

# 多层全息平板波导显示系统研究

胡润, 田方旭, 林旗清, 路陈陈, 张军\*

暨南大学理工学院广州市可见光通信重点实验室, 广东 广州 510632

**摘要** 为了实现增强现实头戴显示系统全色显示功能,建立了多层全息平板波导显示系统,并对该系统所采用的衍射原理、光栅常数及对应衍射波长等技术参数进行了研究。首先,根据光栅方程及全反射理论,介绍了全息平板波导入耦合光栅常数与传输光波长之间的限制关系。其次,为了实现光瞳扩展,介绍了转折光栅、出耦合光栅与入耦合光栅之间的限制关系。在此基础上,以 550 nm 绿光为例仿真设计了单层全息平板波导显示结构。然后,以单层全息平板波导为基础,建立了以 685 nm、550 nm 和 437 nm 作为三基色的三层全息平板波导显示系统。最后,使用 digital light processing 投影系统为光源检验了三层全息平板波导加工样品的出光效果。实验结果表明,三层全息平板波导可以实现光瞳扩展和全色显示。多层全息平板波导能够实现增强现实头戴显示系统全色显示。

**关键词** 全息; 全息光栅; 多层平板波导; 全色显示; 出瞳扩展; 增强现实显示头盔

中图分类号 O436

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1209001

## Multilayer Holographic Planar Waveguide Display System

Hu Run, Tian Fangxu, Lin Qiqing, Lu Chenchen, Zhang Jun\*

Guangzhou Key Laboratory of Visible Light Communication, College of Science and Engineering,  
Jinan University, Guangzhou 510632, Guangdong, China

**Abstract** In this paper, a multilayer holographic flat waveguide display system has been proposed to realize the full-color display function of the augmented reality head-mounted display system. Furthermore, the diffraction principle, grating constant, and corresponding diffraction wavelength are investigated. First, the grating equation and total reflection theory were used to introduce the limiting relationship between the coupling grating constant and the transmitted light wavelength of the holographic planar waveguide. Second, to realize pupil expansion, the restrictive relationship between turning, out-coupling, and in-coupling gratings were applied. Third, the single-layer holographic flat waveguide display structure for 550-nm green light was simulated and designed. Next, based on the single-layer holographic planar waveguide, a three-layer holographic planar waveguide display system with 685 nm, 550 nm, and 437 nm as the three primary colors was established. Finally, the light output effect of three-layer holographic planar waveguide processing samples was examined using digital light processing projection system as a light source. The experimental results show that the three-layer holographic planar waveguide realized pupil expansion and panchromatic display. Moreover, multilayer holographic planar waveguide realized a full-color display of an augmented reality head-mounted display system.

**Key words** holography; holographic grating; multilayer planar waveguide; panchromatic display; pupil expansion; augmented reality display

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-05-24; 录用日期: 2021-06-02

基金项目: 广东省重点领域研发计划(2020B090921002)、广州市产业领军人才聚焦工程项目(CXLJTD-201607)、广东省基础与应用研究基金(2021A1515011933)

通信作者: \*Tzhangjun\_oe@jnu.edu.cn

# 1 引言

增强现实头戴显示器(AR HMD)是一种佩戴在头部的显示设备,主要由图像源和显示光学两部分组成,所谓增强现实就是将虚拟图像信息与真实世界融合,图像源部分发出的图像信息投影到显示光学器件中,在显示光学器件上,真实世界的图像信息与图像源的图像信息叠加,为探测器人眼接收。AR HMD 技术广泛应用于教育、培训、医疗、娱乐等行业<sup>[1-2]</sup>。显示光学器件主要采用折-衍射棱镜式结构<sup>[3]</sup>、自由曲面棱镜式结构<sup>[4-6]</sup>和全息波导式结构<sup>[7-8]</sup>。折-衍射棱镜式结构和自由曲面棱镜式结构具有大出瞳距、大视场等优点,但是为了使整个系统在兼顾大出瞳、大视场、全色显示等特点的同时更加轻型化,目前设计多推荐采用全息波导型结构的显示光学器件<sup>[9-10]</sup>,而目前关于全息波导结构的设计大多数集中于全息光栅的工艺与材料优化,关于全息波导中具体的光栅结构设计仍然处于空白阶段。

