

增强现实显示的偏振不敏感光栅波导研究

申苜弘¹, 杨磊^{1*}, 黄战华^{1,2}, 潘成^{1,2}, 伍圆军¹¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;²天津大学四川创新研究院, 四川 成都 610200

摘要 一般的光栅波导式头戴显示器因偏振敏感不能同时使用横电(TE)偏振光和横磁(TM)偏振光进行成像显示。为解决该问题,基于遗传算法与严格耦合波分析法提出了一种偏振不敏感光栅的设计方法。制作了偏振不敏感的光栅波导,进行了光栅波导的衍射效率测量实验。该光栅工作波长为 532 nm。耦入光栅对 TE 偏振光的平均衍射效率从 6.1% 提高到了 21.0%,对 TM 偏振光的平均衍射效率从 13.7% 提高到了 40.5%,对非偏振光的平均衍射效率从 9.9% 提高到了 30.7%。耦出光栅对 TE 偏振光的平均衍射效率从 3.1% 提高到了 12.1%,对 TM 偏振光的平均衍射效率从 0.8% 提高到了 10.7%,对非偏振光的平均衍射效率从 1.9% 提高到了 11.4%。搭建了显示系统样机,测试表明显示效果清晰明亮。实现了 30°×22°的大视场角,验证了偏振不敏感光栅波导设计方法和非偏振图像源在增强现实领域的可用性,为波导型增强现实系统的研究与发展提供一定的指导作用。

关键词 增强现实显示; 波导光栅; 偏振不敏感光栅; 衍射效率

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.2011018

Polarization-Insensitive Grating Waveguide for Augmented Reality Display

Shen Muhong¹, Yang Lei^{1*}, Huang Zhanhua^{1,2}, Pan Cheng^{1,2}, Wu Yuanjun¹¹Key Laboratory of Optoelectronics Information Technology, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Sichuan Innovation Research Institute of Tianjin University, Chengdu 610200, Sichuan, China

Abstract Transverse electric (TE) polarized light and transverse magnetic (TM) polarized light cannot be used for the display in the general grating waveguide head-mounted display system owing to polarization sensitivity. To solve this problem, a design method for polarization-insensitive grating is proposed, based on a genetic algorithm and rigorous coupled-wave analysis. The method's optical design is based on a wavelength of 532 nm. The average diffraction efficiencies of the in-coupling grating in TE polarized, TM polarized, and non-polarized light increase from 6.1% to 21.0%, 13.7% to 40.5%, and 9.9% to 30.7%, respectively. The average diffraction efficiencies of the out-coupling grating in TE polarized, TM polarized, and non-polarized light increase from 3.1% to 12.1%, 0.8% to 10.7%, and 1.9% to 11.4%, respectively. A prototype of the display system is built, and the test shows that the display is clear and bright. A large field of view of 30°×22° is achieved, revealing the usability of the polarization-insensitive grating waveguide design method and the non-polarization image source in the field of augmented reality. The proposed method can be useful in the research and development of waveguide augmented reality systems.

Key words augmented reality display; waveguide grating; polarization insensitive grating; diffraction efficiency

1 引言

随着新型光学技术的发展,有越来越多的技术能够实现增强现实,目前被业界广泛认可的技术就包含自由曲面技术^[1-2]、平板波导技术、折衍射混合技术^[3-4]

等。平板波导技术是一个统称,又包含同轴半反射镜技术^[5]、级联反射镜阵列波导技术^[6-7]、光栅波导技术^[8-18]等。在这些技术中,使用的图像源可以分为偏振光源与非偏振光源。液晶显示器(Liquid crystal display, LCD)与硅基液晶(Liquid crystal on silicon,

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2021-12-28; 录用日期: 2021-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(61475113)

通信作者: *yanglei@tju.edu.cn

LCOS)的图像源为偏振光源。Mira Prism 和 Meta2 使用的是 LCD 技术, Google Glass、Lumus 与 Optinvent 均使用 LCOS 技术。使用液晶技术进行显示的一维光栅系统在原理上消耗了一半能量, 能量利用率低。近年来, 非偏振光源技术发展迅猛, 如微型有机发光二极管 (Micro organic light emitting diode, Micro-OLED) 与数字光处理 (Digital light processing, DLP) 技术。由 Vuzix 出品的 M3000 使用了 DLP 技术, 但其体积较大, 较难实现小型化。Micro-OLED 具有自主发光、材质轻薄、响应快、功耗低等优点, Nreal Air 就采用了 Micro-OLED 技术。全息光栅波导具有体积小、质量轻、透过率高等优点, 但也有缺点, 如亮度较低导致虚拟画面暗, 不能满足户外显示亮度需求, 画面均一度差, 视场角小。其主要原因在于光栅衍射效率 (DE) 低、衍射效率均一度差, 且光栅的单偏振响应也导致光损耗大、功耗高。为解决该问题, 提出了研究适配非偏

