

# 面向车载增强现实抬头显示的大幅面体全息光波导

蒙道杨, 杨鑫\*, 宋强, 马国斌

深圳珑璟光电科技有限公司, 广东 深圳 518000

**摘要** 增强现实抬头显示(AR-HUD)是下一代智能座舱的关键显示系统,能够极大地提升驾驶安全性和体验感。基于体全息光波导的AR-HUD具有光学系统体积小、能量利用率高等优势,是AR-HUD领域关注的重点。然而,传统基于棱镜耦合的双光束曝光方法实现大幅面体全息光波导的制造极具挑战性。从体全息光波导的曝光参数出发,在矢量球中基于光栅简并理论给出了非全反射条件下体全息光波导曝光的参数设计方法,设计并搭建了一套大幅面体全息光波导自动化拼接曝光系统,制作了幅面尺寸为130 mm×270 mm的大幅面体全息光波导,并给出了增强现实显示效果。

**关键词** 成像系统; 增强现实; 抬头显示; 体全息光波导; 自动化曝光系统

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS222103

## 1 引言

随着电子信息技术的发展,汽车的智能化成为了一种历史发展的必然,尤其在目前新能源汽车领域中,激光雷达、车载摄像头系统、辅助驾驶和语音交互等新技术逐步得到了广泛应用。车载抬头显示<sup>[1-4]</sup>系统作为信息显示的媒介,能够将仪表盘信息、传感器获得的辅助驾驶信息和与环境融合的现实增强信息完美地呈现给驾驶者,使驾驶者无需低头观看仪表,极大地提升了驾驶的安全性和体验感。

实现增强现实抬头显示(AR-HUD)的显示技术有多种,可以按照显示图像的类别划分为三维显示和二维显示。三维AR-HUD主要有双焦面三维显示<sup>[1, 4-5]</sup>、光场三维显示<sup>[6-7]</sup>和全息三维显示<sup>[8-9]</sup>等。其中,双焦面显示系统可以使用单图像源进行区域划分,每个区域通过不同光路呈现不同深度,或者使用两个图像源,分别对应两个显示深度并进行融合<sup>[1, 4-5]</sup>。通过渲染光场图像或多视点图像配合显示系统可实现光场的三维显示,但目前图像源分辨率较低会导致最终显示的光场三维图像不能满足实际显示分辨率的需求,这些问题会随着显示源分辨率的提升而有所改善<sup>[6-7]</sup>。全息三维显示能够实现三维场景的完整波前重构,被认为是最理想的三维显示,但现有空间光调制器的空间带宽积不足以支撑大视场角的同时有较大的眼盒尺寸<sup>[8-9]</sup>。二维AR-HUD显示是目前的主流,主要

实现方式是使用优化的多自由曲面反射镜系统对图像源进行放大,通过前挡风玻璃反射图像光进入人眼,而图像与环境的融合是基于透视原理对显示的图像内容进行设计来实现的,该方案实现大尺寸眼盒和大视场角的AR-HUD需要自由曲面反射镜尺寸增大,这会导致整个光学系统的体积增大,不利于在车载前装方面的实际应用<sup>[10-11]</sup>。

实现轻薄紧凑型AR-HUD显示系统具有迫切的需求,基于体全息光波导的AR-HUD系统能够极大地减小光机部分的体积,通过波导的扩瞳功能可打破光学系统中拉赫不变量限制,能够同时实现大视场角和大眼盒尺寸。基于体全息光波导的一维和二维扩瞳方案均已被提出,并且在耦入光栅或耦出光栅中均可使用具有光焦度的全息光学元件对显示进行缩放<sup>[12-15]</sup>。然而,耦入和耦出光栅均为全反射光和另一空间光干涉形成的,传统方案中必须用棱镜进行耦合,使得全反射光可进入波导中与感光材料发生干涉,此时需要在棱镜和波导之间填充匹配液,匹配液厚度的不均匀性和灰尘或气泡的存在会导致体全息光栅局部出现缺陷或质量变差。对于大幅面体全息光波导而言,幅面越大,所需棱镜的尺寸也越大,匹配液贴合的难度也越高,并且需要大口径的激光光斑用于干涉曝光,这会导致设备成本增加,且波导制造难度剧增,甚至使得大幅面体全息光波导制造变得不具可行性。

为了能够实现应用于车载抬头显示系统的大幅面

收稿日期: 2022-12-06; 修回日期: 2022-12-15; 录用日期: 2023-01-03; 网络首发日期: 2023-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(62005006)