近几年,AR HMD除了应用在军事领域外,国外一些公司也发布了如 Google Project Glass、微软 Hololens 2 等商用和民用的 AR 眼镜<sup>[11-12]</sup>显示光学系统。英国 BAE 公司发布了 Q-sight 全息波导显示器<sup>[13]</sup>;索尼公司研发的全息波导显示技术采用双层波导来减少色间串扰<sup>[9]</sup>;亚利桑那大学 BIGLER 等<sup>[14]</sup>于 2018 年设计了一款单色全息光栅波导显示

结构,该系统视场角为  $12^\circ \times 8^\circ$ ,观察距离为 250 mm,出瞳放大为 1.7 倍。

国内,王龙辉等<sup>[15]</sup>设计了视场角为  $18^\circ \times 14^\circ$ ,出瞳距离为 30 mm,传递函数(MTF)在 30 lp/mm 时均在 0.3 以上的单色全息平板波导显示系统。李玉润<sup>[16]</sup>以半透膜阵列为入耦合结构,以全息光栅为出耦合结构设计了新型平板波导显示结构。相广鑫等<sup>[17]</sup>为了降低光栅的设计制造难度,设计了一种 L 型单波导二维扩展显示构型。曾飞等<sup>[18]</sup>采用棱镜和光栅相结合的方式设计了全息波导头盔显示系统。

本文系统分析了全息平板显示及扩展出瞳原理,通过设计全息光栅元件,研究了单层全息平板波导的波长限制,进一步设计了三层全息平板波导系统,在实现全色显示的同时也实现了出瞳扩展,得到了较好的成像效果。

# 2 全息平板波导显示原理

全息平板波导显示系统的原理如图 1 所示,系统由微显示器、全息光栅、平板波导、接收器等部件组成。微显示器发出的全色图像源向平板波导入射,在入耦合全息光栅的作用下,光线满足在平板波导内全反射的条件,进而在平板波导内继续向前传输,最后在出耦合全息光栅的作用下从平板波导中出射,由接收器接收。

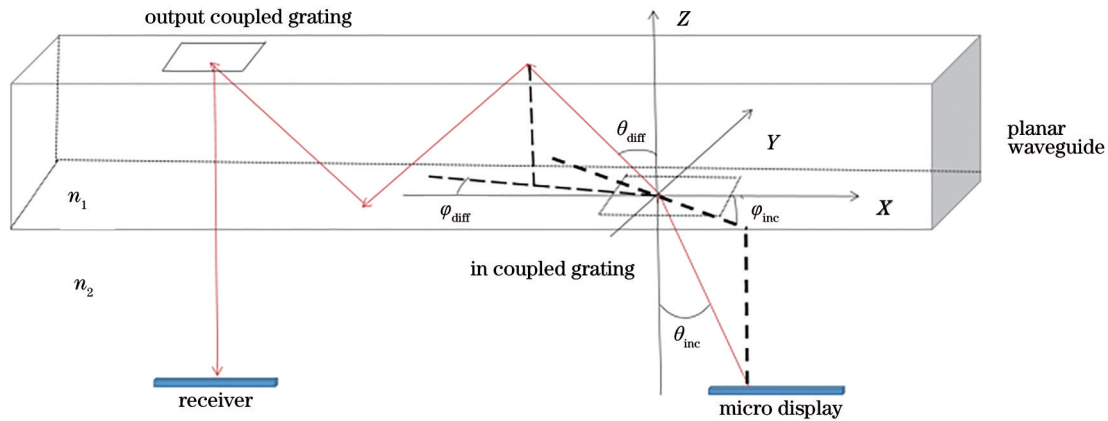


图 1 全息平板波导显示原理

Fig. 1 Principle of holographic flat panel display

设入射光线以一定角度斜入射到波导光栅表面,其与 Z 轴夹角记为  $\theta_{inc}$ ,与 X 轴夹角记为  $\phi_{inc}$ ,衍射光线与 Z 轴夹角记为  $\theta_{diff}$ ,与 X 轴夹角记为  $\phi_{diff}$ 。根据光栅的衍射理论<sup>[18]</sup>,光栅的衍射方程可表示为

$$dn_1 \sin \theta_{diff} \cos \phi_{diff} - dn_2 \sin \theta_{inc} \cos \phi_{inc} = m\lambda, \quad (1)$$

$$n_1 \sin \theta_{diff} \sin \phi_{diff} - n_2 \sin \theta_{inc} \sin \phi_{inc} = 0, \quad (2)$$

式中: $d$ 为光栅常数; $n_1$ 为波导折射率; $n_2$ 为波导外部折射率; $\lambda$ 为入射光波长; $m$ 为光栅的衍射级次。式(1)和式(2)分别为入射光与衍射光 X 轴和 Y 轴分量的关系式。当光线从波导表面出射时,入射介

