

## 光学学报

## 融合自由曲面光学与全息光学元件的成像与显示系统设计

杨通<sup>1,2\*</sup>, 王永东<sup>1,2</sup>, 吕鑫<sup>1,2</sup>, 程德文<sup>1,2</sup>, 王涌天<sup>1,2</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

**摘要** 光学自由曲面具备较高的设计自由度与像差校正能力;全息光学元件具备特有的波前调控特性、选择性、复用性、轻薄性与易加工性。在成像与显示光学系统设计中,将自由曲面与全息光学元件相融合,可以获得较为优秀的系统指标和系统性能,使系统形态更加紧凑、轻便,且得到离轴非对称的新型系统结构。简要介绍了自由曲面光学与全息光学元件的基本原理、光线追迹特性、应用领域等,阐述了自由曲面光学与全息光学元件的融合设计方法,基于对全息光学元件的分类,总结了融合自由曲面光学与全息光学元件的成像与显示光学系统的设计与应用,讨论了两类元件融合设计的限制因素并对未来的发展趋势进行了展望。

**关键词** 自由曲面光学; 全息光学元件; 融合设计; 成像与显示系统

中图分类号 O435

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231830

## 1 引言

随着科技的不断发展与进步,人们对成像与显示系统的设计要求越来越高,不仅需要实现先进的系统指标,还要确保系统性能出色,结构紧凑、轻便<sup>[1-2]</sup>。同时,某些系统还要求结构为离轴非对称形式,例如消遮挡反射式成像系统、平视显示(HUD)系统、增强现实(AR)近眼显示系统等<sup>[3-4]</sup>。对于成像与显示系统的设计,本质上是利用各种光学元件实现对光波面的调控,以实现预期的物像关系、系统参数以及结构的要求。根据波面调控方式的不同,可以将光学元件分为几何元件与相位元件。几何元件通过介质折射、表面反射实现对光波面的调控<sup>[5-6]</sup>,如常规的透镜、反射镜等,其波面调控方式由斯涅尔定律表征,与元件的基底面形和介质的折射率有关。根据表面法向量的分布(表面矢高的分布)不同,基底面形可分为球面、柱面、非球面、自由曲面等,通常可以利用车削、研磨等机械方法直接改变基底表面的面形。相位元件通过与体光栅、微纳结构、液晶分子的相互作用等方式实现光波面的调控,如全息光学元件<sup>[7-10]</sup>(HOE)、衍射光学元件<sup>[11-15]</sup>(DOE)、超表面<sup>[16-21]</sup>(Metasurface)、液晶元件<sup>[22-25]</sup>等,其波面调控方式由相位函数表征,不同类型元件对相位函数的表征形式并不相同。HOE的相位函数由相干

光束所形成的干涉条纹分布(相干光束间的相位差分布)决定;DOE、超表面的相位函数由基底表面的微纳结构分布以及形状、尺寸等决定;液晶元件的相位函数由液晶分子的取向分布决定。通常采用物理方法制备相位元件,如HOE是利用双光束干涉曝光的方法在记录介质中制备出的一种光栅;DOE、超表面则是利用光刻或电子束刻蚀等方法在基底表面上加工出的一种微纳结构;相位元件一般附着于基底层上,基底对相位元件有支撑作用。相位元件较为轻薄,厚度仅为 $\mu\text{m}$ 量级,而基底层的厚度通常只有几mm,甚至更小。需要说明的是,尽管在波前调控和相位调制方面,传统的几何光学元件也可视为“相位元件”。但是本文中所提到的相位元件,主要定义为HOE、DOE、超表面等在几何曲面基底上附加有复杂相位结构的元件,其本质上与几何元件单纯的折射或反射不同。

对于成像与显示系统设计,若仅使用单一类型的相位元件,其功能与设计自由度(DOF)有限,很难同时满足对系统指标、性能、形态、结构的要求。因此,新型光学系统可以综合两类元件的优势,将几何元件与相位元件相融合,以提升系统的设计自由度与波面调控能力。考虑到两类元件融合设计的优势与可行性,本文着重介绍自由曲面光学元件(FOE)与HOE的融合设计,与几何元件的其他面形相比,自由曲面的设计

收稿日期: 2023-11-24; 修回日期: 2023-12-16; 录用日期: 2023-12-27; 网络首发日期: 2024-01-09

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2802100)、北京市自然科学基金(1222026)、国家自然科学基金(62275019, U21A20140)、小米青年学者

通信作者: yangtong@bit.edu.cn

自由度更高,可极大地提升元件的波面调控能力,显著提升系统的成像性能,特别是对于离轴非对称的系统结构,自由曲面能很好地校正其中的像差;HOE可以实现光束的大角度折转,与其他相位元件相比,其具备特有的选择性与复用性,易于实现良好的光学透视效果与复色显示,特别适合作为 HUD 或 AR 系统的成像组合器。同时,HOE 的制备方法简易、制备成本较低,易于制备出较大尺寸的元件以及实现批量化生产。

本文首先概括性地介绍几何元件与相位元件的融合设计方法,再简述 FOE 与 HOE 的基本原理、优势以及应用领域;然后,基于 HOE 的分类,介绍融合 FOE 与 HOE 的成像与显示系统的设计与应用;最后,对两类元件在光学系统中的融合设计进行讨论与展望。

## 2 几何元件与相位元件的融合设计简述

对于几何元件与相位元件的融合设计,首先应分析两者对光波的调控特性。几何元件的波面调控特性由斯涅尔定律表征,其可表示为

$$n'(\mathbf{N} \times \mathbf{r}') = n(\mathbf{N} \times \mathbf{r}), \quad (1)$$

式中: $n$ 、 $n'$ 分别为入射介质与折射(反射)介质的折射率;基于元件的局部坐标系, $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{r}'$ 分别为入射光矢量与折射(反射)光矢量; $\mathbf{N}$ 为基底表面的法向量。几何元件通过连续改变基底表面的法向量分布以实现了对光波面的调控。可在真实三维空间中构建矢高函数  $z=z(x, y)$  来表征几何元件的基底面形,如图 1(a)所示,其中  $(x, y)$  为基底表面的局部坐标,矢高  $z$  为点  $(x, y)$  处相对于元件表面顶点的高度, $S$  为基底表面。基于元件的局部坐标系,基底表面的法向量分布  $\mathbf{N}(x, y)$  可以表示为

$$\mathbf{N}(x, y) = \left[ \frac{\partial z(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial z(x, y)}{\partial y}, -1 \right]. \quad (2)$$

相位元件的波面调控方式由相位函数  $\phi(x, y)$  表征,其可表示为

$$n'(\mathbf{N} \times \mathbf{r}') = n(\mathbf{N} \times \mathbf{r}) + \frac{m\lambda}{2\pi}(\mathbf{N} \times \nabla\phi), \quad (3)$$

式中: $\lambda$ 为波长; $m$ 为衍射级次。与斯涅尔定律相比,相位函数  $\phi(x, y)$  提供了额外的波面调控能力。可以根据基底表面坐标的映射关系构建一个虚拟三维空间来描述相位函数的分布,如图 1(b)所示。

在成像与显示光学系统中,几何元件与相位元件的融合设计可分为 3 类:1) 几何元件与相位元件协同设计,以共同校正光学系统的像差,如图 2(a)所示;2) 几何元件作为相位元件的基底,以连续改变相位元件基底的法向量分布,如图 2(b)所示;3) 在相位元件的制备过程中引入几何元件,以改变相位元件的相位函数分布,如图 2(c)所示。在实际光学系统中,几何

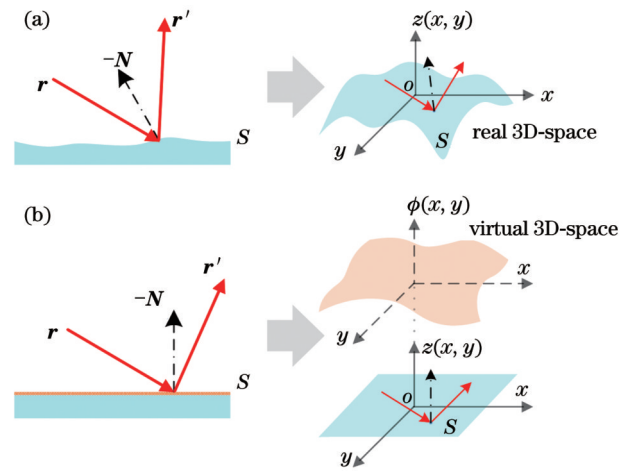


图 1 光学元件。(a)几何元件;(b)平面基底相位元件  
Fig. 1 Optical elements. (a) Geometric element; (b) planar phase element

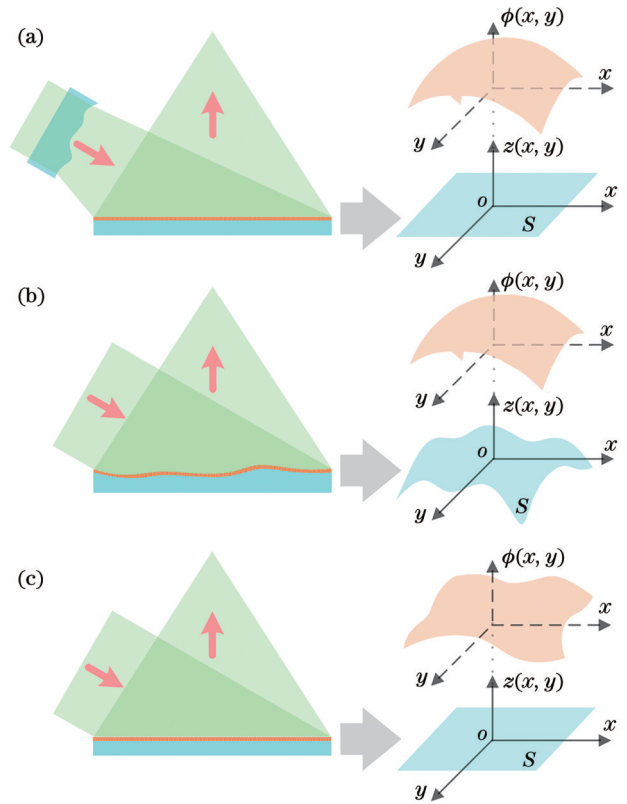


图 2 几何元件与相位元件的融合设计。(a)几何元件与相位元件协同设计;(b)几何元件作为相位元件的基底;(c)几何元件改变相位元件的相位函数分布  
Fig. 2 Fusion design of geometric and phase elements. (a) Joint design of geometric and phase elements; (b) geometric element as substrate of phase element; (c) geometric element tunes distribution of phase function of phase element

Fig. 2 Fusion design of geometric and phase elements. (a) Joint design of geometric and phase elements; (b) geometric element as substrate of phase element; (c) geometric element tunes distribution of phase function of phase element

元件与相位元件的融合设计可以将上述 3 类方法组合起来使用。考虑到两类元件融合设计的优势与可行性,着重介绍 FOE 与 HOE 在成像与显示系统中的融

合设计。

### 3 自由曲面光学与全息光学元件的简述

#### 3.1 自由曲面光学

自由曲面一般是指不具备轴旋转对称或平移对称性的光学曲面<sup>[26-28]</sup>。相比于传统的如球面、非球面等具备旋转对称性的曲面,自由曲面需要使用更多的面形参数进行描述,但其也可以为光学系统设计带来更多的自由度;自由曲面的波面调控与像差校正能力很强,特别适用于校正光学系统的像差,尤其是离轴非对称的系统结构;自由曲面可以减少系统中元件的数量,从而减小系统的体积与质量,实现传统光学系统难以实现的系统指标、性能、形态与结构<sup>[29-31]</sup>。

自由曲面通常是在基底球面或者基底二次曲面的基础上叠加非旋转对称项得到的。对于成像与显示系统设计,自由曲面的面形通常可以用具体的数学表达式来描述<sup>[32]</sup>,例如变形非球面、XY 多项式、Zernik 多项式、Q 多项式、非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面等。由二次曲面基底叠加 XY 多项式所描述的自由曲面面形可表示为

$$z(x, y) = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2)}} + \sum_{i \geq 0} \sum_{j \geq 0} A_{i,j} x^i y^j, \quad (4)$$

式中: $c$ 为顶点处曲率; $A_{ij}$ 为各自由度曲面项的系数; $k$ 为二次曲面系数。

随着精密加工与检测技术的不断发展,可以制造出高面形精度、较大尺寸的自由曲面反射镜或透镜,可应用于遥感探测<sup>[33-35]</sup>、AR 显示<sup>[36-40]</sup>、光谱仪<sup>[41-43]</sup>、光刻物镜<sup>[44-46]</sup>等领域。

#### 3.2 全息光学元件

作为全息技术的应用之一,HOE本质上是一种衍射光栅,但其微结构、制备方式、波前调控机理与表面浮雕光栅有很大的不同。HOE的基本工作原理可总结为干涉记录与衍射复现。两束相干的记录光波(参考光波与信号光波)在全息记录介质内发生干涉,形成包含记录光波信息的干涉模式,导致全息记录介质的折射率在其内部呈现一定的空间周期性分布,形成全息体光栅结构<sup>[47-50]</sup>。入射光波以与参考光波或信号光波相同的方式入射至已记录的HOE中,经全息体光栅的衍射调制,可完全再现出信号光波或参考光波,如图3所示。HOE根据制备方式的不同可分为反射式与透射式。反射式HOE的记录光波位于记录介质异侧,全息光栅条纹平行于基底表面,且具备较强的波长选择性;透射式HOE的记录光波位于记录介质同侧,全息光栅条纹垂直于基底表面,且具备较强的角度选择性。

HOE具备特有的波前调控特性、选择性、复用性、轻薄性、易加工性,因此与其他光学元件相比,HOE的应用优势更大<sup>[51-52]</sup>。

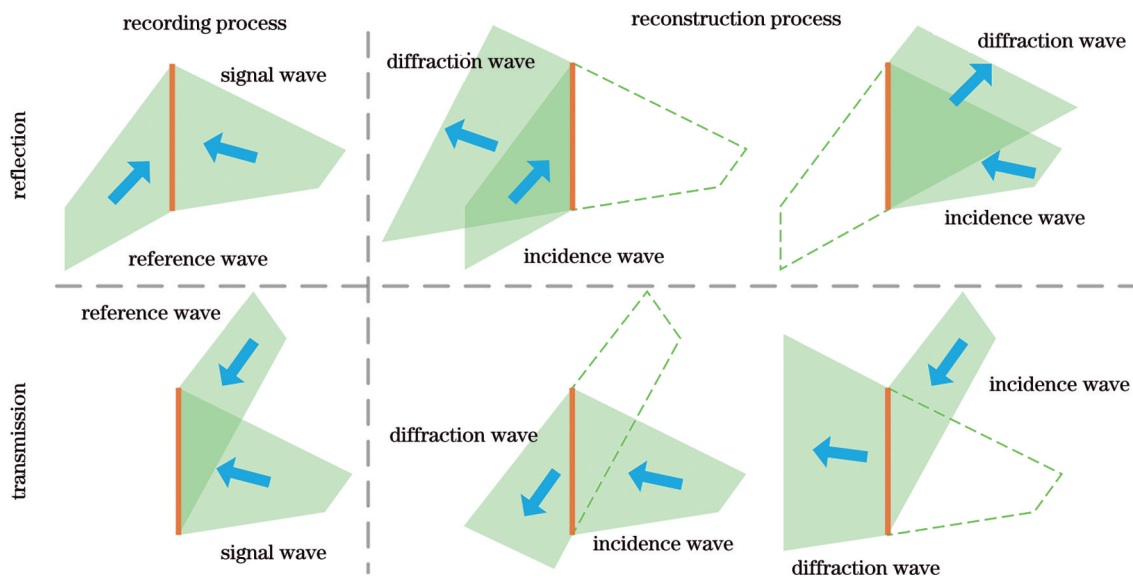


图3 HOE的记录与复现过程

Fig. 3 Recording and reconstruction process of HOE

1) 波前调控特性:几何元件的波前调控特性由其基底面形、元件厚度与材料折射率共同决定,但受限于光学表面实际的加工能力及材料性质,几何元件很难实现大角度的非常规光线偏折。而HOE的波前调控特性仅取决于其曝光制备过程(即取决于信号光波与

参考光波的相对关系),可相对容易地实现大角度的光线偏折。

2) 波长与角度选择性:基于体光栅结构,HOE仅衍射特定波长与入射角度范围内的光波,当其作为AR系统的成像组合器进行使用时,得到的光学透视

效果良好,且无透视畸变问题。

3) 复用性:可在同一层记录介质内实现不同结构全息光栅的叠加,其可提高光学系统设计的灵活性。例如,在同一层记录介质内,同时复用红色、绿色、蓝色波长的全息光栅,可实现全彩色显示。

4) 轻薄性:薄膜形态的HOE一般附着于平板玻璃或树脂基底上,可保证光学系统具备紧凑、轻便、美观的结构。

5) 易加工性:HOE利用同一曝光实验平台即可进行重复制备,易于实现低成本、大批量的生产。而任何元件的制备需要经过车削、研磨或注塑等流程,DOE的制备需要经过光刻或纳米压印等流程,这两种光学元件的制备成本较高且制备周期较长。

HOE的衍射效率与所记录的干涉模式、全息记录介质的折射率调制度等因素直接相关,因此,全息记录介质对HOE的光学特性有十分重要的影响。理想的全息记录介质应具备良好的感光灵敏性、线性的频率响应、较高的稳定性、无惰性、无吸收、无解谐效应(无收缩)、后处理过程简单等特点。全息记录介质可分为卤化银盐乳胶<sup>[53-54]</sup>、光致抗蚀剂<sup>[55-56]</sup>、重铬酸盐明胶<sup>[57]</sup>、光致聚合物<sup>[58-61]</sup>等材料。卤化银盐乳剂的感光灵敏度高、光谱响应范围宽、环境稳定性高、制备工艺较为成熟,但所制备出的光栅衍射效率低,且后处理过程较为复杂,需要显影、定影、漂白等化学过程;与卤化银盐乳胶相比,光致抗蚀剂的制备流程简单,但对波长在可见光范围内的光不敏感,且制备出的光

栅性能不高;重铬酸盐明胶具备较高的折射率调制度,能产生较高的衍射效率,但其光谱响应范围有限,无法记录较长波段的光谱,即无法记录红光以形成彩色光栅,同时其感光性能差且材料易潮解,不适于长期保存。

