

基于层叠阵列波导的穿透式视频眼镜设计

韩昕彦 余飞鸿

浙江大学光电信息工程学系, 浙江 杭州 310027

摘要 设计了一种采用层叠阵列波导结构的紧凑型穿透式视频眼镜光学系统。光学系统由层叠阵列波导系统、照明系统、目镜系统组成。层叠阵列波导是一种具有角度选择膜系实现穿透式显示的全新光学组合器,可以消除半透半反面波导的鬼像效应;照明系统为LCOS微显示器提供均匀照明,均匀性为92.3%;目镜系统负责光束的准直,对其调制传递函数、点列图、场曲、畸变和色差等参数进行了分析,结果表明获得了良好的光学性能。该穿透式视频眼镜分辨率为825 pixel×480 pixel,系统总重135 g,在20 mm出瞳距离和8 mm×8 mm眼动范围下,实现30°视场,在驱动电路功耗为1 W的情况下,系统亮度为3000 nit。

关键词 光学设计; 穿透式显示; 层叠阵列波导; 鬼像

中图分类号 TN27

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0522004

See-Through Video Glass Based on Cascaded Waveguide Combiner

Han Xinyan Yu Feihong

Department of Optical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract A compact see-through video glass optical system based on cascaded waveguide combiner is designed. This optical system is composed of cascaded waveguide combiner, illumination system and eyepiece system. Cascaded waveguide combiner is a new configuration, having an angle selecting film. It can eliminate the ghost images of the semitransparent waveguide. Illumination system for LCOS achieves 92.3% uniformity. Considering modulation transfer function, spot diagram, field curvature, distortion and lateral color, eyepiece system is analyzed. The parameters of the see-through video glasses are listed as follows: LCOS microdisplay resolution: 825 pixel×480 pixel, the total weight of optical system: 135 g. Within a 20 mm exit pupil distance and 8 mm×8 mm eye motion box, system can achieve 30° field of view, under the drive circuit power consumption of 1 W, the brightness is 3000nit.

Key words optical design; see-through display; cascaded waveguide combiner; ghost image

OCIS codes 220.2740; 080.2740; 120.4570

1 引 言

穿透式视频眼镜是双通道的,使用者通过它能够同时看到计算机产生的虚拟图像和外界景象,因而不产生眩晕,在这类光学双通道微显示器中,需要将图像源传来的虚拟图像信息与外界景象的信息相融合,这部分任务由光学系统来实现^[1-2]。性能良好、结构紧凑、小型化的穿透式视频眼镜,对光学系统的设计提出了更高的挑战,传统的光学结构已经不能很好地满足它的需求,需要探索新的设计方法。目前,实现穿透式显示的光学组合器主要包括^[3-7]: 45°半透半反镜波导,回射屏技术,离轴合成器,自由曲面棱镜,全息波导等,但它们存在很多不足^[8]。

本文采用一种全新的层叠阵列波导结构作为实现穿透式显示的光学组合器,其可以实现目镜系统出瞳

收稿日期: 2014-12-29; 收到修改稿日期: 2015-01-10

作者简介: 韩昕彦(1989—),男,硕士研究生,主要从事光学设计以及FPGA软件方面的研究。E-mail: hanxinyan@sina.com

导师简介: 余飞鸿(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光学工程方面的研究。E-mail: feihongyu@zju.edu.cn

的扩展,从而在很薄的厚度下实现较大的视场。该系统结构紧凑、易加工、无鬼像,不受使用环境限制。另外还对穿透式视频眼镜的照明系统和目镜系统进行了设计,均获得了良好的光学特性,与层叠阵列波导结构一起组成了穿透式视频眼镜光学系统。

2 设计原理

2.1 穿透式显示基本原理

图1为穿透式显示光学原理图,图像源的信息经中继光学系统放大后投射在半透半反组合镜上反射进入人眼,同时前方外部景象也可以透过组合镜进入人眼,即人眼通过组合镜可以同时看到图像源和外部景象信息。它是一种半浸入式显示,信息是双通道的,也被称为增强现实显示。

