

## 基于双重体光栅的波导显示系统视场扩展研究

王闯, 沈忠文, 翁一士, 张宇宁\*, 王保平

东南大学电子科学与工程学院信息显示与可视化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210096

**摘要** 体全息波导显示系统的视场角受限于光栅衍射响应带宽, 无法满足人们对大视场显示的需求。为扩展波导显示视场角, 基于严格耦合波理论模型分析了波导显示视场角的影响因素, 进一步提出了一种可有效扩展衍射响应带宽的双重体光栅波导结构, 通过变角度分次曝光法完成光栅制备, 并搭建全息波导显示系统。成像结果表明, 该显示系统的水平和竖直射场角可分别扩展至  $33.4^\circ$  和  $22.6^\circ$ , 对角线视场角为  $40.3^\circ$ 。

**关键词** 光学器件; 全息波导; 视场角; 双重体光栅

中图分类号 O438.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202242.0723001

## Field-of-View Expansion of Waveguide Display System with Double-Layer Volume Grating

Wang Chuang, Shen Zhongwen, Weng Yishi, Zhang Yuning\*, Wang Baoping

*International Joint Research Laboratory for Information Display and Visualization,**School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China*

**Abstract** The fields-of-view of volume holographic waveguide display systems are often limited by the grating diffraction response bandwidth, which still cannot meet people's needs for large field-of-view display. In order to expand the field-of-view of the waveguide display, the influencing factors of the field-of-view of the waveguide display are analyzed based on the strictly coupled wave theory model, and a double-layer volume grating waveguide structure that can effectively expand the diffraction response bandwidth is proposed. The grating is prepared by the variable-angle fractional exposure method, and the holographic waveguide display system is built. The imaging results show that the horizontal and vertical fields-of-view of the display system can be expanded to  $33.4^\circ$  and  $22.6^\circ$  respectively, and the diagonal viewing angle is  $40.3^\circ$ .

**Key words** optical devices; holographic waveguide; field-of-view; double-layer volume grating

## 1 引言

波导显示系统主要由微像源、准直系统和耦合元件组成<sup>[1-3]</sup>。其中, 耦合元件作为全息波导显示系统的核心元件, 对成像质量、视场角(FOV)和清晰度起到至关重要的作用。目前, 可作为耦合元件的器件有自由曲面元件<sup>[4]</sup>、表面浮雕光栅<sup>[5]</sup>、偏振体光栅<sup>[6]</sup>和体全息光栅<sup>[7]</sup>等。体全息光栅作为一种耦合元件, 在满足布拉格条件的情况下, 其具有极高的单级衍射效率、高角度和波长选择性, 以

及高环境光透过率等优点<sup>[8-9]</sup>, 在近眼显示领域有着巨大的应用前景。然而, 其高角度和波长选择性会限制波导系统成像的 FOV。较窄的 FOV 将导致较小的成像画面, 进而无法给使用者带来沉浸式的感官体验。在扩大体全息波导系统 FOV 方面, Wu 等<sup>[10]</sup>提出了叠加体全息光栅衍射角度带宽的方法, 并用光学仿真结果证实了该方法可有效扩大全息波导的 FOV。Han 等<sup>[11]</sup>提出了将自由曲面作为准直光学系统、将复合光栅作为耦合元件来扩大 FOV 的方法, 并对其进行了理论分

收稿日期: 2021-09-08; 修回日期: 2021-09-29; 录用日期: 2021-10-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2242021K1G005)、国家自然科学基金(62105060)

通信作者: \*zyn@seu.edu.cn

析,实现了对角线 FOV 为  $45^\circ$  的单色全息波导系统设计。Shi 等<sup>[12]</sup>在此基础上利用 6 层体全息光栅设计了对角线 FOV 为  $39.5^\circ$  的彩色全息波导系统。

目前,虽然国内外研究人员已提出通过叠层体光栅或复合全息光栅等技术方案来扩展波导显示 FOV,但是大多是理论分析。本文利用严格耦合波理论搭建了基于有机发光半导体(OLED)微像源光谱的波导显示 FOV 模型,通过设计双重体光栅结构来提升波导光栅的衍射响应带宽,搭建实验曝光

光路,通过变角度分次曝光法制备了可有效扩大波导显示 FOV 的双重体光栅,并通过实验验证了该方案的可行性。

## 2 单层体光栅的波导显示 FOV 分析

在全息波导显示系统中,微像源发出的光经过准直系统准直进入耦合光栅并发生衍射,经过衍射后的光线在平板波导介质内发生内全反射传播后到达出耦合光栅。最后,光线被出耦合光栅从波导中耦出并进入人眼<sup>[13]</sup>,如图 1 所示。

