

用于光场成像的超构衍射光栅阵列优化*

郭晨光¹, 王文雯¹, 郝绍坤¹, 林怡彬¹, 周雄图^{1,2**}, 张永爱^{1,2},
吴朝兴^{1,2}, 郭太良^{1,2}

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350116; 2. 中国福建光电信息科学与技术创新实验室, 福州 350116)

摘 要: 为提高矢量光场显示亮度和视角均匀性, 提出了一种应用于圆偏振光场成像的超构光栅结构。利用严格耦合波分析, 逐像素对超构光栅结构进行仿真, 研究了入射光偏振状态、光栅结构、入射角度对-1级光衍射效率的影响规律。仿真结果表明, 圆偏振光显示可以使得光栅衍射效率稳定高效, 当光栅周期为500 nm时, 与基于TE和TM设计的光栅结构相比, 圆偏振光设计的光栅结构衍射效率提高了18.5%和2.6%; 光栅高度和占空比对衍射效率具有明显的影响。综合考虑光栅制备难度、衍射效率和视角均匀性, 设计了一种高度为0.6 μm , 占空比为0.4的光栅阵列结构应用于圆偏振光场显示, 系统衍射效率可以达到40%以上, 具有较优的综合性能, 对超构光栅设计制备和裸眼3D显示具有一定指导意义。

关键词: 纳米光栅; 衍射效率; 严格耦合波分析; 光场显示; 裸眼3D显示

中图分类号: TN219; O436 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)01-0026-08

Optimization of Diffraction Metagrating Array for Light Field Imaging

GUO Chenguang, WANG Wenwen, HAO Shaokun, LIN Yibin, ZHOU Xiongtu, ZHANG Yongai, WU Chaoxing, GUO Tailiang

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, CHN;
2. Fujian Science and Technology Innovation Laboratory for Optoelectronic Information of China, Fuzhou 350116, CHN)

Abstract: In order to improve the display brightness and view uniformity of the vector light field, a metagrating structure for circularly polarized light field imaging was proposed. The effect of incident light polarization state, grating structure and incident angle on the diffraction efficiency of -1st order light were studied by simulating the structure of metagrating pixel by pixel using a rigorous coupled wave analysis method. The simulation results showed that the circularly polarized light display could make the diffraction efficiency of the grating stable and efficient. When the grating period was 500 nm,

收稿日期: 2022-09-26

* 基金项目: 福建省自然科学基金(2021J01577); 闽都创新实验室自主部署项目(2021ZZ130)

作者简介: 郭晨光(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微纳光子器件, 3D显示; (E-mail: 1094740762@qq.com)

王文雯(1997—), 女, 博士研究生, 研究方向为光场成像, 3D显示;

郝绍坤(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光电功能材料和器件;

周雄图(1982—), 男, 教授, 研究方向为光电功能材料和器件, 3D显示及其应用。(E-mail: xtzhou@fzu.edu.cn)

** 通讯作者

the diffraction efficiency of the grating structure based on the circular polarized light increased by 18.5% and 2.6% compared with TE and TM. The height and duty cycle of grating had a significant impact on the diffraction efficiency. Considering the difficulty of metagrating fabrication, diffraction efficiency and viewing angle uniformity, metagratings array structure with the height of 0.6 μm and duty cycle of 0.4 was designed for circular polarization. The diffraction efficiency of the system could reach more than 40%, and it had better comprehensive performance, which was a guideline for metagrating design and preparation, as well as naked-eye 3D display.

Key words: metagrating; diffraction efficiency; rigorous coupled wave analysis(RCWA); light field display; glasses-free three-dimensional display

引 言

未来显示技术将朝着视觉更加自然,用户更加友好的方向发展。三维(Three-dimensional, 3D)显示由于视觉更加逼真,是未来显示技术的一个重要发展趋势。随着元宇宙概念的提出,3D显示作为其重要技术支撑,可以提供更具沉浸感的交互体验,引起广泛的研究关注。裸眼真3D显示技术克服了集合调节冲突所致的立体观看视疲劳和需要佩戴助视设备的不方便等问题,具有健康便携,适用性强,应用范围广等特点^[1-6]。光场3D显示通过投影阵列或将传统平板显示屏幕与“视角调控器”结合,在重新构建三维物体发光分布的基础上实现,具有连续视角、消除聚焦辐辏冲突等优势。