质变为出射介质,出射介质变为入射介质,入射角与衍射角相互转换。为保证衍射光线在波导中传输,必须满足全反射条件,即衍射角  $\theta_{\text{diff}}$  需满足:

$$\frac{n_2}{n_1} \leq \sin \theta_{\text{diff}} \leq 1. \quad (3)$$

根据式(1)、式(2)和式(3),对于特定入射波长  $\lambda$  和波导折射率  $n_1$ ,为了满足衍射光线传播的全反射条件,一般入射光线垂直入射,所以  $\varphi_{\text{inc}}$  为  $0^\circ$ ,则衍射光线与 X 轴形成的夹角  $\varphi_{\text{diff}}$  也为  $0^\circ$ 。另外由于平板波导外部的介质一般为空气,其折射率  $n_2=1$ 。则光栅常数  $d$  的最大值  $d_{\text{max}}$  和最小值  $d_{\text{min}}$  分别为

$$d_{\text{max}} = \frac{\lambda}{1 - \sin \theta_{\text{inc}}}, \quad (4)$$

$$d_{\text{min}} = \frac{\lambda}{n_1 - \sin \theta_{\text{inc}}}. \quad (5)$$

当光束垂直入射时,根据式(4)和式(5)可知,光栅常数  $d$  的取值范围为

$$\frac{\lambda}{n_1} \leq d \leq \lambda. \quad (6)$$

根据光栅方程可知,当光线平行入射,光栅衍射级次选择  $\pm 1$  级时,衍射角  $\theta$  为

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{dn_1}. \quad (7)$$

由于 AR HMD 是为了将微图像源的图像利用全息平板波导传输到人眼的正常视路上,实现虚拟图像信息与真实世界的融合,如果系统只有入射和出射两块全息光栅,则图像源的图像最多可以在一个方向获得放大,因此需要对平板波导系统进行扩展出瞳的设计以获得放大的图像源图像进入人眼。扩展出瞳有多种方法,其中最常用到的是半透膜阵列法、微反射镜阵列和全息光栅法,从系统轻量化角度考虑,本实验组选择全息光栅法。

图 2 为在全息平板波导表面设计的 3 种线性光栅,分别为入耦合光栅  $H_1$ 、转折光栅  $H_2$  及出耦合光栅  $H_3$ 。入耦合光栅  $H_1$  将光线耦合到平板波导内发生全反射,然后传播至转折光栅  $H_2$ ; 光线通过  $H_2$  沿 X 轴方向进行扩展,同时转向  $90^\circ$  至出耦合光栅  $H_3$  方向传播;光线通过  $H_3$  沿 Y 轴方向进行扩展并从波导表面垂直出射;最后光线进入接收器人眼成像。

为了保证系统输出图像具有均匀的光强分布,要求转折光栅  $H_2$  和出耦合光栅  $H_3$  各区域分布的衍射效率必须不同,才能在整个视场上获得相对均匀的光强分布。另外在出瞳距离一定时,转折光栅  $H_2$  和出耦合光栅  $H_3$  的尺寸大小取决于系统在 X-Y 两

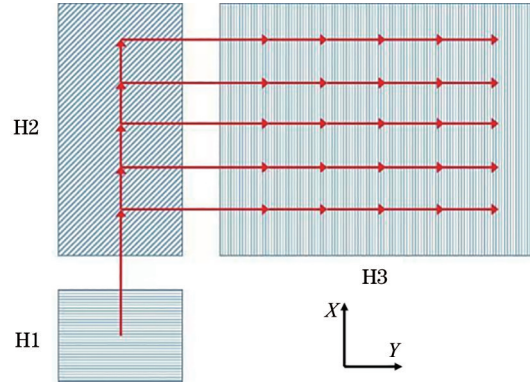


图 2 扩展出瞳原理

Fig. 2 Principle of pupil expansion

个方向的光瞳放大率。

假设入射光的衍射角为  $\theta$ ,则入耦合光栅  $H_1$  的相位  $\Phi_1$  为

$$\Phi_1 = -\frac{2\pi}{\lambda} (n_1 \sin \theta) dx, \quad (8)$$

式中:  $dx$  为光线在波导中传播时 X 轴方向的变化量。

转折光栅  $H_2$  需要将光线方向偏转  $90^\circ$  沿 Y 方向传播,转折光栅  $H_2$  的相位  $\Phi_2$  须在 Y 方向上与  $\Phi_1$  相同,即

$$\Phi_2 = -\varphi_1 + \frac{2\pi}{\lambda} (n_1 \sin \theta) dy =$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} n_1 \sin \theta \left( \frac{\sqrt{2}}{2} dx + \frac{\sqrt{2}}{2} dy \right) + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} n_1 \sin \theta \left( \frac{\sqrt{2}}{2} dx + \frac{\sqrt{2}}{2} dy \right), \quad (9)$$