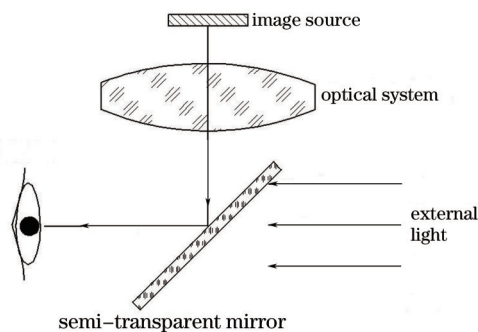


图1 穿透式显示原理图

Fig.1 Diagram of see-through optics

2.2 穿透式显示光学系统结构

光学系统存在两种结构:pupil forming式和 non-pupil forming式,如图2所示。Pupil forming式光学系统由三部分组成:中继光学系统、目镜系统和光学组合器。图像源发出的光线经过中继透镜组在目镜系统的焦平面上成像,中间像经目镜系统的准直放大后变为各个视场的平行光,这些平行光由光学组合器反射进入人眼。图像源发出的光线经过中继透镜组,可以减小光学系统口径;场镜的作用是减小边缘视场主光线在目镜上的投射高度,这样有利于增大视频眼镜的视场。Non-pupil forming式光学系统与 pupil forming式相比减少了中继光学系统,因而结构更加简单紧凑、重量更加轻,但也存在大视场条件下像差校正困难的不足。

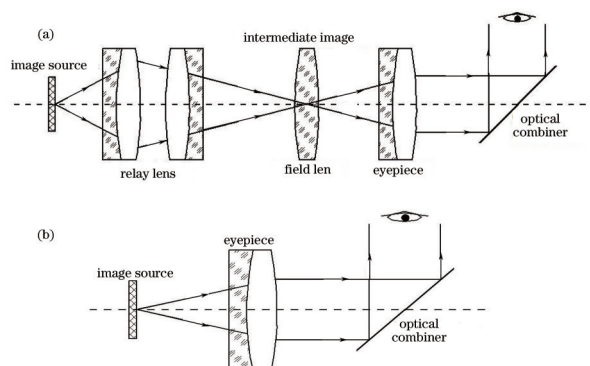


图2 穿透式显示光学系统结构。(a) Pupil forming; (b) non-pupil forming

Fig.2 Structure of see-through optical system. (a) Pupil forming; (b) non-pupil forming

2.3 图像源的选择

微显示器是图像源信息的直接输出器件,它的规格参数直接影响着光学系统的设计。微型显示器尺寸受到光学系统的视场、出瞳距离、出瞳直径、焦距等参数的制约^[9]。大尺寸的微显示器可以获得大的视场,但是尺寸过大会造成光学系统尺寸和重量增加,而且大视场像差校正难度加大,设计的是一种穿透式视频眼镜显示器,其目的是在不影响使用者观察外部景象的情况下,能让使用者获得一些想要的信息,例如 GPS 位置信息、

短信、电话等,设计中最重要的目标是使系统结构紧凑、体积小、重量轻,因此本设计选择小尺寸显示器。硅基液晶(LCOS)在单一微型显示器上提供高品质全彩显示,且尺寸小、分辨率高、亮度高,但是LCOS是工作在反射模式下,因此需要额外的照明系统。有机发光二极管(OLED)作为自发光器件可以省去照明系统,但是目前小尺寸OLED的分辨率低、亮度低,而且价格昂贵,现阶段还不适合穿透式视频眼镜显示器应用。因此本设计选择Himax公司生产的0.29"CS-LCOS作为视频眼镜微显示器,其分辨率为852 pixel×640 pixel,像素大小为7.5 μm。

3 设计实例

3.1 层叠阵列波导设计

3.1.1 半透半反面波导光学组合器原理

如图3所示半透半反面阵列波导光学组合器由入射反射面、波导基板以及相互平行的多个半透半反面组成^[10]。由于存在多个反射面,该结构可以实现出瞳扩展,在很薄的厚度下实现大视场。图4为光线在波导中传播原理图,图像源发出的光线经目镜系统准直后,由波导反射面耦合进入波导,各视场光线依据全反射定理传播,光线入射半透半反面时,一部分反射进入人眼,另一部分透射继续传播,同时外部光线也可透过半透半反面进入人眼,从而实现穿透式显示。

