

半透膜阵列平板波导式头戴显示器光学系统设计

呼新荣^{1,2} 刘 英¹ 王 健¹ 孙 强¹

(¹ 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 为实现头戴显示器(HMD)的轻小型化,设计了一种新型的半透膜阵列平板波导式 HMD 光学系统。利用两个互相垂直放置的半透膜阵列波导实现了目镜出瞳的扩展,使得小出瞳目镜即可满足 HMD 使用需求,在缩小目镜体积的同时减轻了系统重量。通过对半透膜阵列平板波导结构的理论分析和光学系统建模,讨论了系统成像质量和出瞳辐照度分布规律。该系统总重约 36 g,视场为 $15^\circ \times 20^\circ$,出瞳 $7 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,畸变小于 0.13%,点斑均方根半径小于 $3.75 \mu\text{m}$,波像差均方根小于 0.045λ ,各视场光学调制传递函数在 40 lp/mm 时大于 0.58。结果表明,半透膜阵列平板波导装置能够有效扩展目镜出瞳,该系统能够满足 HMD 的使用要求。

关键词 光学设计;平板光波导;出瞳扩展;头戴显示器;半透膜阵列

中图分类号 TN27 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0922001

Optical System Design of Head-Mounted Display Based on Planar Waveguide of Semi-Transparent Film Array

Hu Xinrong^{1,2} Liu Ying¹ Wang Jian¹ Sun Qiang¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract In order to reduce the weight and volume of the head-mounted display (HMD), a planar waveguide HMD is designed based on semi-transparent film array. Two orthogonally placed semi-transparent film arrays are used to expand the eyepiece's exit pupil, as well as to make the HMD compact and light in weight. By analyzing the structure of planar optical waveguide, an optical system model is established. Then, imaging quality and irradiance distribution of the system is discussed. This system has a gross weight of about 36 g, a field of view (FOV) of $15^\circ \times 20^\circ$ and an exit pupil of $7 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$. The distortion is less than 0.13%. The root mean square (RMS) spot diameter is less than $3.75 \mu\text{m}$. The RMS wave aberration is less than 0.045λ . The modulation transfer function (MTF) is higher than 0.58 at the spatial frequency of 40 lp/mm across the entire FOV. The results indicate that planar waveguide of semi-transparent film array can enlarge eyepiece's exit pupil effectively. This system satisfies the requirements of the HMD optical system.

Key words optical design; planar optical waveguide; exit pupil expanding; head-mounted display; semi-transparent film array

OCIS codes 220.4830; 090.2820; 230.7390; 240.031

1 引 言

头戴显示器(HMD)以其沉浸性、交互性以及可提高态势感知等特点,在军事、工业设计与制造、医

疗及娱乐等虚拟现实和增强现实领域得到了广泛应用^[1-3]。随着微显示器技术、光学加工技术以及光学设计理论的日益成熟,HMD正朝着轻小型化方

收稿日期: 2014-02-17; 收到修改稿日期: 2014-04-02

基金项目: 国家 863 计划(2013AA03A116)、院地合作项目(2011CJT0004)、吉林省科技发展计划(20125092)

作者简介: 呼新荣(1988—),男,博士研究生,主要从事光学系统设计方面的研究。E-mail: huxr062768@126.com

导师简介: 孙 强(1971—),男,博士,研究员,主要从事现代红外光学仪器、二元光学和红外系统仿真等方面的研究。

E-mail: sunq@ciomp.ac.cn

向发展。鉴于头部佩戴的特殊要求,透射型 HMD 通常采用离轴折反中继结构^[4-6],组合镜与中继系统的结合限制了透镜尺寸,导致系统很难减小体积和重量。光波导装置可将目镜产生的平行光进行传输和扩展以供人眼观察,能够极大地减小目镜的体积和重量,为 HMD 的轻小型化设计提供了一种新途径。

