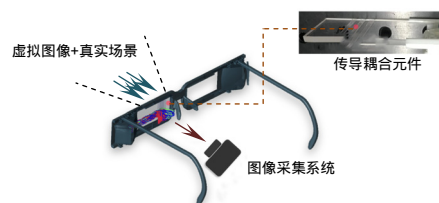




DOI: 10.12086/oe.2019.180550

基于平面波导的大视场增强现实眼镜显示器

肖雪¹, 林泉², 郝建颖², 臧金亮¹, 谭小地^{2*}¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;²福建师范大学光电与信息工程学院, 福建省光子技术重点实验室, 福建 福州 350007

摘要: 本文提出了一种用于实现大视场紧凑型的增强现实眼镜显示器的方法。采用平面波导以及嵌入的窄带负滤光膜来完成图像的传导和耦合。整个光学系统结构简单, 并且具有体积小、质量轻的优点。在此方法下, 通过建立光线在波导中的几何导光模型, 分析了图像传导的约束条件, 得到了波导结构的设计参数以及其与显示视场角之间的关系。根据计算结果, 制作了一个 3 mm 厚的波导耦合器件来进行原理验证。实验结果表明, 利用设计的波导元件及搭建的增强现实眼镜显示器的光学系统可以实现虚拟图像的传导以及其与真实环境的融合, 测得的显示视场角约为 50°。

关键词: 增强现实; 眼镜显示器; 波导; 视场角

中图分类号: TB872; TN873

文献标志码: A

引用格式: 肖雪, 林泉, 郝建颖, 等. 基于平面波导的大视场增强现实眼镜显示器[J]. 光电工程, 2019, 46(10): 180550

Planar waveguide based augmented reality smart glasses with large field of view

Xiao Xue¹, Lin Xiao², Hao Jianying², Zang Jinliang¹, Tan Xiaodi^{2*}¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;²Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China

Abstract: We present a way to achieve the compact augmented reality (AR) smart glasses with a large field of view (FOV). A planar waveguide and embedded narrow band minus filters are used for image transmission and coupling. The optical system based on the method is simple in structure and has the advantages of small size and lightweight. A geometric model for the propagation of light in the waveguide is constructed. Based on this model, the constraints of the structure and the dependence of designed parameters with viewing angles are analyzed. According to the calculations, a 3 mm thick waveguide is fabricated to investigate the feasibility of the theory. Experimental results demonstrate that the prototype can deliver a projected image and realize the fusion of the virtual image and the real scene as expected, the measured viewing FOV was about 50°.

Keywords: augmented reality; smart glasses; waveguide; field of view

Citation: Xiao X, Lin X, Hao J Y, *et al.* Planar waveguide based augmented reality smart glasses with large field of view[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10): 180550

收稿日期: 2018-10-28; 收到修改稿日期: 2019-04-02

作者简介: 肖雪(1990-), 女, 博士研究生, 主要从事信息显示技术的研究。E-mail: xiao_xue@bit.edu.cn

通信作者: 谭小地(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事光学全息、光学测量、图像处理、图像加密、光学信息处理、光子晶体、液晶显示技术、三维立体显示技术等研究。E-mail: xtan@fjnu.edu.cn

1 引言

增强现实(Augmented reality, AR)显示器通过将计算机生成的虚拟物体或者其他信息叠加到真实环境中显示^[1], 从而对现实场景进行增强, 提高用户对真实世界的感知能力。与虚拟现实(virtual reality, VR)强调的沉浸感不同, AR 显示技术不隔离用户与周围真实世界之间的联系, 而是侧重于生成一个真实场景和虚拟景物相融合的场景^[2]。AR 显示器的应用领域很广泛: 可以用于军事训练, 显示辅助作战信息^[3]; 工业上可用在产品生产的监控及大型设备的维护中^[4]; 借助 AR 显示器, 在外科手术中进行精确定位和动态显示有助于减少手术的风险, 提高手术的成功率^[5-8]; 此外, 还可以应用于城市规划^[9]、古迹复原和数字化文化遗产保护^[10]及辅助教学^[11]等领域。