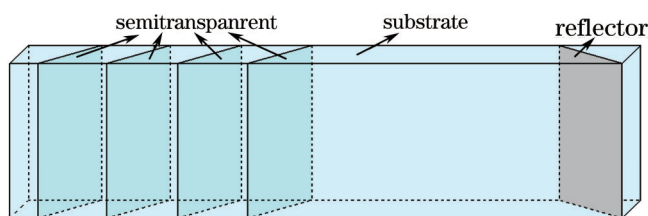


图3 半透半反面阵列波导结构图

Fig.3 Diagram of semitransparent waveguide

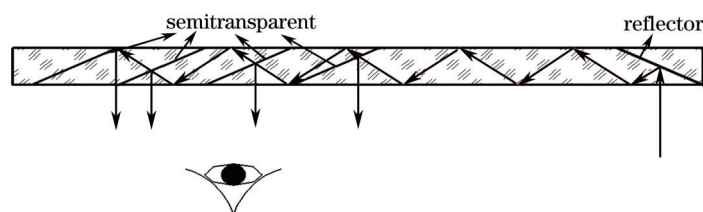


图4 光线在半透半反面阵列波导传播路径图

Fig.4 Diagram of ray trace in semitransparent waveguide

然而半透半反面的特性造成了无法避免的鬼像,是该结构的严重缺陷。图5对鬼像的形成进行了说明,一条入射光线在出射波导时变为两个视场的光线,从而形成鬼像(光线2)。

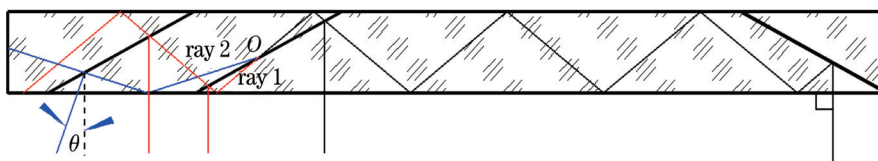


图5 半透半反面阵列波导鬼像说明

Fig.5 Diagram of ghost images in semitransparent waveguide

3.1.2 层叠阵列波导显示原理

假设消除所产生的鬼像光线,即避免产生图5中光线2,那么就可以把波导结构用在视频眼镜中。图5中入射半透半反面的光线按入射角度可以分为两种:一种是小角度入射光线,如图6(a)所示;另一种是大角度入射光线,如图6(b)所示。假设可以设计一种角度选择膜系,可以让小角度入射的光线,一部分反射,一部分透射,而以大角度入射的光线完全透射,那么就可以消除光线2,也就消除了鬼像。假设系统要实现的视场角为 $\pm\theta$ (θ 为波导中的角度),中心视场小角度入射角为 β ,大角度入射角为 β' ,则角度选择膜系需要对 $\beta\pm\theta$ 角度范围的光线

具有一定的反射率,而对 $\beta' \pm \theta$ 角度范围的光线完全透射,图7为角度选择膜系理想反射率曲线。层叠阵列波导就是具有这种角度选择膜系的光学组合器,图8为图像源中心视场光线(实线)和外部视场光线(虚线)在层叠阵列波导中的传播示意图。

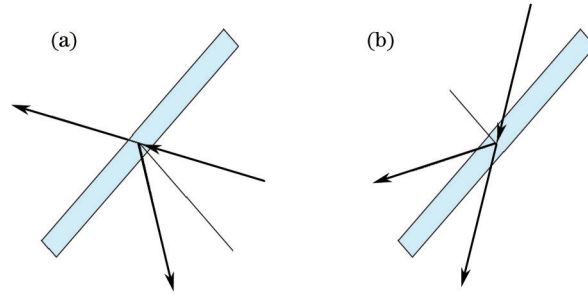


图6 半透半反面上两种入射情况。(a)小角度入射;(b)大角度入射

Fig.6 Two kinds of incident rays in semitransparent. (a) Small incident angle; (b) big incident angle

