个面对应的复振幅相加,取辐角就可以得到三维光场的全息图<sup>[33-34]</sup>。但三维 GS 算法得到的全息图质量并不是很好,且计算速度较慢,后续很多研究者对其进行了改进。例如,传统 GS 算法舍弃了傅里叶逆变换之后的振幅信息,北京大学李焱课题组设计算法将其保留,在迭代过程中引入振幅调制使得全息图的质量有了很大提升<sup>[12]</sup>。斯威本科技

大学顾敏课题组运用德拜衍射积分以及三维傅里叶变换来得到傅里叶逆变换之后的相位,将其投影到二维平面,实现了三维多焦点阵列全息图的计算<sup>[35]</sup>。还有研究工作在保持 GS 算法性能的同时,利用压缩感知的原理进行优化,将利用 GS 算法计算三维光场的速度提升了一个数量级<sup>[36]</sup>。

除了 GS 算法及其变种,一种非凸优化的全息图算法——NOVO-CGH (Non-Convex Optimization for Volumetric Computer-Generated Holography) 算法也被提出,可用于三维光场的全息图计算<sup>[32]</sup>。它在计算聚焦的三维光场时将计算过程分为两步:1)通过设置一个成本函数来评估经相位调制后聚焦体积内光场强度的分布和目标光场强度的差距,将全息图的计算问题转化为了数学里的优化问题;2)使用 L-BFGS (Limited-Memory Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno Algorithm) 算法来对成本函数进行优化<sup>[37]</sup>,这是一种总是收敛到一个固定点的准牛顿梯度下降方法<sup>[38]</sup>。对成本函数进行优化后,得到的全息图可以使得聚焦光场的强度分布与目标光场的强度分布相接近。经过比较,NOVO-CGH 算法得到的结果比 GS 算法得到的结果更好,准确度提高近 20%,效率提高近 5%。此外,NOVO-CGH 算法的一大优势是可以根据实际情况的不同设计不同的成本函数,以满足不同的应用需求,如可抑制某些特定位置的光场强度。

### 3.3 基于深度学习的全息图生成算法

随着计算机技术的发展,深度学习技术已经在各个领域得到了广泛的应用,在光学领域也不例外<sup>[39-41]</sup>。利用传统算法计算全息图时,根据算法的复杂程度及计算机配置,通常需要运算几秒到几百秒,因此在使用全息图时需要提前进行计算生成,再在激光加工时对全息图进行切换,其无法在加工过程中实时地生成全息图的特点,降低了使用的灵活性。引入深度学习技术可以很有效地解决全息图生成速度慢的问题。

近年来基于深度学习技术生成用于空间传播的全息图算法得到了实现,入射光经过空间光调制器的相位调制后传播一定距离,之后可得到目标光场的强度分布<sup>[42]</sup>。其基本原理如图 3 所示。

基于深度学习的全息图生成算法可以分为 3 步:1)制作训练集,生成 10 万张随机的相位图,利用菲涅耳衍射积分计算出加载了相位图的入射光传播一定距离  $z$  之后的光强分布;2)构造了一个用于深度学习的神经网络,将 10 万张随机相位图作为神经

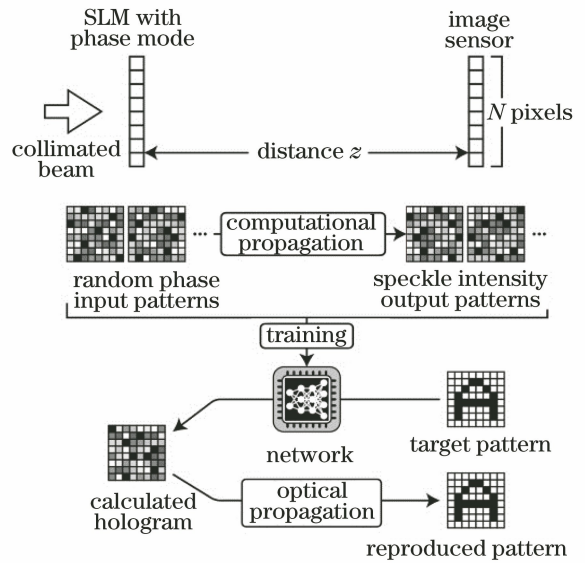


图 3 基于深度学习计算全息图的原理图<sup>[42]</sup>

Fig. 3 Principle of calculating hologram based on deep learning<sup>[42]</sup>

网络的输出,传播距离  $z$  之后的 10 万张光强分布图作为网络的输入,对神经网络进行训练;3)将训练好的神经网络保存下来,将目标光场强度分布输入到神经网络中,网络的输出即为该算法所计算出的全息图<sup>[42]</sup>。在全息图生成中引入深度学习技术的最大优势是:训练好的神经模型具有泛化能力,输入目标光场分布后即可直接计算得到全息图,运算速度比传统迭代算法快 1~2 个数量级。

目前这种方法得到的全息图只适用于二维的空间传播光场生成,还不能运用于聚焦光场的全息图计算。因为透镜聚焦是傅里叶变换的过程,与空间传播的菲涅耳衍射过程有区别,上述神经网络相当于学习了由特定相位经过空间传播得到特定光场强度分布的逆过程,与之相比透镜聚焦的逆过程更难学习,到目前为止还没有用深度学习技术生成聚焦光场全息图的算法被提出。本课题组正在进行利用深度学习计算聚焦光场全息图的开发探索。

计算全息图的算法有多种,除了上述算法外还有 MRAF (Mixed Region Amplitude Freedom) 算法<sup>[43]</sup>、RM (Random Mask) 算法<sup>[44]</sup>等,由于篇幅有限,在此不再详述,每个算法有着自己的优势和不足,不同激光加工应用场景需要选择最合适的算法或者对已有算法进行改进。

## 4 空间光调制器在超快激光加工中的应用

空间光调制器可以方便快捷地对激光光场进

行调制,因此在超快激光加工领域得到了广泛的应用。本节将对空间光调制器在超快激光加工中的应用进行介绍,根据不同的实验目的,空间光调制器有着不同的使用方法,光路系统也不局限于 $4f$ 系统。

#### 4.1 像差校正

像差的主要来源是激光加工过程中激光通过介质表面时由折射率发生变化而导致的折射率不匹配。像差的存在会使得聚焦光场的强度分布和目标光场强度分布产生偏差,影响加工时光场的三维分布、降低加工精度、提高加工阈值,甚至无法加工出目标结构<sup>[45-46]</sup>。折射率不匹配所引入的球差与聚焦物镜的数值孔径、介质折射率以及材料的加工深度等参数有关。如图4(a)所示,由于界面两侧材料的折射率不同,激光在穿过介质表面时会发生折射,当使用物镜聚焦时,不同位置的激光入射角度不一样使得折射的角度不同,导致接近中心的光线与接近边缘的光线不再聚焦于同一点,而是沿着光的传播方向有所拉伸并产生球差,这将对激光加工产生不利影响<sup>[47]</sup>。尤其是当使用高数值孔径的物镜进行加工时,由于边缘光线的入射角较大,球差的影响更加明显。