随着 AR 技术的迅速发展, 适用于便携移动应用的 AR 眼镜显示器成为近年来的热点^[12]。AR 眼镜显示器以眼镜的形式作为支撑, 佩戴在用户的头部, 其主要由信号处理、光学投影、导波及耦合系统组成。利用光学系统, AR 眼镜显示器既能透过从真实环境来的光线, 不影响使用者的正常观察; 又能将光源投影的图像及所需的信息传导到用户视野中。目前 AR 眼镜显示器的研究取得了很大的进展, 提出了各种光学解决方案。微软推出一款头戴 AR 显示装置 HoloLens, 可以完全独立使用, 无需线缆连接, 无需同步电脑或者智能手机^[13], 但是系统体积十分大。同样, 自由曲面棱镜^[14-15]作为耦合器件的显示系统也存在光学元件厚、体积大的问题。EPSON^[16]和 Cheng^[17]都采用了 50/50 的反射式波导, 分别实现了 28°和 20°视场角的小型 AR 眼镜显示器。SONY^[18]则在其眼镜显示产品中使用了全息波导技术^[19], 水平显示视场仅为 19°。全息层比较薄, 因此组成的眼镜显示器体积小、质量轻。

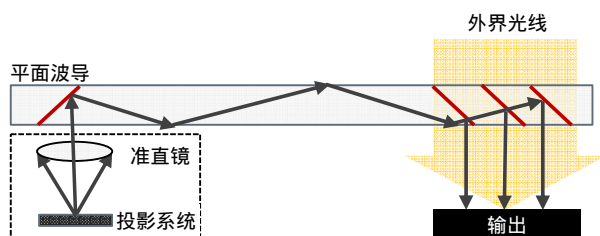


图 1 基于平面波导的 AR 眼镜显示器系统原理图

Fig. 1 Schematic of the planar waveguide based AR smart glasses system

但是制作全息的有机材料不稳定, 全息光栅容易受到环境影响而发生改变^[20]。由此可见, 在小体积紧凑型的 AR 眼镜显示器系统中实现大视场的显示仍具有一定的困难^[21]。

本文采用平面波导的导光方式, 在波导的出射和入射两侧加入可以进行波长选择的负滤光膜作为耦合件, 来完成大视场 AR 眼镜显示器光学系统的设计。相比于其他方式, 波导与负滤光膜组合构成的光学耦合器结构简单, 系统体积小, 视场大。根据理论计算的结果制作了原形样机, 搭建了 AR 眼镜显示器的原理验证和测试系统, 在紧凑型的系统中实现了虚拟图像与真实场景的叠加, 视场角约为 50°。

2 工作原理与理论计算

基于平面波导的增强现实眼镜显示器系统利用双像源双目式的显示方式, 即有两个像源和两套光学系统。其中, 单侧光学系统结构如图 1 所示, 主要包括投影系统(微型显示器和光学准直镜组)、平面波导及光学耦合器。虚拟图像或信息从微型显示器发出, 经过光学镜组的折叠和准直, 入射到透明的平面波导上, 在波导中借助全内反射传播, 直至输出到人眼。

嵌入了窄带负滤光膜^[22-23]的波导是传导显示的虚拟图像以及实现虚实融合的重要器件。窄带负滤光膜具有波长选择性, 能将某波段内的光线以高反射率反射, 而使其他波段内的光线保持高透射率。窄带负滤光膜是多层介质膜, 可利用在基底上交替排列的高低折射率的材料形成。光学薄膜的现有技术和研究表明, 设计和制备窄带负滤光膜是可行的^[24-27]。单峰值的负滤光膜的反射特性曲线如图 2 所示。当它使用在 AR 眼镜显示器中时, 只有入射图像所在的较窄波段内的光线才能耦入波导中继续经全反射传播, 进而在出射