近几年来,以谷歌眼镜和 Lumus 系列眼镜为典型代表的新型头戴显示设备逐渐成为研究热点,推动了波导技术在 HMD 应用领域的迅速发展。目前,用于 HMD 的波导技术主要分为全息波导和半透膜阵列波导两类。Eisen 等^[7]将全息光栅置于平板波导表面设计了平板结构投影显示系统,Cameron 等^[8-9]将全息波导技术应用于 HMD 极大减小了系统体积和质量,研制了 Q-sight 系列 HMD;这些设计由于采用了全息波导,使得光能利用率低、加工难度大,衍射引入的杂光和色散严重且矫正方法复杂^[10-11]。半透膜阵列波导利用半透膜的折射和反射实现目镜出瞳的扩展,色散小容易实现彩色显示,光能利用率高,通过合理的结构设计能够有效抑制杂光并获得满意的像质,其制作工艺相对简单^[12-14],相比全息波导优势明显。Amitai^[15]将反射膜阵列置于导光基底,用以扩展 HMD 的光瞳;曾飞等^[12]将棱镜和光栅相结合提高了全息波导型 HMD 系统的能量利用率。以上设计不同程度地实现了目镜出瞳的扩展,降低了系统对目镜出瞳尺寸的设计要求,因而有利于实现轻小型化设计。

本文考虑 HMD 轻量化设计的要求,对半透膜阵列波导的工作原理及结构进行分析,将两组半透膜阵列分别置于相互垂直放置的透明平板基底以实现目镜出瞳的扩展,设计了一种结构紧凑、重量轻、像质优良的平板波导式 HMD 光学系统,能够满足头戴显示设备的使用需求。

2 基本原理

平板波导式 HMD 由微显示器、目镜和波导系统组成,其截面如图 1 所示。微显示器各像素点出射的发散光锥经目镜准直后入射波导系统,波导系统对目镜出射的平行光进行传输和二维复制,从而形成一个可供目视的扩展光瞳。采用类似的波导装置对目镜出瞳进行扩展可减小透镜口径,有利于减小系统结构体积实现 HMD 光学系统的轻小型化设计。

波导系统由正交放置的垂直扩展波导和水平扩

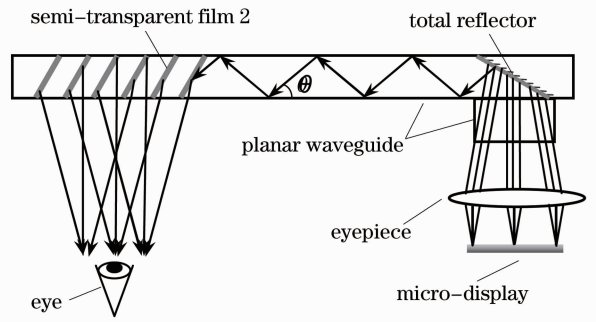


图 1 平板波导头戴显示器原理图

展波导组成,其结构如图 2 所示。目镜某一视场发出的平行光首先入射垂直扩展波导,经半透膜阵列 1 多次反射、透射后沿垂直方向形成一系列扩展光束,从而实现垂直方向的扩展;然后,扩展光束由全反射镜导入水平扩展波导,当光束在平板基底内表面反射时满足全反射条件,因而被约束在平板基底中向输出端传播,经半透膜阵列 2 多次反射、透射,光束在水平方向也得到了扩展,但反射光因不再满足全反射条件而从基底一侧透射输出;至此,在基底外便得到了二维扩展的阵列光束。由不同视场阵列光束的重叠区域构成 HMD 系统的出瞳,当用户眼瞳落在系统出瞳区域以内即可获得显示图像。

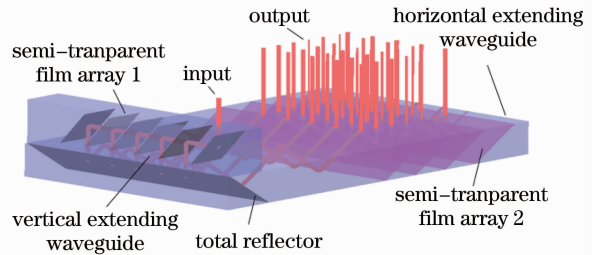


图 2 平板波导的结构

Fig. 2 Structure of planar waveguide

3 平板波导的结构分析

垂直方向视场的光束在水平波导中传播时,轴外视场的扩展光束与水平方向产生偏移,并且视场越大、传输距离越远,偏移量越大。垂直方向的边缘视场在水平波导中的偏移如图 3 所示,光束从水平波导出射后仍具有与图 3 类似的偏移关系。由于视场的对称分布,通过求解出瞳平面处边缘视场与轴上视场的重叠区域可得到系统的出瞳尺寸,其表达式可描述为