此外,当激光焦点靠近样品边缘时,除了有上述的球差,部分激光会从样品侧面而不是从上表面入射到样品内部,这种情况会引入较大的像差,且焦点距离样品边缘越近,像差越大[图4(b)]<sup>[48]</sup>。

超快激光加工过程中像差产生的主要原因是介质折射率不匹配,可以通过几何光学对其进行计算<sup>[47-49]</sup>,并利用空间光调制器的相位调制功能在激光加工时对其进行校正。例如,利用像差校正技术,可以在金刚石和熔融石英内部加工出三维螺旋点阵列的结构[图5(a)]<sup>[47]</sup>。此外,在多维光存储应用中,需要在不同的介质深度进行数据的写入和读取,因此会受到球差的影响,使用预测像差的方法可以利用空间光调制器对像差进行校正<sup>[50]</sup>。结合反向光线追迹方法并使用预失真相位图,不同加工深度所引入的像差可以通过迭代算法生成的全息图得以校正,使光斑失真程度达到最小<sup>[51]</sup>。类似于激光从样品边缘入射的情况,利用空间光调制器可以对圆柱形界面进行像差补偿,利用超快激光加工实现了在光纤截面任意一点的精确加工,制造了一种对偏振不敏感的光纤布拉格光栅[图5(b)]<sup>[52]</sup>。在超快激光写入光波导应用中,利用空间光调制器可以对像差进行校正,构造三维多层光通路,在铌酸锂晶

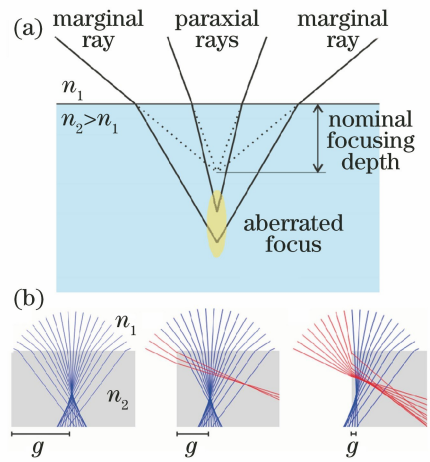


图4 激光加工时产生像差的示意图。(a)激光聚焦到样品内部引入球差的示意图<sup>[47]</sup>; (b)激光靠近样品边缘时引入像差的示意图<sup>[48]</sup>

Fig. 4 Schematics of aberrations induced during laser fabrication. (a) Spherical aberration induced when laser is focused into sample<sup>[47]</sup>; (b) aberration induced when laser is close to sample edge<sup>[48]</sup>

体中加工出偏振无关的光波导结构[图5(d)]<sup>[53]</sup>。除了对单个界面进行像差校正,还可以利用空间光调制器对多个折射层的像差进行校正,实现了超快激光透过石英玻璃对LBO玻璃进行无像差的加工[图5(c)]<sup>[54]</sup>。

当界面两侧折射率差别较大、加工深度较深、聚焦物镜数值孔径较大时,像差会对超快激光加工质量产生较大的不利影响,降低水平方向上的加工精度、增加纵向的结构长度。通过以上算法计算所需的全息图,结合空间光调制器可以快速便捷地对像差进行校正,提升超快激光加工的精度和质量。

#### 4.2 多焦点并行加工

在样品的不同二维或三维位置进行多焦点并行加工,可以成倍地提升加工效率。多焦点并行加工可以通过使用微透镜阵列<sup>[55]</sup>、超表面结构<sup>[56]</sup>等方法实现,但是它们的制备较为复杂,并且往往只能生成固定的光斑阵列,使用起来不够灵活。空间光调制器可以很好地解决这些问题,利用全息图技术对入射光进行相位调制可以快速生成各种目标光场以进行多焦点加工,并且通过切换全息图来实时地调制目标光场进行二维、三维结构的快速加工,有着广泛的应用。

基于 $4f$ 系统,搭建了一套利用空间光调制器、全息图可变的并行加工系统(图6),使用GS算法生成不同光斑点阵分布所需的全息图,在加工的过程



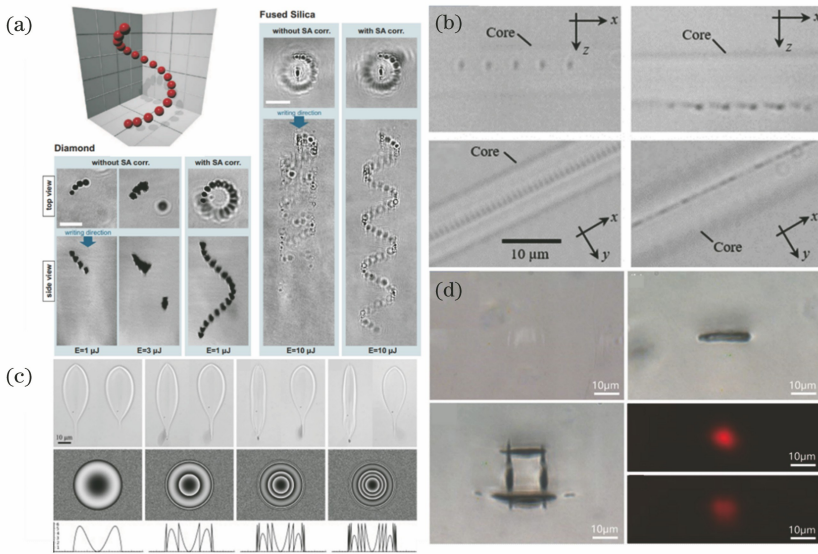


图 5 基于 SLM 的像差校正。(a)利用超快激光在金刚石和熔融石英内部加工出的螺旋状光斑点阵在像差校正前后的对比图<sup>[47]</sup>；(b)利用超快激光加工得到的光纤布拉格光栅的像差校正前(右)、后(左)对比图<sup>[52]</sup>；(c)利用全息技术校正前后不同深度处的结果,其中,每一列分别为不同深度处加工的结果(依次为 0.5 mm、1 mm 以及经过石英玻璃后 0.5 mm、1 mm 表面以下),左边是未校正的结果,右边是校正后的结果<sup>[54]</sup>；(d)像差校正前后加工出的光波导对比图,左上图为未经校正像差加工的结果,右上图为像差校正后加工的结果,左下图为像差校正后加工出的光波导横截面图,右下图为光波导在 s 偏振和 p 偏振光束下的近场模式图<sup>[53]</sup>

