

基于液晶偏振体光栅的波导显示系统

罗豪, 翁嘉承, 李海峰*

浙江大学光电科学与工程学院现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 液晶偏振体光栅作为一种新型波导耦合元件,因其较宽的角度响应带宽和独特的偏振特性而受到关注。然而,目前对液晶偏振体光栅的研究还在初步阶段,基于液晶偏振体光栅的波导显示系统主要存在出瞳范围较小的缺点。制备了中心波长为 532 nm、光束垂直入射时反射衍射角为 50° 的液晶偏振体光栅,光栅峰值衍射效率达到 75%。将其作为波导显示系统的耦合元件可实现图像的传输和显示。同时,设计和实现了出瞳在一维和二维方向上的扩展,将出瞳扩大了到 $14\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 的范围。

关键词 光栅; 光学器件; 衍射光栅; 显示系统; 波导; 液晶

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1005002

Waveguide Display System Based on Liquid Crystal Polarization Volume Grating

Luo Hao, Weng Jiacheng, Li Haifeng*

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China

Abstract As a new type of waveguide coupling element, the liquid crystal polarization volume grating has attracted much attention because of its wide angular response bandwidth and unique polarization characteristics. However, the current research on liquid crystal polarization volume gratings is still in the initial stage, and the waveguide display system based on liquid crystal polarization volume gratings has the disadvantage of small pupil range. A liquid crystal polarization volume grating with a central wavelength of 532 nm and a reflection diffraction angle of 50° at vertical incidence is fabricated. The peak diffraction efficiency of the grating reaches 75%. Using it as the coupling element of the waveguide display system, the image transmission and display can be realized. At the same time, the expansion of the exit pupil in one-dimensional and two-dimensional directions is designed and realized, and the exit pupil is expanded to the range of $14\text{ mm}\times 12\text{ mm}$.

Key words gratings; optical devices; diffraction grating; display system; waveguides; liquid crystal

1 引言

在过去的几十年中,信息显示技术飞速发展,如谷歌眼镜、微软 HoloLens 和 Magic Leap One 等增强现实(AR)显示器在教育、医疗和游戏娱乐等领域中得到了广泛的应用。波导式的增强现实显示设备作为目前被广泛认可的技术方案,在体积、质量、出瞳大小和制作成本等方面都有一定的优势。其中,

波导耦合器件作为波导显示系统中最关键的部件直接决定了波导显示系统的光学效率、出瞳大小、色彩表现和清晰度。

部分反射微镜阵列(PRMA)、表面浮雕式光栅耦合元件(SRG)、体全息耦合光栅(VHG)^[1-2]和液晶偏振体光栅(PVG)等波导耦合器件凭借着各自的优势受到了广泛的关注。对于 PRMA 系统,虽然其视场角(FOV)、色彩表现等都可以达到较高水

收稿日期: 2021-11-26; 修回日期: 2021-12-08; 录用日期: 2021-12-20

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1002905)

通信作者: *lihaifeng@zju.edu.cn

平,但是对生产工艺有极高的要求,目前 PRMA 波导产品的良品率普遍不高。同时,与传统半透膜阵列式显示器件一样,成像结果中还存在着重影、均匀度不高等问题^[3]。SRG 系统和 VHG 系统受限于衍射光栅本身的响应带宽,会存在色彩不均匀和 FOV 较小等问题。

与以上几种波导耦合器件相比,基于液晶材料的反射 PVG 在光学性能和制造上都表现出独特的特性,如衍射效率高、衍射角大、响应带宽宽、偏振选择性强和制造工艺简单等^[4]。2016 年, Kobashi 等^[5]提出了一种新型胆甾相液晶器件。2017 年, Lee 等^[6]成功制备了中心波长为 630 nm 的 PVG 光栅,实现了对垂直入射光束在 50°角方向的反射衍射。2018 年, Weng 等^[7]成功设计了 PVG 彩色波导系统,实现了 PVG 彩色波导耦合成像功能。2019 年, Yin 等^[8]在柔性材料上成功制备出了 PVG。2020 年, Yin 等^[9]沿光束传播方向引入梯度螺距,将 PVG 的角带宽从 18°扩展到了 54°,同时保持超过 80%的平均效率和 95%的峰值衍射效率。然而,目前对基于 PVG 的波导显示系统的研究仅局限在扩大 FOV 和彩色显示方面,对波导显示系统另一个重要参数(出瞳大小)的研究很少,基于 PVG 的二维扩瞳波导显示系统仍未出现。

首先,本文搭建了制备 PVG 的曝光光路,并对制备得到的 PVG 的衍射效率、响应带宽等物理特性进行了实验探究。然后,将 PVG 应用于波导显示系统中,搭建了 PVG 波导显示系统样机,完成了图像的传输和清晰显示。最后,对所搭建的样机的成像效果进行了分析,从实验上验证了 PVG 波导耦合显示技术的可行性且证明了其在成像方面具有很大的优势。此外,为突破拉格朗日不变式对 FOV 与出瞳大小的限制,获得更大的出瞳尺寸,本文设计并实现了出瞳尺寸在一维和二维方向上的扩展。

2 液晶偏振体光栅的结构与特性

PVG 通过液晶分子光轴在空间内周期性旋转产生体布拉格效应,是一种几何相位光栅^[10-11]。如图 1 所示, PVG 的内部液晶分子具有空间周期性结构,横向周期(Λ_x)为液晶分子指向矢 \mathbf{K} 沿水平方向旋转 180°的距离,纵向周期(Λ_y)是液晶分子指向矢沿垂直方向旋转 180°的距离。通过基板表面的光取向层对与其接触的液晶层进行取向,使得接触的液晶分子可以按照需要的图案定向排布,进而实现横向(x 方向)的周期性,而纵向(y 方向)的周期性需要反应型液晶(RM)掺杂适量的手性材料产生。