通信作者: \*yangxin@lochn.com

体全息光波导,本文提出了一种非全反射条件下曝光体全息光栅的方法,设计并搭建了一套全自动化拼接曝光系统,制作了幅面大小为  $130\text{ mm} \times 270\text{ mm}$  的大幅面体全息光波导,并实现了增强现实显示效果。在该方法中,体全息光栅曝光参数通过在矢量球中基于光栅简并理论寻求等效曝光参数而实现,采用该方案可避免耦合棱镜的使用,且通过小尺寸体全息光栅自动化拼接曝光即可实现大幅面体全息光波导的制造,幅面仅受限于所使用的二维移动台的行程。采用该方案可降低对大口径的准直透镜或离轴抛物面反射镜的需求,极大地降低了对激光功率的需求,从而节约了设备成本。另一方面,采用全自动化拼接曝光可提升体全息光波导制造的生产效率,可保证体全息光波导质量的一致性。该技术的成功突破为大幅面体全息光波导在车载抬头显示领域的应用打下了良好的基础。

## 2 基本原理

图 1 给出了二维扩瞳波导实现 AR-HUD 的示意图。来自光机的准直图像光通过耦合元件耦入光波导后全反射传播,并被转折光学元件和耦出光学元件在两个方向上扩瞳逐次耦出,经挡风玻璃反射,图像光进入人眼,驾驶者可看到呈现于远处的虚像和现实环境,所呈现的虚像通过透视投影设计与环境融合,形成 AR-HUD 显示效果。根据光波导实现技术的不同,光波导可分为阵列光波导、浮雕光栅光波导和体全息光波导。在目前工艺和成本条件下,通过阵列光波导和浮雕光栅光波导实现大幅面二维扩瞳波导存在着巨大的现实困难,而体全息光波导可由激光干涉曝光制造,

有实现大幅面的潜力,是本文的研究重点。

应用于波导的体全息光栅可分为透射式体全息光栅和反射式体全息光栅,而二维扩瞳体全息光波导中耦入光栅和耦出光栅结构参数可完全相同,进行  $90^\circ$  旋转即可,转折光栅需要通过两束全反射条件下的异面平面波干涉形成。根据实际的研究和推导,先给出结论:1)应用于波导 AR-HUD 的耦入透射式体全息光栅、耦出透射式体全息光栅和转折光栅在非全反射条件下的曝光条件是不满足的;2)应用于波导 AR-HUD 的耦入反射式体全息光栅和耦出反射式体全息光栅可满足非全反射条件下曝光的条件。对于第 1 条结论的推导方法与应用于波导 AR-HUD 的反射式体全息光栅的推导方法类似,不进行赘述,仅给出第 2 条结论的设计方法。

图 2 为所提的一维扩瞳体全息光波导,包括耦入体全息光栅、耦出体全息光栅和波导基底,耦入和耦出体全息光栅均为反射式体全息光栅。图 2(b)为图 2(a)中圆环内部分的放大,入射光 R 垂直照明耦入体全息光栅,其中产生反向一级衍射光,在光栅材料与空气的交界面处发生全反射进入波导基底。由于全息感光材料厚度在微米量级,故由全反射引起的横向位移可忽略不计。设全反射角为  $\theta_t$ ,表示衍射光与波导基底法线的夹角。耦出体全息光栅和耦入体全息光栅结构完全相同,不同的是再现光恰好相反,即耦入体全息光栅由 R 照明再现 S,而耦出体全息光栅由 S 照明再现 R。为了推导方便,假设全息感光材料和波导基底的折射率相同,从而由光栅进入波导基底或由波导基底进入光栅的光不发生折射。

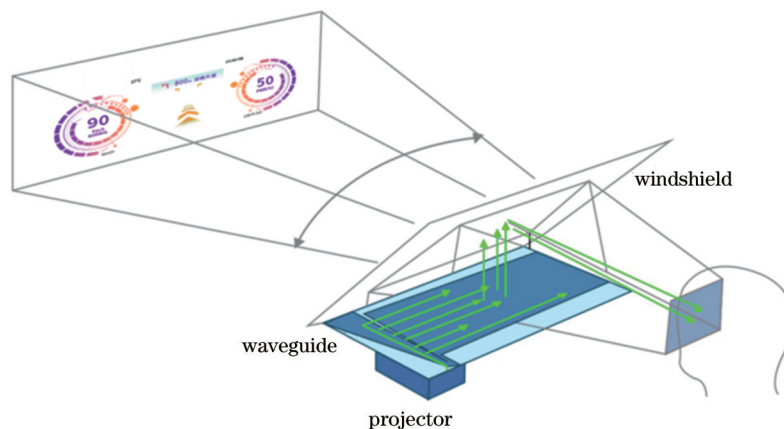


图 1 二维扩瞳波导 AR-HUD 示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two-dimensional pupil expanded waveguide AR-HUD

图 3(a)为体全息光栅参数设计时在矢量球中的初始分布。全息感光材料位于  $k_x O k_y$  平面内,参考光垂直于全息感光材料,矢量为  $\overrightarrow{OB}$ ,定义为  $\mathbf{K}_r$ ,其大小为  $|\mathbf{K}_r| = 2\pi n_m / \lambda = K$ ,方向角  $\theta_r = 0$ ,其中  $\lambda$  为波长,  $n_m$  为全息感光材料的折射率。物光是全息感光材料内全反射传播的光,其与  $k_x$  轴夹角为  $\theta_t$ (大于全息感光材料的

