

## 光学学报

## 衍射光学元件设计方法综述

徐嫻<sup>1,2,3</sup>, 王常宇<sup>1,2,3</sup>, 王涌天<sup>1,2,3</sup>, 刘娟<sup>1,2,3\*</sup><sup>1</sup>北京理工大学光电学院, 北京 100081;<sup>2</sup>北京市混合现实与新型显示工程技术研究中心, 北京 100081;<sup>3</sup>光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

**摘要** 衍射光学元件(DOE)因其轻型化、小型化和多功能化等特点,在现代光学系统中得到了越来越广泛的应用。针对不同应用场景下 DOE 的性能需求,研究人员需要灵活运用 DOE 的设计方法进行设计。通过回顾 DOE 设计的基本原理,简述了现有基于衍射原理和干涉原理的 DOE 设计方法,通过几种典型应用中的最新进展阐述了具体的 DOE 设计方法及其适用性,并对 DOE 设计中的难点及其在未来科技中的可能应用方向进行了展望。

**关键词** 光学设计; 衍射光学元件; 设计; 适用性; 应用

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230557

## 1 引言

衍射光学元件(DOE)是指通过优化设计结构对光波进行控制的元件。早在 19 世纪初, Fraunhofer 等科学家就探索了光栅设计理论。20 世纪 80 年代中期,美国麻省理工学院林肯实验室提出了二元衍射光学元件(BOE)。随着微电子加工技术的迅猛发展,多台阶微结构的实现使 DOE 衍射效率等参数得到了大幅度提高,从而促进了 DOE 的研制并使其在各光学领域中的应用愈发深入和广泛。近年来,DOE 已被广泛应用于工业<sup>[1]</sup>、军事、国防<sup>[2-3]</sup>和医疗<sup>[4-6]</sup>等多个重要领域中,成为了现代光学系统中不可分割的组成部分。

DOE 的设计是一个已知目标光场参量求解调控微结构参量的逆问题,需要借助优化算法寻找尽可能接近的最优解。这个过程需要综合考虑设计理论、优化算法、加工工艺和应用场景等多个方面。DOE 设计的基本理论主要包括矢量衍射理论和标量衍射理论,设计过程包括建立模型、提出设计问题、确定优化方法和反复优化结果几个主要步骤。不同的 DOE 设计方法具有独特的优势和局限,故适合的功能和应用场景也不尽相同。本文结合典型应用对 DOE 设计的最新进展进行了概述。首先回顾了设计 DOE 的基本理论,概述了衍射型和干涉型 DOE 的设计方法。然后,列举了典型应用实例来说明不同需求中的具体设计方法。最后,对 DOE 的未来发展趋势进行了展望。

## 2 基本理论

宏观世界的光传输规律(光波通过 DOE 调制场分布)满足麦克斯韦电磁场理论。然而,由于麦克斯韦方程组的严格求解需要相当长的计算时间和较大的空间容量,对于可见光波段或近红外波段的光波而言,尺寸在毫米和厘米量级的 DOE 的逆向设计基本难以实现。考虑到逆向设计中的计算成本,一般按照 DOE 的特征尺寸和衍射光场特点对衍射理论(麦克斯韦方程组)进行适当近似处理:当 DOE 的特征尺寸小于  $1/10$  波长时,光波衍射明显,DOE 的作用等效于双折射晶体的折射率变化,可采用等效介质理论进行近似分析和设计;当 DOE 的特征尺寸介于  $1/10$  波长到 10 倍波长范围内时,衍射光波的极化特征非常明显,需要考虑矢量光场的偏振耦合特征,必须采用严格麦克斯韦方程组求解;当 DOE 的特征尺寸大于 10 倍波长时,衍射光波的偏振耦合较弱,可忽略矢量光场的内部耦合效应,采用标量衍射理论来近似地计算衍射光波的分布。下面分别介绍矢量衍射理论的数值方法、标量衍射理论和等效介质理论。

## 2.1 矢量衍射理论的数值方法

当 DOE 的特征尺寸小于 10 倍波长时,光波的矢量性和偏振耦合相当复杂,必须求解严格的麦克斯韦方程组,求解方法可采用积分法和微分法等数值模拟方法:积分法主要包括有限元法(FEM)和边界元法(BEM)等;微分法主要有有限时域差分法(FDTD)和

收稿日期: 2023-02-15; 修回日期: 2023-03-07; 录用日期: 2023-03-14; 网络首发日期: 2023-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(61975014, U22A2079, 62035003)、北京市科委中关村管理委员会科技计划项目(Z211100004821012)

通信作者: \*juanliu@bit.edu.cn

严格耦合波法(RCWA)等。应用矢量衍射理论的数值模拟方法可以有效地分析人工材料、超结构、表面等离子体器件、光子晶体<sup>[7-8]</sup>和超表面<sup>[9]</sup>等多种新型微纳衍射元件的光学性能。虽然基于麦克斯韦电磁场理论的数值方法具有精度高的优点,但是计算时间长,除了极少数特殊应用情况,其很难用于微纳光学元件的直接设计。因此,本文将主要阐述基于标量衍射理论的DOE设计方法。

## 2.2 标量衍射理论

在DOE的特征尺寸远大于波长的情况(如DOE的特征尺寸大于10倍波长)下,可以不考虑矢量光场的偏振耦合性,只考虑单个线偏振光波的傍轴近似,采用标量衍射理论评估衍射光波分布,其优势在于计算量小、计算速度快。标量衍射理论的常用计算公式包括基于点源的基尔霍夫衍射积分公式和基于平面波源的平面波角谱理论等。

### 2.2.1 基于点源的标量衍射理论

图1为衍射问题模型的示意图,波长为 $\lambda$ 的入射光照射到衍射孔径 $\Sigma$ 上,输入光波复振幅分布为 $B(\xi, \eta)$ ,衍射孔径中衍射物体的复振幅透射系数为 $T(\xi, \eta)$ , $(\xi, \eta)$ 为输入面坐标, $d$ 为衍射孔径与输出面 $\Pi(x, y)$ 间的距离, $P(x, y)$ 为输出面上任意一个待考察点。

因此,在直角坐标系中,输出面考察点 $P$ 处的衍射场分布 $E(x, y)$ 按基尔霍夫积分公式可以表示为

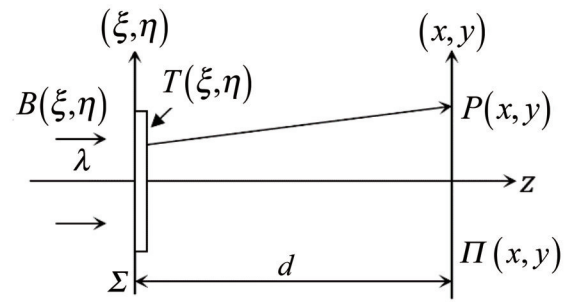


图1 衍射问题模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of diffraction problem model

$$E(x, y) = \frac{1}{j\lambda} \iint_{\Sigma} B(\xi, \eta) T(\xi, \eta) \frac{\exp(jkr)}{r} \left( \frac{\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2}{2} \right) d\xi d\eta, \quad (1)$$

式中: $k$ 为波矢大小; $r$ 为 $P$ 点到衍射物体的距离; $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别为输入光波矢和 $P$ 点与衍射物体的连线与衍射物体表面法线的夹角,傍轴近似条件下方向因子 $(\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)/2$ 近似为1。在实际计算中,由于 $r$ 的计算比较耗时,故可根据具体计算精度需求将式(1)在近场和远场分别简化为菲涅耳衍射和夫琅禾费衍射积分公式。

在菲涅耳衍射区中,满足条件 $d^3 \geq [(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2]^2 / (2\lambda)$ 的近场衍射积分公式为

$$E(x, y) = \frac{1}{j\lambda d} \exp\left[jk\left(d + \frac{x^2 + y^2}{2d}\right)\right] \times \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} B(\xi, \eta) T(\xi, \eta) \exp\left[j\frac{k}{2d}(\xi^2 + \eta^2)\right] \exp\left[-j\frac{k}{d}(x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta. \quad (2)$$

在夫琅禾费衍射区中,满足条件 $d \geq 2(\xi^2 + \eta^2)/\lambda$ 的远场衍射积分公式为

$$E(x, y) = \frac{1}{j\lambda d} \exp\left[jk\left(d + \frac{x^2 + y^2}{2d}\right)\right] \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} B(\xi, \eta) T(\xi, \eta) \exp\left[-j\frac{k}{d}(x\xi + y\eta)\right] d\xi d\eta. \quad (3)$$

菲涅耳衍射积分公式的计算可以简化为点扩散函数的卷积计算或傅里叶变换计算,夫琅禾费衍射积分公式的计算可以直接简化为傅里叶变换计算<sup>[10]</sup>。

基于点源的标量衍射理论积分公式在计算复杂结构(如曲面或任意起伏变化表面)时具有优势,对于输

入输出面的选取具有较高的灵活性,但计算速度仍需改善。

### 2.2.2 基于面源的标量衍射理论

基于面源的标量衍射理论同样可由图1所示的衍射问题模型的示意图来描述。输入面光波分布 $A(\xi, \eta)$  $[A(\xi, \eta) = B(\xi, \eta)T(\xi, \eta)]$ 被分解为一系列沿不同方向传播的三维简谐平面波,每一个平面波在自由空间沿 $z$ 轴方向按照传输因子 $\exp(jkz\sqrt{1-\lambda^2 f_{\xi}^2 - \lambda^2 f_{\eta}^2})$ 传输,由输出面上所有平面波综合可得出衍射图样的光波分布 $E(x, y)$ ,即

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A(\xi, \eta) \exp[-j2\pi(f_{\xi}\xi + f_{\eta}\eta)] d\xi d\eta \right\} \cdot \exp\left(jkz\sqrt{1-\lambda^2 f_{\xi}^2 - \lambda^2 f_{\eta}^2}\right) \cdot \exp\left[j2\pi(f_{\xi}x + f_{\eta}y)\right] df_{\xi} df_{\eta}. \quad (4)$$

基于面源的标量衍射理论可以快速地计算平面间的衍射分布,在计算分层处理的三维结构时具有优势。

### 2.3 等效介质理论

在 DOE 的特征尺寸远小于波长的情况(如小于 1/10 波长)下,光波的衍射效应很强,光波绕开衍射物体传输,就好像衍射物体不存在。整体效应等效于光波直接透过衍射物体传输,只是衍射物体折射率发生改变,而偏振效应可等效于双折射晶体的折射率效应,可采用等效介质理论评估衍射光波的分布,优势在于计算量小、计算速度快,在深亚波长光栅结构的设计和方面具有优势。等效介质理论也可以处理均匀周期和随机介质的衍射场分布。

## 3 衍射光学元件的设计和加工方法

设计 DOE 一般遵循以下流程:根据具体需求建立数学物理模型,包括建立具体问题的坐标系、设置边界条件与初始条件、选取恰当的光波衍射计算方法、选取合适的物理参量和建立各参量之间的关系等;确定优化方法并进行优化,包括选取优化算法、考虑极值条件、建立评价函数和设置满足条件等;根据加工方法优化设计结果,包括将设计的物理参量转化为结构的几何参量、根据工艺要求量化、评估误差容忍和反复优化设计参量等。

### 3.1 设计模型的建立

模型的建立是 DOE 设计的基础,建立合适模型的关键在于对实际问题进行合理假设,以兼顾模型的简洁性和准确性。首先,根据具体问题建立合适的坐标系,如直边孔径的衍射物体多选取直角坐标系、具有圆对称结构的衍射物体可选择极坐标系,以及三维结构的衍射物体可选择直角坐标系、柱坐标系或球坐标系等,与设计问题相适合的坐标系能大大简化运算过程,增加模型的简洁性并提高计算效率。然后,根据需求

确定设计过程中的初始条件和边界条件,初始条件和边界条件在设计过程中将决定解的形式,将在此初值的基础上对参量进行迭代或搜索优化,如关注的参量是振幅还是相位、哪些参量具有冗余的自由度和感兴趣的光场范围等,根据这些初始值和边界条件确定设计中的限制条件。接着,根据实际问题所需要的光波传播距离、计算精度和速度等选择光波的衍射计算方法,如两个平面之间的快速计算可选择基于面源的角谱理论、在非平面间的衍射计算可选择基于点源的基尔霍夫衍射积分公式。最后,选取合适的物理参量并建立各参量之间的关系。一般 DOE 设计中选取的物理参量通常为相位、振幅、偏振和光谱分布等可被调控的光场参量,一方面需要建立待设计参量和已知参量间的关联性,另一方面对于联合优化问题,需要明确各设计参量间的联系。

设计 DOE 的常用方法按照设计原理可归纳为基于衍射原理和基于干涉原理的优化设计方法两类。

#### 3.1.1 基于衍射原理的衍射光学元件设计问题

图 2 为衍射原理 DOE 的基本模型,波长为  $\lambda$  的入射光  $B(\xi, \eta)$  照射到输入面上,被输入面上复振幅透射系数为  $U_1(\xi, \eta) = A_1 \exp(j\varphi_1)$  的衍射物体调制,调制后的光波经过一定距离的衍射传输[等效于传输因子  $G(x, y, \xi, \eta)$ ]后在输出面上形成目标复振幅分布  $U_2(x, y) = A_2 \exp(j\varphi_2)$ ,其中  $A_l (l=1, 2)$  代表振幅,  $\varphi_l$  代表相位。 $U_1$  与  $U_2$  间的关系可以简化为

$$U_2(x, y) = \iint G(x, y, \xi, \eta) U_1(\xi, \eta) d\xi d\eta, \quad (5)$$

当传输系统和介质确定后,传输因子  $G(x, y, \xi, \eta)$  可用数学模型进行描述。在傍轴情况下,自由空间中的传输因子可以表示为

$$G(x, y, \xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda \sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2 + z^2}} \exp\left[jk \sqrt{(\xi-x)^2 + (\eta-y)^2 + z^2}\right]. \quad (6)$$

基于衍射原理的 DOE 设计要解决的是一个逆源设计问题,一般情况下输出面的振幅  $A_2$  和/或相位  $\varphi_2$  的分布是给定值或理想值(已知参量)。DOE 的设计

问题就是求解输入面上振幅  $A_1$  和/或相位  $\varphi_1$  的分布情况,具体保留求解振幅还是相位需要根据实际可加工的衍射元件来确定。由于基于衍射原理的 DOE 的逆源设计问题一般没有解析解,需要通过基于迭代或搜索的优化算法求最优解的方式来获得,因此选取高效获得最优解的优化算法是设计的关键。

#### 3.1.2 基于干涉原理的衍射光学元件设计问题

基于干涉原理的 DOE 设计可以通过逆向求解获得解析解。如图 3 所示,入射光  $B(\xi, \eta)$  经分束棱镜(BS)后分别被  $U_1(\xi, \eta)$  和  $U_2(\xi, \eta)$  调制,调制后的光返回 BS 后在输出面干涉形成复振幅分布  $H(x, y) = A(x, y) \exp[j\alpha(x, y)]$ ,其中  $A(x, y)$  和  $\alpha(x, y)$  分别为振幅和相位。

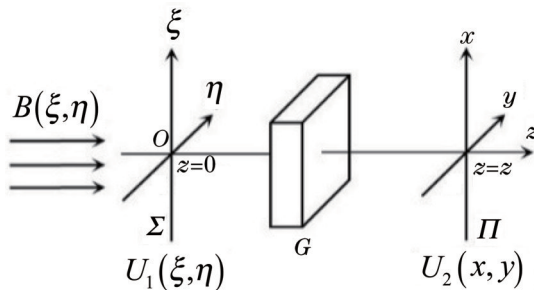


图 2 衍射设计方法的原理图

Fig. 2 Schematic diagram of diffraction design method

该设计问题可以归纳为:如果要想实现振幅或相位或复振幅分布  $H(x, y)$ , 如何求解  $U_1(\xi, \eta)$  和/或  $U_2(\xi, \eta)$  的纯相位或纯振幅或复振幅的分布? 该方法也可用于 DOE 的直接加工(实现任意 DOE 的加工)吗?

