

文章编号:1007-2780(2026)02-0188-09

# 基于单层基板双面液晶偏振体光栅的大视场角光波导 AR 显示

钟梁志煌, 陈全明\*, 罗丹\*

(南方科技大学 电子与电气工程系 光纤光缆先进制造与应用技术全国重点实验室,  
广东省信息功能氧化物材料与器件重点实验室, 广东 深圳 518055)

**摘要:**交叉型液晶偏振体光栅(PVG)二维扩瞳光波导因其结构紧凑和制备便捷性(干涉曝光无需动态调角)成为 AR 显示的研究热点。然而,其用于 AR 显示的视场角(FOV)受到双波导堆叠技术方案的限制。为提升此类波导的视场角,本文提出一种基于单层高折射率玻璃基板( $n=1.9$ )并在其正反双面集成左手、右手手性 PVG 的光波导架构。其中,耦入端和耦出端左右手性光栅倒格矢的水平方位夹角分别为  $0^\circ$  和  $60^\circ$ 。入射光经 PVG 的偏振选择性被分束为两条全内反射路径;当耦入和耦出光栅对光提供的合倒格矢为 0 时被部分耦出,并形成完整的二维扩展光瞳。我们基于光栅衍射方程和玻璃折射率推导了视角中心为波导垂直方向时对应的 PVG 光栅周期,并通过 COMSOL 仿真验证了 532 nm 准直光垂直入射的耦入机制。实验制备的样机实现出瞳光栅尺寸  $28\text{ mm} \times 22\text{ mm}$ ,视场角达水平  $32.8^\circ$ 、垂直  $18.7^\circ$ 、对角线  $37.8^\circ$ ,对角线视场角较前期研究提升 26%。该设计通过在基板双面直接制备 PVG 光栅,省去了传统胶合工艺,避免了折射率匹配胶水和基底材料的严苛选择需求,显著简化了制备流程并有效降低了制造成本。该方案还利用高折射率基板显著增大了 FOV,同时提升了成像质量,为 AR 头戴近眼显示提供了一种具有前景的高性能方案。

**关键词:**液晶偏振体全息光栅;视场角;二维扩瞳;光波导 AR 显示;液晶光学

**中图分类号:** TN27; O753+.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2025-0242 **CSTR:** 32172.14.CJLCD.2025-0242

## Wide-field-of-view AR waveguide display enabled by one substrate coated with double-sided polarization volume gratings

ZHONG Liangzhihuang, CHEN Quanming\*, LUO Dan\*

(State Key Laboratory of Optical Fiber and Cable Manufacture Technology, Guangdong Provisional Key Laboratory of Functional Oxide Materials and Devices, Department of Electrical & Electronic Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Cross type liquid crystal polarization volume grating (PVG)-based two-dimensional pupil

收稿日期:2025-12-01;修订日期:2025-12-23.

**基金项目:**国家自然科学基金(No.62575135, No.62175098, No.U22A20163, No.62405127);国家重点研发计划(No.2022YFA1203700);广东省基础与应用基础研究基金(No.2021B1515020097);国家资助博士后研究人员计划(No.GZC20240640);南方科技大学校长卓越博士后项目

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.62575135, No.62175098, No.U22A20163, No.62405127); National Key Research and Development Program of China (No.2022YFA1203700); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No.2021B1515020097); Postdoctoral Fellowship Program of CPSF under Grant Number (No.GZC20240640); SUSTech Presidential Postdoctoral Fellowship.

\*通信联系人, E-mail: chenqm@sustech.edu.cn; luod@sustech.edu.cn

expansion waveguides have emerged as a research hotspot in AR displays due to their compact structure and fabrication simplicity (no dynamic adjustment of interference angles is required during holographic exposure); however, their field of view(FOV) for AR applications is constrained by traditional dual-waveguide stacking approaches. To enhance the FOV, this work proposes an optical waveguide architecture based on a single-layer high-refractive-index glass substrate ( $n=1.9$ ) coated with left-handed and right-handed PVGs on both surfaces, where the horizontal azimuthal angles of the reciprocal lattice vectors for the input-coupler and output-coupler gratings are  $0^\circ$  and  $60^\circ$ , respectively. Incident light is split into two separate total internal reflection paths via PVG polarization selectivity; partial out-coupling occurs when the combined reciprocal lattice vector provided by the input and output gratings sums to zero, forming a complete two-dimensional expanded exit pupil. Based on the grating diffraction equation and substrate refractive index, we derived the required PVG period for the central FOV aligned with the waveguide normal direction. In addition, the input-coupling mechanism for vertically incident 532 nm collimated light is validated via COMSOL simulations. The fabricated prototype ( $28\text{ mm} \times 22\text{ mm}$  output grating) achieved a  $32.8^\circ$  (horizontal)  $\times 18.7^\circ$  (vertical) FOV ( $37.8^\circ$  diagonal), representing a 26% improvement in the diagonal FOV over prior work. This design eliminates traditional bonding processes by direct dual-side PVG fabrication, circumventing stringent requirements for index-matching adhesives/substrates, significantly simplifying fabrication process and reducing costs. The high-refractive-index substrate further increases FOV while enhancing image quality, providing a promising high-performance solution for AR near-eye displays.