视角调控器是实现光场3D显示的关键光学元器件,常用视角调控器主要包括:视差屏障^[7-9]、柱透镜阵列^[10-11]、微透镜阵列^[12-15]、超构纳米光栅^[16-18]等。视差屏障和柱透镜阵列最先与平板显示面板结合应用在3D移动电子设备领域,但由于其光线方向调控能力与视差屏障透光孔径成反比,光利用率较低是其主要应用瓶颈。为解决视差屏障3D显示亮度低的问题,基于柱透镜阵列的光场3D显示技术孕育而生,并成为目前商业应用最为广泛和成熟的技术^[19]。然而,柱透镜光场3D显示视场角不足、无运动视差,制约了其进一步发展。集成成像3D显示技术采用微透镜阵列作为视角调控器,通过记录和再现来自3D物体的光线来实现全视差3D显示,并提供运动视差信息,但其存在分辨率下降、视场角受限和莫尔条纹严重等问题^[20]。

基于衍射光学的矢量光场3D显示技术可对出射光方向进行精准调控,使用超材料或超表面的衍射光栅实现高衍射效率和大视场,具有更好的光控制。且其采用非周期性的像素光栅,可有效改善集成成像光场显示的分辨率下降、视场角较小和莫尔

条纹等问题。2013年,Fattal D等人^[21]提出了一种基于周期性纳米光栅的宽视角指向型背光设计,开启了矢量光场显示的研究,W Wan等人^[22]在此基础上提出基于非周期结构实现会聚视点,实现全息采样3D显示,极大地降低串扰,消除鬼影。

亮度是影响3D显示图像的重要因素,因此,超构光栅的衍射效率对获得高性能矢量光场成像至关重要。矢量光场显示将显示的视角图像像素逐一与纳米光栅阵列匹配,每个像素点所对应的光栅的周期和取向各不相同,光栅的周期决定衍射光线偏离中心的角度,光栅的取向决定衍射光线的方向。经过纳米结构对光的方向性调制,视角图像被分离于不同的视点位置,重构3D图像。传统的矢量光场3D显示一般都是基于液晶显示屏幕设计,其透射光一般为线偏振光,传统的光栅结构设计^[22],基于TE或TM偏振设计已获得了较高的衍射效率,但由于偏振状态影响,取向角度变化使得进入光栅的偏振状态发生变化造成衍射效率降低。然而,随着显示技术的多元化发展,在新型显示应用中,包括有机发光二极管(Organic light-emitting diode, OLED)显示和微米级发光二极管(Micron light-emitting diode, Micro-LED)显示屏幕出射光通常为圆偏振光(Circularly polarized light, CPL)^[23-25]。圆偏振光显示可以使得光栅阵列不受取向角度的影响,对提高矢量光场显示亮度和视角均匀性具有重要意义。目前基于圆偏振光提高矢量光场显示亮度和视角均匀性的超构纳米光栅的相关研究较少,文章根据严格耦合波分析逐像素单元仿真了圆偏振下光栅高度和占空比对超构光栅系统各个周期的衍射效率的影响,针对圆偏振光源设计了视场角范围为 50° 最优的超构像素结构,来提高矢量光场3D显示的衍射效率,减少视角之间的亮度差异,为矢量光场显示光栅结构设计与新型显示(OLED, μLED 等)方式兼容性提供了设计思路。

1 建模和仿真方法

1.1 矢量光场显示原理

矢量光场显示是一种利用像素级纳米光栅阵列实现对立体图像重构显示的图像技术,其原理如图 1(a)所示^[26]。超构光栅阵列作为空间光调制器对入射光线进行分光调控,每个超构光栅像素单元通过精准调控-1级光线,将视角图像分离至各个视点位置,汇聚为多个视点,形成多视角三维显示,最后融合成一幅视角连续并含有三维信息的集成像。

$$\Lambda = \frac{\sqrt{\left((x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + z^2\right) \lambda^2}}{\sqrt{(x_0 - x)^2 + (n \sin \theta \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + z^2} - y_0 + y)^2}} \quad (2)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{n \sin \theta \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + z^2} - y_0 + y}{x - x_0} \right) \quad (3)$$