设计问题是已知  $H(x, y)$  中的  $A(x, y)$  和  $\alpha(x, y)$  求解  $U_1(\xi, \eta)$  和  $U_2(\xi, \eta)$  的逆向分解问题。加工问题是把相位或振幅分布编码为光强分布作为已知条件, 求解  $U_1(\xi, \eta)$  和  $U_2(\xi, \eta)$  的逆向分解问题。值得注意的是,  $U_1(\xi, \eta)$  和  $U_2(\xi, \eta)$  可以为纯振幅、纯相位或复振幅三种形式中的任意一种。

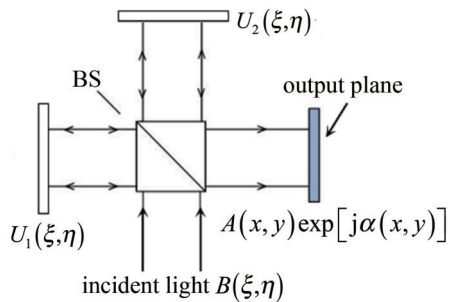


图 3 基于干涉原理设计方法的示意图<sup>[11]</sup>

Fig. 3 Schematic diagram of design method based on interference principle<sup>[11]</sup>

### 3.2 优化方法

优化方法的确定和实现是 DOE 设计的主体部分, 优化算法的选择很大程度上决定了最终设计指标的优劣, 通常需要考虑算法的收敛性、对初值的敏感程度、计算速度和解是否为全局最优等。有些基于迭代的算法需要建立设计参量与已知参量间的关系, 该关系可以通过极值条件推导得出, 如使用 Yang-Gu (YG) 算法时需要对相位求极值、使用共轭梯度算法时需要对步长求极值等。评价函数与具体应用的设计目标相关, 按照目标的唯一性可以分为单目标设计和多目标设计, 如聚焦 DOE 的设计中只需要考虑衍射效率为单目标设计、点阵生成 DOE 中需要同时考虑衍射效率和均匀性为多目标设计。多目标设计需要选取适当形式将多个性能指标整合到一个公式中, 并按经验或前期设计结果为多个指标分配不同的权重。通常考虑的满足条件为设计精度、最大迭代次数或最大搜索次数。

#### 3.2.1 基于衍射原理的衍射光学元件优化算法

DOE 的设计是已知输出面  $U_2(x, y)$  上的光场参量分布求解输入面  $U_1(\xi, \eta)$  上光场参量分布的逆源设计问题。理论上 DOE 可以同时振幅和相位进行调制, 由于复振幅型 DOE 加工目前难以实现和纯振幅型 DOE 衍射效率不高, 而纯相位型 DOE 易于加工且效率可接近 100%, 故其是研究最多也是应用最广泛的 DOE。下面主要介绍纯相位型 DOE 的优化算法, 复

振幅型 DOE 的一些典型实现方式在随后进行简要介绍。DOE 优化设计算法主要可以分为迭代法和搜索法两种: 常见的迭代法有 Gerchberg-Saxton (GS) 算法、YG 算法和共轭梯度算法等; 常见的搜索算法有爬山算法、模拟退火 (SA) 算法和遗传算法 (GA) 等。近年来, 深度学习算法也被用于 DOE 的设计和 optimization。下面介绍几种常用算法, 并对其性能进行简单的对比。

GS 算法<sup>[12]</sup>是 Gerchberg 和 Saxton 于 1972 年提出的一种迭代优化算法, 基于傅里叶正/逆变换, 结合输入输出面上光场分布的限制条件进行迭代以完成 DOE 相位分布的设计, 也被称为迭代傅里叶算法。由于 GS 算法无需对参量求极值, 故优化速度快且迭代简单, 在 DOE 设计中被广泛采用。然而, 该算法只适用于幺正光学变换系统, 同时对初始条件敏感且易陷入局部最优, 后来的研究者在此基础上进行了改进, 发展出了各种混合算法、“不关心”区域算法和添加扰动修正的算法等用于提升算法的适用范围和优化效果。

YG 算法<sup>[13]</sup>是杨国桢和顾本源于 1982 年提出的一种更普适的迭代优化算法, 其将相位恢复问题归结为对相位求极值的问题, 通过对约束/非约束相位的极值求解, 再采用套叠迭代优化方法, 可求得 DOE 的相位分布。YG 算法适用于幺正和非幺正变换光学系统, 能够快速逼近最优解, 在实际应用中所得设计结果最接近真实值。

爬山算法是一种局部优化的搜索算法, 其将初始相位分布与扰动相位分布中评价函数更优的相位分布保留, 并在无法找到更优解时停止。该算法无需推导参量极值, 但对初值敏感且易陷入局部最优解。

SA 算法<sup>[14]</sup>是一种全局优化搜索算法, 可以模拟固体退火加热再缓慢降温的过程。该算法以一定概率接受恶劣解, 加热时接受恶劣解的概率高, 有更高的概率跳出局部极值点, 在缓慢降温的过程中接受恶劣解的概率也逐渐降低, 最终在终止温度下可以得到稳定的全局最优解。该算法不需要推导参量间的公式且稳定性好, 但收敛速度慢。

GA 算法<sup>[15]</sup>是一种模拟生物进化过程的全局搜索算法, 通过计算评价函数舍弃不满足条件的解, 再对优解进行“染色体”的交叉、变异从而得到一组新解, 重复上述过程可得到满足评价函数精度要求的解。该算法基于概率规则, 最大程度降低了参数对搜索效果的影响。同时, 该算法基于群体搜索, 避免了陷入局部最优解, 具有并行性和全局搜索性。然而, 该算法难以全面表现优化问题的约束, 存在进化过程缓慢的问题。

深度学习法<sup>[16]</sup>设计 DOE 一般分为两步: 对给定的训练集中的目标信息和相位分布进行学习训练, 以计算输出层的相位分布和训练集中期望值相位分布的均方差作为反馈, 不断优化网络中各个层的权重, 得到训练后的模型; 基于已经训练好的网络, 根据目标光场强度分布获得 DOE 的相位分布。此类算法计算速度快且

结果准确,存在的问题为需要的训练时间较长、有些问题的训练数据集难以获取和过于依赖训练数据集等。

各种设计算法各有特点,它们的优势和局限对比见表 1。

表 1 常见设计算法对比  
Table 1 Comparison of common design algorithms

Algorithm	Type	Characteristic of solution	Advantage	Limitation
GS algorithm	Iteration	Local optimum	High calculation speed, simple structure	Sensitive to initial conditions, only applicable to unitary optical transformation system
YG algorithm	Iteration	Local optimum	High calculation speed, suitable for any optical transformation system	Sensitive to initial conditions
Hill-Climbing algorithm	Search	Local optimum	Simple structure	Sensitive to initial conditions, low calculation speed
SA algorithm	Search	Global optimum	Simple structure, strong robustness	Slow convergence, sensitive to parameter
Genetic algorithm	Search	Global optimum	Parallel operation	Slow evolution, premature convergence
Deep learning	Learning	Global optimum	Accurate results, high calculation speed	Long training time, sensitive to training data

由于迭代算法存在对初始条件敏感、容易陷入局部最优解的问题,而搜索算法存在计算量大、收敛速度慢的问题,因此 DOE 的优化设计常采用基于上述基础算法的改进算法<sup>[17-18]</sup>或基于上述多种算法的混合算法<sup>[19-20]</sup>来降低基础算法劣势的影响或综合发挥各个算法的优势。

### 3.2.2 基于干涉原理的衍射光学元件设计算法

根据图 3 所示的基于干涉原理的 DOE 设计模型和提出的设计问题,描述不同情况下 DOE 的设计算法。

#### 1) 两个纯相位光学元件的设计

该情况下,  $U_1(\xi, \eta)$  和  $U_2(\xi, \eta)$  是纯相位分布, 则  $U'_1(x, y) = \text{FrT}\{\exp[j\varphi_1(\xi, \eta)], z\}$ ,  $U'_2(x, y) = \text{FrT}\{\exp[j\varphi_2(\xi, \eta)], z\}$ , 其中  $\text{FrT}(\cdot)$  为平行近似下的菲涅耳衍射或夫琅禾费衍射函数,  $z$  是  $U_1(\xi, \eta)$  或  $U_2(\xi, \eta)$  到  $H(x, y)$  平面的距离。设计需要满足  $A(x, y)\exp[j\alpha(x, y)] = U'_1(x, y) + U'_2(x, y)$ , 因此待设计的相位分布  $\varphi_1(\xi, \eta)$  和  $\varphi_2(\xi, \eta)$  可以表示为

$$\begin{cases} \varphi_1(\xi, \eta) = \text{ang}(\zeta) \pm \arccos \frac{|\zeta|}{2} \\ \varphi_2(\xi, \eta) = \text{ang}\{\zeta - \exp[j\varphi_1(\xi, \eta)]\} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\zeta = \text{FrT}^{-1}\{A(x, y)\exp[j\alpha(x, y)]\}$ , 其中  $\text{FrT}^{-1}(\cdot)$  为平行近似下的逆向菲涅耳衍射或逆向夫琅禾费衍射函数;  $\text{ang}(\cdot)$  为求幅角函数。因为相位  $\varphi_1(\xi, \eta)$  和  $\varphi_2(\xi, \eta)$  是解析得到的, 所以两束光干涉时可以精确得到  $A(x, y)\exp[j\alpha(x, y)]$ 。

#### 2) 两个纯振幅光学元件的设计

如果  $U_1(\xi, \eta)$  和  $U_2(\xi, \eta)$  是纯振幅分布, 则  $U'_1(x, y) = \text{FrT}\{A_1(\xi, \eta), z\}$  和  $U'_2(x, y) = \text{FrT}\{jA_2(\xi, \eta), z\}$ 。设计需要满足  $A(x, y)\exp[j\alpha(x, y)] = U'_1(x, y) + U'_2(x, y)$ , 因此待设计的振幅分布  $A_1(\xi, \eta)$  和  $A_2(\xi, \eta)$  可以表示为

$$\begin{cases} A_1(\xi, \eta) = |\zeta| \cos[\text{ang}(\zeta)] \\ A_2(\xi, \eta) = |\zeta| \sin[\text{ang}(\zeta)] \end{cases} \quad (8)$$

因为振幅  $A_1(\xi, \eta)$  和  $A_2(\xi, \eta)$  是解析得到的, 所以两束光干涉时可以精确得到  $A(x, y)\exp[j\alpha(x, y)]$ 。需要注意的是,  $A_1(\xi, \eta)$  和  $A_2(\xi, \eta)$  均包含负值, 如果要加载到振幅型空间光调制器上还需要给原始波前叠加一个平移因子, 使得平移后的振幅分布均为正值, 且在  $A_2(\xi, \eta)$  所在的光路中需要加玻片等光学元件使其相对  $A_1(\xi, \eta)$  有  $\pi/2$  的相位延迟。

#### 3) 两个复振幅分布的光学元件设计

如果  $U_1(\xi, \eta)$  和  $U_2(\xi, \eta)$  是复振幅分布, 则  $U'_1(x, y) = \text{FrT}\{A_1(\xi, \eta)\exp[j\varphi_1(\xi, \eta)], z\}$  和  $U'_2(x, y) = \text{FrT}\{A_2(\xi, \eta)\exp[j\varphi_2(\xi, \eta)], z\}$ 。设计需要满足  $A(x, y)\exp[j\alpha(x, y)] = U'_1(x, y) + U'_2(x, y)$ , 因此待设计的复振幅分布  $A_1(\xi, \eta)\exp[j\varphi_1(\xi, \eta)]$  选定后,  $A_2(\xi, \eta)\exp[j\varphi_2(\xi, \eta)]$  可以表示为  $A_2(\xi, \eta)\exp[j\varphi_2(\xi, \eta)] = \zeta - A_1(\xi, \eta)\exp[j\varphi_1(\xi, \eta)]$ , (9)

因为复振幅分布是解析得到的,所以两束光干涉时可以精确得到  $A(x, y)\exp[j\alpha(x, y)]$ 。

4) 一个振幅元件和一个相位元件的设计

如果  $U_1(\xi, \eta)$  为振幅分布和  $U_2(\xi, \eta)$  为相位分布, 则  $U_1'(x, y) = \text{FrT}\{A_1(\xi, \eta), z\}$ ,  $U_2'(x, y) = \text{FrT}\{\exp[j\varphi_2(\xi, \eta)], z\}$ 。设计需要满足  $A(x, y)\exp[j\alpha(x, y)] = U_1'(x, y) + U_2'(x, y)$ , 因此待设计的振幅和相位分布  $A_1(\xi, \eta)$  和  $\varphi_2(\xi, \eta)$  可以表示为

$$\begin{cases} A_1(\xi, \eta) = |\zeta| \\ \varphi_2(\xi, \eta) = \text{ang}(\zeta) \end{cases} \quad (10)$$