**Key words:** liquid crystal polarization volume grating; field of view; two-dimensional exit pupil expansion; waveguide-based AR display; liquid crystal optics

## 1 引 言

随着信息技术的快速更迭,人类获取信息的手段正经历着翻天覆地的变化。在新一代数字信息技术的浪潮中,人们对于信息获取的方式已不再局限于传统的平板显示屏,而是开始追求更为沉浸式的交互体验。正是在这样的背景下,增强现实(Augmented Reality, AR)显示技术应运而生<sup>[1-3]</sup>。该技术能够将虚拟图像与用户的真实环境无缝融合,因而被广泛视为下一代交互式显示技术的典范,在教育、军事、医疗以及消费等多个领域展现出巨大的应用潜力<sup>[4-5]</sup>。在诸多AR显示技术方案中,光波导方案因其轻薄外形而备受关注<sup>[6-8]</sup>。光波导主要分为部分反射微镜阵列(Partially Reflective Mirrors Array, PRMA)光波导、表面浮雕光栅(Surface Relief Grating, SRG)衍射光波导、体全息光栅(Volume Holographic Grating, VHG)衍射光波导和液晶偏振体全息光栅(Polarization Volume Grating, PVG)衍射光波导4种类型<sup>[9-11]</sup>。凭借成熟的液晶材料和双光束干涉技术以及高效率等关键性能优势,PVG近些

年在学术界和产业界备受关注<sup>[12-16]</sup>。

在AR光波导中,视场角(Field of View, FOV)决定用户看到的虚拟画面范围,其大小主要由基底材料折射率决定。出瞳范围(Eyebow)决定了用户眼球移动时能清晰观察虚拟信息的区域。协同优化视场角与出瞳范围对于提升AR显示的沉浸式体验至关重要。当前AR光波导技术主要通过视点复制技术扩展出瞳,结合多种视场角扩大技术协同优化性能。基于一维扩瞳技术<sup>[17]</sup>, Y. C. Gu等人<sup>[18]</sup>采用双层旋涂法(螺距不同但中心波长相近的PVG)以扩大角度带宽相近的PVG来扩大角度带宽。X. D. Yan等人<sup>[19]</sup>提出三维周期性梯度结构PVG进一步拓展角度带宽。相比于一维扩瞳所需的狭长光机设计,二维扩瞳技术能以更紧凑的光机实现更大的眼动范围<sup>[20]</sup>。Q. Yang<sup>[21]</sup>等人优化蝶形二维扩瞳方案,并结合周期性梯度结构PVG扩大视场角。但该PVG受限于复杂的周期性梯度结构而难以制备。近期,Y. S. Weng等人<sup>[22]</sup>提出基于交叉PVG光栅的二维扩瞳光波导。该方案因其结构紧凑且曝光制备时无需动态调整干涉角度,已成为研究

热点。但前期研究依赖双片光波导的胶合工艺实现交叉 PVG。由于常用光学胶的折射率( $n \approx 1.6$ )限制了系统光学性能,导致 FOV 受限。因此,在保留交叉光栅二维扩瞳优势的前提下,如何突破胶合工艺的 FOV 限制,成为 PVG 光波导领域亟待解决的核心挑战。

为实现大视场角交叉型 PVG 衍射光波导 AR 显示,本研究创新性地提出并实现了一种高折射率玻璃基板( $n=1.9$ )双面集成 PVG 的架构——在耦入端与耦出端正反面同步制备手性光栅结构。实验证实,该设计成功构建了二维扩展出瞳,最终实现了水平  $32.8^\circ$ 、垂直  $18.7^\circ$ 、对角线  $37.8^\circ$  (较前期研究<sup>[22]</sup>提升 26%)的大视场角显示。此项工作突破了单基板双面 PVG 无胶集成的技术瓶颈,在显著提升系统视场角与成像质量的同时规避了折射率匹配难题,为推进 AR 显示技术实用化进程提供了高性能解决方案。

## 2 双面液晶偏振体全息光栅光波导

### 2.1 结构设计及工作原理

本文提出的基于双面反手性 PVG 的光波导架构如图 1(a)所示。入耦合器由光栅矢量一致但手性相反的两个 PVG 共同组成,分别为左手手性的 L- $G_i$ (left-handed input grating)和右手手性的 R- $G_i$ (right-handed input grating)。L- $G_i$ 的倒格矢  $G_{Li}$ 和 R- $G_i$ 的倒格矢  $G_{Ri}$ 的倒格矢指向  $+x$  方向。出耦合器也由具有相反的手性两个 PVG (L- $G_o$ , left-handed output grating)和 R- $G_o$ (right-handed output grating)组成,但倒格矢  $G_{Lo}$ 和  $G_{Lo}$ 相对于  $x$ 轴镜像对称,且与  $-x$ 轴方向的夹角为  $\pm 60^\circ$ 。