Fig. 5 Aberration correction based on SLM. (a) Comparison of helical spot arrays fabricated by ultrafast laser machining in diamond and fused silica before and after aberration compensation<sup>[47]</sup> ; (b) comparison of fiber Bragg grating structures fabricated by ultrafast laser machining before (right) and after (left) aberration compensation<sup>[52]</sup> ; (c) results at different depths of structures fabricated by holographic technique. Four rows represent 0.5 mm, 1mm, 0.5 mm (through a silica glass window), and 1 mm (through a silica glass window), respectively, below the surface without (left) and with (right) aberration compensation<sup>[54]</sup> ; (d) comparison of fabricated optical waveguides without (top left) and with (top right) aberration compensation. Cross section of optical waveguide with aberration compensation (down left), and near-field mode profile of s-polarized and p-polarized beams in the fabricated optical waveguide (down right) <sup>[53]</sup>

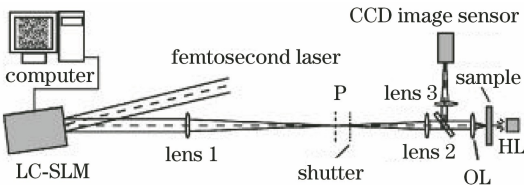


图 6 基于空间光调制器的超快激光并行加工系统<sup>[57]</sup>  
Fig. 6 Schematic of ultrafast laser parallel processing system based on spatial light modulator<sup>[57]</sup>

程中将全息图更新到空间光调制器上,用超快激光在玻璃表面实现了不同字母点阵的快速打印[图 7 (a)]<sup>[57]</sup>。这套系统即为基于空间光调制器的超快激光并行加工应用中最常见的光路。利用该系统可以实现多焦点的双光子聚合加工,全息图的刷新频率可达 20 Hz,可加工出弯曲、非对称的二维结构,还可通过控制焦点的个数和位置并结合扫描的方法加工出不同形状的三维结构<sup>[58]</sup>。多焦点的双光子

聚合技术还可用于人体组织工程支架、微针阵列、细胞培养基等功能性生物、医疗微器件的制备,大幅提升了加工效率、精度[图 7 (b)]<sup>[59-60]</sup>。超快激光多焦点并行加工技术也可用于提升多维度光存储的写入速度,通过多焦点阵列和半波片阵列可以动态改变单个焦点的强度及偏振状态,将多维数据快速地写入到熔融石英碟片中,实现数据的永久五维存储[图 8 (a)]<sup>[61]</sup>。多焦点超快激光加工系统可产生多达 576 个焦点的阵列以对硅和不锈钢等材料进行并行加工<sup>[62]</sup>,甚至生成 1500 个焦点的阵列<sup>[10]</sup>,实际加工时阵列焦点个数受限于空间光调制器像素个数、加工激光功率、空间光调制器阈值、物镜通光孔径等因素。

上述并行加工技术产生的都是二维平面上的多焦点,还可以利用基于德拜衍射理论的三维傅里叶变换得到全息图,生成三维空间的多焦点阵列,并且

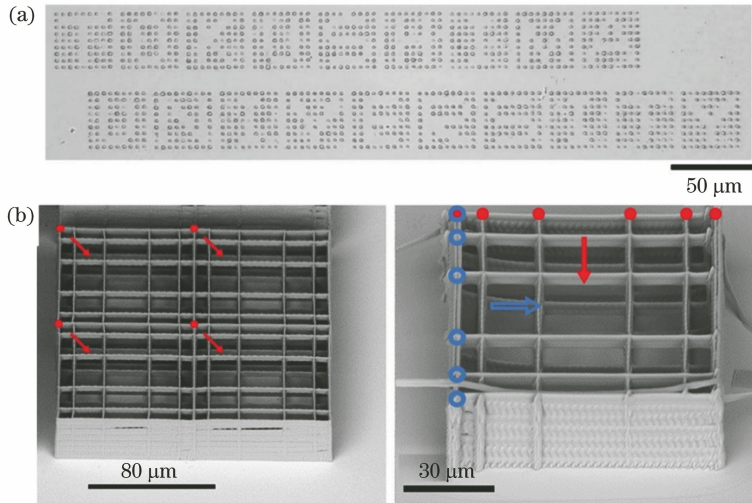


图 7 基于 SLM 的多焦点并行加工。(a) 利用多焦点并行加工技术加工的字母点阵图案光学显微镜图像<sup>[57]</sup>；  
(b) 利用 4 焦点(左)、6 焦点(右)扫描技术加工出的 3 维细胞培养基质的扫描电镜图像<sup>[59]</sup>

Fig. 7 Multi-focus parallel machining based on SLM. (a) Optical microscope image of character dot array fabricated with multi-focus parallel machining technique<sup>[57]</sup> ; (b) SEM images of 3D cell culture substrates fabricated by 4-focus scan (left) and 6-focus scan (right) techniques<sup>[59]</sup>

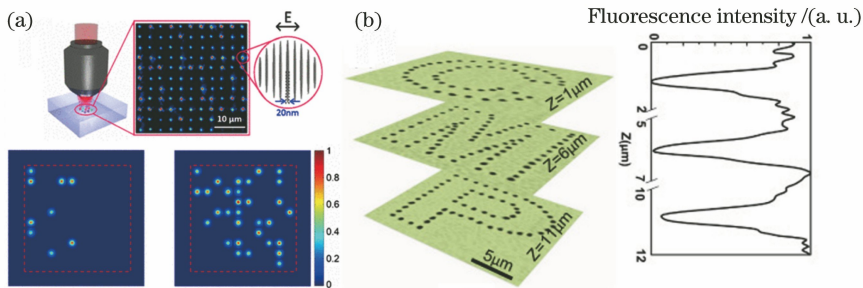


图 8 基于 SLM 多焦点并行加工的多维光存储应用。(a) 利用多焦点阵列实现 5 维永久光存储数据的写入<sup>[61]</sup>；(b) 基于德拜衍射理论得到的经像差校正后的三维多焦点阵列<sup>[35]</sup>

Fig. 8 Multi-dimensional optical data storage applications based on SLM multi-focus parallel writing. (a) Five-dimensional permanent optical storage data recording by multi-focus array<sup>[61]</sup> ; (b) 3D multi-focus array generated based on Debye diffraction theory after aberration compensation<sup>[35]</sup>