因为振幅和相位分布  $A_1(\xi, \eta)$  和  $\varphi_2(\xi, \eta)$  是解析得到的, 所以两束光干涉时可以精确得到  $A(x, y)\exp[j\alpha(x, y)]$ 。如果要实现任意 DOE 的加工, 仅需将所需相位分布线性编码为强度分布, 其他与第一种设计问题完全相同。

### 3.3 加工前优化

为了将设计的 DOE 加工出来, 并使加工后各项指

标满足设计要求, 在上述设计结果的基础上还需要针对加工工艺的要求和限制对 DOE 进行进一步优化。首先, 需要将设计的物理参量转化为能在介质中加工的几何结构或折射率结构分布, 如微结构的高度可以与相位调制量间建立转化关系, 从而将设计的相位分布转化为基底上的浮雕结构。其次, 一些加工方法由于工艺限制无法加工连续的结构, 故需要将原有的设计进行量化, 并在后续优化过程中尽可能降低量化给 DOE 指标带来的影响。此外, 加工过程中会存在高度、倾斜度和对准等多方面的误差, 故优化时还应考虑性能指标对误差的容忍度, 以使加工后 DOE 的指标最大限度满足要求。

### 3.4 衍射光学元件辅助设计工具

一般情况下, DOE 的设计利用上述的原理和算法编制设计程序, 根据具体设计任务编制的程序针对性强, 但需要设计人员熟悉原理和算法。对于初学者, 也可以借助现有的光学设计软件来完成。表 2 是几种光学设计软件的原理、功能和特点。软件中集成的算法经过了开发者反复的研究和优化, 计算速度通常比设计者自行编制的程序运行效率更高, 但针对性不强, 往往不能满足特殊的需求或达不到预期的效果。

表 2 几种 DOE 辅助设计软件  
Table 2 Common auxiliary tools for designing DOE

Software	Developer	Principle	Major function	Characteristic
Virtuallab Fusion	Jena University, Germany	Diffraction and interference of light	Component and system design for imaging, detection and shaping	Solver integrating geometry and wave optics
DOE Master	Light Soft, America	Diffraction and interference of light	Design of DOE	Multiple optimization algorithms, design cascade DOE
Diffraction Tools @ BIT	Beijing Institute of Technology, China	Diffraction, interference and polarization of light	Design of micro-optics and DOE	Multiple design modules, joint optimization of complex optical systems

本文选取 Diffraction Tools@BIT 为例, 对其原理、特点进行简要介绍, 并结合具体设计实例说明该设计工具的主要功能。Diffraction Tools@BIT 是在北京理工大学衍射光学实验室二十多年算法积累的基础上研发的一款波动光学软件, 该软件具有光源模块、传输模块、逆向设计模块、光栅分析模块和微纳超颖应用模块等多个设计模块, 能实现干涉、衍射、散射和像差效应的建模。如图 4 所示, 该软件可以单独设计并分析 DOE<sup>[21]</sup>, 也可以结合多个设计模块对含有 DOE 的复杂光学系统进行联合优化分析<sup>[22]</sup>。

### 3.5 衍射光学元件的加工方法

由于 DOE 设计需要考虑加工误差, 因此将常见加工方法的特点和误差来源总结在表 3 中, 其中 DMD 为数字微镜器件。按照加工过程是否使用掩模可将前 5 类分为有掩模方式, 而后 7 类分为无掩模方式: 有掩模的技术通常会存在加工周期长和成本高等问题, 需要

投影系统的加工技术通常会有设备昂贵、需要校正误差等问题; 无掩模方式中逐点写入的方法通常存在写入时间长的问题。此外, 激光干涉光刻(全息干涉光刻)可用于非周期结构的制作, 尤其是对基于干涉原理设计的 DOE 进行加工<sup>[11, 21, 23-25]</sup>。

## 4 衍射光学元件优化设计的应用实例

DOE 设计与应用关系密切, DOE 的功能一般包括光场调控、波前调制、光谱调制和成像等。

### 4.1 光场调控

光场调控是 DOE 的一个重要应用方向, 典型的光场调控应用包含对光的强度空间分布横向独立调制、纵向独立调制和横纵向同时调制, 以及偏振光场的不同偏振态分别或同时强度调制。

光场的横向强度调制主要包含光束整形、辐射聚焦和阵列发生等应用。光束整形技术主要针对高斯光

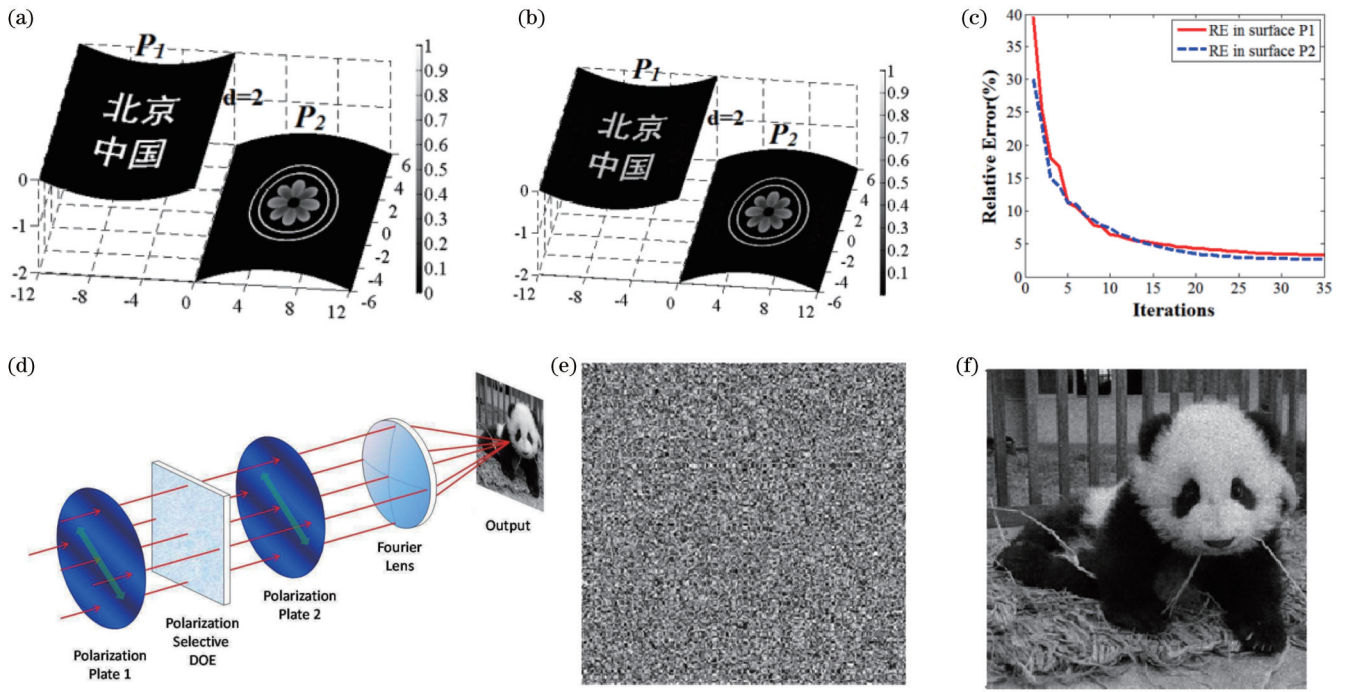


图 4 Diffraction Tools @ BIT 设计实例<sup>[21-22]</sup>。(a)原始图像的强度分布;(b)重建图像的强度分布;(c)重建误差随迭代次数的变化曲线;(d)含有偏振 DOE 的光学图像解密系统装置;(e)设计的偏振 DOE 的表面浮雕图样;(f)解密图像

Fig. 4 Design examples of Diffraction Tools @ BIT<sup>[21-22]</sup>. (a) Intensity distribution of original image; (b) intensity distribution of reconstructed image; (c) reconstruction error varying with number of iterations; (d) optical setup of image decryption system with polarization DOE; (e) designed surface relief pattern of polarized DOE; (f) decryption image

表 3 DOE 加工方式对比

Table 3 Comparison of DOE processing methods

Fabrication method	Mask	Projection system	Point-by-point method	Source of error
Binary mask lithography <sup>[26]</sup>	✓	×	×	Mask alignment, line width, depth
Grayscale mask lithography <sup>[27-28]</sup>	✓	×	×	Nonlinear error
Thin film deposition technology <sup>[29]</sup>	✓	×	×	Mask alignment, coating thickness
Particle beam projection lithography <sup>[30]</sup>	✓	✓	×	Mask displacement, mask deformation, particle scattering
Sub-wavelength holographic lithography <sup>[31-35]</sup>	✓	×	×	Holographic mask calculation, mask alignment
Diamond turning <sup>[36]</sup>	×	×	✓	Residual knife mark, surface profile
Particle beam direct writing lithography <sup>[37-38]</sup>	×	×	✓	Proximity effect, substrate location, processing environment
Imprint <sup>[39-40]</sup>	×	×	×	Mold, viscous deformation, elastic deformation
Injection molding <sup>[41]</sup>	×	×	×	Mold, viscous deformation, elastic deformation
Digital lithography <sup>[42-46]</sup>	×	×	×	Discrete of DMD pixel elements, illumination uniformity
Femtosecond laser direct writing <sup>[47-49]</sup>	×	×	✓	Mechanical displacement, proximity effect
Laser interference lithography <sup>[50-53]</sup>	×	×	×	Material nonlinearity, loss of high frequency

束在激光加热<sup>[54]</sup>、激光加工<sup>[55]</sup>等应用中的需求,将高斯光束整形为均匀的平顶光束。目前,光束整形可以使用非球面透镜组系统<sup>[56]</sup>、微透镜阵列整形系统<sup>[57]</sup>等,但多个元件的使用在能量利用率和加工装调等方面存在

问题,通过将高斯光场分布的 DOE 变换为 sinc 函数分布<sup>[58]</sup>或超高斯分布<sup>[59]</sup>的 DOE 可以在一定程度避免上述问题。使用零填充或区域填充<sup>[60]</sup>的方法能在设计过程中有效抑制散斑噪声引起的光束质量下降。

阵列发生 DOE 可以将一束光分成一维或二维的光束阵列<sup>[61-62]</sup>,在光计算、光互连和集成光学中有广泛的应用。李彦锦等<sup>[63]</sup>将可分束 DOE 应用于超快成像中,实现了全光分幅成像。辐射聚焦 DOE 将入射光聚焦成预定的图案<sup>[64-65]</sup>,如点、环、字符和符号等,广泛应用于激光加工、微粒操控和激光外科手术等领域中。

Siemion 等<sup>[66]</sup>基于纸制二元相位 DOE 实现了太赫兹波段的图案生成。Lee 等针对阵列光源提出了 DOE 直流降噪技术。如图 5 所示, Buske 等<sup>[67]</sup>的工作不限于使用单层 DOE 对光场进行调制,基于神经网络训练算法设计了多个级联 DOE,可对多个目标平面的复杂目标场分布进行优化。

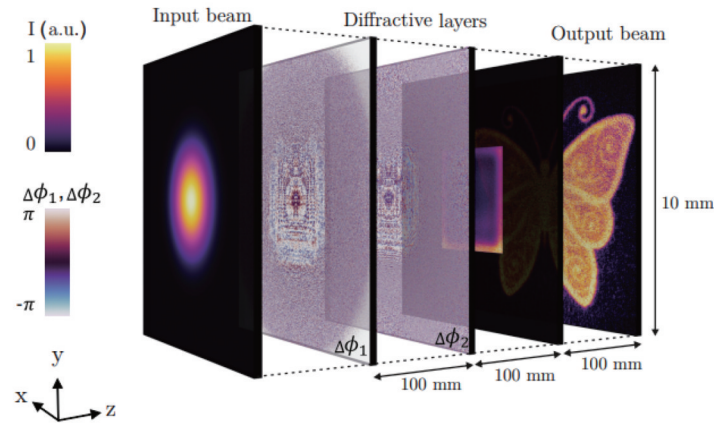


图 5 双 DOE 双输出平面的示意图<sup>[67]</sup>

Fig. 5 Schematic diagram of two DOE and two output layers<sup>[67]</sup>

将多层 DOE 进行级联或对 DOE 进行编码,也可以在光计算和光互连中实现复杂的光束变换和控制,是 DOE 在集成光学和信息处理领域中很有潜力的发展方向。Chang 等<sup>[68]</sup>在混合光电卷积神经网络的电子计算之前引入了基于 DOE 的光学卷积层,提高了图像分类任务的性能,同时显著节省了计算成本。Lin 等<sup>[69]</sup>通过图 6 所示的多层 3D 打印的 DOE 实现了衍射

深度神经网络,最终通过强度分布实现了手写数字的分类。Yan 等<sup>[70]</sup>将这一思路发展到傅里叶域中。用于上述系统的 DOE 在设计中的关键是将神经网络的偏置系数编码为 DOE 的复振幅调制函数,主要面临的问题是特征尺寸与波长的匹配和非线性的引入,优势在于 DOE 的衍射特性和并行性提高了计算的速度和信号处理的准确性。

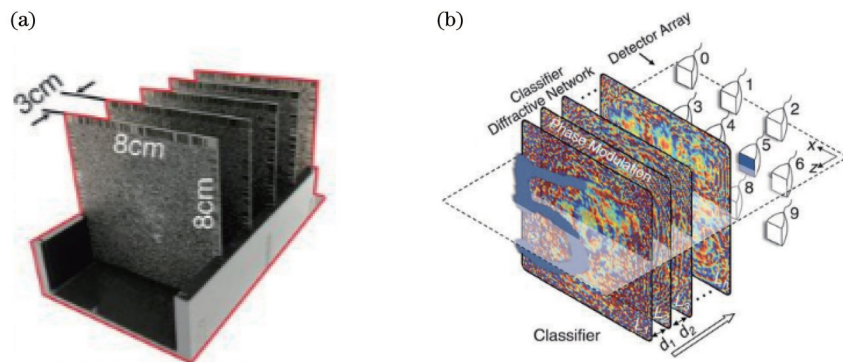


图 6 基于 DOE 的衍射深度神经网络<sup>[69]</sup>。(a) 3D 打印的 DOE; (b) 级联 DOE 实现手写数字分类的原理图

Fig. 6 Diffraction deep neural network based on DOE<sup>[69]</sup>. (a) DOEs manufactured by 3D printing; (b) schematic diagram of cascaded DOEs for handwritten digit classification

