

大视场二维扩瞳全息光栅波导设计与加工

程德文^{1,2*}, 倪栋伟^{1,2}, 吕鑫^{1,2}, 王永东^{1,2}, 杨通^{1,2}, 王涌天^{1,2}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²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 为扩大全息光栅波导的出瞳直径和视场,提出了二维扩瞳和视场扩展的两重体全息光栅波导设计方法。该波导结构的出耦合光栅由两个两重体全息光栅构成,用于实现二维扩瞳。将入射视场分为两条路径传播,每条路径负责一半的视场,最后将两部分视场拼接形成完整视场。该方法不仅扩大了出瞳直径,还有利于增大全息波导系统的视场角。介绍了二维扩瞳视场扩展的光学原理和设计方法,最终实现的系统水平视场为 48° ,垂直视场为 27° ,出瞳尺寸为 $16\text{ mm}\times 13\text{ mm}$ 。实验结果验证了所提方法的可行性。该方法在扩瞳的同时有助于扩展视场角,为头戴近眼显示设备提供了具有前景的有效方案。

关键词 全息; 两重体全息光栅波导; 二维扩瞳; 视场扩展

中图分类号 O438.1 文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS230836

1 引言

增强现实(AR)头戴近眼显示技术将虚拟图像信息和真实环境结合在一起,被认为是下一代交互显示技术,在教育、军事、医疗、消费等领域都有潜在的应用前景^[1]。作为主要核心光学器件的AR近眼显示器已经被研究很多年,典型的AR近眼显示器方案包括折返式方案、自由曲面棱镜方案和光波导方案^[2]。其中光波导方案具有轻薄化、紧凑型、眼镜形态等特点,能够实现真正的可佩戴性和全天使用,被认为是具有前景的近眼显示技术^[3]。光波导^[4-10]通常由投影光学系统、入耦合器、出耦合器和一个传输虚拟图像的波导基底构成。其中全息光栅波导的耦合端可以使用体全息光栅,通过利用激光的双光束干涉在微米级厚度的感光材料上进行记录,制造相对方便^[11-12]。全息光栅^[13]具有很好的波前重建功能,在AR头戴近眼显示系统中应用广泛。

尽管全息波导显示技术发展较快,文献^[14-16]开展体全息光栅波导研究,提出了提高体全息光栅衍射效率的设计方法,但其出瞳尺寸和视场(FOV)角依然是影响体全息光栅波导光学性能的重要因素。当前用于制备体全息光栅的光聚合物材料折射率较低,难以与高折射率波导基底匹配。同时全息光栅具有明显的角度选择性,视场越大则衍射效率下降越明显。由于全息材料折射率和角带宽的约束,体全息光栅波导难

以实现大视场。

为在实现体全息光栅波导的二维出瞳扩展的同时扩大显示视场角,本文提出二维扩瞳和视场扩展的两重体全息光栅波导设计方法。本系统将视场分为两条路径传播,每条传播路径分别容纳一半视场,最后两条路径的视场拼接形成完整视场。该波导结构的出耦合端由两个两重体全息光栅构成,利用两重全息曝光方法,分别在两层全息材料上曝光了两个非相干叠加的两重光栅结构,用于实现全息波导的二维扩瞳。该方法不仅拓宽了出瞳直径,还有助于增大显示视场角。

2 基本原理设计

2.1 二维扩瞳结构基本原理

为实现全息波导的二维扩瞳,在本文的波导结构中,除了设计入耦合光栅(HOE₁),还引入两个两重体全息光栅(HOE₂,HOE₃)。如图1(a)所示,投影系统的出射光通过入耦合光栅耦入波导中,在波导内以全反射形式传播。全反射光接触到多重出耦合光栅时,被衍射向两个方向传播,再次被多重全息光栅衍射后进入人眼。图1(b)为设计的两重体全息光栅波导结构示意图,多重出耦合光栅由两重体全息光栅HOE₂和HOE₃组成,HOE₂和HOE₃贴齐于波导基底的前后表面,它们均由两个非相干叠加的光栅组成。入射光被HOE₁衍射,HOE₂和HOE₃的作用使得传播光束由一维传播转换成路径A和路径B两条路径的二维传播,

收稿日期: 2023-04-18; 修回日期: 2023-05-16; 录用日期: 2023-05-25; 网络首发日期: 2023-06-28

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2802100)、北京市自然科学基金(1222026)