式中:  $dy$  为光线在波导中传播时 Y 轴方向的变化量。则出耦合光栅  $H_3$  的相位  $\Phi_3$  为

$$\Phi_3 = -\frac{2\pi}{\lambda} (n_1 \sin \theta) dy, \quad (10)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0. \quad (11)$$

式(11)适用于任一波长,对于一特定入射光,经过光栅扩展出瞳之后不会给入射光带来附加相位。因此在设计过程中,当转折光栅  $H_2$  处需要  $90^\circ$  偏转时,根据光栅设计的矢量变化,为保证偏转后的光栅矢量在 X、Y 两方向保持不变,偏转角需要设置为  $45^\circ$ ,同时光栅常数  $d_2$ 、入耦合光栅  $H_1$  的光栅常数  $d_1$ 、出耦合光栅  $H_3$  的光栅常数  $d_3$  应满足关系<sup>[19-20]</sup>的表达式为

$$\begin{cases} d_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} d_3. \\ d_3 = d_1 \end{cases} \quad (12)$$

### 3 全息平板波导的设计

#### 3.1 单层平板波导的设计

为了实现全息平板波导的全色显示,首先分析

了单层平板波导的图像传输特性。单层平板波导基本结构采用了普通眼镜的结构,尺寸大小为  $35\text{ mm} \times 60\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ ;波导材料设定为 N-BK7,折射率为 1.515。全息平板波导表面入耦合光栅的区域大小设为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ;中间转折光栅区域设为 1 块  $5\text{ mm} \times 14\text{ mm}$  的光栅,入耦合光栅与转折光栅之间的间距为  $25\text{ mm}$ ;出耦合光栅区域由 1 块  $14\text{ mm} \times 14\text{ mm}$  的光栅构成,出耦合光栅与转折光栅之间的间距为  $8\text{ mm}$ 。图像源发出的图像如图 3 所示,光栅分布结构如图 4(a) 所示。

以人眼最敏感的  $550\text{ nm}$  绿光作为光源,为了方便对比,图像源大小设为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ,根据式(6),入耦合光栅常数  $d_{G1}$  设为  $550\text{ nm}$ ,根据式(12),转折



图 3 图像源发出的图像

Fig. 3 Image from image source

光栅常数  $d_{G2}$  设为  $388\text{ nm}$ ,出耦合光栅常数  $d_{G3}$  与  $d_{G1}$  相同为  $550\text{ nm}$ 。

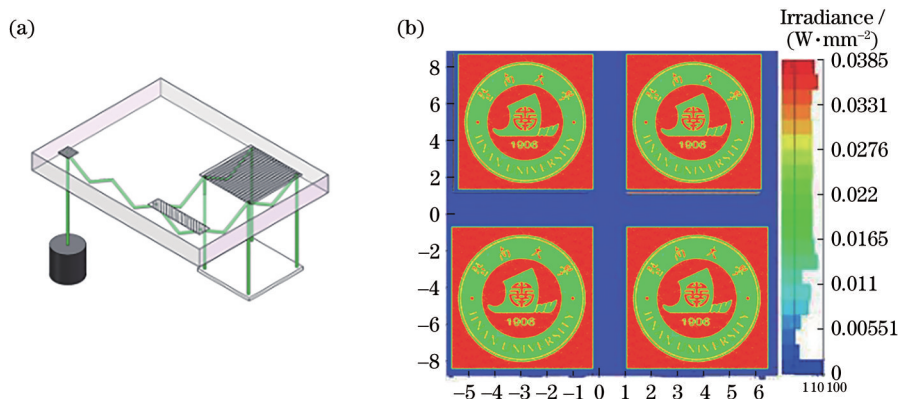


图 4 单层息全平板波导结构及仿真结果。(a)单层息全平板波导结构;(b)仿真结果

Fig. 4 Single layer all planar waveguide structure and simulation results. (a) Single layer all planar waveguide structure; (b) simulation results