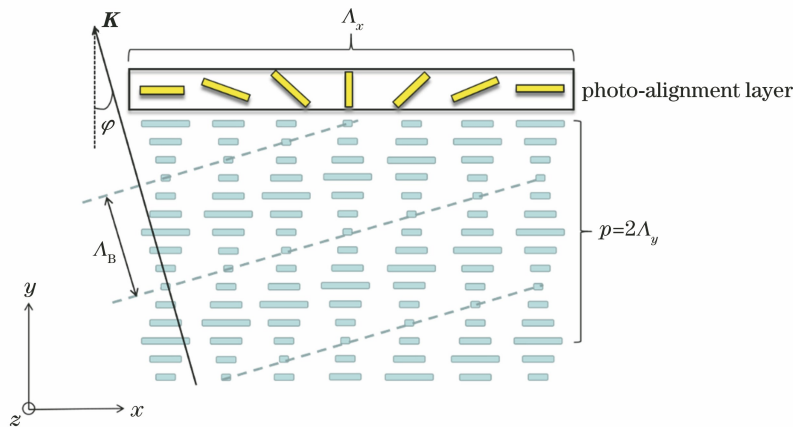


图 1 PVG 的结构示意图

Fig. 1 Structural diagram of PVG

横向的周期性是使用光取向层通过圆偏振全息干涉曝光实现的,即用两束偏振态完全正交且相干的圆偏振光干涉曝光。如图 2(a)所示,一束右旋圆偏振光(RCP)与一束左旋圆偏振光(LCP)以 2θ 夹角^[12]照射到光取向层上,进而引发光取向层上的光化学反应,形成与干涉场偏振相同的光控取向效应,将取向完成后的光取向层与液晶接触,即可诱导液晶分子按照干涉场的偏振分布取向。干涉光场为光强均

匀分布且偏振方向沿 x 轴周期性线性变化的线偏振光,如图 2(c)所示,周期为

$$\Lambda_x = \frac{\lambda}{2\sin\theta}, \quad (1)$$

式中: λ 为记录光的波长。由式(1)可知 Λ_x 可以通过调整全息干涉曝光中的两束相干光的曝光角度来改变,横向周期与干涉光夹角的函数关系如图 2(b)所示。

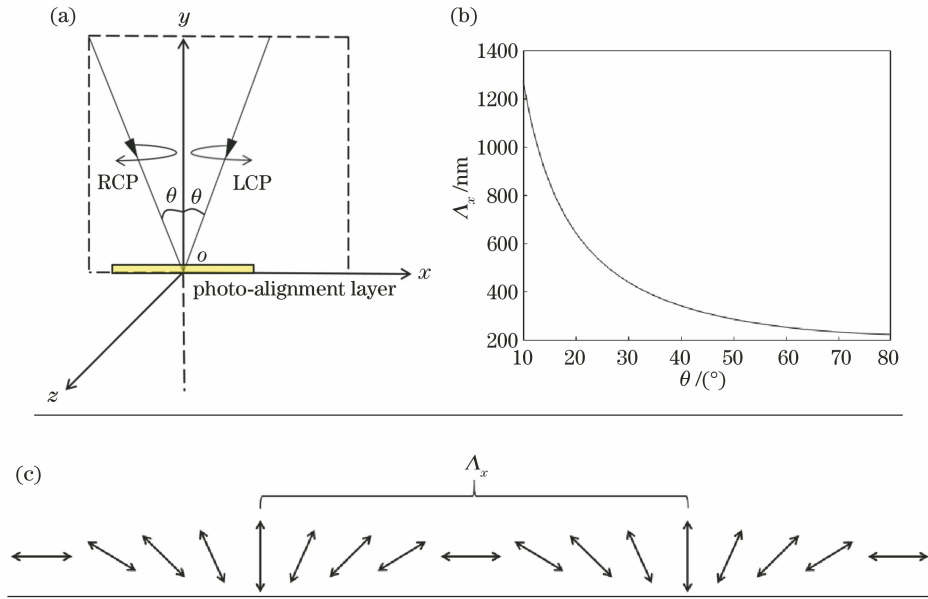


图 2 横向周期实现方法。(a) RCP 和 LCP 干涉;(b)横向周期与干涉光夹角的关系;(c)干涉光场的偏振态分布
Fig. 2 Realization method of transverse period. (a) Interference of RCP and LCP; (b) relationship between transverse period and angle of interference light; (c) polarization state distribution of interference light field

纵向周期 Δ_y 可以通过在 RM 单体中掺杂的手性材料的浓度 c 来调制, RM 单体分子结构在主链末端含有丙烯酸双键,在一定光能引发下能够进行自由基反应使得单体发生聚合。在一定浓度或温度下, RM 能表现出液晶相且具有与向列相液晶相似的光学特性^[13],在掺杂手性材料后 RM 会转变为胆甾相态,从而具有 PVG 所需的纵向周期特性。掺杂手性材料后的液晶螺距 p (液晶分子转动 360°) 可表示为

$$p = (M_{\text{HTP}} \cdot c)^{-1}, \quad (2)$$

式中: M_{HTP} 为手性材料的螺旋扭曲力常数 (HTP)。因此,纵向周期(液晶分子转动 180°)可以表示为

$$\Delta_y = p/2. \quad (3)$$

当光束垂直入射(入射角为 0°)时, PVG 的布拉格条件可表示为

$$2n_{\text{eff}}\Delta_B \cos \varphi = \lambda_B, \quad (4)$$

式中: λ_B 是真空中布拉格中心波长; φ 为光栅矢量 \mathbf{K} 的倾斜角; n_{eff} 是各向异性介质的平均折射率; Δ_B 是布拉格周期。 n_{eff} 与 Δ_B 的表达式为