振图像源 Micro-OLED 的偏振不敏感光栅的需求。通过对偏振不敏感光栅的研究, 有望提升衍射效率, 提高系统光能利用率。同时因使用非偏振图像源, 可以减小系统体积, 降低系统质量。本文通过对光栅的仿真与实验, 得到了一种偏振不敏感光栅, 并搭建了结合 Micro-OLED 与偏振不敏感光栅波导的头戴显示系统。

2 光栅波导头戴显示系统的原理

头戴显示器的核心模块包括图像源、镜头以及光栅波导, 如图 1 所示。光从图像源发出, 经镜头被准直成平行宽光束, 再经耦入光栅衍射耦合入波导中。由斯涅尔定律可知, 光在波导与空气的交界处发生全反射, 进而将光约束在波导中。光经耦出光栅衍射, 满足斯涅尔定律的传播条件被破坏, 光被解耦出波导, 再经人眼成像, 人即可观察到图像源显示的像。

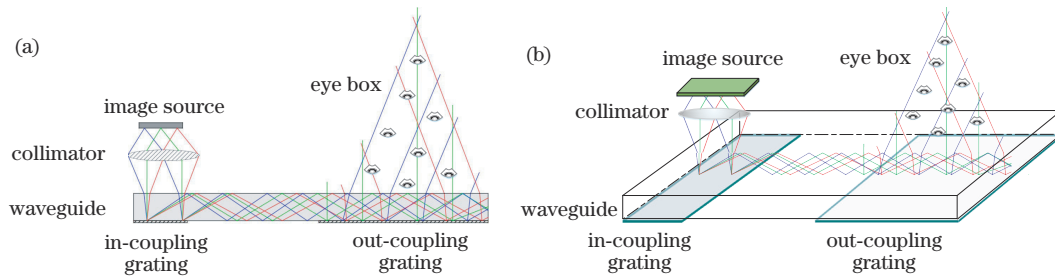


图 1 系统光路图。(a) 正视图; (b) 侧视图

Fig. 1 System light path diagram. (a) Front view; (b) side view

主要研究耦入光栅及耦出光栅部分, 并对系统的显示效果进行仿真与实验验证。因耦入光栅和耦出光栅在系统中起到控制光传播方向的独特作用, 需要光发生衍射时, 主要能量集中在某一衍射级次, 例如当垂直入射时, 光的衍射效率应该一边大一边小, 所以光栅形貌不能为对称结构。为满足高光栅衍射效率及耦出光栅部分对外界光的高透过率等条件, 同时考虑到实际加工困难, 经仿真计算, 使用如图 2 所示的光栅结构并镀

膜。对于耦入光栅, 需要镀二氧化钛 (TiO_2) 以及银 (Ag) 两层膜, 镀 Ag 能够有效提高光栅反射级次的衍射效率。对于耦出光栅, 因需要保证环境光的透过率, 不镀 Ag 膜, 只镀 TiO_2 膜。使用波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 的光进行研究。光栅波导的基底玻璃型号为 ZF13, 在 $\lambda = 532 \text{ nm}$ 处折射率 $n_{\text{wg}} = 1.79532$, 用于压印光栅的胶层折射率为 $n_{\text{g}} = 1.56$, 光栅周期为 416.67 nm , 光栅高度为 130 nm , TiO_2 的折射率为 2.3 , Ag 的折射率为 $0.133 + 3.25i$ 。

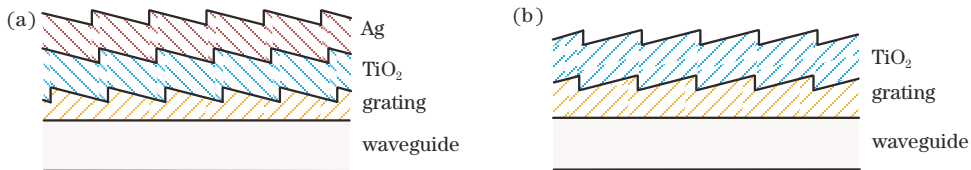


图 2 光栅示意图。(a) 耦入光栅; (b) 耦出光栅

Fig. 2 Schematic diagrams of gratings. (a) In-coupling grating; (b) out-coupling grating

3 偏振不敏感光栅及系统的仿真

仿真基于严格耦合波分析法 (Rigorous coupled wave analysis, RCWA) 对光栅模型进行计算^[19-20]。对于耦入光栅, 镀 TiO_2 以及 Ag 两层膜。如图 3 所示, 当 Ag 层厚度达到 150 nm 后, 再增加厚度, 对于横电 (TE) 偏振光与横磁 (TM) 偏振光的衍射效率曲线几

乎没有影响, 同时为了确保衍射效率能够得到提高, 将 Ag 层厚度定为一个较高的值, 取 400 nm 。

耦入光栅对 TE 偏振光、TM 偏振光、非偏振光的衍射效率 (DE) 与 TiO_2 层厚度的关系如图 4 所示。由图 4 可知, 随着 TiO_2 层厚度增加, 衍射效率曲线呈现一种周期性变化。耦入光栅将光耦入波导, 理论上只需一次衍射, 衍射效率越高越好, 但同时为保证图像均

