

引用格式: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.

## 单片式全息波导双色显示优化设计

李瑞华<sup>1,2</sup>, 康明武<sup>1,2</sup>, 高阳<sup>1,2</sup>, 谢意<sup>1,2</sup>, 相广鑫<sup>1,2</sup>

(1. 光电控制技术重点实验室,河南 洛阳 471000;

2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所,河南 洛阳 471000)

**摘要:** 彩色全息波导显示通常采用复杂的多层光栅耦合或多层波导组合的结构,导致系统的重量和体积较大。针对该问题,提出了一种单片式、单层光栅双色全息波导显示构型,该构型采用三组光栅实现光线的输入、输出及出瞳的二维扩展,并通过严格耦合波理论(RCWA)对光栅槽型和光栅膜系进行了优化设计,使该构型在较大视场范围内实现对红、绿两种色光较好的均匀显示。

**关键词:** 全息波导; 双色显示; 单片式; 光栅设计

中图分类号: V271.4

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.02.019

## Optimized Design of Single-Plate Dual-Color Holographic Waveguide Display

LI Rui-hua<sup>1,2</sup>, KANG Ming-wu<sup>1,2</sup>, GAO Yang<sup>1,2</sup>, XIE Yi<sup>1,2</sup>, XIANG Guang-xin<sup>1,2</sup>

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** Full-color holographic waveguide display usually adopts the complex coupling structure of multi-layer gratings or the combined structure of multi-layer waveguide, which results in heavy weight and large volume of the system. To solve this problem, a configuration of dual-color holographic waveguide display with single plate and mono-layer grating is proposed. This configuration adopts three gratings to realize the input and output of the light and the two-dimensional expansion of the exit pupil. To display the red and green color with a better uniformity in the wide field of view, the shape and films of grating are designed and optimized by using the theory of Rigorous Coupled-Wave Analysis (RCWA).

**Key words:** holographic waveguide; dual-color display; single plate; grating design

### 0 引言

双色全息波导显示提供了显示信息新维度,增强了使用者的态势感知能力。人眼能很好地分辨基本颜色,允许不同颜色的符号相互覆盖且可以独立显示。此外,人还具有将注意力集中到某些颜色而忽视另一些颜色的能力,这样即使在复杂的背景环境和凌乱的符号环境下,使用者也能快速地分辨某特定颜色的符号<sup>[1]</sup>。目前机载平显多为单色显示,无法突出显示重要信息,如果在显示中增加人眼敏感的红色,用来显示重要信息,则可以让使用者获得更短的反应时间与更

佳的情形感知能力<sup>[2]</sup>。因此,包括双色在内的彩色全息波导显示成为全息波导显示的研究热点<sup>[3-10]</sup>。

英国的BAE系统公司提出了三层波导重叠的彩色显示结构方案,利用高效率的光栅分别耦合RGB光束,实现均匀的彩色显示<sup>[11]</sup>。文献[12]在BAE公司描述系统的基础上,将三层波导系统精简为两层,同时对其公布的光栅结构进行改进和优化,实现了彩色显示。文献[13]提出了单片双色全息波导显示系统,实验上验证了红、绿双色显示的可行性。

上述彩色全息波导显示均采用复杂的多层光栅耦合或多层波导组合的结构,导致系统的重量和体积较大。针对该问题,本文提出了一种单片式、单层光栅双色全息波导显示构型,该构型采用三组光栅实现光线的输入、输出及出瞳的二维扩展,对于红、绿两种色光,可以实现 $24^\circ \times 16^\circ$ 视场显示,二维扩展对显示均匀性

收稿日期:2018-06-14

修回日期:2018-06-24

基金项目:航空科学基金(20165168007)

作者简介:李瑞华(1992—),男,河南鹤壁人,硕士生,研究方向为全息光学。

要求较高,采用矢量衍射理论中的严格耦合波理论(RCWA)对光栅进行优化,实现更好的均匀性。

### 1 双色全息波导显示基本原理

双色全息波导显示的结构与单色全息波导显示的组成部分基本相同,也是由像源、准直镜组、耦合输入光栅、传输波导和耦合输出光栅组成,如图 1 所示。

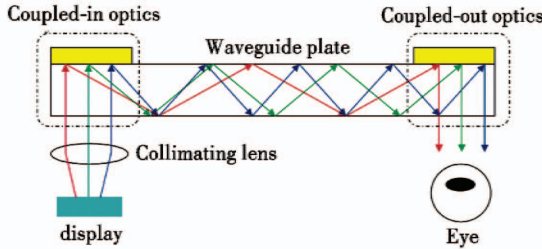


图 1 双色全息波导基本结构

Fig. 1 Basic configuration of the dual-color holographic waveguide

在双色全息波导显示系统中,像源输出的图像光线经准直系统之后入射至紧贴于波导板一端的全息光栅,也就是耦合输入光学结构。经过光栅衍射的光线角度满足波导传输的条件,以全反射的形式向前传播,直到入射紧贴于波导板另一端的全息光栅,即耦合输出光学结构,以衍射的方式输出。这一过程与单色全息波导显示一致,不过,为了满足显示多色图像的要求,输入光栅和输出光栅乃至波导部分都需要采用特殊的设计。