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{(n_e^2 + 2n_o^2)/3}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} \Delta_x = \Delta_B / \sin \varphi \\ \Delta_y = \Delta_B / \cos \varphi \end{cases}, \quad (6)$$

式中: n_o 、 n_e 分别是液晶材料的“寻常光”的折射率和“非常光”的折射率。当 $0^\circ < \varphi < \pi/4$ 时, PVG 可以实现反射衍射光栅功能,反射 PVG 的衍射特性

如图 3 所示。当入射光束满足布拉格条件时将产生衍射现象。同时, PVG 还具有独特的偏振特性,即当入射光束为圆偏振且旋向与 PVG 内部的液晶分子扭曲螺旋方向一致时(图 3 中为右旋圆偏光),根据布拉格衍射中的光栅与光束之间的几何规律,在满足布拉格衍射条件的情况下,折射率平面可以视为平面镜,进而衍射光方向可通过平面镜反射公式得到。当入射光束以 θ_i 的角度入射至 PVG 上时,衍射角 θ_d 表示为

$$\theta_d = 2\varphi + \theta_i. \quad (7)$$

然而,当入射圆偏光旋向与 PVG 内部液晶分子螺旋方向相反时,光束不发生衍射而是直接透过 PVG。

基于 PVG 的波导显示系统的结构如图 4(a) 所

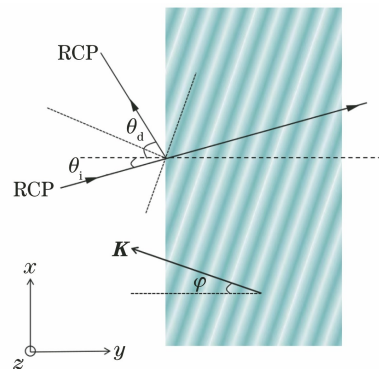


图 3 反射 PVG 的衍射特性
Fig. 3 Diffraction characteristics of reflective PVG

示^[14]。由微像源发出的成像光束经过准直系统后成为平行光射向耦入 PVG, 耦入 PVG 将成像光束反射衍射进入波导中, 在波导内成像光束全反射向耦出 PVG 方向传播。耦出 PVG 是一个与耦入 PVG 对称的光栅, 成像光束在到达耦出 PVG 后, 可从波导中耦出最终到达人眼。

由于人的眼动范围和瞳距等存在差异, 故让人眼在更大范围内都能观察到图像是很有必要的, 表明出瞳大小也是目视光学系统中的重要参数。与传统目视光学系统相比, 出瞳可扩展是光波导成像技术的一大优势。传统目视光学系统中的 FOV 与出瞳大小受拉格朗日不变式的限制^[15], 拉格朗日不变式为

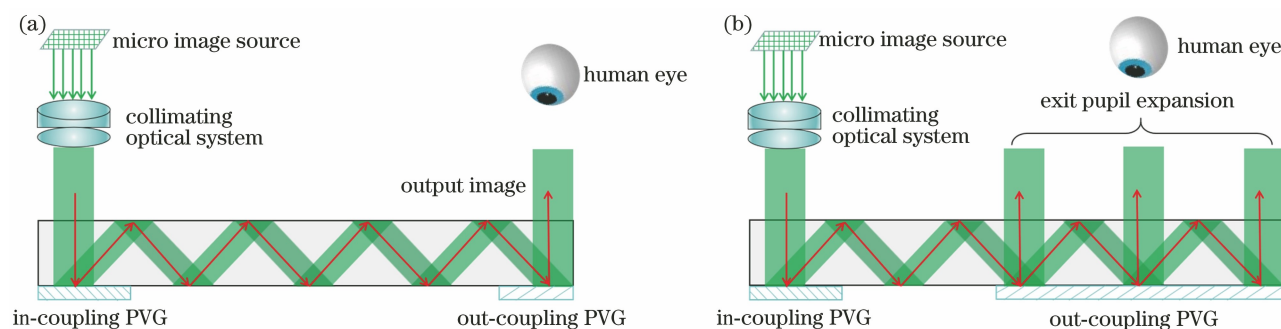


图 4 波导显示系统结构示意图。(a)未扩瞳;(b)一维扩瞳

Fig. 4 Structural diagrams of waveguide display system. (a) Without pupil expansion; (b) pupil expansion in one-dimensional direction

3 实验与分析

3.1 材料准备

需制备中心波长为 532 nm 的 PVG, 经过理论计算得到的所需参数如表 1 所示。

本实验中选用亮黄染料(BY)作为光取向材

$$n \cdot \theta \cdot y_p = n' \cdot \theta' \cdot y_p' \quad (8)$$

式中: θ 是光学系统入瞳处半视场角; y_p 是物方入瞳大小; n 是物方折射率; θ' 是像方半视场角; y_p' 是出瞳大小; n' 是折射率。不难看出, 视场范围和出瞳大小成反比关系, 这就导致无法同时获得更大的视场角和更大的出瞳尺寸。

然而, 在光波导显示系统中, 可以通过出瞳扩展打破这一限制。图 4(b)展示了波导显示系统的一维扩瞳结构示意图。将反射 PVG 作为耦入和耦出光栅, 成像光束每次进入耦出 PVG 光栅后都有一部分光能被耦出射向人眼, 剩下的光能继续在波导内通过全内反射传输, 当下一次进入耦出 PVG 时将再次耦合导出, 进而实现了一维出瞳的扩展。