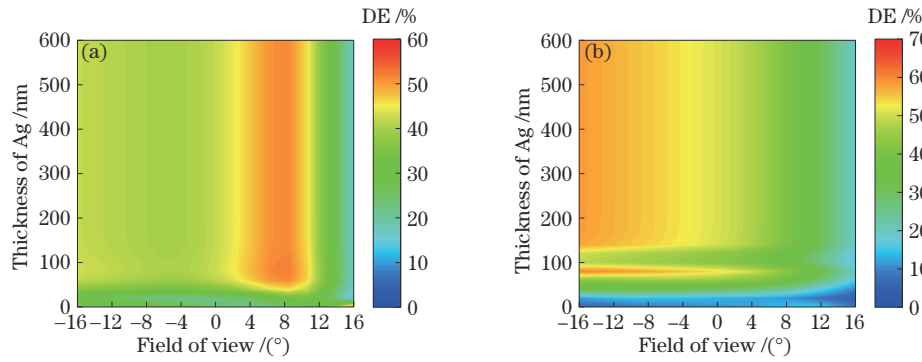


图 3 耦合光栅衍射效率与 Ag 层厚度关系图。(a) TE 偏振光; (b) TM 偏振光

Fig. 3 Diagram of the relationship between the diffraction efficiency of the in-coupling grating and the thickness of Ag. (a) TE polarized light; (b) TM polarized light

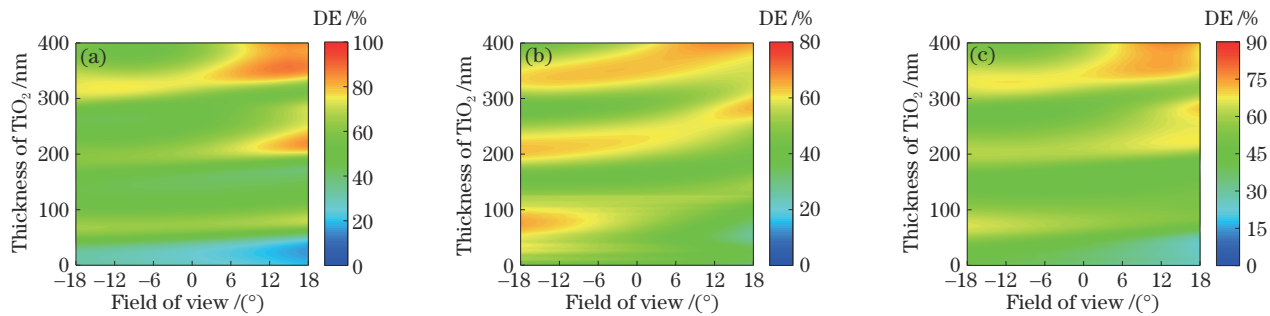


图 4 耦合光栅衍射效率与 TiO₂ 层厚度关系图。(a) TE 偏振光; (b) TM 偏振光; (c) 非偏振光

Fig. 4 Diagram of the relationship between the diffraction efficiency of the in-coupling grating and the thickness of TiO₂. (a) TE polarized light; (b) TM polarized light; (c) non-polarized light

匀性,在视场内衍射效率波动越小越好。从图 4 可知,当 TiO₂ 层厚度过高时,视场边缘处衍射效率过高,图像均匀性将变差。因此 TiO₂ 层厚度不能过高,同时为保证衍射效率较高,膜厚取在 0~100 nm 之间较好。

TiO₂ 层在 0~100 nm 的不同厚度下,对 TE 偏振光、TM 偏振光和非偏振光的衍射效率如图 5 所示。

随着厚度从 0 nm 增长到 100 nm,衍射效率曲线整体呈现从低到高再到低的变化趋势。从图 5 可知,TE 偏振光与 TM 偏振光的衍射效率随着镀膜厚度增加均有提高。衍射效率较高时,TE 偏振光与 TM 偏振光的衍射效率均在 60% 左右,较为接近,且衍射效率曲线都比较平稳。

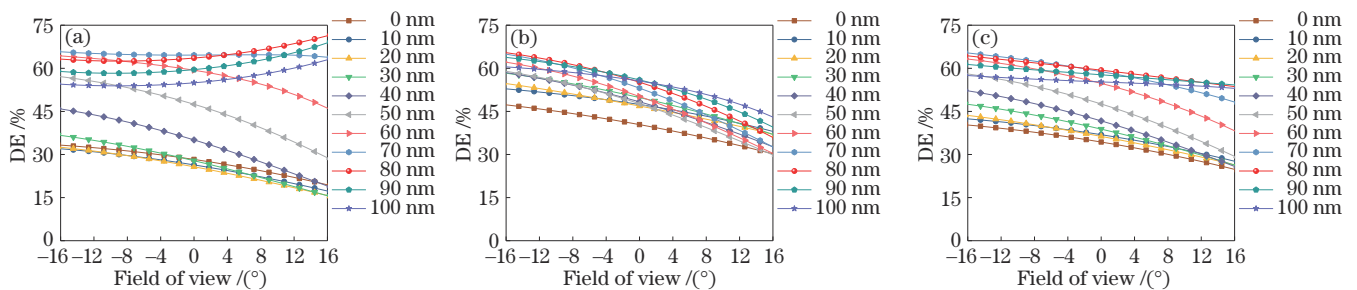


图 5 不同 TiO₂ 层厚度下衍射效率-视场角关系图。(a) TE 偏振光; (b) TM 偏振光; (c) 非偏振光

Fig. 5 Relationship between diffraction efficiency and field of view under different TiO₂ thicknesses. (a) TE polarized light; (b) TM polarized light; (c) non-polarized light