全反射临界角),满足  $\theta_t > \arcsin(1/n_m)$ ,矢量为  $\overrightarrow{OA}$ ,定义为  $\mathbf{K}_s$ ,其大小为  $|\mathbf{K}_s| = 2\pi n_m / \lambda = K$ ,方向角为  $\theta_s = \pi - \theta_t$ 。其中,方向角为光栅矢量与  $k_x$  轴正方向的夹角。矢量  $\overrightarrow{OA}$  和矢量  $\overrightarrow{OB}$  位于  $k_x O k_y$  平面内,体全息光栅矢量为  $\mathbf{K}_g = \mathbf{K}_r - \mathbf{K}_s$ ,其与  $k_x$  轴的夹角为  $\alpha$ 。图

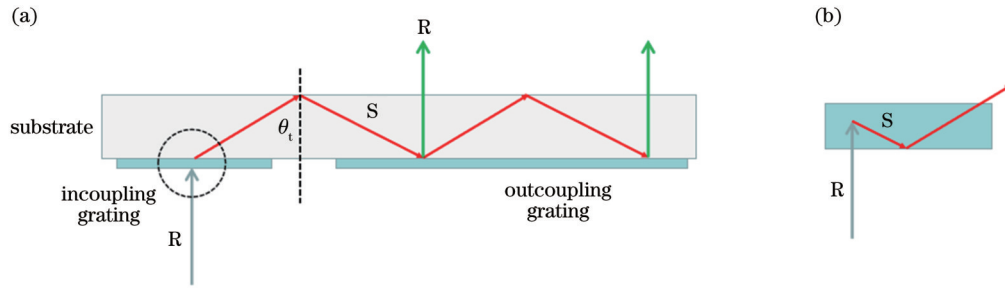


图 2 一维扩瞳体全息光波导示意图。(a)波导结构;(b)局部放大

Fig. 2 Schematic diagram of one-dimensional pupil expanded volume holographic waveguide. (a) Waveguide structure; (b) local amplification

3(b)为  $k_xOk_z$  平面内的矢量分布情况。

第一步,将全息感光材料绕着  $k_y$  轴旋转  $\alpha$ ,使得旋转后的光栅矢量  $K_g$  与  $k_z$  轴平行。

图 4(a)为矢量球中各个矢量的分布。矢量  $\vec{OB}$  旋转后为  $\vec{OB}'$ ,仍定义为  $K_r$ ,其大小为  $|K_r|=2\pi n_m/\lambda=K$ ,方向角为  $\theta_r=\alpha$ 。矢量  $\vec{OA}$  旋转后为矢量  $\vec{OA}'$ ,仍

定义为  $K_s$ ,其大小为  $|K_s|=2\pi n_m/\lambda=K$ ,方向角为  $\theta_s=\pi-\theta_t-\alpha$ 。矢量  $\vec{OA}'$  和矢量  $\vec{OB}'$  仍位于  $k_xOk_z$  平面内。图 4(b)为  $k_xOk_z$  平面内矢量分布情况。旋转之后,  $\vec{OB}'$  与  $k_z$  轴的夹角为  $\alpha$ ,而  $\vec{OA}'$  与  $k_z$  轴负方向的夹角为  $\theta_t-\alpha$ ,且满足  $\alpha=\theta_t-\alpha$ ,故有  $\theta_t=2\alpha$ 。

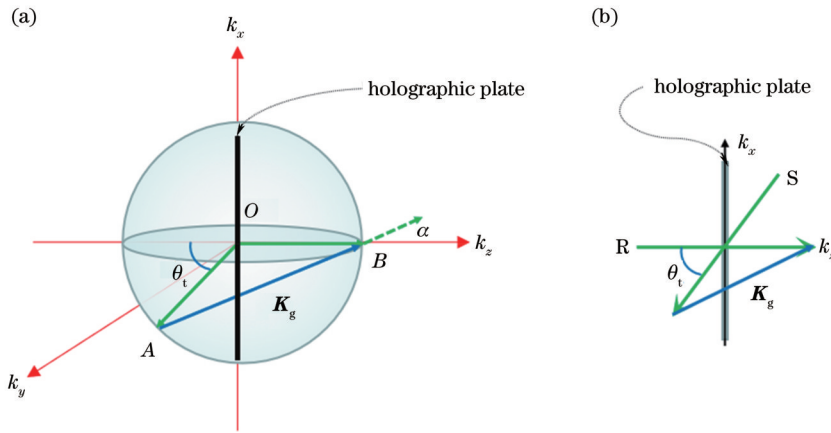


图 3 体全息光栅参数设计矢量的初始分布。(a)  $K$  矢量球中的矢量分布;(b)  $k_xOk_z$  平面中的矢量分布

Fig. 3 Initial vector distribution of volume holographic grating parameters. (a) Vector distribution in  $K$  vector sphere; (b) vector distribution in  $k_xOk_z$  plane