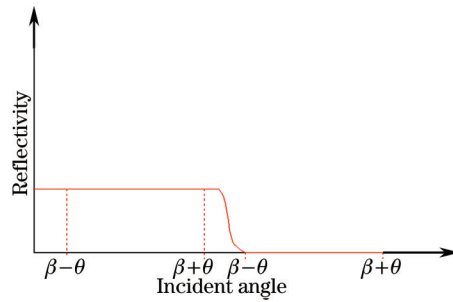


图7 角度选择膜系理想反射率曲线

Fig.7 Ideal reflectance curve of angle selecting film

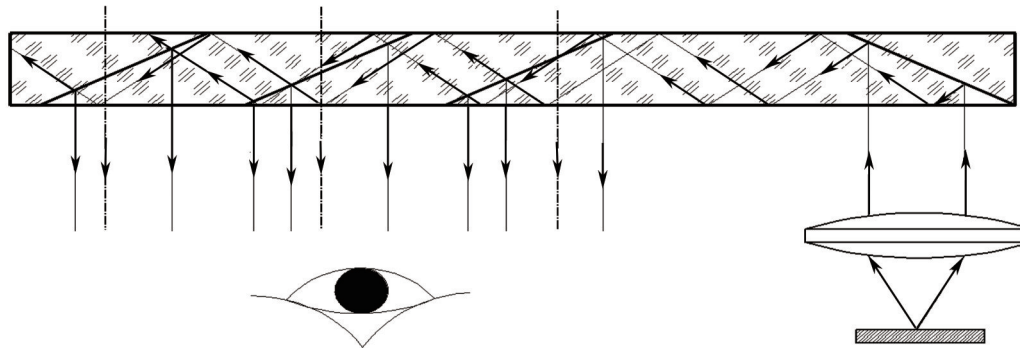


图8 光线在层叠阵列波导中的传播

Fig.8 Diagram of ray tracing in cascaded waveguide

3.1.3 层叠阵列波导结构设计

图9为层叠阵列波导各角度参数示意图,设角度选择膜系反射面上小入射角为 β 、大入射角为 β' 。为了保证入射的中心视场光线出射时也为中心视场,则有 $\alpha_{sur1} = \alpha'_{sur1}$,再依据反射定律以及图中几何关系可以得到如下公式:

$$\alpha_{sur1} = 90^\circ - \frac{\alpha_{in}}{2}, \quad (1)$$

$$\alpha_{sur2} = \frac{\alpha_{in}}{2}, \quad (2)$$

$$\beta = 90^\circ - \frac{\alpha_{in}}{2}, \quad (3)$$

$$\beta' = 270^\circ - \frac{3\alpha_{in}}{2}. \quad (4)$$

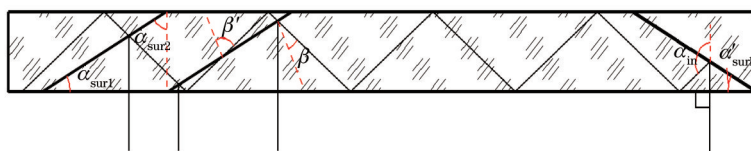


图9 层叠阵列波导参数示意图

Fig.9 Schematic of cascaded waveguide's parameters

(1)~(4)式说明了层叠阵列波导角度参数关系,可以依据需求设计层叠阵列波导的结构。假设波导中实现视场角为 $\pm\theta$,首先 $-\theta$ 到 $+\theta$ 视场范围内的光线需满足全反射定律:

$$180^\circ - \alpha_{in} - \theta \geq \arcsin \frac{1}{n}, \quad (5)$$

式中 n 为波导基板折射率,一般为1.5~1.6。假设视场为 30° , $n=1.5$,则 $\theta=10^\circ$,可得 $\alpha_{in} \leq 130^\circ$ 。根据角度选择膜系的原理,两个人射范围分开才能设计出合理的膜系,可得:

$$\beta' - \theta > \beta + \theta, \quad (6)$$

联立(3)、(4)式有: $\alpha_{in} < 160^\circ$ 。

对于 $\beta' + \theta$ 的取值要分两种情况来讨论:

1) 若 $\beta' + \theta \leq 90^\circ$ ($\alpha_{in} \geq 127^\circ$), 联立(5)、(6)式得出 α_{in} 的取值范围,有:

$$127^\circ \leq \alpha_{in} \leq 130^\circ. \quad (7)$$

2) 若 $\beta' + \theta > 90^\circ$ ($\alpha_{in} < 127^\circ$), 此时光线在角度选择反射面的入射角等效为 $180^\circ - (\beta' + \theta)$, 因为必须把两个角度范围分开, 则有:

$$180^\circ - (\beta' + \theta) > \beta + \theta, \quad (8)$$

联立(3)、(4)式,再根据(5)、(6)式所得结果有:

$$100^\circ < \alpha_{in} < 127^\circ. \quad (9)$$

综合以上两种情况,最后可得 α_{in} 的取值范围为: $100^\circ < \alpha_{in} \leq 130^\circ$ 。由(1)式可以得到 α_{sur1} 的取值范围为 $25^\circ \leq \alpha_{sur1} < 40^\circ$ 。至此,得到了要实现 30° 视场时,波导的角度参数取值范围。