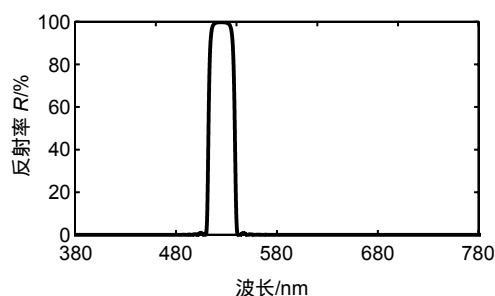


图 2 单峰值的负滤光膜的反射特性曲线

Fig. 2 Reflective curve of a single-peaked minus filter

端作为信息被耦出；而其他波段的光线大部分会被透射出。由此，既保证了微型显示源投射的虚拟图像具有高亮度，极大地减少了光能损失，同时来自外部真实的环境光线又能以很高的透射率穿过波导而不被遮挡。入射耦合面和出射耦合面倾斜的角度大小相等，方向相反，由此可以使光线以特定的角度进入波导并以相应的角度出射。此外，导出光束的宽度受到出射面尺寸以及波导厚度的限制，因此在出射端平行排布了多个窄带负滤光膜。多个出射面的反射率依次递增(分别为 30%、50%和 100%)，能够在不增加系统体积并保证亮度均匀的前提下实现出瞳扩展的作用。整个光学系统结构紧凑，光学效率高，可实现大视场显示。

平面波导的设计参数及导光模型如图 3 所示。倾斜的耦入和耦出窄带负滤光膜关于波导中心是对称的，由此可使光线以特定的角度进入波导并以相应的角度出射。假设负滤光膜与波导表面所成的锐角均为 $\theta(0 < \theta < \pi/2)$ ；在波导的入射端，经准直后的一般斜光束在平面波导表面的入射角为 $\alpha_0(-\pi/2 < \alpha_0 < \pi/2)$ ，约定从入射光线转向入射面法线方向顺时针为正，逆时针为负)；光线进入波导时折射角为 α 。则由 Snell 定律可得：

$$n_0 \sin \alpha_0 = n \sin \alpha \quad (1)$$

其中： n_0 是空气的折射率， n 是波导基板的折射率。为了保证入射光线能够在波导内顺利地传播和导出，波导的设计参数需要满足下列条件：

$$\begin{cases} 0 < \theta - \alpha < \frac{\pi}{2} \\ \arcsin\left(\frac{n_0}{n}\right) \leq \beta \leq \frac{\pi}{2} \\ 3\theta - \alpha \geq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (2)$$

以上的约束条件中，第一个不等式保证了入射光线向出射端的方向行进；第二个不等式是全反射条件，确保光线在波导上下表面之间连续传导，至出射端之前不泄露到波导外；第三个不等式保证进入波导内的光线不会在耦入负滤光膜上发生多次反射，减少杂散光的产生。式(2)中，全内反射角 β 有两种表达式。根据光线在波导内的不同轨迹，当第一次全内反射发生在波导的下表面时记为 β_1 ，发生在波导的上表面时记为 β_2 ：

$$\begin{cases} \beta_1 = 2\theta - \alpha \\ \beta_2 = \pi - 2\theta + \alpha \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2)中，可得到满足所列约束条件的波导参数(折射率 $n=1.52$)，如图 4 所示。横坐标表示负滤光膜的倾斜角 θ ，纵坐标表示准直光线在空气中的入射角 α_0 。填充的区域内表示符合光线传导条件的波导设计方案。对应不同 θ 的取值时，波导能传导的最大及最小视角范围不同，也就是视场大小不同。在填充区域外的 θ 与 α_0 不可用。可传导的视场角 $\Delta\alpha_0$ 由图 4 中入射角上边界 α_{01} 与下边界 $\Delta\alpha_{02}$ 的差值得到，即 $\Delta\alpha_0 = \alpha_{01} - \alpha_{02}$ 。由图中可以看出，当 θ 逐渐增加时， $\Delta\alpha_0$ 随之先增大再减小。依据计算曲线对波导结构进行合理的选择，可以实现大视场的图像传导。1 区与 2 区分别对应第一次全内反射发生在波导的下表面和上表面的情况。AR 眼镜显示器系统的视场角不仅受到波导可传导视角的限制，同时，还决定于像源及准直镜组能提供的视角范围。因此，在波导设计参数的选取过程中，应该考虑到实际投影系统可提供的视场角。在现有条件下综合考虑，选取了各负滤光膜的倾斜角 $\theta=34^\circ$ ，制作了厚度 d 为 3 mm 的波导。在此波导的设计参数下，可计算出能传导的空气中最大视角为 $\alpha_{01}=18.4^\circ$ ，最小视角为 $\alpha_{02}=-34.7^\circ$ ，视场角理论上可达 53° 。