$$d_{\text{eye}}^y = D^y - 2\delta, \quad (1)$$

式中 d_{eye}^y 为垂直方向的出瞳直径, D^y 为垂直扩展波

导的长度,偏移量 δ 的表达式为

$$\delta = R \tan \omega^y + \frac{L}{\cos \theta} \tan \theta', \quad (2)$$

式中 R 为出瞳距, ω^y 为垂直方向半视场, L 为全反射镜与半透膜阵列 2 中心的间距, θ 为视场角的水平方向分量与平板底面的夹角, θ' 为波导内垂直方向半视场。结合折射定律 $n \sin \theta' = n_0 \sin \omega^y$ 和小角度近似 $\sin \theta' \approx \tan \theta'$, 求解(2)式可得

$$\omega^y = \arctan \left[\frac{D^y - d_{\text{eye}}^y}{2R + 2L / (n \cos \theta)} \right], \quad (3)$$

式中 n 为波导材料折射率, n_0 为空气折射率。

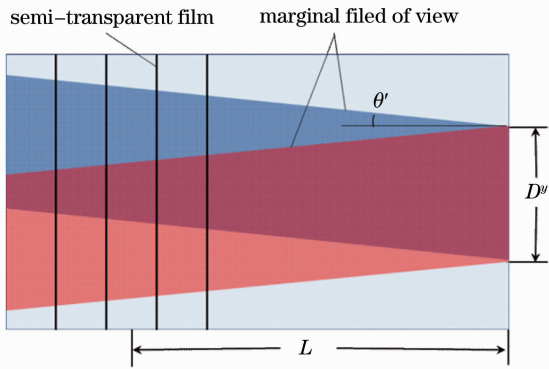


图 3 水平扩展波导的俯视图

Fig. 3 Top view of horizontal extending waveguide

经垂直方向扩展的光束在水平波导内表面反射时应该满足全反射条件,即

$$\theta \leq \frac{\pi}{2} - \arcsin \left(\frac{1}{n} \right), \quad (4)$$

根据图 1 中几何关系可得

$$\theta = \frac{\pi}{2} - 2\alpha + \arcsin \left(\frac{\sin \omega^x}{n} \right), \quad (5)$$

式中 α 为全反射镜与水平基底的夹角。在满足(4)式的基础上,水平方向视场主要受到半透膜阵列的分布区域大小的限制,由图 1 中几何关系可知水平方向半视场为

$$\omega^x = \arctan \left(\frac{Nd_0 - d_{\text{eye}}^x}{2R} \right), \quad (6)$$

式中 N 为半透膜个数, d_0 为水平方向半透膜间距, d_{eye}^x 为水平方向出瞳直径。为确保目镜出瞳经波导扩展后仍能满足目视要求,来自目镜各视场的平行光束经过波导装置扩展输出后应保持平行并与入射前方向保持对称;此外,水平波导中半透膜阵列 2 与全反射镜应对称或垂直放置以减小半透膜多次反射产生杂光^[14-15]。

考虑平板波导结构参数之间的约束特性,其视场受到诸多因素的限制,设计中需要根据各参数的

实际使用要求进行权衡。由于波导系统可看作反射式无焦光学系统,只要目镜的单色像差及色差矫正良好,无需考虑波导本身引入的像差。另外,波导材料应尽量选择高折射率材料以压缩各视场光束在垂直方向波导内的发散角,从而减小垂直扩展后的光斑在全反射镜上尺寸,进而减小波导系统的体积。

4 光学系统设计与仿真

利用光学设计软件对目镜系统进行像差分析,采用光学仿真软件对波导系统的出瞳进行照度均匀性分析。选择图像源分辨率为 $800 \text{ pixel} \times 600 \text{ pixel}$, 像素尺寸为 $12.6 \mu\text{m}$; 水平波导尺寸为 $50 \text{ mm} \times 35 \text{ mm} \times 1.9 \text{ mm}$, 垂直波导尺寸为 $35 \text{ mm} \times 8.9 \text{ mm} \times 5.9 \text{ mm}$, 波导结构质量约 29.2 g 。鉴于波导系统能够实现出瞳扩展,小出瞳目镜即可满足 HMD 的使用要求。根据波导结构的参数,选择目镜视场为 $15^\circ \times 20^\circ$, 出瞳为 2.4 mm , F 数为 11.8 , 其结构如图 4 所示,畸变和点斑均方根 (RMS) 如图 5 (a)、(b) 所示。目镜质量仅 6.8 g , 畸变小于 0.13% , 点斑 RMS 小于 $3.75 \mu\text{m}$, 波像差 RMS 小于 0.045λ , 调制传递函数 (MTF) 在奈奎斯特频率 40 lp/mm 处大于 0.58 , 能够满足系统使用要求。