光致聚合物(Photopolymer)具备较高的衍射效率、高信噪比、低成本、后处理过程简单(不涉及化学处理)等优点,现已广泛应用于HOE的制备<sup>[62-63]</sup>。目前生产光致聚合物的厂商有德国科思创(Covestro,原拜耳材料部门)、美国杜邦(DuPont)等公司。工业上,进行HOE记录的光致聚合物的结构如图4(a)所示,其一般由PET(Polyethylene terephthalate)膜层、光致聚合物膜层、基底层组成。PET膜层用于保护光致聚合物膜层,以避免其在运输过程中被划伤;基底层用于支撑光致聚合物膜层,一般可选用玻璃或树脂作为基底层材料;光致聚合物主要由光敏染料、光引发剂、单体,以及基体介质(成膜树脂)等物质组成。当未受到光照时,光致聚合物中的单体不发生反应;当受到光照时,光引发剂被激活,靠近引发剂的单体发生聚合反应形成聚合物分子。聚合物分子区域与基体介质之间存在折射率差,这导致光致聚合物内部的折射率分布发生改变,基于参考光波与信号光波的干涉模式,形成基于折射率调制的全息光栅结构,如图4(b)所示。光致聚合物在完成记录曝光后,还需经过UV(Ultraviolet)固化、热处理等过程,以固化其内部存在的聚合物分子,增强全息光栅的稳定性<sup>[64-68]</sup>。

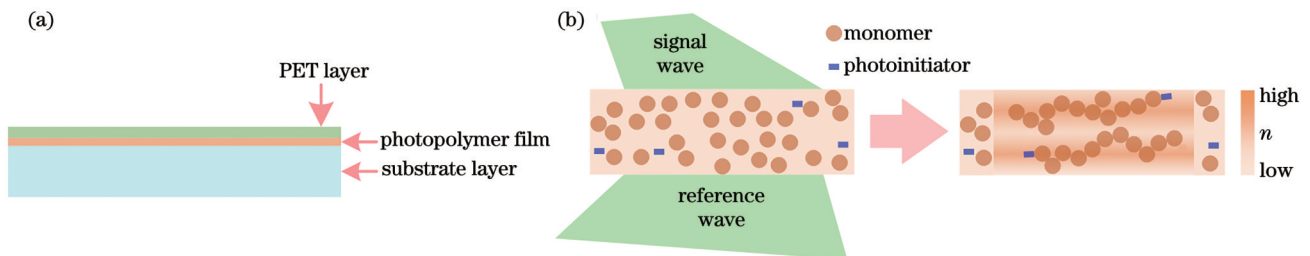


图4 基于光致聚合物的HOE。(a)光致聚合物的封装结构示意图;(b)基于光致聚合物的全息光栅的形成原理图

Fig. 4 HOE based on photopolymer. (a) Schematic diagram of package structure of photopolymer; (b) schematic diagram of formation of holographic volume grating based on photopolymer

一般可通过薄膜贴敷或溶液涂布的方式将光致聚合物附着于基底层表面。在光致聚合物溶液中加入成膜树脂,其可起到成形与支撑作用<sup>[69-70]</sup>,形成固相光致聚合物薄膜。薄膜可贴敷于基底层表面;或者在光致聚合物溶液中加入物理凝胶因子,在溶胶状态下,光致聚合物溶液可涂布于基底层表面,改变其物理条件(如温度、光照)使光致聚合物溶液薄膜凝胶化<sup>[71]</sup>。

根据记录光波的不同,不同类型的HOE可实现不同的光学功能,例如全息透镜<sup>[72-78]</sup>、全息反射镜<sup>[79-84]</sup>、全息透镜阵列<sup>[85-90]</sup>、散射片<sup>[91-95]</sup>等。因此,HOE在一定程度上可取代传统的光学元件,应用于HUD<sup>[96-100]</sup>、全息

波导<sup>[101-105]</sup>、麦克斯韦显示<sup>[106-112]</sup>、全息显示<sup>[113-114]</sup>、集成成像<sup>[115-117]</sup>、虚拟现实<sup>[118]</sup>等领域。

针对光波与全息光栅的相互作用,通常可利用波动光学方法来求解,但其计算量较大、求解过程所消耗的时间较长,并不适用基于HOE的光学系统设计过程。在一定的近似条件下,即当记录HOE的全息介质厚度( $z$ 方向的厚度)远小于HOE在 $x$ 与 $y$ 方向上的尺寸(HOE的横向尺寸)时,可利用定义在全息基底表面 $S$ 上的三维矢量场 $\Psi_c(x, y)$ 来表征全息光栅<sup>[119-120]</sup>,如图5所示。例如制备HOE最为常用的光致聚合物,其厚度通常仅为十几 $\mu\text{m}$ ,而HOE的尺寸为 $\text{mm}$ 量级(十几 $\text{mm}$ ~数百 $\text{mm}$ ),两者相差3~4个数量级,可以

满足上述近似条件。因此,可利用光线追迹的方法快速求解光波与全息体光栅的相互作用,使得基于 HOE 的光学系统可被建模、仿真、设计、优化。利用光线追迹来设计全息光学系统,可提高系统的设计与优化过程的灵活性与便利性。同时,利用光线追迹也可以定量地分析系统的波面调控、成像性能、衍射效率等特性。但是对于此种近似下引入的数量级极微小的误差,目前学术界仍难以给出具体的量化解释。这也是全息光学领域进一步研究的方向之一。

假设全息体光栅本身的厚度无限薄,则定义在全息基底表面  $S$  上的 HOE 波前调控特性可通过光线追迹定量分析。如图 5 所示,在全息基底表面  $S$  的点  $(x, y)$  处,制备 HOE 的信号光波和参考光波可分别由三维矢量  $\mathbf{r}_S(x, y) \in \mathbb{R}^3$  与  $\mathbf{r}_R(x, y) \in \mathbb{R}^3$  表征

$$\begin{cases} \mathbf{r}_S = 2\pi n_c (\mu_S \mathbf{x} + \nu_S \mathbf{y} + \xi_S \mathbf{z}) / \lambda_c \\ \mathbf{r}_R = 2\pi n_c (\mu_R \mathbf{x} + \nu_R \mathbf{y} + \xi_R \mathbf{z}) / \lambda_c \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\lambda_c$  为 HOE 的记录光波的波长;  $n_c$  为全息记录介质的折射率;  $\mu_S, \nu_S, \xi_S$  分别为矢量  $\mathbf{r}_S$  相对于局部  $x, y, z$  轴方向的余弦值;  $\mu_R, \nu_R, \xi_R$  分别为矢量  $\mathbf{r}_R$  相对于局部坐标轴方向的余弦值;  $\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}$  分别为  $x, y, z$  方向上的单位向量。在该点处,可定义一个位于基底表面  $S$  的三维全息光栅矢量  $\Psi_G(x, y) \in \mathbb{R}^3$ , 用于表征全息体光栅。全息光栅矢量  $\Psi_G$  的各分量可表征全息体光栅在对应方向上的空间频率,具体表达式为

$$\Psi_G = (\Psi_{G,x}, \Psi_{G,y}, \Psi_{G,z}) = \mathbf{r}_S - \mathbf{r}_R = \frac{2\pi}{\lambda_c} [n_c (\mu_S - \mu_R), n_c (\nu_S - \nu_R), n_c (\xi_S - \xi_R)] \quad (6)$$

在全息重现(成像)过程中,全息基底表面  $S$  上位于该点处的入射光波  $\mathbf{r}_I$  可表示为

$$\mathbf{r}_I = 2\pi n_p (\mu_I \mathbf{x} + \nu_I \mathbf{y} + \xi_I \mathbf{z}) / \lambda_p \quad (7)$$

式中:  $\lambda_p$  为重现(成像)光波的波长;  $n_p$  为重现(成像)波长在全息记录介质中的折射率。在该点处,经全息体光栅所调制的一阶衍射光波  $\mathbf{r}_D$  可表示为

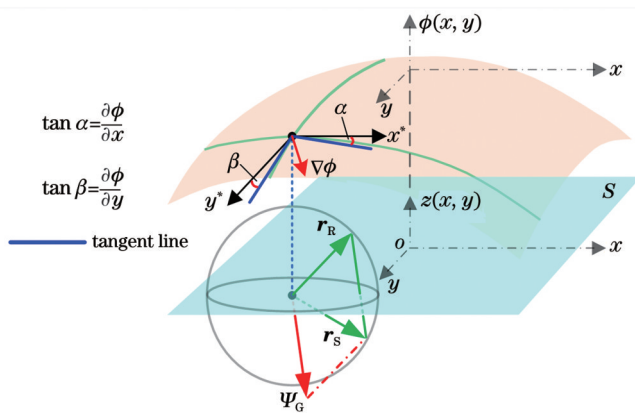


图 5 HOE 的表征方式

Fig. 5 Representation way of HOE

$$\begin{cases} r_{D,x} = \Psi_{G,x} + r_{I,x} \\ r_{D,y} = \Psi_{G,y} + r_{I,y} \end{cases} \quad (8)$$

一阶衍射光波  $\mathbf{r}_D$  的分量  $r_{D,z}$  可根据矢量  $\mathbf{r}_D$  的模长度计算得到,其正负号取决于 HOE 的类型(反射式或透射式)。由式(8)可得,全息光栅矢量  $\Psi_G$  的分量  $(\Psi_{G,x}, \Psi_{G,y})$  完全决定全息基底表面上各点位置处的入射光波与衍射光波的数值关系。

若相位元件定义在该基底表面  $S$  上,且虚拟三维空间中的相位函数为  $\phi(x, y)$ , 其中  $x^*$  与  $y^*$  分别平行于  $x$  轴与  $y$  轴,如图 5 所示。基于式(3),对于基底表面上某点处的入射光波  $\mathbf{r}_I$ , 经相位函数调控后,其所对应的一阶出射光波  $\mathbf{r}_O$  可表示为

$$\begin{cases} r_{O,x} = \frac{\partial \phi}{\partial x} + r_{I,x} \\ r_{O,y} = \frac{\partial \phi}{\partial y} + r_{I,y} \end{cases} \quad (9)$$

同理,一阶出射光波  $\mathbf{r}_O$  的分量  $r_{O,z}$ , 可根据矢量  $\mathbf{r}_O$  的模长度计算得到,其正负号取决于该相位元件的类型(反射式或透射式)。

对比式(8)与式(9)中所涉及的三维矢量,可得到

$$\begin{cases} \tan \alpha = \frac{\partial \phi}{\partial x} = \Psi_{G,x} \\ \tan \beta = \frac{\partial \phi}{\partial y} = \Psi_{G,y} \end{cases} \quad (10)$$

在光学基底表面  $S$  的各点位置处,式(10)构建出相位函数  $\phi(x, y)$  与全息光栅矢量  $\Psi_G$  之间唯一确定的数值关系,即可利用相位函数  $\phi(x, y)$  定量地表征 HOE 的波前调控特性。相位函数的表征与计算以 rad 为单位,其通常可表示为多项式的线性组合,例如 XY 多项式、Zernike 多项式、正交多项式,或者采用其他数学形式进行表征,如径向基函数组合、NURBS 等。

综上所述,在基于 HOE 的光学系统设计中,有 3 种方法可以表征 HOE。

1) 在真实三维空间中,通过直接定义记录光波(信号光波与参考光波)来表征 HOE,如图 6(a)所示。在全息基底表面  $S$  上,记录光波可由相位函数  $\phi(x, y)$  或光线方向的余弦值  $(\mu, \nu, \xi)$  定义,两者的关系可表示为

$$\begin{cases} \mu = \frac{\lambda_c}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial x} \\ \nu = \frac{\lambda_c}{2\pi} \frac{\partial \phi}{\partial y} \end{cases} \quad (11)$$

若信号光波与参考光波的相位函数分别为  $\phi_S(x, y)$ 、 $\phi_R(x, y)$ , 则 HOE 的相位函数  $\phi_G(x, y)$  可表示为

$$\phi_G(x, y) = \phi_S(x, y) - \phi_R(x, y) \quad (12)$$

若信号光波与参考光波的光线方向余弦值分别为  $(\mu_S, \nu_S, \xi_S)$ 、 $(\mu_R, \nu_R, \xi_R)$ , 则 HOE 的全息光栅矢量  $\Psi_G(x, y)$  可表示为

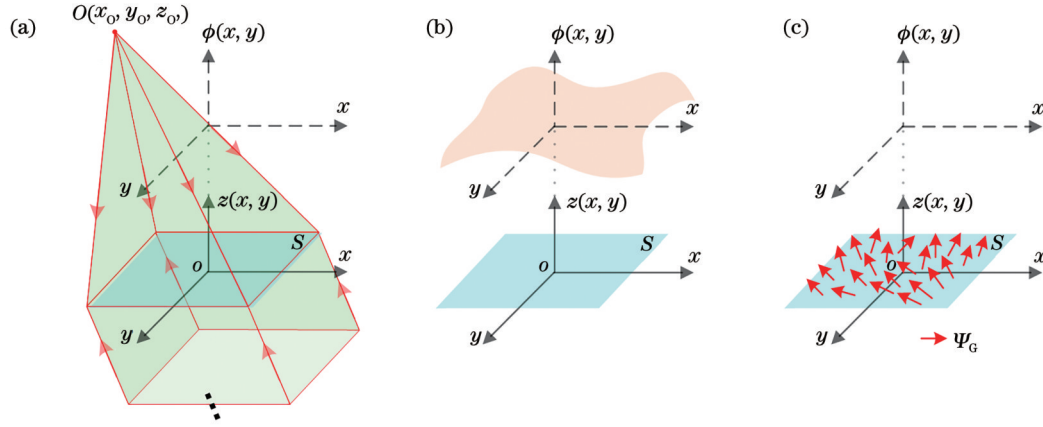


图 6 HOE 的表征方法。(a)记录光波;(b)全息相位函数;(c)全息光栅矢量

Fig. 6 Characterization methods of HOE. (a) Recording waves; (b) holographic phase function; (c) holographic grating vector

$$\Psi_G(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_c} (\mu_s - \mu_r, \nu_s - \nu_r, \xi_s - \xi_r). \quad (13)$$

根据波面形状不同,记录光波可分为球面波或自由曲面光波,其中平面波可视为曲率半径无穷大的球面波。对于球面光波,在全息基底表面  $S$  上,其相位函数可表示为

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_c} \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + [z(x, y) - z_0]^2}, \quad (14)$$

式中:  $(x, y)$  为全息基底表面的局部坐标。相对于基底表面  $S$  的局部坐标系,  $(x_0, y_0, z_0)$  为球面波的点源坐标。

自由曲面光波的波前可表示为多项式的线性组合,或者在球面波基础上叠加多项式的线性组合等形式。由 XY 多项式所描述的波前为

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_c} \sum_{m \geq 0, n \geq 0} A_{m,n} x^m y^n, \quad (15)$$

$$\phi(x, y) = \frac{2\pi}{\lambda_c} \sum_{m \geq 0, n \geq 0} A_{m,n} x^m y^n + \frac{2\pi}{\lambda_c} \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + [z(x, y) - z_0]^2}. \quad (16)$$

2) 在虚拟三维空间中,通过定义全息相位函数  $\phi_c(x, y)$  直接表征 HOE,如图 6(b) 所示。

3) 在真实三维空间中,通过定义位于基底表面  $S$  上的全息光栅矢量  $\Psi_G(x, y)$  直接表征 HOE,如图 6(c) 所示。全息光栅矢量  $\Psi_G$  的各分量可表示为多项式的线性组合,则全息光栅矢量  $\Psi_G$  可表示为

$$\Psi_G(x, y) = [\Psi_{G,x}(x, y), \Psi_{G,y}(x, y), \Psi_{G,z}(x, y)]. \quad (17)$$

因此,基于 HOE 的成像与显示系统设计可以根据系统参数与结构要求,利用多参数优化方法计算出全息基底表面  $S$  的记录光波、相位函数分布  $\phi_c(x, y)$ 、全息光栅矢量分布  $\Psi_G(x, y)$ ,以及全息基底表面  $S$  的位置坐标。

若利用相位函数或光栅矢量表征 HOE,在完成全息光学系统设计后,并不能直接获得 HOE 的记录光波

信息,还需设计 HOE 的记录系统。对于目前商用的光学设计软件,例如 CODE V、OpticStudio (Zemax) 等,可通过全息相位函数或者球面光波点源坐标来表征 HOE。而利用全息光栅矢量表征 HOE 时,设计者需编写特定的算法。

全息光栅矢量  $\Psi_G$  在  $x$  方向与  $y$  方向上的分量表征了 HOE 的波前调控特性,而全息光栅矢量  $\Psi_G$  在  $z$  方向的分量  $\Psi_{G,z}$  则用于表征 HOE 的波长与角度选择性。当入射光波  $r_1$  的波长或角度偏离原始的参考光波或信号光波时,所对应的衍射光波  $r_D$  将偏离原始的信号光波或参考光波,同时衍射光波的衍射效率会有所衰减,该现象称为布拉格失配 (Bragg mismatch)。可通过建立相位失配项参数  $\Delta\Psi_z$  来评价衍射效率的衰减程度,其表达式为

$$\Delta\Psi_z = |r_{D,z} - \Psi_{G,z} - r_{1,z}|. \quad (18)$$

当  $\Delta\Psi_z = 0$  时,入射光波满足布拉格条件,衍射效率  $\eta$  最高。衍射效率  $\eta$  随参数  $\Delta\Psi_z$  的增加而直接降低。对于实际的全息光学系统,所有成像光线(来自于不同的视场点与光瞳坐标)的布拉格条件通常并不能完全满足,这会导致衍射效率在整个成像视场与光瞳范围内衰减且具有不均匀性。因此,在全息光学系统的设计优化中,应利用  $\Delta\Psi_z$  构建与衍射效率调控相关的参数。在保证系统成像性能的前提下,调控成像光束的衍射效率变化的幅度与均匀性。

## 4 融合自由曲面光学与全息光学元件的成像与显示系统

对于光学系统设计,若仅使用其中单一类型的光学元件,其设计自由度有限,很难同时满足系统指标、性能、形态、结构的要求。因此,可以将 FOE 与 HOE 相互融合设计,充分发挥两者的优势,以研制出设计自由度更高、性能更高且结构更紧凑的成像与显示光学系统。在理论上,FOE 与 HOE 的融合设计可分为 3 类:

1) 在系统中同时使用 FOE 和 HOE, 以共同校正光学系统中的像差;

2) 自由曲面作为 HOE 的基底面形, 以实现曲面基底的 HOE;

3) 在 HOE 的制备过程中, 通过引入 FOE 以调控 HOE 的记录光波。

但是, 受限于全息记录介质在曲面基底上的涂布或贴敷工艺, 上述融合设计分类 2) 中 HOE 的基底面形目前主要为柱面或球面。在实际光学系统中, FOE 与 HOE 的融合设计可以将上述 3 类方法组合使用。

由式(3)可知, HOE 的波面调控取决于全息相位函数  $\phi(x, y)$  与基底面形  $z(x, y)$ 。HOE 的相位函数分布本质上取决于记录光波面。根据波面形状的不同, HOE 可以有不同的分类。当 HOE 的记录光波为球面波时, 可将其称为 SHOE (Spherical HOE)。为提升 HOE 的波前调控与像差校正能力, 可利用非常规的波前来制备 HOE。为区别于球面波的复杂波前, 非常规的波前可以是旋转对称的非球面波 (即对应于非球面波 HOE), 非球面 HOE 的像差校正能力比 SHOE 强, 但其设计自由度仍然受限; 也可以是非旋转对称的自由曲面光波, 可实现对离轴非对称像差的良好校正。为统一概括这些非常规的波前, 将其统称为自由曲面光波, 由此制备出的 HOE 称为 FHOE (Freeform HOE)。因此, FHOE 也包括了非球面 HOE, 其记录波前可以是旋转对称的非球面波或者非旋转对称的自由曲面光波。需要说明的是, 由于曝光光路与 HOE 可能存在离轴倾斜关系, 采用旋转对称的球面波或者非球面波制备出的 HOE 的相位函数也可能是非旋转对称的。

另外, 根据不同的基底面形  $z(x, y)$ , 可将 HOE 分为平面基底 HOE 与曲面基底 HOE。平面基底 HOE 的表面法向量  $N(x, y)$  恒定, 其设计自由度仅局限于对记录光波的调控。而曲面基底 HOE 可扩展到对基底面形与记录光波的同时调控。

基于上述的分类依据, HOE 有 4 种类型, 如图 7 所示。对于同一类型的记录光波 (球面波或自由曲面光波), 曲面基底 HOE 的设计自由度要高于平面基底 HOE。而对于同一类型的基底面形, FHOE 的设计自由度要高于 SHOE。

基于上述分类, 介绍融合 FOE 与 HOE 的成像与显示系统的设计与应用。

#### 4.1 球面波记录的全息光学元件 (SHOE)

SHOE 由球面光波制备而成, 在实际制备过程中, 球面波是最易获取的一类光波, 其可由显微物镜配合滤波针孔产生, 针孔中心对应为球面波的点源位置。当球面波的点源位于理想准直透镜的焦点位置时, 可产生平面波。基于 SHOE 的全息光学系统设计可通过定义球面记录光波的点源坐标表征 HOE, 点源坐标作为系统的优化变量。由于 SHOE 是针对“点源对点

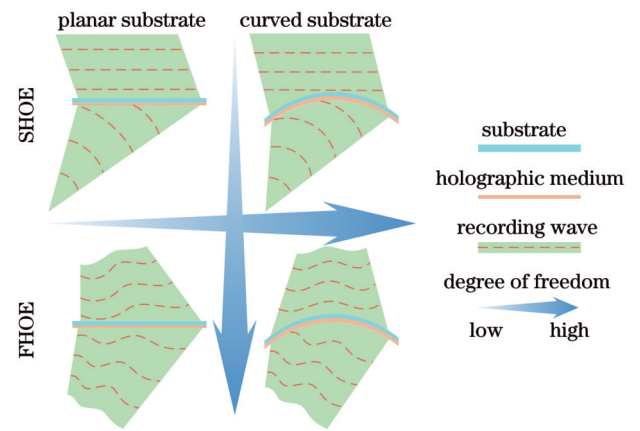


图 7 HOE 的分类

Fig. 7 Classification of HOE

源”设计而成的, 其仅对单视场点的光束有良好的成像性能, 其他视场点则存在较大的像差。为保证在较大的视场范围内均能实现良好的成像性能, 可在全息光学系统中引入 FOE, 通过与 SHOE 协同设计, 以共同校正系统中的像差。

##### 4.1.1 平面基底 SHOE

由于平面基底 SHOE 的设计与制备过程较为简单, 是目前应用范围最广的一类 HOE。Shu 等<sup>[121]</sup>研制了全彩全息 AR 近眼显示系统, 实现了  $20^\circ$  的对角视场角, eyebox 尺寸为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 。如图 8(a) 所示, 该系统包含了自由曲面中继系统与全息成像组合器, 由图像源发出的成像光束经中继系统调控后形成一次像面, 再经全息组合器衍射后进入人眼成像。全息组合器为平面基底的反射式 SHOE。中继系统用于补偿剩余像差, 以校正离轴的单色与复色像差, 其包含了两片自由曲面透镜、两片自由曲面反射镜以及一片反射式 SHOE。通过协同设计 FOE 与 SHOE, 以保证该系统具有良好的成像性能。Han 等<sup>[122]</sup>研制了一维出瞳扩展的全息波导近眼显示系统, 波导厚度为  $3\text{ mm}$ , 实现了  $45^\circ$  的对角视场角。如图 8(b) 所示, 该系统包含了自由曲面耦入元件、平板波导与全息耦出元件。自由曲面耦入元件用于准直并放大图像源所发出的成像光束, 并将其耦入波导内部传播; 全息耦出元件为平面基底的反射式 SHOE, 可以将波导内部传播的准直成像光束衍射进入人眼成像。通过 FOE 与 SHOE 的相互协同设计, 实现了轻薄型的高性能全息波导显示系统。

##### 4.1.2 曲面基底 SHOE

平面基底 SHOE 的设计自由度仅为球面记录光波的点源坐标, 为进一步提升自由度, 可将基底表面的面形由平面扩展至曲面。对于 AR 或 HUD 系统, 与平面基底相比, 曲面基底的全息组合器可以进一步扩大系统的视场角范围, 同时还可提升用户的佩戴舒适度与美学感, 或者可直接集成于汽车的风挡玻璃。目前受限于全息记录介质的涂布或贴敷工艺, 曲面基底的

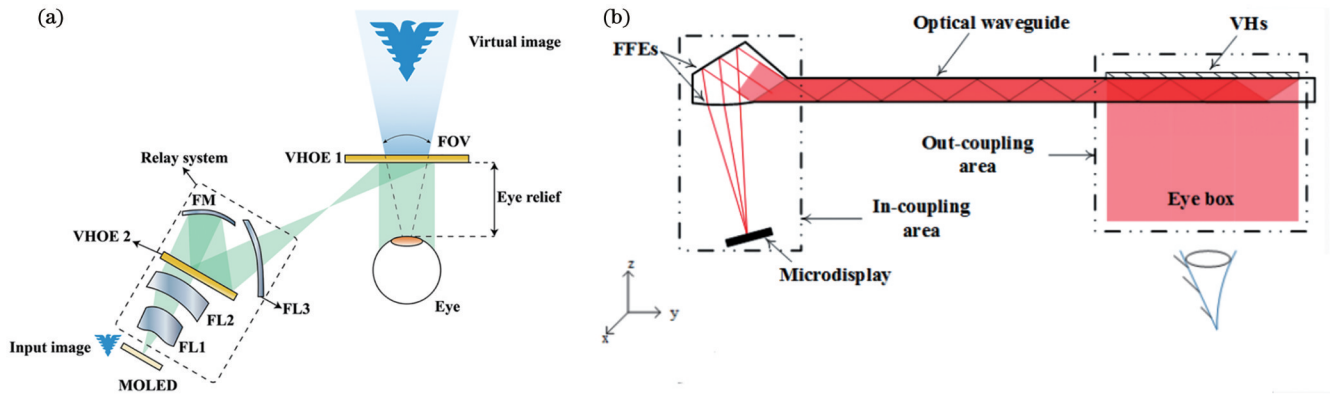


图 8 由 FOE 与平面基底 SHOE 协同设计的全息光学系统。(a)带有合成器的 AR 近眼显示系统<sup>[121]</sup>; (b)波导类型的 AR 近眼显示系统<sup>[122]</sup>

Fig. 8 Holographic optical systems jointly designed by FOE and SHOE with planar substrate. (a) AR near-eye display system with combiner<sup>[121]</sup>; (b) AR near-eye display system with waveguide type<sup>[122]</sup>

面形主要为球面或柱面。

Bang 等<sup>[123]</sup>制备了柱面基底的反射式 SHOE, 可作为视网膜投影显示系统的成像组合器, 如图 9 所示。激光扫描投影仪发出的成像光束经准直后入射至全

息组合器, 再经衍射调制后以会聚球面波的形式入射至相机镜头中心。该系统实现了  $65^\circ$  的水平视场角与 50 mm 的出瞳距离。在同一记录条件下, 对于不满足布拉格匹配条件的入射光束, 与平面基底相比, 柱面基底的 SHOE 能够实现尺寸更小的聚焦光斑。因此, 柱面基底的 SHOE 更适用于基于布拉格失配条件设计的出瞳扩展的视网膜投影显示系统。

在传统的汽车 HUD 系统中, 风挡玻璃仅用于反射成像光束, 并不参与像差校正, 系统中投影单元的位置相对固定, 且体积较大。Wayray 公司<sup>[124-126]</sup>制备了集成于汽车风挡玻璃的反射式 HOE, 可作为 HUD 系统的成像组合器, 如图 10(a) 所示。由图像源发出的成像光束经投影单元调控后, 再经全息元件的衍射入射至系统的 eyebox 范围内。该 HUD 系统的视场角为  $14^\circ \times 4^\circ$ , eyebox 尺寸为  $130 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ , 出瞳距离为 900 mm。Wayray 公司根据特定的系统规格参数与风

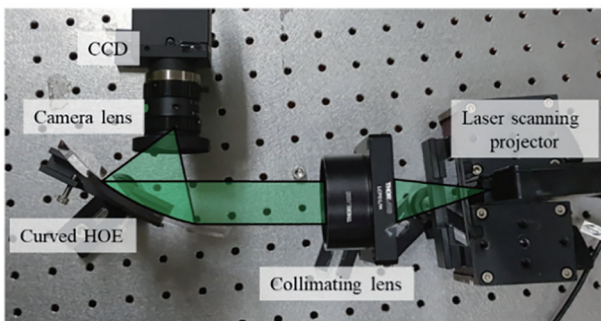


图 9 基于柱面基底 SHOE 的视网膜投影显示系统<sup>[123]</sup>

Fig. 9 Retinal projection display system based on SHOE with cylindrical substrate<sup>[123]</sup>

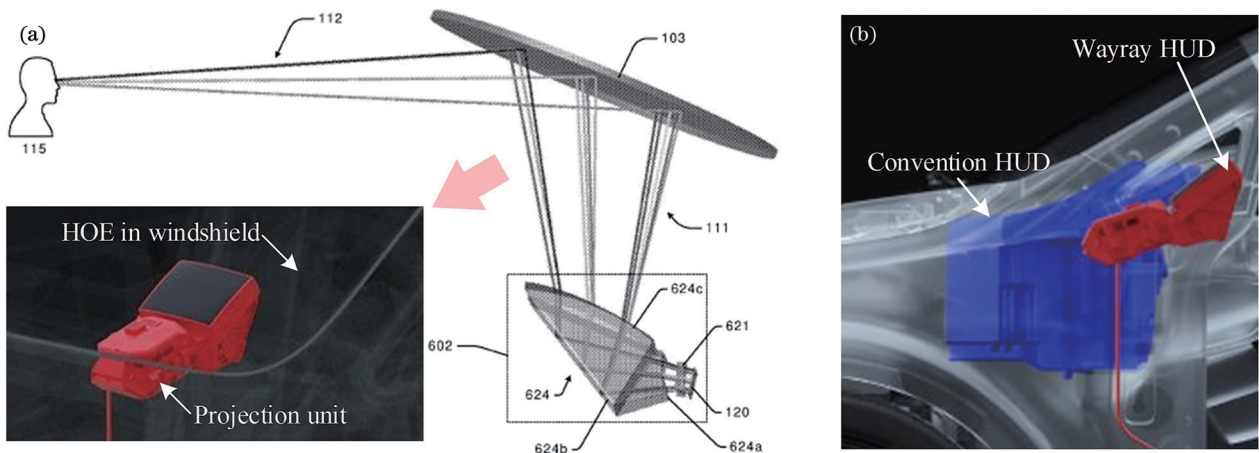


图 10 Wayray 公司设计的基于曲面基底 HOE 的 HUD 系统<sup>[124-126]</sup>。(a)设计布局, 插图为全息 HUD 系统的示意图; (b)与传统 HUD 系统的投影单元体积对比图

Fig. 10 HUD system based on HOE with curved substrate designed by Wayray company<sup>[124-126]</sup>. (a) Design layout, inset image is schematic diagram of holographic HUD system; (b) comparison diagram of projection unit volume with conventional HUD system



挡玻璃面形,对全息组合器的记录光路进行设计,以配合投影单元校正像差。图 10(b)为 Wayray 公司所研制的全息 HUD 系统与传统 HUD 系统的投影单元体积对比图,可以看出全息 HUD 的投影单元体积要明显小于传统 HUD 系统。

#### 4.2 自由曲面光波记录的全息光学元件(FHOE)

对于 SHOE,其波前调控与像差校正能力仍然有限,需要在全息光学系统中引入额外的辅助光学元件来补偿系统中的剩余像差,但这会增加系统的体积、重量以及装配难度。为进一步提升 HOE 的设计自由度,研究者们提出了 FHOE,旨在保证 HOE 复用性、选择性、轻薄性的同时,提升其波前调控能力。

基于 FHOE 的全息光学系统设计,可通过定义记录光波的相位函数  $\phi_r(x, y)$ 、 $\phi_s(x, y)$  或全息相位函数  $\phi_c(x, y)$  或全息光栅矢量  $\Psi_G(x, y)$  表征 FHOE 的波前调控特性,各多项式系数作为系统的优化变量。由于 FHOE 不再单独实现“点源对点源”设计,记录光波不再是传统的球面波。因此,在 FHOE 的记录系统设计中,须引入额外的波前调控元件(WCE),在实际制备过程中通过简单球面波与 WCE 的组合产生特定要求的自由曲面记录光波。WCE 可以是透镜组、自由曲面透镜(反射镜)、空间光调制器(SLM)、计算机生成全息图(CG H)等元件。

针对由记录光波的相位函数  $\phi_r(x, y)$ 、 $\phi_s(x, y)$  直接定义得到的 FHOE,可分别直接设计参考光路与信号光路中的 WCE;而针对由全息相位函数  $\phi_c(x, y)$  或全息光栅矢量  $\Psi_G(x, y)$  表征得到的 FHOE,在完成全息光学系统的设计后,并不能直接获得 FHOE

记录的光波信息,还需单独设计 FHOE 的全息记录系统。

同样根据基底面形的不同,FHOE 可分为平面基底 FHOE 与曲面基底 FHOE,以下将分别介绍这两种类型的元件与自由曲面光学在成像与显示系统中的融合设计。

##### 4.2.1 平面基底 FHOE

对于平面基底 FHOE 的研究,1982 年, Fairchild 等<sup>[127]</sup>提出了复杂全息元件的制备与设计方法。如果在传统的点光源产生球面波(或平面波)的曝光光路中引入与光路光轴旋转对称的附加元件或元件组,即可产生旋转对称的复杂非球面波前,进而可以制备出波前调制能力更强的非球面 HOE。如果想要在曝光光路中使用到自由曲面光波,其可由 CGH 附加光学系统产生,如图 11(a)所示。针对 HOE 的设计,利用相位函数表征信号记录光波,并通过优化各相位项的系数以实现特定的成像要求;在完成 HOE 设计后,将相位函数所描述的信号记录光波从全息基底表面经光学系统反向追迹至 CGH 平面,光学系统可降低光波的空间带宽积,以满足制备 CGH 记录系统要求。同时,光学系统产生一个频谱面,利用空间滤波器移除 CGH 的其他衍射阶。CGH 平面上由反向追迹得到的相位函数分布可用于制备 CGH 元件。基于提出的设计方法,他们研制了全息傅里叶变换透镜,透镜尺寸为  $9\text{ cm} \times 9\text{ cm}$ 、焦距为  $50\text{ cm}$ 、成像波长为  $514.5\text{ nm}$ 。相比于球面波制备的傅里叶透镜,由自由曲面光波制备的透镜显著降低了彗差与场曲,像差的均方根值降低为原来的  $5/39$ ,其成像性能达到衍射极限。

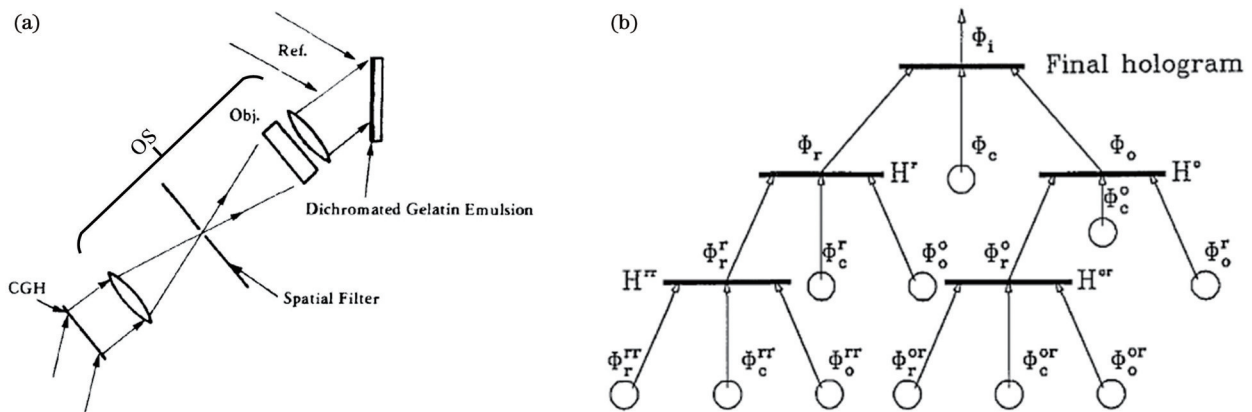


图 11 基于自由曲面光波制备 FHOE。(a)利用 CGH 生成的自由曲面光波制备 FHOE<sup>[127]</sup>; (b)利用多级 HOE 产生的自由曲面光波制备 FHOE,圆圈代表球面波<sup>[128]</sup>