为了评价不同 TiO₂ 层厚度时,耦合光栅对不同偏振态光的衍射情况,对 -16°~16° 视场角内不同偏振态光的平均衍射效率和方差进行计算,如图 6 所示。可以看出,TE 偏振光与 TM 偏振光入射时的衍射效率得到了提升。由图 6(a) 可知, TiO₂ 的层厚度取在 80 nm、90 nm、80 nm 时, TE 偏振光、TM 偏振光、非偏振光的平均衍射效率达到最高,分别为 64.9%、54.30% 和

59.2%。由图 6(b) 可知, TE 偏振光衍射效率的方差在 TiO₂ 层为 70 nm 时取得极小值,为 0.004; TM 偏振光方差随着 TiO₂ 层厚度增加呈现从低到高再到低的变化趋势,在 TiO₂ 层厚度为 10 nm、100 nm 时较低,分别为 0.046、0.053。但当 TiO₂ 层厚度为 10 nm 时,非偏振光平均衍射效率较低,为 36.3%,而在 100 nm 时为 55.3%;非偏振光衍射效率的方差随着 TiO₂ 层厚度增

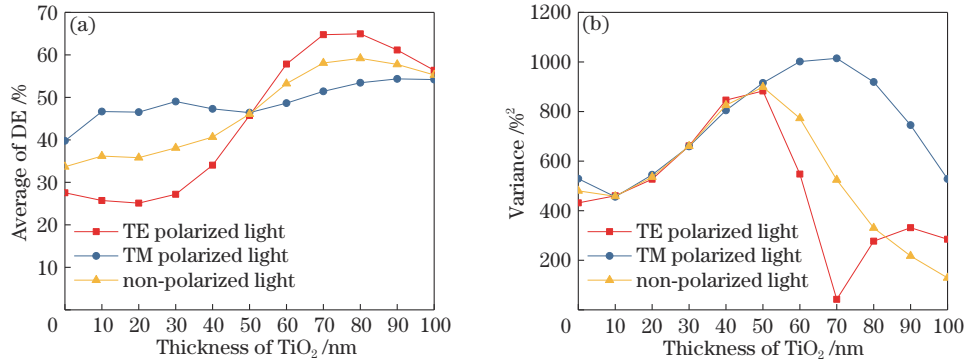


图 6 耦入光栅对不同偏振态光的衍射情况。(a)平均衍射效率-TiO₂层厚度关系图;(b)方差-TiO₂层厚度关系图

Fig. 6 Diffraction of light with different polarization states for in-coupling grating. (a) Relationship between average diffraction efficiency and TiO₂ thickness; (b) relationship between variance and TiO₂ thickness

加也呈现从低到高再到低趋势,在 TiO₂层厚度为 10 nm、100 nm 时较低,分别为 0.046、0.013。按照平均衍射效率来看,取 TiO₂层厚度为 80 nm 为最佳,但考虑到衍射效率平稳性,则取 100 nm 为最佳,且取 100 nm 时非偏振光平均衍射效率也较高,为 55.3%。综合考量,可以选取中间值 90 nm 作为耦入光栅的 TiO₂层厚度。

耦出光栅只镀 TiO₂膜。对于 TiO₂层,与耦入光栅情况类似,随着 TiO₂层厚度的增加,其衍射效率曲线也呈现一种类周期性的变化。耦出光栅对 TE 偏振

光、TM 偏振光和非偏振光的衍射效率与 TiO₂厚度的关系如图 7 所示。耦出光栅起到 2 个作用,一是将经由耦入光栅耦合进波导的光耦出波导,二是起到扩瞳作用。因此,在保证耦出光栅衍射效率波动较小的前提下,耦出光栅的衍射效率并不是越高越好,应综合考虑扩瞳次数与图像均匀性,不应盲目提高衍射效率。当 TiO₂层厚度过高时,视场边缘处的衍射效率过高,图像均匀性将变差,因此 TiO₂层厚度应取较低的值,同时为保证衍射效率较高,膜厚取在 0~100 nm 之间较好。