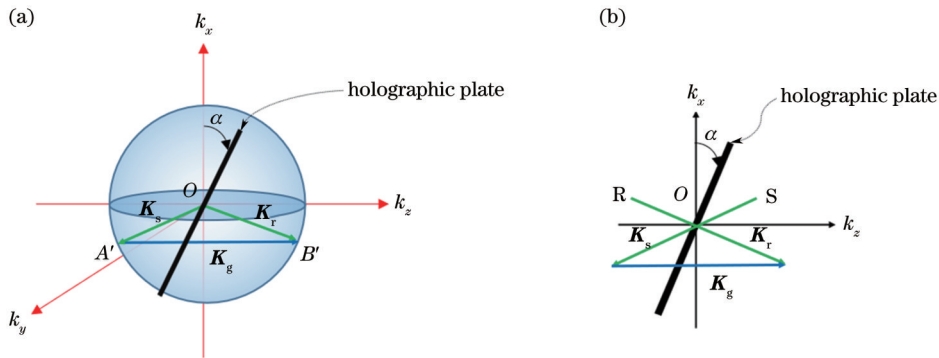


图 4 全息感光材料绕  $k_y$  轴旋转。(a)  $K$  矢量球中的矢量分布;(b)  $k_xOk_z$  平面中的矢量分布

Fig. 4 Holographic photosensitive material rotating around  $k_y$  axis. (a) Vector distribution in  $K$  vector sphere; (b) vector distribution in  $k_xOk_z$  plane

第二步,在矢量球中,将  $K_s$  和  $K_r$  组成的平面绕  $k_z$  轴旋转  $360^\circ$ ,其矢量顶点形成两个圆形的轨迹,在该圆

形轨迹上的任意一对  $K_s$  和  $K_r$  干涉曝光形成的光栅完全相同,这就是光栅筒并<sup>[16]</sup>,如图 5 所示。

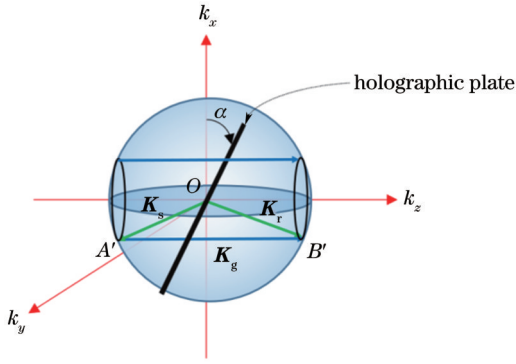


图 5 光栅筒并获取等效矢量集合

Fig. 5 Grating degeneracy for obtaining equivalent vector set

第三步,选择一旋转平面,分析此时物光矢量  $\mathbf{K}_s$  和参考光矢量  $\mathbf{K}_r$  与全息感光材料法线的夹角。

如图 6 所示,矢量  $\overrightarrow{OC}$  和矢量  $\overrightarrow{OD}$  是由  $\overrightarrow{OA'}$  和  $\overrightarrow{OB'}$  组成的平面绕着  $k_z$  轴旋转  $\beta$  形成的,此时全息感光材料表面法线为  $EB'$ ,  $\overrightarrow{OD}$  与  $\overrightarrow{OB'}$  方向的夹角  $\angle DOB'$  为参考光与法线的夹角,  $\overrightarrow{OC}$  与  $\overrightarrow{OE}$  的夹角  $\angle COE$  为物光与法线的夹角,经过一系列的几何推导,有

$$\angle DOB' = \arccos \left[ 1 - \cos^2 \left( \frac{\pi - \theta_i}{2} \right) (1 - \cos \beta) \right], \quad (1)$$

$$\angle COE = \arccos \left\{ 1 - \left[ 2 \sin^2(\theta_i - \alpha) - \cos^2 \left( \frac{\pi - \theta_i}{2} \right) (1 - \cos \beta) \right] \right\}. \quad (2)$$

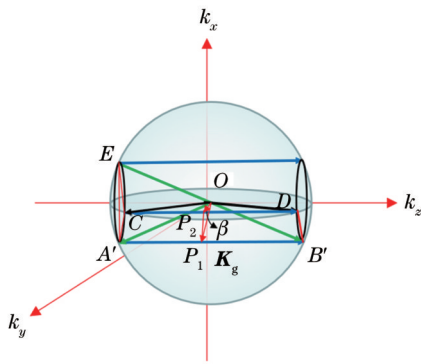


图 6 物光与参考光关于全息感光材料法线夹角的推导

Fig. 6 Derivation of angles between object light and reference light to normal of holographic material

$\theta_i$  和  $\alpha$  已知,通过选择合适的  $\beta$  可使得  $\angle COE$  和  $\angle DOB'$  均小于感光材料全反射临界角  $\sin(1/n_m)$ , 则用于记录的两束光均可从空气中折射进入全息感光材料中曝光,从而实现体全息光栅非反射条件下的制造。