可以对因界面折射率不匹配产生的不同聚焦深度处的像差进行补偿,实现三维光存储的多层并行写入[图 8 (b)]<sup>[35]</sup>。

除了使用多焦点并行加工,还可以通过对激光的波前进行调制,将聚焦光束调制为目标图案直接进行加工。例如,用两个空间光调制器实现多目标图案的平行加工,第一个空间光调制器可通过对振幅进行调制来得到需要加工的形状,第二个空间光调制器则是用来生成多光束以进行超快激光并行加工,实现二维图案的阵列打印<sup>[63]</sup>。

### 4.3 聚焦体积内三维光场调制

对于三维结构,可以运用前文提到的三维光场调控技术,使用杨顾算法并在迭代过程中加入强度

调制,通过单次曝光、单次扫描,或者两者相结合,对光敏树脂进行加工,得到复杂的三维结构[图 9 (a)]<sup>[12]</sup>,或在含有银离子的水溶液中加工出具有圆二向色性的三维双螺旋结构[图 9 (b)]<sup>[64]</sup>。

### 4.4 脉冲时空整形

空间光调制器可以用于时空同步聚焦系统。在传统的超快激光时空同步聚焦系统中,超快激光不同频率成分经过色散器件后在空间上展开,经过透镜后聚焦,在焦平面上实现光斑空间尺寸的最小值和脉冲宽度的最小值。在焦平面以外的地方不同频率的光在空间上分散且脉冲宽度长,导致峰值功率较低而不足以产生非线性吸收现象,使时空聚焦系统沿光传播方向有更高的分辨率。因此,传统的光



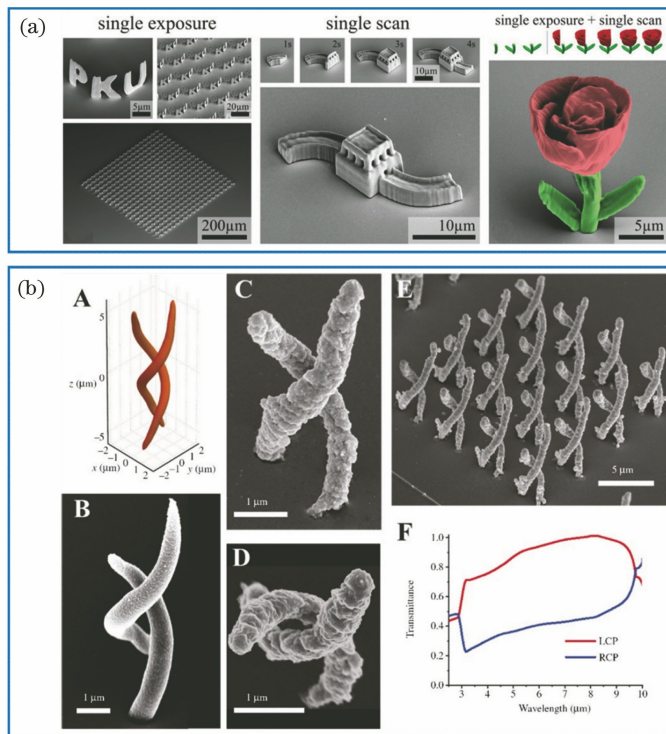


图9 单次曝光或扫描加工出的三维结构。(a)通过对焦点光场进行三维调控打印出的三维结构的SEM图:单次曝光(左)、单次扫描(中)、利用单次曝光和单次扫描相结合(右)<sup>[12]</sup>; (b)利用空间光调制器单次曝光加工出的三维双螺旋结构<sup>[64]</sup>  
Fig. 9 Three-dimensional structures produced by single exposure or scanning. (a) SEM images of 3D microstructures printed by 3D adjustment for focusing light field: single-exposure (left), single-scan (middle), and single-exposure & single-scan (right)<sup>[12]</sup>; (b) 3D double-helix structures fabricated by single-exposure based on SLM<sup>[64]</sup>

学系统无法实现三维的多焦点时空同步聚焦,只能在焦平面附近构建二维的目标光场。三维的时空同步聚焦技术可以通过两个空间光调制器来实现,分别控制垂直于光传播方向上目标光场的强度分布和时空同步聚焦沿着光传播方向的聚焦位置<sup>[65]</sup>。使用这套系统可以摆脱传统时空聚焦系统轴向位置单一的约束,使得时空同步聚焦技术的使用更加方便灵活。该系统还可以简化,仅使用一个空间光调制器,即可生成时空分离的三维点阵,相邻焦点在空间上紧邻,但在时域上分离,从而克服传统多焦点情况下相邻焦点间的互相干扰,降低了点间距,实现了超快激光的四维(空间三维和时域维度)并行加工[图10(a)、(b)]<sup>[66]</sup>。另外,如果将DMD用作一个色散元器件,那么时空同步聚焦光路中常用的光栅也可以被省略,结合DMD的高刷新频率可以实现纳米级精度的快速3D打印,通过单次聚焦即可在毫秒时间量级内制造出复杂的三维结构,这些结构是传统超快激光直写扫描系统难以加工得到的[图10(c)]<sup>[67]</sup>。

由于超快激光脉冲持续时间极短,较难在时域上直接对脉冲进行调制,在一些情况下可以利用透

镜前后焦平面互为傅里叶变换的关系对脉冲进行时域整形。脉冲时域整形技术通常使用的系统为上文所提到的 $4f$ 系统。利用这套系统可以对超快激光脉冲进行调制,形成特定脉冲形状的超快激光,对不同形状的脉冲进行编码和解码,可以运用于光通信领域<sup>[68]</sup>。对800 nm的飞秒激光脉冲进行时域整形,可以对光引发剂(ITX)的双光子吸收和聚合实现相干控制,用这种技术制造出的微棒结构的尺寸可以达到衍射极限的 $1/25$ <sup>[69]</sup>。飞秒激光可以实现稀土离子的价态转换,但是通常转换效率较低,利用飞秒激光时域整形技术可以提高稀土离子的价态转换效率<sup>[70]</sup>。脉冲时域整形技术的应用范围很广,一直受到人们的广泛关注,有着巨大的发展潜力。

#### 4.5 结构光场的产生及应用

结构光场有着特殊的相位、偏振特性,表现出独特的光学性质,在多个领域有着广泛的应用。使用空间光调制器可以方便快捷地产生这些有着特殊相位、偏振的结构光场,其在超快激光加工领域有着广泛的应用,本节将对超快激光加工领域中利用空间光调制器引入结构光场的应用进行介绍。