其中 $(x, y, 0)$ 是像素光栅中心坐标, (x_0, y_0, z) 为设计的会聚视点的坐标。

在矢量光场显示中,光栅负责将像素光线汇聚到成像视点,因此其衍射效率的高低将极大影响系统的能量利用率。为提高光栅阵列的衍射效率,提出了一种适用于圆偏振成像的光栅结构,仿真结构示意图如图 1(b)所示,光栅结构参数包括光栅周期

矢量光场显示利用非周期性的像素光栅阵列实现对视角图像光线的分离与会聚,根据显示屏幕像素的排布,不同位置的像素单元对应的光栅周期和取向角度也不同,取向角度指的是光栅沟槽方向相对 TE 偏振的旋转角度,衍射光波矢 k_d 和入射光波矢 k_i 满足如下关系:

$$k_d = k_i - G \quad (1)$$

其中 $|G| = 2\pi/\Lambda$ 表示光栅矢量, Λ 表示光栅的周期, $|k_d| = 2\pi/\lambda$, $|k_i| = 2n\pi/\lambda$, n 为光栅基底折射率,以显示屏幕中心为坐标原点建立矢量光场坐标系,可得到像素单元光栅周期和取向角^[26]分别为:

Λ ,宽度 $W = f \times \Lambda$ (f 为占空比),脊高为 H ,基底厚度 B 。根据光栅的色散理论^[26],当入射角度 θ_2 一定时,-1级衍射角度 θ_3 与光栅周期 Λ 有关,0级光衍射角度 θ_4 仅与入射光角度有关,衍射效率与光栅宽 W ,脊高 H 有关。参考文献[22]~[25]设定光栅材料 n_1 为 1.5,透射区域为空气折射率 n_2 为 1,仿真入射光波长 632.8 nm,入射角度 $\theta_2 = 30^\circ$ 。

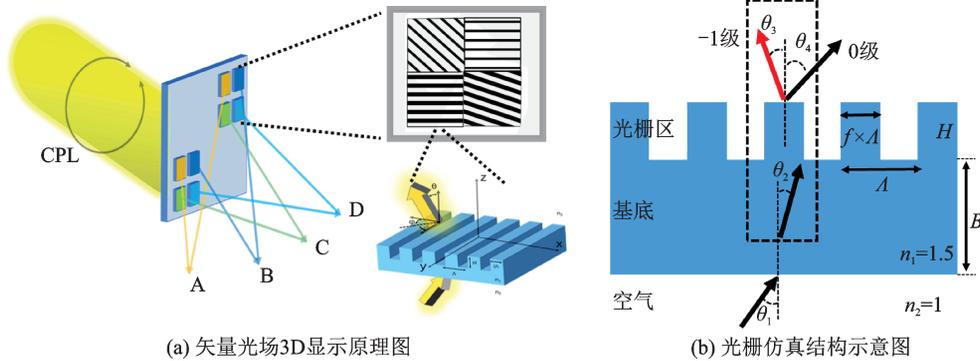


图 1 矢量光场中超构光栅结构仿真模型

Fig.1 Simulation model of metagrating structure in vector light field

1.2 理论模型

为了满足显示的需求,实现视角完全分离,像素型纳米光栅的特征尺寸需要达到波长量级,严格耦合波分析(RCWA)作为一种没有近似的严格的矢量计算方法,其精度只依赖于展开谐波数的数量,与 FDTD 相比,在相似的精度下,RCWA 计算时间大大缩短^[27],考虑到仿真精度和速度设置为 10 个谐

波数量。求解过程主要分为:(1)通过 Maxwell 方程组求解入射区和透射区的电磁场表达式;(2)对光栅区域内介电常数和电磁场作傅里叶级数展开,求出耦合波微分方程组;(3)在不同区域边界处利用电磁场的边界条件,求出各级衍射波的振幅,计算各级衍射波的衍射效率^[28]。第 i 级反射光衍射效率和第 i 级透射光衍射效率的表达式分别为:

$$\eta_{ri} = \text{Re} \left(\frac{\xi_{1i}}{\xi_{10}} \right) R_i R_i^* \quad (4)$$

$$\eta_{ti} = \text{Re} \left(\frac{\xi_{4i}}{\xi_{10}} \right) T_i T_i^* \quad (5)$$

式中: i 为衍射级次; ξ_{1i} 和 ξ_{4i} 为入射区和透射区中第 i 级衍射光沿着 y 方向的波数; ξ_{10} 为入射光沿着 y 方向的波矢; R_i 和 T_i 为第 i 级反射光和透射光归一化的振幅; R_i^* 和 T_i^* 为 R_i 和 T_i 的共轭。