根据式(1)和式(2),可求出空气中入射时,参考光与全息感光材料法线的夹角  $\theta_{ra}$  和物光与全息感光材料的夹角  $\theta_{sa}$  分别为

$$\theta_{ra} = \arcsin(n_m \sin \angle DOB'), \quad (3)$$

$$\theta_{sa} = \arcsin(n_m \sin \angle COE). \quad (4)$$

第四步,令  $\angle COE = \angle DOB'$ , 有

$$\beta = \arccos \left[ 1 - \frac{\sin^2(\theta_i - \alpha)}{\cos^2 \left( \frac{\pi - \theta_i}{2} \right)} \right]. \quad (5)$$

将  $\theta_i = 2\alpha$  代入式(5)中,有  $\beta = 90^\circ$ 。此时,物光矢量  $\overrightarrow{OC}$  和参考光矢量  $\overrightarrow{OD}$  恰好位于  $k_yOk_z$  平面内,且与法线的夹角大小完全相同,为对称入射的情形。定义  $k_yOk_z$  为光学平台所在平面,即全息光栅曝光时物光和参考光所在的平面。

第五步,  $\overrightarrow{OC}$  和  $\overrightarrow{OD}$  为材料内部物光和参考光的矢量,通过三维空间的折射定理可求出从空气入射到全息材料的物光矢量和参考光矢量。

对于参考光  $\overrightarrow{OD}$ , 全息感光材料的法向矢量和材料中的参考光矢量分别为

$$\mathbf{N}_1 = [\sin \alpha \quad 0 \quad -\cos \alpha], \quad (6)$$

$$\overrightarrow{OD} = [0 \quad \sin \alpha \quad \cos \alpha], \quad (7)$$

则入射光矢量  $L_1$  (空气中参考光入射矢量) 可以表示为

$$\mathbf{L}_1 = [-\delta \sin \alpha \quad e \sin \alpha \quad (e + \delta) \cos \alpha], \quad (8)$$

式中:  $e = n_m/n_a = n_m$ , 其中  $n_a = 1$  为空气折射率;  $e$  为相对折射率;  $\delta$  为仅与入射光与法线夹角大小和折射率有关的量,对称入射时对物光和参考光而言是相同的,可表示为

$$\delta = \cos |\theta_{ra}| - e \sqrt{1 - \frac{1 - \cos^2 |\theta_{ra}|}{e^2}}. \quad (9)$$

对于物光  $\overrightarrow{OC}$ , 全息感光材料的法向矢量和材料中的物光矢量分别为

$$\mathbf{N}_2 = [-\sin \alpha \quad 0 \quad \cos \alpha], \quad (10)$$

$$\overrightarrow{OC} = [0 \quad \sin \alpha \quad -\cos \alpha], \quad (11)$$

则入射光矢量  $L_2$  (空气中物光入射矢量) 可以表示为

$$\mathbf{L}_2 = [\delta \sin \alpha \quad e \sin \alpha \quad -(e + \delta) \cos \alpha]. \quad (12)$$

式(8)和式(12)即为空气中入射的物光和参考光的方向矢量,并且可知这两个照明光矢量组成的平面并不与  $k_yOk_z$  平面平行,在  $k_x$  方向上存在分量  $-\delta \sin \alpha$  和  $\delta \sin \alpha$ 。  $k_y$  和  $k_z$  方向上的分量满足对称关系。  $k_y$  分量相同故不进行改变,将  $L_1$  和  $L_2$  绕着  $k_y$  轴旋转(全息感光材料绕  $k_y$  轴旋转),旋转角设置为  $\gamma$ 。

旋转后的矢量分别表示为

$$\mathbf{L}'_1 = [-\delta \sin \alpha \cos \gamma + (e + \delta) \cos \alpha \sin \gamma \quad e \sin \alpha \quad \delta \sin \alpha \sin \gamma + (e + \delta) \cos \alpha \cos \gamma], \quad (13)$$

$$L_2' = [\delta \sin \alpha \cos \gamma - (e + \delta) \cos \alpha \sin \gamma \quad e \sin \alpha \quad -\delta \sin \alpha \sin \gamma - (e + \delta) \cos \alpha \cos \gamma], \quad (14)$$

矢量  $L_1'$  和  $L_2'$  为  $L_1$  和  $L_2$  绕  $k_y$  轴旋转后形成的矢量。令两个矢量的  $k_z$  分量均为 0, 可得到

$$\gamma = \arctan\left(\frac{\delta}{e + \delta} \tan \alpha\right), \quad (15)$$

