

文章编号 1004-924X(2026)01-0035-09

高性能几何光波导头戴显示器设计

许恒深, 姜玉婷, 胡跃强*

(湖南大学 机械与运载工程学院 国家高效磨削中心, 湖南 长沙 410082)

摘要:为满足增强现实对光波导在大视场角、轻薄化及高沉浸感方面的需求,设计了一种基于阵列式几何薄膜光波导结构的可量产化轻薄型透射式头戴显示器光学系统。该系统由目镜系统、阵列波导系统和照明系统组成。阵列波导结构采用具有定制化角度选择膜系的半透半反薄膜阵列作为光学组合器,实现了出瞳扩展。通过“双半波片”偏振混合设计,将显示均匀性从单一偏振光的 59.66%~61.12% 提升至 76.61%(实际测试)。采用系统的光学仿真与设计方法,依托国内成熟的光学加工链(包括精密切割、研磨抛光、复杂膜系真空镀膜及精密胶合工艺),同时新增半波片贴膜工序,成功突破了阵列光波导量产化关键技术难点,制备出样机并实现量产。该设计解决了 AR 头戴显示器性能与量产难兼顾的问题,满足消费级与工业级应用需求。

关键词:光波导;近眼显示技术;光学设计;增强现实;头戴显示器

中图分类号:TN252 **文献标识码:**A

doi:10.37188/OPE.20263401.0035

CSTR:32169.14.OPE.20263401.0035

Design of high-performance geometric waveguide head-mounted displays

XU Hengshen, JIANG Yuting, HU Yueqiang*

(National Research Center for High-Efficiency Grinding, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

* Corresponding author, E-mail: huyq@hnu.edu.cn

Abstract: To satisfy augmented reality (AR) optical waveguide requirements for a large field of view (FOV), thin and lightweight form factor, and high immersion, a mass-producible thin-lightweight transmissive head-mounted display (HMD) optical system based on an arrayed geometric thin-film waveguide architecture was designed and implemented. The system comprises an eyepiece, an arrayed waveguide module, and an illumination module. The arrayed waveguide employs an array of semi-transparent, semi-reflective films with customized angle-selective coatings as the optical combiner, enabling pupil expansion. A dual-waveplate polarization-mixing scheme was introduced, improving display uniformity from 59.66% to 61.12% under single-polarized illumination and to 76.61% in practical measurements. Through comprehensive optical simulation and system-level optimization, and supported by a mature domestic optical manufacturing chain-including precision cutting, grinding and polishing, vacuum deposition of complex multilayer films, and high-precision bonding-together with an added waveplate lamination process, key

收稿日期:2025-08-08;修订日期:2025-09-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 62275078)

technical barriers limiting the mass production of arrayed waveguides were overcome. A prototype was fabricated, and mass production was achieved. The proposed approach resolves the longstanding trade-off between optical performance and manufacturability in AR HMDs, supporting both consumer and industrial applications.

Key words: waveguide; near-eye display technology; optical design; augmented reality; head-mounted display

1 引 言

近年来,增强现实(Augmented Reality, AR)技术^[1]成为一个炙手可热的研究方向,它具有实时交互性良好、信息集成度高及便携性等优点,在工业、军事、娱乐、医疗、交通运输等领域具有广泛的应用前景。作为虚拟现实技术的一个重要分支,AR技术是对现实世界的补充。它允许将2D或3D虚拟数字信息叠加到一个人的真实世界中,从而实现增强现实的作用,被视为一种革命性的技术,且可以重新定义人们与虚拟数字信息的交互方式^[2]。

AR显示器的理想形式是一种轻量级的穿透式头戴显示器,它可以将数字信息光学叠加到人们看到的真实世界画面中,并在光学上保持对真实环境的清晰透视观察。近年来,随着谷歌眼镜(Google glass)的问世,越来越多专家学者以及公司研发团队开始致力研发用于增强现实的轻量级穿透式头戴显示器^[3]。其中,光学中继系统是衔接图像和人眼的核心元件,常见的中继方式有光学波导、衍射光栅、全息光学、自由曲面棱镜^[4]和离轴非球面等^[5-6]。国内外研究人员对各种光学中继系统进行了系统研究。2007年,程德文^[7]等对轻型大视场自由曲面棱镜头盔的光学结构进行了设计。2010年,佟静波^[8]等提出了离轴双通道头盔显示器的光学系统设计。2018年,许建^[9]等提出了表面凹凸型波导增强现实显示器。由于棱镜型显示光学系统存在视场角小的问题,现有技术通常采用离轴非球面构成折反射系统,以实现大视场角的效果,但这种系统一般会产生很大的垂轴像差和场曲,使得虚拟画面变形,进而影响用户体验。另外,现有的技术装置一般体积较大,并且受限于设计原理难以进一步减小尺寸,从而导