1.3 基于圆偏振光的超构光栅结构设计

常见的手机显示屏幕参数设置会聚视点的距

离为200 mm~300 mm,根据1.1矢量光场成像原理利用算法计算求得RGB光栅周期范围从400 nm到1 100 nm,取向角度范围从 0° 到 90° ^[25-26,29]。圆偏振光可以看作是两个振幅相同,极化角和相位差 90° 的线极化叠加而成,为了准确地仿真光栅在圆偏振光下的衍射效率,这里以互相正交的TE、TM偏振态,按照图2所示流程对超构光栅进行逐周期仿真计算得到CPL入射下的-1级衍射效率变化^[28],逐周期求解计算纳米光栅CPL下的-1级衍射效率,设计CPL照射下的最优的纳米光栅阵列结构,设计流程图如图2所示。

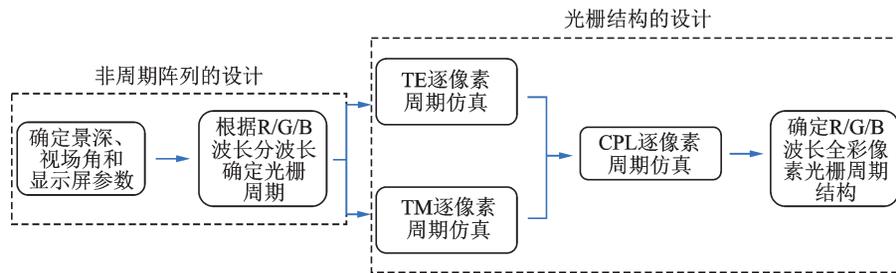


图2 矢量光场光栅设计流程图

Fig.2 Designed flow chart of vector light grating

2 结果与讨论

2.1 入射光偏振状态对衍射效率的影响

为了研究入射光偏振状态对超构光栅衍射效率的影响,首先分别仿真入射光为TE和TM偏振状态下超构光栅的衍射效果。当红光(632.8 nm)以 $\theta_2 = 30^\circ$ 角度入射时,以周期为500 nm光栅为例进行分析。图3(a)和(b)分别为TE和TM偏振下光栅衍射效率随光栅高度和占空比变化的等高线分布图,图中TE偏振下光栅-1级衍射效率的峰值主要集中在高度 $0.83 \mu\text{m}$ 占空比40%、高度 $2.38 \mu\text{m}$ 占空比40%和高度 $3.94 \mu\text{m}$ 占空比40%处;TM偏振下光栅-1级衍射效率峰值主要集中在高度 $1.23 \mu\text{m}$ 占空比60%和高度 $3.75 \mu\text{m}$ 占空比60%处。图3(c)为CPL下周期为500 nm光栅-1级衍射效率随占空比和高度的变化规律,光栅的衍射效率的峰值主要集中在高度为 $0.7 \mu\text{m}$ 到 $1.4 \mu\text{m}$ 和占空比为40%到70%的区域内,与TE偏振和TM偏振入射的衍射效果均有明显不同。

亮度是影响3D显示图像的重要因素,因此,在衍射效率峰值附近选择光栅结构对获得高性能矢量光场成像至关重要。对于矩形光栅,槽深过高会

造成制作困难,从工艺角度选择整数附近的参数便于加工制备,因此选择TE、TM、CPL最优结构参数为高度 $0.8 \mu\text{m}$ 占空比40%、高度 $1.3 \mu\text{m}$ 占空比65%和高度为 $1.1 \mu\text{m}$ 占空比为60%的光栅结构。