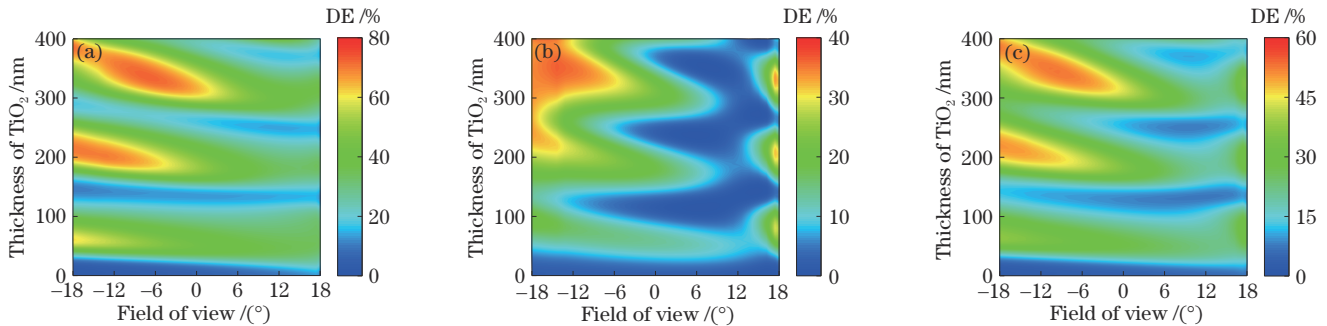


图 7 耦出光栅衍射效率与 TiO₂厚度关系图。(a) TE 偏振光;(b) TM 偏振光;(c)非偏振光

Fig. 7 Diagram of the relationship between the diffraction efficiency of the out-coupling grating and the thickness of TiO₂.

(a) TE polarized light; (b) TM polarized light; (c) non-polarized light

TiO₂层厚度在 0~100 nm 之间时,不同厚度情况下对 TE 偏振光、TM 偏振光和非偏振光的衍射效率如图 8 所示。随着 TiO₂厚度从 0 nm 增长到 100 nm,衍射效率曲线整体呈现从低到高再到低的变化趋势。TE 偏振光在衍射效率较高时仍较平稳,但对于 TM 偏振光,在 12°~16°边缘视场范围内衍射效率偏高,可能造成图像显示强度不均匀的情况。

为了评价不同 TiO₂层厚度条件下,耦出光栅对不同偏振态光的衍射情况,对 -16°~16°视场角内不同偏振态光的平均衍射效率和方差进行计算,如图 9 所示。可以看出,TE 偏振光与 TM 偏振光的衍射效率均有提升。由图 9 (a)可知,当 TiO₂层的厚度取在 50 nm、70 nm、60 nm 时,TE 偏振光、TM 偏振光、非偏振光的

平均衍射效率达到最高,分别为 42.7%、13.0%、27.6%。由图 9 (b)可知,TE 偏振光衍射效率的方差在 TiO₂层厚度为 40 nm 或 100 nm 时最小,均为 0.022;TM 偏振光衍射效率的方差随着 TiO₂层厚度的增加而升高,在 TiO₂层厚度为 0 nm 时为 0.006,在 TiO₂层厚度为 90 nm 时最高,为 0.057。非偏振光衍射效率的方差在 TiO₂层厚度为 0 nm 时最小,为 0.012,在 TiO₂层厚度为 40 nm 时出现次小值,为 0.016。按照平均衍射效率来看,TiO₂层厚度取 60 nm 为最佳,但从衍射效率的平稳性来看,则是取 40 nm 为最佳。在实际取值时,要对平均衍射效率及衍射效率曲线的波动性等进行综合考量,可以取为中间值 50 nm,此时 TE 偏振光、TM 偏振光、非偏振光平均衍射效率分别为 42.7%、

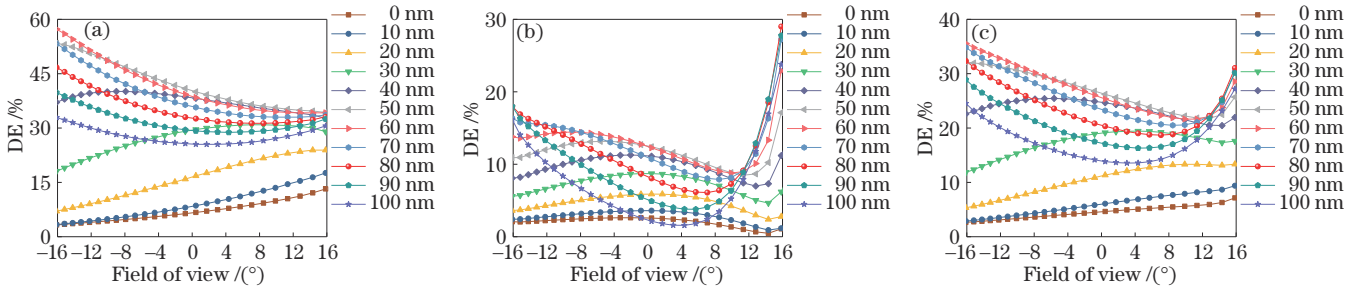


图 8 不同 TiO₂ 层厚度下行射效率-视场角关系图。(a) TE 偏振光; (b) TM 偏振光; (c) 非偏振光

Fig. 8 Relationship between diffraction efficiency and field of view under different TiO₂ thicknesses. (a) TE polarized light; (b) TM polarized light; (c) non-polarized light