Fig. 11 Fabricating FHOE based on freeform waves. (a) Fabricating FHOE using freeform wave generated by CGH<sup>[127]</sup>; (b) fabricating FHOE using freeform waves generated by multi-level HOEs, with circles represent spherical wave<sup>[128]</sup>

1990 年, Amitai 等<sup>[128]</sup>提出了利用自由曲面光波制备全息透镜的设计方法,其考虑了记录波长与成像波长的偏差(记录波长为  $488\text{ nm}$ ,成像波长为  $633\text{ nm}$ ),通过对记录光波引入额外的像差项来校正全息透镜的高阶像差。并制备了  $F$  数为  $2.5$  且具备较大偏移角度

的全息透镜,其成像性能接近衍射极限。采用递归设计方法,通过引入多级 HOE 以产生具有一定像差的记录光波,每一级 HOE 的衍射光波作为上一级 HOE 的记录光波,以此类推,最终产生全息透镜的非常规记录光波,如图 11(b)所示,其中圆圈代表球面波。

对于采用平面基底 FHOE 的成像系统设计,尤其是离轴非对称系统设计,初始结构十分匮乏,这造成此类系统设计缺乏参考,整个设计过程效率较低,并且容易失败。针对此问题, Yang 等<sup>[129-130]</sup>提出了基于平板相位元件的离轴非对称成像系统的逐点设计方法(平面基底 FHOE 本质上为平板相位元件)。该方法考虑了来自不同视场以及不同孔径位置的光线,以满足成像系统设计的一般需求;同时,该方法可以实现离轴非对称系统中的多个平板相位元件设计。首先,构建一个由无光焦度分布的平板相位元件所组成的系统,平板相位元件应近似位于满足系统结构与光路折叠要求的位置上,也可以为平板元件初步添加  $x^2$  与  $y^2$  相位项以大致实现预期的光焦度分布,初步控制系统结构并消

除光线遮拦。其次,采样不同视场点、不同光瞳坐标的成像光线,如图 12(a)所示。对于单个相位元件,根据折射/反射方程与费马原理,基于系统设计要求的物像关系或者光线映射关系,计算出采样成像光线与全息基底表面  $S$  交点位置处的相位函数值以及位于虚拟三维空间中相位函数图像的法向量,使其满足系统参数所要求的物像关系。然后,通过拟合这些离散采样点的相位函数值与相位函数图像法向量,可得到相位函数的解析表达式,如图 12(b)所示。按照上述方法,依次完成系统中每个相位元件的构建。以此系统为起点,重复上述过程可以提升系统的成像质量。由上述逐点设计方法所计算的全息成像系统将作为进一步优化的良好初始结构。

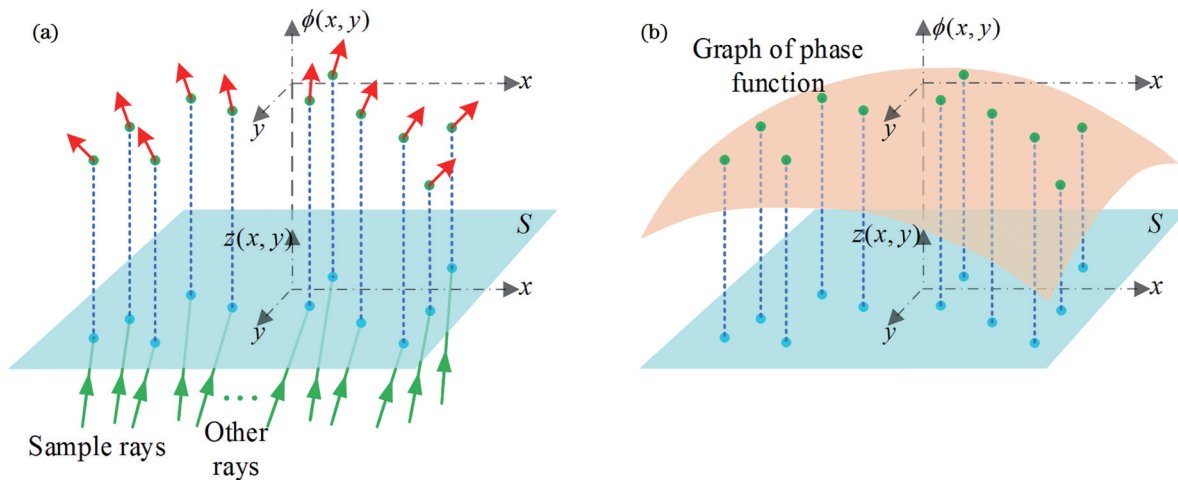


图 12 相位函数的逐点设计方法<sup>[129-130]</sup>。(a)采样光线与全息基底表面交点位置处的相位函数值与相位函数图像法向量的计算;(b)拟合后的解析相位函数

Fig. 12 Point-by-point design method of phase function<sup>[129-130]</sup>. (a) Calculation of phase function value and phase function graph normal vector at intersection points of sample rays with holographic substrate surface; (b) analytical phase function after fitting

此外,为快速构建满足给定结构和参数要求的由平板相位元件组成的系统, Yang 等<sup>[131]</sup>提出了基于共焦特性实现系统快速建模与设计的方法。如果一个特定的相位面可以实现(一组)点对点理想成像,那么通过顺次共焦点的方法,可以实现一个包含多个相位元件的系统对单个视场进行理想成像。基于此思路,推导了各种情况下(透射/反射、实焦点/虚焦点)实现点到点成像的平面基底元件的相位函数表达式。基于给定的近轴系统参数(如近轴焦距、近轴放大率等),以及相位元件的位置等,几乎可以实时计算得到实现共焦成像的系统中所有相位面的相位函数。该方法适用于各类同轴或者离轴折射、反射与折反射系统,元件数量不限。此外,同样也可以将可实现点到点理想成像的几何二次曲面集成到此方法中。采用此方法设计得到的系统(如果采用 HOE,此时实际上是由 SHOE 元件组成的系统)可作为良好的初始结构,以作后续优化使用。可以在此相位函数基础上进一步叠加旋转对称或者非旋转对称相位函数项(此时变为 FHOE),以进一

步提升系统的像质。图 13(a)为采用共焦方法设计无中间像的离轴三反成像系统的基本思路,图 13(b)为采用此方法快速生成的各类光路折叠形式系统。得到的相位函数可以进一步用来设计超表面的单元结构或者用于全息元件的曝光光路等。

Jang 等<sup>[132]</sup>提出了基于平面基底 FHOE 的成像系统设计与制备方法。针对全息成像系统的设计,利用光栅矢量  $\Psi_G$  表征 FHOE 的波前调控特性与选择性,通过优化光栅矢量  $\Psi_G$  的  $x$  分量与  $y$  分量,以满足系统的成像性能要求。再通过优化光栅矢量场的  $z$  分量  $\Psi_{G,z}$ ,以调控 FHOE 对成像光束的衍射效率。在完成全息成像系统的设计后,根据 FHOE 的光栅矢量分布设计其记录系统。选用自由曲面透镜作为 WCE,通过将光栅矢量  $\Psi_G$  分解为信号光矢量  $\mathbf{r}_s$  与参考光矢量  $\mathbf{r}_R$ ,基于光路可逆原理分别反向迭代出自由曲面透镜的面形矢高,如图 14(a)所示。基于所提出的方法,他们研制了基于 FHOE 的近眼显示系统,以同轴 Birdbath 结构的 AR 组合器为例,如图 14(b)所示。由图像源发出的

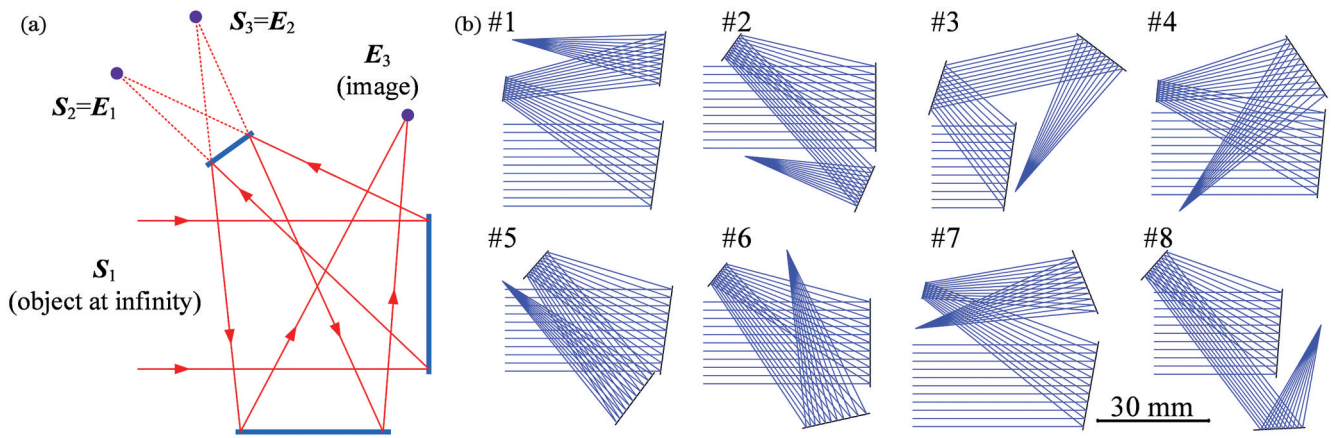


图 13 采用共焦平板相位元件的成像光学系统设计方法<sup>[131]</sup>。(a)采用共焦方法设计无中间像的离轴三反成像系统的基本思路；(b)各类光路折叠形式的离轴三反系统

Fig. 13 Design method of imaging optical system using confocal flat phase element<sup>[131]</sup>. (a) Basic idea of using confocal method to design off-axis three-mirror imaging system without intermediate image; (b) off-axis three-mirror system with various folding forms of optical path

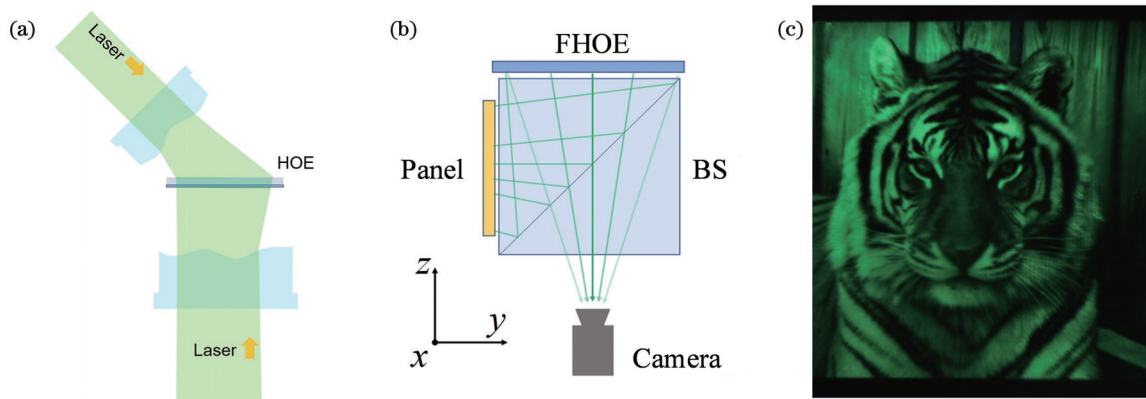


图 14 基于 FHOE 的光学系统设计<sup>[132]</sup>。(a)FHOE 的记录系统示意图,利用自由曲面透镜调控记录光波;(b)基于 FHOE 的 AR 近眼显示系统;(c)AR 系统所显示的虚拟图像

Fig. 14 Design of optical system based on FHOE<sup>[132]</sup>. (a) Schematic diagram of recording system of FHOE, using freeform lenses to modulate recording waves; (b) AR near-eye display system based on FHOE; (c) virtual image displayed by AR system

成像光束经分束器(BS)棱镜反射后入射至 FHOE 上,再经 FHOE 的衍射调制,以平行光的形式入射至系统出瞳位置。拍摄的虚拟图像如图 14(c)所示,其实现了良好的成像质量与亮度均匀性。

Yang 等<sup>[130]</sup>提出了基于平面基底 FHOE 的成像系统设计与制备方法。在全息成像系统设计中,利用相位函数  $\phi_c(x, y)$  表征 FHOE 的波前调控特性,通过优化相位项系数以满足系统的成像性能要求。在完成全息成像系统设计后,根据 FHOE 的相位函数分布设计其记录系统。FHOE 的记录系统可认为是设计一个仅考虑单视场点的带像差的成像系统,如图 15(a)所示, WCE 用于校正由相位函数分布为  $\phi_c(x, y)$  的 FHOE 所引入的像差。由一点源(平面光波的点源位置可认为位于无穷远处)发出的物方光波经 WCE 调控后,经相位函数分布为  $\phi_c(x, y)$  的 FHOE 调控,再经另一个 WCE 的调控,最终成像于另一点源位置,其中

物方光波与像方光波对应为 FHOE 的两个记录光波,如图 15(b)所示。基于光路可逆原理,在实际制备过程中,物方光波与反向入射的像方光波在全息基底表面的干涉,即可构建出相位函数  $\phi_c(x, y)$ ,如图 15(a)所示。利用 FHOE 在全息成像系统与全息记录系统中的真实光线追迹数据,构建与衍射效率调控相关的优化评价函数,以控制成像光束的衍射效率幅度与均匀性。综合考虑成像性能、衍射效率、系统约束、加工要求等因素,同时利用全息成像系统与全息记录系统进行协同优化设计,以获得最优的设计结果。

在 FHOE 的记录系统设计中,考虑到消除杂散光因素, Yang 等<sup>[130]</sup>选用自由曲面反射镜作为 WCE,反射面的一次反射光不会在曝光过程中引入杂散光,而透镜前后表面的反射光可能会在曝光过程引入杂散光,干扰全息光栅的制备。

基于所提出的设计方法, Yang 等<sup>[130]</sup>研制了基于

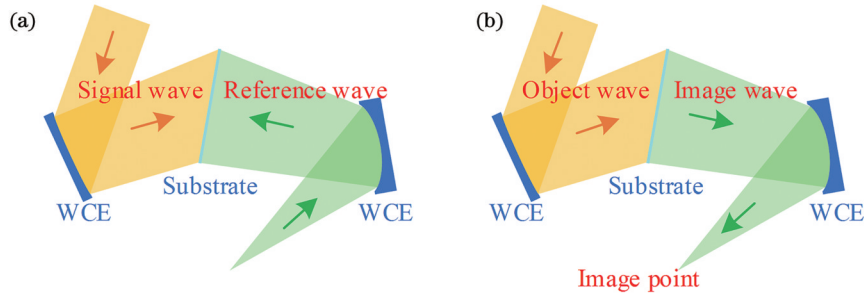


图 15 FHOE 的记录系统设计<sup>[130]</sup>。(a)FHOE 的记录系统示意图;(b)FHOE 记录系统的逆向设计过程

Fig. 15 Design of recording system of FHOE<sup>[130]</sup>. (a) Schematic diagram of recording system of FHOE; (b) reverse design process of recording system of FHOE

FHOE 的离轴反射式 HUD 系统,如图 16 所示,FHOE 1

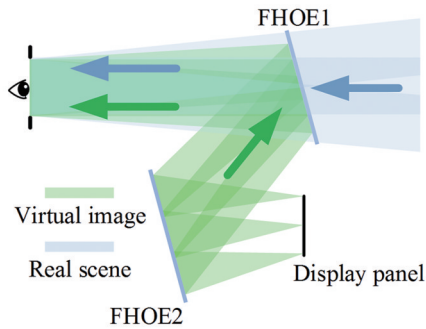


图 16 基于 FHOE 的 HUD 系统示意图<sup>[130]</sup>

Fig. 16 Schematic diagram of HUD system based on FHOE<sup>[130]</sup>

与 FHOE 2 作为成像元件。由图像源发出的成像光束经 FHOE 2 与 FHOE 1 的衍射调制后,以平行光的形式进入人眼,人眼可观察到位于一定距离的、放大的虚拟图像。FHOE 1 作为成像组合器,用于组合虚拟图像光路与透视式光路。由于平面基底不会引入波前像差,同时 FHOE 特有的波长与角度选择性保证外界环境的透视光线不会被全息光栅所调制。因此,环境光线可无像差地进入系统的出瞳范围,实现良好的光学透视效果,且无透视畸变问题。

综合考虑成像性能、衍射效率等因素,经协同优化后的全息 HUD 成像系统、FHOE 1 与 FHOE 2 的记录系统如图 17(a)所示,FOHE 1 与 FHOE 2 的记录系统装置如图 17(b)与(c)所示。