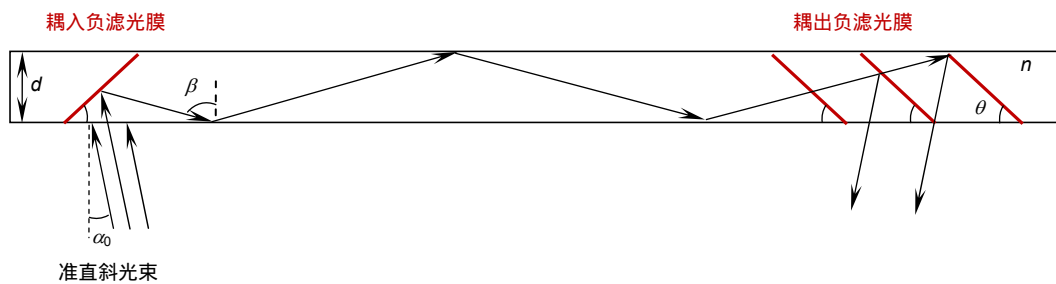


图 3 平面波导的参数及导光模型

Fig. 3 Parameters of the planar waveguide and the geometric model for the propagation of collimated light

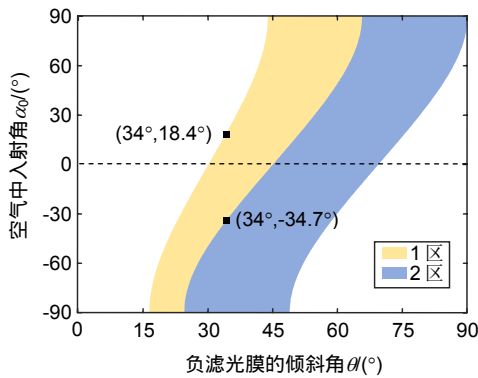


图 4 负滤光膜的倾斜角与空气中入射角的关系 ($n=1.52$)

Fig. 4 Dependence between the tilted angle of the minus filter and the incident angle in the air ($n=1.52$)

3 实验结果

在前面已经阐述了平面波导及负滤光膜在 AR 眼镜显示器中工作的基本原理，并对波导的设计参数进行了理论计算。制作的耦合器件中，光波导的厚度为 3 mm，波导基板材料选用了容易获得的常用光学玻

璃，折射率为 1.52。在波导内的倾斜面上镀有窄带负滤光膜，倾斜角度为 34° ，中心波长设计为 535 nm，反射带宽 50 nm。出射耦合面为 3 个，峰值反射率分别为 33%，50% 和 100%。按照图 5 所示的实验装置示意图搭建了显示光路，来验证所提出的导光方式的可行性。在输入端将虚拟图像加载到光学投影源中，通过制作的波导板的传输，在输出端使用相机代替人眼，拍摄接收的图像，得到的实验结果如图 6 所示。在图 6 中，能清楚地看到投影的虚拟图像，同时能够看到图像后的背景，成功地实现了虚拟信息与真实场景的叠加。经测量(如图 7 所示)，投影的虚拟图像的显示范围约为 142 mm，中心约在 102 mm 处；显示的图像与拍摄的相机之间的距离 L 约为 150 mm。由此可以计算出，从系统输出端传导出的视场角 $\Delta\alpha'_0$ 约为 50° 。实际测量与理论计算的相差为 3° ，可能是测量误差所致。实验表明，本文所阐述的基于平面波导的 AR 眼镜显示器的导光及耦合方式是可行的，利用所设计和制作的波导，能够按照预期传输图像并实现虚实融合。实验中搭建的 AR 眼镜显示系统，传导的虚拟图像的显示视场角经测量达到了 50° 。