为了简化仿真的过程,设图像源发出的光为平行光。利用 LIGHTTOOLS 光学仿真软件获得全息平板波导的出耦合光栅的出射图像如图 4(b) 所示。每个图像出瞳大小均为  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ ,成像质量良好。图像之间的间隙小于人眼瞳孔大小,当人眼的瞳孔接收到多束包含相同图像显示信息的光束时,人眼的视网膜上就会感知图像,进而显示完整图像,因此出耦合光栅的出射图像不会造成图像信息丢失,同时为了讨论人眼看到的图像大小,引入视窗(Eyebow)的概念。Eyebow 是指佩戴头盔显示器的人能够完整看到头盔显示器传输的虚拟图像时,佩戴者的眼睛在所处的垂直平面内的可动范围,此时系统的视窗为  $12\text{ mm} \times 12\text{ mm}$ ,由于镜面到角膜的距离不确定,视角会随着镜面到角膜的距离的改变而改变,这个距离一般为  $21\text{ mm}$ ,因此单目视场角为  $15^\circ$ 。

为了实现全色显示,试着将  $550\text{ nm}$  的单色光增加带宽,但是当带宽增加到  $3\text{ nm}$  时,图像的清晰度明显降低,如图 5 所示。由于图像源存在一定的宽

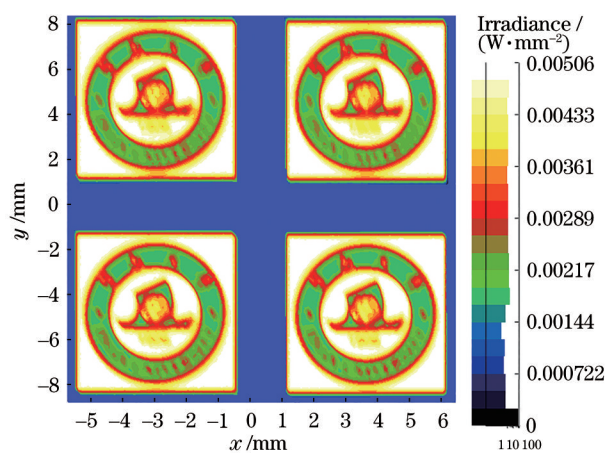


图 5 波长干涉仿真结果

Fig. 5 Simulation results of wavelength interference

度,当光谱范围较宽时,根据式(7)可知不同波长的光线的衍射角不同,同一点发出不同波长的光线不会会聚到同一点,影响成像质量。故单层全息平板波导可以实现单波长的图像显示并实现了出瞳扩展,但是无法实现宽带显示。

### 3.2 三层全息平板波导的设计

根据混色原理和三基色理论可知,只要获得红绿蓝(RGB)三种原色,就可以通过混色实现全色显示。根据单层平板波导可以实现单波长的图像传输结果可知,可以采用三层平板波导的模式获取红绿蓝三种原色,从而实现全息平板波导全色图像显示功能。

在设计过程中,由于蓝光的波长最小,图像源发出的光进入平板波导,接触第1层平板波导的入耦合光栅后,根据式(7)可知,只有蓝光可以达到平板波导的全反射临界角,绿光和红光由于无法达到全反射临界角,在第1层波导中折射进入第2层平板波导中,以此类推,分别对三层平板波导的入耦合全息光栅进行设计,使RGB三色光分别在三层波导中传输。系统结构如图6所示。

在三层平板波导的设计过程中,为了实现全色显示,必须选择合适的RGB波长以及光栅常数,从而使RGB三色光在同一位置被耦合出波导。因此至关重要的设计参数是RGB三原色波长和光栅常数,这两个参数又是密切关联的。因为550 nm的绿光单层平板波导已经设计完成,在此基础上,设计红光和蓝光传输的单层波导。

根据式(6)可知,当绿光波长为550 nm时,其入

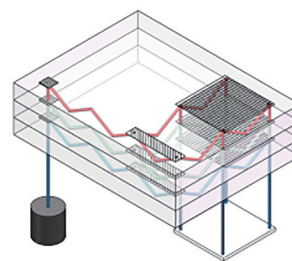


图6 三层全息平板波导结构图

Fig. 6 Structure of three-layer holographic planar waveguide  
耦合光栅常数  $d_{G1}$  范围为[363 nm, 550 nm],因此在设计过程中,第1层蓝光入耦合光栅的光栅常数  $d_{B1}$  需要小于363 nm,第3层红光入耦合光栅的光栅常数  $d_{R1}$  需要大于550 nm,以此保证每层光波长的单一性。