料。BY 已被验证为是具有良好的取向功能的光取向材料^[16]。同时, BY 相较 SD1(4,4'-二重对二氨基联苯-2,2'-二磺酸钠)等传统偶氮类取向材料更为容易获取且价格便宜, 将质量分数为 1% 的 BY 充分溶解在二甲基甲酰胺中即可得到光取向溶液。

表 1 PVG 的物理参数

Table 1 Physical parameters of PVG

Central wavelength	Transverse period	Longitudinal period	Bragg period	Grating tilt
λ_B/nm	Λ_x/nm	Λ_y/nm	Λ_B/nm	angle $\varphi / (^\circ)$
532	442	209.03	188.96	25.31

制备液晶层的材料是一种液晶光敏混合溶液, 是将一定比例的 RM、手性材料和光引发剂溶于甲苯中得到的, 固体混合物与甲苯按照质量比为 1:8 的比例充分溶解混合。RM 材料选用已被广泛使用且光学性能较好的 RM257($n_o = 1.508, n_e = 1.678, n_{\text{eff}} = 1.56$)。手性材料选择了能使液晶左旋的 R5011($M_{\text{HTP}} = 104 \mu\text{m}^{-1}$), 根据式(2), 只需在液晶中掺杂合适浓度的 R5011, 就可得到需要的纵向周期。选择 Irgacure 651 作为紫外光固化的光引

发剂。

3.2 光取向层的制备与曝光

将清洗好的玻璃基板平稳放置在旋涂仪上, 用滴管取适量配置好的光取向溶液滴在玻璃基板上, 先低速旋涂(速度为 500 r/min, 时间为 4 s)使溶液均匀分布, 再高速旋涂(速度为 2500 r/min, 时间为 30 s)使溶剂蒸发达到所需的取向层厚度。将旋涂好的光取向层放入烘箱(温度为 130 °C), 进行 30~40 min 的烘焙以去除多余溶剂, 使基板上形成牢固

稳定的光取向膜。

将烘焙好的光取向层取出,在室温下冷却后即可开始曝光,曝光光路图如图 5 所示。经由连续运转 s 偏振的 442 nm 氦-镉激光器(110 mW,基横模 TEM₀₀)出射的光束经过偏振无关分束器(NPBS)后被分为两束相干偏振光,两束相干光分别经过显微物镜、小孔滤波器和准直透镜,完成光束的滤波、扩束和准直。准直后的相干光束经过平面反射镜(M1、M2)反射后形成一定夹角,再分别经过两个四分之一波片(QWP),QWP1 与 QWP2 的快轴方向与两束相干光的偏振方向成 45°角,且 QWP1 与

QWP2 的快轴方向互相垂直,此时两束线偏振的相干光即可转换为左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。将烘焙好的基板放置于光路中的曝光平面(sample)上且使基板法线方向平行于曝光夹角的角平分线方向,由式(1)可知,只需调节 M1 与 M2 的角度,就可以调节两束相干光在曝光平面处的夹角 2θ ,进而得到所需的横向周期。根据表 1,调节两束相干光的夹角 2θ 为 60°。根据所测得基板处的光强密度为 10 mW/cm²,光取向层需要的曝光能量需大于 3 J/cm²,此时若设置曝光能量为 5 J/cm²,则曝光时间为 500 s。

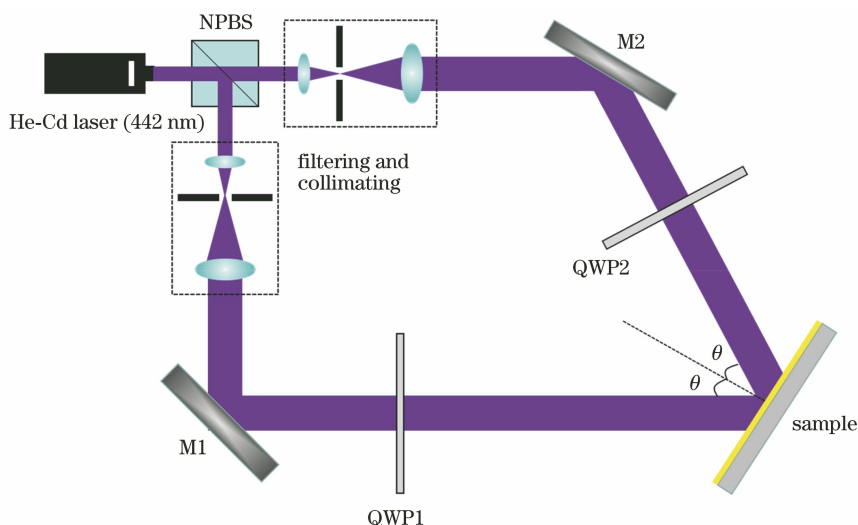


图 5 圆偏振全息干涉曝光光路

Fig. 5 Light path of circular polarization holographic interference exposure

3.3 液晶层的制备

根据纵向周期大小和式(2),经过理论计算得到

表 2 液晶混合物中各成分的比例

Table 2 Proportion of components in liquid crystal mixture

Mass fraction of RM257 / %	Mass fraction of R5011 / %	Mass fraction of Irgacure 651 / %
90.4	2.3	7.3

固体混合物需按照质量比 1:8 的比例溶于甲苯中并在加热台上(温度为 70 °C)充分溶解混合,曝光过程结束后将配置好的溶液滴在涂覆有光取向材料的基板上,先慢速旋涂(速度为 500 r/min,时间为 4 s)使材料均匀分布,再高速旋涂(速度为 2300 r/min,时间为 30 s)使得液晶层达到所需厚度。将涂覆好液晶的基板取下并放置在氮气(N₂)环境中,使用波长为 365 nm 的紫外线照射 5 min 使得 RM257 的单体发生聚合,进而形成稳定的 PVG 液晶膜层。由于 PVG 的衍射效率与液晶膜层的厚度正相关,故在第一次固化结束后,需重复涂覆液晶溶液和固化操作直至衍射效率达到所需值。图 6 展