图 6 给出了平板波导 HMD 光学系统的仿真结构中零视场光线的走向和分布,其他视场也具有类似的光线走向。微显示器发出的光束被目镜准直后经过垂直扩展波导实现一次扩束,然后经过水平扩展波导得到第二次扩束并从波导一侧出射,由于光束两次扩展的方向垂直,最终在 HMD 出瞳处得到二维分布圆形光斑阵列。

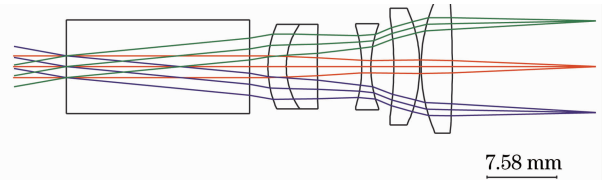


图 4 目镜系统结构图

Fig. 4 Configuration of eyepiece system

图 7 为系统出瞳平面上零视场的辐照度分布。直径为 2.4 mm 圆形目镜出瞳经波导结构的二维扩展后,形成分布在矩形区域内的等直径圆斑,每个圆斑直径仍为 2.4 mm 。圆形光斑之间的缝隙是由半透膜阵列的间隔引起的,为避免因眼瞳落在光斑阵列缝隙而造成观察图像的丢失,该间隔应该小于人眼瞳孔直径。经扩展后的出瞳阵列的间隙是由于波导系统结构参数之间的制约关系难以得到平衡,但