通信作者: *cdwlxk@bit.edu.cn

最终实现了全息波导的二维扩瞳。HOE₂ 包含 HOE₂₁ 和 HOE₂₂ 两重光栅结构, HOE₃ 包含 HOE₃₁ 和 HOE₃₂ 两

重光栅结构, 下面将详细介绍两重体全息光栅波导的设计方法原理。

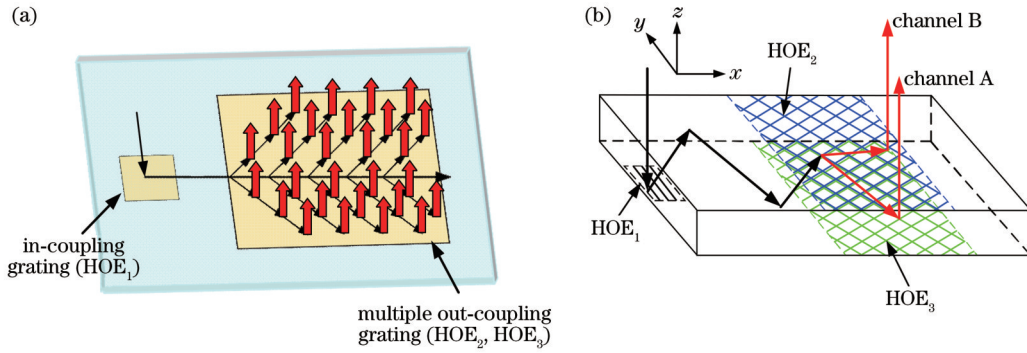


图1 两重体全息光栅波导传播示意图。(a)二维扩瞳传播光路;(b)两重体全息光栅波导结构

Fig. 1 Schematic diagrams of propagation in double volume holographic grating waveguide. (a) Two-dimension optical path of exit pupil expansion; (b) structure of double volume holographic grating waveguide

两重体全息光栅波导二维扩瞳中, 路径 A 主要负责正视图光传播, 如图 2(a) 所示, 入射正视图光经过入耦合光栅 HOE₁ 衍射后, 在波导内以全反射形式传播, 经过两重光栅 HOE₂ 中 HOE₂₂ 光栅结构的衍射后, 衍射光将沿着 y 轴负方向与 x 轴正方向成一定夹角传播, 该衍射光入射到两重光栅 HOE₃ 中的 HOE₃₁ 光栅

结构后被衍射, 衍射光从波导出射进入人眼。如图 2(b) 所示, HOE₁ 衍射的 R₁ 级次光经全反射入射到 HOE₂₂, 被 HOE₂₂ 衍射为 R₁ 和 R₀ 级次光, R₁ 级次光入射到 HOE₃₁, HOE₃₁ 衍射出的 R₋₁ 级次光进入人眼。路径 A 的光栅矢量满足 $G_1 + G_{31} + G_{22} = 0$, 确保路径 A 的出射光角度和入射光角度相等。

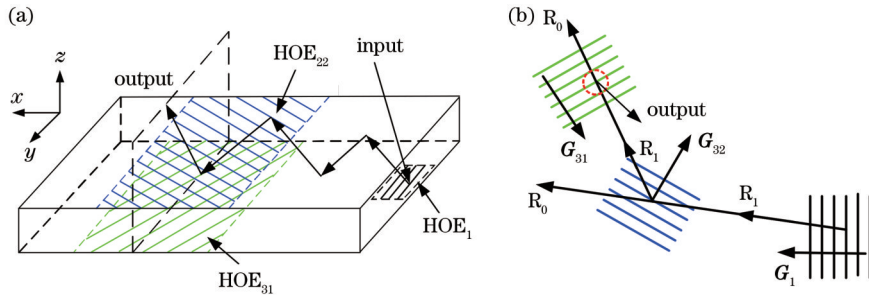


图2 路径 A 的光路传播示意图。(a)正视图光传播路径示意图;(b)衍射光在光栅矢量作用下的传播示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of optical path propagation in path A. (a) Schematic diagram of light propagation path in positive field of view; (b) diagram of diffraction light propagation under grating vector

负视图光在路径 B 内传播, 如图 3(a) 所示, 入射负视图光经过入耦合光栅 HOE₁ 衍射后, 在波导内以全反射形式传播, 经过两重光栅 HOE₂ 中的 HOE₂₁ 光栅结构衍射后, 衍射光将沿着 y 轴正方向与 x 轴正方向成

一定夹角传播, 再入射到两重光栅 HOE₃ 中的 HOE₃₂ 光栅结构后被衍射, 衍射光从波导出射并进入人眼。如图 3(b) 所示, 与路径 A 中光栅的衍射级次一样, HOE₁ 的 R₁ 级次光入射到 HOE₂₁, HOE₂₁ 衍射的 R₁ 级次

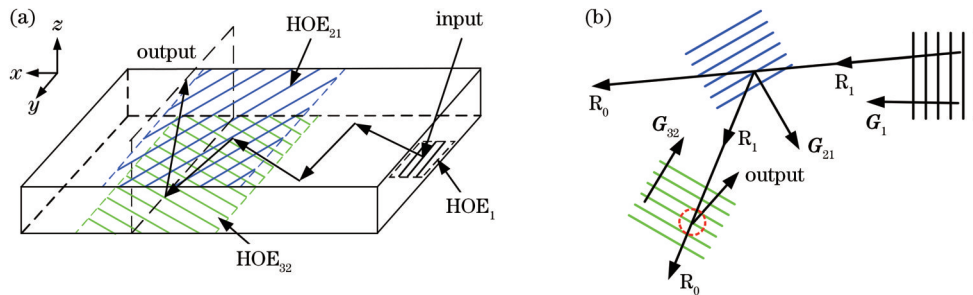


图3 路径 B 光路传播示意图。(a)负视图光传播路径示意图;(b)衍射光在光栅矢量作用下的传播示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of optical path propagation in path B. (a) Schematic diagram of light propagation path in negative field of view; (b) diagram of diffraction light propagation under grating vector

光传播到 HOE_{32} , HOE_{32} 衍射的 R_{-1} 级次光进入人眼。光栅矢量 $G_1 + G_{32} + G_{21} = 0$, 确保路径 B 的出射光角度和入射负视场角度相等。