此外,随着集成电路尺寸的缩小,极紫外(EUV)光刻技术成为了取代当前深紫外(DUV)光刻技术的可能方向。因此,EUV 光刻掩模作为一种基于 Mo/Si 多层膜的反射式 DOE<sup>[71]</sup>,也是 DOE 横向调制的一个重要应用场景。由于大多数物质在 EUV 波段具有强吸收作用,因此 EUV 系统需要真空环境和反射式掩模 DOE,这些需求使 EUV 光刻掩模 DOE 的设计面临许

多挑战。在设计优化方法方面,研究人员开发了多种方法来减少光学近邻效应、杂散光效应、光刻胶与掩模阴影效应对图像质量的影响。Ma 等<sup>[72]</sup>开发了一种基于梯度的逆向设计算法,应用基于块的方法迭代优化掩模图案的主要特征和子分辨率辅助特征,通过基于校正阴影模型的重定向方法来补偿掩模阴影效应。为了减轻禁止间距(FP)效应的影响, Ma 等<sup>[73]</sup>提出了一



种基于遗传算法的掩模优化方法,分别在水平和垂直方向上改善了工艺窗口。在仿真速度提升方面,为了满足大面积掩模图形优化与缺陷补偿对仿真速度的需求,张恒等<sup>[74]</sup>对掩模吸收层和多层膜分别建模,实现了对整体掩模衍射谱的仿真,在不影响仿真精度的条件下速度提升了 80 倍。为了加快矢量衍射理论数值方法的仿真速度,Tanabe 等<sup>[75]</sup>开发了对掩模 DOE 进行严格电磁模拟的卷积神经网络,并提出了数据增强技术以减少训练时间。此外,EUV 光刻掩模的缺陷检测<sup>[76]</sup>和补偿在实际系统应用中也十分重要,可参考相关综述<sup>[77]</sup>。

光场的纵向调制是指使光场在沿光轴方向的强度分布按特定目标被调控,纵向强度调制主要包括多焦点和长焦深的调制。菲涅耳波带板(FZP)是一种简单的纵向强度调制元件,其在光轴上可产生许多级次的焦点<sup>[78]</sup>。此外,FZP 区别于以玻璃为基底的光学元件的一大特点是能对 X 光和 EUV 光进行聚焦,故其在 X 射线显微术<sup>[79]</sup>、X 射线天文学和 X 射线干涉测量<sup>[80]</sup>等领域中有广泛的应用。光子筛和 FZP 设计原理相似,

只是将透光的波带改成位置满足一定条件的透光微孔,它同样能对 X 射线和 EUV 光进行聚焦和成像,且与 FZP 相比,其聚焦光斑更小、旁瓣抑制效果更好,可应用于高分辨显微术<sup>[81]</sup>、光谱学和光刻机<sup>[82]</sup>中。与 FZP 不同,多焦透镜可控制多个焦点在轴上的位置和光强<sup>[83-84]</sup>,在医用内窥镜和条码扫描仪等应用中可以更合理地使用光能。

DOE 可在一段纵向区域中同时实现高横向分辨率和均匀轴向光强分布,在轮廓测量和显微成像方面具有应用价值。实现长焦深、高分辨率的聚焦光斑的方式包括组合不同焦距的菲涅耳透镜的相位<sup>[85]</sup>、基于有限时域差分方法设计二元亚波长元件<sup>[86]</sup>、通过迭代优化算法设计轴棱镜相位<sup>[87]</sup>和基于差分二次曝光设计皮米梳<sup>[88]</sup>等。图 7 为设计产生超高宽高比波束 DOE 的算法流程图<sup>[89]</sup>,通过在改进的迭代傅里叶变换算法中引入 Zernike 多项式来生成超高宽高比波束,该 DOE 能产生横向超分辨率光斑,并通过旁瓣抑制实现了 1602:1 的超高纵横比,在超分辨率成像或精密制造等领域中具有潜在的应用前景。

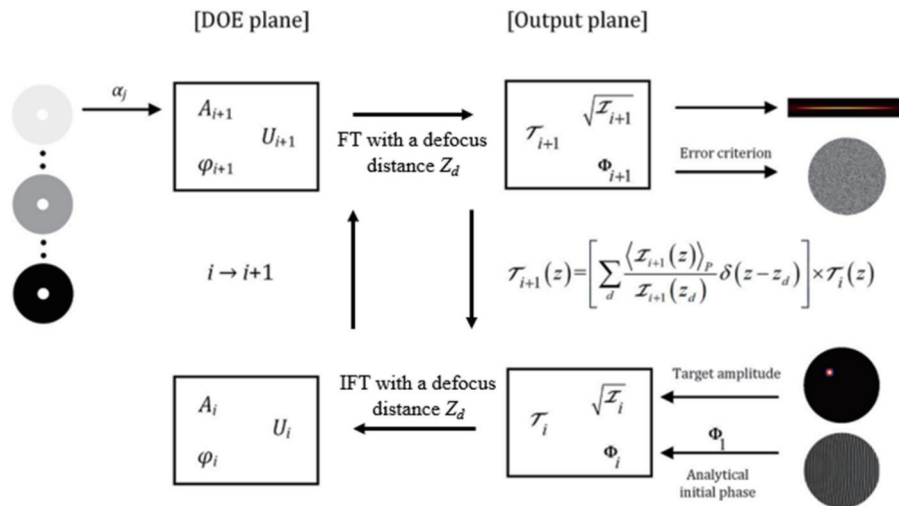


图 7 设计能产生超高宽高比波束 DOE 的算法流程图<sup>[89]</sup>

Fig. 7 Algorithm flow chart for designing DOE that can generate beam with ultrahigh aspect ratio<sup>[89]</sup>

经过适当设计的 DOE 也可以同时调制横向和纵向的光强分布,其中生成空间三维点阵是一种典型的需求,可应用于 3D 显微及全息立体显示等领域中。为实现空间三维点阵,可采用结合 Dammann 光栅和 Dammann 波带片<sup>[90]</sup>,以及设计广义 Fibonacci 光子筛<sup>[91]</sup>等方法,生成的点阵在 3D 激光写入、3D 显微测量<sup>[92]</sup>和 3D 光学存储等方面有潜在的应用。

上述 DOE 主要通过入射光的振幅或相位进行调制来实现目标光强分布。除此之外,对入射光不同偏振分量进行调制也可以产生不同的目标光场分布。在各向异性材料中,寻常光 o 光和异常光 e 光具有不同的折射率,故通过时会产生不同的相位延迟,即对不同偏振的入射光可以产生不同的调制。对各向异性材料

偏振 DOE 的研究一方面是应用其光偏振特性提高系统性能<sup>[93]</sup>,另一方面是结合材料制备偏振敏感的 DOE<sup>[94]</sup>。当在各向同性材料中制作特征尺寸与光波长可比拟的 DOE 结构时,必须采用严格的矢量衍射理论进行分析<sup>[95-96]</sup>,由于形状双折射或人工双折射效应,DOE 的衍射会出现偏振特性,因此用各向同性材料也可以设计和制作调制偏振光场的 DOE。

#### 4.2 波前调制

基于相位调制的非球面波前生成技术是一种对波前进行调制的技术,它在非球面检测干涉仪等领域中具有重要的应用<sup>[97]</sup>。Liu 等<sup>[98]</sup>提出了一种基于计算全息图波前调制的大口径非球面检测系统。在球形参考面上制作了计算全息图,可以生成与被测非球面面形

匹配的非球面波前,经计算全息图直接反射形成的参考光束与经待测面反射通过计算全息图的测量光束发生干涉,通过干涉条纹实现非球面面形的检测。

通过相位调制生成艾里光束、涡旋光束等新型光束也是一种典型的波前调制,生成的光束在非接触式微粒操纵<sup>[99]</sup>等领域中具有重要的应用。朱一帆等<sup>[100]</sup>使用优化设计的 DOE 代替反射腔镜,实现了圆对称艾

里光束的腔内生成。这种光束具有自聚焦特性,故其在激光加工、光学微操作等领域中具有广阔的应用前景。为了生成在微加工等领域中有重要应用的自旋光束,Niu 等<sup>[101]</sup>提出了一种基于多个纯相位型全息图的光束生成方法。调节 DOE 透射函数中的参数可以实现可控的自旋光束,得到的 DOE 相位分布和不同出射距离处的自旋光场分布如图 8 所示。

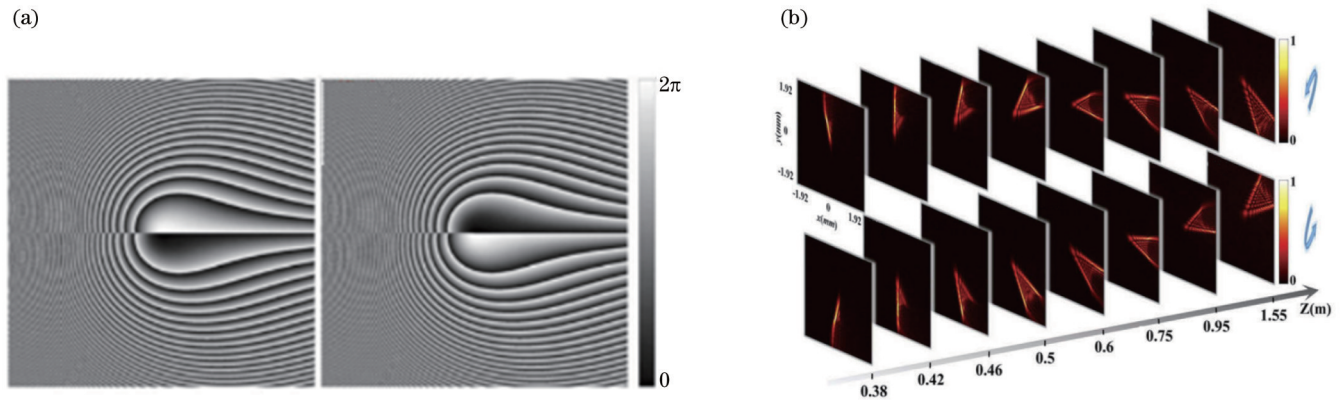


图 8 实现可控自旋光束的 DOE<sup>[101]</sup>。(a) DOE 相位分布;(b) 不同出射距离处的自旋光场分布图

Fig. 8 DOE that can realize controllable spin beam<sup>[101]</sup>. (a) DOE phase distribution;(b) spin light field distribution at different exit distances

### 4.3 光谱调制

DOE 除了能应用于对光强、相位和偏振的调制外,其对光谱的调控在各种多波长光学系统中也有重要的应用。

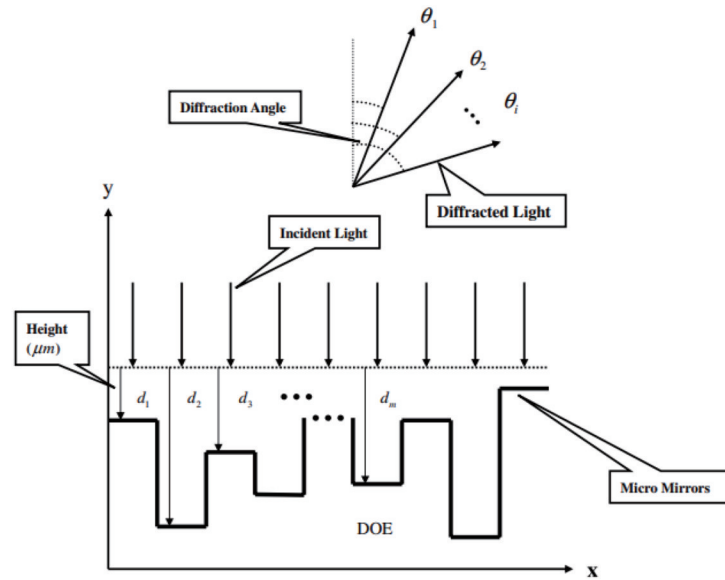
为了同时对入射光波实现波长解复用和空间聚焦,研究人员进行了许多相关工作。Dong 等<sup>[102]</sup>基于振幅相位恢复的一般理论设计并制作了对三个不同波长光束进行解复用并将每个分量同时聚焦在预定位置的 DOE。该设计方法可针对任意波长设计任意的聚焦图案,具有较强的灵活性和通用性。为同时实现对光波的空间解复用和光谱合成,Sun 等<sup>[103]</sup>使用共轭梯度算法设计了一种如图 9 所示的 DOE,在 30°、45°和 60°三个不同衍射角处同时实现了三个不同的衍射光谱,可应用于各种光学系统中的波分复用器和阵列波导等元件中。为对宽光谱入射光进行分离和集中,Gün 等<sup>[104]</sup>提出了一种通过波前整形对宽带光进行光谱分割和集中的实验方法。使用纯相位空间光调制器来调制白光,能够将红、绿和蓝三个频带的光分割并集中到两个目标点。该方法将优化的相位图案转换为可以大规模和低成本制造的 DOE,比基于计算的方法快大约 300 倍。Xu 等<sup>[105]</sup>提出了一种用于光谱分离和光束集中 DOE 设计的通用方法。该设计方法提高了光学聚焦效率,且设计波长的焦点位置可以是任意的。所设计的 DOE 在太阳能电池系统中具有重要应用。