即旋转  $\gamma$  角度之后, 两个矢量在  $k_z$  方向不再有分量, 此时入射参考光和入射物光构成的平面位于  $k_x O k_z$  内。

照明光与  $k_y$  方向的夹角由矢量分量求得, 即

$$\theta_{11} = \arctan \frac{\delta \sin \alpha \sin \gamma + (e + \delta) \cos \alpha \cos \gamma}{e \sin \alpha}, \quad (16)$$

$$\theta_{12} = -\theta_{11}. \quad (17)$$

上述非全反射条件下曝光方法可总结为: 1) 空气中入射的物光和参考光均位于  $k_x O k_z$  平面内; 2) 空气中入射的物光和参考光入射方向关于  $k_y$  轴对称, 由式 (16) 和式 (17) 决定; 3) 全息感光材料 (全息干板) 绕  $k_y$  轴旋转  $\alpha + \gamma$ 。

### 3 实验、结果和分析讨论

#### 3.1 实验及结果

全息曝光时使用银盐感光材料, 折射率与玻璃基底折射率相近 (约为 1.52), 设置全反射角  $\theta_c$  为  $55^\circ$ , 将上述参数代入式 (1) 和式 (2) 中得到物光和参考光随着旋转角度  $\beta$  变化时与全息感光材料法线的夹角的变化情况, 如图 7 所示。可以发现, 随着  $\beta$  的增大, 物光与全息感光材料表面法线的夹角逐渐减小, 而参考光与全息感光材料表面法线的夹角逐渐增大。当这两个角度均小于全反射临界角  $41.14^\circ$  时, 可从空气中折射进入全息感光材料而无需耦合棱镜。从图 7 还可以发现, 当旋转角度为  $\beta \in [81^\circ, 99^\circ]$  时, 非全反射条件下的曝光条件成立。当  $\beta = 90^\circ$  时, 物光和参考光恰好满足对

称入射的情形, 对应空气中入射角度为  $\theta_{11} = -\theta_{12} = 45.42^\circ$ , 此时  $\alpha + \gamma = 60.92^\circ$ , 物光与参考光关于全息感光材料法线的夹角均为  $69.73^\circ$ 。

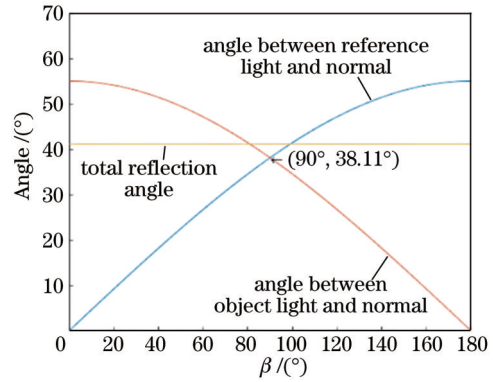


图 7 物光和参考光与全息感光材料法线的夹角变化情况  
Fig. 7 Change in angles between object light and reference light to normal of holographic material

基于上述曝光参数, 设计并搭建了大幅面体全息光波导自动化曝光系统, 该系统中使用两个二维移动台的组合来进行拼接曝光, 位移台的行程决定了目前所能实现的最大波导尺寸为  $200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$ 。作为演示, 所实现的光波导的设计图和实际制造的光波导如图 8 所示, 尺寸为  $130 \text{ mm} \times 270 \text{ mm}$ , 包含耦合和耦出光栅。二维移动台沿着光波导横向和纵向方向带动全息干板移动, 每次曝光的尺寸为  $30 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ , 总共拼接 16 次, 耦合和耦出光栅之间的间隔设置为  $20 \text{ mm}$ , 全息干板的厚度为  $2 \text{ mm}$ , 通过光学胶水贴合在一个厚度为  $7 \text{ mm}$  的玻璃基底上。曝光使用的激光器为波长为  $532 \text{ nm}$  的单纵模半导体激光器, 功率为  $0.5 \text{ W}$ 。

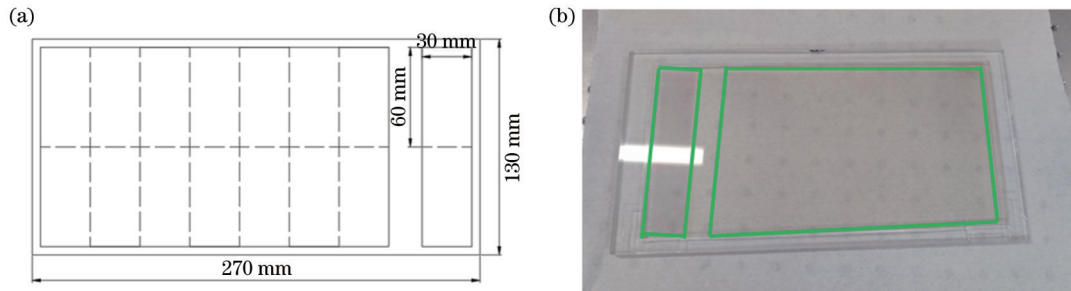


图 8 设计的全息光波导结构和实际加工的全息光波导。(a) 设计的全息光波导结构; (b) 实际加工的全息光波导  
Fig. 8 Structure of designed holographic optical waveguide and actual processed holographic optical waveguide. (a) Structure of designed holographic optical waveguide; (b) actual processed holographic optical waveguide