为了满足大出瞳显示且不增加系统体积和重量的需求,本文采用二维扩展构型。常见的二维扩展构型有:双波导板组合结构、波导杆波导板组合结构、单波导板结构以及多像源结构 4 种。

本文采用目前最为紧凑、高效率的单波导板构型。单波导板构型将所使用的光栅集中在一块波导板上来实现光瞳的二维扩展,这种构型降低了系统的复杂性和体积、重量,同时提高了光学显示性能。单波导板构型如图 2 所示。

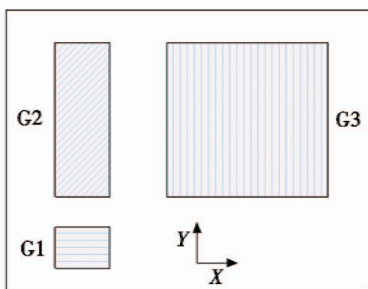


图 2 单波导板二维扩展构型

Fig. 2 Two-dimensional expansion configuration of single waveguide plate

单波导板构型使用光栅 G1, G2 和 G3,其中:入射

光栅 G1 与中继光学系统相接,将中继光学系统发出的平行光耦合进入波导板;锥形转折光栅 G2 实现各视场光线传播方向的偏折,实现 Y 方向出瞳的扩展;出射光栅 G3 将出瞳进行 X 方向的扩展并将光线衍射输出至人眼。

### 2 矢量衍射理论简述

由于波导显示采用的光栅特征尺寸是红、绿两种色光的波长量级,所以需要采用矢量衍射理论对光栅结构进行分析,矢量衍射理论中的严格耦合波理论(RCWA)可以得到各级次衍射效率的严格解。本文采用 RCWA 对光栅进行分析设计(以 TE 入射为例,下同)。

光栅方程为

$$n\Lambda(\sin\theta + \sin i) = k\lambda \quad (1)$$

式中: $n$  为光栅材料折射率; $\Lambda$  为光栅周期; $\theta$  为光线入射角; $i$  为衍射角; $k$  为光栅衍射级次; $\lambda$  为入射光波长。光栅区域分区如图 3 所示。

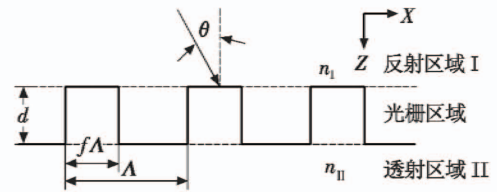


图 3 严格耦合波光栅分区示意图

Fig. 3 RCWA grating partitioning

在光栅附近反射区域 I 和透射区域 II 的电场可以表示为

$$E_{I,y} = E_{i,y} + \sum_i R_i \exp[-j(k_{xi}x - k_{1,z}z)] \quad (2)$$

$$E_{II,y} = \sum_i T_i \exp[-j(k_{xi}x - k_{2,z}(z-d))] \quad (3)$$

在光栅区域,切向电场( $y$  分量)和磁场( $x$  分量)进行傅里叶展开为空间谐波之和

$$E_{gy} = \sum_i S_{yi}(z) \exp(-jk_{xi}x) \quad (4)$$

$$H_{gx} = -j \left( \frac{\epsilon_0}{\mu_0} \right)^{1/2} \sum_i U_{xi}(z) \exp(-jk_{xi}x) \quad (5)$$

通过麦克斯韦方程组和边界条件(界面两侧的  $E$  和  $H$  切向分量连续),可以求得反射衍射效率和透射衍射效率为

$$\begin{cases} D_{ri} = R_i R_i^* \operatorname{Re} \left( \frac{k_{1,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) \\ D_{ti} = T_i T_i^* \operatorname{Re} \left( \frac{k_{2,zi}}{k_0 n_1 \cos \theta} \right) \end{cases} \quad (6)$$

根据能量守恒定律,应有

$$\sum_{i=1}^m (D_{ri} + D_{ti}) = 1 \quad (7)$$

### 3 光栅衍射特性分析和设计

本文设计的单片式全息波导彩色显示选用的红、绿两种色光的主波长分别为 635 nm, 532 nm。为了实现在大视场、大出瞳双色显示, 选取绿光波长 532 nm 和红光波长 635 nm 为主波长对光栅进行优化。