### 4.4 成像

DOE 除上述功能外,在成像光学系统中也具有重要的功能。主要体现在折衍混合系统中成像质量<sup>[106]</sup>

与热稳定性的提升、偏振成像与全息光学元件(HOE)在增强现实(AR)显示系统中的应用。

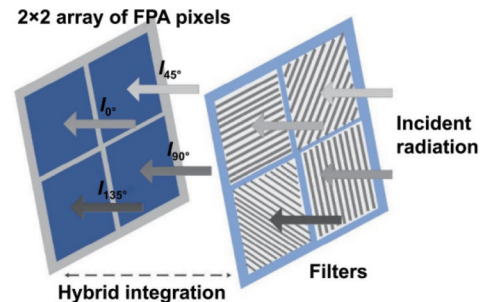
DOE 具有与材料无关的负向色散特性,可以与传统的折射光学元件组合,通过在折射元件表面刻蚀微结构实现光学系统消色差<sup>[107-108]</sup>。利用 Zemax 优化 DOE 在折衍混合系统中的位置,可对系统的球差、慧差和像散等其他像差进行校正<sup>[109]</sup>。上述单层衍射光学元件只能在给定的设计波长处达到较高的衍射效率。为了适应光学系统在宽谱段中的应用需求,DOE 的形态被扩展到双层甚至多层,由此引入每一层的高度和材料作为额外的变量给 DOE 的设计带来新的自由度。Zhang 等<sup>[110]</sup>提出了一类基于多层衍射光学元件(MLDOE)的中波红外和长波红外双频变焦透镜。通过合理选择衬底材料得到了结构简单、色差校正的混合双波段红外变焦镜头。由于 DOE 依赖微结构高度分布引入不同光程变化来实现对入射光的调制,热效应引起的高度变化将导致成像质量下降,当光学系统被应用于红外波段时热效应比其他波段更明显,因此对 DOE 进行消热差设计在红外折衍混合光学系统中十分必要。DOE 与折射光学元件具有不同的温度特性,其焦距的变化只由材料的膨胀系数决定,而与温度变化导致的折射率变化无关<sup>[111]</sup>。为降低环境温度对 DOE 应用的限制,通过以多色积分衍射效率为设计目标<sup>[112]</sup>、选择基底材料<sup>[113-114]</sup>等方式可以设计消热差的 DOE,进而提高成像系统的成像质量。Mao 等<sup>[115-118]</sup>在设计 MLDOE 时除了考虑波段外,还考虑了入射角度和温度对衍射效率的影响,该设计提高了 MLDOE 在

图 9 用于实现光谱分离的 DOE<sup>[103]</sup>Fig. 9 DOE for spectral separation<sup>[103]</sup>

宽波段、大角度、宽温度范围情况下的衍射效率,对实际混合成像光学系统的优化设计具有重要意义。传统折射光学元件的折射率随温度变化,这会导致焦距等光学性能发生改变。田晓航等<sup>[119]</sup>利用 MLDOE 实现了对双波段系统的消色差设计。此外,仿真折衍混合系统需要进行大量的计算,Low 等<sup>[120]</sup>将超薄 DOE 连接到折射光学元件上,在不牺牲分辨率和精度的情况下实现了折衍混合系统的模拟。

偏振成像系统可更好地反映目标信息,在图像识别<sup>[121]</sup>等领域中具有广泛的应用。偏振成像通过目标多个偏振状态下的强度信息解算出偏振信息,亚波长 DOE 可用于这一过程。为充分发掘被观察物体的隐藏信息,Sun 等<sup>[122]</sup>提出了一种用于偏振成像的亚波长金属偏振光栅阵列。基于有限时域差分法设计优化了金属铝层的厚度和占空比,偏振 DOE 在全可见光波段的能量利用率大于 45%,消光比大于  $3.5 \times 10^3$ ,能够满足偏振成像的需求。为实现白光的偏振成像,Noda 等<sup>[123]</sup>提出了一种基于双偏振光栅和楔形棱镜的白光圆偏振成像技术。利用偏振光栅对入射光左旋圆偏振光和右旋圆偏光成像,通过两个周期不同的偏振光栅补偿单个偏振光栅存在的色散,并配合楔形棱镜实现了白光强度成像和偏振成像。为增强偏振成像的对比度,Feng 等<sup>[124]</sup>实现了一种偏振滤波器阵列。如图 10 所示,基于光栅的偏振 DOE 被精确集成在近红外光电探测器焦平面阵列上,通过检测物体的特定偏振状态,增强了系统从明亮背景中区分物体的能力。

HOE 中的体全息光学光栅 (VHG) 具有波长和角度选择性,是波导式近眼显示<sup>[125-126]</sup>、极筒式近眼显示<sup>[127-128]</sup>和抬头显示 (HUD)<sup>[129-130]</sup>等 AR 成像系统中颇具潜力的技术方案。设计用于上述成像系统的 HOE

图 10 偏振滤波器阵列和焦平面阵列传感器<sup>[124]</sup>Fig. 10 Polarization filter array and focal plane array sensor<sup>[124]</sup>

时像差校正需要重点考虑的问题,像差的分析方法主要有利用光学设计软件进行光线追迹<sup>[131-133]</sup>、应用波前传感器对像差进行直接探测<sup>[134]</sup>和根据 Kogelnik 耦合波理论<sup>[135]</sup>或薄透镜像差理论<sup>[136-138]</sup>进行公式推导等。上述像差可以通过在记录光路中对波前引入补偿或在图像源中添加预补偿<sup>[139-140]</sup>的方式进行校正。

Lee 等<sup>[141]</sup>采用几何分析和公式推导的方法分析了波导中 HOE 像散的原因,并将柱面透镜引入记录 HOE 的光路中,补偿了透明头戴式显示器中全息透镜引入的像差,如图 11 所示。Yeom 等<sup>[143]</sup>通过光线追迹的方法分析了作为耦合出 HOE 的非对称衍射角引起的像差,并对全息图进行预失真处理以补偿使用两个 HOE 的条形三维全息头戴显示器中的像差。为校正 HOE 像差并扩展其应用场景,Jang 等<sup>[142]</sup>提出了一种设计、优化和制造复杂定制 HOE 的方法,如图 12 所示。该方法采用光栅矢量场的优化方法,减小了图像像差,优化了所需波长和角度的衍射效率,并补偿了 HOE 制造过程中材料收缩引起的像差。HOE 不仅在可见光波段有大量应用,还被应用在无损检测、形貌检

测和眼动跟踪等红外系统中。然而,重铬酸盐明胶和干法处理的 Covestro 光聚合物<sup>[144]</sup>等用于 AR 眼镜的典型全息材料在红外(750~900 nm)范围内不敏感<sup>[145]</sup>,工作波长与记录波长不匹配将导致衍射效率下降、像差和重影等问题的出现。点源优化<sup>[145]</sup>、基于波前打印的方法<sup>[146]</sup>、用传统元件调制记录光束的波前<sup>[147]</sup>和采用

对红外敏感的材料<sup>[148-150]</sup>等方法可解决上述问题。上述校正离轴像差和解决波长失配的优化设计方法多是针对某一种特定的应用,将这些设计方法与全息打印技术相结合,有望开发出更具通用性的解决方案,使应用于投影显示等系统中的无像差大面积 HOE 的设计和加工成为可能。

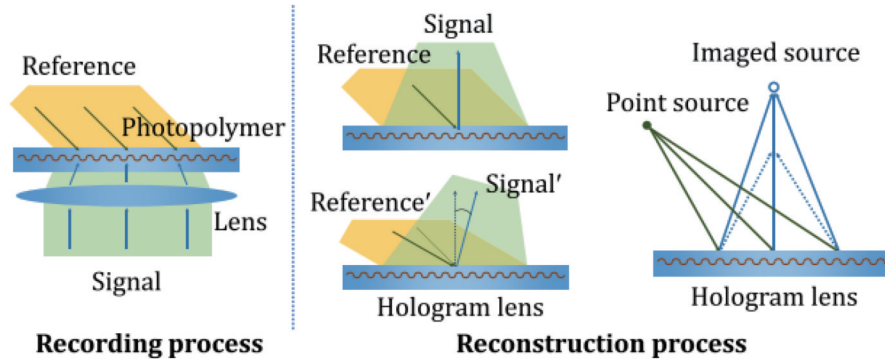


图 11 HOE 产生像散的原因<sup>[141]</sup>

Fig. 11 Reasons for astigmatism in HOE<sup>[141]</sup>

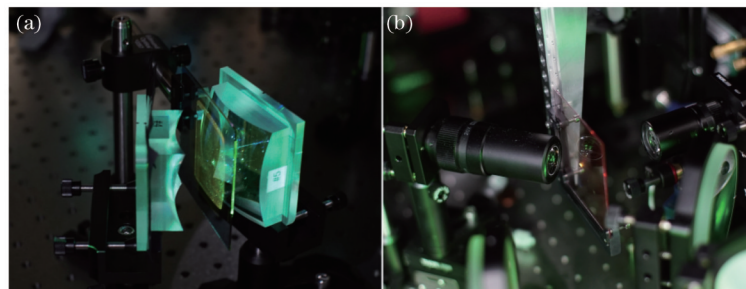


图 12 两种用于加工优化 DOE 的方式<sup>[142]</sup>。(a)使用折射自由曲面元件,(b)使用全息打印系统

Fig. 12 Two methods for processing and optimizing DOE<sup>[142]</sup>. (a) Using refractive freeform surface element; (b) using holographic printing system

#### 4.5 其他领域

与上述结合特定系统设计 DOE 的方式不同,从对器件的一般需求出发为 DOE 设计提供了另一个角度,下文以复振幅 DOE 与动态 DOE 为典型实例来进行说明。

由于保留完整的光场信息能最大程度保证重建光场的质量,因此对振幅和相位同时进行调制一直是研究者们追求的方向。由于没有能同时调制振幅和相位的器件,故实现复振幅型 DOE 有编码<sup>[151-152]</sup>、级联 DOE<sup>[153-156]</sup>和改进加工方式<sup>[157-158]</sup>三种主要途径。上述方案最大程度抑制了噪声的影响,但也增加了系统设计、加工或装配的复杂程度,需要使用者结合具体应用的特点进行取舍。

DOE 在制作完成后无法修改,这导致其难以应用到需要动态调整的系统中,故设计可调谐的动态 DOE 在微粒操纵、精密加工和三维显示等参数需要实时调整的应用中十分必要。目前可调 DOE 采用的方案主要有聚合物浮雕层<sup>[159-161]</sup>、图案化电极<sup>[162-163]</sup>、图案化光

对准层<sup>[164-168]</sup>和复合材料<sup>[169-170]</sup>等。

将上述典型方案的代表工作的材料、性能等信息整理在表 4 中。研制动态 DOE 最关键的是寻找电、光、热等外界刺激与材料相互作用的规律,如蓝相液晶良好的电光特性、全息聚合物分散液晶独特的材料特性,使其在 DOE 动态行为方面具有广阔的应用前景。

## 5 总结与展望

### 5.1 设计难点

近年来,人们对 DOE 设计方法的研究和对其特性的分析愈发深入,成功将 DOE 应用到光场调控、波前调制、成像和光谱调制等方面,但 DOE 设计中存在的一些问题仍限制了其大规模的商业应用。DOE 对波长的变化比较敏感,当光学系统的工作波长偏离设计波长时,衍射效率会下降。因此,在单波长系统中,要求光学系统中光源的谱宽尽可能窄,且与 DOE 的设计波长一致。当工作波长为宽波段时,如在用 DOE 来缩小镜头体积的相机中,偏离设计波长的光会成为杂散

表 4 典型动态 DOE 参数指标  
Table 4 Parameters of typical dynamic DOE

Material	Function	Tuning mode	Mask	Response time	Driving voltage
Liquid crystal <sup>[159]</sup>	Switchable	Electrical	×	15 ms/50 ms	20 V
Azo-benzene functionalized polymer film <sup>[161]</sup>	Rewritable	Electrical/optical/ thermal	×	Dozens of minutes	8 kV@ 130 °C
Liquid crystal <sup>[162]</sup>	Switchable	Electrical	×		6 V
Hybrid nematic liquid crystal <sup>[164]</sup>	Switchable/ rewritable	Electrical/optical	✓	1 ms	3 V· $\mu\text{m}^{-1}$
Blue phase liquid crystal <sup>[163]</sup>	Switchable	Electrical	×	545 $\mu\text{s}$ /673 $\mu\text{s}$	180 V
Chiral liquid crystals <sup>[166]</sup>	Rewritable	Electrical/optical	×	100 $\mu\text{s}$	~175 V
Blue phase liquid crystal <sup>[165]</sup>	Rewritable	Electrical/optical	✓	16 min	10 V
Liquid crystal <sup>[167]</sup>	Tunable	Optical	✓	24 min	
Holographic polymer-dispersed Liquid crystals <sup>[169]</sup>	Rewritable	Optical	×	40 s	
Cholesteric liquid crystal <sup>[168]</sup>	Rewritable	Optical	✓	17 min/90 s	10 V (erase)

光,虽然可通过图像增强算法进行部分补偿,但是仍对成像质量有一定影响。基底材料热胀冷缩会带来尺寸变化,进而 DOE 的性能也会受到温度变化的影响,这一问题在红外光学系统中需要予以重视,目前有很多研究致力于提升 DOE 的热稳定性,前文已有所介绍。除了 DOE 本身性能,设计和加工的成本也在一定程度上限制了其大范围的推广应用。设计 DOE 需要大量的计算,即使是同一种功能的 DOE,当光学系统的参数发生变化时,原有的设计结果往往也不能直接使用而需要重新设计。解决这一问题的一种可能思路是通过深度学习的方法构建具有一定通用性的设计网络,使在一定参数范围内 DOE 能够被快速准确地构建。另一种可能思路则需要依赖于计算机性能的提升、优化算法的提出和新设计方法的提出。在实际应用中,对 DOE 加工的成本和精度往往需要进行取舍,大批量、高精度 DOE 的快速加工方法将有利于其大范围的推广使用。

## 5.2 设计方法

提升解的准确性和优化性能指标是 DOE 设计中需要重点解决的问题。建立模型和确定优化方法是提升解的准确性的两条重要途径。一方面建立并推导更接近实际情况的数学物理模型,这是比较根本地提升准确性的方法,一旦有所突破会为 DOE 的设计开辟新的路径。这方面一个典型的例子就是杨国桢和顾本源研究员推导了能确定光学一般变换系统中振幅-相位分布的方程组,解决了非幺正变换系统中的逆源问题,大大提高了设计实际应用中具有强衍射损耗 DOE 相位分布的准确性<sup>[171]</sup>。另一方面是寻找更合适的数值计算方法以应用在优化算法中,由于优化算法中涉及的数学运算需要通过计算机来实现,因此提升数值计算方法的稳定性和收敛性有助于获得更好的设计