根据式(7)可知,为了使三色光在同一位置出射,光线的衍射角  $\sin \theta = \lambda/d_1 n_1$  应该保持一致,即波长与光栅常数的比值应该保持一致。故红光的波长  $\lambda_r$  为685 nm,红光入耦合光栅的光栅常数  $d_{R1}$  为565 nm;绿光的波长  $\lambda_g$  为550 nm,绿光入耦合光栅的光栅常数  $d_{G1}$  为453 nm(相对于单层全息平板波导结构进行修正);蓝光的波长  $\lambda_b$  为437 nm,蓝光入耦合光栅的光栅常数  $d_{B1}$  为360 nm。

由此,进一步根据式(12)可以得到:红光转折光栅的光栅常数  $d_{R2}$  为399.5 nm;绿光转折光栅的光栅常数  $d_{G2}$  为320.5 nm;蓝光转折光栅的光栅常数  $d_{B2}$  为254.5 nm。出耦合光栅常数与入耦合光栅常数相同。

蓝光层的光栅设计如表1所示,表1的第1行表

表1 蓝光层光栅属性

Table 1 Blue light layer raster properties

Parameter	Input grating	Turning grating		Output grating	
Form	Block/attribute uniform	Front	Back	Front	Back
Characteristic	Semi transparent and semi reflective	Reflection grating	Reflection grating	Semi transparent and semi reflective	Semi transparent and semi reflective
Size /(mm×mm)	5×5	5×5	5×5	5×10	5×10
Diffraction order	± Level 1	± Level 1	± Level 1	± Level 1	± Level 1
Raster vector	$x:y:z=0:1:0$	$x:y:z=1:1:0$	$x:y:z=1:1:0$	$x:y:z=1:0:0$	$x:y:z=1:0:0$
Grating constant /nm	360	254.5	254.5	360	360
Reflectivity	The first grade reflectivity is 50%; The transmission is 50%	The reflectivity of level 1 is 50%, and that of level 0 is 50%	Level 1 reflection 100%	Grade 1 reflectivity 13%, grade 0 reflectivity 37%, grade 0 transmittance 50%	Grade 1 reflection 35% 0 transmission 65%
Input light color	Blue light, wavelength 437 nm				
Reflection condition	Total reflection of blue light. Red light and green light enter the second layer through the first layer				

示光栅的作用,第 2 行表示光栅的形式,第 3 行表示光栅的特性,第 4 行表示光栅的几何尺寸,第 5 行表示光栅的衍射级次,第 6 行为光栅的光栅矢量,第 7 行为光栅的光栅常数,第 8 行表示光栅的反射率与

透过率,第 9 行表示输入的光色,最后 1 行表示反射的条件。绿光层的光栅设计如表 2 所示,红光层的光栅设计如表 3 所示,三层结构的仿真结果如图 7 所示。

表 2 绿光层光栅属性  
Table 2 Green light layer raster properties

Parameter	Input grating	Turning grating		Output grating	
Form	Block/attribute uniform	Front	Back	Front	Back
Characteristic	Semi transparent and semi reflective	Reflection grating	Reflection grating	Semi transparent and semi reflective	Semi transparent and semi reflective
Grating constant /nm	453	320.5	320.5	453	453
Reflectivity	The first grade reflectivity is 50%; The transmission is 50%	The reflectivity of level 1 is 50%, and that of level 0 is 50%	Level 1 reflection 100%	Grade 1 reflectivity 20%, grade 0 reflectivity 30%, grade 0 transmittance 50%	Grade 1 reflection 50% 0 transmission 50%
Input light color	Green light, wavelength 550 nm				
Reflection condition	The green light is totally reflected, the red light enters the third layer through the second layer, and the blue light is totally reflected in the first layer				

表 3 红光层光栅属性  
Table 3 Red light layer raster properties

Parameter	Input grating	Turning grating		Output grating	
Form	Block/attribute uniform	Front	Back	Front	Back
Characteristic	Reflection grating	Reflection grating	Reflection grating	Reflection grating	Reflection grating
Grating constant /nm	565	399.5	399.5	565	565
Reflectivity	Grade 1 reflectivity: 100%	Grade 1 reflectivity 50%, level 0 reflectivity 50%	Grade 1 reflection 100%	Grade 1 reflectance 57%, grade 0 reflectance 43%	Grade 1 reflectivity: 100%
Input light color	Red light, wavelength 685 nm				
Reflection condition	Red light is totally reflected, blue light is totally reflected in the first layer, and green light is totally reflected in the second layer				