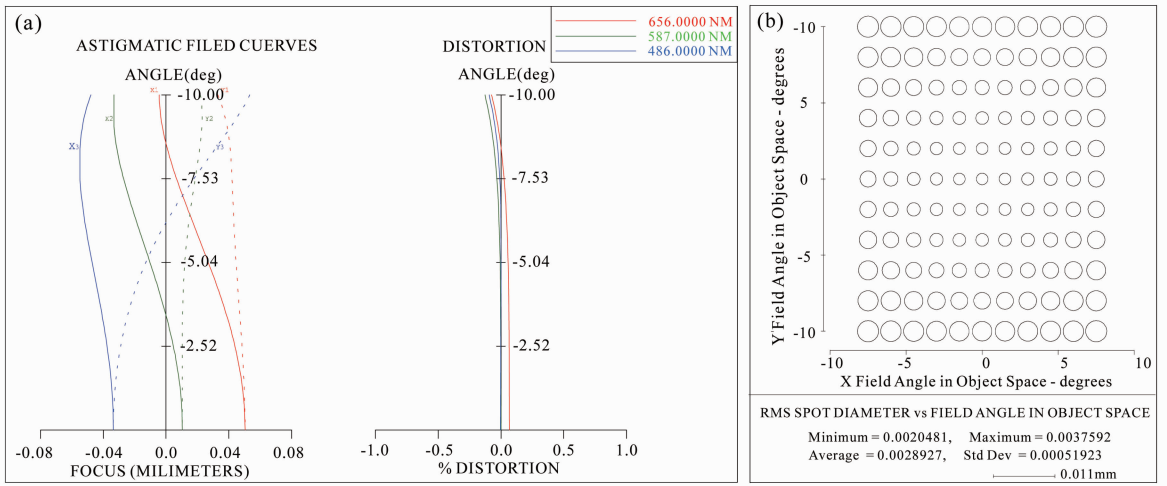


图 5 目镜的(a)畸变和(b)RMS点斑图

Fig. 5 (a) Distortion and (b) RMS spot diameter of eyepiece

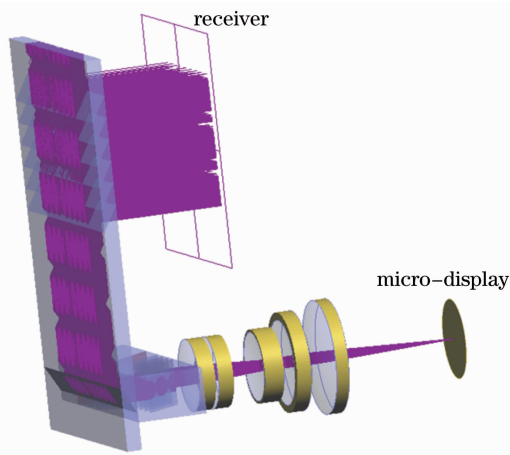


图 6 HMD 光学系统仿真结构图

Fig. 6 Simulation structure of the HMD optical system

存在对数平滑效应,因而在观察不同视场的显示亮度变化并不明显,可见该平板波导结构对光瞳的扩展能够满足人眼观察需求。

图 8 为光学系统垂直方向两个边缘视场($0^\circ, \pm 7.5^\circ$)在出瞳位置的辐照度分布。由于不同视场入射角度的不同,光束经过垂直方向扩展后沿着垂直方向发生偏移,满足(2)式中的规律,随着传输距离的增加和视场角的增大,偏移量增大。除中心视场外,每个视场在系统的出瞳面上都会得到一个平行四边形区域,视场越大,平行四边形的锐角就越小。图 8 中以白线为边界的中心区域是由对称分布的边缘视场($0^\circ, 7.5^\circ$)和($0^\circ, -7.5^\circ$)所对应的平行四边形的重叠区域构成的,正是这个重叠区域决定了系统在 X 方向的出瞳大小。

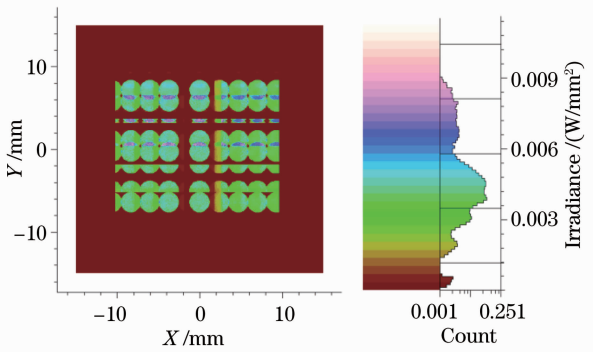


图 7 出瞳处零视场的辐照度分布

Fig. 7 Irradiance distribution at the exit pupil for centre filed

是其最大间隙(约 1.2 mm)小于眼瞳直径(一般为 3 mm 以上),当眼瞳处于出瞳阵列的不同位置时并不会丢失图像,由于眼瞳内一般包括 1~2 个光斑,光通量变化在两倍以内,鉴于人眼对光通量的响应

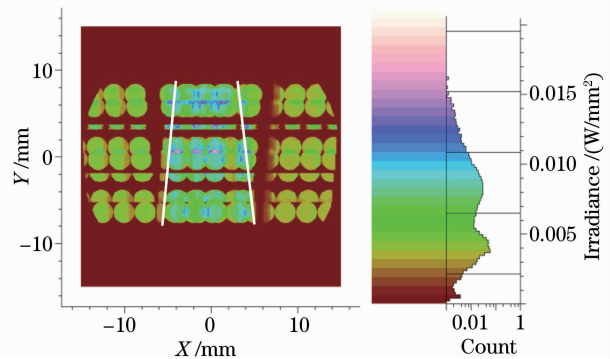


图 8 出瞳处垂直视场($0^\circ, \pm 7.5^\circ$)的辐照度分布

Fig. 8 Irradiance distribution at the exit pupil for vertical filed of view ($0^\circ, \pm 7.5^\circ$)

图 9 给出了光学系统水平方向两个边缘视场($\pm 10^\circ, 0^\circ$)在出瞳位置的辐照度分布。对比图 8 和图 9 可知,垂直方向和水平方向视场对系统结构及