致便携性明显不足,与AR对轻量化和便携性的需求相悖。自由曲面棱镜技术虽具有较大的视场角和眼眶,但其光学系统结构复杂,自由曲面加工困难,很难保证成品的成像质量;并且随着视场角的增大,其自由曲面棱镜的厚度也跟着增大,这不仅不利于轻型化设计,还导致效率降低,对环境适应性变差。尽管全息波导系统厚度能低至1 mm,但该技术的发展目前还不成熟,不仅清晰度和均匀性比较低,使用环境苛刻,而且由于光能利用率低和高色散性,在设计光学系统时需要高亮度的图像源和高单色性的光源。目前,可实现量产化的AR头戴式显示商品,如谷歌眼镜采用的棱镜普遍厚度在10 mm左右,视场角仅15°,戴上眼镜后,往往只能看到一个极为袖珍的图像^[10]。爱普生的自由曲面棱镜^[11]和韩昕彦设计的采用层叠阵列波导结构的光学系统^[12],以及Meta的半反半透曲面方案,虽然提升了视场角,但其体积和厚度仍然难以缩减,画面效果、透过性也都一般,很难产生好的AR透视视觉效果。以微软HoloLens为代表的全息光波导在色彩均匀性和视觉饱和度上均不及阵列光波导,而目前除微软HoloLens外,这类方案仍难以实现量产。除光波导系统以外的传统光学方案目前普遍被视为过渡性方案,并未实现根本性突破。因此,光波导已成为消费级AR显示器技术的核心和基础,但光波导模组当前的核心瓶颈在于量产,高精度的玻璃冷加工工艺、极其复杂的膜系设计、近百层纳米级膜厚的精确控制、层叠斜面棱镜的精确贴合等复杂工艺技术,严重制约了光波导模组的大规模生产。

本文在分析各种光学系统的缺陷和产业化目标的基础上,针对增强现实系统对光波导大视场、体积轻薄小巧、沉浸感强的需求,基于阵列式

几何光波导系统原理,取得了关键技术突破。利用“双半波片”偏振混合设计提升显示均匀性,结合国内成熟供应链的工艺优势,成功实现可量化的轻薄型、大视场彩色显示的透射式头戴显示器,不仅在显示效果上保持了较大的视场角与清晰饱和的图像,也更契合消费领域的产品化需求。

2 原理

阵列式几何薄膜光波导的主要结构由具有角度选择的膜系构成,是透射式头戴眼镜的重要组成部分。该方案可以实现目镜系统出瞳的扩展,从而在很薄的厚度下实现较大的视场,并且具有结构紧凑、无鬼像、易加工、不受使用环境限制等优点,因此适用于AR光学系统。本文采用阵列式几何薄膜光波导原理进行光学设计,其主要原理结构如图1所示,波导由耦合棱镜和各分光棱镜组成,各分光棱镜胶合面镀有分光膜。分光膜的本质是“半透半反膜”,每片膜对入射光的处理分为两部分:一部分反射出波导进入人眼;一部分继续在波导内全反射,从而实现扩瞳。其中,波导的折射率、厚度、分光膜的数量、角度、膜系、眼盒、出瞳距离等是波导设计的主要参数。

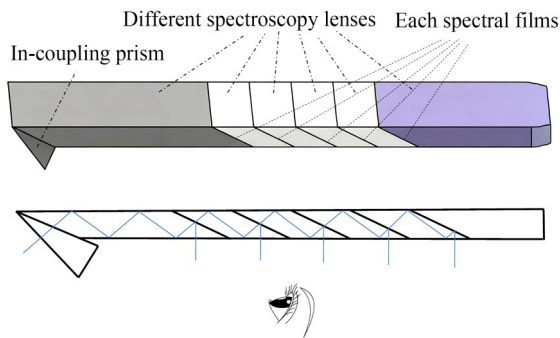


图1 半透半反阵列式几何光波导结构及扩瞳示意图

Fig. 1 Schematic diagram of semitransparent/semi-reflective arrayed geometric waveguide and its exit-pupil expansion

2.1 波导片几何设计原理

如图2(a)所示,耦合棱镜和分光棱镜的角度记为 θ ,棱镜厚度记为 h ,波导折射率为 n ,出瞳距

离记为 H ,扩瞳方向眼盒记为 L_1 ,扩瞳方向视场角记为 $2f_{\text{air}}$,分光膜数量为 N 。

根据图2(a)中的几何关系可得, $L = Nh/\tan\theta$, $L_1 = L - 2H\tan(f_{\text{air}}) = Nh/\tan\theta - 2H\tan(f_{\text{air}})$ 。