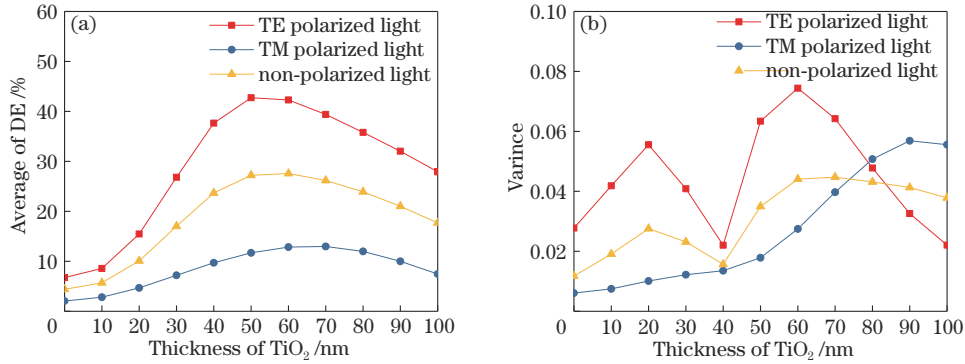


图 9 耦出光栅对不同偏振态光的衍射情况。(a) 平均衍射效率-TiO₂ 厚度关系图; (b) 方差-TiO₂ 厚度关系图

Fig. 9 Diffraction of light with different polarization states for out-coupling grating. (a) Relationship between average diffraction efficiency and TiO₂ thickness; (b) relationship between variance and TiO₂ thickness

11.7%、27.2%。

对偏振不敏感光栅进行系统性仿真,如图 10 所示。图 10(a)为光路结构,图 10(b)为显示效果。由图 10 可知,像质较为均匀,可以满足系统要求。

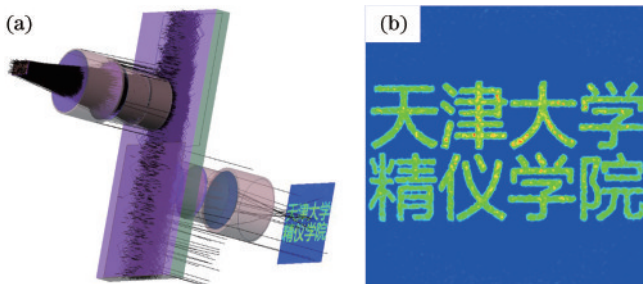


图 10 系统仿真。(a) 光路结构; (b) 显示效果

Fig. 10 System simulation. (a) Optical path structure; (b) display effect

4 偏振不敏感光栅波导头戴显示系统的实验

设计了光栅衍射效率的测量实验,测量装置如图 11 所示。光从激光器发出,经过起偏器将激光变为 TE 偏振光或 TM 偏振光,然后经过光阑,限制激光直径,再经过夹持装置夹持的光栅。旋转平台控制激光的入射角度。功率计可以测量激光经过光栅前的功率以及经衍射后的功率,进而可以计算得到衍射效率。