因为光栅的衍射方向与光栅周期和入射光波长有关, 因此光栅周期的选取应该保证在设计 的  $24^\circ \times 16^\circ$  全视场范围内, 红、绿双色衍射光均能在波导内满足全反射条件。据此, 将 G1 和 G3 光栅的周期设计为  $T_1 = T_3 = 410 \text{ nm}$ , G2 光栅的周期设计为  $T_2 = 289.9 \text{ nm}$ 。为了得到较高的利用率, 选取衍射效率较高的 -1 级衍射级次。为了保证系统较好的显示均匀性, 利用转折光栅和输出光栅区域的衍射效率渐变来实现出瞳均匀显示, 所以转折光栅和输出光栅不能只寻求高衍射效率。为保证最终显示画面的亮度, 需使输入光栅有尽量高的衍射效率。通过对输入光栅 G1 的槽型和膜系的优化设计, 可以实现绿光和红光在全视场范围内较高的衍射效率和较好的显示均匀性。

利用式(1)~式(7), 通过 Matlab 软件对设计完毕的输入光栅 -1 级衍射效率进行分析, 如图 4 所示, 可见红、绿两种色光可以在全视场范围内有较高的衍射效率。

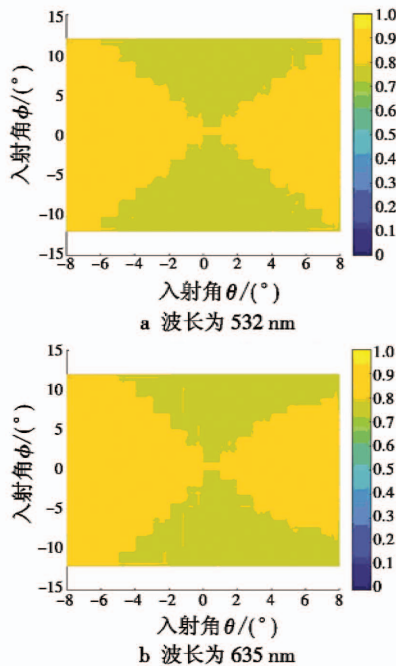


图 4 入射光栅双色光衍射效率

Fig. 4 Incident grating dual-color light diffraction efficiency

波导中的光线在转折光栅和输出光栅传播过程中, 光线每经过一次转折光栅或输出光栅, 有一部分光线会发生衍射耦合输出, 另一部分光线在波导中发生

全内反射继续向前传播, 经下一次衍射耦合输出, 所以波导中的光线在转折光栅和输出光栅传播时能量不断减小。一般来说, 通过镀膜或改变槽深的方法实现光栅的衍射效率渐变设计, 使得全视场的每次衍射光线能量均相同是不可能的。人眼可自动调节弥补亮度不均匀性为 30% 以内的光强变化, 因此只需显示亮度均匀性大于 70%, 不同位置处耦合输出能量可不等, 只要在亮度均匀性的要求范围内即可。亮度不均匀性算式为

$$K = 1 - \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max} + L_{\min}} \times 100\% \quad (8)$$

因此, 本文通过分区域调节转折光栅和输出光栅的膜系, 来满足显示均匀性的要求。

### 4 系统仿真和显示均匀性分析

光线经过输入光栅 G1 后, 通过转折光栅 G2 和输出光栅 G3 对出瞳实现了二维扩展。入瞳大小为  $4 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ , 经过二维扩展后, 可以实现  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$  的大出瞳显示。用 VirtualLab 软件对系统进行仿真, 主视场光路仿真如图 5 所示。

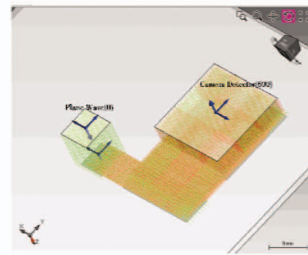


图 5 光路仿真

Fig. 5 Simulation of optical path

红、绿双色光主视场出瞳面光线追迹结果如图 6 所示。

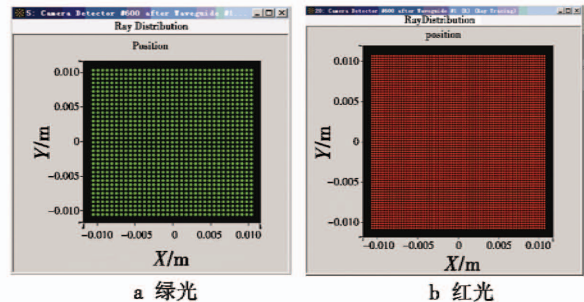


图 6 出瞳面双色光光线追迹结果

Fig. 6 Tracing results of exit pupil dual-color light

从追迹结果可以看出, 红、绿双色光均能充满整个出瞳面。

在对光栅分区域优化前, 主视场范围内的红、绿双色光显示均匀效果如图 7 所示。

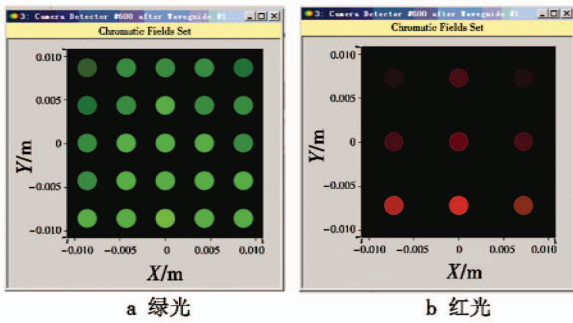


图7 双色光优化前亮度均匀性仿真结果

Fig. 7 Simulation results of brightness uniformity before dual-color light optimization