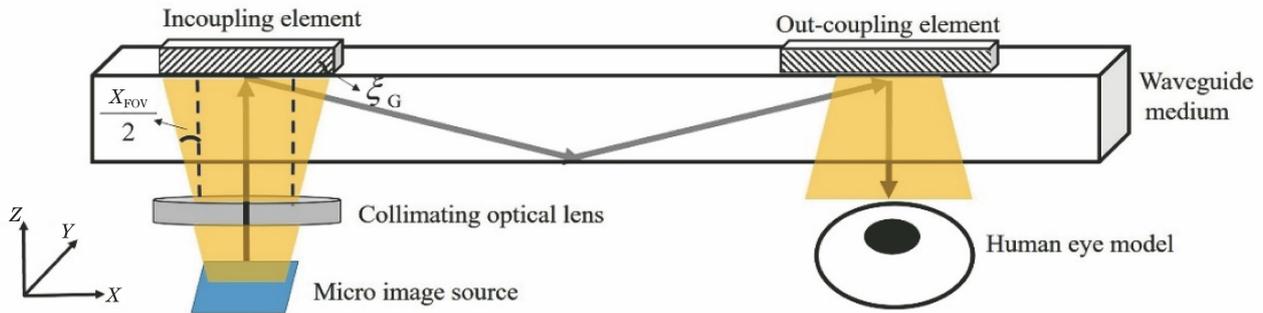


图 1 全息波导显示系统

Fig. 1 Holographic waveguide display system

在设计全息波导显示系统时,为了使经过入耦合光栅的光线能够在全息波导内发生全反射,光栅的衍射角度需要满足平板波导的内全反射条件。以反射体光栅为例,光栅倾角为  $\xi_G$ ,像源的水平 FOV 为  $X_{FOV}$ ,平板波导的折射率为  $n$ ,三者应该满足

$$\arcsin \frac{1}{n} \leq 2\xi_G + \frac{X_{FOV}}{2}. \quad (1)$$

由耦合波理论<sup>[14-15]</sup>研究发现,光栅的角度和波长选择性与光栅方向有关。以图 1 中的相对坐标系为参考,当光栅矢量平行于 Z-X 平面时,体全息光栅在像源横向视场 X 方向具有较高的波长和角度选择性,在纵向视场 Y 方向上的波长和角度选择性较低,而较高的波长和角度选择性意味着较小的 FOV<sup>[9]</sup>。由此可以看出,限制波导显示 FOV 的主要因素是体全息光栅在像源水平视场 X 方向的角度和波长带宽。本文采用单绿色 OLED 面板作为全息波导显示系统的微像源。同时,由于反射式体光栅比透射式体光栅具有更大的角度响应带宽,因此采用反射体光栅作为耦合元件来制备光波导更具优势。由 Qwave 光纤光谱仪测得的 OLED 像源光谱曲线如图 2 所示,其中 ADC 为模数转换器。

为了保证系统的整体发光效率,用严格耦合波理论<sup>[16-17]</sup>计算了中心波长为 524 nm、折射率调制度(RIM)为 0.06 的反射体全息光栅随入射角度和入

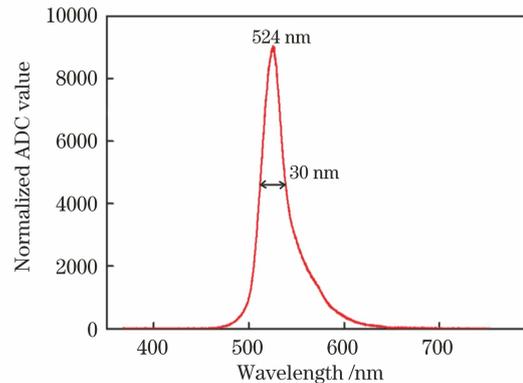


图 2 OLED 像源光谱曲线

Fig. 2 Spectral curve of OLED image source

射波长下的衍射效率曲线。同时,基于其和 OLED 像源光谱曲线重叠的角度带宽计算波导显示系统的 FOV。单层体光栅的波导显示 FOV 仿真模型如图 3 所示。可以发现,重叠部分的入射角度响应范围为  $-5^\circ \sim 5^\circ$ ,该角度是光线从波导介质中射入光栅的角度,在仿真中波导介质的折射率被设置为与光栅材料的折射率相同,均为 1.52。考虑到像源光线是由空气入射到波导介质中的,由折射定律可以计算其对应的入射角度范围为  $-7.6^\circ \sim 7.6^\circ$ ,即对应于空气中水平方向上  $15.2^\circ$  的 FOV。图 3 中 M 为光栅衍射效率和像源亮度的相对值,标出的矩形区域为全息波导可显示的入射角度和光谱范围。