使用空间光调制器并通过加入涡旋相位可以产

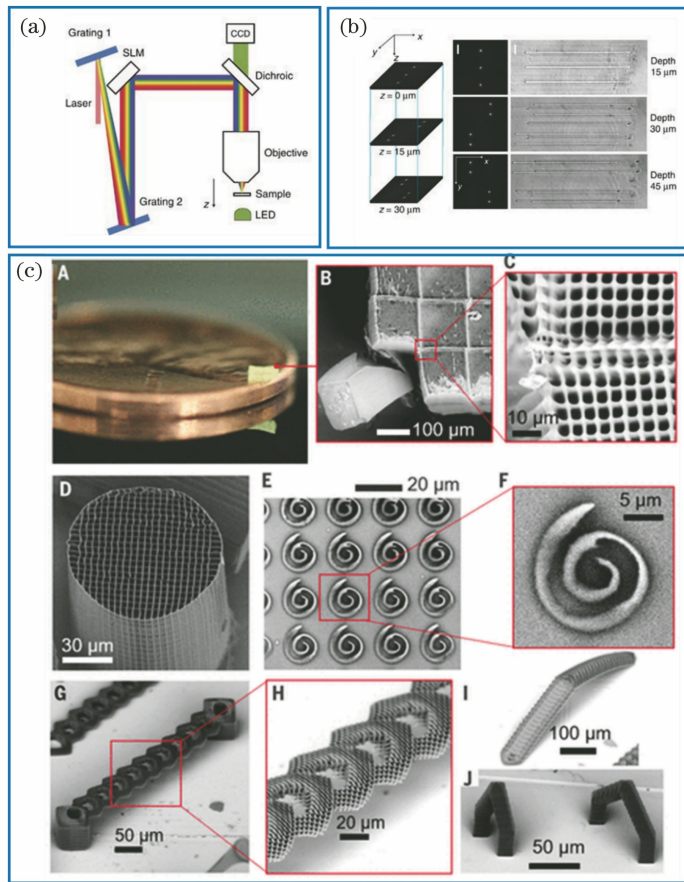


图 10 超快激光时空同步聚焦并行加工。(a)超快激光时空同步聚焦并行加工的光路示意图<sup>[66]</sup>;(b)由图 10(a)中系统生成的三维多焦点阵列及其加工结果<sup>[66]</sup>;(c)基于 DMD 的超快激光时空同步聚焦并行加工出的复杂三维结构<sup>[67]</sup>

Fig. 10 Ultrafast laser simultaneous spatial and temporal focusing (SSTF) parallel processing. (a) Schematic of light path of ultrafast laser simultaneous spatial and temporal focusing (SSTF) parallel processing<sup>[66]</sup>; (b) 3D multifocal array generated by system in Fig. 10(a) and processing results<sup>[66]</sup>; (c) complex 3D structures printed by DMD based ultrafast laser SSTF parallel processing<sup>[67]</sup>

生带有轨道角动量的涡旋光束,利用光路和其他光学元器件可以实现多种矢量光束和一些有特殊性质的光场。将单个空间光调制器分为两个区域分别放置不同的全息图,激光先后经这两个区域的调制后,可生成高阶矢量光场[图 11 (a)]<sup>[71]</sup>,利用单个空间光调制器及  $4f$  系统可以产生任意矢量光束<sup>[72]</sup>,还可以用单个空间光调制器和相干叠加光路实现不同偏振矢量的多光斑阵列[图 11 (b)]<sup>[73]</sup>。以上光路都可以用于超快激光加工,使用空间光调制器进行相位和偏振调制,可以生成多个结构光场光斑以进行并行加工,在金属表面生成各向异性的周期性结构<sup>[13]</sup>。

结构光场可以应用在基于 STED (Stimulated Emission Depletion) 光路的超快激光超分辨光激发-光抑制 SPIN (Superresolution Photoinduction-Inhibited Nanolithography) 加工系统中,用高斯光

作加工光引发双光子聚合,用空心结构光作抑制光激发光抑制剂阻断树脂聚合,当两束光合在一起加工时即可以达到超衍射极限加工的效果<sup>[74]</sup>。这样的超分辨加工技术可以同并行加工技术相结合,利用两个空间光调制器分别生成高斯光束阵列和涡旋光束阵列,实现超分辨的三维多焦点阵列的并行加工[图 12 (a)]<sup>[75]</sup>。

利用结构光场特殊的性质可以加工出一些普通光场难以加工出的复杂结构。例如通过涡旋光束相位叠加,在聚合物中并行加工出开口环结构阵列[图 12 (b)]<sup>[76]</sup>。通过改变加载在光学涡旋上的相位因子,可以一次成型加工出复杂的三维微管结构[图 12 (c)]<sup>[77]</sup>,在此基础上利用平面波和涡旋光的同轴干涉可以生成三维带手性的光场,利用这种光场对各向同性的介质进行加工,可以制备三维手性微结构<sup>[78]</sup>。利用空间光调制器还可以生成贝塞尔

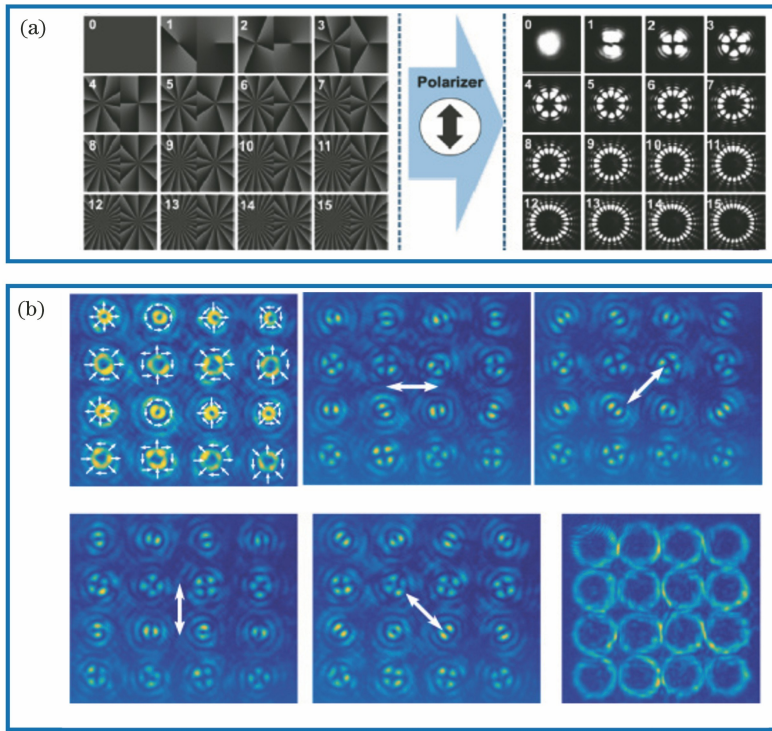


图 11 使用 SLM 生成的结构光场。(a)通过在空间光调制器不同区域反射两次,生成了 16 种不同的结构光场<sup>[71]</sup>; (b)利用空间光调制器得到 16 个不同矢量分布的光束阵列<sup>[73]</sup>