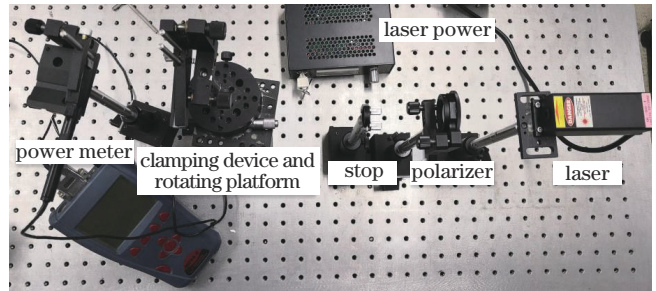


图 11 测量装置图

Fig. 11 Measuring device diagram

图 12 为视场角 (FOV) 测量的示意图。使用系统观察图像,测量墙壁(虚线处)上显示区域的两侧端点间距离 H ,记录系统到墙壁的距离 D ,则视场角为

$$\Phi = 2\arctan \frac{H}{2D} \quad (1)$$

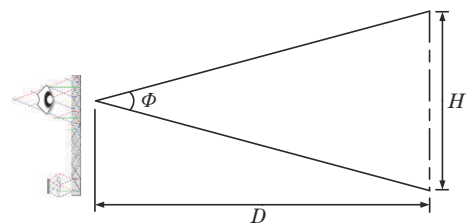


图 12 视场角测量示意图

Fig. 12 Schematic diagram of measuring FOV

分别测量镀 0、20、40、60、80、100 nm 厚度 TiO₂ 膜的耦入及耦出光栅在 -16°~16° 范围内的 TE 偏振光

及 TM 偏振光的光栅衍射效率, 得到如图 13、图 14 所示结果。

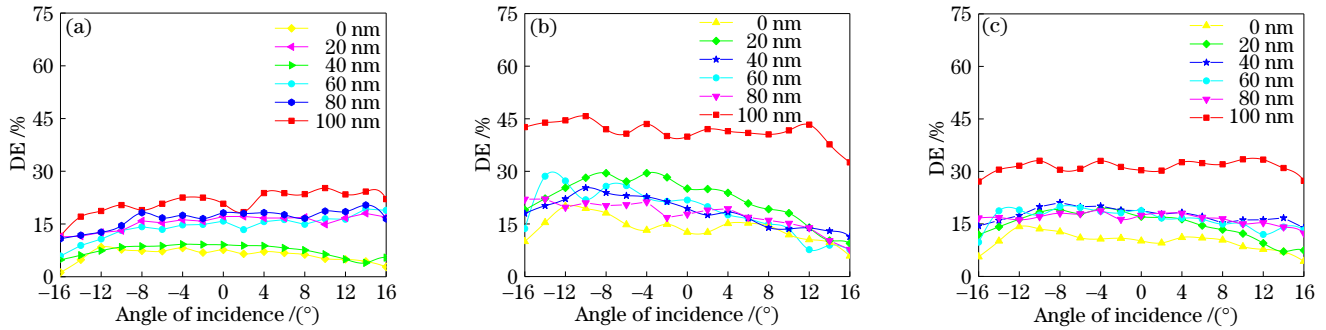


图 13 耦入光栅衍射效率。(a) TE 偏振光; (b) TM 偏振光; (c) 非偏振光

Fig. 13 DE of in-coupling grating. (a) TE polarized light; (b) TM polarized light; (c) non-polarized light

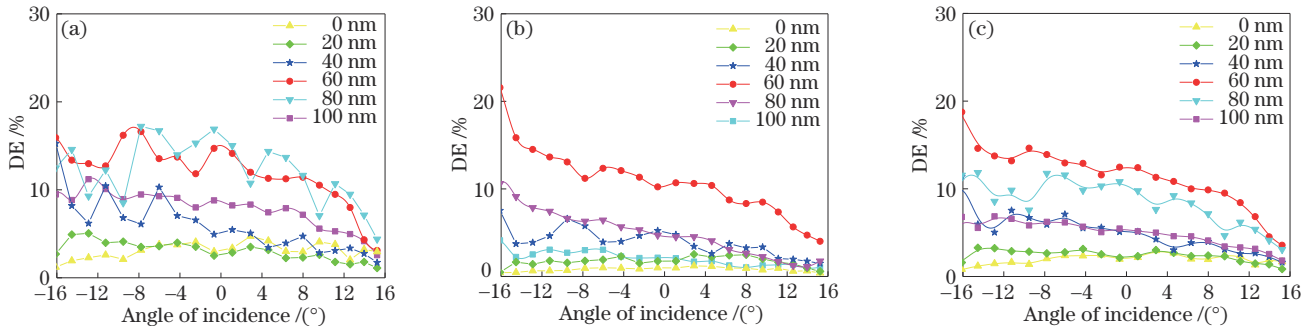


图 14 耦出光栅衍射效率。(a) TE 偏振光; (b) TM 偏振光; (c) 非偏振光

Fig. 14 DE of out-coupling grating. (a) TE polarized light; (b) TM polarized light; (c) non-polarized light

对于耦入光栅的衍射效率测试, 如图 13(a) 所示, TE 偏振光的平均衍射效率从 6.1% 明显地提升到了 21.0%; 如图 13(b) 所示, TM 偏振光的平均衍射效率从 13.7% 明显地提升到了 40.5%; 如图 13(c) 所示, 非偏振光的平均衍射效率从 9.9% 明显地提升到了 30.7%。并且在大角度入射范围 -16°~16° 间, 衍射效率曲线整体平坦, 表明光栅波导对各视场光束的耦合效率相对均匀。

对于耦出光栅的衍射效率测试, 如图 14(a) 所示, TE 偏振光的平均衍射效率从 3.1% 明显地提升到了 12.1%; 如图 14(b) 所示, TM 偏振光的平均衍射效率

从 0.8% 明显地提升到了 10.7%; 如图 14(c) 所示, 非偏振光的平均衍射效率从 1.8% 明显地提升到了 11.4%。并且在大角度入射范围 -16°~16° 间, 衍射效率曲线整体平坦, 表明光栅波导对各视场光束的耦合效率相对均匀。

另外特别针对光栅的偏振敏感性进行了优化, 得到了偏振不敏感的耦入光栅和耦出光栅。为此, 利用该特性使用非偏振光源的图像显示器 Micro-OLED, 拍照显示效果如图 15(a) 和 15(b) 所示。可以看出, 无论使用该系系统观察室内还是室外环境, 均能清晰看到图像源显示的像, 同时看到现实环境。佩戴效果如图 15(c) 所示。

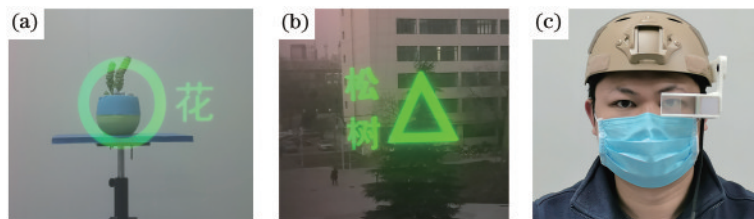


图 15 显示效果照片。(a) 室内; (b) 室外; (c) 佩戴效果展示

Fig. 15 Display effect photos. (a) Indoor; (b) outdoor; (c) wearing effect display