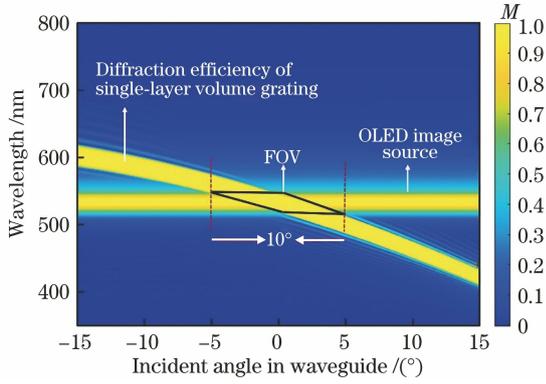


图 3 单层体光栅的波导显示 FOV 仿真模型  
Fig. 3 Simulation model of FOV of waveguide display of single-layer volume grating

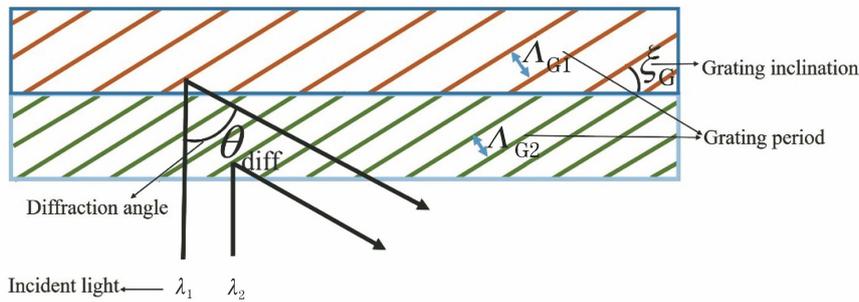


图 4 双重体光栅结构示意图  
Fig. 4 Structural diagram of double-layer volume grating

$$\theta_{\max} = \arctan \frac{P_{\text{in}}}{2d}, \quad (3)$$

式中： $P_{\text{in}}$  是准直系统在水平  $X$  方向上的出瞳直径，这里将其设计为 10 mm； $d$  是波导介质的厚度，其值为 1 mm。

光栅的衍射角  $\theta_{\text{diff}}$  应满足

$$\theta_{\min} \leq \theta_{\text{diff}} = 2\xi_G + \Delta\theta \leq \theta_{\max} \quad (4)$$

式中： $\Delta\theta$  为入射光角度。在实际制备中，平板介质的折射率为 1.60，根据(2)、(3)式可以计算出最小传播角度  $\theta_{\min}$  和最大传播角度  $\theta_{\max}$  分别为  $41.14^\circ$  和  $78.69^\circ$ 。

为了使全息波导显示空气中水平  $30^\circ$  的 FOV，双重体光栅在波导介质中的衍射角度带宽范围应为  $-9.8^\circ \sim 9.8^\circ$ 。本文根据严格耦合波理论对双重体光栅的衍射效率分布进行了仿真，为了保证空气中水平  $30^\circ$  的 FOV 下光线在平板介质中的传播角度满足(4)式，将双重体光栅的光栅倾角设计为  $30^\circ$ 。经过仿真发现，当双重体光栅的中心波长分别为 520 nm 和 545 nm 时能满足空气中水平  $30^\circ$  的 FOV 的设计要求。仿真结果如图 5 所示。

由仿真结果可以看出，需保证双重体光栅在

### 3 双重体光栅的设计与仿真

为了解决单层体光栅全息波导显示系统的 FOV 较小的问题，设计双重体光栅结构来叠加衍射带宽，从而增大 FOV<sup>[11-12,18-19]</sup>。双重体光栅结构如图 4 所示。

光线在平板波导介质中的传播角度有限，最小传播角度由平板波导介质的折射率决定

$$\theta_{\min} = \arcsin \frac{1}{n}. \quad (2)$$

最大传播角度的设计需要保证出瞳的连续性，其满足

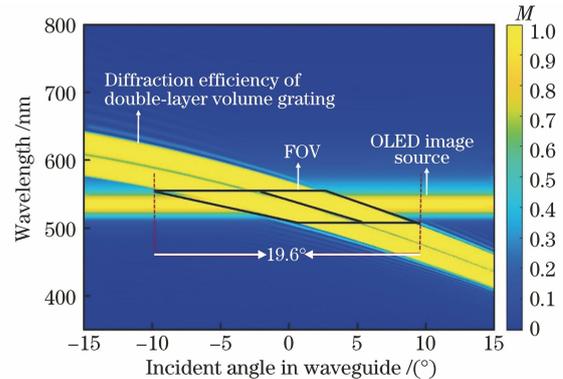


图 5 双重体光栅的波导显示 FOV 仿真模型  
Fig. 5 Simulation model of FOV of waveguide display of double-layer volume grating