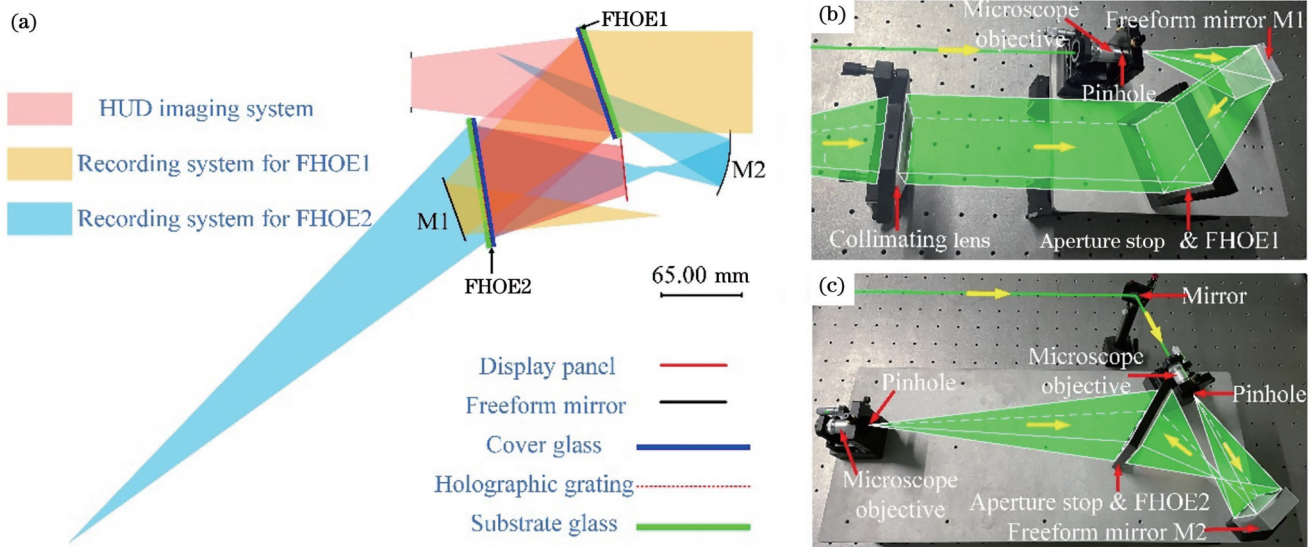


图 17 基于 FHOE 的 HUD 系统设计<sup>[130]</sup>。(a)经协同优化设计后的 HUD 成像系统以及 FHOE 1 与 FHOE 2 的记录系统,三个系统同时绘制在同一张图上;(b) FHOE 1 的记录系统装置;(c) FHOE 2 的记录系统装置

Fig. 17 Design of HUD system based on FHOE<sup>[130]</sup>. (a) HUD imaging system as well as recording systems of FHOE 1 and FHOE 2 after joint optimization design, three systems are plotted on same figure simultaneously; (b) recording system setup of FHOE 1; (c) recording system setup of FHOE 2

所搭建的全息 HUD 系统样机如图 18(a)所示,所拍摄的虚拟图像与透视场景如图 18(b)所示,其成像质量较好且亮度均匀性较优秀,同时实现了良好的光

学透视效果。

基于 Yang 等<sup>[130]</sup>提出的设计方法,Wang 等<sup>[133]</sup>研制了基于 FHOE 的全彩 AR 近眼显示系统,如图 19(a)所

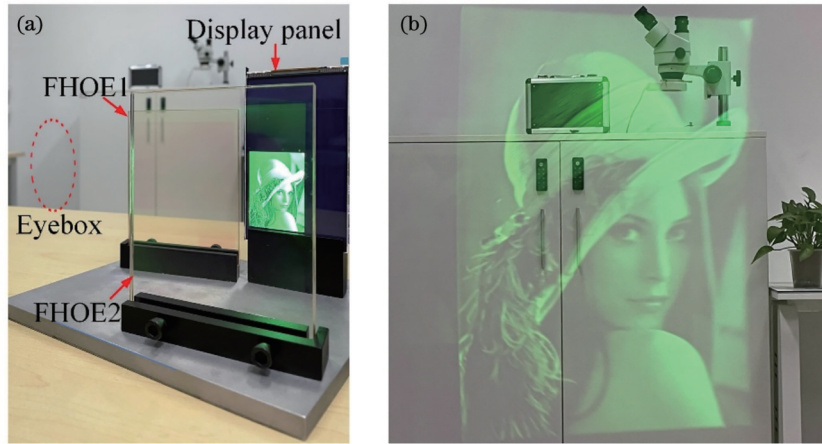


图 18 基于 FHOE 的 HUD 系统设计<sup>[130]</sup>。(a) HUD 系统样机; (b) 所拍摄的虚拟图像与透视场景

Fig. 18 Design of HUD system based on FHOE<sup>[130]</sup>. (a) Prototype of HUD system; (b) virtual image and real scene captured

示。FHOE 作为成像组合器, 图像源发出的成像光束经 FHOE 的衍射调制后, 以平行光的形式进入人眼成像, 同时外界环境光线也可无像差地进入人眼。所拍摄的彩色虚拟图像与透视场景如图 19(b)、(c) 所示, 其具有良好的成像质量与光学透视效果。Wang 等利用 HOE 的波长复用性, 将红色、绿色、蓝色全息光栅同时复用到单层全息记录介质中, 在实现彩色全息显示的同时, 减小了全息组合器的体积与质量, 避免三层全

息元件堆叠。在全息成像系统的设计中, 控制同一视场点中不同颜色通道的成像光束在像面上尽可能接近, 以避免产生较大的色差; 而对于全息记录系统的设计, 三个颜色通道的全息记录系统共用一个 WCE, 利用同一元件在不同记录系统中的位置偏差来补偿由记录波长差异所引入的波前调制像差, 以保证三个颜色通道的全息记录系统均具备良好的性能, 同时简化了记录系统的复杂度及减少了成本。

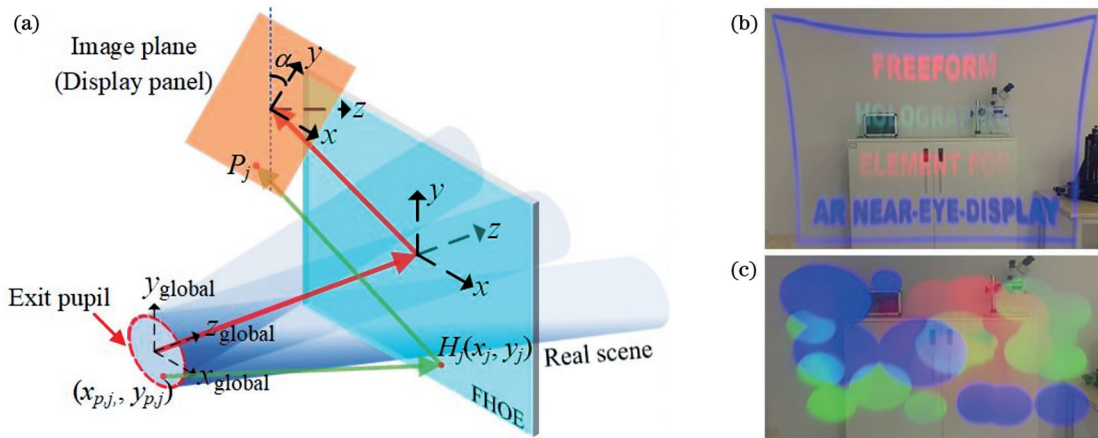


图 19 基于 FHOE 的全彩 AR 近眼显示系统设计<sup>[133]</sup>。(a) AR 系统的示意图; (b) 所拍摄的虚拟图像; (c) 所拍摄的透视场景

Fig. 19 Design of full-color AR near-eye display system based on FHOE<sup>[133]</sup>. (a) Schematic diagram of AR system; (b) virtual image captured; (c) real scene captured

Xiong 等<sup>[134]</sup>提出了利用自由曲面曝光与喷墨打印的方法制备液晶偏振全息 (Liquid crystal polarization hologram, LCPH) 元件, 该方法实现了对 LCPH 的全自由度调控。先优化全息元件的相位函数分布以实现特定的成像要求, 再根据成像系统所优化的相位函数设计全息元件的记录系统。通过在记录系统中引入自由曲面反射镜作为 WCE, 以产生曝光过程中所要求的自由曲面光波。同时, 利用喷墨打印技术可以逐点控制 LCPH 元件的衍射性质, 从而抑制其他衍射杂光。基于所提出的设计方法, Xiong 等制备了全彩色的

LCPH 元件, 将其作为视网膜投影显示系统的成像组合器, 如图 20(a) 所示。其中自由曲面曝光用于校正显示系统的红色、绿色、蓝色波长与全息记录波长的匹配错误所导致的像差, 而喷墨打印则用于逐点调控液晶薄膜的布拉格衍射峰, 以消除各个颜色通道之间的串扰。所拍摄的虚拟图像与透视场景如图 20(b) 所示, 其具有良好的显示与光学透视效果。

在以上所介绍的平面基底 FHOE 的制备方法中, 均选用了单个空间连续的光学元件作为 WCE, 以调控 FHOE 基底面上整个记录区域内的光波面。此外, 还

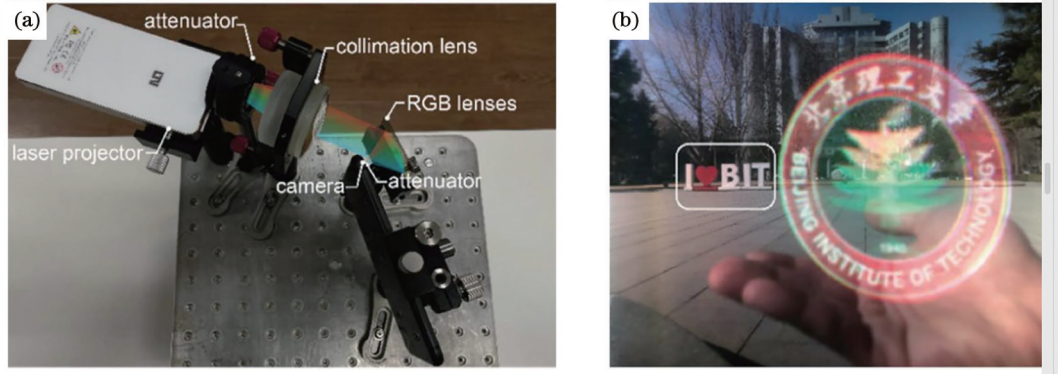


图 20 基于自由曲面曝光与喷墨打印的 LCPH 元件制备<sup>[134]</sup>。(a) 视网膜投影显示系统; (b) 所拍摄的虚拟图像与透视场景  
Fig. 20 Fabrication of LCPH element based on freeform exposure and inkjet printing<sup>[134]</sup>. (a) Retinal projection display system; (b) virtual image and real scene captured

可选用相位型 SLM 作为 WCE 以调控记录光波面, 并利用全息打印技术实现对 FHOE 的制备, 图 21 为全息打印技术的示意图。由于 SLM 存在有效使用区域, 应将 FHOE 的整个记录区域分割成一系列子区域。经相位型 SLM 调控后, 参考光波与信号光波在曝光子区域内发生干涉, 形成特定要求的全息相位函数或光栅矢量分布。全息元件置于二维位移平台上, 通过平台移动实现对整个记录区域的曝光。

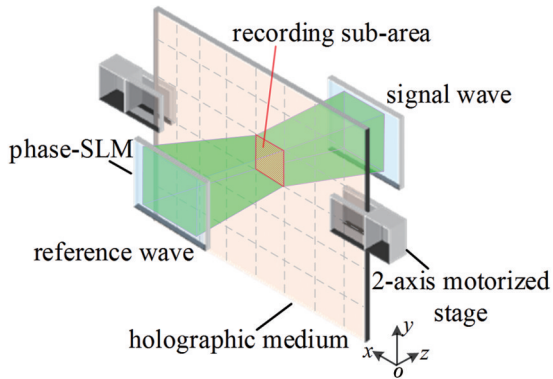


图 21 全息打印技术的示意图

Fig. 21 Schematic diagram of holographic printing technology

在理论上, 经 SLM 调控后的记录光波可直接入射至全息记录介质, 且不需要附加额外的透镜组。但是, 考虑到光学滤波(抑制衍射噪声)与曝光子区域的尺寸, 应附加由透镜 L1 与 L2 组成的  $4f$  系统<sup>[135]</sup>, 如图 22 所示。空间滤波器位于傅里叶平面处,  $4f$  系统将 SLM 调控后的记录光波面按照一定的比率因子缩小, 以曝光特定的子区域尺寸。其中, 缩小因子  $M$  可表示为

$$M = \frac{f_1}{f_2}, \quad (19)$$

式中:  $f_1$  和  $f_2$  分别为透镜 L1 和 L2 的焦距。

另外, 曝光子区域  $S_{\text{sub}}$  与 SLM 上的有效光波调控区域  $S_{\text{SLM}}$  的关系为

$$S_{\text{SLM}} = MS_{\text{sub}} \quad (20)$$

SLM 的波前调控能力 (SLM 所能偏折光线的最

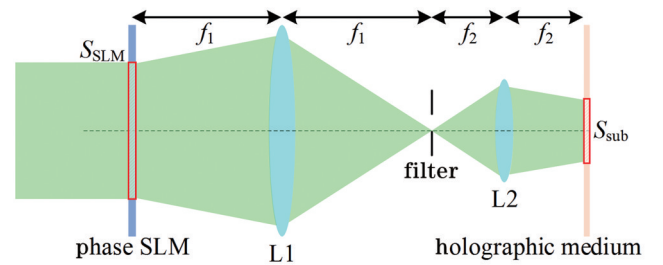


图 22 相位型 SLM 与  $4f$  系统的耦合光路

Fig. 22 Coupled optical path of the phase SLM and  $4f$  system

大角度  $\theta$ ) 受限于其像素尺寸, 角度  $\theta$  的表达式为

$$\theta = \arcsin \frac{\lambda_{\text{SLM}}}{2p}, \quad (21)$$

式中:  $\lambda_{\text{SLM}}$  为 SLM 的照明波长;  $p$  为 SLM 的像素间距。

全息打印系统可分为单臂打印与双臂打印。对于单臂打印, 仅有一束记录光波由 SLM 调控, 另外一束为常规的球面波; 而对于双臂打印, 信号光波与参考光波均由 SLM 调控。

Wakunami 等<sup>[136]</sup> 利用单臂打印机制备了平面基底的反射式 FHOE, 其参考光波为垂直入射的平面波, 信号光波为经相位型 SLM 调控后的光波, 如图 23(a) 所示。信号光路主要由反射式 SLM 与两个  $4f$  系统组成。SLM 的分辨率为  $4320 \times 2160$  (4K), 像素间距为  $3.5 \mu\text{m}$ ; 第一个  $4f$  系统中单边带滤波器 (SSBF) 用于光学滤波, 以消除衍射噪声; 第二个  $4f$  系统将 SLM 调控后的光波面按 0.102 的系数缩小, 曝光子区域的像素尺寸为  $3600 \text{ pixel} \times 1800 \text{ pixel}$ 。所制备的反射式 FHOE 作为显示屏幕并结合全息投影技术, 使投射至 FHOE 上的成像光束发生衍射, 以实现离轴的全息显示。所制备的 FHOE 中每个子区域具备特定设计的相位函数分布, 以针对特定的目标观察区域与可视角度, 同时消除显示图像畸变。Jackin 等<sup>[137]</sup> 利用单臂打印机制备了全息微反射镜阵列, 其作为投影类型的透视式光场显示的成像组合器, 如图 23(b) 所示。针对

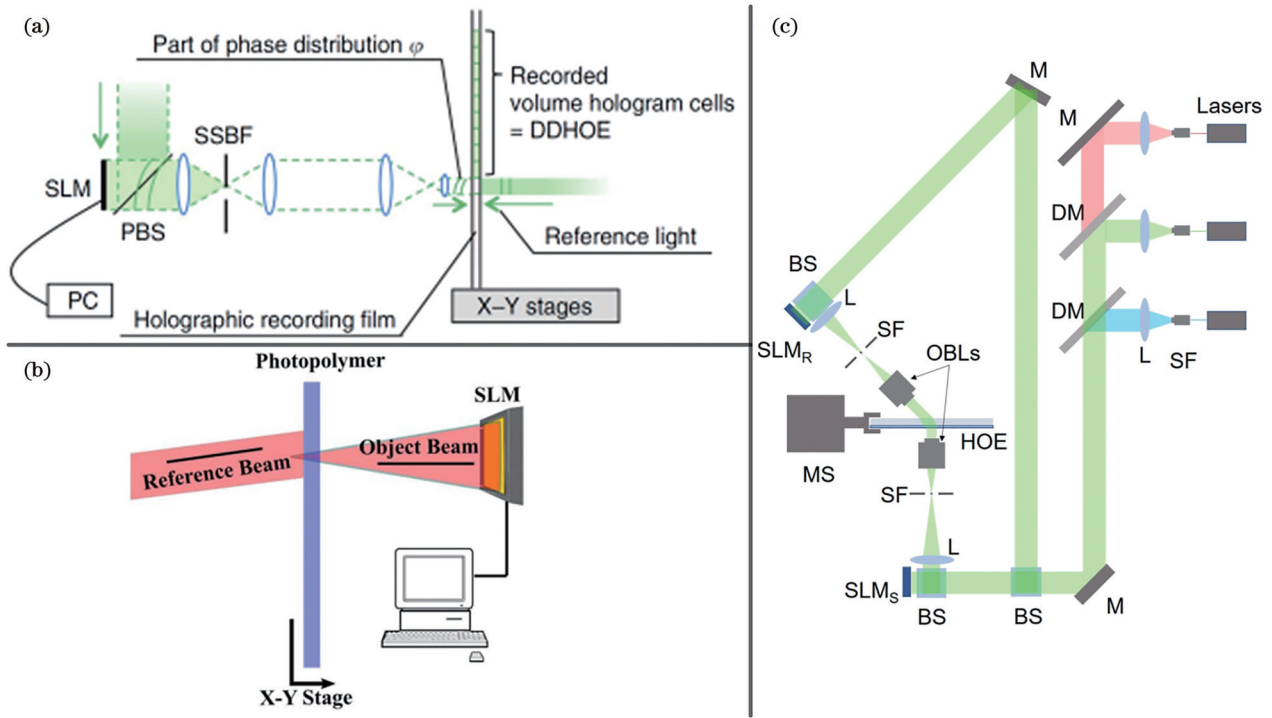


图 23 全息打印系统。(a)(b)单臂全息打印系统<sup>[136-137]</sup>；(c)双臂全息打印系统<sup>[132]</sup>

Fig. 23 Holographic printing systems. (a)(b) One-arm holographic printing systems<sup>[136-137]</sup>; (c) two-arm holographic printing system<sup>[132]</sup>

特定的投影光线角度,为全息阵列中每个子单元设计特定的相位函数分布,其同时包含了会聚相位项、水平倾斜相位项以及垂直倾斜相位项。Jang等<sup>[132]</sup>利用双臂打印机制备了反射式FHOE,SLM<sub>R</sub>与SLM<sub>S</sub>分别调控参考光波与信号光波,如图23(c)所示。由透镜L与物镜OBLs组成的4f系统将光波面按一定的比率因子缩小,同时空间滤波器(SF)用于滤除4f系统频率域内的直流分量与高阶分量。在全息记录系统的设计过程中,综合考虑到SLM带宽限制、物镜F数匹配、编码方法、衍射噪声等因素,对曝光子区域内的记录光线角度进行优化。Hofmann等<sup>[138]</sup>利用双臂打印机制备了透射式FHOE,位于全息记录介质同侧的两个SLM分别用于调控信号光波与参考光波,经SLM调控后的光波通过两个4f系统在全息基底表面上发生干涉。同时,位于记录介质另外一侧的光学系统检测信号光波与参考光波在记录介质上是否对准,以及检测记录光波面的特性。