波导的折射率越高,能够容纳的视场角越大,但利用胶合工艺的波导片,受限于胶水的折射率。目前,工艺成熟材料的最高折射率约为 $n=1.58$ (BaK5)。

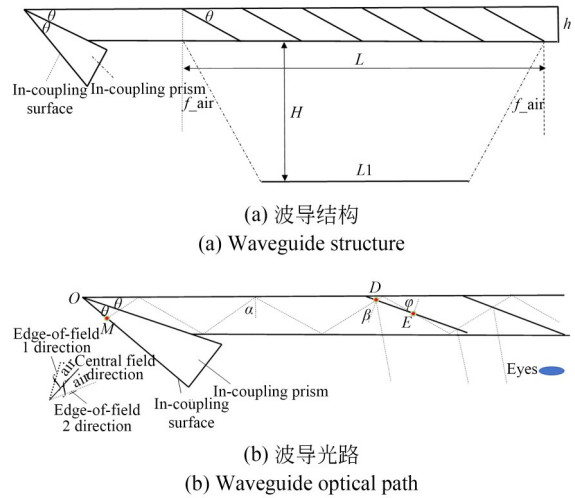


图2 波导结构和光路

Fig. 2 Waveguide structure and optical path

由图2(b)可知, $\alpha = 2\theta \pm f_{\text{glass}}$ 。其中, $f_{\text{glass}} = \text{asin}(\sin f_{\text{air}}/n)$,为折射入波导内的角度。为了保证全反射条件, $\alpha = 2\theta - f_{\text{glass}} > \text{asin}(1/n)$,则 $\theta > [\text{asin}(1/n) + f_{\text{glass}}]/2$ 。

图2(b)中, $|M_1M_2|$ 和 $|N_1N_2|$ 为边缘视场对应的有效光束尺寸范围,对于每一个视场,超出对应的有效光束尺寸范围无法进入波导。很显然,不同视场在耦合面上的有效光束尺寸范围不对称。

如果本文对应系统的设计目标为:视场角 40° ,16:9侧入式,波导折射率1.58,则扩瞳方向的视场角 $2f_{\text{air}} = 4016/\sqrt{(16^2 + 9^2)} = 34.86^\circ$,则 $f_{\text{air}} = 17.43^\circ$, $f_{\text{glass}} = 10.93^\circ$, $\theta > 25.1^\circ$ 。根据 L_1 的计算公式可得, θ 越小, L_1 越大,因此确定 $\theta = 25.5^\circ$ 。在当前加工工艺下,几何波导片的厚度定为 $h = 1.5 \text{ mm}$ 。

不同 H ,不同 N 对应的眼盒如表1所示。经

表 1 出瞳距离与眼盒的对应关系

Tab. 1 Relationship between eye box and eye relief(mm)

H	$N=4, L_1$	$N=5, L_1$	$N=6, L_1$
14	3.79	6.93	10.08
16	3.16	6.31	9.45
17	1.90	5.05	8.19

统计,国内双目距离约为 56~72 mm,则对应眼盒 $L_1 > (72 - 56)/2 = 8$ mm。因此,此时 $N \geq 6$,且 $H \leq 17$ mm。 N 确定为 6,即有 6 个分光膜。

2.2 波导片膜系要求

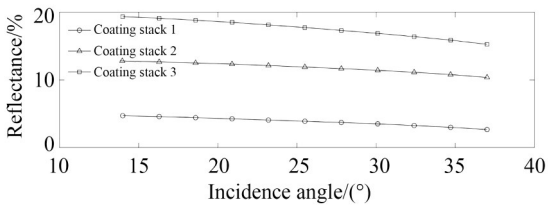
系统采用 LCOS 光机,输出偏振光,照明光源 LED 光谱覆盖 420~670 nm,亮度越高,功耗越高。假设光机的出光亮度可调整为 10 000 nits,为了保证 1 000 nits 的最高亮度,波导的光效要求应 $\geq 10\%$ 。

波导内光线在经过某一分光膜时,一部分直接反射出波导(如图中的 D 点处),入射角为 $\beta = \theta \pm f_{\text{glass}} \in [14.57^\circ, 36.43^\circ]$;另一部分,一定概率透过分光膜后经全反射再透射该分光膜(如图中的 E 点处),此时的入射角为 $\varphi = 3\theta \pm f_{\text{glass}} \in [65.57^\circ, 87.43^\circ]$, E 点处的反射率应尽量小,否则会产生光束损失并产生杂散光和鬼像。因此,膜系要求的角度范围有两组:小角度为 $14^\circ \sim 37^\circ$ 及大角度为 $65^\circ \sim 88^\circ$ 。各膜大角度范围的反射率应尽量低($< 3\%$),而小角度 $14^\circ \sim 37^\circ$ 内的反射率,符合一定的要求,使得各分光面的有效反射率 $\geq 10\%$ 且尽量均匀。