从仿真结果可以看出,红、绿双色光的显示亮度均匀性均较差,人眼可明显分辨。为了实现全视场范围内较好的亮度均匀性,采用分区域改变槽深的方法实现光栅的衍射效率渐变设计。按照光线的传播方向将转折光栅 G2 和输出光栅 G3 分为间隔相当的 5 个区域,对这些区域分别优化膜系。优化后的主视场范围内的显示均匀性如图 8 所示。

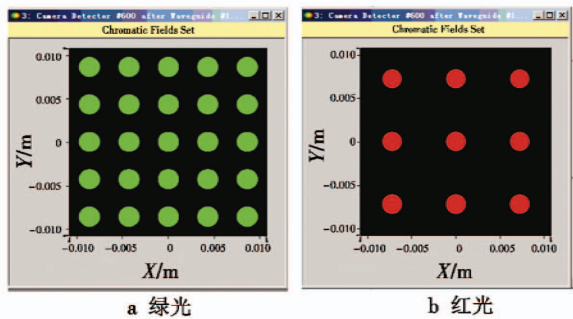


图8 双色光优化后亮度均匀性仿真结果

Fig. 8 Simulation results of brightness uniformity after dual-color light optimization

从仿真的结果可以看出,红光、绿光在主视场的整个出瞳面均具有较好的显示均匀性,红光的亮度均匀性为 93.17%,绿光的亮度均匀性为 86.63%,均不在被人眼觉察的范围,具有较好的显示均匀性。

## 5 结束语

本文提出了一种采用二维扩展构型的单片式双色全息波导显示设计方案,该设计采用简单的单片波导和单层光栅,降低了设计复杂度和系统的体积、重量。通过对方案的理论分析和仿真设计,优化了光栅的槽型和膜系,计算结果表明该设计可以实现 20 mm × 20 mm 的

大出瞳显示,可以实现较好的显示均匀性,该设计可以应用于机载平显,提供显示信息的新维度。

## 参考文献

- [1] ATAC R. Applications of the scorpion color helmet-mounted cueing system[J]. SPIE, 2010. doi:10.1117/12.849287.
- [2] 刘玉,刘旭,孙隆和. 透视型液晶头盔显示器时序双原色显示[J]. 光电工程,2000,27(2):5-8.
- [3] SHECHTER R, BOKOR N, AMITAI Y, et al. Compact red-green-blue beam illuminator and expander[J]. Applied Optics, 2002, 41(7):1229-1234.
- [4] CAMERON A. Optical waveguide technology & its application in head mounted displays[J]. SPIE, 2012. doi:10.1117/12.923660.
- [5] MUKAWA H, AKUTSU K, MATSUMURA I, et al. A full color eyewear display using holographic planar waveguides[J]. SID, 2008, 39(1):89-92.
- [6] VALERA M S, SIMMONDS M D. Optical waveguide and display device; US, 8611014[P]. 2013-02-21.
- [7] SHI R, LIU J, ZHAO H Z, et al. Chromatic dispersion correction in planar waveguide using one-layer volume holograms based on three-step exposure[J]. Applied Optics, 2012, 51(20):4703-4708.
- [8] WU Z, LIU J, WANG Y T. High efficiency waveguide display system with achromatic volume hologram and a prism in-coupler[J]. SID, 2013. doi:10.1002/j.2168-0159.2013.tb06362.x.
- [9] PIAO J G, LI G, PIAO M L, et al. Full color holographic optical element fabrication for waveguide-type head mounted display using photopolymer[J]. Optical Society of Korea, 2013, 17(3):242-248.
- [10] PYUN K P, CHOI C, MOROZOV A V, et al. Compact holographic printer using RGB waveguide holographic optical elements[J]. SPIE, 2013. doi:10.1117/12.2002926.
- [11] SIMMONDS M D, FERNS A R. Improvements in or relating to waveguides EP:2373924[P]. 2010-06-17.
- [12] 尤勤,黄站华,蔡怀宇. 用于彩色屏显的双层耦合光栅设计[J]. 光学学报,2012,32(10):10050011-10050016.
- [13] 刘辉. 基于平板波导的头盔显示技术研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.