OLED 像源光谱内的带宽没有重叠部分，否则由布拉格条件可知，同一束光线经过每一重光栅对应的衍射角度将会不相同，成像画面显示会有一部分的重影。同时，也需要保证双重体光栅的衍射带宽不存在间隔，否则可能会出现显示画面缺失的现象。通过计算双重体光栅的衍射带宽和像源光谱带宽重叠部分对应的入射角度可以看出，该结构能够有效扩大波导显示的 FOV，满足设计要求。

#### 4 双重体光栅的全息波导设计和制备

在得到双重体光栅结构下各个光栅的光学参数后,设计曝光光路来制备光栅。所使用激光器的中心波长为 532 nm,设计光栅的倾角为 30°。根据矢量圆分析图<sup>[9]</sup>可以计算曝光光路中参考光和物光之间的夹角,分别制备中心波长为 520 nm 和 545 nm 的光栅。矢量圆分析图如图 6 所示。

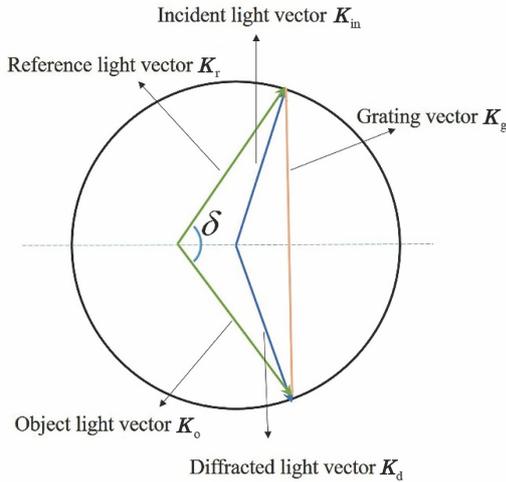


图 6 矢量圆分析图

Fig. 6 Vector circle analysis diagram

参考光矢量  $\mathbf{K}_r$  和物光矢量  $\mathbf{K}_o$  的大小为

$$|\mathbf{K}_r| = |\mathbf{K}_o| = \frac{2n\pi}{\lambda_{\text{rec}}}, \quad (5)$$

式中: $\lambda_{\text{rec}}$  为记录光波长。

光栅矢量  $\mathbf{K}_g$  等于参考光矢量和物光矢量之和,由此可以计算出光栅矢量大小为

$$|\mathbf{K}_g| = 2 \times \frac{2n\pi}{\lambda_{\text{rec}}} \sin \frac{\delta}{2}, \quad (6)$$

式中: $\delta$  为参考光和物光之间的夹角。

根据图 7 中几何关系,可得

$$\delta = \theta_r + \theta_o, \quad (7)$$

式中: $\theta_r$ 、 $\theta_o$  分别为参考光矢量、物光矢量与光栅记录平面的夹角。

当入射光垂直射向光栅记录平面时,光栅衍射角满足

$$\theta_d = \theta_r - \theta_o. \quad (8)$$

当入射光和再现光满足布拉格条件时,有

$$|\mathbf{K}_g| = 2 \times \frac{2n\pi}{\lambda_{\text{in}}} \sin \left( \frac{\pi - \theta_d}{2} \right), \quad (9)$$

式中: $\lambda_{\text{in}}$  为入射光波长。

通过(6)~(9)式可以计算出衍射角  $\theta_d$  为 60° 时参考光光路、物光光路与光栅记录平面的夹角,如

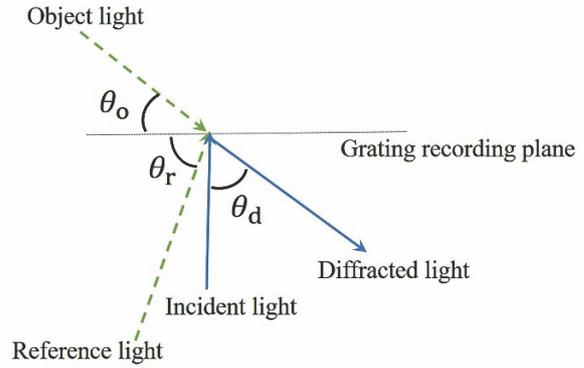


图 7 再现光路示意图

Fig. 7 Schematic diagram of reproduction light path

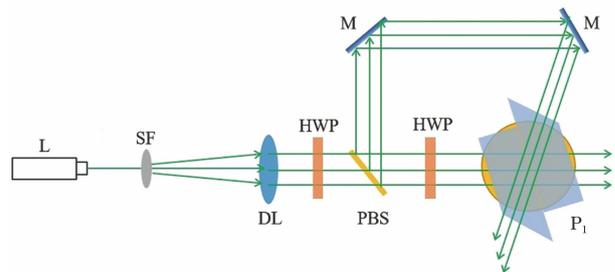
表 1 所示。

表 1 双重光栅 G1、G2 的物光和参考光相对光栅记录平面的角度

Table 1 Angles of object light and reference light of double-layer volume gratings G1 and G2 relative to grating recording plane