根据图3(a)~3(c)分别得到三种偏振下最优的光栅结构,表1比较了三种偏振下最优结构光栅在不同偏振下的衍射效率,其中序号1、2、3分别为TE、TM和CPL偏振下所设计的最优光栅结构。当采用TE偏振光源入射高度 $0.8 \mu\text{m}$ 占空比40%的光栅结构时,-1级衍射效率为83.8%;当采用TM偏振光源入射时,-1级衍射效率仅为28.9%;采用CPL偏振光源入射时,-1级衍射效率为56.4%,与TE偏振光相比衍射效率下降了26.9%。CPL偏振光入射高度为 $1.1 \mu\text{m}$ 占空比为60%的光栅结构,-1级衍射效率为74.9%,TE偏振下的-1级衍射效率为79.8%,TM偏振下-1级衍射效率为69.9%。通过表1对比三种偏振的最优结构,可以看出基于圆偏振光设计的光栅结构衍射效率更加突出,同时参考图3(d)取向角度变化对光栅衍射效率的影响,随着光栅的取向角度的改变,TE/TM最优结构衍射效率均有一定变化,其中TE变化明显,而圆偏振光情况下不论光栅取向角度如何变化,衍射效果都保持稳定。衍射效率随着光栅的取向角

度的改变可以等效为随光源偏振态的变化。图中所示 TM 结构与 CPL 结构相似,衍射效率随取向角度变化不大。这是因为矩形光栅的形状使得 TE 和 TM 具有不同的折射率分布,当光入射光栅结构时,由于 TE 和 TM 的场分布的不同,导致它们之间的有效折射率不同,使得所对应的电磁场传输常数不同,这便造成了不同偏振态具有不一样的衍射效率,这也是微纳光栅器件偏振敏感的根本原因之

一。由于 TM 有效折射率差相对应 TE 偏小,所以 TM 衍射效率峰值滞后于 TE 衍射效率,这就造成了 TE 最优结构时, TM 衍射效率没有达到峰值,而圆偏振光的衍射效率可以看成 TE 和 TM 方向的偏振态的衍射效率之和。图中所示 TM 结构和 CPL 结构相近,因此对于偏振角度的变化,图中所示 TM 结构和 CPL 结构变化不大。综上所述,圆偏振下光栅的衍射效率更加稳定高效。

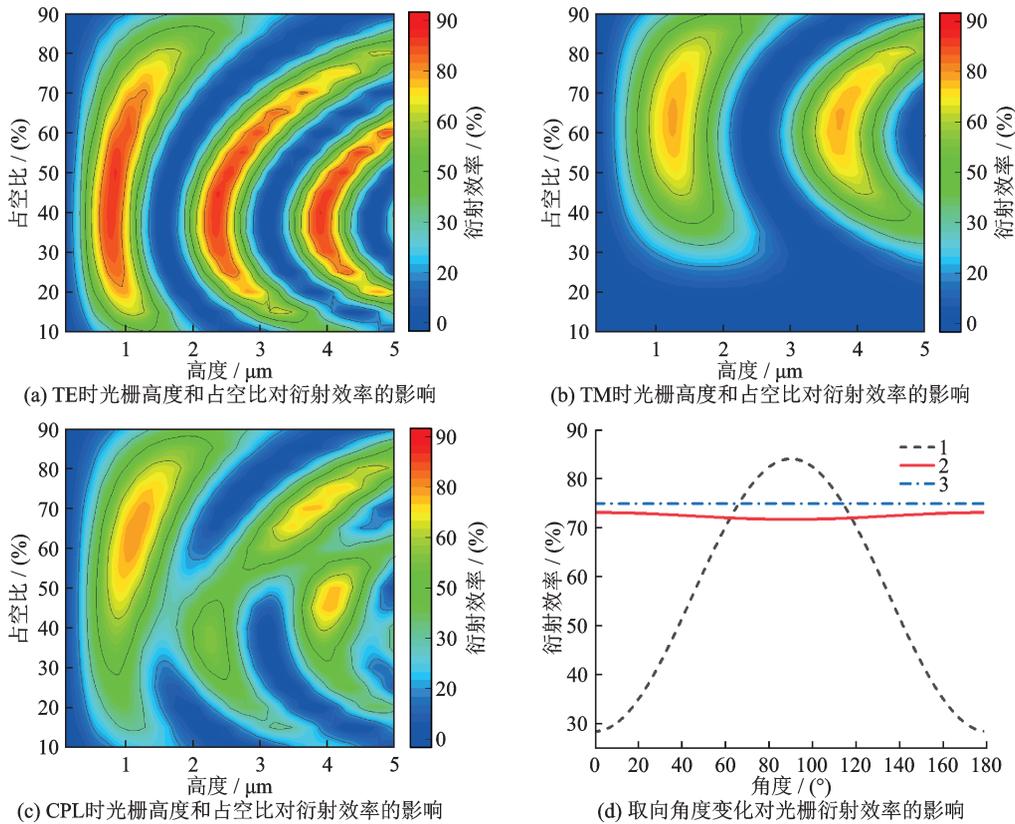


图 3 不同偏振下光栅结构变化对-1级衍射效率的影响

Fig.3 Effect of grating structure changes on the diffraction efficiency of -1 order at different polarizations