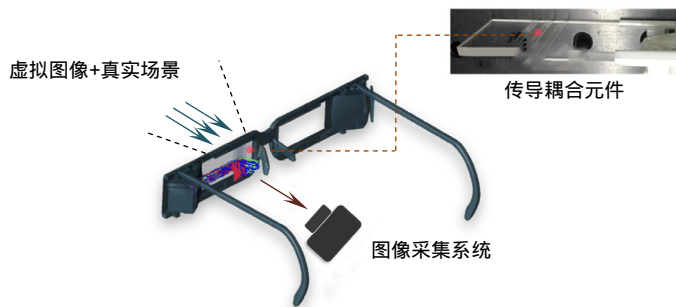


图 5 实验装置示意图

Fig. 5 Experimental setup

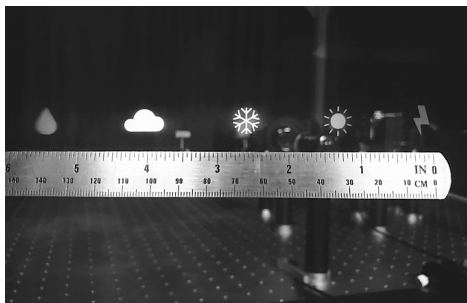


图 6 透过原形样机拍摄的虚实融合效果图

Fig. 6 Virtual icons superimposed on real scene captured through the prototype

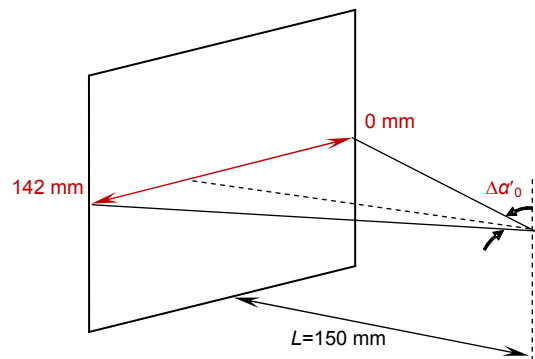


图 7 虚拟图像的显示视角范围

Fig. 7 Viewing angle of the virtual image

4 总结

本文采用平面波导的结构设计了一种大视场紧凑型的 AR 眼镜显示器。利用波导进行图像的传导，并利用嵌入在输入和输出端的窄带负滤光膜来完成光线的耦合和耦合。在所提出的结构下，建立了导光模型，理论分析和计算出符合光线传输要求的波导结构参数以及这些设计参数与显示视场角的关系。根据计算结果，制作相应的波导及耦合器件，完成了 AR 眼镜显示器的显示光路的搭建，并在实验中对波导传导图像的原理进行了验证。实验结果表明，所研制的 AR 眼镜显示器系统能够将虚拟图像叠加在真实环境中进行显示效果，测得的虚拟图像视场角约为 50°。本文所提出的方法可以用于实现大视场紧凑型的 AR 眼镜显示器。