Grating	$\theta_o / (^\circ)$	$\theta_r / (^\circ)$
G1	17.7	77.7
G2	32.4	92.4

图 8 所示为本实验的曝光光路图。光束首先从激光器中射出,经空间光滤波器扩束,接着经透镜准直,准直光线经过第一片半波片后被分光棱镜分成两束出射方向呈 90° 夹角的 P 光和 S 光,通过第二片半波片后 P 光被全部转变为 S 光,这样就可通过这两个半波片保证物光和参考光为 S 光且二者的光强比为 1:1。



L: laser; SF: spatial filter; HWP: half wave plate; M: mirror; P1: prism; PBS: polarization beam splitter; DL: double-glued achromatic lens

图 8 曝光光路图

Fig. 8 Diagram of exposure light path

本文采用变角度分次曝光法来制备光栅 G1 和 G2。制备流程如图 9 所示,首先根据制备 G1 的光路要求调节参考光和物光的夹角以对全息干板进行曝光。其中,全息干板的厚度为 1 mm,由平板波导介质和感光材料组成,平板波导介质是折射率为 1.6 的光学玻璃,感光材料为本课题组自主研发的一种高 RIM 的丙烯酸酯光致聚合物<sup>[20]</sup>。在曝光完成后,将感光材料放在暗室中静置一段时间,这一过

程称为暗反应阶段,该阶段可以使材料组分进行更充分的反应。然后,对其紫外(UV)曝光以固定光栅的基本结构。为了更进一步地提升光栅的衍射效

率,还需要将其放在恒温烘箱中进行烘焙和进一步的固化处理。类似地,调节参考光和物光的夹角以对 G2 进行曝光,其后处理过程与 G1 相同。

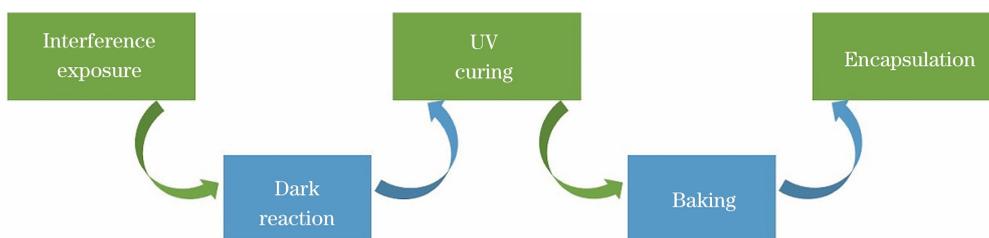


图 9 光波导制备流程

Fig. 9 Preparation process of optical waveguide

受当前实验设备精度限制,在制备中难以控制 G1 和 G2 光栅的表面周期完全相同。光线串扰示意图如图 10 所示。可以发现,当 G1 和 G2 完全贴合时,双重体光栅的衍射效率曲线重叠部分对应的像源

光线经过入耦合光栅时向不同方向衍射。当两束衍射光线经波导介质传播到出耦合光栅时,每一束光线在经过 G1、G2 光栅后会产生两束不同方向的衍射光线,此时人眼接收到的成像画面将会出现重影。

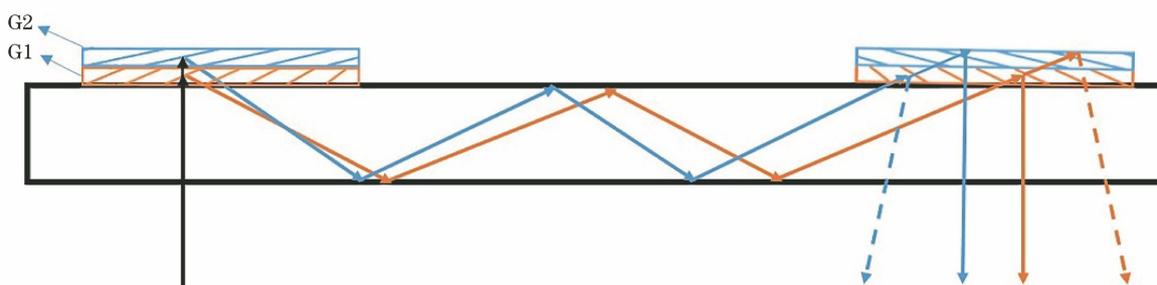


图 10 光线串扰示意图

Fig. 10 Schematic diagram of light crosstalk

为了避免光线发生串扰,将微米级的 Mylar 片垫在双重体光栅波导的 4 个角上,并使用 UV 胶水 NOA 61 对波导边缘进行粘合封装,这就保证了光栅层间存在一定的空气层。像源光线经过第一重光栅时将直接被衍射进波导,经过第二重光栅衍射后将会在材料-空气接触面发生全反射并再次进入波