当线偏振光垂直入射时,左旋偏振分量(红色箭头)被 L- $G_i$ 衍射。当衍射角大于或等于液晶-空气界面的全反射临界角  $\theta_{\text{air-LC}}$ 时,衍射光在 PVG 的上边界发生全反射<sup>[23]</sup>并通过液晶-玻璃界面的折射进入波导内以全内反射方式传播。右旋圆偏振光(蓝色箭头)凭借 PVG 的圆偏振选择性,先后透过 L- $G_i$ 和玻璃基板,随后被 R- $G_i$ 衍射,经液晶-玻璃界面折射后,该光束在波导内以全内反射方式传播。

在出射端,首先分析波导内全内反射光束首次入射至 L- $G_o$ 光栅时的情况。如图 1(b)所示,在耦合平面( $xy0$ 平面)内,L- $G_o$ 与 L- $G_i$ 光栅共同作用

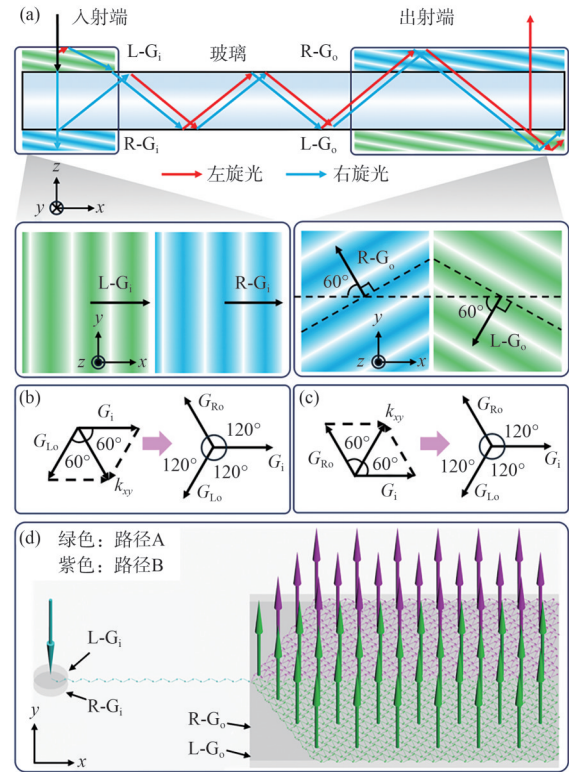


图 1 双面 PVG 光波导结构设计及工作原理示意图。(a)结构示意图,图中 L- $G_i$ /R- $G_i$ 和 L- $G_o$ /R- $G_o$ 分别表示左旋/右旋耦入光栅和左旋/右旋耦出光栅;全内反射光束首次抵达 L- $G_o$ (b)和 R- $G_o$ (c)后被耦出的工作流程;(d)光波导内光束传播路径的整体示意图。路径 A 和 B 分别对应于全内反射光束首次抵达 L- $G_o$ 和 R- $G_o$ 的情况。

Fig. 1 Schematic diagram of the double-sided PVG waveguide structure design and working principle. (a) Structural schematic, in the figure, L- $G_i$ /R- $G_i$  and L- $G_o$ /R- $G_o$  represent the left-/right-handed input gratings and left-/right-handed output gratings, respectively; Workflow where the total internal reflection beam is coupled out after first reaching L- $G_o$  (b) and R- $G_o$  (c); (d) Overall schematic diagram of the beam propagation path within the waveguide. Path A and B correspond to the cases where the total internal reflection beam first reaches L- $G_o$  and R- $G_o$ , respectively.

( $G_i + G_{Lo}$ )提供的等效倒格矢方向与  $x$ 轴成  $-60^\circ$ 。因此,光束被衍射至  $y < 0$  区域,其波矢在  $xy0$ 面内的投影  $k_{xy}$ 与  $x$ 轴夹角为  $-60^\circ$ 。此传播路径标记为 A。随后,该光束继续传播至 R- $G_o$ 光栅。由于在器件设计上保证了 L- $G_o$ 、R- $G_o$ 和 L- $G_i$ 、R- $G_i$ 在  $xy0$ 平面内提供的合倒格矢为零( $G_{Lo} + G_{Ro} + G_i = 0$ ),

光束在此处被耦出光波导。由于斜入射条件下PVG难以实现完全衍射,每次衍射过程均会产生残余光束。该残余光束继续在波导内传播,并在后续光栅位点被部分耦出。这种能量在多个位置的分步出射机制,实现了关键的光瞳扩展功能。

同理,如图1(c)所示,当波导内全内反射光束首次入射至R-G<sub>0</sub>光栅时,在耦合平面(xy0平面)内,R-G<sub>0</sub>与R-G<sub>1</sub>光栅共同作用提供的等效倒格矢方向与x轴成+60°角。因此,光束被衍射至y>0区域,其波矢在xy0面内的投影 $k_{xy}$ 与x轴夹角为+60°,此传播路径标记为B。随后,该光束继续传播至L-G<sub>0</sub>光栅。由于 $G_{L0}+G_{R0}+G_1=0$ ,光束部分被耦出光波导,最终进入人眼。路径A与B对应的整体光束传播示意图如图1(d)所示。