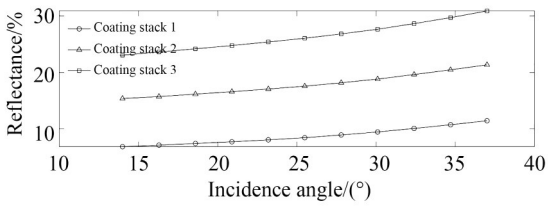
2.3 波导片膜系偏振混合优化原理

为了减小波导镀膜工艺的难度和成本,6 个分光膜采用 3 个膜系,第 1~2 分光膜采用膜系 1,第 3~4 分光膜采用膜系 2,第 5~6 分光膜采用膜系 3。

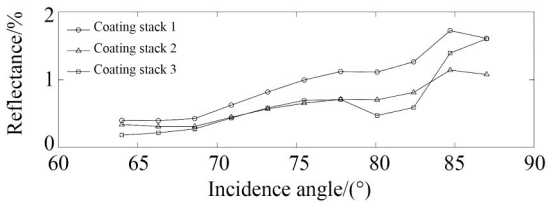
LCOS 出射的光为偏振光,可选择 p 光或 s 光。图 3(a)~3(d)为设计的 3 个膜系的参数,分别表示 p 光和 s 光在小角度范围和大角度范围的反射率。由图 3 可知,p 光和 s 光在同一片分光膜上的反射率,在小角度范围内趋势是相反的:p 光单调递减,s 光单调递升。



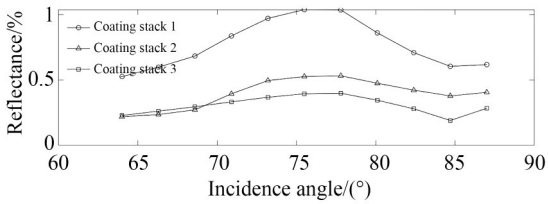
(a) p 光小角度
(a) p-polarized light at small angle



(b) s 光小角度
(b) s-polarized light at small angle



(c) p 光大角度
(c) p-polarized light at large angle



(d) s 光大角度
(d) s-polarized light at large angle

图 3 p/s 光不同入射角的反射率

Fig. 3 Reflectance of p/s-polarized light at different incidence angles

波导光效计算时,假设人眼位于波导片眼盒中心, $H=16$ mm,且人眼直径为 3.6 mm,根据图 3 的膜系,仿真得到:系统分别采用 p 光和 s 光时不同视场(对应不同分光膜入射角 β)的光效(即有效反射率),分别如图 4(a)和 4(b)所示。

如图 4 所示,均匀性分别为 $5.92/9.85=59.9\%$ 和 $9.12/13.03=70\%$,且不同视场光效的

趋势类似于图 3(a)和 3(b):p 光和 s 光都是相反的。因此,考虑将 p 光和 s 光进行混合来中和单调的趋势。

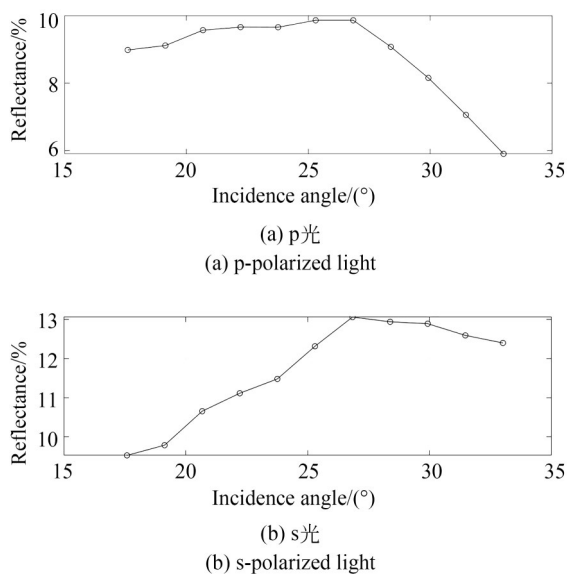


图 4 p/s 光不同视场光效

Fig. 4 Optical efficiency of p/s-polarized light at different FOVs

将图 3(a)和 3(b)中的 p 光和 s 光按照 7:3 的比例混合,结果如图 5(a)所示。此时,混合光的

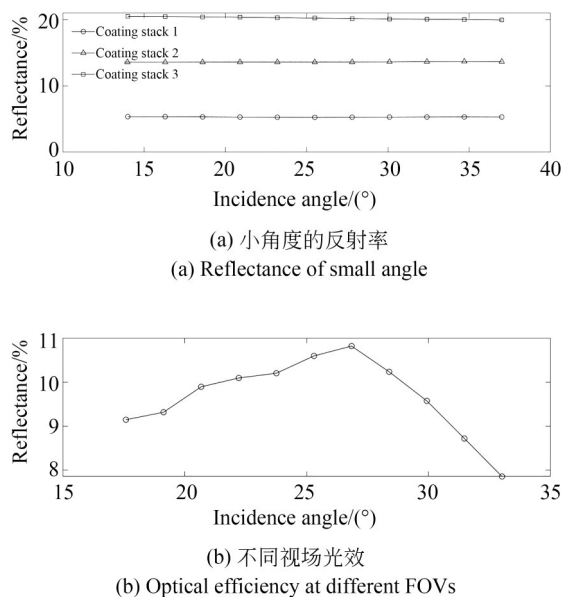


图 5 p+s(7:3)光不同视场光效

Fig. 5 Optical efficiency of p+s(7:3)-polarized light at different FOVs

反射率随着入射角的增加,近似不变;而且波导片的反射率均 $<20\%$,即透过率均 $>80\%$ 。

根据图 5(a)的反射率,仿真得到中心眼盒位置处不同视场的光效,如图 5(b)所示。p 光和 s 光混合光对应的均匀性为 $7.91/10.65=74.3\%$,相对于 p 光和 s 光,均匀性有所提升。一方面,说明混合方案有效;另一方面,中心视场还是偏高,因此混合方案还需进一步优化。