参照图9可知,层叠阵列波导由于具有多个角度选择反射面,其水平视场可近似表示为:

$$F_{max} \approx \frac{N \cdot T \tan \alpha_{sur2} - d_{eye}}{R_{eye}}, \quad (10)$$

式中 d_{eye} 为人眼的瞳孔大小, T 为波导基板的厚度, R_{eye} 为人眼出瞳距, N 为角度选择反射面的个数。如果想实现 30° 的视场,假设出射反射面个数为5,计算可得波导厚度仅为1.8 mm(计算时取 $\alpha_{sur1}=25^\circ$, $R_{eye}=20$ mm, $d_{eye}=8$ mm)。

仅对水平方向出瞳扩展的情况下,垂直视场的公式近似为:

$$F_{max}^\eta \approx \frac{D_\eta - d_{eye}}{R_{eye} + L/(n \cdot \sin \alpha_{in})}, \quad (11)$$

式中为 D_η 为垂直视场入瞳直径(即目镜系统的出瞳直径), L 为入瞳与第一个角度选择膜系反射面之间距离。

3.1.4 角度选择膜系的设计及仿真

本设计实现 30° 视场,层叠阵列波导基板材料选择肖特公司的F8,其折射率 $n=1.5991$ 。取 $\alpha_{in}=130^\circ$,按上述推导可得 $\alpha_{sur1}=25^\circ$, $\beta=25^\circ$, $\beta'=75^\circ$, $N=5$, $T=1.8$ mm。则角度选择膜系设计目标为:对 $15^\circ \sim 35^\circ$ 的入射角反射率为10%,对 $65^\circ \sim 85^\circ$ 的入射角透射率大于99.5%。LCOS利用S偏振光,照明LED光谱范围为400~650 nm,采用TFCal进行角度选择膜系设计,膜系材料采用 Al_2O_3 、 TiO_2 、 SiO_2 ,软件最后得到37层膜系,按照设计结果进行实际加工,所测得的反射率曲线如图10所示,考虑到测量误差等因素,膜系反射率符合理论设计。

在TracePro仿真软件中建立角度选择膜系和层叠阵列波导模型,用中心视场光线追迹比较半透半反面波导和层叠阵列波导光线传播情况,如图11所示。从结果可以看出,半透半反面波导存在鬼像,层叠阵列波导无鬼像,因此验证了理论设计的结论,并且说明所设计的角度选择膜系的性能良好。

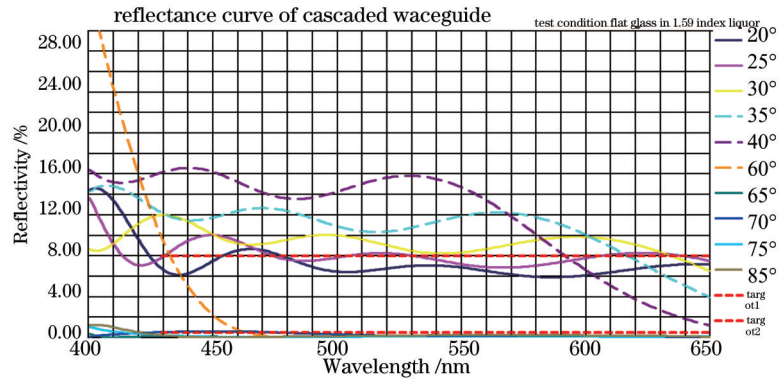


图 10 角度选择膜系实际反射率曲线

Fig.10 Reflectance curves of angle selecting film



图 11 两种波导光线追迹。(a) 半透半反面波导; (b) 层叠阵列波导

Fig.11 Ray trace of two kinds of waveguide. (a) Semitransparent waveguide; (b) cascaded waveguide

然后,对层叠阵列波导进行了 0° 视场、水平视场 $\pm 10^\circ$ 、垂直视场 $\pm 10^\circ$ 的光线追迹,来验证角度选择膜系是否符合所设计的视场范围,追迹角度分布如图 12 所示,可以看到结果中没有产生鬼像视场,因此说明通过 TFCal 软件设计的角度选择膜系满足视场要求。