2.2 二维扩瞳设计

设计的路径 A 扩瞳中传播光的圆锥衍射平面图如图 4 所示。图 4(a) 显示了中心视场光的传播方向, 图中虚线圆圈表示 HOE_{31} 的衍射光垂直波导出射。图 4(b) 显示了正视场光的传播方向, 图中箭头表示 HOE_{31} 的 R_{-1} 级次衍射光出射方向。 HOE_1 的 R_1 级衍射光在 xy 平面的投影与 HOE_1 的光栅矢量 G_1 的夹角为 φ_1 ,

HOE_{22} 的 R_1 级衍射光在 xy 平面的投影与 HOE_{22} 的光栅矢量 G_{22} 的夹角为 φ_2 。假定波导的入射角为 θ_0 , 入射光线在 xy 平面的投影与 HOE_1 的光栅矢量的夹角为 φ_0 , HOE_1 的 R_1 级次衍射角为 θ_1 , HOE_{22} 的 R_1 级次衍射角为 θ_2 , HOE_{31} 的 R_{-1} 级次衍射角为 θ_3 , 其衍射光线在 xy 平面的投影与 HOE_{31} 的光栅矢量 G_{31} 的夹角为 φ_3 。则波导的入射角度表示为 (θ_0, φ_0) , HOE_1 的 R_1 级衍射光的角表示为 (θ_1, φ_1) , HOE_{22} 的 R_1 级衍射光的角表示为 (θ_2, φ_2) , HOE_{31} 的 R_{-1} 级衍射光从波导的出射角度为 (θ_3, φ_3) 。光栅矢量 G_{22} 、 G_{31} 与光栅矢量 G_1 的夹角为 60° 。

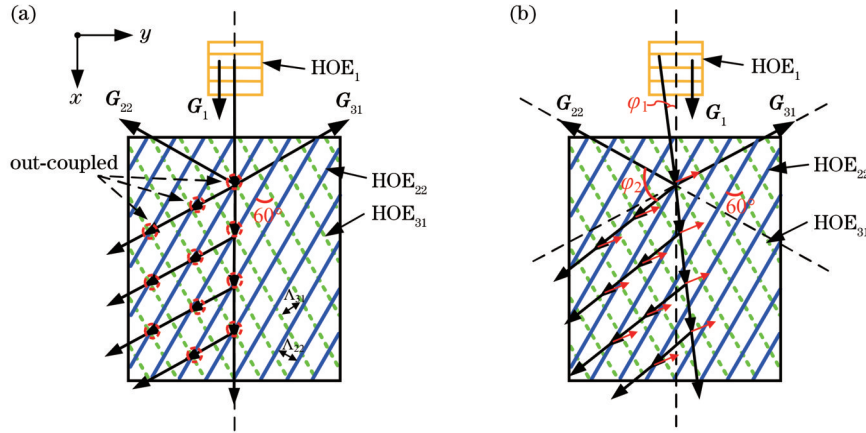


图 4 路径 A 圆锥衍射传播路径平面图。(a) 中心视场光线传播; (b) 正视场光线传播

Fig. 4 Planar diagrams of conical diffraction light propagation path in path A. (a) Light propagation in center field of view; (b) light propagation in positive field of view

设计的路径 B 扩瞳中传播光的圆锥衍射平面图如图 5 所示。图 5(a) 显示了中心视场光的传播方向。图 5(b) 显示了负视场光的传播方向, HOE_1 的 R_1 级衍射光在 xy 平面的投影与 HOE_1 的光栅矢量 G_1 的夹角为 φ_1 , HOE_{21} 的 R_1 级衍射光在 xy 平面的投影与 HOE_{21} 的光栅矢量 G_{21} 的夹角为 φ_2 。假定光在波导路径 B 扩瞳中的入射角度表示为 (θ_0, φ_0) , HOE_1 的 R_1 级衍射光角

度表示为 (θ_1, φ_1) , HOE_{21} 的 R_1 级衍射角为 (θ_2, φ_2) , HOE_{32} 的 R_{-1} 级次衍射光从波导出射的角度为 (θ_3, φ_3) 。

光从空气入射到 HOE_1 , HOE_1 的光栅圆锥衍射方程可表示为

$$n \sin \theta_1 \sin \varphi_1 = \sin \theta_0 \sin \varphi_0, \quad (1)$$

$$n \sin \theta_1 \cos \varphi_1 = \sin \theta_0 \cos \varphi_0 + \frac{\lambda}{\Lambda_1}, \quad (2)$$

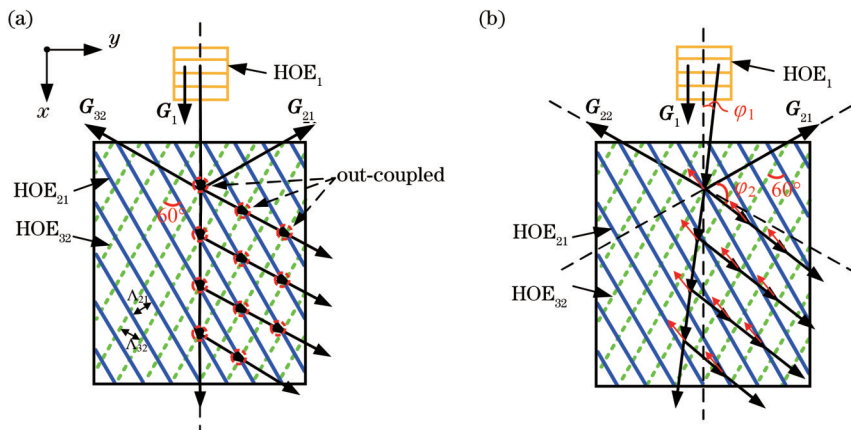


图 5 路径 B 圆锥衍射传播路径平面图。(a) 中心视场光线传播; (b) 负视场光线传播

Fig. 5 Planar diagrams of conical diffraction light propagation path in path B. (a) Light propagation in center field of view; (b) light propagation in negative field of view