Fig. 11 Structured light field generated by SLM. (a) 16 kinds of structured light fields generated by double reflection of SLM<sup>[71]</sup>; (b) 16-vector-Bessel-beam-array generated by SLM<sup>[73]</sup>

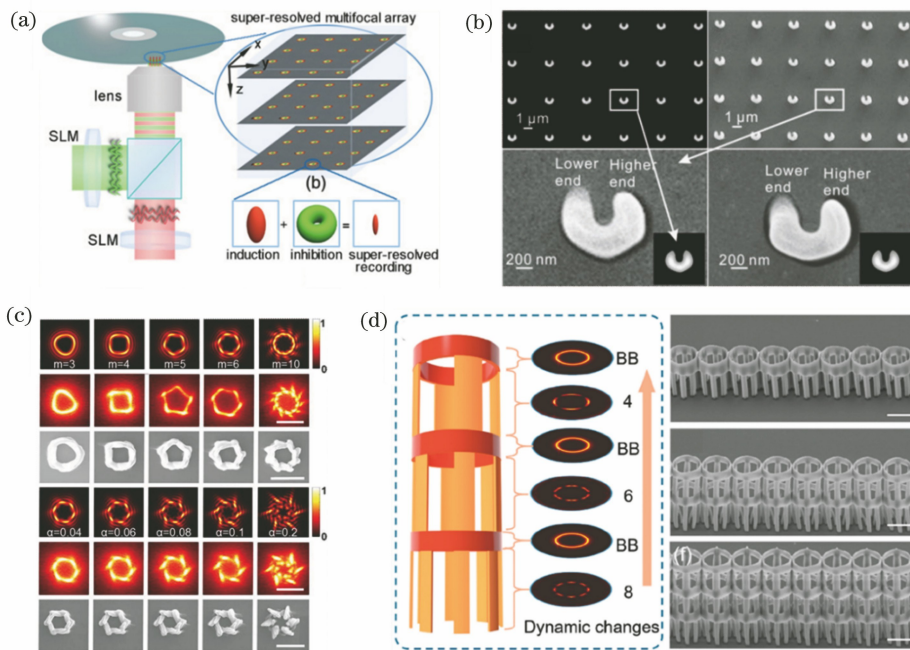


图 12 结构光场的应用。(a)利用空间光调制器进行超衍射并行存储原理图<sup>[75]</sup>; (b)利用双涡旋光束叠加得到的开口环结构<sup>[76]</sup>; (c)对涡旋光的相位因子进行调控得到的不同的微结构<sup>[77]</sup>; (d)利用贝塞尔光束和马蒂厄光束加工出的微笼结构<sup>[79]</sup>

Fig. 12 Applications of structured light fields. (a) Schematic of super-diffraction parallel storage based on SLMs<sup>[75]</sup>; (b) split-ring structure fabricated by two vortex beams<sup>[76]</sup>; (c) microstructures fabricated by controlling phase factor of vortex beam<sup>[77]</sup>; (d) microcages fabricated by using Bessel and Mathieu beams<sup>[79]</sup>



(Bessel)光束和马蒂厄(Mathieu)光束,通过切换不同的全息图可以快速改变加工光束的类型,通过纵向扫描的方式对聚合物进行加工,得到三维微笼结构,用于捕获微小的物体[图 12 (d)]<sup>[79]</sup>。

使用空间光调制器及全息图技术可以快速地产生一些特殊的结构光场,利用这些结构光场进行超快激光加工可以快速、高分辨、高质量地生成复杂的二维、三维结构。但是,利用结构光场加工具有一定的局限性,无法得到任意结构,相关的全息图生成技术还有继续发展的空间。

## 5 结束语

空间光调制器为超快激光加工带来了极大的便利,通过不同的全息图算法可以得到不同的二维、三维目标光场,从而快速、高精度地加工得到所需结构。利用空间光调制器进行多焦点阵列的并行加工极大地提升了加工效率,更可贵的是该技术可以同多种光场调制技术相结合,如像差校正、时空同步聚焦、结构光场等,实现多种特殊应用场景下的超快激光并行加工。通过全息图对聚焦体积内的二维、三维甚至四维光场进行操控,实现了对各种复杂结构的并行加工、扫描加工、一次曝光成型、超分辨加工等。空间光调制器结合色散系统,也可实现超快激光时空同步聚焦加工和脉冲时域整形加工。通过空间光调制器可以产生任意涡旋光、矢量光束,进一步丰富了超快激光并行加工技术的使用场景。空间光调制器的使用方式灵活多变,还有很多潜在的应用场景有待挖掘。然而利用空间光调制器进行超快激光加工受到了空间光调制器本身如刷新频率、分辨率、相位灰阶数、像素个数、填充因子等参数的限制,并且全息图的计算速度以及生成光场的质量仍有提升的空间。向列型液晶空间光调制器拥有较多的相位调制灰阶、较高的分辨率,可以生成复杂的相位全息图,引入水冷模块后可以承受高功率的飞秒激光照射,但是刷新频率较低阻碍了其在工业上的应用。而基于 MEMS 的 DMD 有着更高的刷新频率,在工业中应用更为广泛,如何将两者的优势结合起来,生产出高质量、高刷新频率、高阈值的空间光调制器用于超快激光加工是一个有待解决的问题。根据不同的超快激光应用场景,需要选择合适的算法、光学系统,希望本篇综述能够给从事相关领域的研究人员带来一些帮助,在实际应用时能够找到适合的算法,设计出理想的光学系统,收获一系列有鲜明特色的研究成果。