## 2.2 参数设置

图2(a)展示了PVG的结构示意图。液晶分子在空间中呈现倾斜的二维周期性螺旋结构,其指向矢 $\alpha$ 可由式(1)表示<sup>[24]</sup>:

$$\alpha = \frac{\pi}{\Lambda_x} x + \frac{\pi}{\Lambda_z} z, \quad (1)$$

其中, $\Lambda_x$ 和 $\Lambda_z$ 分别为PVG的横向周期和纵向周期,分别定义为液晶分子在x和z方向上旋转 $\pi$ 对应的空间距离。 $\Lambda_x$ 由干涉曝光参数决定,而 $\Lambda_z$ 与PVG的螺距P有关,且 $P=2\Lambda_z$ <sup>[25]</sup>。 $\varphi$ 为光栅矢量K的倾斜角, $\Lambda_b$ 为PVG的布拉格周期且满足<sup>[26]</sup>:

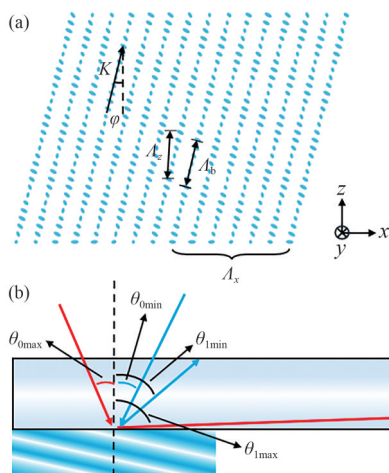


图2 (a)液晶偏振体全息光栅结构示意图;(b)光栅光波导的最大、最小入射角与最大、最小衍射角的示意图。

Fig. 2 (a) Schematic of polarization volume grating; (b) Schematic diagram of the maximum and minimum incident angles and the maximum and minimum diffraction angles of waveguide based on PVG.

$$\begin{cases} \Lambda_x = \Lambda_b / \sin\varphi \\ \Lambda_z = \Lambda_b / \cos\varphi \end{cases} \quad (2)$$

当入射光波长落在PVG的光子禁带内时,根据光栅方程可得<sup>[27]</sup>:

$$n_{\text{eff}} \sin\theta_d = n_0 \sin\theta_i + \frac{m\lambda}{\Lambda_x}, \quad (3)$$

其中: $n_{\text{eff}}$ 为液晶的平均等效折射率, $\theta_d$ 是衍射角, $\theta_i$ 是入射角。 $n_{\text{eff}}$ 可用公式(4)计算<sup>[28]</sup>:

$$n_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{n_e^2 + 2n_o^2}{3}}. \quad (4)$$

从而得到衍射角的计算公式<sup>[29-30]</sup>:

$$\theta_d = \arcsin\left(\frac{\lambda}{\Lambda_x n_{\text{eff}}} + \frac{\sin\theta_i}{n}\right). \quad (5)$$

为扩大视场角,本研究采用高折射率玻璃作为光波导材料( $n=1.9$ ),目标工作波长为532 nm。首先推导波导材料折射率与视场角的关系。图2(b)展示了光栅波导的最大耦入角 $\theta_{0\text{max}}$ 与最小耦入角 $\theta_{0\text{min}}$ 分别对应其在波导内产生的最大衍射角 $\theta_{1\text{max}}$ 与最小衍射角 $\theta_{1\text{min}}$ 。最大衍射角趋近于90°,满足:

$$\sin\theta_{1\text{max}} = 1. \quad (6)$$

最小衍射角则等于波导的全内反射临界角,满足:

$$\sin\theta_{1\text{min}} = \sin\theta_c = n_0/n_1. \quad (7)$$

根据光栅方程可得:

$$\begin{cases} n_1 \sin\theta_{1\text{max}} = n_0 \sin\theta_{0\text{max}} + \frac{\lambda}{\Lambda_x} \\ n_1 \sin\theta_{1\text{min}} = n_0 \sin\theta_{0\text{min}} + \frac{\lambda}{\Lambda_x} \end{cases}, \quad (8)$$

其中: $n_1$ 为波导介质的折射率, $n_0$ 为空气折射率, $\lambda$ 为波长(nm), $\Lambda_x$ 为光栅横向周期(nm)。

将式(6)和式(7)代入式(8)中,将式(8)中的两个公式相减得到:

$$n_1 - n_0 = n_0 \sin\theta_{0\text{max}} - n_0 \sin\theta_{0\text{min}}. \quad (9)$$