式中: Λ_1 为 HOE₁ 的光栅周期; λ 为入射波长。

在路径 A 中 HOE₁ 的衍射光入射到 HOE₂₂ 上, 路径 B 中 HOE₁ 的衍射光入射到 HOE₂₁ 上, HOE₂₂ 和 HOE₂₁ 衍射的 R₁ 级次光分别满足

$$\sin \theta_2 \sin \varphi_2 = \sin \theta_1 \sin (\varphi_1 - 60), \quad (3)$$

$$n \sin \theta_2 \cos \varphi_2 = n \sin \theta_1 \cos (\varphi_1 - 60) + \frac{\sqrt{3} \lambda}{2 \Lambda_{2i}}, \quad (4)$$

式中: $i=1, 2$ 。 $i=1$ 时, 式(3)、(4)满足 HOE₂₁ 的 R₁ 级次光衍射, Λ_{21} 为 HOE₂₁ 的光栅周期; $i=2$ 时, 式(3)、(4)满足 HOE₂₂ 的 R₁ 级次光衍射, Λ_{22} 为 HOE₂₂ 的光栅周期。

在路径 A 中 HOE₂₂ 的衍射光入射到 HOE₃₁ 上, 路径 B 中 HOE₂₁ 的衍射光入射到 HOE₃₂ 上, HOE₃₁ 的 R₋₁ 级次衍射光和 HOE₃₂ 的 R₋₁ 级次衍射光分别从波导出射的角度满足

$$\sin \theta_3 \sin \varphi_3 = n \sin \theta_2 \sin (60 - \varphi_2), \quad (5)$$

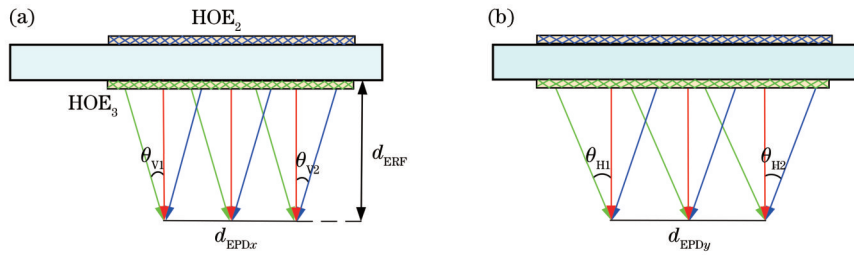


图 6 两重体全息光栅波导出瞳直径。(a) x 方向出瞳直径; (b) y 方向出瞳直径

Fig. 6 Exit pupil diameters of double volume holographic grating waveguide. (a) Exit pupil diameter in x direction; (b) exit pupil diameter in y direction

2.3 视场扩展 k 矢量图分析

在球面坐标系下, 入射波导的光波矢量 k 可以表示为

$$k = (k_x, k_y, k_z) = k_0 n (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta). \quad (9)$$

波导中光的传播可以用 k 矢量图进行分析。以一个普通的单路径系统为例, 入射光从空气入射到波导, 被波导的入耦合光栅衍射到波导内进行全反射传播, 其 k 矢量图如图 7 所示, 其中内圆区域表示空气, 折射率为 n_{air} , 空气中的入射光波数为 k_0 。外圆和内圆之间的环形区域表示波导全反射 (TIR) 区域, 波导折射率为 n_w 。在 k 矢量图的 xy 平面内, x 轴方向大小用 k_x/k_0 表示, y 轴方向大小用 k_y/k_0 表示, 则内圆半径可以表示为空气折射率 n_{air} 的函数, 外圆半径可以表示为波导折射率 n_w 的函数。经入耦合光栅的衍射后, 入射视场的中心从坐标原点移动到 λ/Λ 的位置, 其中 Λ 为入耦合光栅的周期。

内圆半径可以表示为

$$R_{\text{air}} = \sqrt{k_x^2 + k_y^2} = k_0 n_{\text{air}}. \quad (10)$$

外圆半径可以表示为

$$R_w = k_0 n_w. \quad (11)$$

当被衍射的中心视场位于全反射区域内外边界中

$$\sin \theta_3 \cos \varphi_3 = n \sin \theta_2 \cos (60 - \varphi_2) - \frac{\sqrt{3} \lambda}{2 \Lambda_{3i}}. \quad (6)$$

$i=1$ 时, 利用式(5)、(6)可以计算 HOE₃₁ 的 R₋₁ 级次光从波导出射的角度, Λ_{31} 为 HOE₃₁ 的光栅周期; $i=2$ 时, 利用式(5)、(6)可以计算 HOE₃₂ 的 R₋₁ 级次光从波导出射的角度, Λ_{32} 为 HOE₃₂ 的光栅周期。在给定的周期和入射视场下, 由上述方程可以推导和计算不同入射波长下各光栅结构的入射角和衍射角。