参考文献

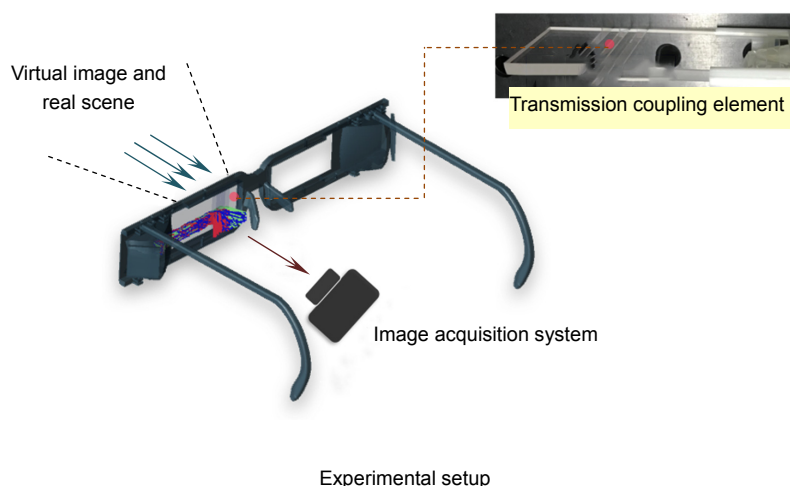
- [1] Vallino J R. Interactive augmented reality[D]. New York: University of Rochester, 1998.
- [2] Shi Q, Wang Y T, Chen J. Vision-based algorithm for augmented reality registration[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2002, **7**(7): 679–683.
施琦, 王涌天, 陈靖. 一种基于视觉的增强现实三维注册算法[J]. *中国图象图形学报*, 2002, **7**(7): 679–683.
- [3] Furness III T A. The super cockpit and its human factors challenges[J]. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 1986, **30**(1): 48–52.
- [4] Pentenrieder K, Meier P. The need for accuracy statements in industrial Augmented Reality applications[C]//*Proceedings of the 5th IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Santa Barbara, 2006.
- [5] Argotti Y, Davis L, Outters V, et al. Dynamic superimposition of synthetic objects on rigid and simple-deformable real objects[J]. *Computers & Graphics*, 2002, **26**(6): 919–930.
- [6] Rolland J P, Fuchs H. Optical versus video see-through head-mounted displays in medical visualization[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 2000, **9**(3): 287–309.
- [7] Bichlmeier C, Heining S M, Feuerstein M, et al. The virtual mirror: A new interaction paradigm for augmented reality environments[J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2009, **28**(9): 1498–1510.
- [8] Rosenthal M, State A, Lee J, et al. Augmented reality guidance for needle biopsies: an initial randomized, controlled trial in phantoms[J]. *Medical Image Analysis*, 2002, **6**(3): 313–320.
- [9] Ren B, Li L J, Cao W M, et al. Interactive urban design based on augmented reality[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Urban Science Edition)*, 2006, **23**(2): 32–34.
任波, 李利军, 曹伟明, 等. 基于增强现实的交互式城市设计研究. *华中科技大学学报(城市科学版)*, 2006, **23**(2): 32–34.
- [10] Wang Y T, Liu Y, Hu X M. Study on key technique and application of outdoor AR system[J]. *Journal of System Simulation*, 2003, **15**(3): 329–333, 337.
王涌天, 刘越, 胡晓明. 户外增强现实系统关键技术及其应用的研究[J]. *系统仿真学报*, 2003, **15**(3) 329–333, 337.
- [11] Fjeld M, Voegtli B M. Augmented chemistry: an interactive educational workbench[C]//*Proceedings, International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, Darmstadt, Germany, Germany, 2002: 259.
- [12] Liu Z G, Li S Q, Li Z Q. Development and application of augmented reality[J]. *Journal of System Simulation*, 2003, **15**(2): 222–225.
柳祖国, 李世其, 李作清. 增强现实技术的研究进展及应用[J]. *系统仿真学报*, 2003, **15**(2): 222–225.
- [13] Microsoft HoloLens[EB/OL]. [2018-10-25]. <https://www.microsoft.com/microsoft-hololens/en-us>.
- [14] Cakmakci O, Thompson K, Vallee P, et al. Design of a free-form single-element head-worn display[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7618**: 1–6.
- [15] 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): 2098–2100.
- [16] Moverio BT-300 Smart Glasses[EB/OL]. (2018-10-25). <https://epson.com/For-Work/Wearables/Smart-Glasses/Moverio-BT-300-Smart-Glasses-%28ARDeveloper-Edition%29-p/V11H756020>.
- [17] 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.
- [18] Oku T, Akutsu K, Kuwahara M, et al. 15.2: high luminance see-through eyewear display with novel volume hologram waveguide technology[J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2015, **46**(1): 192–195.
- [19] Amitai Y, Friesem A A, Weiss V. Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays[J]. *Applied Optics*, 1989, **28**(16): 3405–3416.
- [20] Kress B. See through optical architectures for wearable displays[C]//*Applied Industrial Optics: Spectroscopy, Imaging and Metrology 2014*, 2014.
- [21] Li H, Zhang X, Shi G W, et al. Review and analysis of avionic helmet-mounted displays[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(11): 110901–110915.
- [22] Thelen A. Design of optical minus filters[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1971, **61**(3): 365–369.
- [23] Amotchkina T V. Analytical estimations for the reference wavelength reflectance and width of high reflection zone of two-material periodic multilayers[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(19): 4590–4595.
- [24] Schallenberg U, Ploss B, Lappschies M, et al. Design and manufacturing of high-performance notch filters[J]. *Proceedings of SPIE*, 2010, **7739**: 77391X.
- [25] Hall J T. Controlled method of manufacture of multiple-notch rugate filters: U.S. Patent5, 009, 485[P]. 1991-04-23.
- [26] Hendrix K D, Hulse C A, Ockenfuss G J, et al. Demonstration of narrowband notch and multi-notch filters[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, **7067**: 706702.
- [27] Zhang J L, Xie Y J, Cheng X B, et al. Thin-film thickness-modulated designs for optical minus filter[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(23): 5788–5793.