又因为 $\sin\theta_{0\text{max}} = -\sin\theta_{0\text{min}}$ ,简化公式可以得到:

$$\sin\theta_{0\text{max}} = \frac{n_1 - n_0}{2n_0}. \quad (10)$$

那么全视角,即视场角为:

$$\text{FOV} = 2\arcsin\left(\frac{n_1 - n_0}{2n_0}\right). \quad (11)$$

由式(11)可知,增大基底的折射率可增大全反射条件的临界角,从而扩大视场角。

将式(6)和式(7)代入式(8)中,将式(8)中的两个公式相加,可以得到:

$$\Lambda_x = \frac{2\lambda}{n_0 + n_1}. \quad (12)$$

由式(12)可以确定视场中心为基板法线方向时对应的PVG横向周期。经计算可得横向周期 $\Lambda_x = 366.9 \text{ nm}$ 。进一步计算可得,正入射时PVG的衍射角为 $67.5^\circ$ ,大于液晶-空气界面的全反射临界角 $39.6^\circ$ 和玻璃的临界全内反射角 $31.8^\circ$ 。

基于所设计的结构,我们采用COMSOL软件对 $532 \text{ nm}$ 准直激光束垂直耦入过程进行了仿真(图3)。线偏振光的左旋圆偏振分量首先被L-G<sub>1</sub>光栅衍射(衍射角 $67.5^\circ$ ),由于该角度大于液晶-空气界面的全反射临界角( $39.6^\circ$ ),衍射光在PVG上边界发生全反射,随后经液晶-玻璃界面折射后以 $49.7^\circ$ 的全内反射角在波导内传播;而右旋圆偏振分量先后透过L-G<sub>1</sub>和玻璃基板,随后被R-G<sub>1</sub>光栅衍射(衍射角同样为 $67.5^\circ$ ),该光束经液晶-玻璃界面折射后同样以 $49.7^\circ$ 的全内反射角在波导内传播。仿真结果表明,左旋与右旋圆偏振光分量最终均以 $49.7^\circ$ 的全反射角在波导介质中传播。

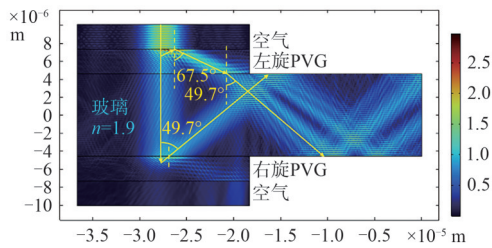


图3 入射光耦入波导仿真

Fig. 3 Simulation of incident light coupling into the waveguide

### 3 光波导样品制备

#### 3.1 双光束干涉光路

双光束干涉光路如图4所示。 $405 \text{ nm}$ 半导体激光器(TOPTICA, TopWave 405)经准直和扩束后,入射至偏振分束立方体(PBS)。在PBS入射端设置半波片,调节入射光的偏振态,使分束后产生的两束正交线偏振光能量均衡。利用反射镜调整两束光的传播路径使其在曝光位置重叠,并在干涉区域前分别放置 $1/4$ 波片,将正交线偏振光转换为正交圆偏振态。根据光栅周期与衍射角之间的关系:

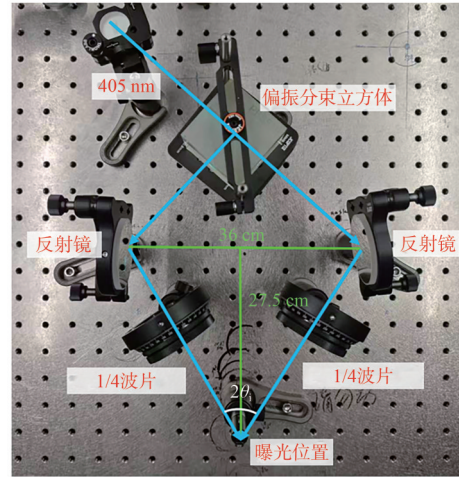


图4 双光束干涉光路

Fig. 4 Interference optical setup for photoalignment

$$\Lambda_x = \frac{\lambda_i}{2\sin\theta_i}, \quad (13)$$

其中: $\Lambda_x$ 为光栅横向周期(nm), $\lambda_i$ 为干涉时使用的激光波长(nm), $\theta_i$ 为两束干涉光夹角( $^\circ$ )。

本文中设计的 $\Lambda_x = 366.9 \text{ nm}$ ,则对应的 $\theta_i$ 为 $33.5^\circ$ 。测得两个反射镜之间的距离为 $36 \text{ cm}$ ,随后设置曝光位置到两个反射镜之间的垂直距离为 $27.5 \text{ cm}$ ,计算得到 $\theta_i$ 为 $33.2^\circ$ ,基本符合设计要求。

#### 3.2 液晶样品制备流程

采用尺寸为 $80 \text{ mm} \times 70 \text{ mm}$ 的矩形玻璃作为光波导基底。玻璃的预处理流程依次为:分别使用乙醇、异丙醇和丙酮进行超声清洗(各 $30 \text{ min}$ ),随后烘干( $100^\circ \text{C}$ )。在旋涂SD1<sup>[31-33]</sup>薄膜前,对玻璃进行 $40 \text{ min}$ 紫外臭氧(UV-Ozone)处理以增强玻璃对光取向剂SD1的附着力。由于本研究需要在玻璃正反面都制备PVG,因此玻璃的正反面分别进行 $20 \text{ min}$ 紫外臭氧处理。PVG的示意性制作过程如图5所示,主要分为如下4个步骤:

步骤1. 将SD1溶液(SD1以重量百分比为 $0.5\%$ 溶解在二甲基甲酰胺中)旋涂到臭氧处理后的玻璃基板上(玻璃正反面依次旋涂)。旋涂参数为:先以 $500 \text{ r/min}$ 的速度旋转 $5 \text{ s}$ ,然后以 $3000 \text{ r/min}$ 的速度旋转 $30 \text{ s}$ ,随后快速将样品放置在 $100^\circ \text{C}$ 的热台上烘干 $10 \text{ min}$ 。

步骤2. 通过上述搭建的曝光光路取向SD1。

步骤3. 将偏振体光栅的液晶前体溶液旋涂到已取向的样品上。混合液由液晶单体RM257、

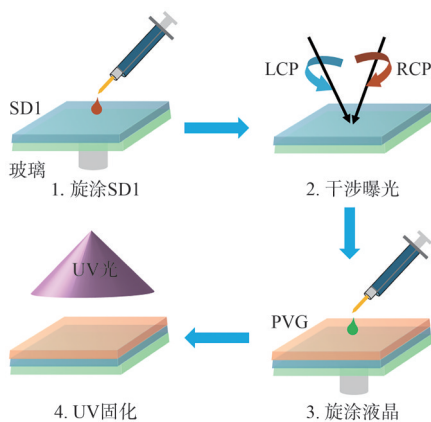


图5 液晶偏振体光栅制备流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the fabrication process for liquid crystal polarization volume gratings

手性掺杂剂 S/R5011、光引发剂 Irgacure 651 和溶剂 PGMEA 按照质量百分比 20%:0.21%:0.3%:79.49% 制备而成。

步骤4. 为使手性液晶层更好地自组装,将已旋涂的样品放置在 60 °C 的热台上加热 30 s。最后用紫外光进行固化成膜(功率密度为  $1 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  的紫外光照射 5 min)。重复步骤 2~4,完成玻璃背面 PVG 的制备。

为实现出瞳光栅的规则化成型,本文采用图形化掩膜辅助的选择性保留工艺。首先,根据 CAD 设计的尺寸和位置,1:1 打印定位图纸。将光波导样品精确对准图纸,用裁纸刀沿矩形边界刻划定位。随后,用纸巾覆盖非目标光栅区域,以去离子水浸润 10 min,使水充分渗透。浸润完成后,轻轻揭去纸巾,非目标光栅随之剥离,最终在预设位置形成轮廓清晰、边界规整的矩形出瞳光栅结构。

#### 4 光波导样品及其 AR 成像

图 6(a)和图 6(b)分别展示了光波导的正面和反面实物图。两个入瞳光栅 L-G<sub>1</sub>、R-G<sub>1</sub> 为直径 2 mm 的圆(紫色虚线圆圈标记)。两个矩形出瞳光栅 L-G<sub>0</sub>、R-G<sub>0</sub> 的尺寸为 28 mm × 22 mm(红色虚线圆圈标记)。将波长为 532 nm 的准直激光束垂直入射至耦入光栅区域,经玻璃基板内全内反射传播后,在出瞳位置形成密集且均匀分布的光斑阵列,从而验证了二维交叉分布的出瞳扩展(图 6(c))。为展示 AR 效果,我们使用 LCoS 投影

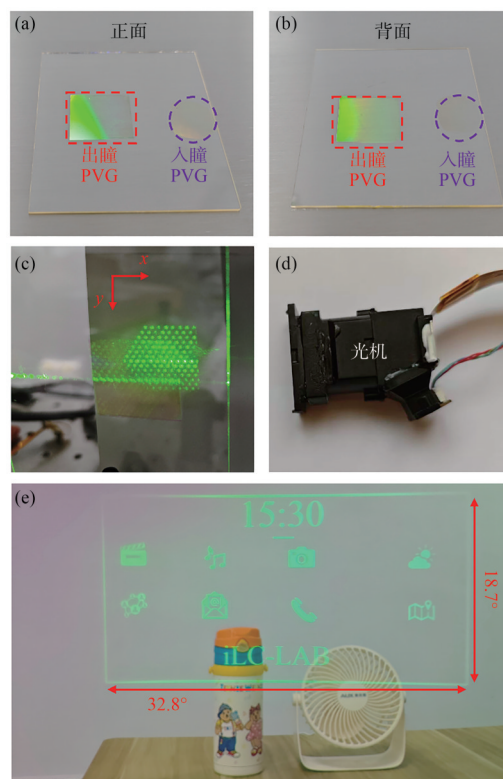


图6 光波导样品及其 AR 成像。光波导正面(a)和反面(b)实物图;(c)二维扩瞳光瞳点;(d)LCoS 图像源;(e)成像效果图。

Fig. 6 Optical waveguide sample and its AR imaging. Physical images of the front (a) and back (b) of the optical waveguide; (c) Two-dimensional array of pupil point; (d) LCoS image source; (e) Imaging rendering.