出瞳直径大小可由图 6 中几何关系计算得到, 如图 6(a) 所示, x 方向的出瞳直径为 $d_{\text{EPD}x}$, 视场角为 $|\theta_{v1}| = |\theta_{v2}|$, 出瞳距离为 d_{ERF} , 假设 HOE₃ 的 x 方向长度为 L_x , 则 $d_{\text{EPD}x}$ 可表示为

$$d_{\text{EPD}x} = L_x - d_{\text{ERF}} \times 2 \tan \theta_{v1}. \quad (7)$$

如图 6(b) 所示, 假定 HOE₃ 的 y 方向长度为 L_y , 视场角为 $|\theta_{H1}| = |\theta_{H2}|$, 则 y 方向的出瞳直径 $d_{\text{EPD}y}$ 可表示为

$$d_{\text{EPD}y} = L_y - d_{\text{ERF}} \times 2 \tan \theta_{H1}. \quad (8)$$

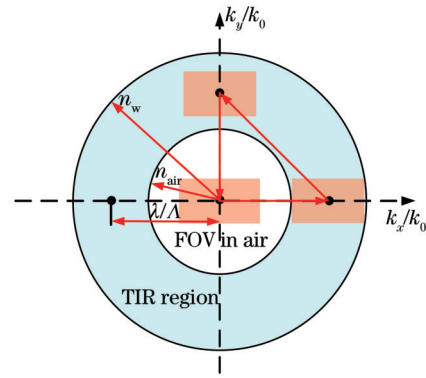


图 7 常见单路径波导 k 矢量图

Fig. 7 k vector diagram of general single channel waveguide

间时, 有效入射视场最大。因此, 根据图 7 中几何关系, 可以计算出此时的最大视场对应的最佳入耦合光栅周期为

$$\Lambda = \frac{2\lambda}{n_{\text{air}} + n_w}. \quad (12)$$

此时, 对应的空气中最大入射视场用 θ 表示, 可表示为

$$\theta = 2 \arcsin \left(\frac{n_w - n_{\text{air}}}{2} \right). \quad (13)$$

要实现更大的入射视场,需要扩大波导全反射区域的外边界,这相当于需要提高波导的折射率。从图 7 的 k 矢量图分析及式 (13) 可以看出,视场的理论上限由波导折射率决定。玻璃的高折射率难以与全息材料折射率匹配。全息光栅具有明显的角度选择性,视场越大则衍射效率下降越明显。对于单路径波导系统来说,全息光栅在大视场角度入射时,光栅衍射效率过低会导致不同视场显示亮度不均匀甚至大视场角图像难以显示的问题。

本文提出的二维扩瞳视场扩展方法扩大了波导的显示视场,图 8 显示了整个波导的全视场传播 k 矢量图。路径 A 和路径 B 将视场分为两部分传播,在光栅矢量作用下正负两部分视场分别通过路径 A 和路径 B 传播,并最终通过两路径视场叠加重建全视场,实现了全视场传播。从图 8 中几何关系可知,被光栅衍射的视场中心和入射视场中心之间构成一个等边三角形,视场中心之间的距离相等,即 $\lambda/\Lambda_1 = \lambda/\Lambda_{21} = \lambda/\Lambda_{32} = \lambda/\Lambda_{22} = \lambda/\Lambda_{31}$, 即 $\Lambda_1 = \Lambda_{21} = \Lambda_{32} = \Lambda_{22} = \Lambda_{31}$ 。光栅周期可通过式 (12) 计算得出,此时,对应的空气中最大入射视场 θ_{\max} 是图 7 中单路径视场的两倍,可表示为

$$\theta_{\max} = 4\arcsin\left(\frac{n_w - n_{\text{air}}}{2}\right) \quad (14)$$

相比于图 7 中单路径覆盖全视场的方法来说,理论上分视场传播的二维扩瞳方法可以将视场扩大两倍,同时有利于降低全息光聚合物和波导基底折射率要求。

本设计中采用光聚合物材料加工两重体全息光栅,其折射率为 1.52。选取波导基底材料为成都光明 H-K9L 玻璃,当入射波长范围为 500~560 nm 时,波导的折射率变化范围为 1.5180~1.5214。入射波导的中心光波长 λ 为 530 nm 时,波导基底折射率为 1.52,计算得到光栅周期为 $\Lambda_1 = \Lambda_{21} = \Lambda_{32} = \Lambda_{22} = \Lambda_{31} = 422$ nm。

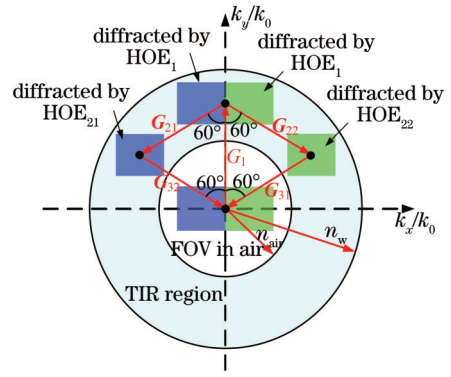


图 8 两重全息光栅波导全视场 k 矢量图
Fig. 8 k vector diagram of double holographic grating waveguide in full field of view