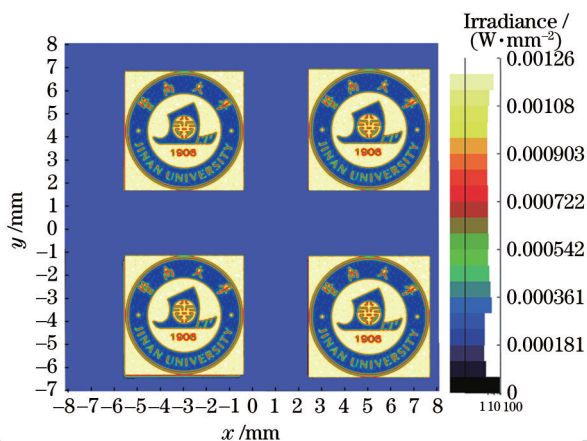


图 7 三层全息平板波导仿真结果

Fig. 7 Simulation results of three-layer holographic planar waveguide

从仿真结果可以看出,三层全息平板波导的设计可以较好地实现全色显示的同时也实现了出瞳扩展,系统的视窗为 13 mm×13 mm,单目视场角为 17°。

## 4 实 验

为了验证仿真结果,对样品的成像效果进行了检测,搭建的测试系统如图 8 所示,选择 digital light processing(DLP)投影系统作为微显示器,DLP 的数字微镜元件(DMD)发出的图像经过一个准直透镜后进入样品的入耦合光栅区域,在样品后方选择用 CCD 作为图像接收器记录出耦合光栅的出射情况。

实验中,DLP 的型号为 DLP5530-Q1,DMD 的

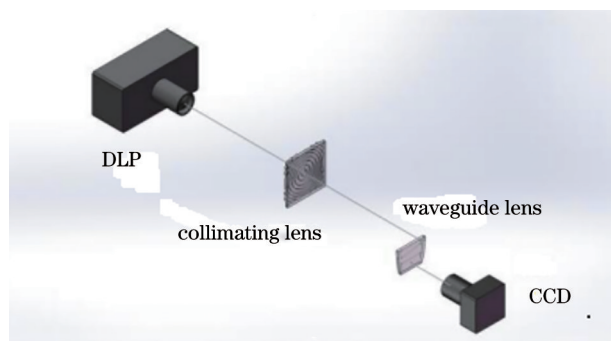


图 8 测试系统

Fig. 8 Test system

大小为 0.55 inch(1.397 cm), 像素为 130 万, 准直透镜的焦距为 25 mm, 波导镜片为待测样品。CCD 拍摄的结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出, 单色光微图像经过样品的入射光栅、转折光栅和出射光栅后, 可以获得完整的放大图像出射, 出瞳扩展和放大图像的目的都可以实现, 成像质量良好。当使用白光光源作为图像源时, 可以发现, 样品同样能够实现放大图像输出, 同时出射彩色图样, 说明样品在实现出瞳扩展的同时能较好地实现全色显示, 符合设计要求。

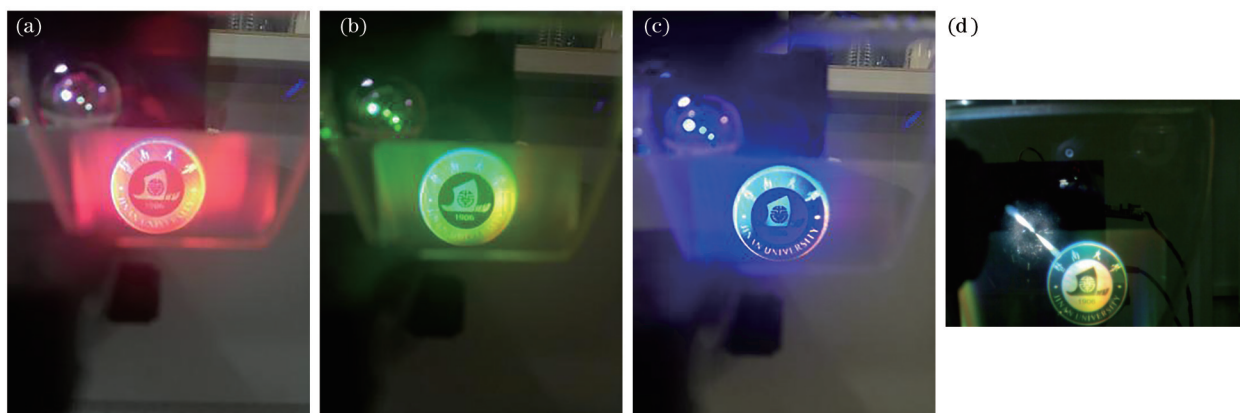


图 9 成像结果。(a)红光成像;(b)绿光成像;(c)蓝光成像;(d)白光成像

Fig. 9 Imaging results. (a) Red light imaging; (b) green light imaging; (c) blue light imaging; (d) white light imaging