表 1 光栅偏振最优结构衍射效率对比

Tab. 1 Diffraction efficiency comparison of optimal polarization structure of grating

编号	高度/ μm	占空比/ (%)	TE/ (%)	TM/ (%)	CPL/(%)
1	0.8	40	83.8	28.9	56.4
2	1.3	65	71.6	72.9	72.3
3	1.1	60	79.8	69.9	74.9

2.2 超构光栅结构参数对衍射效率的影响

圆偏振下光栅的衍射效率更加稳定高效,为获得适用于光场成像的超构衍射光栅阵列结构,在圆偏振光状态下研究超构光栅结构对衍射效率的影

响。由 1.3 基于圆偏振光的超构光栅结构设计可知,RGB 光栅周期范围为 400 nm~1100 nm,以光栅阵列高度和占空比为变量,光栅阵列的平均衍射效率为性能指标,仿真 RGB 三种波长下的衍射效率变化,获得应用于 CPL 衍射成像的最优光栅结构。图 4(a)~4(c)为 CPL 偏振下,光栅阵列分别在 R/G/B 三种波长下,-1 级衍射效率随占空比和高度的变化,其中图 4(a)中表示在红光(632.8 nm)入射下,当光栅高度在 580 nm 到 830 nm 以及占空比从 32% 到 58% 变化时,光栅阵列具有较高衍射效率峰值;图 4(b)中显示了绿光(550 nm)入射下光栅阵列衍射效率峰值区域主要集中在光栅高度在 500 nm 到 780 nm,占空比从 33% 到 58% 之间;图 4(c)中显示了蓝

光(450 nm)入射下,衍射效率峰值在光栅高度在400 nm到550 nm,占空比从33%到50%区间范围内。

通过上述仿真计算得到单色光最优光栅结构参数如表2所示,可以看出应用于不同波长的光栅具有不同的最优参数,考虑到光栅实际制备过程中加工不同高度的光栅难度较大,为了找到一个最优的结构可以同时应用于红绿蓝三种波长并便于加

工,根据图4(a)~4(c)得到了红绿蓝混合波长下不同结构光栅系统对衍射效率的影响。如图4(d)所示,当光栅结构在高度500 nm到680 nm,占空比在38%到53%范围内,光栅系统的-1级平均衍射效率大于40%。为了保证光场成像光栅衍射强度和视角均匀性,考虑到加工误差最终选择应用于RGB全彩的光栅结构为高度0.6 μm,占空比为40%。