对于设计的两重体全息光栅波导结构,在波导折射率和全息光栅材料折射率均为 1.52 时,计算出波导的对角视场理论上可达 60° 。在本设计中,每重光栅周期为 422 nm,对角视场设置为 55° ,加工的 HOE₃ 在 x 方向和 y 方向的尺寸分别为 25 mm 和 29 mm,计算得到 x 方向和 y 方向的出瞳直径分别为 16 mm 和 13 mm。依据计算得到的波导参数,对两重体全息光栅波导进行两重全息激光曝光加工。

3 实验加工分析

本设计中,HOE₂ 和 HOE₃ 的加工将采用两重全息曝光记录方法,在加工中,HOE₂ 和 HOE₃ 分别需要在同一层全息材料上进行两次干涉方向不同的曝光记录,以形成各自的两重体全息光栅。

以 HOE₂ 的加工为例,在 HOE₂ 的加工过程中,先通过曝光记录得到 HOE₂₁,再在曝光的 HOE₂₁ 基础上进行第二重全息曝光,得到 HOE₂₂。HOE₂₁ 的全息曝光加工光路如图 9 所示。通过孔径光阑 A1 的准直光束 L1 平行于 xy 平面,垂直于图中 Prism-1 斜面入射。

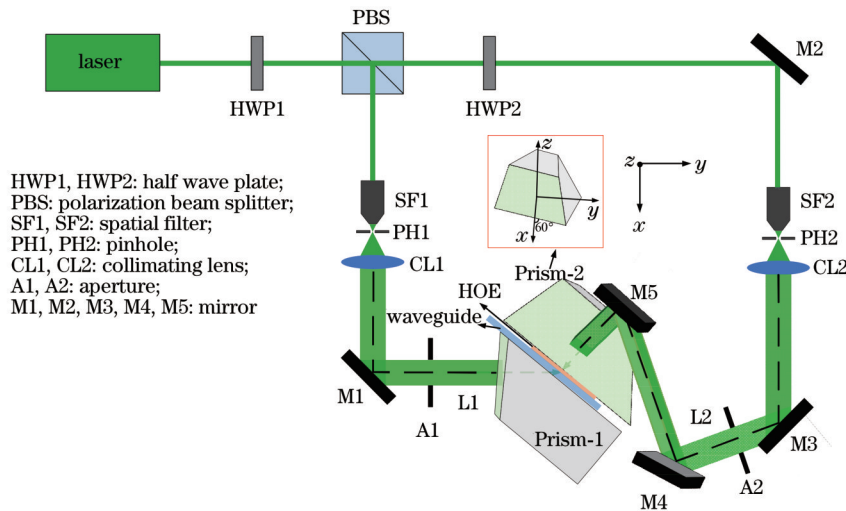


图 9 HOE₂₁ 的全息曝光加工光路
Fig. 9 Holographic exposure processing optical path of HOE₂₁

但另一路被反射镜 M4 反射后的光束 L2 将位于 xyz 空间内, 相对于 xy 平面产生偏转角度, 然后被 M5 反射, 垂直图中 Prism-2 的斜面入射。最终, 通过两束激光的干涉曝光制备出 HOE₂₁。Prism-2 的位置如方框所示, 曝光过程中 Prism-2 的斜面底边与 x 轴的夹角为 60°。HOE₂₂ 将在 HOE₂₁ 基础上进行第二重曝光, 将方框中棱镜沿顺时针方向旋转, 使其与 x 轴负方向的夹角为 120°。在此基础上进行一次曝光, 即可得到两重体全息光栅 HOE₂。

HOE₁ 和 HOE₃ 的全息曝光加工光路用到的光学器件与 HOE₂ 类似。其中 HOE₃ 分别接收 HOE₂₁ 和 HOE₂₂ 的衍射光, 将其衍射并使其从波导出射后进入人眼。参考 HOE₃₁ 和 HOE₃₂ 的入射光和出射光方向, 可以确定 HOE₃₁ 和 HOE₃₂ 的双光束曝光记录方向, 依

次对 HOE₃₁ 和 HOE₃₂ 进行全息曝光, 即可得到两重体全息光栅 HOE₃。最终, 加工得到的 HOE₁ 衍射效率可达 90%, 每一重光栅结构的衍射效率均可达 40%。

利用两重全息曝光方法制备的两重体全息光栅波导样片如图 10(a) 所示, 入耦合光栅 HOE₁ 的尺寸为 4 mm × 4 mm, 两重体全息光栅 HOE₂ 和 HOE₃ 的尺寸均为 29 mm × 25 mm。两种光栅结构紧凑, 有利于实现 AR 眼镜形态造型。如图 10(b) 中左图所示, 532 nm 的激光垂直入射到 HOE₁, HOE₁ 的衍射光在波导中进行全反射传播, 经过 HOE₂ 和 HOE₃ 的共同作用后从波导出射, 沿着 x 和 y 方向传播的出射光瞳点如图 10(b) 中右图所示, 出射光瞳点可以验证该两重体全息光栅波导能够在水平和垂直两个方向实现二维扩瞳。