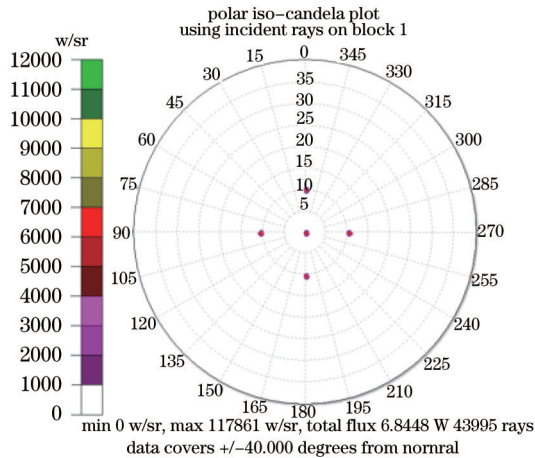


图 12 不同视场光线追迹角度分布图

Fig.12 Candela plot of ray trace

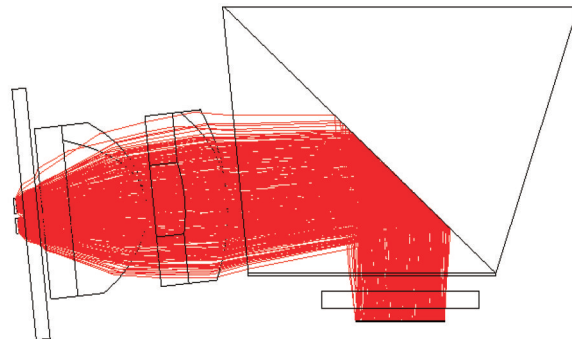


图 13 照明系统结构图

Fig.13 Diagram of illumination system

3.2 照明系统设计

本设计采用LED加两片准直透镜作为照明系统,因为采用反射式的LCOS作为显示芯片,所以需要加入偏振分束器(PBS)。在CODEV软件中对系统进行优化,利用TracePro对优化后系统进行仿真,光路如图13所示。LCOS有效区域仿真照度如图14所示,可以看到LCOS面上的光能利用率为38%,考虑偏振损失后,光能利用率约为19%,按照ANSI9点法对LCOS面照度进行采样,其均匀性为92.3%。

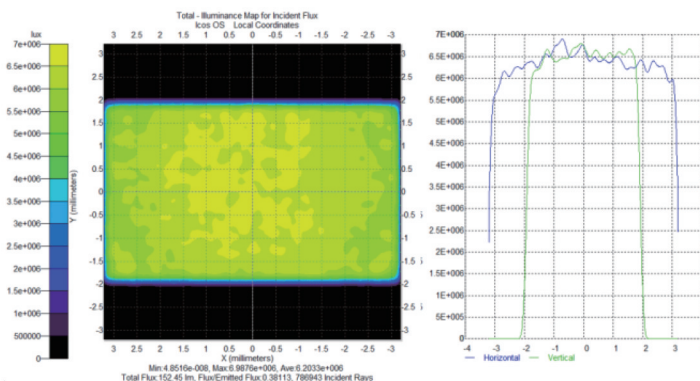


图 14 LCOS 面仿真照度

Fig.14 Illuminance map for LCOS

3.3 目镜系统设计

对于电子消费领域的视频眼镜显示器的设计要求为:1)外形尺寸:轻、薄、眼镜式;2)成本低、光学零件易于大批量生产;3)功耗小于10 mW;4)周边视场不受影响;5)眼动范围大于10 mm×10 mm;6)出瞳距18~21 mm;7)分辨率大于QVGA;8)透射率大于90%;9)视场不小于20°;10)对比度大于50:1;11)畸变小于5%;12)调制传递函数(@60 lp/mm)大于0.3。

本设计的目镜系统仅使用一片球面反射镜,使系统结构紧凑、便于安装,并且满足低成本要求。成像系统通过再加入一个PBS使其与照明系统中PBS相配合,并且波导和目镜系统采用折射式的耦合方式,使最后的显示器具有眼镜式的形式。利用CODEV软件优化设计后,目镜系统主要性能指标如下:1)出瞳直径为7 mm;2)出瞳距离为8 mm;3)视场角为26.6°(H)×15.2°(V);4)焦距为 $f=13.53$ mm;5) F 数为 $f/D=1.93$;6)LCOS图像源分辨率为852 pixel×480 pixel;7)像素视差大小: $\varphi=60 \times (26.6^\circ / 852) = 1.87'$ 。

图16(a)为目镜系统示意图,系统中用理想透镜来模拟人眼的成像情况。目镜系统的像差曲线如图16(b)~(f)所示,各视场调制传递函数曲线在空间频率30 lp/mm处均大于0.38;从点列图可以看到中心视场均方根直径为0.012 mm,边缘视场均方根直径为0.034 mm;垂轴球差小于0.06 mm,场曲小于0.15 mm,最大畸变约为1%。