出瞳分布的影响不同,垂直方向的不同视场主要引起出瞳边缘的梯形分布,而水平方向的不同视场主要造成出瞳光斑沿 Y 方向间隔的变化。为使系统最终的扩展出瞳阵列照度均匀,各圆形光斑的辐照度应相同,因此半透膜阵列的反射率应沿着光束传输方向逐渐增大;垂直扩展波导中半透膜的反射率按照光线入射的先后顺序应依次满足 $R = 1/M, 1/(M-1), \dots, 1$, 其中 M 表示垂直基底中半透膜个数;水平扩展波导中半透膜的反射率应按照光线入射的先后顺序应依次满足 $R = 1/(K-1), 1/(K-2) \dots, 0.5$, 其中 K 表示水平基底中半透膜个数。此外,为抑制光线在水平扩展波导中传播时产生的杂光反射,水平基底中半透膜需要经过特殊的膜系设计使得反射率在满足以上关系的同时减小其他角度入射光的反射率^[14]。

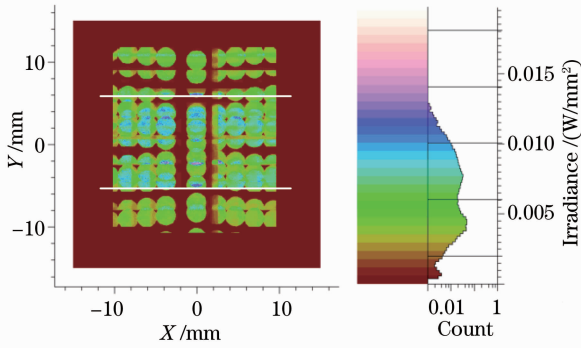


图9 出瞳处水平视场($\pm 10^\circ, 0^\circ$)的辐照度分布
Fig. 9 Irradiance distribution at the exit pupil for horizontal fields of view ($\pm 10^\circ, 0^\circ$)

图10为光学系统4个边缘视场($\pm 10^\circ, 0^\circ$)、($0^\circ, \pm 7.5^\circ$)在出瞳位置的辐照度分布。可见视场对称分布的情形下,多个视场叠加后形成的有效光瞳区域的形状近似为一个等腰梯形,梯形上底为7 mm,下底为10 mm,高为12 mm,当眼瞳落入该梯形区域内时即可观察来自微显示器所有视场的信息。另外,该系统还可将显示器图像叠加到外部景物之上,这是由于水平基底中的半透膜阵列对于外界环境光而言可视为半透明,其半透膜只针对特定设计角度范围的光束进行反射分光,并且该角度范围内的光束在基底中满足全反射条件;从空气向平板基底入射的环境光其折射角必然小于全反射临界角,该光束经过半透膜时大部分发生透射直接从基底另一侧输出,小部分光束经半透膜反射后从基底的入射端输出,相当于环境光有所衰减的透过平板基底。可见,水平基底中半透膜的存在并不影响外

部环境光的透射方向,只是强度有所衰减,因而可实现双通道显示。

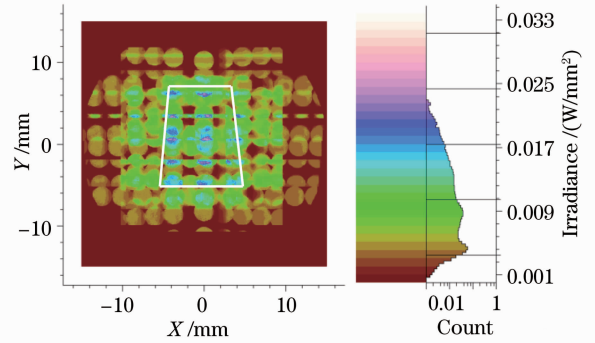


图10 出瞳处边缘视场($\pm 10^\circ, 0^\circ$)、($0^\circ, \pm 7.5^\circ$)的辐照度分布

Fig. 10 Irradiance distribution at the exit pupil for edge fields of view ($\pm 10^\circ, 0^\circ$) and ($0^\circ, \pm 7.5^\circ$)