2.4 波导片膜系偏振混合方案

本文对波导的耦合面进行了改进,在光机和波导的耦合区域的部分空间贴了一层半波片(半波片与光束的振动方向成 45° 夹角,可达到 p 光和 s 光相互转换的目的),进而实现 p 光和 s 光混合的目的,具体如图 6 所示。

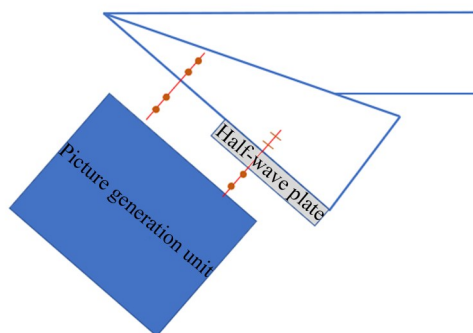


图 6 耦合区域结构优化

Fig. 6 Optimization of in-coupling region structure

经过图 6 的结构,光机出射的光线会分为两组,一组维持 s 光不变射入波导内,另一组会从 s 光先转变为 p 光再射入波导内。

观察图 5(b)可知,中心视场的有效光效偏大,边缘视场偏小。不同视场在耦合面的有效光束范围不对称,因此,可以通过优化半波片的位置和尺寸来达到光效均匀的目的。

经优化,将半波片分为 2 部分,宽度均为 1 mm,以图 2(b)中的 O 点为起始,双半波片分别位于耦合面的 0.5~1.5 mm 和 2.5~3.5 mm 处。该情况下,仿真得到中心眼盒位置处不同视场的均匀性如图 7 所示,对应的均匀性为 $9.37/9.84=95.2\%$,相对于 p 光和 s 光均匀性分别提高 35.2% 和 25.2% 。

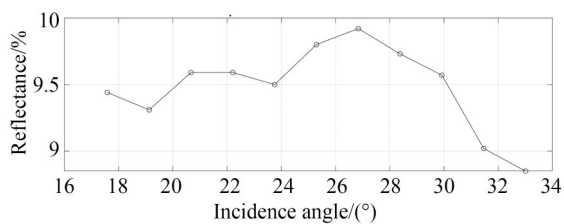


图7 双半波片在不同视场的光效

Fig. 7 Optical efficiency of dual half-wave plates at different FOVs

2.5 波导片制备

采用国内先进的加工和设备以及成熟的生产链,对光波导制备工艺进行了改进和完善,推动其实现低成本的量产化,光波导制备工艺流程如图8所示。优化后的波导只是在原有波导的镀膜工艺上增加了半波片贴膜的工序,不影响量产性。