结果。

优化设计后的 DOE 的性能指标可以从三个角度入手。第一个角度是开发新的可调节的自由度以实现性能指标的提升。虽然光场具有很多可调节的自由度,但是考虑到设计和加工的容易程度,最常用于 DOE 设计的是空间中的振幅、相位和偏振等调制参量,时间、轨道角动量和自旋角动量也可以用于光场参量的调制,这方面的设计可以参考综述<sup>[172]</sup>。第二个角度是对现有优化算法进行改进,提升算法本身的收敛性、搜索范围、搜索效率和搜索精度,常见的方法是将几种互补的优化方法结合起来使用,使其发挥各自的优势,如 Su 等<sup>[173]</sup>将粒子群算法和 SA 算法相结合,充分发挥两种算法的优势,设计出的 DOE 重建像均匀度比传统 GS 算法提升了 10%。第三个角度是对 DOE 物理实现的形态和介质进行优化,如将 DOE 的基底由平面改为柱面或曲面、将多层 DOE 由一侧具有微结构改为两侧均具有微结构的设计和优化用于 DOE 加工材料的性能。

## 5.3 加工方法

DOE 加工技术的总体目标是提升加工精度、提高加工效率并降低加工成本,但通常三个目标难以同时满足,主要目标的选择要根据实际需求来决定。总体上实现以上目标有两个努力的方向:一个是对现有的加工系统和加工工艺进行优化升级,如通过研究分辨率增强技术(RET)、优化光刻胶材料和优化光刻工艺来提升光刻机的分辨率;另一个方向是探究新的加工技术,纵观 DOE 加工技术的发展历史,新加工方式的出现往往与其他底层原理和技术的突破有关,这些技术在诞生之初往往并不是用于 DOE 的加工的,但因其特点与 DOE 加工需求契合而推动了 DOE 加工技术的发展。例如,激光的出现提供了高相干光源,使得激光

干涉光刻得以实现,进而能够低成本地制造大面积的 DOE。因此,研制任意相位分布的激光干涉曝光方法是未来重要的发展方向。加工方法方面尤其需要注意对其他领域技术的借鉴,如光刻等加工技术是用于微电子领域集成电路的制作的,但因其高精度的特点,逐渐也被应用于 DOE 的加工中,并成为了一种应用广泛、影响力大的加工方式。

#### 5.4 衍射光学元件的应用

DOE 是现代光学系统轻量化和集成化进程中的核心元件,其与成像系统、光学检测系统和 AR 显示系统等应用相结合,已经被越来越广泛地应用于工业、医学和国防等重要领域中。

DOE 在医学中可以作为医疗器械,也可以作为医疗仪器的元件。对于医疗器械,最典型的是用 DOE 作为人工晶状体取代因白内障而浑浊的天然晶状体<sup>[174]</sup>,其具有重量轻、光学性能好和可生物降解等特性,让病人在手术后能看清周围景物。对于医学科学研究和临床诊断,无创成像是一种重要的辅助工具,有利于医生准确地观察并分析病灶。Zhao 等<sup>[175]</sup>开发了一种借助 DOE 灵活产生生长焦深针状激光束的新方法,通过这种针状光束扩展了光学相干成像(OCT)系统的焦深,提高了显微系统的分辨率,进而提高了诊断的准确性。

除了医学领域,DOE 在工业和消费电子领域也有很多应用场景。三维场景重建是目前万物互联发展趋势下一项重要的技术,在自动驾驶、人脸识别和机器视觉方面得到了广泛应用。其中,基于结构光的三维重建是一种很有代表性的方案,而 DOE 是大部分结构光发生器的核心器件。美国 Apple 公司发布的 iPhone X 支持 Face ID 解锁功能,由垂直共振腔表面发射激光(VCSEL)和 DOE 组成的点阵投影器将约 30000 个光点投影到人脸上,经红外照相机捕获后结合算法对人脸进行三维重建,极大地提升了解锁的安全性。由于消费者对手机轻薄化的需求,手机中传感器安装的空间非常有限,DOE 轻小和多功能的特点使其在有限的空间中实现了三维重建系统所要求的点阵生成功能,有利于硬件设计的紧凑和小型化。

此外,在 AR 系统中使用 DOE 作为虚拟画面和真实场景的组合器或实现光束控制是一种很有潜力的技术方案。相对于几何光学和自由曲面的方案,该方案具有体积小、重量轻和批量生产成本低等优势。已有的产品(如 Microsoft、Magic Leap 等公司推出的 AR 眼镜)可以让使用者同时看到真实和虚拟的场景,可用于教育培训、工业生产和单兵装备等多种场景中。HUD 系统已经搭载到宝马、奔驰、奥迪和蔚来等国内外车型中,能在车辆行驶过程中为驾驶员提供辅助信息。

上述是 DOE 在各领域的典型应用,本文限于篇幅未能列举全部 DOE 的应用场景,其在微粒操纵、光互连和光通信等方面也正发挥着重要作用。未来 DOE 的设计可能会面对更大视场角、更高衍射效率和更好

消色差特性等方面的要求,而加工将面临增加保真度、增大高宽比和减小特征尺寸等方面的挑战。总而言之,DOE 将被更广泛地与传统和热点领域的应用相结合,从而推动光学系统的发展和升级。

## 6 结束语

由于现代光学系统具有体积轻薄化、功能集成化的发展趋势,故 DOE 向着小型化、多功能化方向发展的需求也会越来越强烈,这对设计的准确性、设计的灵活性、加工的效率、加工的精度和成本等方面也会提出更高的要求。研究物理模型、借鉴其他领域的新技术和对现有方法的优化改进是提升 DOE 性能的三种主要途径:最基础的是对物理模型的研究和突破,尤其是将快速、准确的光场传播理论和数值计算方法用于 DOE 的设计和分析中;第二类途径依赖于其他领域原理和技术的发展,一方面是基底或辅助材料性能的提升,如全息记录材料或光刻胶材料,另一方面是将其他原理与技术借鉴到 DOE 的加工中来,从而促进 DOE 设计方法的革新和实现;第三类途径是结合应用场景,在现有方法的基础上对设计、加工方式进行优化和改进,使其满足具体应用需求。

### 参 考 文 献

- [1] Bhattacharya S. Simplified mesh techniques for design of beam-shaping diffractive optical elements[J]. *Optik*, 2008, 119(7): 321-328.
- [2] Liu S, Liu C Y, Jin G, et al. Design of an omnidirectional gaze optical imaging system with ultrahigh resolution[J]. *Optical Review*, 2021, 28(1): 8-17.
- [3] Yang S P, Kim J B, Seo Y H, et al. Rotational offset microlens arrays for highly efficient structured pattern projection[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(16): 2000395.
- [4] Ho C M B, Hu K, Mishra A, et al. Printing of woodpile scaffold using Fresnel lens for tissue engineering[J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 2022, 9(2): 507-522.
- [5] Wang H, Wang H T, Zhang W, et al. Toward near-perfect diffractive optical elements via nanoscale 3D printing[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8): 10452-10461.
- [6] Yang G, Qi Y H, Cao J, et al. Ultralow voltage imprinting in GeS<sub>2</sub>-Ga<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-AgI glasses for visible to middle-infrared diffraction gratings[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(7): 9030-9039.
- [7] Shi Z, Gan L, Xiao T H, et al. All-optical modulation of a graphene-cladded silicon photonic crystal cavity[J]. *ACS Photonics*, 2015, 2(11): 1513-1518.
- [8] Dong J W, Chen X D, Zhu H Y, et al. Valley photonic crystals for control of spin and topology[J]. *Nature Materials*, 2017, 16(3): 298-302.
- [9] Zheng Y H, Xu M F, Pu M B, et al. Designing high-efficiency extended depth-of-focus metalens via topology-shape optimization[J]. *Nanophotonics*, 2022, 11(12): 2967-2975.
- [10] 刘娟, 胡滨, 周雅. 物理光学基础教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.
- [11] Liu J, Hu B, Zhou Y. Fundamental concepts of physics optics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2017.
- [11] Shi R, Liu J, Xu J, et al. Designing and fabricating diffractive optical elements with a complex profile by interference[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(20): 4053-4055.

- [12] 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.
- [13] 杨国桢, 顾本源. 光学系统中振幅和相位的恢复问题[J]. *物理学报*, 1981, 30(3): 410-413.  
Yang G Z, Gu B Y. On the amplitude-phase retrieval problem in optical systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 1981, 30(3): 410-413.
- [14] Kirkpatrick S, Gelatt C D, Jr, Vecchi M P. Optimization by simulated annealing[J]. *Science*, 1983, 220(4598): 671-680.
- [15] Johnson E G, Abushagur M A G. Microgenetic-algorithm optimization methods applied to dielectric gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1995, 12(5): 1152-1160.
- [16] Sinha A, Lee J, Li S, et al. Lensless computational imaging through deep learning[J]. *Optica*, 2017, 4(9): 1117-1125.
- [17] Meister M, Winfield R J. Novel approaches to direct search algorithms for the design of diffractive optical elements[J]. *Optics Communications*, 2002, 203(1/2): 39-49.
- [18] Fienup J R. Phase retrieval algorithms: a comparison[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(15): 2758-2769.
- [19] Tan Q F, Yan Y B, Jin G F, et al. Diffractive optical array element for realizing uniform spot on the plane non-perpendicular to the optical axis with geometrical shape transform[J]. *Optics Communications*, 2000, 175(1/2/3): 13-18.
- [20] Zhou G Y, Chen Y X, Wang Z G, et al. Genetic local search algorithm for optimization design of diffractive optical elements [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(20): 4281-4290.
- [21] Tian R, Liu J, Li X, et al. Design and fabrication of complicated diffractive optical elements on multiple curved surfaces[J]. *Optics Express*, 2015, 23(26): 32917-32925.
- [22] Zhu N, Wang Y T, Liu J, et al. Optical image encryption based on interference of polarized light[J]. *Optics Express*, 2009, 17(16): 13418-13424.
- [23] Zhao H Z, Liu J, Xiao R, et al. Modulation of optical intensity on curved surfaces and its application to fabricate DOEs with arbitrary profile by interference[J]. *Optics Express*, 2013, 21(4): 5140-5148.
- [24] Wang X G, Liu J, Han J, et al. 3D optical intensity modulation on curved surfaces by optimization method and its application to fabricate arbitrary patterns[J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20387-20395.
- [25] Liu P L, Liu J, Li X, et al. Design and fabrication of DOEs on multi-freeform surfaces via complex amplitude modulation[J]. *Optics Express*, 2017, 25(24): 30061-30072.
- [26] Leger J R, Swanson G J, Veldkamp W B. Coherent laser addition using binary phase gratings[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(20): 4391-4399.
- [27] Däschner W, Long P, Stein R, et al. Cost-effective mass fabrication of multilevel diffractive optical elements by use of a single optical exposure with a gray-scale mask on high-energy beam-sensitive glass[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(20): 4675-4680.
- [28] O'Shea D C, Rockward W S. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication. II. Spatially filtered halftone screens[J]. *Applied Optics*, 1995, 34(32): 7518-7526.
- [29] Pawlowski E, Kuhlow B. Antireflection-coated diffractive optical elements fabricated by thin-film deposition[J]. *Optical Engineering*, 1994, 33(11): 3537-3546.
- [30] de Jager P W H, Derksen G, Mertens B, et al. Experimental results of the stochastic Coulomb interaction in ion projection lithography[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1999, 17(6): 3098-3106.
- [31] Borisov M V, Borovikov V A, Gavrikov A A, et al. Methods of the development and correction of the quality of holographic images of geometry objects with subwave-size elements[J]. *Doklady Physics*, 2010, 55(9): 436-440.
- [32] Borisov M, Chelubeev D, Chernik V, et al. Sub-wavelength holographic lithography (SWHL) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11324: 1132417.
- [33] Borisov M V, Chelyubeev D A, Chernik V V, et al. Phase-shift at subwavelength holographic lithography (SWHL) [J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8352: 83520P.
- [34] Borisov M V, Chelyubeev D A, Chernik V V, et al. Analysis of an effect of perturbations in SWHM and illuminating optical scheme parameters on an aerial image[C]//2012 SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, May 15-17, 2012, Saratoga Springs, NY, USA. New York: IEEE Press, 2012: 165-169.
- [35] Borisov M V, Chelyubeev D A, Chernik V V, et al. Experimental verification of sub-wavelength holographic lithography physical concept for single exposure fabrication of complex structures on planar and nonplanar surfaces[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10446: 104460X.
- [36] Donaldson R R, Patterson S R. Design and construction of a large, vertical axis diamond turning machine[J]. *Proceedings of SPIE*, 1983, 0433: 62-67.
- [37] Fujita T, Nishihara H, Koyama J. Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography[J]. *Optics Letters*, 1982, 7(12): 578-580.
- [38] Bell D C, Lemme M C, Stern L A, et al. Precision cutting and patterning of graphene with helium ions[J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(45): 455301.
- [39] Chou S Y, Krauss P R, Renstrom P J. Imprint of sub-25 nm vias and trenches in polymers[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, 67(21): 3114-3116.
- [40] Plachetka U, Bender M, Fuchs A, et al. Wafer scale patterning by soft UV-nanoimprint lithography[J]. *Microelectronic Engineering*, 2004, 73/74: 167-171.
- [41] Tofteberg T, Amédéo H, Andreassen E. Injection molding of a diffractive optical element[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2008, 48(11): 2134-2142.
- [42] Gao Y Q, He S A, Luo N N, et al. Research on dynamical-gradual greyscale digital mask lithography[J]. *Journal of Modern Optics*, 2011, 58(7): 573-579.
- [43] Zhang L, Shi Z J, Li Q S. Improved image quality of digital lithography using modified particle swarm optimization algorithm [J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10256: 102562J.
- [44] Wen S B, Bhaskar A, Zhang H J. Scanning digital lithography providing high speed large area patterning with diffraction limited sub-micron resolution[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2018, 28(7): 075011.
- [45] Luo N N, Liu Z H, Zhang Z M. Dynamic fractal digital lithography for the fabrication of microlens array[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 10840: 1084012.
- [46] Xiong M H, Luo N N, Zhang Z M, et al. Factors influencing resolution of optical fiber end face processing in digital lithography[C]//2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS), April 25-29, 2021, Xiamen, China. New York: IEEE Press, 2021: 864-869.
- [47] Komlenok M S, Volodkin B O, Knyazev B A, et al. Fabrication of a multilevel THz Fresnel lens by femtosecond laser ablation[J]. *Quantum Electronics*, 2015, 45(10): 933-936.
- [48] Smith D, Ng S H, Han M L, et al. Imaging with diffractive axicons rapidly milled on sapphire by femtosecond laser ablation [J]. *Applied Physics B*, 2021, 127(11): 154.
- [49] Davis K M, Miura K, Sugimoto N, et al. Writing waveguides in glass with a femtosecond laser[J]. *Optics Letters*, 1996, 21(21): 1729-1731.
- [50] Hassanzadeh A, Mohammadnezhad M, Mittler S. Multiexposure laser interference lithography[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2015, 9(1): 093067.
- [51] Mahmood R, Ramirez A V, Hillier A C. Creating two-dimensional quasicrystal, supercell, and Moiré lattices with laser