体全息光波导显示时, 使用了一个分辨率为  $1920 \text{ pixel} \times 1080 \text{ pixel}$  的投影仪作为图像源, 在投影仪外部放置了两个透镜对投影距离和视场角进行调节, 投影光直接打到耦合光栅中, 并被耦合到波导内传播, 再从耦合光栅耦合出。图 9(a) 为在暗环境下, 图像

光通过耦合光栅耦合入光波导的传输情况, 可以看到一条光全反射传播的轨迹, 说明所制造的大幅面体全息光波导能够实现图像光的耦合、传输和耦合出。图 9(b) 和图 9(c) 为通过该体全息光波导拍摄的实际增强现实显示效果, 能够清晰地看到环境图像和显示的导航



图 9 全息光波导和增强现实显示效果。(a)图像光在波导内传输;(b)(c)增强现实显示效果

Fig. 9 Holographic optical waveguide and augmented reality display results. (a) Image light transmitting in waveguide; (b)(c) augmented reality display results

图,实现了预期目标。

### 3.2 分析及讨论

给出了反射式体全息光栅设计参数的具体计算方法,得到了非全反射条件下曝光的参数,但对于透射式体全息光栅波导而言,可设置物光和参考光参数进行计算。不同的是,物光和参考光与全息感光材料法线的夹角会随着 $\beta$ 的增加而增加,不能同时两个光均满足非全反射条件,且转折光栅设计的情况类似,故均不能在非全反射条件下等效曝光制造。虽然所提方法实现的是一维扩瞳体全息光波导,但是对于二维扩瞳体全息光波导,其可由两个一维扩瞳体全息光波导的组合来实现,从而所提方法也可应用于二维扩瞳体全息光波导的制造,极大地降低了应用于车载AR-HUD的大幅面体全息光波导的制造难度。

仅给出了单波长记录的情形,但通过对推导的公式的分析可知,初始物光方向、初始参考光方向和材料折射率确定后,其他的推导过程是与波长无关的,即上述的曝光参数可同时满足红、绿和蓝三色波导的制造,通过组合可实现全彩大幅面体全息光波导AR-HUD。

理论计算时为了方便起见,假设全息感光材料和波导基底的折射率相同,当两者折射率不同时,全息感光材料和波导基底之间存在一定的折射率差,需要在计算时予以考虑。若要保证曝光时的对称性关系,可用前后两个波导基底夹持全息感光材料,形成所谓的“三明治结构”进行曝光,用于制作大幅面体全息光波导。

实现了非全反射条件下体全息波导的曝光技术,并未产生新型的体全息光栅,而是实现了等效光栅的制造方法,最核心的内容为理论的推导并给出来干涉时物光和参考光的角度与空间坐标关系,根据给出的曝光参数可实现光路的搭建。体全息光波导的角度带宽、波长带宽和透过率等参数与传统方法制造的体全息光波导并无不同。进行体全息波导曝光时,通过控制耦出光栅沿着全反射方向上的曝光时间对衍射效率进行了一定的控制,从而保证了耦出图像的亮度均匀。

## 4 结 论

基于光栅简并理论和体全息光栅应用于大幅面体全息光波导的实际情况,设计并推导了非全反射条件下的等效曝光方法,搭建了一套全自动化拼接曝光系统,并实现了尺寸为 $130\text{ mm} \times 270\text{ mm}$ 的大幅面体全息光波导制造,获得了初步的显示效果。该技术的突破为大幅面体全息光波导在车载AR-HUD领域中的量产和应用打下了良好的基础。

### 参 考 文 献

- [1] 孔祥旭, 薛常喜. 基于双图像生成器的双焦面抬头显示系统光学设计[J]. 光学学报, 2022, 42(14): 1422003.  
Kong X X, Xue C X. Optical design of dual-focal-plane head-up display based on dual picture generation units[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(14): 1422003.
- [2] Karar V, Ghosh S. Estimation of tunneling effect caused by luminance non-uniformity in head-up displays[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(1): 013301.
- [3] Gu L, Cheng D W, Liu Y, et al. Design and fabrication of an off-axis four-mirror system for head-up displays[J]. Applied Optics, 2020, 59(16): 4893-4900.
- [4] Qin Z, Lin S M, Luo K T, et al. Dual-focal-plane augmented reality head-up display using a single picture generation unit and a single freeform mirror[J]. Applied Optics, 2019, 58(20): 5366-5374.
- [5] 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.
- [6] Lee J H, Yanusik I, Choi Y, et al. Automotive augmented reality 3D head-up display based on light-field rendering with eye-tracking[J]. Optics Express, 2020, 28(20): 29788-29804.
- [7] Takaki Y, Urano Y, Nishio H. Motion-parallax smoothness of short-, medium-, and long-distance 3D image presentation using multi-view displays[J]. Optics Express, 2012, 20(24): 27180-27197.
- [8] Teich M, Schuster T, Leister N, et al. Real-time, large-depth holographic 3D head-up display: selected aspects[J]. Applied Optics, 2022, 61(5): B156-B163.
- [9] 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.
- [10] Wei S L, Fan Z C, Zhu Z B, et al. Design of a head-up display based on freeform reflective systems for automotive applications [J]. Applied Optics, 2019, 58(7): 1675-1681.
- [11] 安喆, 徐熙平, 杨进华, 等. 光学透射式AR-HUD系统的标定方法研究[J]. 光子学报, 2019, 48(4): 0412002.  
An Z, Xu X P, Yang J H, et al. Calibration method of optical