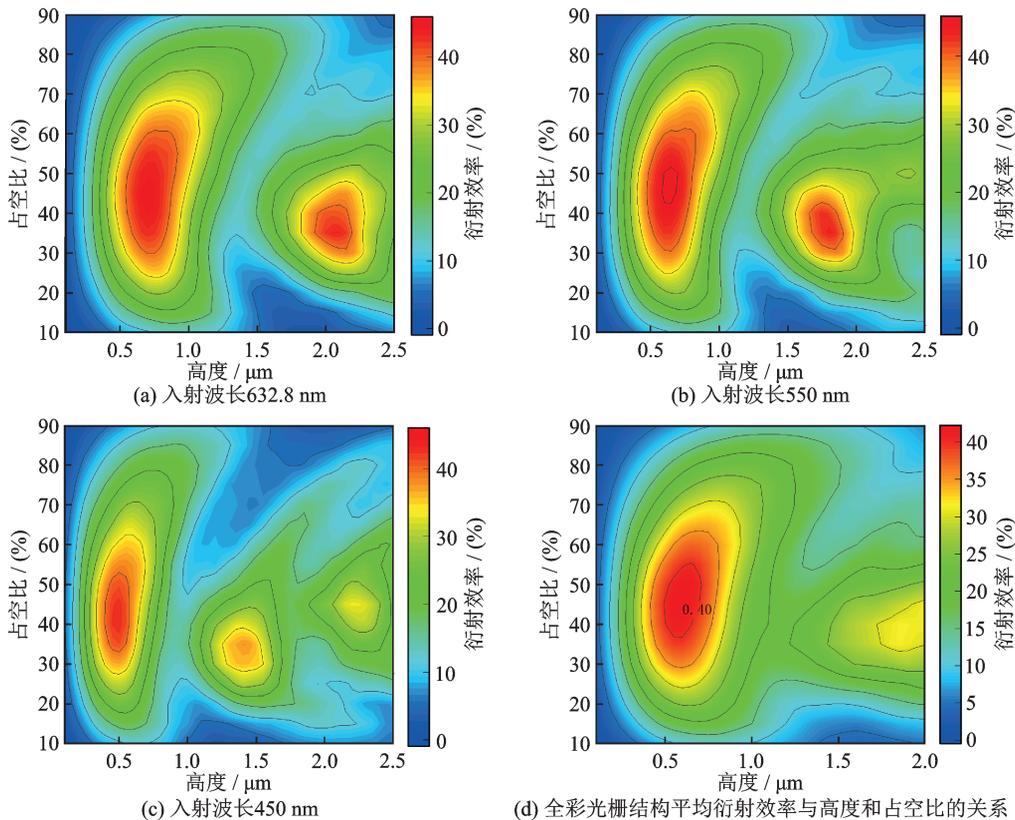


图4 CPL入射下,在不同波长时光栅高度和占空比对光栅阵列(光栅周期范围400 nm~1 100 nm)平均衍射效率的影响

Fig.4 Effect of grating height and duty cycle on the average diffraction efficiency of grating arrays (grating period range of 400 nm~1 100 nm) at different wavelengths under CPL incidence

表2 光栅结构参数对比

Tab.2 Comparison of grating structure parameters

光栅类型	高度/μm	占空比/(%)
红光像素光栅	0.7	40
绿光像素光栅	0.6	50
蓝光像素光栅	0.5	40
全彩光栅	0.6	40

2.3 光源的入射角对RGB光栅衍射效率的影响

根据上述仿真得到圆偏振光设计的RGB全彩的光栅结构为高度0.6 μm,占空比为40%,实际应用中由于光源准直和入射角度误差,会对衍射效率

产生影响,进而影响视角的亮度均匀性。由斯涅尔定律可知平面波以 θ_1 角度入射在光栅基底,在基底内变成以 θ_2 角度传播的平面波,为了减少基底厚度对衍射效率的影响,文章以入射角度 θ_2 为变量,对光栅的-1级衍射效率进行仿真计算。 θ_3 和 θ_4 分别是-1级衍射光和0级衍射光。0级光仅与入射光角度有关,不具备光线调控能力。为了得到亮度均匀的会聚视点,对光栅的-1级衍射效率进行仿真计算。

当入射光角度 θ_2 发生变化时,光栅的-1级衍射角度 θ_3 会发生偏移,衍射效率也会发生变化。为了排除基底厚度对衍射效率的影响,将入射光设置

为基底与光栅区域边界处进行RCWA仿真计算,仿真区域示意图如图5(d)所示。RGB三种波长随入射光角度变化的-1级衍射强度变化如图5(a)~5(c),分别代表RGB三种波长随入射光角度变化的-1级衍射强度变化。入射角度低于30度时,会使得600 nm~800 nm光栅周期的衍射效率提升,但由于入射角度减小使得0级衍射光与-1级衍射成像区重合,视角范围缩小,影响观看效果,图5(e)为光栅系统成像光路图。当入射角度增加时,光栅效率会出现明显的下降趋势,为保证衍射效果,选择准直性较好的光源提高成像质量,30°入射可以保证光栅系统具有较高的衍射效率,同时也可以保证视角亮度的均匀性。

综上所述,采用圆偏振光可以解决由于取向角度变化光栅阵列衍射效率下降所导致的视角亮度不均匀问题,同时优化后的RGB光栅阵列不同视角像素的出光效率在40%左右,视角亮度均匀性的调控是根据不同周期的光栅来进行的。图5(a)~(c)中-1级光栅衍射效率随周期的变化可以等效为视角亮度均匀性的变化,30°入射角度所对应视角亮度曲线较为平缓,具有较好的亮度均匀性,红光光栅阵列视角亮度差为4%,绿光光栅阵列视角亮度差为10%,蓝光光栅阵列视角亮度差为20%左右,因为蓝光光栅阵列衍射效率低于红光和绿光阵列,可以有效的减少蓝光,对于未来面向健康显示的裸眼3D显示技术具有重要意义。