- interference lithography: implications for photonic bandgap materials[J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2021, 4(9): 8851-8862.
- [52] Poletaev S D, Lyubimov A I. Formation of periodic relief structures in thin chromium films using laser interference lithography[J]. *Journal of Optical Technology*, 2022, 89(6): 359-364.
- [53] Seo J H, Park J H, Kim S I, et al. Nanopatterning by laser interference lithography: applications to optical devices[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, 14(2): 1521-1532.
- [54] Prakapenka V B, Kubo A, Kuznetsov A, et al. Advanced flat top laser heating system for high pressure research at GSECARS: application to the melting behavior of germanium [J]. *High Pressure Research*, 2008, 28(3): 225-235.
- [55] Račiukatis G, Stankevicius E, Gecys P, et al. Laser processing by using diffractive optical laser beam shaping technique[J]. *Journal of Laser Micro Nanoengineering*, 2011, 6(1): 37-43.
- [56] Frieden B R. Lossless conversion of a plane laser wave to a plane wave of uniform irradiance[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(11): 1400-1403.
- [57] Deng Z F, Yang Q, Chen F, et al. High-performance laser beam homogenizer based on double-sided concave microlens[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(20): 2086-2089.
- [58] Veldkamp W B. Laser beam profile shaping with interlaced binary diffraction gratings[J]. *Applied Optics*, 1982, 21(17): 3209-3212.
- [59] 张艳, 张静娟, 司徒国海. 高斯光束变换成方形均匀焦斑的衍射光学元件的研究[J]. *中国激光*, 2004, 31(10): 1183-1187.  
Zhang Y, Zhang J J, Situ G H. Investigation on diffractive optical elements for converting Gaussian beam into square uniform focused spot[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(10): 1183-1187.
- [60] Guo M, Lv G Q, Cai J H, et al. Speckle-reduced diffractive optical elements beam shaping with regional padding algorithm [J]. *Optical Engineering*, 2022, 61(12): 125103.
- [61] 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.
- [62] Li Q K, Chen Q D, Niu L G, et al. Sapphire-based dammann gratings for UV beam splitting[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2016, 8(6): 2500208.
- [63] 李彦锦, 周朗, 李卓, 等. 基于衍射光学元件的全光分幅成像技术[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0232001.  
Li Y J, Zhou L, Li Z, et al. All-optical framing imaging technology based on diffractive optical elements[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0232001.
- [64] Dresel T, Beyerlein M, Schwider J. Design and fabrication of computer-generated beam-shaping holograms[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(23): 4615-4621.
- [65] Liu J S, Caley A J, Taghizadeh M R. Diffractive optical elements for beam shaping of monochromatic spatially incoherent light[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(33): 8440-8447.
- [66] Siemion A, Siemion A, Suszek J, et al. THz beam shaping based on paper diffractive optics[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, 6(4): 568-575.
- [67] Buske P, Völl A, Eisebitt M, et al. Advanced beam shaping for laser materials processing based on diffractive neural networks [J]. *Optics Express*, 2022, 30(13): 22798-22816.
- [68] Chang J L, Sitzmann V, Dun X, et al. Hybrid optical-electronic convolutional neural networks with optimized diffractive optics for image classification[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1-10.
- [69] 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.
- [70] Yan T, Wu J M, Zhou T K, et al. Fourier-space diffractive deep neural network[J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123(2): 023901.
- [71] 谢常青. 衍射光学元件成套制造技术研究进展[J]. *光学精密工程*, 2022, 30(15): 1815-1827.  
Xie C Q. Research progress on complete fabrication technology of diffractive optical elements[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2022, 30(15): 1815-1827.
- [72] Ma X, Wang J, Chen X B, et al. Gradient-based inverse extreme ultraviolet lithography[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7284-7300.
- [73] Ma L, Dong L S, Fan T A, et al. Mitigating the forbidden pitch of extreme ultraviolet lithography using mask optimization based on genetic algorithm[J]. *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology*, 2022, 21(4): 043204.
- [74] 张恒, 李思坤, 王向朝. 基于改进型结构分解的极紫外光刻掩模衍射谱快速仿真方法[J]. *光学学报*, 2018, 38(1): 0105001.  
Zhang H, Li S K, Wang X Z. A rapid simulation method for diffraction spectra of EUV lithography mask based on improved structural decomposition[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(1): 0105001.
- [75] Tanabe H, Takahashi A. Data augmentation in extreme ultraviolet lithography simulation using convolutional neural network[J]. *Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology*, 2022, 21(4): 041602.
- [76] 成维, 李思坤, 王向朝. 极紫外光刻掩模相位型缺陷检测方法 [J]. *光学学报*, 2023, 43(1): 0112001.  
Cheng W, Li S K, Wang X Z. Method for inspection of phase defects in extreme ultraviolet lithography mask[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(1): 0112001.
- [77] 成维, 李思坤, 张子南, 等. 极紫外光刻掩模缺陷检测与补偿技术研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(9): 0922022.  
Cheng W, Li S K, Zhang Z N, et al. Research on mask defect inspection and compensation techniques in extreme ultraviolet lithography[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(9): 0922022.
- [78] Moreno V, Román J F, Salgueiro J R. High efficiency diffractive lenses: deduction of kinoform profile[J]. *American Journal of Physics*, 1997, 65(6): 556-562.
- [79] Chao W L, Harteneck B D, Liddle J A, et al. Soft X-ray microscopy at a spatial resolution better than 15 nm[J]. *Nature*, 2005, 435(7046): 1210-1213.
- [80] Haroutunyan L A. Amplitude-division type X-ray interferometer based on bi-level Fresnel zone plates[J]. *Journal of Contemporary Physics (Armenian Academy of Sciences)*, 2015, 50(3): 292-295.
- [81] Kipp L, Skibowski M, Johnson R L, et al. Sharper images by focusing soft X-rays with photon sieves[J]. *Nature*, 2001, 414(6860): 184-188.
- [82] Menon R, Carter D J D, Gil D, et al. Zone-Plate-Array Lithography (ZPAL): Simulations for system design[C]. *AIP Conference Proceedings*, 2000, 507(1): 647-652.
- [83] Golub M A, Doskolovich L L, Kazanskiy N L, et al. Computer generated diffractive multi-focal lens[J]. *Journal of Modern Optics*, 1992, 39(6): 1245-1251.
- [84] Zhang A Z. Multifocal diffractive lens design in ophthalmology [J]. *Applied Optics*, 2020, 59(31): 9807-9823.
- [85] 王仲勋, 潘一鸣, 尹韶云, 等. 长焦深、高分辨激光加工聚焦透镜[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0222004.  
Wang Z X, Pan Y M, Yin S Y, et al. Laser processing lens of long focal depth and high resolution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0222004.
- [86] Feng D, Ou P, Feng L S, et al. Binary sub-wavelength diffractive lenses with long focal depth and high transverse resolution[J]. *Optics Express*, 2008, 16(25): 20968-20973.
- [87] Yu X, Xie Z X, Liu J H, et al. Optimization design of a diffractive axicon for improving the performance of long focal depth[J]. *Optics Communications*, 2014, 330: 1-5.
- [88] Li C, Zhou C H, Lu Y K, et al. Picometer-differential twice-



- exposed element for three-dimensional measurement with extremely long depth of field[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(17): 5234-5239.
- [89] Xu N, Liu G X, Zhao Y B, et al. Ultrahigh-aspect-ratio beam generation with super-resolution spot[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 119(9): 094101.
- [90] Zhou C H, Yu J J, Wang S Q, et al. Three-dimensional optical techniques using Dammann gratings[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8556: 85560Z.
- [91] Ke J, Zhang J Y. Generalized Fibonacci photon sieves[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(24): 7278-7283.
- [92] He K, Wang Z H, Huang X, et al. Computational multifocal microscopy[J]. *Biomedical Optics Express*, 2018, 9(12): 6477-6496.
- [93] Merkulov A Y, Belyaev V V, Belyaev A A, et al. Diffraction on anisotropic substrates with sinusoidal surface microrelief[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2014, 596(1): 122-127.
- [94] Yu X H, Yao B L, Lei M, et al. Polarization-sensitive diffractive optical elements fabricated in BR films with femtosecond laser[J]. *Applied Physics B*, 2014, 115(3): 365-369.
- [95] Nojonen E, Turunen J. Eigenmode method for electromagnetic synthesis of diffractive elements with three-dimensional profiles [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(9): 2494-2502.
- [96] Schmitz M, Bräuer R, Bryngdahl O. Gratings in the resonance domain as polarizing beam splitters[J]. *Optics Letters*, 1995, 20(17): 1830-1831.
- [97] 卢振武, 刘华, 李凤有. 利用曲面计算全息图进行非球面检测 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12(6): 555-559.
- Lu Z W, Liu H, Li F Y. Aspheric surface testing with CGH on curved surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, 12(6): 555-559.
- [98] Liu H, Lu Z W, Li F Y, et al. Design of a novel hologram for full measurement of large and deep convex aspheric surfaces[J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3120-3126.
- [99] Dholakia K, Čizmar T. Shaping the future of manipulation[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(6): 335-342.
- [100] 朱一帆, 耿滔. 谐振腔内的高质量圆对称艾里光束的产生方法 [J]. *物理学报*, 2020, 69(1): 014205.
- Zhu Y F, Geng T. Generation of high-quality circular Airy beams in laser resonator[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(1): 014205.
- [101] Niu K, Zhao S D, Liu Y, et al. Self-rotating beam in the free space propagation[J]. *Optics Express*, 2022, 30(4): 5465-5472.
- [102] Dong B Z, Zhang G Q, Yang G Z, et al. Design and fabrication of a diffractive phase element for wavelength demultiplexing and spatial focusing simultaneously[J]. *Applied Optics*, 1996, 35(35): 6859-6864.
- [103] Sun X D, Liu J, Wang Y Q, et al. Diffractive optical elements for implementing spatial demultiplexing and spectral synthesizing simultaneously[J]. *Optics Communications*, 2006, 266(2): 399-403.
- [104] Gün B N, Yüce E. Wavefront shaping assisted design of spectral splitters and solar concentrators[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 2825.
- [105] Xu W Q, Lin D F, Xu X, et al. Simple and universal method in designs of high-efficiency diffractive optical elements for spectrum separation and beam concentration[J]. *Chinese Physics B*, 2017, 26(7): 074202.
- [106] Stone T, George N. Hybrid diffractive-refractive lenses and achromats[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(14): 2960-2971.
- [107] Sweeney D W, Sommargren G E. Harmonic diffractive lenses [J]. *Applied Optics*, 1995, 34(14): 2469-2475.
- [108] Swanson G J, Veldkamp W B. Diffractive optical elements for use in infrared systems[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(6): 605-608.
- [109] 朱海宇, 马军, 张鸿佳, 等. 刑侦日盲紫外折衍混合变焦光学系统设计[J]. *激光技术*, 2015, 39(2): 242-246.
- Zhu H Y, Ma J, Zhang H J, et al. Design of solar blind ultraviolet refractive/diffractive zoom lens used in criminal investigation[J]. *Laser Technology*, 2015, 39(2): 242-246.
- [110] 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.
- [111] Behrmann G P, Bowen J P. Influence of temperature on diffractive lens performance[J]. *Applied Optics*, 1993, 32(14): 2483-2489.
- [112] Piao M X, Cui Q F, Zhang B, et al. Optimization method of multilayer diffractive optical elements with consideration of ambient temperature[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(30): 8861-8869.
- [113] 周正平, 陈恒, 纪辉, 等. 折衍混合轻量化长波红外消热差光学系统设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(10): 1022001.
- Zhou Z P, Chen H, Ji H, et al. Design of lightweight long-wave infrared athermalized optical system with hybrid refractive-diffractive[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(10): 1022001.
- [114] 孙强, 刘宏波, 王肇圻, 等. 红外折射/衍射超常温光学系统 [J]. *光子学报*, 2003, 32(4): 466-469.
- Sun Q, Liu H B, Wang Z Q, et al. An infrared diffractive/refractive optical system beyond normal temperature[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(4): 466-469.
- [115] Mao S, Zhao J L. Design and analysis of a hybrid optical system containing a multilayer diffractive optical element with improved diffraction efficiency[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(20): 5888-5895.
- [116] Mao S, Zhao J L. Diffractive optical element optimization under wide incident angle and waveband situations[J]. *Optics Communications*, 2020, 458: 124762.
- [117] Mao S, Zhao J L, He D H. Analytical and comprehensive optimization design for multilayer diffractive optical elements in infrared dual band[J]. *Optics Communications*, 2020, 472: 125831.
- [118] Mao S, Cui Q F, Piao M X, et al. High diffraction efficiency of three-layer diffractive optics designed for wide temperature range and large incident angle[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(13): 3549-3554.
- [119] 田晓航, 薛常喜. 小  $F$  数红外双波段无热化折衍摄远物镜设计 [J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1422002.
- Tian X H, Xue C X. Athermalization design of small  $F$ -number refractive-diffractive telephoto objective lens in infrared dual-band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1422002.
- [120] Low M J, Rohith T M, Kim B, et al. Refractive-diffractive hybrid optics array: comparative analysis of simulation and experiments[J]. *Journal of Optics*, 2022, 24(5): 055401.
- [121] Wolff L B. Polarization vision: a new sensory approach to image understanding[J]. *Image and Vision Computing*, 1997, 15(2): 81-93.
- [122] Sun P, Liu Q, Wu J H. Sub-wavelength metal polarization gratings array used in polarization imaging[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, 7848: 78482L.
- [123] Noda K, Yamada K, Momosaki R, et al. White-light circular-polarization imaging using pairs of polarization gratings and wedge prisms[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(11): 3383-3388.
- [124] Feng B, Chen Y F, Sun D, et al. Precision integration of grating-based polarizers onto focal plane arrays of near-infrared photovoltaic detectors for enhanced contrast polarimetric imaging [J]. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 2021, 3(3): 035201.
- [125] Shi X L, Liu J, Xiao J S, et al. Design of a compact waveguide eyeglass with high efficiency by joining freeform surfaces and volume holographic gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2021, 38(2): A19-A26.
- [126] Shi X L, Liu J, Zhang Z Q, et al. Extending eyebox with