## 参 考 文 献

- [1] Couairon A, Sudrie L, Franco M, et al. Filamentation and damage in fused silica induced by tightly focused femtosecond laser pulses[J]. *Physical Review B*, 2005, 71(12): 125435.
- [2] Tamaki T, Watanabe W, Nishii J, et al. Welding of transparent materials using femtosecond laser pulses [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, 44 (20/21/22/23): L687-L689.
- [3] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices [J]. *Nature*, 2001, 412: 697-698.
- [4] Friedman N J, Palanker D V, Schuele G, et al. Femtosecond laser capsulotomy [J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2011, 37(7): 1189-1198.
- [5] Drevinskis R, Beresna M, Zhang J Y, et al. Ultrafast laser-induced metasurfaces for geometric phase manipulation[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, 5(1): 1600575.
- [6] Liao Y, Song J X, Li E, et al. Rapid prototyping of three-dimensional microfluidic mixers in glass by femtosecond laser direct writing[J]. *Lab on a Chip*, 2012, 12(4): 746-749.
- [7] Parthenopoulos D A, Rentzepis P M. Three-dimensional optical storage memory [J]. *Science*, 1989, 245(4920): 843-845.
- [8] Yong J L, Chen F, Yang Q, et al. Bioinspired underwater superoleophobic surface with ultralow oil-adhesion achieved by femtosecond laser microfabrication[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2014, 2(23): 8790-8795.
- [9] Huang X J, Guo Q Y, Yang D D, et al. Reversible 3D laser printing of perovskite quantum dots inside a transparent medium[J]. *Nature Photonics*, 2020, 14 (2): 82-88.
- [10] Kim D, Keesling A, Omran A, et al. Large-scale uniform optical focus array generation with a phase spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44 (12): 3178-3181.
- [11] Zhang C C, Hu Y L, Du W Q, et al. Optimized holographic femtosecond laser patterning method towards rapid integration of high-quality functional devices in microchannels [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 33281.
- [12] Yang D, Liu L P, Gong Q H, et al. Rapid two-photon polymerization of an arbitrary 3D

- microstructure with 3D focal field engineering [J]. *Macromolecular Rapid Communications*, 2019, 40(8): 1970017.
- [13] Allegre O J, Jin Y, Perrie W, et al. Complete wavefront and polarization control for ultrashort-pulse laser microprocessing[J]. *Optics Express*, 2013, 21(18): 21198-21207.
- [14] Gauthier G, Lenton I, McKay Parry N, et al. Direct imaging of a digital-micromirror device for configurable microscopic optical potentials [J]. *Optica*, 2016, 3(10): 1136-1143.
- [15] Dana D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications [J]. *Proceedings of SPIE*, 2003, 4985: 14-25.
- [16] Zhang Z C, You Z, Chu D P. Fundamentals of phase-only liquid crystal on silicon (LCOS) devices [J]. *Light: Science & Applications*, 2014, 3(10): e213.
- [17] Reichelt S. Spatially resolved phase-response calibration of liquid-crystal-based spatial light modulators [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(12): 2610-2618.
- [18] Cotter L K, Drabik T J, Dillon R J, et al. Ferroelectric-liquid-crystal/silicon-integrated-circuit spatial light modulator[J]. *Optics Letters*, 1990, 15(5): 291-293.
- [19] Gerchberg R W, Saxton W O. A practical algorithm for the determination of phase from image and diffraction plane pictures[J]. *Optik*, 1972, 35: 237-246.
- [20] Soifer V A. *Iterative methods for diffractive optical elements computation* [M]. London: CRC Press, 2014.
- [21] Dufresne E R, Spalding G C, Dearing M T, et al. Computer-generated holographic optical tweezer arrays [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(3): 1810.
- [22] Curtis J E, Koss B A, Grier D G. Dynamic holographic optical tweezers [J]. *Optics Communications*, 2002, 207(1/2/3/4/5/6): 169-175.
- [23] di Leonardo R, Ianni F, Ruocco G. Computer generation of optimal holograms for optical trap arrays [J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1913-1922.
- [24] Poland S P, Krstajić N, Knight R D, et al. Development of a doubly weighted Gerchberg-Saxton algorithm for use in multibeam imaging applications [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(8): 2431-2434.
- [25] Zhang J, Čerkauskaitė A, Drevinskas R, et al. Eternal 5D data storage by ultrafast laser writing in glass [J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9736: 97360U.
- [26] Yang G Z, Dong B Z, Gu B Y, et al. Gerchberg-Saxton and Yang-Gu algorithms for phase retrieval in a nonunitary transform system: a comparison [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(2): 209-218.
- [27] Yan S H. Research on the weighted Yang-Gu algorithm [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(3): 530-535.  
颜树华. 加权杨顾算法研究 [J]. *光子学报*, 2007, 36(3): 530-535.
- [28] Bengtsson J. Kinoform design with an optimal-rotation-angle method [J]. *Applied Optics*, 1994, 33(29): 6879-6884.
- [29] Lin H, Jia B H, Gu M. Dynamic generation of Debye diffraction-limited multifocal arrays for direct laser printing nanofabrication [J]. *Optics Letters*, 2011, 36(3): 406-408.
- [30] Pang H, Wang J Z, Zhang M, et al. Non-iterative phase-only Fourier hologram generation with high image quality [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14323-14333.
- [31] Mengü D, Ulusoy E, Urey H. Non-iterative phase hologram computation for low speckle holographic image projection [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4462-4476.
- [32] Zhang J Z, Pégard N, Zhong J S, et al. 3D computer-generated holography by non-convex optimization [J]. *Optica*, 2017, 4(10): 1306-1313.
- [33] Makowski M. Iterative design of multiplane holograms: experiments and applications [J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(4): 045802.
- [34] Sinclair G, Leach J, Jordan P, et al. Interactive application in holographic optical tweezers of a multiplane Gerchberg-Saxton algorithm for three-dimensional light shaping [J]. *Optics Express*, 2004, 12(8): 1665-1670.
- [35] Ren H R, Lin H, Li X P, et al. Three-dimensional parallel recording with a Debye diffraction-limited and aberration-free volumetric multifocal array [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1621-1624.
- [36] Pozzi P, Maddalena L, Ceffa N, et al. Fast calculation of computer generated holograms for 3D photostimulation through compressive-sensing gerchberg-saxton algorithm [J]. *Methods and*