此外,有研究者提出利用振幅型SLM实现对光波相位的调控,如图24所示,入射光波经振幅型SLM调控后,傅里叶透镜可以在全息记录平面上重建出光波的相位信息。考虑到光学滤波与记录光波面尺寸等因素,还应附加额外的4f系统。

Jeong等<sup>[139-140]</sup>利用振幅型SLM设计了双臂全息打印机,如图25(a)所示,并制备了复杂相位函数分布的全息成像组合器,以用于实现全息近眼显示系统的eyebow在二维方向上的同时扩展,如图25(b)所示。并且制备了反射式FHOE阵列(相当于自由曲面反射

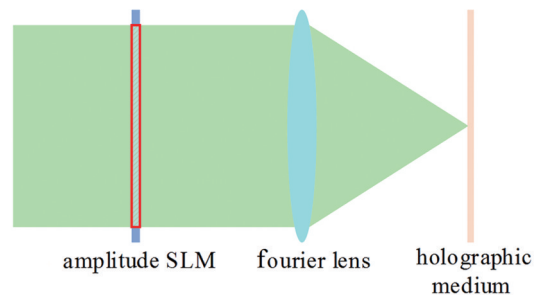


图 24 基于振幅型 SLM 的全息打印技术

Fig. 24 Holographic printing technology based on amplitude SLM

镜阵列),每个阵列子单元具备特定设计的相位函数分布,其作为AR近眼显示系统的成像组合器,可以实现大的景深范围,如图25(c)所示。

上述所介绍的基于整体曝光或分区域曝光制备平面基底FHOE的方法,两者各有优势与不足:

1) 整体曝光方法利用单个空间连续的WCE调控整个记录区域内的光波面,通过一次曝光的方式完成FHOE的制备,其保证了全息相位函数的连续性。但是,该方法制备FHOE的灵活性较低,为制备出不同相位函数分布的全息元件,需加工不同的WCE,其加工成本与周期相对较长。同时,单个WCE的空间连续性受限于元件的可加工性,对于某些应用领域中的全息元件(如FHOE阵列),该方法并不适用。

2) 分区域曝光方法利用SLM调控部分记录区域内的光波面,通过逐个区域曝光的方式完成FHOE的

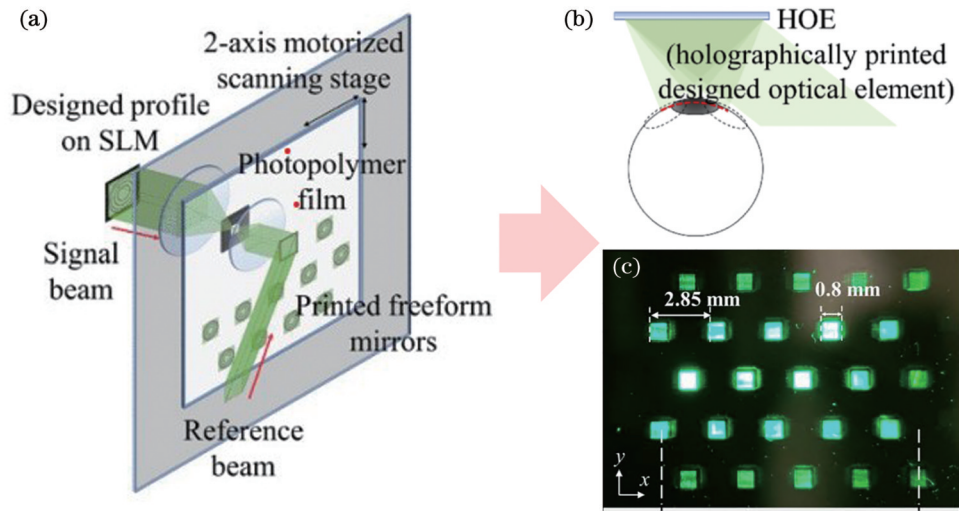


图 25 基于振幅型 SLM 的全息打印系统<sup>[139-140]</sup>。(a) 双臂全息打印系统; (b) 用于在二维方向上扩展 eyebox 的全息成像组合器; (c) FHOE 阵列

Fig. 25 Holographic printing system based on amplitude SLM<sup>[139-140]</sup>. (a) Two-arm holographic printing system; (b) holographic imaging combiner for extending eyebox in two-dimensional directions; (c) FHOE array

制备。该方法可通过调控每个曝光子区域内的相位函数分布,制备出非常规的 FHOE。同时,仅需改变 SLM 上的相位模式,即可制备出不同相位函数分布的 FHOE,其易于实现快速的原理验证实验。但是,SLM 的带宽仍然限制了其对记录光波的调控能力。同时,在实际曝光过程中,该方法容易使各曝光子区域之间产生间隙或重叠,导致 FHOE 的相位函数分布出现间断或偏差的现象。

#### 4.2.2 曲面基底 FHOE

为进一步提升 FHOE 的波前调控能力,可将 FHOE 的基底面形由平面扩展至曲面。目前针对曲面基底 FHOE 的研究工作仍较少,主要停留在设计阶段。Fisher<sup>[141]</sup>设计了球面基底的反射式 FHOE,并作为成像组合器用于全息 HUD 系统,如图 26(a)所示。图像源发出的成像光束经中继系统调控后,在折转镜面附近形成一次像面,再被 FHOE 衍射至系统的出瞳位置。中继系统包含了 6 片离轴偏心的透镜组,其与 FHOE 共同校正系统中的离轴非对称像差。在 HUD 成像系统设计中,选用由多项式级数所描述的信号光波与参考光波来定义 FHOE,多项式系数作为优化变量。在成像系统设计完成后,基于光路可逆原理,通过在全息记录系统中加入透镜组,将多项式级数所描述的自由曲面光波调控为会聚球面波,如图 26(b)所示,两束记录光路中均包含了球面与柱面透镜,其中信号光路包含了非球面透镜与自由曲面透镜。

Draper 等<sup>[142]</sup>提出了曲面基底的全息波导组合器,曲面基底 HOE 作为光束耦合元件用于实现在一维或二维方向上扩展出瞳。对于平面基底的波导组合器,当准直成像光束在其内部传播时,并不会引入额外的像差。HOE 仅起到偏折光束的作用,并不会引入光焦

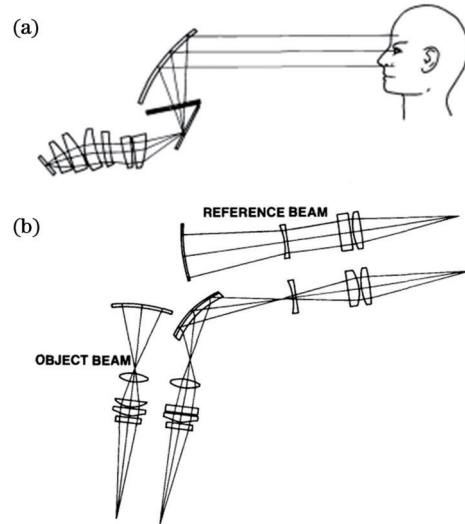


图 26 基于曲面基底 FHOE 的光学系统设计<sup>[141]</sup>。(a) 基于球面基底 FHOE 的 HUD 系统; (b) HUD 系统中 FHOE 的记录系统

Fig. 26 Design of optical system based on FHOE with curved substrate<sup>[141]</sup>. (a) HUD system based on FHOE with spherical substrate; (b) recording system of FHOE of HUD system

度调控,其记录光波均为平面波。而对于曲面基底的波导组合器,由于表面法向量的连续变化,成像光束在波导内部传播时会引入额外的像差,造成各出瞳位置发生重叠,以及造成各出瞳尺寸的不一致,从而导致图像模糊或者图像尺寸在子午与弧矢方向上的放大率不一致。图 27(a)为像差未校正的单视场点成像光束的出瞳痕迹图。

为校正由曲面基底造成的成像光束的像差,应给 HOE 添加额外的光焦度项。Draper 等<sup>[142]</sup>根据曲面基



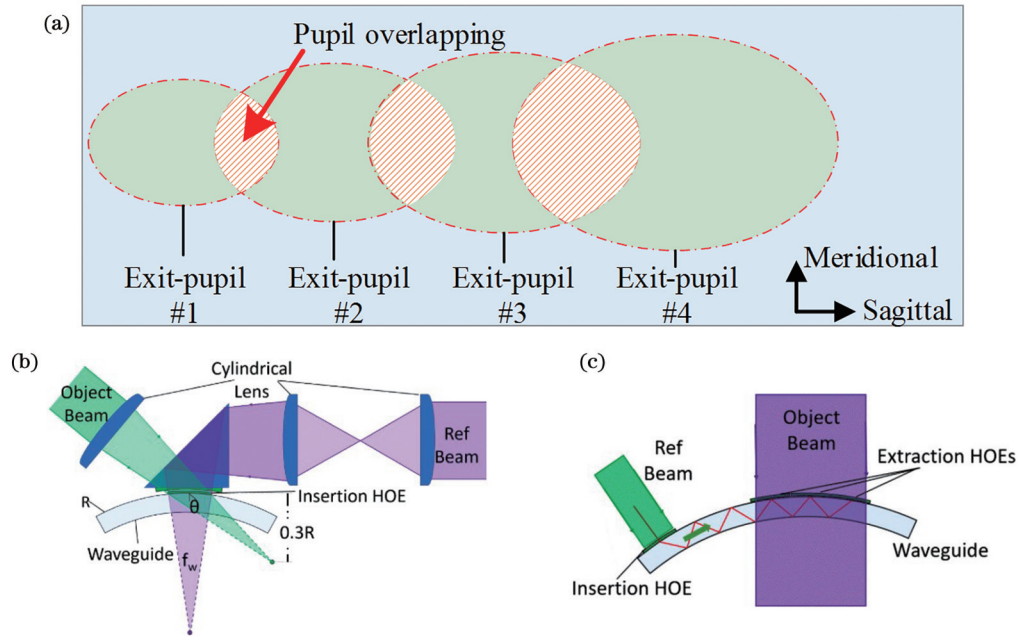


图 27 柱面基底&一维扩瞳的全息波导<sup>[142]</sup>。(a)像差未校正的单视场点成像光束的出瞳痕迹图；(b)耦入HOE的记录系统；(c)耦出HOE的记录系统

Fig. 27 Holographic waveguide with cylindrical substrate and one-dimensional-pupil expansion<sup>[142]</sup>. (a) Footprint of exit pupil of imaging beam of single filed point without aberration correction; (b) recording system of injection HOE; (c) recording system of extraction HOE

底的面形为HOE设计了特定的记录光波,以保证曲面波导的各出瞳位置不重叠、各出瞳尺寸均匀,以及成像光束以平行光的形式被耦出波导内部。耦入HOE的记录光波由基底曲率决定。对于柱面基底,耦入HOE的记录光波为对应曲率半径方向上的柱面波;对于球面基底,耦入HOE的记录光波为椭球面波(记录光波在子午与弧矢方向上的曲率半径不同);对于耦出HOE,平面波经耦入HOE耦合进波导内部的光波作为其参考波,而垂直入射的平面波作为其信号波;对于二维扩瞳的波导组合器,需要额外的折转HOE以实现在二维方向上扩展出瞳;对于折转HOE的制备,平面波经耦入HOE耦合进波导内部的光波作为其参考波,而倾斜入射的平面波作为其信号波。图 27(b)与(c)分别为柱面基底和一维扩瞳的全息波导组合器的耦入HOE与耦出HOE的曝光光路。

Draper等<sup>[142]</sup>分别设计并研制了四种基于曲面基底的全息波导显示系统的形式,分别为柱面基底和一维扩瞳<sup>[143]</sup>、柱面基底和二维扩瞳<sup>[144]</sup>、球面基底和一维扩瞳<sup>[145]</sup>、球面基底和二维扩瞳<sup>[146]</sup>。

针对曲面基底相位元件的设计方法研究,除了借鉴折衍混合系统的设计思路,有研究者也提出了新的设计方法,其对研究曲面基底FHOE具有一定的指导意义。Mendes-Lopes等<sup>[147]</sup>提出了一种改进的多曲面同步(SMS)设计方法,其根据特定的系统参数设计要求逐点构建出系统中的相位面以及基底曲面,可实现用1个或者2个相位面来控制2个或3个光波面。

该方法对于设计过程中选用的视场点数量有一定限制,且仅用于传统的同轴系统。基于所提出的方法,Mendes-Lopes等设计了基于自由曲面基底相位元件的同轴成像系统,其包含了三个成像物点(-4、0、4 mm)和两个成像波长(403.2 nm、607.4 nm),成像性能达到衍射极限,如图 28(a)所示。Duan等<sup>[148]</sup>提出了基于自由曲面基底相位元件的离轴非对称成像系统的设计方法,该方法将虚拟三维空间中的相位函数与真实三维空间中的曲面基底连接起来,由相位函数梯度向量的微分计算曲面基底表面法向量的微分。设计过程以一个使用简单几何平面或其他曲面的初始系统为起点,根据系统设计要求,利用逐点构建和迭代来采样不同视场点与不同孔径坐标的成像光束,快速且有效地计算出在非对称系统结构下多个自由曲面基底相位元件的基底几何面形和相位函数的解析形式。基于所提方法,Duan等设计了基于自由曲面基底相位元件的离轴三反成像系统,系统的工作波长为1064 nm,视场角为 $4^\circ \times 3^\circ$ ,其成像性能达到衍射极限,如图 28(b)所示。

针对曲面基底相位元件的制备,有研究者研制了基于曲面基底超表面的成像系统。Kamali等<sup>[149]</sup>在柱面透镜的曲面基底上制备了超表面,柱面透镜与超表面共同调控光波,实现了与非球面透镜相当的光束聚焦能力。如图 29(a)所示,柱面透镜的焦距为8.1 mm,系统的成像波长为915 nm。如图 29(b)所示,在柱面基底上附加超表面后,可实现相当于3.5 mm焦距的非

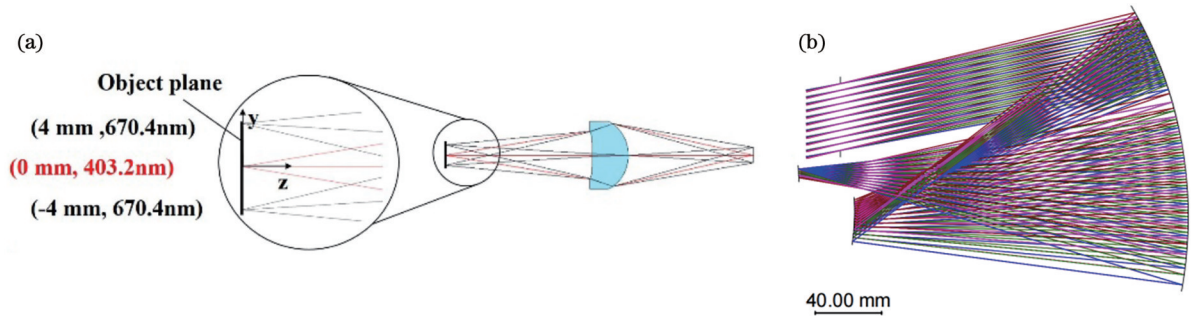


图 28 曲面基底相位元件的研究。(a)基于自由曲面基底相位元件的同轴成像系统<sup>[147]</sup>;(b)基于自由曲面基底相位元件的离轴三反成像系统<sup>[148]</sup>

Fig. 28 Research on phase element with curved substrate. (a) Co-axial imaging system based on phase element with freeform substrate<sup>[147]</sup>; (b) off-axis three-mirror imaging system based on phase element with freeform substrate<sup>[148]</sup>

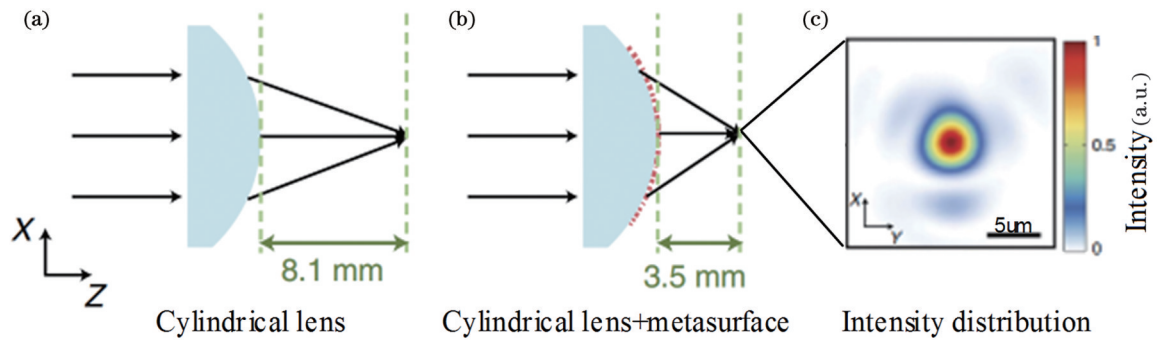


图 29 基于柱面基底超表面的成像系统<sup>[149]</sup>。(a)柱面透镜;(b)柱面透镜附加超表面;(c)像面上的聚焦点尺寸

Fig. 29 Imaging system based on metasurface with cylindrical substrate<sup>[149]</sup>. (a) Cylindrical lens; (b) cylindrical lens attached metasurface; (c) focal spot size located at image plane

球面透镜的光学功能。像面上的聚焦点尺寸如图 29(c) 所示。

Nikolov 等<sup>[150]</sup>利用电子束刻蚀技术在自由曲面基

底上制备了超表面,以实现离轴成像,如图 30(a)所示。系统的成像波长为 632.8 nm,有效焦距为 4 mm, $F$  数为 4.67,放大率为 0.0453。针对像面上的成像对比度,该