虚拟信息,且光源中心波长为 532 nm(图 6(d))。为了模拟人眼观看,将相机放置在距离出瞳光栅 15 mm 的位置捕获虚拟图像。显示的全视图图像如图 6(e)所示,投影的虚拟信息和背景信息清晰可见。经计算,水平视场角为 32.8°,垂直视场角为 18.7°,对角线视场角为 37.8°。

如表 1 所示,将本文实验结果与参考研究<sup>[22]</sup>对比,结果表明,本文的研究方案在指标上整体优

表 1 技术指标对比

Tab. 1 Key metrics comparison

	本文方案	现有交叉 PVG 波导
视场角	37.8°	30.0°
出瞳范围	21 mm × 16 mm	18.2 mm × 17.3 mm
波导厚度	1.1 mm	1.4 mm
光效	7.00%	3.85%

于后者。

## 5 结 论

本文提出了一种基于单层高折射率玻璃基板正反双面制备偏振体光栅(PVG)光波导的创新方法,成功实现了衍射光波导的二维光瞳扩展与视场角提升。该方法通过在耦合端和耦合端位置的正反两面直接制备 PVG 结构(L-G<sub>0</sub>/R-G<sub>0</sub>, L-G<sub>0</sub>/R-G<sub>0</sub>),彻底省去了胶合工艺,不仅避免了选择折射率匹配胶水和基底材料的难题,显著降

低了制备的复杂性与成本,同时提升了基于交叉性 PVG 光波导系统的成像质量,还利用高折射率玻璃有效增大了视场角。实验测试得到二维出射光瞳在出瞳位置沿  $x$  和  $y$  方向均匀扩展;实现的视场角达水平 32.8°、垂直 18.7°、对角线 37.8°,其中对角线视场角较前期研究<sup>[22]</sup>(30°)提升了 26%。这些结果表明,所提方法有效实现了更简洁的二维扩瞳光波导制备及显著的视场扩展,在推动 AR 头戴近眼显示技术的实际应用方面具有广阔前景。后续研究可通过叠层光波导架构和相位设计,实现消色差和节能的 AR 显示<sup>[34-35]</sup>。

## 参 考 文 献:

- [1] 周婷,乔文,华鉴瑜,等. 增强现实抬头显示现状与展望[J]. 激光与光电子学进展,2023,60(8):0811008.  
ZHOU T, QIAO W, HUA J Y, *et al.* Status and prospect of augmented reality head-up display [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(8): 0811008. (in Chinese)
- [2] 邹鑫,徐子涵,蒙翠玲,等. 光场操控新范式:液晶多维动态赋能[J]. 液晶与显示,2025,40(10):1391-1422.  
ZOU X, XU Z H, MENG C L, *et al.* New paradigm for light field manipulation: liquid crystal empowered multidimensional dynamic control [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2025, 40(10): 1391-1422. (in Chinese)
- [3] WANG Y F, YUAN C L, HUANG W B, *et al.* Programmable jigsaw puzzles of soft materials enabled by pixelated holographic surface reliefs [J]. *Advanced Materials*, 2023, 35(13): 2211521.
- [4] CARMIGNIANI J, FURHT B, ANISETTI M, *et al.* Augmented reality technologies, systems and applications [J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2011, 51(1): 341-377.
- [5] 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.
- [6] CAMERON A A. Optical waveguide technology and its application in head-mounted displays [C]//*Proceedings of SPIE 8383, Head- and Helmet-Mounted Displays XVII; and Display Technologies and Applications for Defense, Security, and Avionics VI*. Baltimore: SPIE, 2012: 83830E.
- [7] ZHANG L, ZHOU L Y, ZHOU W C, *et al.* Design, fabrication and testing of a compact large-field-of-view infrared compound eye imaging system by precision glass molding [J]. *Precision Engineering*, 2020, 66: 87-98.
- [8] 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. (in Chinese)
- [9] 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.
- [10] DING Y Q, YANG Q, LI Y N Q, *et al.* Waveguide-based augmented reality displays: perspectives and challenges [J]. *eLight*, 2023, 3(1): 24.
- [11] 程德文,倪栋伟,吕鑫,等. 大视场二维扩瞳全息光栅波导设计与加工[J]. 光学学报,2024,44(2):0222001.  
CHENG D W, NI D W, LÜ X, *et al.* Design and fabrication of 2D exit pupil expansion holographic grating waveguide with large field of view [J]. *Acta Optica Sinica*, 2024, 44(2): 0222001. (in Chinese)
- [12] SHISHOVA M, ZHERDEV A, ODINOKOV S, *et al.* Selective couplers based on multiplexed volume holographic gratings for waveguide displays [J]. *Photonics*, 2021, 8(7): 232.
- [13] YIN K, HE Z Q, XIONG J H, *et al.* Virtual reality and augmented reality displays: advances and future perspectives [J]. *Journal of Physics: Photonics*, 2021, 3(2): 022010.