示了 PVG 制备流程,整个制备流程需在温度、湿度稳定的超净环境中完成,环境温度应稳定在 23 °C 左右,湿度应不超过 50%。

示了 PVG 制备流程,整个制备流程需在温度、湿度稳定的超净环境中完成,环境温度应稳定在 23 °C 左右,湿度应不超过 50%。

3.4 波导显示系统搭建与成像分析

制备完成后的 PVG 在自然环境中如图 7 所示。经过测试,当光束正入射时,PVG 的波长响应曲线如图 8 所示。可以发现,衍射效率在中心波长处可以达到峰值(75%),在蓝紫波段(380~480 nm)中透射比变低,这是因为黄色的光取向层对蓝紫光吸收较强。

由于在 PVG 波导显示系统中,出耦合光栅与入耦合光栅是对称的 PVG,故在实验中采取两次曝

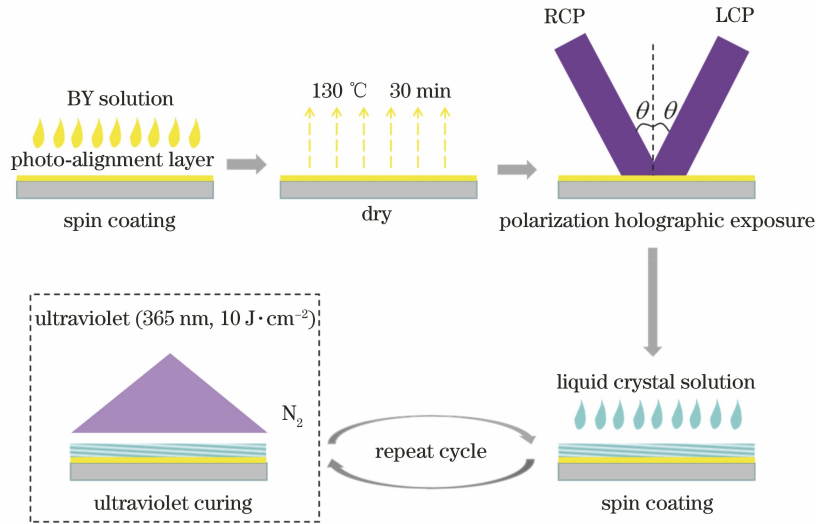


图 6 PVG 的制备流程图

Fig. 6 Fabrication flow chart of PVG

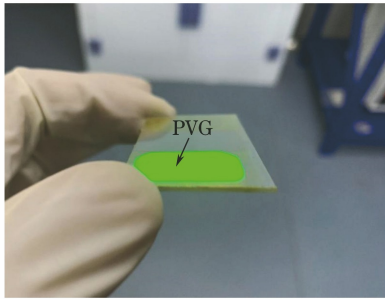


图 7 制备的 PVG 照片

Fig. 7 Photo of fabricated PVG

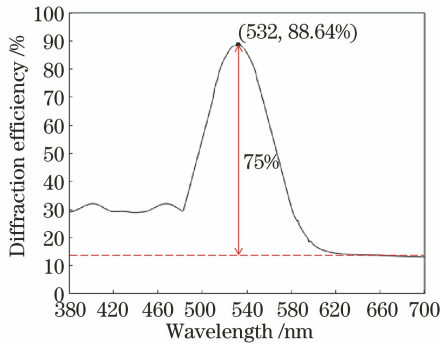


图 8 正入射时 PVG 衍射效率图

Fig. 8 Diffraction efficiency diagram for PVG at normal incidence

光的方法进行圆偏振干涉曝光,即在曝光平面前加入掩膜。如图 9 所示,先在出耦合 PVG 区域进行第一次曝光,之后将覆有光取向膜的玻璃基板旋转 180°,在入耦合 PVG 区域进行第二次曝光,如此便能实现出、入耦合 PVG 的横向周期的对称。需要注意的是,第一次曝光区域应当大于第二次曝光区域,这样才能实现出瞳在一维方向上的扩展。在两次曝光之后的基板上继续旋涂液晶,制备液晶层,这

样便能得到对称的出、入耦合 PVG,进而实现成像光束在波导系统内的耦合和耦合。

基于一维扩瞳的方案,设计了如图 10 所示的二维扩瞳结构。成像光束入射到达入耦合光栅 PVG1, PVG1 将光束反射衍射耦合进入光波导,在光波导中光束发生全反射进入到下转置光栅 PVG2 中。在 PVG2 处一部分光束反射衍射到上转置光栅 PVG3 中,另一部分光束继续全反射向前传播,在 PVG2 的下一个位置继续反射衍射到 PVG3 中。重复以上传播方式即可完成一维方向的扩展。在完成一维方向的扩展后,光束在 PVG3 处反射衍射再次耦合进入光波导,继续通过内全反射向前传播至 PVG4,在 PVG4 处耦合并完成二维方向的扩展。

值得注意的是,出耦合光栅与入耦合光栅是对称的 PVG,如图 11 所示。PVG1 与 PVG2 的结构对称, PVG3 与 PVG4 的结构对称,且 PVG1、PVG2、PVG3 和 PVG4 的光栅矢量 \mathbf{K}_1 、 \mathbf{K}_2 、 \mathbf{K}_3 和 \mathbf{K}_4 应该满足

$$\begin{cases} \mathbf{K}_1 \times \mathbf{K}_2 // z \\ \mathbf{K}_3 \times \mathbf{K}_4 // x \\ \mathbf{K}_1 \cdot \mathbf{y} = \mathbf{K}_2 \cdot \mathbf{y} \\ \mathbf{K}_3 \cdot \mathbf{y} = \mathbf{K}_4 \cdot \mathbf{y} \end{cases}, \quad (9)$$