- transmission AR-HUD system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(4): 0412002.
- [12] Bigler C M, Mann M S, Blanche P A. Holographic waveguide HUD with in-line pupil expansion and 2D FOV expansion[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(34): G326-G331.
- [13] 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.
- [14] Yanusik I, Kalinina A, Morozov A, et al. Pupil replication waveguide system for autostereoscopic imaging with a wide field of view[J]. *Optics Express*, 2021, 29(22): 36287-36301.
- [15] 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.
- [16] 袁泉, 陶世荃, 江竹青, 等. 体光栅的垂直选择角和光栅简并[J]. *中国激光*, 1997, 24(4): 337-341.
- Yuan Q, Tao S Q, Jiang Z Q, et al. The vertical angular selectivity and grating degeneracy of volume holographic gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1997, 24(4): 337-341.

## Large-Scale Volume Holographic Optical Waveguide for Automotive Augmented Reality Head-Up Display

Meng Daoyang, Yang Xin\*, Song Qiang, Ma Guobin

*Shenzhen Lochn Optics Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China*

### Abstract

**Objective** Automotive intelligence is an unstoppable process, and as a key display system in the intelligent cockpit, augmented reality head-up display (AR-HUD) is becoming more and more important. AR-HUD presents the vehicle's sensor information, driving speed information, navigation information, and other enhanced image information integrated with the real environment to the driver, thus improving the driving experience and safety. Large field of view and eye box are very important for AR-HUD. However, for an AR-HUD system based on traditional geometric imaging methods, AR-HUD systems with a large field of view and large eye box require a larger-scale volume of the optical system, which is determined by the Rach invariant of the imaging system. The only display method that can break the limitation of Rach invariant is optical waveguide display technology, including relief grating optical waveguide, geometric optical waveguide, and volume holographic optical waveguide. The relief grating optical waveguide has high production cost and is difficult to be used for large-scale volume optical waveguide displays, while the geometric optical waveguide has low production efficiency and is not suitable for large-scale volume optical waveguide displays. Volume holographic optical waveguides are manufactured by laser exposure, which has the potential advantage to realize the display of large-scale volume waveguides. However, the preparation of traditional volume holographic optical waveguides requires the use of coupling prisms. Filling refractive index matching solution between the holographic photosensitive material and the coupling prisms will lead to troublesome manufacturing problems and is not conducive to automatic manufacturing.

**Methods** In this paper, a complete theoretical derivation method of exposure volume holographic grating under the condition of non-total reflection is realized. Starting from the exposure parameters of holographic optical waveguides, this paper gives the parameter design method of large-scale volume holographic optical waveguide exposure under non-total reflection conditions based on grating degeneracy theory in the vector sphere. It is concluded that the transmitted-volume holographic grating and the transition grating used for two-dimensional pupil expansion are not valid to be exposed under the condition of non-total reflection, and the reflective volume holographic grating waveguides can only be manufactured under the condition of non-total reflection. Based on the theoretical derivation, a fully automatic splicing and exposure system of volume holographic optical waveguides is designed and built, which successfully realizes the manufacturing of large-scale volume holographic optical waveguides.

**Results and Discussions** Based on the exposure angle parameters obtained by theoretical calculation, a large-scale volume holographic optical waveguide splicing exposure system is built, and a large-scale volume holographic optical waveguide with a size of 130 mm × 270 mm is fabricated through 18 splicing. The projector is used as the image source for display, and the AR display results are obtained. Although we realize monochrome display, the exposure angle parameters are wavelength independent, which means that this set of parameters can be used to make three primary color waveguides using three color lasers for color display. In addition, a two-dimensional pupil expansion waveguide can be composed of two one-dimensional pupil expansion waveguides, so the method in this paper can be applied to the development of a two-dimensional pupil expansion waveguide for AR-HUD applications.

**Conclusions** Starting from the exposure parameters of holographic optical waveguides, this paper gives the parameter design method of large-scale volume holographic optical waveguide exposure under non-total reflection conditions based on grating degeneracy theory in the vector sphere. A large-scale volume holographic optical waveguide automatic exposure system is designed and built. The large-scale volume holographic optical waveguide with a size of 130 mm×270 mm is demonstrated, and the AR display results are obtained. The successful breakthrough of this technology has laid a solid foundation for the mass production and wide application of large-scale volume holographic optical waveguide AR-HUD.

**Key words** imaging systems; augmented reality; head-up display; volume holographic optical waveguide; automated exposure system