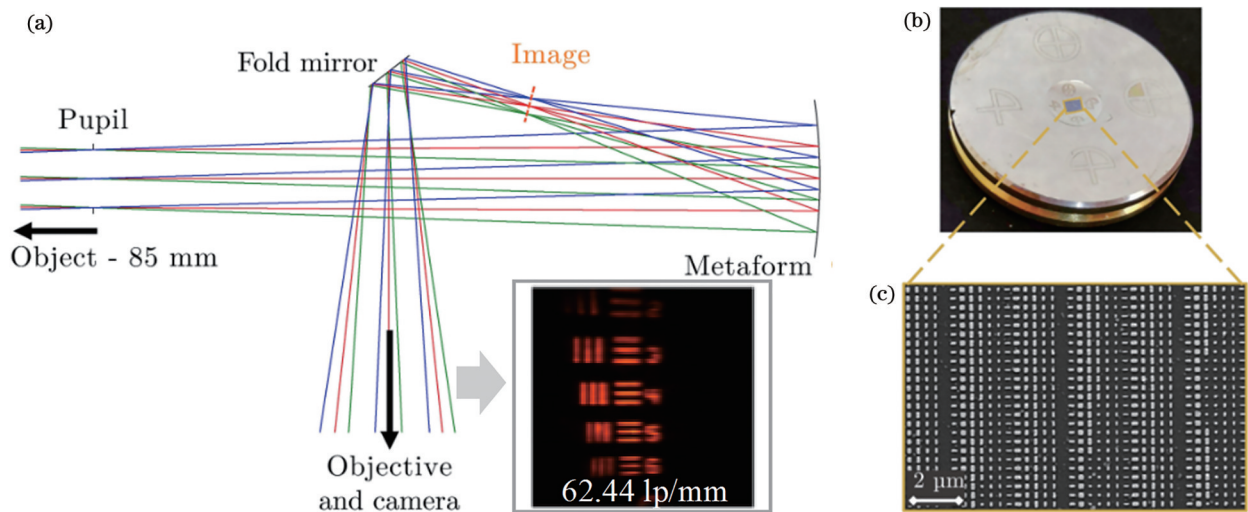


图 30 基于自由曲面基底超表面的成像系统<sup>[150]</sup>。(a)成像系统的布局,插图为超表面所成像的分辨率靶;(b)自由曲面基底的超表面;(c)超表面微纳结构的扫描电镜图

Fig. 30 Imaging system based on metasurface with freeform substrate<sup>[150]</sup>. (a) Layout of imaging system, illustrated by resolution target imaged via metasurface; (b) metasurface of freeform substrate base; (c) scanning electron microscope image of nano-structures of metasurface

系统在弧矢方向上的 230 lp/mm 处,以及在子午方向上的 100 lp/mm 处的图像对比度均大于 0.1。超表面的尺寸为 2.0 mm×1.5 mm,其基底面形为超环面(镱面)。超表面包含线性相位项,以保证曲面基底在无倾斜的情况下可实现离轴成像,自由曲面基底与超表面相位的高阶项用于校正由离轴系统结构所引入的像差。在设计过程中,利用光线追迹软件对该成像系统进行建模,同时对自由曲面基底的面形系数与超表面的相位系数进行优化,以实现良好的成像性能;在成像系统设计完成后,对超表面的相位函数进行离散采样,并利用时域有限差分(FDTD)软件对超表面结

构进行仿真模拟。所制备的自由曲面基底超表面如图 30(b)所示,扫描电镜所拍摄的超表面微纳结构如图 30(c)所示。

表 1 列出了所提到的各类光学元件的设计自由度、制备方式、形态以及可实现的系统指标对比。对于 HOE 等相位元件,在满足相位调制结构厚度远小于元件横向尺寸的条件,均可以使用和几何元件成像系统相同的光线追迹方法对系统的像差进行计算并对像质进行优化。使用不同类型元件后系统像质以及体积等参数与实际系统的结构、参数、应用等具体的设计要求相关。

表 1 不同光学元件的性能对比

Table 1 Performance comparisons of different optical elements

Type	Degree of design freedom	Fabrication	Form factor	System specification
Spherical surface	Low	Turning/grinding/injection	Thick	Low
Freeform surface	High	molding		High
SHOE	Low	Exposing	Thin	Low
FHOE	High			High
Rotationally symmetric phase function	Low	UV lithography /etching/ nanoimprint lithography/electron	Thin	Low
Non-rotationally symmetric phase function	High	beam lithography, etc.		High

## 5 总结与展望

介绍了 FOE 与 HOE 的融合设计与制备方法,并综述了一系列融合 FOE 与 HOE 的成像与显示光学系统的设计与应用。基于对 FOE 与 HOE 融合设计的研究,可以实现 FOE 与 HOE 的协同设计以共同校正光学系统中的像差并提升系统的参数和成像质量、利用 FOE 调控 HOE 的记录光波面以实现具备复杂相位函数分布的平面基底和自由曲面基底 HOE(全自由度 HOE),以实现复杂紧凑的离轴非对称结构等。这进一步推动成像与显示光学系统的发展,推动相关系统在国民经济发展等重点领域中的应用。针对融合 FOE 和 HOE 研究,目前仍然面临着许多的问题与挑战。例如,针对自由曲面基底 HOE 的研究,仍然受限于全息记录介质在曲面基底上的涂布工艺,目前只能实现柱面或球面基底的 HOE。在未来的研究中,如何将全息记录介质均匀地涂布在自由曲面基底上是亟待解决的问题以及值得探索的方向。目前,使用 HOE 元件的成像与显示系统进行色差校正仍是系统设计及系统研制中的难题,需要从显示器件选择、优化设计方法与系统结构、元件选型、全息材料制备与涂布等方面进行突破。目前使用 HOE(包括 FHOE)的系统还存在衍射效率不均匀、杂光较多等问题。如何从优化设计方法、照度调控、材料涂布、光机结构等方面单独以及协同考虑进行衍射效率调控以及杂光抑制,是亟待解

决的问题。此外,如何在综合考虑 FOE 和 HOE(包括基底面形、曝光光路等)的加工制备误差和装调误差的情况下对成像与显示系统进行公差分析,也是今后的重点研究方向之一。

## 参 考 文 献

- [1] 杨通, 段瓔哲, 程德文, 等. 自由曲面成像光学系统设计: 理论、发展与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 0108001.  
Yang T, Duan Y Z, Cheng D W, et al. Freeform imaging optical system design: theories, development, and applications [J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1): 0108001.
- [2] Cheng D W, Wang Q W, Liu Y, et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(3): 336.
- [3] Xiong J H, Hsiang E L, He Z Q, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. Light, Science & Applications, 2021, 10(1): 216.
- [4] Liu Z Y, Wang D Y, Gao H, et al. Metasurface-enabled augmented reality display: a review[J]. Advanced Photonics, 2023, 5(3): 034001.
- [5] Kingslake R, Johnson R B. Lens design fundamentals[M]. 2nd ed. London: Academic Press, 2010.
- [6] Conrady A E. Applied optics and optical design[M]. New York: Dover Publications, 1991.
- [7] Close D H. Holographic optical elements[J]. Optical Engineering, 1975, 14(5): 145402.
- [8] Li Y, Yang Q, Xiong J H, et al. 3D displays in augmented and virtual realities with holographic optical elements[J]. Optics Express, 2021, 29(26): 42696-42712.
- [9] Sando Y, Satoh K, Barada D, et al. Holographic augmented reality display with conical holographic optical element for wide

- viewing zone[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 26-34.
- [10] Park J H, Lee B. Holographic techniques for augmented reality and virtual reality near-eye displays[J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2022, 3(1): 137-150.
- [11] Katz S, Kaplan N, Grossinger I. Using diffractive optical elements[J]. *Laser Technik Journal*, 2018, 15(4): 29-32.
- [12] Pang H, Yin S Y, Deng Q L, et al. A novel method for the design of diffractive optical elements based on the Rayleigh-Sommerfeld integral[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2015, 70: 38-44.
- [13] 徐嫻, 王常宇, 王涌天, 等. 衍射光学元件设计方法综述[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 0822007.  
Xu Y, Wang C Y, Wang Y T, et al. Review of design methods of diffractive optical element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822007.
- [14] Poleshchuk A G, Korolkov V P, Nasyrov R K. Diffractive optical elements: fabrication and application[J]. *Proceedings of SPIE*, 2014, 9283: 928302.
- [15] 霍家琦, 胡源, 程彬鹏. 衍射光学技术发展历程及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2023, 60(7): 0700002.  
Huo J Q, Hu Y, Cheng B P. History and application of diffractive optics technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(7): 0700002.
- [16] Engelberg J, Levy U. The advantages of metalenses over diffractive lenses[J]. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 1991.
- [17] Hu J, Bandyopadhyay S, Liu Y H, et al. A review on metasurface: from principle to smart metadevices[J]. *Frontiers in Physics*, 2021, 8: 502.
- [18] Zhang S F, Zhou H Y, Liu B Y, et al. Recent advances and prospects of optical metasurfaces[J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(7): 2045-2063.
- [19] Degl'Innocenti R. Terahertz metasurface platform for modulation, holography, and encryption[J]. *Advanced Photonics*, 2023, 5(2): 020503.
- [20] 高心越, 宋清华. 轨道角动量超表面全息复用研究进展[J]. *中国激光*, 2023, 50(18): 1813011.  
Gao X Y, Song Q H. Recent advances in orbital angular momentum multiplexed metasurface holography[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(18): 1813011.
- [21] 罗栩豪, 董思禹, 王占山, 等. 超表面 VR/AR 显示技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(20): 2011002.  
Luo X H, Dong S Y, Wang Z S, et al. Research progress of metasurface-based VR/AR display technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(20): 2011002.
- [22] Xiong J H, Wu S T. Planar liquid crystal polarization optics for augmented reality and virtual reality: from fundamentals to applications[J]. *eLight*, 2021, 1(1): 3.
- [23] Yin K, Zhan T, Xiong J H, et al. Liquid-crystal polarization volume gratings for near-eye displays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11708: 1170804.
- [24] Yin K, Zhan T, Xiong J H, et al. Polarization volume gratings for near-eye displays and novel photonic devices[J]. *Crystals*, 2020, 10(7): 561.
- [25] Xiong J H, Chen R, Wu S T. Device simulation of liquid crystal polarization gratings[J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 18102-18112.
- [26] Rolland J P, Davies M A, Suleski T J, et al. Freeform optics for imaging[J]. *Optica*, 2021, 8(2): 161-176.
- [27] Fang F Z, Zhang X D, Weckenmann A, et al. Manufacturing and measurement of freeform optics[J]. *CIRP Annals*, 2013, 62(2): 823-846.
- [28] Thompson K P, Rolland J P. Freeform optical surfaces: a revolution in imaging optical design[J]. *Optics and Photonics News*, 2012, 23(6): 30-35.
- [29] Yang T, Jin G F, Zhu J. Automated design of freeform imaging systems[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(10): e17081.
- [30] Zhu J, Yang T, Jin G F. Design method of surface contour for a freeform lens with wide linear field-of-view[J]. *Optics Express*, 2013, 21(22): 26080-26092.
- [31] 王梦晖, 赵高兴, 时其然, 等. 自由曲面成像光学系统的设计方法及其应用[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 0822012.  
Wang M H, Zhao G X, Shi Q R, et al. Design methods and applications of freeform surface imaging optical systems[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822012.
- [32] 程德文, 陈海龙, 王涌天, 等. 复杂光学曲面数理描述和设计方法研究[J]. *光学学报*, 2023, 43(8): 0822008.  
Cheng D W, Chen H L, Wang Y T, et al. Mathematical description and design methods of complex optical surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(8): 0822008.
- [33] Zhu J, Hou W, Zhang X D, et al. Design of a low F-number freeform off-axis three-mirror system with rectangular field-of-view[J]. *Journal of Optics*, 2015, 17(1): 015605.
- [34] Yang T, Zhu J, Jin G F. Compact freeform off-axis three-mirror imaging system based on the integration of primary and tertiary mirrors on one single surface[J]. *Chinese Optics Letters*, 2016, 14(6): 060801.
- [35] Wu W C, Jin G F, Zhu J. Optical design of the freeform reflective imaging system with wide rectangular FOV and low F-number[J]. *Results in Physics*, 2019, 15: 102688.
- [36] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, et al. Design of an optical see-through head-mounted display with a low f-number and large field of view using a freeform prism[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(14): 2655-2668.
- [37] Cheng D W, Duan J X, Chen H L, et al. Freeform OST-HMD system with large exit pupil diameter and vision correction capability[J]. *Photonics Research*, 2022, 10(1): 21-32.
- [38] Cheng D W, Wang Y T, Hua H, et al. Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2098-2100.
- [39] Cheng D W, Wang Q F, Wang Y T, et al. Lightweight spatial-multiplexed dual focal-plane head-mounted display using two freeform prisms[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(3): 031201.
- [40] Wei L D, Li Y C, Jing J J, et al. Design and fabrication of a compact off-axis see-through head-mounted display using a freeform surface[J]. *Optics Express*, 2018, 26(7): 8550-8565.
- [41] Zhang B Q, Tan Y L, Jin G F, et al. Imaging spectrometer with single component of freeform concave grating[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(14): 3412-3415.
- [42] Zhang B Q, Jin G F, Zhu J. Design method for freeform optical systems containing diffraction gratings[J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20792-20801.
- [43] Liu Y X, Bauer A, Viard T, et al. Freeform hyperspectral imager design in a CubeSat format[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 35915-35928.
- [44] Liu Y, Li Y Q, Cao Z. Design method of off-axis extreme ultraviolet lithographic objective system with a direct tilt process [J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(7): 075102.
- [45] Wu Y, Wang L P, Zhang X, et al. Design method for an off-axis reflective anamorphic optical system with aberration balance and constraint control[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(16): 4557-4566.
- [46] 毛姗姗, 李艳秋, 刘克, 等. 高数值孔径自由曲面极紫外光刻物镜光学设计[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(8): 0814002.  
Mao S S, Li Y Q, Liu K, et al. Optical design of high numerical aperture extreme ultraviolet lithography objective with freeform surfaces[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(8): 0814002.
- [47] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, 48(9): 2909-2947.
- [48] Akhmetov D M, Muslimov E R, Kharitonov D Y, et al.

- Modeling and optimization of optical designs with composite holographic elements[J]. *Journal of Optical Technology*, 2022, 89(10): 633-641.
- [49] Kim S I, Choi C S, Morozov A, et al. Slim coherent backlight unit for holographic display using full color holographic optical elements[J]. *Optics Express*, 2017, 25(22): 26781-26791.
- [50] Vorzobova N, Sokolov P. Properties of holographic elements based on periodic structures in a wide range of angles of incidence [J]. *Photonics*, 2021, 8(12): 562.
- [51] Xiong J H, Yin K, Li K, et al. Holographic optical elements for augmented reality: principles, present status, and future perspectives[J]. *Advanced Photonics Research*, 2021, 2(1): 2000049.
- [52] Koreshev S N, Shevtsov M K. Optical systems of holographic collimator sights[J]. *Journal of Optical Technology*, 2015, 82(9): 592-597.
- [53] Kim J M, Choi B S, Choi Y S, et al. Holographic optical elements recorded in silver halide sensitized gelatin emulsions. Part II. Reflection holographic optical elements[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(8): 1522-1533.
- [54] Weiss V, Friesem A A. Storage mechanism of volume phase holograms recorded in silver halide emulsions[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(7): 2004-2010.
- [55] Wong K W, Yip W C, Cheng L M. Recording complex holograms on photoresist by using an ion-implantation method [J]. *Applied Optics*, 1993, 32(26): 4955-4959.
- [56] Beesley M J, Castledine J G. The use of photoresist as a holographic recording medium[J]. *Applied Optics*, 1970, 9(12): 2720-2724.
- [57] 朱建华, 徐敏, 郭永康, 等. 全色铬酸盐明胶全息记录新材料 [J]. *光电子·激光*, 2007, 18(6): 701-705.
- Zhu J H, Xu M, Guo Y K, et al. Panchromatic chromate gelatin holographic recording material[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2007, 18(6): 701-705.
- [58] Kim N, Hwang E S, Shin C W. Analysis of optical properties with photopolymers for holographic application[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2006, 10(1): 1-10.
- [59] Gleeson M R, Sheridan J T, Bruder F K, et al. Comparison of a new self developing photopolymer with AA/PVA based photopolymer utilizing the NPDD model[J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26325-26342.
- [60] Ortuño M, Fernández E, Gallego S, et al. New photopolymer holographic recording material with sustainable design[J]. *Optics Express*, 2007, 15(19): 12425-12435.
- [61] Vorzobova N, Sokolov P. Application of photopolymer materials in holographic technologies[J]. *Polymers*, 2019, 11(12): 2020.
- [62] Moothanchery M, Naydenova I, Toal V. Studies of shrinkage as a result of holographic recording in acrylamide-based photopolymer film[J]. *Applied Physics A*, 2011, 104(3): 899-902.
- [63] Navarro-Fuster V, Ortuño M, Fernández R, et al. Peristrophic multiplexed holograms recorded in a low toxicity photopolymer [J]. *Optical Materials Express*, 2017, 7(1): 133-147.
- [64] Jang C W, Lee C K, Jeong J, et al. Recent progress in see-through three-dimensional displays using holographic optical elements[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(3): A71-A85.
- [65] 郭斌, 王铭轩, 张荻琴, 等. 用于制备全息光波导的光致聚合物的研究进展[J]. *化学学报*, 2023, 81(4): 393-405.
- Guo B, Wang M X, Zhang D Q, et al. Research progress of photopolymers for the preparation of holographic optical waveguide[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2023, 81(4): 393-405.
- [66] Ramírez M G, Sirvent D, Morales-Vidal M, et al. LED-cured reflection gratings stored in an acrylate-based photopolymer[J]. *Polymers*, 2019, 11(4): 632.
- [67] Galli P, Evans R A, Bertarelli C, et al. Cyclic allylic sulfide based photopolymer for holographic recording showing high refractive index modulation[J]. *Journal of Polymer Science*, 2021, 59(13): 1399-1413.
- [68] Shen Z W, Weng Y S, Zhang Y N, et al. Holographic recording performance of acrylate-based photopolymer under different preparation conditions for waveguide display[J]. *Polymers*, 2021, 13(6): 936.
- [69] Frederick H E. Hologram recording in photopolymerizable layers: US3658526[P]. 1972-04-25.
- [70] Weber A M, Beresiewicz A. Recording films with a high refractive index modulation: US5470662[P]. 1995-11-28.
- [71] 杨志方, 郑成斌, 董明艳. 一种光致聚合物全息记录材料及其制备方法: CN102880004A[P]. 2013-01-16.
- Yang Z F, Zheng C F, Dong M Y. Photoinduced polymer holographic recording material and preparation method thereof: CN102880004A[P]. 2013-01-16.
- [72] Liu Y Y, Liu H P, Wang B H, et al. Expansion of axial dispersion in a photopolymer-based holographic lens and its improvement for measuring displacement[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(27): 8279-8284.
- [73] Keshri S, Murphy K, Toal V, et al. Development of a photopolymer holographic lens for collimation of light from a green light-emitting diode[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(22): E163-E172.
- [74] Wang D, Liu C, Wang Q H. Method of chromatic aberration elimination in holographic display based on zoomable liquid lens [J]. *Optics Express*, 2019, 27(7): 10058-10066.
- [75] López A M, Atencia J, Tornos J, et al. Partitioned-field uniaxial holographic lenses[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(10): 1872-1881.
- [76] Collados M V, Arias I, Atencia J, et al. Anamorphic white light Fourier processor with holographic lenses[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(34): 8706-8713.
- [77] Sweatt W C. Describing holographic optical elements as lenses [J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1977, 67(6): 803-808.
- [78] Kedmi J, Friesem A A. Optimal holographic Fourier-transform lens[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(22): 4015-4019.
- [79] Nakamura T, Kimura S, Takahashi K, et al. Off-axis virtual-image display and camera by holographic mirror and blur compensation[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 24864-24880.
- [80] Jivkova S T, Shurulinkov S, Kavehrad M. Holographic parabolic mirror as a receiver optical front end for wireless infrared communications: experimental study[J]. *Applied Optics*, 2002, 41(28): 5860-5865.
- [81] Sando Y, Satoh K, Barada D, et al. Fast calculation method for parabolic-mirror-reflection holographic 3D display using wavefront segmentation[J]. *Applied Optics*, 2020, 59(27): 8211-8216.
- [82] Gusarova N I, Lushnikov D S, Markin V V, et al. Fabricating holographic mirrors for a night-vision system[J]. *Journal of Optical Technology*, 2011, 78(2): 110-114.
- [83] Duban M, Lemaitre G R, Malina R F. Recording method for obtaining high-resolution holographic gratings through use of multimode deformable plane mirrors[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(16): 3438-3439.
- [84] Duban M. Theory of spherical holographic gratings recorded by use of a multimode deformable mirror[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(31): 7209-7213.
- [85] Yang S W, Sang X Z, Yu X B, et al. 162-inch 3D light field display based on aspheric lens array and holographic functional screen[J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 33013-33021.
- [86] 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*, 2017, 29(1): 82-85.
- [87] Shin D, Kim C, Koo G, et al. Depth plane adaptive integral imaging system using a vari-focal liquid lens array for realizing augmented reality[J]. *Optics Express*, 2020, 28(4): 5602-5616.