导介质中。双重体光栅的光波导结构如图 11 所示。可以发现,该波导结构不会改变双重体光栅的衍射角度带宽,仍然满足空气中水平 FOV 为 30°的设计要求。同时,该结构将像源光线限制在各自的波导内进行传播,避免了光线串扰造成的重影现象的出现。

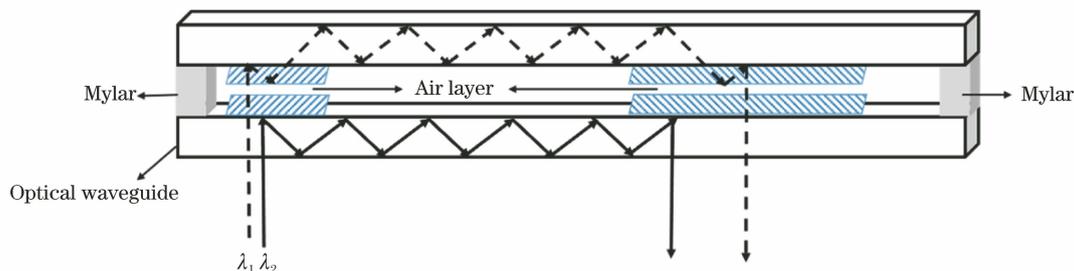


图 11 双重体光栅的光波导结构

Fig. 11 Optical waveguide structure of double-layer volume grating

图 12(a)所示为制备的双重体光栅结构下的全息波导实物图。为了测试其透过率,利用 D65(人工日光)光源来模拟外界环境光,用照度计分别测量了

光束进入波导片出耦合位置前后的亮度,通过测量得到该双重体全息光栅波导显示系统的透过率为 72%,表明该系统对环境光具有良好的透明度,即该

显示模组具有良好的穿透显示效果。图 12(b)所示为波导片透明度展示图。



图 12 双重体光栅全息波导实物图和波导片透明度展示图。

(a) 双重体光栅全息波导实物图; (b) 波导片透明度展示图  
Fig. 12 Actual picture of double-layer volume grating holographic waveguide and transparency display of waveguide. (a) Actual picture of double-layer volume grating holographic waveguide; (b) transparency display of waveguide

### 5 双重光栅波导系统成像结果

为了验证所制备的全息波导能够有效扩大光栅的衍射带宽,利用 R1 角分辨光谱仪(上海复享光学股份有限公司)测量了所制备全息波导的衍射响应波长带宽曲线。双重体光栅的仿真和实际衍射效率曲线如图 13 所示。可以发现,该全息波导的衍射效率带宽为 40 nm,其同时存在两个衍射效率峰值,对

应的中心波长分别为 530 nm 和 542 nm,这与设计的光栅参数存在一定的误差,其原因可能是实验设备无法十分准确地将参考光和物光的夹角调节为设计指标。

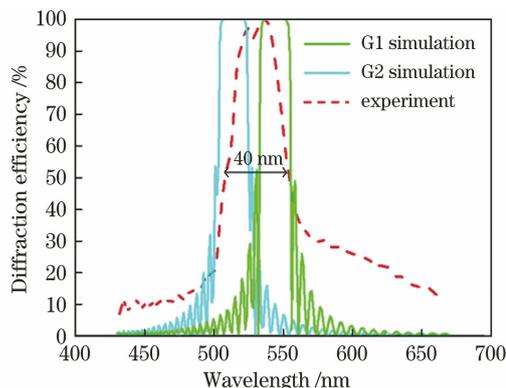


图 13 双重体光栅的仿真和实际衍射效率曲线  
Fig. 13 Simulation and actual diffraction efficiency curves of double-layer volume grating

为了分析所制备的全息波导显示系统的成像效果,搭建了如图 14(a)所示的波导显示系统,该系统主要包括 OLED 微显示器、准直光学镜组和制备的全息波导。理论上,该波导显示系统可提供的最大对角线 FOV 为 40°,出瞳距离为 18 mm。显示效果如图 14(b)所示,由显示画面可以看出所制备的全息波导显示系统能够完整地显示 OLED 微显示器的画面。该画面左下角字符存在的拖影现象是由装配准直透镜过程中出现的轴上像差所导致的。