选择 532 nm 的左旋圆偏振光输入设计制备完成后的波导片中。图 12(a)所示为一维扩瞳波导片的光束复制,其中方框位置为扩瞳区域。图 12(b)所示为二维扩瞳波导片的光束复制,其中方框位置为扩瞳区域。

将制备完成后的波导片放置在波导显示系统中,搭建如图 13 所示的波导显示系统。像源使用绿

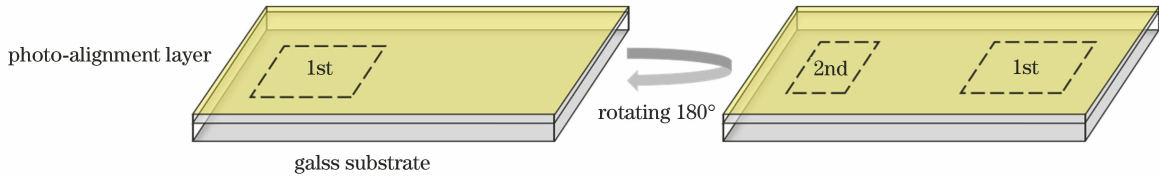


图 9 两次全息曝光过程

Fig. 9 Process of double-holography exposure

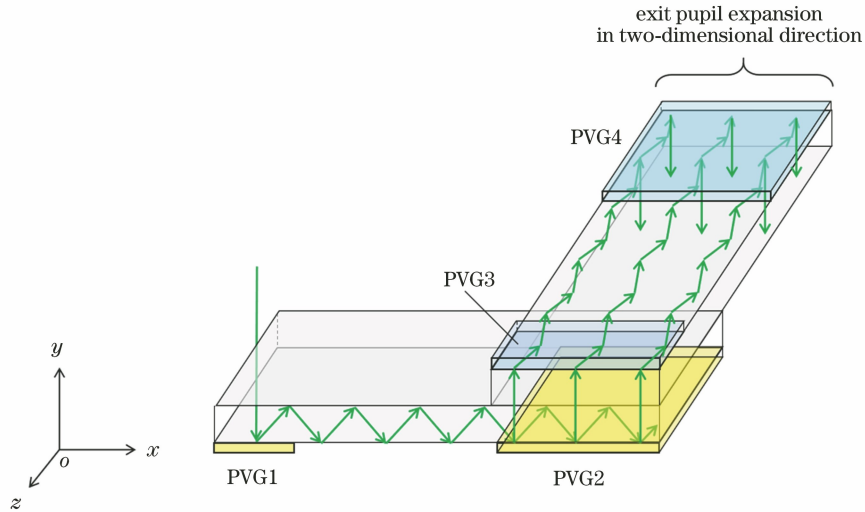


图 10 波导显示系统结构二维扩瞳示意图

Fig. 10 Structural diagram of waveguide display system with pupil expansion in two-dimensional direction

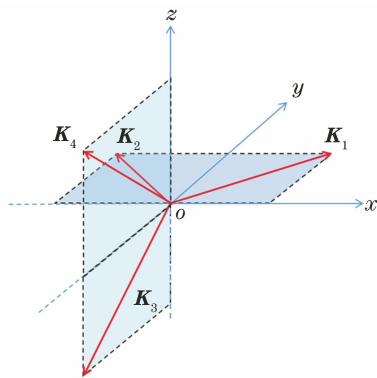


图 11 光栅矢量分布图

Fig. 11 Distribution diagram of grating vectors

色微发光二极管(LED, 波长为 530 nm), 显示面积为 6.4 mm × 3.6 mm, 分辨率为 1920 pixel × 1080 pixel, 显示结果是长宽比为 16:9 的图像。在像元前方放置一个直径 D 为 20 mm, 焦距 f 为 50 mm 的准直镜组, 将微发光二极管放置在准直镜组焦点处, 使其成像在无穷远处。可调光阑的作用是控制入瞳直径大小为 4 mm。采集使用工业相机, 镜头的焦距为 12.5 mm, 镜头光圈 F 数为 1.4, 工业相机放置在平行导轨上以便测量出瞳大小, 并将镜头对焦在无穷远处。将微发光二极管和准直镜

组放置在波导的入耦合 PVG 前, 将工业相机放置在波导的出耦合 PVG 前的出瞳位置处。

图 14 展示了该波导显示系统的一维扩瞳显示效果。图 15 展示了二维扩瞳显示效果。本文中分辨率可表征为角分辨率, 即可以识别出的相邻像素点之间的角度。显示分辨率板图像的作用是计算出显示系统的实际显示分辨率。当观察分辨率板时, 微发光二极管的分辨率为

$$R_0 = \arctan\left(\frac{3.6}{1080 \times 50}\right) = 0.004^\circ = 0.24' \quad (10)$$

在一维扩瞳和二维扩瞳显示中均可以分辨出线宽为 10 pixel 的线对, 故实际显示分辨率为

$$R_1 = \arctan\left(\frac{3.6}{1080} \times \frac{10}{50}\right) = 0.04^\circ = 2.4' \quad (11)$$

式中: 50 为波导显示系统的准直镜组的焦距。可以从式(11)中看出, 波导显示系统的实际显示分辨率为 2.4', 人眼的极限分辨约为 1.0', 两者非常接近, 表明该波导显示系统的分辨率已经达到了较高水平。