## 5 结 论

根据全息光栅的衍射理论, 设计了单层单波长全息平板波导显示系统, 该系统由入耦合全息光栅、转折全息光栅和出耦合全息光栅组成, 能够实现单波长的图像显示及出瞳扩展 4 倍的显示效果。进而利用三基色混色原理, 设计了三层全息平板波导显示系统, 该系统每层结构与单波长全息平板波导显示系统相同, 为了保证三基色从出耦合光栅对齐出射, 每个波长的三个光栅常数要相互协调匹配设计。仿真结果表明, 三层全息平板波导显示系统能够实现全色显示, 同时也实现了出瞳扩展 4 倍的显示效果。最后对加工样品的成像结果进行了测试, 分别使用红光、绿光、蓝光及白光对样品进行了测试, 结果表明, 样品能实现全色显示与出瞳扩展功能, 成像质量良好。

### 参 考 文 献

[1] Cakmakci O, Rolland J. Head-worn displays: a review[J]. Journal of Display Technology, 2006, 2

(3): 199-216.

- [2] Pan J W, Che-Wen C A, Huang K D, et al. Demonstration of a broad band spectral head-mounted display with freeform mirrors[J]. Optics Express, 2014, 22(11): 12785-12798.
- [3] Furht B. Handbook of augmented reality[M]. New York: Springer, 2011.
- [4] 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.
- [5] Shi X L, Liu J, Xiao J S, et al. Design of a compact waveguide eyeglass with high efficiency by joining freeform surfaces and volume holographic gratings[J]. Journal of the Optical Society of America. A, Optics, Image Science, and Vision, 2021, 38(2): A19-A26.
- [6] 黄颂超, 冯云鹏, 程灏波. 非对称轻小型头盔显示器光学系统设计[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 832-841.
- Huang S C, Feng Y P, Cheng H B. Non-symmetrical design of a compact, lightweight HMD optical system[J]. Chinese Optics, 2020, 13(4): 832-841.

- [7] Piao J A, Li G, Piao M L, et al. Full color holographic optical element fabrication for waveguide-type head mounted display using photopolymer[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2013, 17(3): 242-248.
- [8] 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.
- [9] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, 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.
- [10] 王玉瑾, 张锦, 蒋世磊, 等. 全息波导耦合元件对称结构的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(15): 152303.  
Wang Y J, Zhang J, Jiang S L, et al. Research on symmetric structure of holographic waveguide coupling elements[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(15): 152303.
- [11] Stamer T. Project glass: an extension of the self[J]. IEEE Pervasive Computing, 2013, 12(2): 14-16.
- [12] Hanna M G, Ahmed I, Nine J, et al. Augmented reality technology using Microsoft HoloLens in anatomic pathology[J]. Archives of Pathology & Laboratory Medicine, 2018, 142(5): 638-644.
- [13] Cameron A A. Optical waveguide technology and its application in head-mounted displays[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8383: 83830E.
- [14] 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.
- [15] 王龙辉, 汪岗, 黄丽琼, 等. 一种单色全息平板波导显示系统的研究[J]. 应用光学, 2019, 40(2): 241-245.  
Wang L H, Wang G, Huang L Q, et al. Study on monochromatic holographic planar waveguide display system[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(2): 241-245.
- [16] 李玉润. 基于平板光波导的微投影光学系统研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.  
Li Y R. Micro-projection system design based on planar optical waveguide[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [17] 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.
- [18] 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.  
Zeng F, Zhang X, Zhang J P, et al. Holographic waveguide head-mounted display system design based on prisms-grating structure[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(9): 0909001.
- [19] Amitai Y, Friesem A. Holographic optical devices: US6580529[P]. 2003-06-17.
- [20] 黄兴洲. 车载平视显示系统光学模组技术研究[D]. 成都: 中国科学院光电技术研究所, 2019.  
Huang X Z. Optical technology of automobile head up display system[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019.