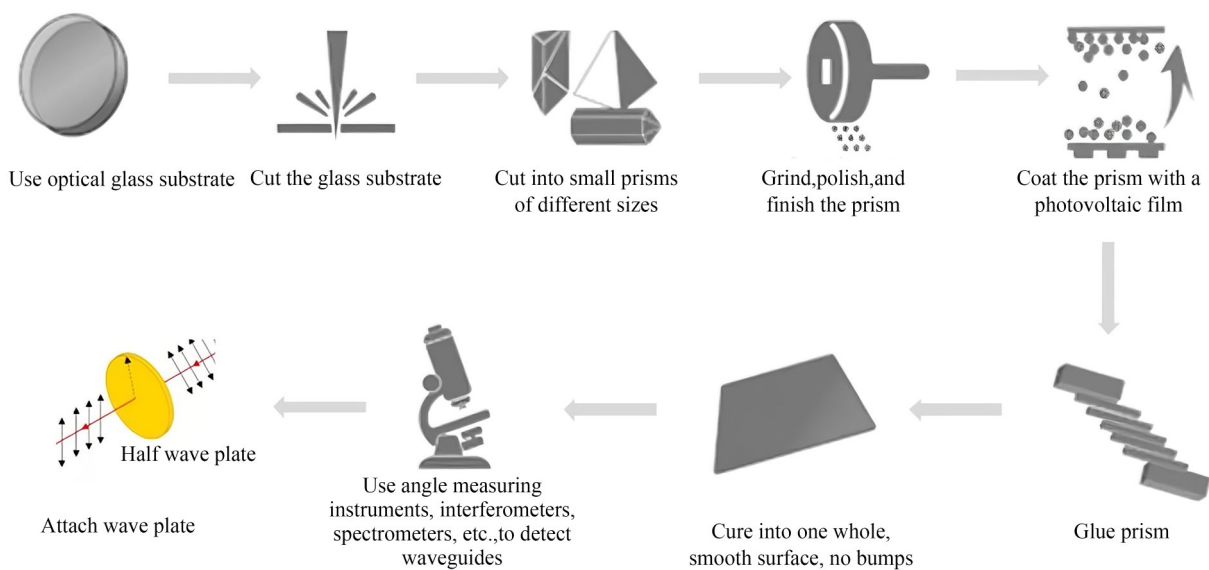


图8 光波导片制备工艺流程

Fig. 8 Preparation process flow of optical waveguide plates

3 系统装配和测试

3.1 光学系统设计

基于阵列式波导的穿透式头戴显示器完整的光学结构如图9所示,其中包含目镜系统、阵列式波导系统和照明系统。光机透镜采用4片直射式,性能如图10所示。

照明系统引入偏光分束器,采用发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)配合两片准直透镜进行照明,同时采用反射式硅基液晶(Liquid Crystal on Silicon, LCoS)作为显示芯片。LCoS采用的空间光调制器是以液晶光电效应为基础的反射式液晶光阀,可以调制光的偏振态。在Zemax软件中对系统进行仿真优化,当照明光斑的尺寸大于微显