设置入瞳直径大小为 4 mm, 在出瞳位置将相机分别在上下、左右位置平移: 经过一维扩瞳, 可以在水平距离为 14 mm 的范围内观察到图像; 经过二

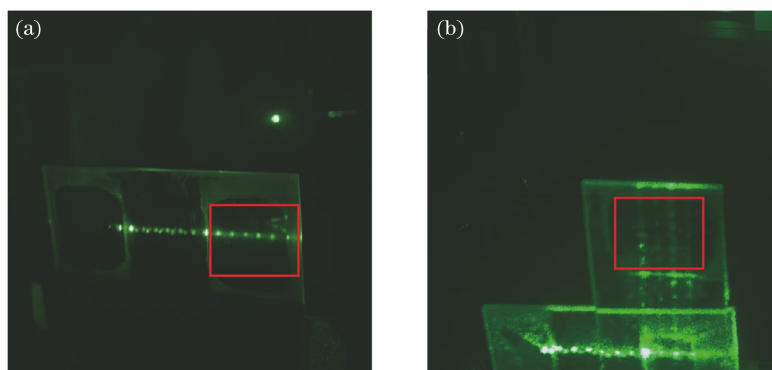


图 12 一维和二维的光束复制

Fig. 12 Copied light beam in one-dimensional and two-dimensional directions

维扩瞳,可以在水平距离为 14 mm、垂直距离为 12 mm 的范围内观察到图像,将出瞳直径大小从 4 mm 扩大到了 14 mm×12 mm 的范围,此时理论上该系统的视场角大小约为 38°。图 16 展示了二维扩瞳后的显示范围。由于出瞳位置处光能不断耦出,故出瞳在远离耦入光栅的边缘位置处的光能随之减少,图像变暗且亮度不均匀,当输出图像经过二维扩瞳到达(0,2)位置时,相机采集到的图像亮度非常微弱。因此,优化光栅衍射效率使出瞳亮度更均衡是未来研究的重点。图 16 左上角的数字表示的是二维扩瞳中的位置,单位为 mm。

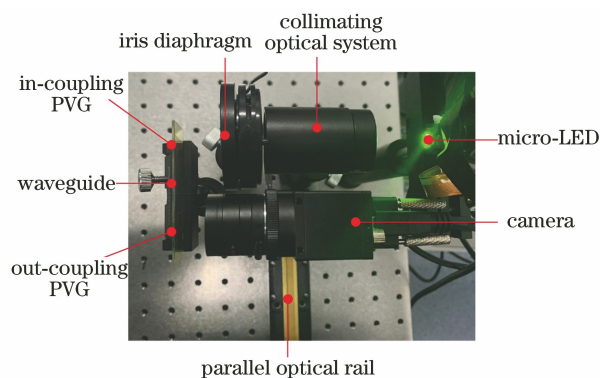


图 13 波导显示系统

Fig. 13 Waveguide display system

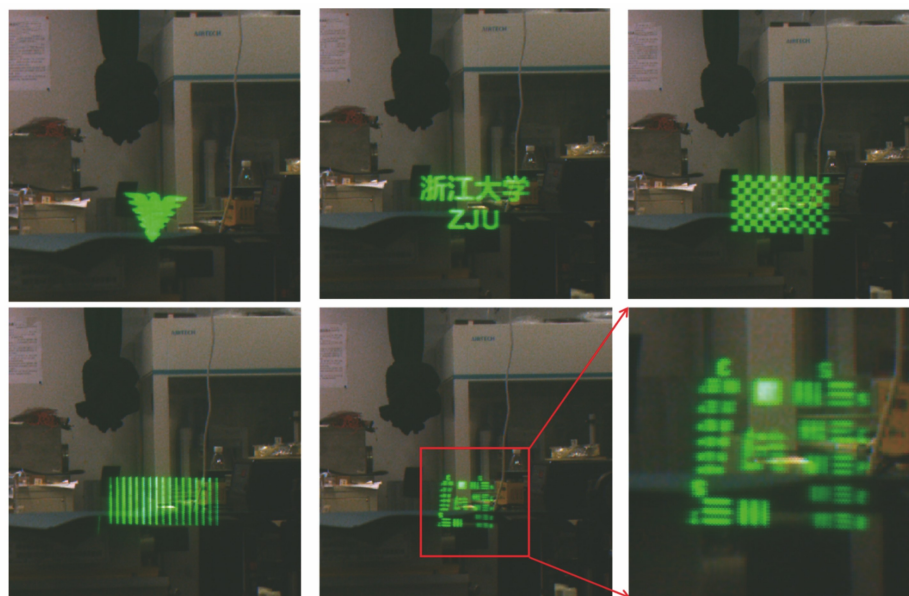


图 14 不同图像的一维扩瞳显示效果

Fig. 14 Display effect of different images with pupil expansion in one-dimensional direction

4 结 论

制备了中心波长为 532 nm、光束垂直入射时反射衍射角为 50°、峰值衍射效率达到 75% 的液晶偏

振体光栅,并将其作为波导耦合元件搭建了波导成像系统。对所提成像系统的成像效果进行了测试。同时,在其基础上设计并实现了出瞳在一维和二维方向上的扩展且均达到了较好的成像效果。本研究