5 结 论

通过仿真与实验, 所设计的偏振不敏感光栅可以有效解决传统光栅偏振敏感的特性, 其耦入光栅的

TE 偏振光、TM 偏振光、非偏振光平均衍射效率可以达到 21%、40.5%、30.7%, 耦出光栅的 TE 偏振光、TM 偏振光、非偏振光平均衍射效率可以达到 12.1%、10.7%、11.4%。结合 Micro-OLED 与偏振不敏感光

栅波导搭建了头戴显示系统,拍照证明显示效果良好。通过这种结合,能够提高系统能量利用率和亮度,改善系统能耗,实现非偏振态光源大视场角高效率耦合。未来还可以进行更多的研究,如:可以将一维光栅改为二维光栅进行二维扩瞳,可以通过增加保护膜的情况延缓光栅退化,也可以通过提高光栅波导平行度改善成像情况。

参 考 文 献

- [1] Li H, Zhang X, Wang C, et al. Design of an off-axis helmet-mounted display with freeform surface described by radial basis functions[J]. *Optics Communications*, 2013, 309: 121-126.
- [2] Thompson K P, Rolland J P. Freeform optical surfaces: a revolution in imaging optical design[J]. *Optics and Photonics News*, 2012, 23(6): 30-35.
- [3] 赵亚辉, 范长江, 应朝福, 等. 含三层衍射元件的 60° 视场折/衍混合头盔目镜[J]. *光子学报*, 2013, 42(3): 266-270.
Zhao Y H, Fan C J, Ying C F, et al. Hybrid diffractive-refractive 60° field of view eyepiece with three-layer diffractive optical element[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, 42(3): 266-270.
- [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 S, 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.
- [5] Kress B, Starner T. A review of head-mounted displays (HMD) technologies and applications for consumer electronics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8720: 87200A.
- [6] Martinez-Millana A, Bayo-Monton J L, Lizondo A, et al. Evaluation of google glass technical limitations on their integration in medical systems[J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2142.
- [7] Sarayedine K, Mirza K. Key challenges to affordable see-through wearable displays: the missing link for mobile AR mass deployment[J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8720: 87200D.
- [8] Liu A, Zhang Y N, Weng Y S, et al. Diffraction efficiency distribution of output grating in holographic waveguide display system[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, 10(4): 700310.
- [9] Bigler C M, Blanche P A, Sarma K. Holographic waveguide heads-up display for longitudinal image magnification and pupil expansion[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(9): 2007-2013.
- [10] 相广鑫, 郭岩, 李文强, 等. L型全息波导构型设计[J]. *电光与控制*, 2017, 24(3): 89-92.
- Xiang G X, Guo Y, Li W Q, et al. Design of a holographic waveguide with L configuration[J]. *Electronics Optics & Control*, 2017, 24(3): 89-92.
- [11] 李瑞华, 康明武, 高阳, 等. 单片式全息波导双色显示优化设计[J]. *电光与控制*, 2019, 26(2): 89-92.
Li R H, Kang M W, Gao Y, et al. Optimized design of single-plate dual-color holographic waveguide display[J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(2): 89-92.
- [12] Kress B C, Cummings W J. 11-1: invited paper: towards the ultimate mixed reality experience: holoLens display architecture choices[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 127-131.
- [13] Chen C P, Mi L T, Zhang W B, et al. Waveguide-based near-eye display with dual-channel exit pupil expander[J]. *Displays*, 2021, 67: 101998.
- [14] Xiao J S, Liu J, Han J, et al. Design of achromatic surface microstructure for near-eye display with diffractive waveguide[J]. *Optics Communications*, 2019, 452: 411-416.
- [15] 王垒, 屠彦, 郭静菁, 等. 基于双面体全息光栅的高亮度全息波导显示器[J]. *光电子技术*, 2016, 36(4): 227-231.
Wang L, Tu Y, Guo J J, et al. High-luminance holographic waveguide display based on double-faced volume holographic gratings[J]. *Optoelectronic Technology*, 2016, 36(4): 227-231.
- [16] 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.
- [17] 黄战华, 马云飞, 尤勤, 等. 新型波导型准直投影系统中衍射光栅的设计[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(3): 030501.
Huang Z H, Ma Y F, You M, et al. Design of diffraction grating in new type of waveguide collimated projection system[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(3): 030501.
- [18] 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.
- [19] 杨光华, 王宇, 李璟, 等. 增强型相位光栅衍射效率研究[J]. *光学学报*, 2021, 41(12): 1205001.
Yang G H, Wang Y, Li J, et al. Diffraction efficiency of enhanced phase grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(12): 1205001.
- [20] 高雅增, 吴鹿杰, 卢维尔, 等. 基于严格耦合波理论的硬 X 射线菲涅耳波带片设计[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1111002.
Gao Y Z, Wu L J, Lu W E, et al. Design of hard X-ray Fresnel zone plates based on rigorous coupled wave theory[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1111002.