- [14] 白梓嫣,蔡文锋,成茗,等. 液晶偏振体光栅及其在增强现实波导显示中的应用[J]. 液晶与显示, 2024, 39(5): 629-645.  
BAI Z Y, CAI W F, CHENG M, *et al.* Liquid crystal polarization volume gratings and their applications in augmented reality waveguide displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 629-345. (in Chinese)
- [15] 朱嘉昕,罗丹. 视网膜投影AR近眼显示研究进展[J]. 液晶与显示, 2024, 39(5): 656-671.  
ZHU J X, LUO D. Research progress on retinal projection AR near-eye displays [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(5): 656-671. (in Chinese)
- [16] 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.
- [17] AMITAI Y. Extremely compact high-performance HMDs based on substrate-guided optical element [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2004, 35(1): 310-313.
- [18] GU Y C, WENG Y S, WEI R, *et al.* Holographic waveguide display with large field of view and high light efficiency based on polarized volume holographic grating [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2022, 14(1): 7003707.
- [19] YAN X D, WANG J W, ZHANG W, *et al.* Gradient polarization volume grating with wide angular bandwidth for augmented reality [J]. *Optics Express*, 2023, 31(21): 35282-35292.
- [20] GREY D, TALUKDAR S. Exit pupil expanding diffractive optical waveguiding device: US, US10359635B2 [P]. 2019-07-23.
- [21] YANG Q, DING Y Q, WU S T. Full-color, wide field-of-view single-layer waveguide for augmented reality displays [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2024, 32(5): 247-254.
- [22] WENG Y S, ZHANG Y N, WANG W, *et al.* High-efficiency and compact two-dimensional exit pupil expansion design for diffractive waveguide based on polarization volume grating [J]. *Optics Express*, 2023, 31(4): 6601-6614.
- [23] DING Y Q, GU Y C, YANG Q, *et al.* Breaking the in-coupling efficiency limit in waveguide-based AR displays with polarization volume gratings [J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13(1): 185.
- [24] 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 technologies applied for full-color waveguide displays [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [25] BELYAKOV V A, DMITRIENKO V E, ORLOV V P. Optics of cholesteric liquid crystals [J]. *Soviet Physics Uspekhi*, 1979, 127(2): 64-88.
- [26] 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.
- [27] NYS I, STEBRYTE M, YE Y, *et al.* Tilted chiral liquid crystal gratings for efficient large-angle diffraction [J]. *Advanced Optical Materials*, 2019, 7(22): 1901364.
- [28] HONG Q, WU T X, WU S T. Optical wave propagation in a cholesteric liquid crystal using the finite element method [J]. *Liquid Crystals*, 2003, 30(3): 367-375.
- [29] 崔静怡. 偏振体光栅全息波导系统的二维扩瞳研究[D]. 南京:东南大学, 2021.  
CUI J Y. Research on two-dimensional exit pupil expansion of polarization volume grating holographic waveguide system [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [30] 刘皓天. 偏振体光栅全息波导显示的成像仿真研究[D]. 南京:东南大学, 2021.  
LIU H T. Research on imaging simulation of polarization volume grating holographic waveguide display [D]. Nanjing: Southeast University, 2021. (in Chinese)
- [31] CHEN P, WEI B Y, HU W, *et al.* Liquid-crystal-mediated geometric phase: from transmissive to broadband reflective planar optics [J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(27): 1903665.
- [32] 袁方,谭庆贵,王光耀,等. 基于液晶偏振光栅的快速大角度光束偏转[J]. 液晶与显示, 2022, 37(11): 1411-1419.  
YUAN F, TAN Q G, WANG G Y, *et al.* Fast and large-angle optical beam deflection based on liquid crystal polarization grating [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2022, 37(11): 1411-1419. (in Chinese)
- [33] ZHENG Y, WANG D, JIANG Z, *et al.* Continuous zoom compound eye imaging system based on liquid lenses [J].

*Optics Express*, 2021, 29(23): 37565-37579.

- [34] ZHANG D W, XU C T, CHEN Q M, *et al.* Cascaded chiral birefringent media enabled planar lens with programmable chromatic aberration [J]. *Photonix*, 2024, 5(1): 17.
- [35] ZHANG D W, GUO Z H, XU C T, *et al.* Colorless and unidirectional diffractive-type solar concentrators compatible with existing windows [J]. *Photonix*, 2025, 6(1): 20.

作者简介:



钟梁志煌,男,硕士研究生,2023年于长春理工大学获得学士学位,主要从事增强现实显示方面的研究。E-mail: 12332146@mail.sustech.edu.cn



罗丹,男,博士,研究员,教授,2012年于新加坡南洋理工大学获得博士学位,主要从事增强现实显示、液晶光电器件、液晶弹性体执行器的研究。E-mail: luod@sustech.edu.cn



陈全明,男,博士,2023年于南京大学获得博士学位,主要从事液晶光学、增强现实显示的研究。E-mail: chenqm@sustech.edu.cn