通常采用全息光栅结构的波导型HMD由于光栅的衍射效率很低,致使系统的光能利用率一般低于10%,难以得到进一步提高^[12]。采用半透膜阵列波导进行扩展,垂直扩展波导中半透膜只是对光束进行分光,透射光和反射光均得到了有效利用,考虑材料的微量吸收和入射端面的菲涅尔反射损耗,其能量利用率也能达到90%以上;水平扩展波导中为避免杂光反射,最后一块反射膜的反射率最大为50%,因而水平扩展方向的能量损失仅由最后一块反射膜的透射损失构成,忽略材料微量吸收,水平波导的能量利用率理论上可达83%,远高于光栅结构约为10%的能量利用率;此外,由于系统的有效出瞳只占了扩展光斑中心的梯形区域部分(见图10),其能量利用率约为40%。根据以上讨论,波导系统的能量利用能够达到30%,考虑透镜的损耗和实际加工因素,系统总能量利用率会有所下降,但仍远高于采用全息光栅的能量利用率。

5 结 论

将半透膜阵列平板波导与目镜相结合设计了具有阵列出瞳的平板波导型头戴显示器光学系统,该系统结构轻小便于集成。对平板波导系统的工作原理及结构进行了分析,并对目镜和波导结构进行了成像分析和光学仿真分析。所设计系统视场为 $15^\circ \times 20^\circ$, F 数为11.8,畸变小于0.13%,点斑RMS小于 $3.75 \mu\text{m}$,波像差RMS小于 0.045λ ,系统总质量约36 g。通过权衡平板波导的结构参数进行优化设计,实现了目镜出瞳的有效扩展,出瞳尺寸为 $7 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。仿真结果表明,

该光学系统出瞳辐照度分布均匀,能量利用率高,具有良好的成像质量,可应用于新一代头戴显示器。

参 考 文 献

- 1 C E Rash, M B Russo, T R Letowski, *et al.*. *Helmet-Mounted Displays: Sensation, Perception and Cognitive Issues* [M]. Fort Rucker; U. S. Army Aeromedical Research Laboratory, 2009.
- 2 S K Ong, A Y C Nee, S K Ong. *Virtual and Augmented Reality Applications in Manufacturing* [M]. London: Springer-Verlag, 2004.
- 3 Lu Haiping, Liu Weiqi, Kang Yusi, *et al.*. Design of compact optical system in panoramic three-dimensional head mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(5): 0522002.
卢海平, 刘伟奇, 康玉思, 等. 全景三维立体头盔显示光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(5): 0522002.
- 4 O Cakmakci, J Rolland. Head-worn displays: a review [J]. *Journal of Display Technology*, 2006, 2(3): 199–216.
- 5 Tong Jingbo, Cui Qingfeng, Xue Changxi, *et al.*. Optical design of an off-axis dual-channel helmet mounted display [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(9): 2662–2667.
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.
- 6 Li Hua, Zhang Xin, Wang Chao, *et al.*. Optical design of an avionic helmet-mounted displays using freeform surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0322001.
李 华, 张 新, 王 超, 等. 自由曲面机载头盔显示器光学系统设计[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0322001.
- 7 L Eisen, M Meyklyar, M Golub, *et al.*. Planar configuration for image projection [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(17): 4005–4011.
- 8 A Cameron. The application of holographic optical waveguide technology to the Q-sight family of helmet mounted displays [C]. SPIE, 2009, 7326: 73260H.
- 9 P L Wisely. Head up and head mounted display performance improvements through advanced techniques in the manipulation of light [C]. SPIE, 2009, 7327: 732706.
- 10 H Mukawa, K Akutsu, I Matsumura, *et al.*. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms [J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, 17(3): 185–193.
- 11 R Shi, J Liu, H Z Zhao, *et al.*. Chromatic dispersion correction in planar waveguide using one-layer volume holograms based on three-step exposure [J]. *Appl Opt*, 2012, 51(20): 4703–4708.
- 12 Zeng Fei, Zhang Xin, Zhang Jianping, *et al.*. Holographic waveguide head-mounted display system design based on prism-grating structure [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0909001.
曾 飞, 张 新, 张建萍, 等. 基于棱镜光栅结构的全息波导头盔显示系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(9): 0909001.
- 13 Liu Hui, Zheng Zhenrong, Li Haifeng, *et al.*. Design of planar display based on transparent film array [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(5): 145–150.
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.
- 14 Y Amitai. Substrate-Guided Optical Device Utilizing Polarization Beam Splitters; US6829095[P]. 2008-6-26.
- 15 Y Amitai. Substrate-Guided Optical Beam Expander; US6829095[P]. 2004-12-7.

栏目编辑: 韩 峰