Planar waveguide based augmented reality smart glasses with large field of view

Xiao Xue¹, Lin Xiao², Hao Jianying², Zang Jinliang¹, Tan Xiaodi^{2*}

¹School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Fujian Provincial Key Laboratory of Photonics Technology, College of Photonic and Electronic Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou, Fujian 350007, China



Overview: Augmented reality (AR) smart glasses are capable of superimposing computer-generated information on the real world. Until now, various combiners for delivering displayed virtual image, for instance, semi-reflective reflectors, hologram, and freeform prism have been adopted. However, they are suffering from some problems, such as low light efficiency, relative short lifetime when exposed to environmental variations, and complex production process. What's more, to realize large field of view (FOV) is still a great challenge, especially for AR smart glasses with compact format. In this paper, we present a method to achieve compact AR glasses by using a planar waveguide with embedded narrow band minus filters. The planar waveguide works as an element for the transmission of projected virtual image, while the minus filters work for coupling the image from the micro-display into the waveguide, and coupling it out of the waveguide on the other side to the eye of a viewer. Since the minus filters reflect only the specified waveband from a wide spectral range, the output virtual image from the waveguide can maintain high luminance and the rays from the ambient environment can pass through the waveguide with high transmittance. Furthermore, an array of parallel out minus filters is arranged at the output side, so that exit beams can be expanded without additional ghost images. To get the design parameters of the waveguide and the viewing angle that can be transferred by the waveguide, a geometric model was constructed. According to that, constraints of the design parameters and the relationship of them with the incident angles were analyzed. Based on the calculation results, a 3 mm thick waveguide, which can deliver a FOV of 53° theoretically, was fabricated to verify the feasibility of the proposed method. Experiment was conducted with the first prototype. A virtual image was provided by a projector and a camera was used at the output side for capturing the exit virtual image and the real scene. Through the photo taken by the camera, we can see both the suspended image and a view of the real environment. Experimental result demonstrated that the waveguide can deliver a projected image and realize the fusion of the virtual image and the real scene as expected. The actual FOV transferred by the prototype was about 50°. In conclusion, the present approach is a very promising design to enable a compact AR glasses with a large FOV.

Citation: Xiao X, Lin X, Hao J Y, *et al.* Planar waveguide based augmented reality smart glasses with large field of view[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2019, 46(10): 180550

* E-mail: xtan@fjnu.edu.cn