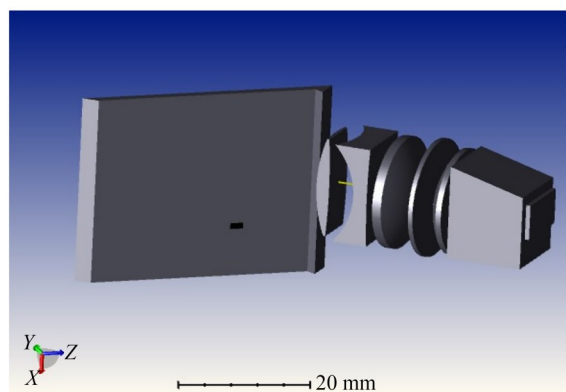


图9 穿透式头戴显示器光学系统

Fig. 9 Optical system of see-through head-mounted display

示芯片 LCoS 的有效区域时,能防止边缘出现暗角,通过 ANSI 九点法计算可得空间均匀性大于 85%,如图11所示。

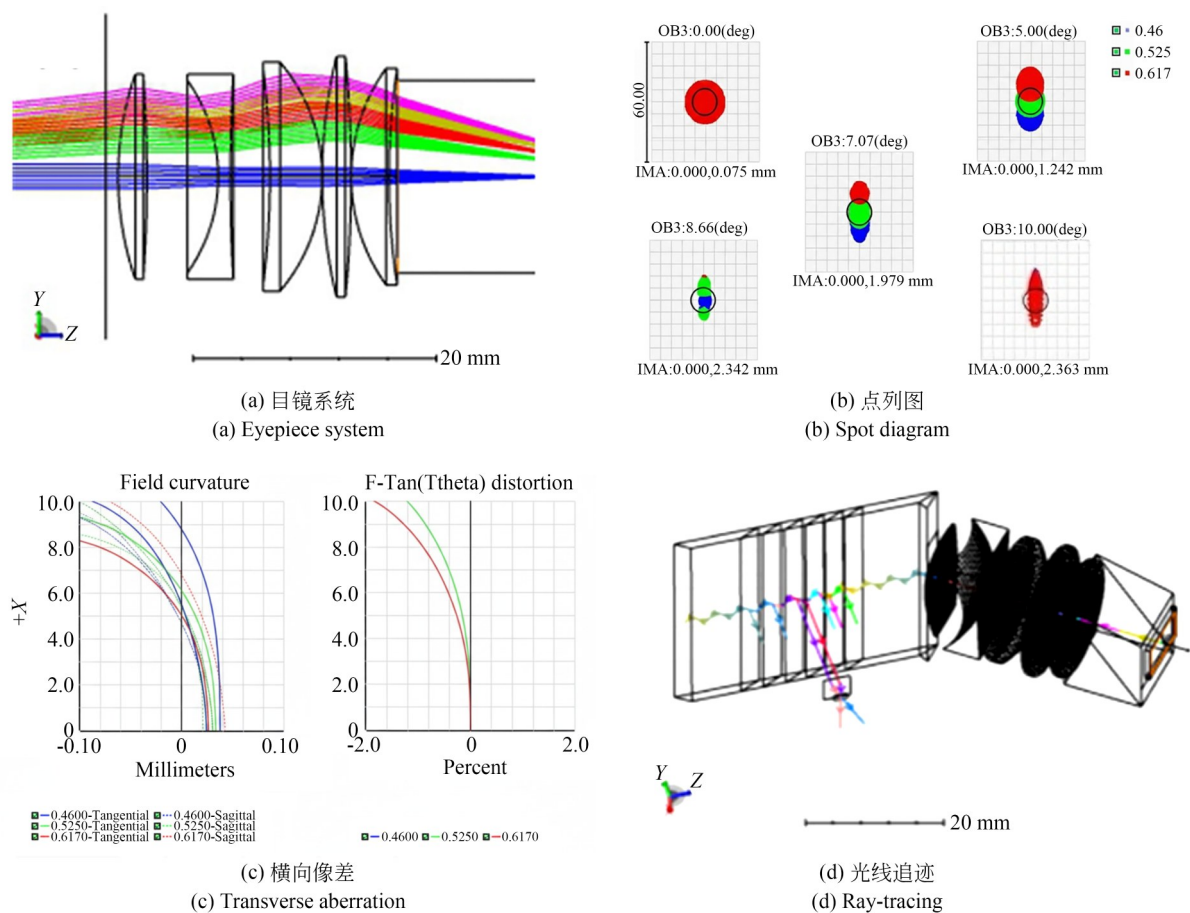


图 10 目镜系统与像差

Fig. 10 Eyeiece system and aberrations

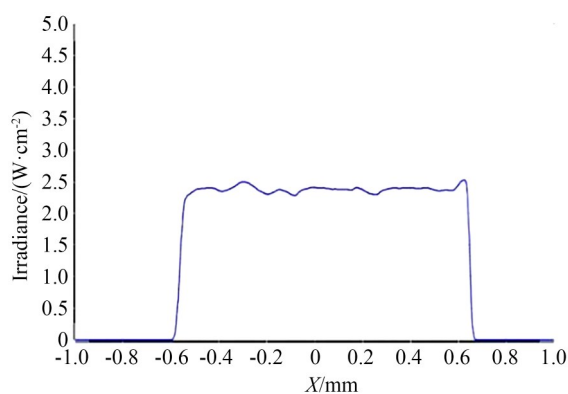


图 11 LCoS 面上的辐照度

Fig. 11 Incident irradiance on LCoS panel

3.2 系统尺寸测量

穿透式几何阵列波导头戴显示器样机实物如图 12 所示。镜片厚度为 1.5 mm, 单个波导片质量低于 5.5 g, 整个光学系统总重约 30 g, 尺寸约为 66 mm × 16 mm × 29 mm。此穿透式头戴显

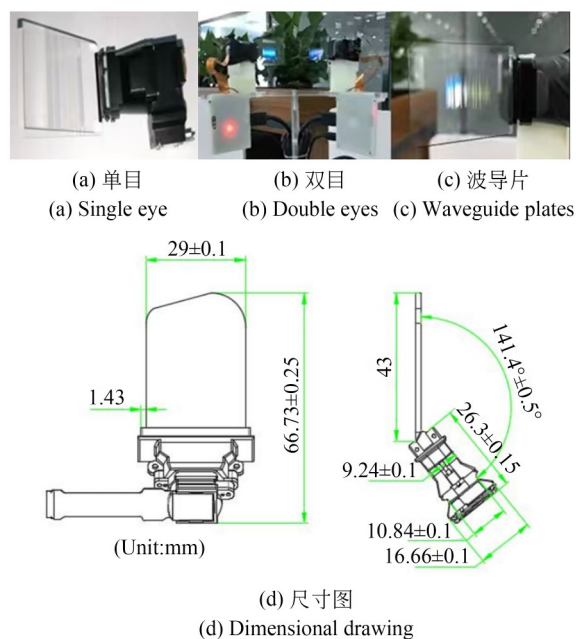


图 12 穿透式头戴式显示器样机

Fig. 12 See-through head-mounted display prototype

示器显示出的 AR 影像如图 13 所示。图像重叠在现实世界的物体上,说明该阵列式光波导头戴显示装置是适用于穿透显示应用。从图 13 可以看出,图像清晰度优异,色彩保真度高,亮度合适不会造成眼睛刺痛感,可推动面向消费领域的产品面世。



图 13 透射式头戴式显示器样机显示图像

Fig. 13 Photos captured through see-through head-mounted display

3.3 系统效果测试

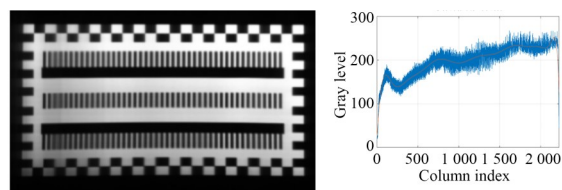
测试时,采用 3 组不同的模组状态:无半波片,全面贴半波片,贴宽度为 1 mm 的双半波片(分别位于耦入面的 0.5~1.5 mm 和 2.5~3.5 mm 处)。将 RGB 相机放置中心眼盒处,分别对 3 种不同状态模组效果进行拍摄,结果如图 14 和表 2 所示。很显然,双半波片方案将实际均匀性从 61.12%(p 光)和 59.66%(s 光),提高至 76.61%。