- [88] Yu X B, Sang X Z, Gao X, et al. Dynamic three-dimensional light-field display with large viewing angle based on compound lenticular lens array and multi-projectors[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 16024-16031.
- [89] Kwon K C, Lim Y T, Shin C W, et al. Enhanced depth-of-field of an integral imaging microscope using a bifocal holographic optical element-micro lens array[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(16): 3209-3212.
- [90] Yu Y W, Chen C Y, Sun C C. Increase of signal-to-noise ratio of a collinear holographic storage system with reference modulated by a ring lens array[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(8): 1130-1132.
- [91] Ganzherli N M, Maurer I A, Chernykh D F, et al. Microlens arrays and holographic diffusers based on PFG-01 silver halide photographic material[J]. *Journal of Optical Technology*, 2009, 76(7): 384-387.
- [92] Wen J, Yan X P, Jiang X Y, et al. Integral imaging based light field display with holographic diffuser: principles, potentials and restrictions[J]. *Optics Express*, 2019, 27(20): 27441-27458.
- [93] Gu C, Lien J R, Dai F, et al. Diffraction properties of volume holographic diffusers[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1996, 13(8): 1704-1711.
- [94] Piao M L, Kwon K C, Kang H J, et al. Full-color holographic diffuser using time-scheduled iterative exposure[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(16): 5252-5259.
- [95] Poutous M. Dammann gratings as phase diffusers in Fourier holography[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(29): 6827-6832.
- [96] Draper C T, Bigler C M, Mann M S, et al. Holographic waveguide head-up display with 2-D pupil expansion and longitudinal image magnification[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(5): A251-A257.
- [97] Peng H C, Cheng D W, Han J, et al. Design and fabrication of a holographic head-up display with asymmetric field of view[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(29): H177-H185.
- [98] Mu C T, Lin W T, Chen C H. Zoomable head-up display with the integration of holographic and geometrical imaging[J]. *Optics Express*, 2020, 28(24): 35716-35723.
- [99] Lü Z L, Xu Y, Yang Y, et al. Multiplane holographic augmented reality head-up display with a real-virtual dual mode and large eyebox[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(33): 9962-9971.
- [100] Lü Z L, Li J N, Yang Y, et al. 3D head-up display with a multiple extended depth of field based on integral imaging and holographic optical elements[J]. *Optics Express*, 2023, 31(2): 964-975.
- [101] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, et al. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, 17(3): 185-193.
- [102] Guo J J, Tu Y, Yang L L, et al. Holographic waveguide display with a combined-grating in-coupler[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 9293-9298.
- [103] Yang L L, Tu Y, Shi Z Y, et al. Efficient coupling to a waveguide by combined gratings in a holographic waveguide display system[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(35): 10135-10145.
- [104] Mitasaki T, Senda M. Write-once recording for multilayered optical waveguide-type holographic cards[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2006, 23(3): 659-663.
- [105] Piao J G, Li G, Piao M L, et al. Full color holographic optical element fabrication for waveguide-type head mounted display using photopolymer[J]. *Journal of the Optical Society of Korea*, 2013, 17(3): 242-248.
- [106] Kim S B, Park J H. Optical see-through Maxwellian near-to-eye display with an enlarged eyebox[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(4): 767-770.
- [107] Jang C W, Bang K, Li G, et al. Holographic near-eye display with expanded eye-box[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2018, 37(6): 195.
- [108] Lee J S, Kim Y K, Won Y H. See-through display combined with holographic display and Maxwellian display using switchable holographic optical element based on liquid lens[J]. *Optics Express*, 2018, 26(15): 19341-19355.
- [109] Jo Y J, Yoo C Y, Bang K, et al. Eye-box extended retinal projection type near-eye display with multiple independent viewpoints[J]. *Applied Optics*, 2021, 60(4): A268-A276.
- [110] Song W T, Li X, Zheng Y J, et al. Full-color retinal-projection near-eye display using a multiplexing-encoding holographic method[J]. *Optics Express*, 2021, 29(6): 8098-8107.
- [111] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 85.
- [112] Qin X J, Sang X Z, Li H, et al. Binocular holographic display based on the holographic optical element[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2022, 39(12): 2316-2324.
- [113] Yeh P, Gu C. 3D displays: toward holographic video displays of 3D images[J]. *Chinese Optics Letters*, 2013, 11(1): 010901.
- [114] Zaperty W, Kozacki T, Kujawińska M. Multi-SLM color holographic 3D display based on RGB spatial filter[J]. *Journal of Display Technology*, 2016, 12(12): 1724-1731.
- [115] Park J H, Hong K H, Lee B. Recent progress in three-dimensional information processing based on integral imaging[J]. *Applied Optics*, 2009, 48(34): H77-H94.
- [116] Park S G, Yeom J W, Jeong Y, et al. Recent issues on integral imaging and its applications[J]. *Journal of Information Display*, 2014, 15(1): 37-46.
- [117] Yamaguchi M. Light-field and holographic three-dimensional displays[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2016, 33(12): 2348-2364.
- [118] Maimone A, Wang J R. Holographic optics for thin and lightweight virtual reality[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, 39(4): 67.
- [119] Wissmann P, Oh S B, Barbastathis G. Simulation and optimization of volume holographic imaging systems in Zemax [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7516-7524.
- [120] Jang C W, Bang K, Moon S, et al. Retinal 3D: augmented reality near-eye display via pupil-tracked light field projection on retina[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(6): 190.
- [121] Shu T, Hu G Y, Wu R M, et al. Compact full-color augmented reality near-eye display using freeform optics and a holographic optical combiner[J]. *Optics Express*, 2022, 30(18): 31714-31727.
- [122] Han J, Liu J, Yao X C, et al. Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms[J]. *Optics Express*, 2015, 23(3): 3534-3549.
- [123] Bang K, Jang C W, Lee B. Curved holographic optical elements and applications for curved see-through displays[J]. *Journal of Information Display*, 2019, 20(1): 9-23.
- [124] Ponomarev V, Belkin A, Bushmanov O, et al. Compact holographic head-up display device: WO2023007230A1[P]. 2023-02-02.
- [125] Belkin A, Lvova K I, Ponomarev V, et al. Optical system of augmented reality head-up display device with improved visual ergonomics: US20230161159[P]. 2023-05-25.
- [126] Wayray. Advantage of deep reality display system[EB/OL]. (2023-09-22)[2023-11-17]. <https://www.wayray.com/deep-reality-display/#advantages/>.
- [127] Fairchild R C, Fienup J R. Computer-originated aspheric holographic optical elements[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(1): 128.
- [128] Amitai Y, Friesem A A, Weiss V. Designing holographic lenses with different recording and readout wavelengths[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1990, 7(1): 80-86.
- [129] Yang T, Cheng D W, Wang Y T. Design method of nonsymmetric imaging systems consisting of multiple flat phase

- elements[J]. *Optics Express*, 2018, 26(19): 25347-25363.
- [130] Yang T, Wang Y D, Ni D W, et al. Design of off-axis reflective imaging systems based on freeform holographic elements[J]. *Optics Express*, 2022, 30(11): 20117-20134.
- [131] Yang T, Gao L N, Cheng D W, et al. Design method of imaging optical systems using confocal flat phase elements[J]. *Optics Express*, 2022, 30(25): 45895-45909.
- [132] Jang C W, Mercier O, Bang K, et al. Design and fabrication of freeform holographic optical elements[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2020, 39(6): 184.
- [133] Wang Y D, Yang T, Ni D W, et al. Design of an off-axis near-eye AR display system based on a full-color freeform holographic optical element[J]. *Optics Letters*, 2023, 48(5): 1288-1291.
- [134] Xiong J H, Zhong H Z, Cheng D W, et al. Full degree-of-freedom polarization hologram by freeform exposure and inkjet printing[J]. *Photonix*, 2023, 4(1): 35.
- [135] Bruder F K, Fäcke T, Hagen R, et al. Diffractive optics in large sizes: computer-generated holograms (CGH) based on Bayfol HX photopolymer[J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9385: 93850C.
- [136] Wakunami K, Hsieh P Y, Oi R, et al. Projection-type see-through holographic three-dimensional display[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 12954.
- [137] Jackin B J, Jorissen L, Oi R, et al. Digitally designed holographic optical element for light field displays[J]. *Optics Letters*, 2018, 43(15): 3738-3741.
- [138] Hofmann J, Fiess R, Kick M, et al. Extended holographic wave front printer setup employing two spatial light modulators[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11030: 110300N.
- [139] Jeong J, Lee C K, Lee B, et al. Holographically printed freeform mirror array for augmented reality near-eye display [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(16): 991-994.
- [140] Jeong J, Lee J, Yoo C, et al. Holographically customized optical combiner for eye-box extended near-eye display[J]. *Optics Express*, 2019, 27(26): 38006-38018.
- [141] Fisher R L. Design methods for a holographic head-up display curved combiner[J]. *Optical Engineering*, 1989, 28(6): 2866-16.
- [142] Draper C T, Blanche P A. Holographic curved waveguide combiner for HUD/AR with 1-D pupil expansion[J]. *Optics Express*, 2022, 30(2): 2503-2516.
- [143] Blanche P A, Draper C T. Curved holographic waveguide combiner for HUD and AR display[C] // *OSA Imaging and Applied Optics Congress 2021 (3D, COSI, DH, ISA, pcAOP)*, July 19–23, 2021, Washington, DC. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2021: DF2F.4.
- [144] Blanche P A J, Zhang T Y, Draper C T. Holographic curved waveguide combiner for AR/HUD with 2D pupil expansion[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12231: 1223108.
- [145] Zhang T Y, Draper C T, Blanche P A, et al. 2D curved holographic waveguide combiner for augmented reality with pupil expansion[J]. *Proceedings of SPIE*, 2023, 12449: 124491Q.
- [146] Blanche P A, Zhang T Y, Draper C T. 2D pupil expansion in plastic curved holographic waveguide combiner for AR/HUD [C] // *Digital Holography and 3-D Imaging 2022*, August 1–4, 2022, Cambridge. Washington, DC: Optica Publishing Group, 2022: M5A.1.
- [147] Mendes-Lopes J, Benítez P, Miñano J C, et al. Simultaneous multiple surface design method for diffractive surfaces[J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 5584-5590.
- [148] Duan Y Z, Yang T, Cheng D W, et al. Design method for nonsymmetric imaging optics consisting of freeform-surface-substrate phase elements[J]. *Optics Express*, 2020, 28(2): 1603-1620.
- [149] Kamali S M, Arbabi A, Arbabi E, et al. Decoupling optical function and geometrical form using conformal flexible dielectric metasurfaces[J]. *Nature Communications*, 2016, 7: 11618.
- [150] Nikolov D K, Bauer A, Cheng F, et al. Metaform optics: bridging nanophotonics and freeform optics[J]. *Science Advances*, 2021, 7(18): eabe5112.

## Design of Imaging and Display Systems Combining Freeform Optics and Holographic Optical Elements

Yang Tong<sup>1,2\*</sup>, Wang Yongdong<sup>1,2</sup>, Lü Xin<sup>1,2</sup>, Cheng Dewen<sup>1,2</sup>, Wang Yongtian<sup>1,2</sup>

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

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

### Abstract

**Significance** Progress in imaging and display optical systems exerts significant influences on the development of science and technology. Imaging and display systems intrinsically utilize optical elements (geometric or phase elements) to modulate optical wavefronts and achieve expectational imaging relationships, system specifications, and structure requirements. As the representative elements of geometric and phase elements respectively, freeform optical elements (FOEs) and holographic optical elements (HOEs) have significant advantages in optical system design. FOEs possess high degrees of design freedom, which can greatly enhance the ability to modulate wavefronts and improve imaging performance. Additionally, freeform surfaces can correct the aberrations of optical systems with off-axis nonsymmetric structures. Meanwhile, HOEs can unconventionally deflect rays at large angles due to their unique ability to modulate optical wavefronts. They can dramatically reduce the weight and volume of optical systems due to the lightweight form factor, and realize better optical see-through experiences and full-color display due to unique selectivity and multiplex

ability, achieving mass productions owing to relatively simple fabrication methods and low costs. Meanwhile, it is easy to fabricate HOEs with large sizes due to the unique fabrication methods. Considering the above-mentioned advantages, designers may design imaging and display optical systems that combine FOEs and HOEs, significantly improving the degrees of design freedom and the ability to correct aberrations. Additionally, we can achieve advanced system specifications, excellent system performance, compact and lightweight system forms, and unconventional system structures with off-axis nonsymmetry, with further development of optical systems promoted. It is important to summarize the existing design methods of imaging and display systems combining FOEs and HOEs, analyze the problems restricting their further development, and predict the development trends. Meanwhile, it is essential to summarize the existing designs and applications of these systems to better guide and promote the development.

**Progress** We describe the basic principles, ray-tracing models, advantages, and applications of FOEs and HOEs respectively, summarize the system design methods, review the designs and applications of these systems, and analyze current restrictions and future development trends. The design of these systems can be divided into three types. 1) FOEs and HOEs are simultaneously utilized to correct the aberrations of optical systems. 2) The freeform surface is adopted as the substrate shape of HOEs. 3) During HOE fabrication, FOEs are introduced to modulate the recording waves of HOEs. In practical optical system designs, the design can be a combination of the above three ways. The first way directly builds ray-tracing models of freeform optics and HOEs in the optical system design and then adopts the optimization strategy to achieve expectational requirements. The second way coats the holographic recording medium on the freeform substrate to yield HOEs with freeform substrates. The third way bridges the numerical relationship between freeform optics and recording waves of HOEs to fabricate HOEs with unconventional profiles of holographic phase function or grating vector. The methods for defining HOEs based on ray tracing are described in detail, including the phase functions (direction cosines) of the recording waves, holographic phase function, and holographic grating vector, which guides the basic combined design schemes. We review the ways of fabricating HOEs including the whole-area exposing and sub-area exposing (holographic printing) to provide references for combined design fabrication. The calculation methods of starting points of optical systems based on HOEs are summarized in detail, including point-by-point construction and iteration methods, confocal methods, and simultaneous multiple surface (SMS) methods, which guide the design of the optical system combining FOEs and HOEs. The designs and applications of these systems are summarized based on the classifications of HOEs, including augmented reality (AR) near-eye display systems, head-up display (HUD) systems, and HOE-lens imaging systems. Additionally, combined designs of freeform optics and other types of phase elements are also presented, such as liquid crystal polarization hologram (LCPH) based on freeform exposure, and metasurfaces with freeform substrate, which has certain guidance for the combined design of FOEs and HOEs.

**Conclusions and Prospects** Studies on the system design combining FOEs and HOEs make significant progress in the basic principles, design frameworks, and fabrication methods, which has been employed for developing imaging and display systems with high performance, novel structure, and lightweight form factor. There are also some problems and challenges for the research on the system design combining FOEs and HOEs. They include how to fabricate HOEs with freeform substrates by innovative coating technologies of the holographic recording medium, how to correct chromatic aberrations in the imaging and display system using HOEs, how to reduce the nonuniformity of diffraction efficiency and stray light of systems combining FOEs and HOEs, and how to conduct tolerance analysis of such systems. In summary, the research on the design of imaging and display systems combining FOEs and HOEs will promote the development of next-generation high-performance and compact optical systems.

**Key words** freeform optics; holographic optical element; combined design; imaging and display system