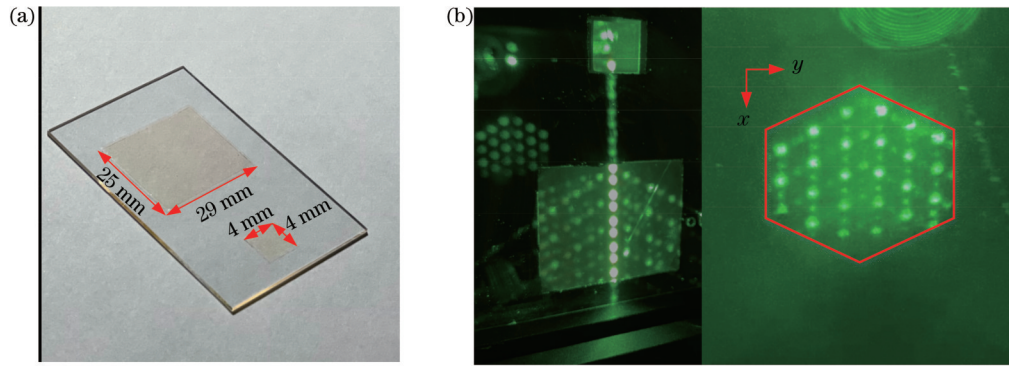


图 10 制备的两重体全息光栅波导样片。(a) 两重体全息光栅波导样片; (b) 真实光线追迹及二维扩瞳光瞳点

Fig. 10 Processed double volume holographic grating waveguide sample. (a) Double volume holographic grating waveguide sample; (b) real ray tracing and optical pupil spots in two-dimension expansion pupil

为了验证样品的显示视场角, 选择 DLP (digital light processing) 作为投影光学系统, DLP 的出瞳位置对准样品的入耦合光栅 HOE₁, 利用标定相机在两重体全息光栅波导的出瞳位置观察显示图像。显示的全视场图像如图 11 所示, 图像的水平方向长度为 93.5 mm, 垂直方向长度为 50.4 mm, 全息图像与标定相机之间的距离为 105 mm, 计算得到两重体全息光栅波导的水平视场角为 48°, 垂直视场角为 27°, 显示对角

线视场角为 55°。通过对显示视场的测试验证了所提出的方法能够实现视场扩展。

4 结 论

提出了二维扩瞳和视场扩展的两重体全息光栅波导设计方法, 通过两个两重体全息光栅的组合, 有效地扩大了全息波导的出瞳直径和显示视场。详细介绍了每条路径的光路传播原理和设计方法, 利用两重全息曝光方法制备了全息波导样片, 并对两重体全息光栅波导样片进行实验测试。实验结果表明, 二维出射光瞳点在出瞳位置的 x 和 y 两个方向进行传播, 显示的全视场图像的水平视场角为 48°, 垂直视场角为 27°, 对角线视场角为 55°, 这些结果验证了所提方法有助于实现二维扩瞳和视场扩展。该方法有效地扩大了全息波导显示系统的出瞳直径和显示视场, 在 AR 头戴近眼显示领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Carmigniani J, Furht B, Anisetti M, et al. Augmented reality technologies, systems and applications[J]. Multimedia Tools and Applications, 2011, 51(1): 341-377.
- [2] Cheng D W, Wang Q W, Liu Y E, et al. Design and

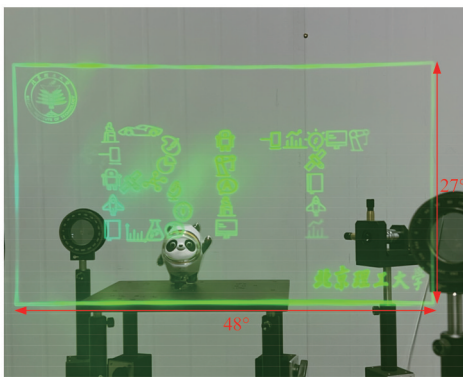


图 11 全视场图像

Fig. 11 Full field of view image

- manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook [J]. *Light: Advanced Manufacturing*, 2021, 2(3): 336.
- [3] Cameron A A. Optical waveguide technology and its application in head-mounted displays[J]. *Proceedings of SPIE*, 2012, 8383: 83830E.
- [4] Cheng D W, Wang Y T, Xu C, et al. Design of an ultra-thin near-eye display with geometrical waveguide and freeform optics [J]. *Optics Express*, 2014, 22(17): 20705-20719.
- [5] Xu M M, Hua H. Methods of optimizing and evaluating geometrical lightguides with microstructure mirrors for augmented reality displays[J]. *Optics Express*, 2019, 27(4): 5523-5543.
- [6] Pan C, Liu Z Y, Pang Y J, et al. Design of a high-performance in-coupling grating using differential evolution algorithm for waveguide display[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26646-26662.
- [7] Shi R, Liu J, Zhao H Z, et al. Chromatic dispersion correction in planar waveguide using one-layer volume holograms based on three-step exposure[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4703-4708.
- [8] 曾飞, 张新, 张建萍, 等. 基于棱镜-光栅结构的全息波导头盔显示系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0909001.
Zeng F, Zhang X, Zhang J P, et al. Holographic waveguide head-mounted display system design based on prisms-grating structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0909001.
- [9] 王彦, 康明武, 闫占军, 等. 双棱镜耦合输入全息波导显示系统设计[J]. *电光与控制*, 2014, 21(4): 73-76.
Wang Y, Kang M W, Yan Z J, et al. Design of a holographic waveguide display system using twice prism coupled input[J]. *Electronics Optics & Control*, 2014, 21(4): 73-76.
- [10] 翁一士. 彩色波导显示光学耦合技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
- Weng Y S. Research on optical coupling technology of color waveguide display[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [11] Fernández R, Bleda S, Gallego S, et al. Holographic waveguides in photopolymers[J]. *Optics Express*, 2019, 27(2): 827-840.
- [12] 杨柳, 蒋世磊, 季雪淞, 等. 用于平板波导显示的反射型体全息光栅制备[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(3): 0305001.
Yang L, Jiang S L, Ji X S, et al. Preparation of reflective volume holographic grating for plate waveguide display[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(3): 0305001.
- [13] 吴佳雪, 桂进斌, 李俊昌, 等. 基于深度学习的无干扰全息图生成[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1409001.
Wu J X, Gui J B, Li J C, et al. Interference-free hologram generation based on deep learning[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1409001.
- [14] Yu C, Peng Y F, Zhao Q, et al. Highly efficient waveguide display with space-variant volume holographic gratings[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(34): 9390-9397.
- [15] 鲁婷婷, 冯奇斌, 王梓, 等. 大角带宽高衍射效率体全息光栅的设计和制备[J]. *光学学报*, 2021, 41(2): 0205001.
Lu T T, Feng Q B, Wang Z, et al. Design and fabrication of volume holographic gratings with large angular bandwidth and high diffraction efficiency[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(2): 0205001.
- [16] 谢豪, 霍富荣, 薛常喜. 用于头戴显示的新型耦合光栅结构优化设计与分析[J]. *光学学报*, 2022, 42(14): 1405001.
Xie H, Huo F R, Xue C X. Optimal design and analysis of new coupled grating structure for head-mounted display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(14): 1405001.