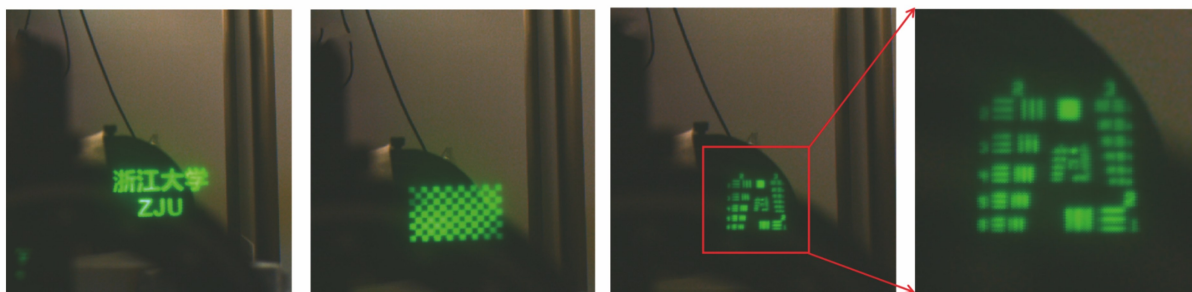


图 15 不同图像的二维扩瞳显示效果

Fig. 15 Display effect of different images with pupil expansion in two-dimensional direction

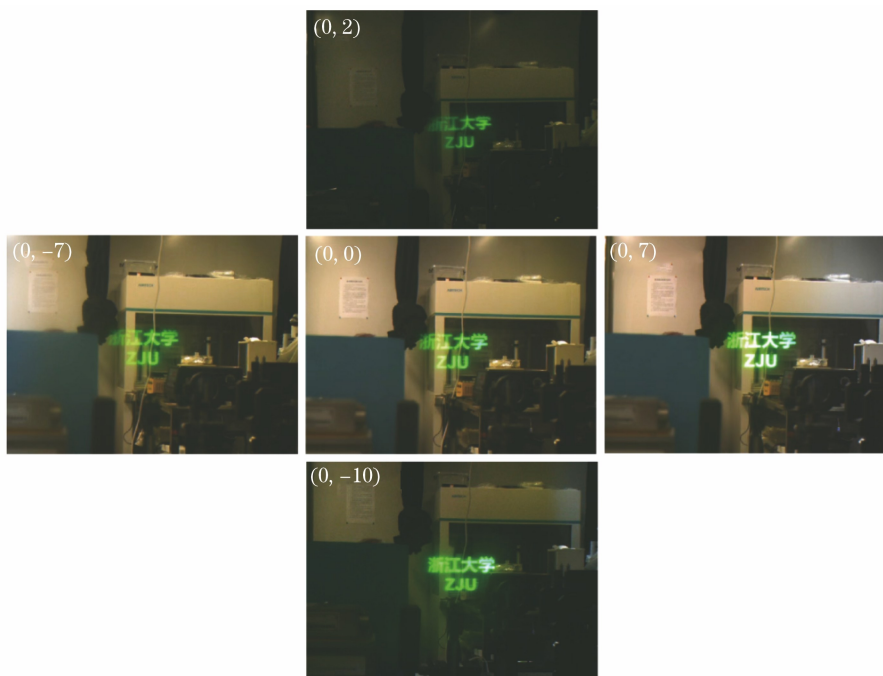


图 16 显示系统出瞳范围

Fig. 16 Exit pupil range of display system

为进一步制备性能更优良的液晶偏振体光栅和全彩二维扩瞳显示系统提供了理论分析依据和现实指导。

参 考 文 献

[1] 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.

[2] 王玉瑾, 张锦, 蒋世磊, 等. 全息波导耦合元件对称结构的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 152303.
 Wang Y J, Zhang J, Jiang S L, et al. Research on symmetric structure of holographic waveguide

coupling elements [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 152303.

[3] 刘辉, 郑臻荣, 李海峰, 等. 半透膜阵列式平板显示设计[J]. 光电工程, 2012, 39(5): 145-150.
 Liu H, Zheng Z R, Li H F, et al. Design of planar display based on transparent film array [J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(5): 145-150.

[4] Weng Y S, Xu D M, Zhang Y N, et al. Polarization volume grating with high efficiency and large diffraction angle[J]. Optics Express, 2016, 24(16): 17746-17759.

[5] Kobashi J, Yoshida H, Ozaki M. Planar optics with patterned chiral liquid crystals[J]. Nature Photonics, 2016, 10(6): 389-392.

[6] Lee Y H, Yin K, Wu S T. Reflective polarization volume gratings for high efficiency waveguide-coupling augmented reality displays [J]. Optics Express, 2017, 25(22): 27008-27014.

- [7] 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.
- [8] Yin K, Lee Y H, He Z Q, et al. Stretchable, flexible, and adherable polarization volume grating film for waveguide-based augmented reality displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2019, 27(4): 232-237.
- [9] Yin K, Lin H Y, Wu S T. Chirped polarization volume grating for wide FOV and high-efficiency waveguide-based AR displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2020, 28(4): 368-374.
- [10] Bomzon Z E, Biener G, Kleiner V, et al. Space-variant Pancharatnam-Berry phase optical elements with computer-generated subwavelength gratings[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(13): 1141-1143.
- [11] Lee Y H, Tan G J, Zhan T, et al. Recent progress in Pancharatnam-Berry phase optical elements and the applications for virtual/augmented realities [J]. *Optical Data Processing and Storage*, 2017, 3(1): 79-88.
- [12] Nikolova L, Todorov T. Diffraction efficiency and selectivity of polarization holographic recording [J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1984, 31(5): 579-588.
- [13] Yun C J, Song J K. Functional films using reactive mesogens for display applications [J]. *Journal of Information Display*, 2017, 18(3): 119-129.
- [14] 刘晔, 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.
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.
- [15] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review[J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(3): 199-216.
- [16] Wang J R, McGinty C, West J, et al. Effects of humidity and surface on photoalignment of brilliant yellow[J]. *Liquid Crystals*, 2017, 44(5): 863-872.