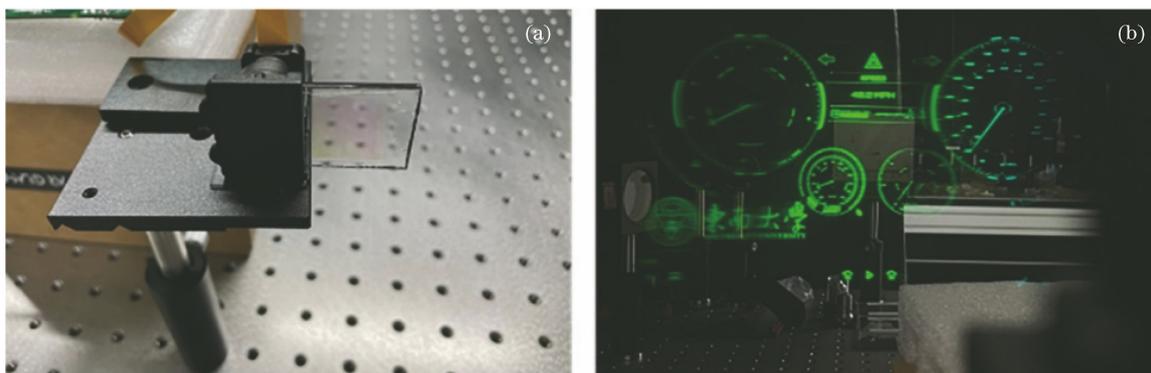


图 14 全息波导显示模组和实际显示效果图。(a)全息波导显示模组;(b)实际显示效果图

Fig. 14 Holographic waveguide display module and actual display effect. (a) Holographic waveguide display module; (b) actual display effect

进一步计算该双重体光栅全息波导显示系统所能成像的 FOV 大小。图 15(a)所示为测试光路示意图,其中 AR 为增强现实。样机的测试输入图像如图 15(b)所示,为了模拟人眼正常的观看效果,将相机与出耦合光栅的距离固定为 18 mm。测试时

将带有刻度的白板置于如图 15(c)、(d)所示的测量位置,其距离样机为 10 cm。调节相机焦距直至测试画面清晰后,记录测试画面覆盖白板刻度的区域。根据显示画面在白板上面积以及波导片与白板之间的距离计算得到水平方向的 FOV 为 33.4°,竖直

方向的 FOV 为  $22.6^\circ$ , 对应的对角线 FOV 约为  $40.3^\circ$ 。

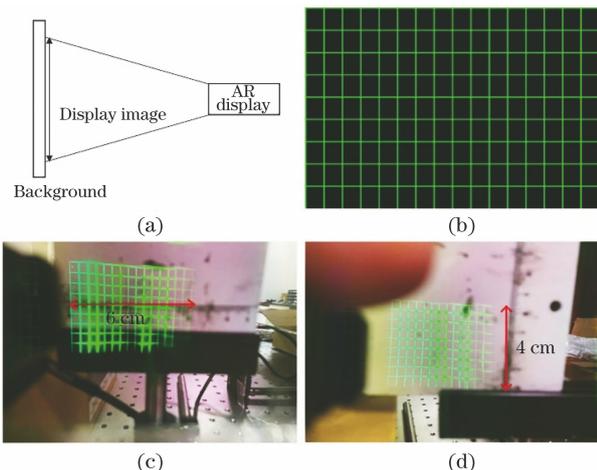


图 15 显示模组的 FOV 测试示意图及测试结果。(a) 显示模组的 FOV 测试示意图;(b) 测试图(网格);(c) 显示画面覆盖的水平方向范围(相机对焦无穷远);(d) 显示画面覆盖的垂直方向范围(相机对焦无穷远)

Fig. 15 FOV test diagram of display module and display results. (a) FOV test diagram of display module; (b) test chart (grids); (c) horizontal range covered by display picture (camera focuses at infinity); (d) vertical range covered by display picture (camera focuses at infinity)

值得注意的是,图 14(b)和图 15(c)、(d)的实验结果均显示画面左右边缘较暗,这是因为光栅衍射效率曲线与像源光谱曲线在边缘视场入射角度下重叠的面积较小,而在中心视场入射角度下重叠的面积较大,进而造成视场内亮度的不均匀。然而,在图 15(c)、(d)中,除了画面边缘较暗外,画面中心视场还存在较暗部分,这是因为双重体光栅的衍射效率曲线的不连续使效率分布呈现“M”型。因此,成像左右画面各存在一个较亮区,而画面边缘和中心较暗,总体呈现暗、亮、暗、亮、暗分布。除了成像的不均匀性,成像画面还存在一定的色散,这是因为当入射角度不断增大时,对应的布拉格波长发生改变,引起各视场下的画面出现色差。