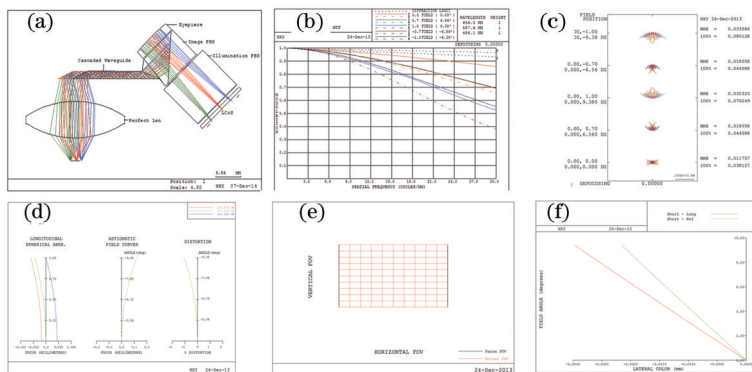


图 15 目镜系统与像差。(a) 目镜系统;(b) 调制传递函数;(c) 点列图;(d) 横向像差;(e) 畸变网格;(f) 垂轴色差

Fig.15 Diagram of eyepiece system and aberration. (a) Eyepiece system (b) modulation transfer function; (c) spot diagram; (d) transverse aberration; (e) distortion grid; (f) lateral color aberration

4 系统验证

4.1 目镜系统与波导系统耦合验证

基于层叠阵列波导的穿透式视频眼镜完整的光学结构如图 16 所示,包括照明系统、目镜系统以及层叠阵列波导系统,由 LED 发出光线经过两片准直透镜在 LCOS 面上形成均匀的照明光斑,由 LCOS 反射调制后的光线经由反射式目镜准直后,各视场的平行光通过转折棱镜耦合进入层叠阵列波导中,最后由波导出射反射面耦合进入人眼。

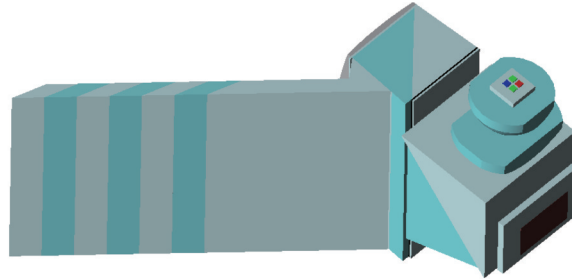


图 16 穿透式视频眼镜系统图

Fig.16 Optical system of see-through video glass

在 TracePro 软件中搭建的完整系统模型,对目镜与波导系统的耦合进行了鬼像分析。如图 17 所示,在 LCOS 面上模拟 4 个发光视场,通过层叠阵列波导后以一片球面镜使各视场光线成像在其焦平面上,观察焦平面上成像情况来分析是否存在鬼像。从图 18 的结果中可以看到,系统中并没有产生鬼像(该结构下人眼看到的图像相对于 LCOS 来说是上下左右颠倒的,设计中可通过颠倒 LCOS 显示芯片的位置或通过 LCOS 驱动电路进行调节)。

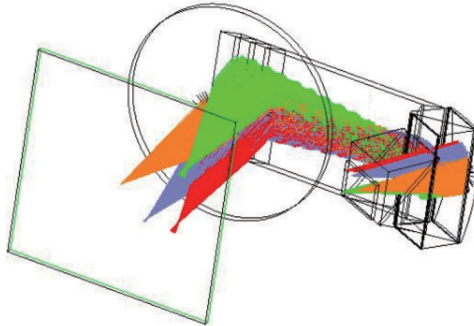


图 17 光线追迹图

Fig.17 Layout of ray trace

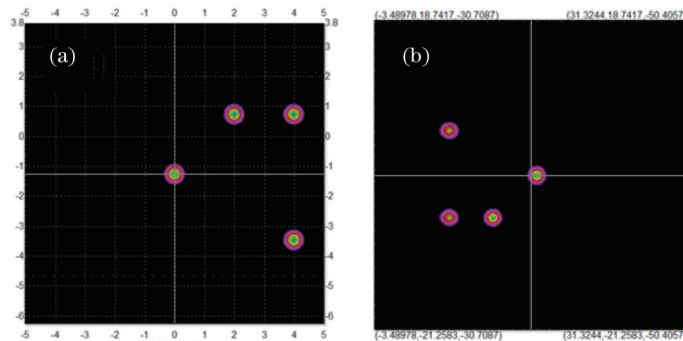


图 18 仿真结果。(a) LCOS 面; (b) 球面镜焦平面

Fig.18 Simulation result. (a) LCOS plan; (b) focal plan of spherical lens

4.2 样机验证

穿透式视频眼镜样机实物如图 19 所示,光学系统总重量为 135 g,尺寸为 10 mm×21 mm×30 mm。在 LED 驱动功率为 1 W, LCOS 驱动功率为 40 mW 的情况下,得到穿透式视频眼镜参数如表 1 所示。