4 结 论

为了实现增强现实对光波导大视场、体积轻薄小巧及沉浸感强的需求,本文提出了一种可量产化阵列式几何光波导薄膜头戴式显示器,对其进行系统的理论分析和设计仿真,并通过实际样机验证和检测其各项性能。采用阵列式波导结构能使得镜片更轻薄、视场角更大同时实现更好的显示效果,且通过“双半波片”偏振混合设计大幅提升显示均匀性。依托国内成熟产业链,突破光波导量产的工艺壁垒,新增工序不增加成本与复杂度,有望实现规模化生产。

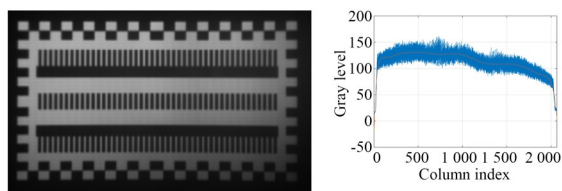
参考文献:

- [1] 熊晶莹,戴明. 适应移动智能设备的目标跟踪器[J]. 光学精密工程, 2017, 25(12): 3152-3159.



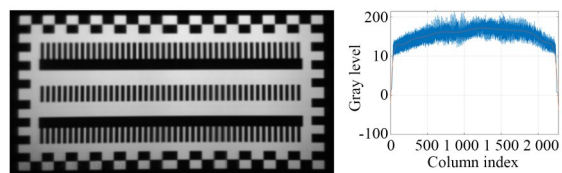
(a) 拍摄图片和s光均匀性分布

(a) Photographs and uniformity distribution of s-polarized light



(b) 拍摄图片和p光均匀性分布

(b) Photographs and uniformity distribution of p-polarized light



(c) 拍摄图片和p+s光均匀性分布

(c) Photographs and uniformity distribution of p+s-polarized light

图 14 拍摄图片和均匀性分布

Fig. 14 Photographs and uniformity distribution

表 2 不同视场的均匀性对比

Tab. 2 Comparison of uniformity in different field of views (%)

模组状态	仿真均匀性	实际均匀性
p 光	70	61.12
s 光	59.9	59.66
双半波片混合光	95.2	76.61

作者贡献声明:

许恒深:研究选题,方案制定,实验验证及论文撰写;

姜玉婷:结构理论分析,实验数据整理,技术支持;

胡跃强:技术指导,论文审阅。

XIONG J Y, DAI M. Design of tracker for mobile smart devices[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(12): 3152-3159. (in Chinese)

- [2] HUA H, JAVIDI B. A 3D integral imaging optical see-through head-mounted display [J]. *Optics Express*, 2014, 22(11): 13484-13491.
- [3] ZHAO K-W, PAN J W. Optical design for a see-through head-mounted display with high visibility [J]. *Optics Express*, 2016, 24(5): 4749.
- [4] 姜洋, 孙强, 谷立山, 等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 508-514.
JIANG Y, SUN Q, GU L SH, *et al.* Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(3): 508-514. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 王健, 刘英, 郭帮辉, 等. 离轴回转对称棱镜式头戴显示器目镜的研制[J]. 光学精密工程, 2012, 20(7): 1421-1426.
WANG J, LIU Y, GUO B H, *et al.* Development of HMD eyepiece with prism of decentered rotationally symmetrical surfaces[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(7): 1421-1426. (in Chinese)
- [7] CHENG D W, WANG Y T, HUA H, *et al.* Design of a wide-angle, lightweight head-mounted display using free-form optics tiling[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(11): 2098.
- [8] 佟静波, 崔庆丰, 薛常喜, 等. 离轴双通道头盔显示器光学系统设计[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2662-2667.
TONG J B, CUI Q F, XUE CH X, *et al.* Optical design of a off-axis dual-channel helmet mounted display[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2662-2667. (in Chinese)
- [9] ZHANG W J, WANG Z F, XU J. Research on a surface-relief optical waveguide augmented reality display device[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(14): 3720-3729.
- [10] OLSSON M I, MARTIN M W. Wearable display device: US, USD716806 S[P]. 2014-11-04.
- [11] TAKAGI M, *et al.* Light guide plate and virtual image display apparatus having the same: US, US8662686 B2[P]. 2014-03-04.
- [12] 韩昕彦, 余飞鸿. 基于层叠阵列波导的穿透式视频眼镜设计[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0522004.
HAN X Y, YU F H. See-through video glass based on cascaded waveguide combiner[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0522004. (in Chinese)

作者简介:



许恒深(1991—),广东深圳人,博士研究生,2016年于韩国 Solbridge 国际商学院获得硕士学位,主要从事微纳光学结构设计及应用的研究。E-mail: 24040331@qq.com

通讯作者:



胡跃强(1992—),男,安徽合肥人,博士,教授,博士生导师,2018年于清华大学获得博士学位,主要从事微纳光学结构设计、制备及应用的研究。E-mail: huyq@hnu.edu.cn