## 6 结 论

为扩大波导显示系统的 FOV,首先分析光栅衍射特性对波导显示系统 FOV 的影响,搭建了基于 OLED 像源光谱的波导显示 FOV 模型,利用光栅衍射曲线和像源光谱曲线重叠部分对应的入射角度范围来计算 FOV。单层体光栅较窄的波长和角度带宽限制了全息波导显示系统的 FOV,无法满足增

强现实显示大 FOV 的要求。为了优化 FOV,设计了基于双重体光栅的波导结构,基于布拉格衍射原理与矢量圆分析法分别计算了所设计的双重体光栅的曝光角度,通过变角度分次曝光法以及紫外烘烤等后处理工艺制备了双重体光栅。利用角度分辨光谱仪测试可得所制备的双重体光栅的衍射波长带宽高达 40 nm。为分析所制备的双重体光栅波导结构的成像效果,搭建了基于单绿色 OLED 微像源的双重体光栅波导显示系统。经测试发现,该显示系统可实现水平方向为  $33.4^\circ$ 、竖直方向为  $22.6^\circ$ 、对角线为  $40.3^\circ$  的大 FOV 显示画面。成像结果表明,所制备的样品能够有效地扩大全息波导显示的 FOV,证实了双重体光栅扩展 FOV 的可行性,为实现大 FOV 体全息光栅波导显示提供了新的技术方案。

## 参 考 文 献

- [1] Borisov V N, Okun R A, Angervaks A E, et al. Wide field of view HOE-based waveguides system for AR display[J]. Proceedings of SPIE, 2020, 11350: 113500E.
- [2] Aye T M, Yu K, Tenggara I, et al. Compact HMD optics based on multiplexed aberration-compensated holographic optical elements[J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4361: 89-97.
- [3] Zeng F, Zhang X. Waveguide holographic head-mounted display technology[J]. Chinese Optics, 2014, 7(5): 731-738.  
曾飞, 张新. 全息波导头盔显示技术[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 731-738.
- [4] Cao C, Liao S, Liao Z Y, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(8): 1122001.  
操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. 光学学报, 2020, 40(8): 1122001.
- [5] Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C. Development and application of shortwave infrared convex blazed grating with high diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(12): 1205002.  
郑志忠, 杨忠, 修连存. 高衍射效率短波红外凸面闪耀光栅的研制与应用[J]. 光学学报, 2020, 40(12): 1205002.
- [6] Weng Y S, Zhang Y N, Cui J Y, et al. Liquid-crystal-based polarization volume grating applied for full-color waveguide displays [J]. Optics Letters, 2018, 43(23): 5773-5776.

- [7] 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.  
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.
- [8] Blanche P A, Gailly P, Habraken S L M, et al. Volume phase holographic gratings: large size and high diffraction efficiency[J]. *Optical Engineering*, 2004, 43(11): 2603-2612.
- [9] Tao S Q, Jiang Z Q, Wan Y H, et al. Optical holography technology and its application[M]. Beijing: Science Press, 2013.  
陶世荃, 江竹青, 王玉红, 等. 光学体全息技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [10] Wu Y, Chen C P, Zhou L, et al. Design of see-through near-eye display for presbyopia[J]. *Optics Express*, 2017, 25(8): 8937-8949.
- [11] Han J, Liu J, Yao X, 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.
- [12] Shi X, Liu J, Xiao J, et al. Design of a compact waveguide eyeglass with high efficiency by joining freeform surfaces and volume holographic gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2021, 38(2): A19-A26.
- [13] Liu A, Zhang Y N, Shen Z W, et al. Realization and optimization of holographic waveguide display system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(5): 0523003.  
刘募, 张宇宁, 沈忠文, 等. 全息波导显示系统的实现与优化[J]. *光学学报*, 2017, 37(5): 0523003.
- [14] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, 48(9): 2909-2947.
- [15] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1981, 71(7): 811-818.
- [16] Moharam M G, Gaylord T K, Magnusson R. Criteria for Bragg regime diffraction by phase gratings[J]. *Optics Communications*, 1980, 32(1): 14-18.
- [17] Chateau N, Hugonin J P. Algorithm for the rigorous coupled-wave analysis of grating diffraction[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 1994, 11(4): 1321-1331.
- [18] Liu W C, Jin G, Xie Y F, et al. Broadband high-efficiency polarization-independent double-layer slanted grating for RGB colors[J]. *Optics Communications*, 2021, 488: 126864.
- [19] Yin K, He Z Q, Li K, et al. Doubling the FOV of AR displays with a liquid crystal polarization-dependent combiner[J]. *Optics Express*, 2021, 29(8): 11512-11519.
- [20] 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.