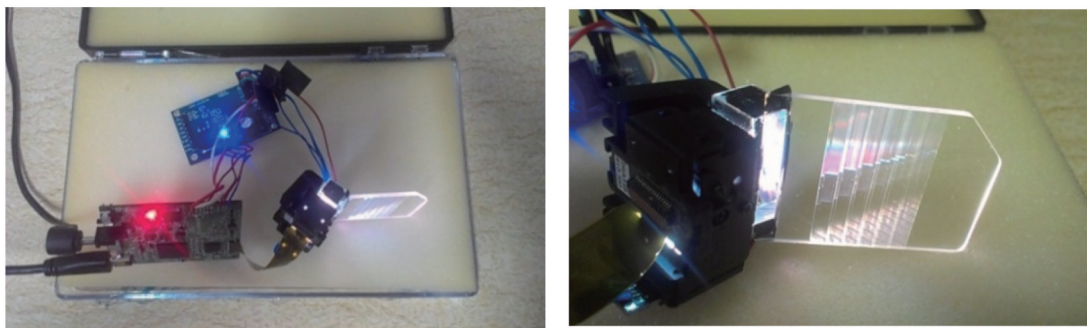


图 19 穿透式视频眼镜样机

Fig.19 See-through video glass prototype

表 1 穿透式视频眼镜样机参数

Table 1 Specifications of see-through video glass prototype

Specifications	Description
Display format	852 pixel×480 pixel
Field of view	30°(22" at 1m away)
Weight	135 g
Size	10 mm×21 mm×3.0mm
Eye relief	20 mm
Eye motion box	8 mm×8 mm
Brightness	3000 nit
Contrast ratio	100:1
Consumption	1 W

5 结 论

对穿透式视频眼镜显示器的光学系统进行了设计。提出一种新型层叠阵列波导结构,对层叠阵列波导的结构进行了理论推导。对角度选择膜系进行设计,通过选择合适的角度,实现了光线在反射面入射角的分离;依据两个范围的入射角度,对角度反射膜系进行了设计加工,通过软件仿真,验证了反射膜的可行性。对视频眼镜的照明系统和目镜系统进行优化设计,照明系统得到了较高的光效率以及均匀性;目镜系统成像质量良好,满足显示器的设计目标和使用要求。

参 考 文 献

- 1 G Dolgoff. Real-dephtn imaging: a new no-glasses 3-D imaging technology with video/dotta projection applications[J]. SPIE, 1997, 3012: 214-221.269-272.
- 2 K Fukai, H Amafuji, Y Murata. Color and high resolution head-mounted display[J]. SPIE, 1994, 2177: 317-324.
- 3 Xiaoyu Miao, Adrian Wong, Babak Amirparviz. Compact See-Through Display System: US, US20130021658A1[P]. 2013-1-24.
- 4 Hong Hua, Yong gang Hua, Jannick P Rolland. Design of an ultralight and compact projective lens[J]. A O. 2003, 42(1): 97-107.
- 5 S Yamazaki, *et al.*. Development of super compact HMD with sight line input[C]. Proceeding of LD Image Conferenle, 1995: 70-75.
- 6 H Mukawa, K Akutsu, I Matsumura, *et al.*. A full color eyewear display using holographic planar waveguides[J]. Journal of Society for Information Display, 2009, 17(3): 185-193.
- 7 Bernard Kress, Thad Starner. A review of head-mounted displays (HMD) technologies and applications for consumer electronics[J]. SPIE, 2013, 8720: 87200A.
- 8 J P. Rolland, Hong Hua. Head-mounted display systems[J]. Encyclopedia of Optical Engineering, 2005: 1-14.
- 9 J Johns, S Walker. Imaging with planar optical systems[J]. Opt Communications, 1990, 76(5): 313-317.

栏目编辑: 韩 峰