Design and Fabrication of 2D Exit Pupil Expansion Holographic Grating Waveguide with Large Field of View

Cheng Dewen^{1,2*}, Ni Dongwei^{1,2}, Lü Xin^{1,2}, Wang Yongdong^{1,2}, Yang Tong^{1,2},
Wang Yongtian^{1,2}

¹*School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;*

²*Beijing Engineering Research Center of Mixed Reality and Advanced Display, Beijing 100081, China*

Abstract

Objective Augmented reality (AR) head-mounted near-eye display technology combines virtual image information with real environment, and it is the next generation of interactive display technology with potential applications in education, military, medical, consumption, and other fields. The optical waveguide scheme is a promising technology due to its thinness, compactness, and eyeglass shape, which can realize true wearability and all-day utilization. A volume holographic grating (VHG) has a good wavefront reconstruction function and can be fabricated by the laser exposure method. The process is controllable at a low cost, which is a potential AR solution. Although holographic waveguide display technology develops rapidly, its exit pupil size and field of view (FOV) are still important factors affecting the optical performance of volume holographic waveguide. VHG waveguides are difficult to achieve large FOV due to the restrictions of refractive index and angular bandwidth of holographic materials. How to ensure a large FOV display of VHG waveguide under the premise of a large exit pupil is a difficult research point, which requires a breakthrough from the design method of exit pupil expansion (EPE). Thus, we propose a design method of double VHG waveguide with two-dimensional (2D) EPE and FOV expansion.

Methods To enlarge the exit pupil diameter and FOV of the VHG waveguide, we put forward a design method of double VHG waveguide with 2D-EPE and FOV expansion. The out-coupling grating of the waveguide structure is composed of

double VHGs. By changing the light transmission direction in the waveguide through the structure of double VHGs, the beam is converted from one-dimensional propagation to 2D propagation for realizing the 2D-EPE of the system. We divide the incident FOV into two propagating paths, each path is responsible for half of the FOV, and the two parts of the FOV are finally spliced together to form a complete FOV. The optical principle and design method of 2D-EPE and FOV expansion are introduced in detail. Two non-coherent double grating structures are exposed on two layers of holographic material by double holographic exposure method, which is adopted to realize 2D-EPE in holographic waveguides. The proposed method not only expands the exit pupil diameter but also improves the FOV of the holographic waveguide system.

Results and Discussions The VHG waveguide sample is fabricated by double holographic exposure method. The structure of the two grating positions is compact, which is conducive to glass shape modeling. A 532 nm laser is employed to illuminate HOE₁ vertically, and the diffracted light of HOE₁ is propagated in the waveguide by total reflection and then exits through the influence of HOE₂ and HOE₃ together. The exit pupil point propagates along the x and y directions, and the optical pupil point can prove the ability of the VHG waveguide to achieve 2D-EPE (Fig. 10). Digital light processing (DLP) is selected as the projection optical system to verify the display FOV of the waveguide sample. The experimental results show that the horizontal FOV of the waveguide is 48°, the vertical FOV is 27°, and the display diagonal FOV is 55° (Fig. 11). The experimental tests prove that the proposed method can realize 2D-EPE and FOV expansion.

Conclusions A design method of double VHG waveguide with 2D-EPE and FOV expansion is proposed. The exit pupil diameter and display FOV of the holographic waveguide are enlarged by the combination of double VHGs. The optical propagation principle and design method of each path are introduced in detail. The volume holographic waveguide sample is fabricated by the double holographic exposure method, and the experimental test of the double VHG waveguide sample is carried out. The 2D optical pupil point propagates in the x and y directions of the exit pupil position, and the size of the exit pupil is 16 mm × 13 mm. The displayed full FOV image has a horizontal FOV of 48°, a vertical FOV of 27°, and a diagonal FOV of 55°. The experimental results verify that the proposed method is beneficial to achieve 2D-EPE and FOV expansion, with a broad application prospect in AR head-mounted near-eye display.

Key words holography; double volume holographic grating waveguide; two-dimensional exit pupil expansion; field of view expansion