- Protocols, 2018, 2(1): 2.
- [37] Liu D C, Nocedal J. On the limited memory BFGS method for large scale optimization[J]. *Mathematical Programming*, 1989, 45(1/2/3): 503-528.
- [38] Curtis F E, Que X C. A quasi-Newton algorithm for nonconvex, nonsmooth optimization with global convergence guarantees [J]. *Mathematical Programming Computation*, 2015, 7(4): 399-428.
- [39] Sinha A, Lee J, Li S, et al. Lensless computational imaging through deep learning[J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1117-1125.
- [40] Lin X, Rivenson Y, Yardimci N T, et al. All-optical machine learning using diffractive deep neural networks[J]. *Science*, 2018, 361(6406): 1004-1008.
- [41] Wiecha P R, Lecestre A, Mallet N, et al. Pushing the limits of optical information storage using deep learning[J]. *Nature Nanotechnology*, 2019, 14(3): 237-244.
- [42] Horisaki R, Takagi R, Tanida J. Deep-learning-generated holography[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3859-3863.
- [43] Pasienski M, DeMarco B. A high-accuracy algorithm for designing arbitrary holographic atom traps [J]. *Optics Express*, 2008, 16(3): 2176-2190.
- [44] Montes-Usategui M, Pleguezuelos E, Andilla J, et al. Fast generation of holographic optical tweezers by random mask encoding of Fourier components[J]. *Optics Express*, 2006, 14(6): 2101-2107.
- [45] Williams H E, Luo Z Y, Kuebler S M. Effect of refractive index mismatch on multi-photon direct laser writing [J]. *Optics Express*, 2012, 20(22): 25030-25040.
- [46] Marcinkevičius A, Mizeikis V, Juodkakis S, et al. Effect of refractive index-mismatch on laser microfabrication in silica glass [J]. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 2003, 76(2): 257-260.
- [47] Jesacher A, Booth M J. Parallel direct laser writing in three dimensions with spatially dependent aberration correction [J]. *Optics Express*, 2010, 18(20): 21090-21099.
- [48] Salter P S, Booth M J. Focussing over the edge: adaptive subsurface laser fabrication up to the sample face [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 19978-19989.
- [49] Sun Q, Jiang H B, Liu Y, et al. Effect of spherical aberration on the propagation of a tightly focused femtosecond laser pulse inside fused silica [J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7(11): 655-659.
- [50] Booth M J, Schwertner M, Wilson T, et al. Predictive aberration correction for multilayer optical data storage [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(3): 031109.
- [51] Itoh H, Matsumoto N, Inoue T. Spherical aberration correction suitable for a wavefront controller [J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 14367-14373.
- [52] Salter P S, Woolley M J, Morris S M, et al. Femtosecond fiber Bragg grating fabrication with adaptive optics aberration compensation [J]. *Optics Letters*, 2018, 43(24): 5993-5996.
- [53] Wang P, Qi J, Liu Z M, et al. Fabrication of polarization-independent waveguides deeply buried in lithium niobate crystal using aberration-corrected femtosecond laser direct writing [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 41211.
- [54] Stone A, Jain H, Dierolf V, et al. Multilayer aberration correction for depth-independent three-dimensional crystal growth in glass by femtosecond laser heating [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(5): 1234-1240.
- [55] Kato J I, Takeyasu N, Adachi Y, et al. Multiple-spot parallel processing for laser micronanofabrication [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 86(4): 044102.
- [56] Kamali S M, Arbabi E, Arbabi A, et al. Highly tunable elastic dielectric metasurface lenses [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2016, 10(6): 1002-1008.
- [57] Hayasaki Y, Sugimoto T, Takita A, et al. Variable holographic femtosecond laser processing by use of a spatial light modulator [J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(3): 031101.
- [58] Obata K, Koch J, Hinze U, et al. Multi-focus two-photon polymerization technique based on individually controlled phase modulation [J]. *Optics Express*, 2010, 18(16): 17193-17200.
- [59] Zandrini T, Shan O M, Parodi V, et al. Multi-foci laser microfabrication of 3D polymeric scaffolds for stem cell expansion in regenerative medicine [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 11761.
- [60] Gittard S D, Nguyen A, Obata K, et al. Fabrication of microscale medical devices by two-photon polymerization with multiple foci via a spatial light modulator [J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(11): 3167-3178.
- [61] Zhang J Y, Gecevičius M, Beresna M, et al.



- Seemingly unlimited lifetime data storage in nanostructured glass [J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(3): 033901.
- [62] Silvennoinen M, Kaakkunen J, Paivasaari K, et al. Parallel microstructuring using femtosecond laser and spatial light modulator [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 693-697.
- [63] Li J N, Tang Y, Kuang Z, et al. Multi imaging-based beam shaping for ultrafast laser-material processing using spatial light modulators [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2019, 112: 59-67.
- [64] Liu L P, Yang D, Wan W P, et al. Fast fabrication of silver helical metamaterial with single-exposure femtosecond laser photoreduction [J]. *Nanophotonics*, 2019, 8(6): 1087-1093.
- [65] Hernandez O, Papagiakoumou E, Tanese D, et al. Three-dimensional spatiotemporal focusing of holographic patterns [J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11928.
- [66] Sun B S, Salter P S, Roeder C, et al. Four-dimensional light shaping: manipulating ultrafast spatiotemporal foci in space and time [J]. *Light: Science & Applications*, 2018, 7(1): 17117.
- [67] Saha S K, Wang D E, Nguyen V H, et al. Scalable submicrometer additive manufacturing [J]. *Science*, 2019, 366(6461): 105-109.
- [68] Weiner A M, Heritage J P, Kirschner E M. High-resolution femtosecond pulse shaping [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1988, 5(8): 1563-1572.
- [69] Ma J, Cheng W J, Zhang S A, et al. Coherent quantum control of two-photon absorption and polymerization by shaped ultrashort laser pulses [J]. *Laser Physics Letters*, 2013, 10(8): 085304.
- [70] Zheng Y, Yao Y H, Deng L Z, et al. Valence state manipulation of  $\text{Sm}^{3+}$  ions via a phase-shaped femtosecond laser field [J]. *Photonics Research*, 2018, 6(2): 144.
- [71] Zhao Y F, Wang J. High-base vector beam encoding/decoding for visible-light communications [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(21): 4843-4846.
- [72] Wang X L, Ding J P, Ni W J, et al. Generation of arbitrary vector beams with a spatial light modulator and a common path interferometric arrangement [J]. *Optics Letters*, 2007, 32(24): 3549-3951.
- [73] Rosales-Guzmán C, Bhebhe N, Forbes A. Simultaneous generation of multiple vector beams on a single SLM [J]. *Optics Express*, 2017, 25(21): 25697-25706.
- [74] Gan Z S, Cao Y Y, Evans R A, et al. Three-dimensional deep sub-diffraction optical beam lithography with 9 nm feature size [J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2061.
- [75] Li X P, Cao Y Y, Tian N, et al. Multifocal optical nanoscopy for big data recording at 30 TB capacity and gigabits/second data rate [J]. *Optica*, 2015, 2(6): 567-570.
- [76] Lin H, Gu M. Creation of diffraction-limited non-Airy multifocal arrays using a spatially shifted vortex beam [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(8): 084103.
- [77] Yang L, Qian D D, Xin C, et al. Direct laser writing of complex microtubes using femtosecond vortex beams [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(22): 221103.
- [78] Ni J C, Wang C W, Zhang C C, et al. Three-dimensional chiral microstructures fabricated by structured optical vortices in isotropic material [J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(7): e17011.
- [79] Wang C W, Yang L, Hu Y L, et al. Femtosecond mathieu beams for rapid controllable fabrication of complex microcages and application in trapping microobjects [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(4): 4667-4676.