- tunable viewpoints for see-through near-eye display[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11613-11626.
- [127] Zhang S J, Zhang Z Q, Liu J. Adjustable and continuous eyebox replication for a holographic Maxwellian near-eye display[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(3): 445-448.
- [128] Duan X H, Liu J, Shi X L, et al. Full-color see-through near-eye holographic display with 80° field of view and an expanded eye-box[J]. *Optics Express*, 2020, 28(21): 31316-31329.
- [129] Lü Z L, Liu J, Yang Y. Dual-view and multi-content head-up display using a single picture generation unit and two-layer volume holographic grating[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(4): 7035208.
- [130] Lü Z L, Liu J, Xu L F. A multi-plane augmented reality head-up display system based on volume holographic optical elements with large area[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2021, 13(5): 5200108.
- [131] Cheng H H, Tian X. An advanced ray-tracing model for multi-color holographic optical elements[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11188: 1118817.
- [132] Yeom J, Son Y, Choi K S. Pre-compensation method for optimizing recording process of holographic optical element lenses with spherical wave reconstruction[J]. *Optics Express*, 2020, 28(22): 33318-33333.
- [133] Bang K, Jang C, Lee B. Curved holographic optical elements and applications for curved see-through displays[J]. *Journal of Information Display*, 2019, 20(1): 9-23.
- [134] Lloret T, Navarro-Fuster V, Ramírez M G, et al. Aberration-based quality metrics in holographic lenses[J]. *Polymers*, 2020, 12(4): 993.
- [135] Prijatelj M, Klepp J, Tomita Y, et al. Far-off-Bragg reconstruction of volume holographic gratings: a comparison of experiment and theories[J]. *Physical Review A*, 2013, 87(6): 063810.
- [136] Atencia J, Quintanilla M. Ray aberration for a biaxial holographic imaging system[J]. *Optics Communications*, 2001, 199(5/6): 325-344.
- [137] Batomunkuev Y T. Aberrations of a volume holographic optical element obtained by means of a cylindrical object wave and a spherical reference wave[J]. *Journal of Optical Technology*, 2013, 80(8): 490-494.
- [138] Atencia J, Quintanilla M. Ray tracing for holographic optical element recording with non-spherical waves[J]. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2001, 3(5): 387-397.
- [139] Lin W K, Matoba O, Lin B S, et al. Astigmatism correction and quality optimization of computer-generated holograms for holographic waveguide displays[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5519-5527.
- [140] Lin W K, Matoba O, Lin B S, et al. Astigmatism and deformation correction for a holographic head-mounted display with a wedge-shaped holographic waveguide[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(25): 7094-7101.
- [141] Lee S, Lee B, Cho J, et al. Analysis and implementation of hologram lenses for see-through head-mounted display[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2016, 29(1): 82-85.
- [142] Jang C, Mercier O, Bang K, et al. Design and fabrication of freeform holographic optical elements[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, 39(6): 1-15.
- [143] Yeom H J, Kim H J, Kim S B, et al. 3D holographic head mounted display using holographic optical elements with astigmatism aberration compensation[J]. *Optics Express*, 2015, 23(25): 32025-32034.
- [144] Bruder F K, Fäcke T, Rölle T. The chemistry and physics of Bayfol® HX film holographic photopolymer[J]. *Polymers*, 2017, 9(10): 472.
- [145] Zhao J B, Nguyen J, Chrysler B D, et al. Design of volume holographic lenses for operation at 850 nm in augmented reality eyewear applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2020, 11350: 1135003.
- [146] Hofmann J, Friedel A K, Fiess R, et al. Angle-compensated holographic wave front printing for the fabrication of holographic optical elements operating in the infrared[J]. *Optical Engineering*, 2019, 59(10): 102405.
- [147] Zhao J B, Chrysler B, Kostuk R K. Design of a high-resolution holographic waveguide eye-tracking system operating in near-infrared with conventional optical elements[J]. *Optics Express*, 2021, 29(15): 24536-24551.
- [148] Kowalski B A, McLeod R R. Design concepts for diffusive holographic photopolymers[J]. *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 2016, 54(11): 1021-1035.
- [149] Bruder F K, Frank J, Hansen S, et al. Latest Bayfol HX® developments: ultrahigh index modulation and NIR recordable holographic films[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11788: 117880B.
- [150] Bruder F K, Frank J, Hansen S, et al. Expanding the property profile of Bayfol HX films towards NIR recording and ultra-high index modulation[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11765: 117650J.
- [151] Lee W H. Sampled Fourier transform hologram generated by computer[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(3): 639-643.
- [152] Liu K W, Liu T G, Wang Z, et al. THz beam shaping based on diffractive transformation for forming patterned simulation lightfields and wavefronts[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, 124: 104225.
- [153] Wang Y L, Li T, Gao Q K, et al. Application of diffractive optical elements for controlling the light beam in ptychography [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(9): 091720.
- [154] Wang X L, Gong L P, Zhu Z Q, et al. Creation of identical multiple focal spots with three-dimensional arbitrary shifting[J]. *Optics Express*, 2017, 25(15): 17737-17745.
- [155] Gibson G, Barron L, Beck F, et al. Optically controlled grippers for manipulating micron-sized particles[J]. *New Journal of Physics*, 2007, 9(1): 14.
- [156] Jesacher A, Maurer C, Schwaighofer A, et al. Near-perfect hologram reconstruction with a spatial light modulator[J]. *Optics Express*, 2008, 16(4): 2597-2603.
- [157] Neto L G, Cardona P S P, Cirino G A, et al. Implementation of Fresnel full complex-amplitude digital holograms[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(11): 2640-2649.
- [158] Sparvoli M, Mansano R D. Glass Diffractive Optical Elements (DOEs) with complex modulation DLC thin film coated[J]. *Materials Research*, 2008, 11(3): 341-345.
- [159] Stalder M, Ehbets P. Electrically switchable diffractive optical element for image processing[J]. *Optics Letters*, 1994, 19(1): 1-3.
- [160] Lou Y M, Liu Q K, Wang H, et al. Rapid fabrication of an electrically switchable liquid crystal Fresnel zone lens[J]. *Applied Optics*, 2010, 49(26): 4995-5000.
- [161] Itoh M, Harada K, Kamemaru S I, et al. Holographic recording on azo-benzene functionalized polymer film[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(7S): 4968-4971.
- [162] Shih H F, Li B W. Diffraction grating with dual modes for two-wavelength rewritable optical pickup heads[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(2): 900-902.
- [163] Ge S J, Chen P, Ma L L, et al. Optical array generator based on blue phase liquid crystal Dammann grating[J]. *Optical Materials Express*, 2016, 6(4): 1087-1092.
- [164] Wang X Q, Srivastava A K, Fan F, et al. Electrically/optically tunable photo-aligned hybrid nematic liquid crystal Dammann grating[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(24): 5668-5671.
- [165] Zheng Z G, Yuan C L, Hu W, et al. Light-patterned crystallographic direction of a self-organized 3D soft photonic crystal[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(42): 1703165.
- [166] Kobashi J, Yoshida H, Ozaki M. Planar optics with patterned chiral liquid crystals[J]. *Nature Photonics*, 2016, 10(6): 389-392.

- [167] Wang X Q, Wu S B, Yang W Q, et al. Light-driven liquid crystal circular Damman grating fabricated by a micro-patterned liquid crystal polymer phase mask[J]. *Polymers*, 2017, 9(8): 380.
- [168] Qin J Q, Wang X Q, Yuan C L, et al. Light-rewritable geometric phase and reflectance modulations enabled by pattern-aligned photoresponsive liquid crystal superstructures[J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(2): 255-262.
- [169] Fernández R, Gallego S, Márquez A, et al. Analysis of holographic polymer-dispersed liquid crystals (HPDLCs) for tunable low frequency diffractive optical elements recording[J]. *Optical Materials*, 2018, 76: 295-301.
- [170] Lovšin M, Brandl D, Glavan G, et al. Reconfigurable surface micropatterns based on the magnetic field-induced shape memory effect in magnetoactive elastomers[J]. *Polymers*, 2021, 13(24): 4422.
- [171] 顾本源, 张岩, 刘娟. 光学中的逆源问题[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- Gu B Y, Zhang Y, Liu J. Inverse source problem in optics[M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [172] He C, Shen Y J, Forbes A. Towards higher-dimensional structured light[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 1-17.
- [173] Su P, Cai C, Song Y M, et al. A hybrid diffractive optical element design algorithm combining particle swarm optimization and a simulated annealing algorithm[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(16): 5485.
- [174] Korolkov V P, Konoshenko P E, Mikerin S L, et al. Development of method for measuring a light energy distribution over foci for mould of diffractive component of bifocal intraocular lens[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11873: 118730G.
- [175] Zhao J J, Wintraub Y, Du L, et al. Flexible method for generating needle-shaped beams and its application in optical coherence tomography[J]. *Optica*, 2022, 9(8): 859-867.

## Review of Design Methods of Diffractive Optical Element

Xu Yuan<sup>1,2,3</sup>, Wang Changyu<sup>1,2,3</sup>, Wang Yongtian<sup>1,2,3</sup>, Liu Juan<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

<sup>2</sup>*Beijing Engineering Research Center for Mixed Reality and Advanced Display Technology, Beijing 100081, China;*

<sup>3</sup>*Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education, Beijing 100081, China*

### Abstract

**Significance** Diffractive optics is the most dynamic and potential branch of micro-optics based on diffraction theory. Diffractive optical element (DOE) is widely used in the design of optical systems as an element that modulates light waves through optimized structures. As DOE has the characteristics of light weight, easy replication, and high degree of freedom, and can achieve wavefront conversion, spectral modulation, array generation, and other functions that are difficult to be achieved by traditional refraction and reflection elements, it has become one of the research hotspots in modern optics. The characteristics of DOE can be widely combined with optical systems due to its compliance with the development trend of miniaturization and functional integration of modern optical systems. In addition, it has played an important role in modern industrial and national defense fields such as information processing, optical fiber communication, biomedicine, and space technology, and has shown broad application prospects.

DOE based on scalar diffraction theory is the most widely used, and it has the characteristics of reasonable calculation and wide application ranges. In the process of combining with practical optical systems such as laser shaping, micro-measurement, and advanced processing, its design method has made significant progress in design theory, design process, optimization algorithm, and auxiliary design tools. The modeling, design optimization, pre-processing optimization, and evaluation analysis of DOE in typical optical systems can be realized.

In recent years, there are a large number of interests in DOE designs and some reviews of DOE with a specific function or purpose, and the latest DOE design methods are required to be summarized. In order to promote the further development of DOE design methods based on scalar diffraction theory and better serve the development requirements of modern optical systems for structural compactness and functional integration, it is necessary to summarize the research progress of existing DOE design methods, discuss the problems restricting their further development, and prospect the future development trend, so as to provide reference and inspiration for the future research on DOE design methods.

**Progress** This paper summarizes the design methods of DOE based on scalar diffraction theory. The basic principle of DOE design is reviewed, and the existing DOE design methods based on the diffraction principle and interference principle are briefly described. The specific DOE design methods and their applicability are described through several typical applications, and the technical difficulties in DOE design and the possible application direction in future science and technology are predicted.

The scalar diffraction theory is applicable to the case where the feature size of DOE is much larger than the wavelength. The commonly used formulas include Kirchhoff diffraction integral formula based on point source and plane wave angular spectrum theory based on plane wave source. The scalar diffraction theory only considers the paraxial approximation of a single linearly polarized light but fails to discuss the vectorization and polarization coupling of the wave. It has the advantages of small calculation amounts, fast calculation speeds and can obtain the design results that meet the requirements of the optical system when the feature size is more than ten times larger than the wavelength.

The design of DOE based on the diffraction principle is an inverse design problem. Since there is generally no analytical solution to this problem, it is necessary to solve the optimal solution through an optimization algorithm based on iteration, search, or deep learning (Table 1). The characteristics of the optimization algorithm in terms of convergence, initial value sensitivity, calculation speed, and whether the solution is the global optimum are critical, which largely determines the design efficiency and the proximity of the design solution to the real solution.

The design of DOE based on the interference principle is a problem of obtaining an analytical solution through inverse decomposition. In terms of design, it can be summarized as the inverse decomposition problem of solving the interference sources with known interference light field. In terms of processing, it can be summarized as the inverse decomposition problem of solving the interference sources with known encoded light intensity distribution, where the interference source distribution can be any of amplitude, phase, or complex amplitude. DOE following this principle is often processed by holographic interference lithography.

DOE is designed to be applied to practical optical systems, so the development of DOE design methods is closely related to the requirements of applications. Considering the functional requirements of DOE in the fields of light field regulation, wavefront modulation, spectral modulation, and imaging, this paper discusses the new development of DOE design methods in traditional application scenarios such as beam shaping and array generation, and summarizes the integration and development of DOE design methods and new system requirements in cutting-edge directions such as all-optical diffraction neural networks and extreme ultraviolet lithography masks. In addition, the main design methods of complex amplitude DOE and dynamic DOE are summarized from the perspective of the development direction of DOE as an optical element.

**Conclusions and Prospects** After years of theoretical design and practical requirements of DOE for optical systems, DOE design methods based on scalar diffraction theory have made important progress in the theoretical model establishment, optimization algorithm development, and joint optimization with processing technology. However, in the face of higher diffraction efficiency, higher modulation accuracy, wider spectrum and temperature range, and more diverse functions of optical systems, the existing design methods still have problems of slow design speed, complex design process, and limited design freedom. In the future, the universality, accuracy, and applicability of DOE design methods can be improved by innovating physical models, learning from other fields, and integrating the advantages of existing optimization methods. It is expected that the well-designed DOE will play an increasingly important role in fields such as biomedicine, AR display, and space technology.

**Key words** optical design; diffractive optical element; design; applicability; application