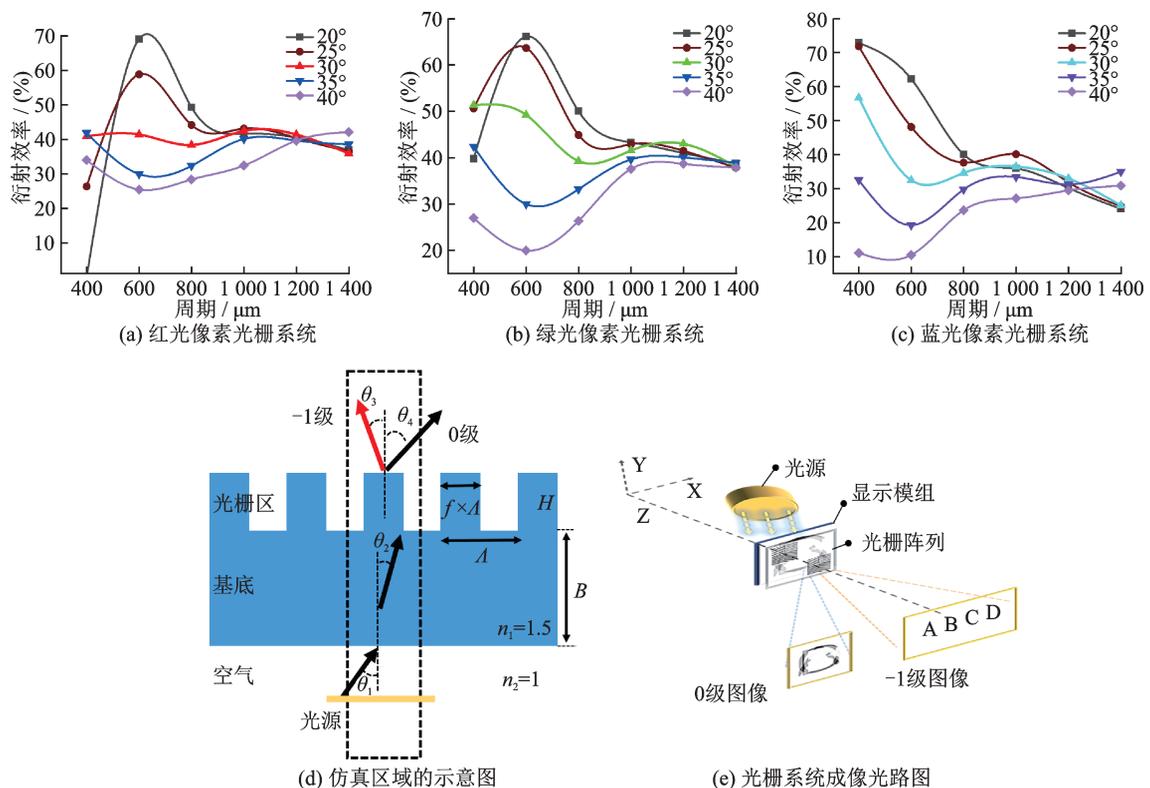


图5 入射角度变化对R/G/B光栅阵列的衍射效率的影响

Fig.5 Effect of incident angle variation on diffraction efficiency of R/G/B grating arrays

3 结 论

不同偏振对微纳光栅的衍射效果具有一定影响。文章为了改善微纳光栅矢量光场3D显示随着取向角度变化出现的亮度不均匀,衍射效率降低等问题,提出了一种基于圆偏振入射的纳米光栅阵列结构。首先,利用RCWA讨论了偏振对于光栅衍射效率的影响,确定圆偏振可以有效的解决随着取向

角度变化引起的衍射效率降低等问题,并在圆偏振条件下周期400 nm~1 100 nm时讨论了波长、光栅结构与衍射效率的关系,并根据关系图考虑到工艺和加工误差最终选择高度0.6 μm占空比40%作为新型RGB集成光栅结构参数。同时讨论了入射角度的变化对光栅系统的衍射效率的影响,为了兼顾视角大小和亮度,根据仿真角度与衍射效率的关系,确定光源入射角度最优值为30°,系统衍射效率

可以达到40%以上,具有较优的综合性能,对超构光栅设计制备和裸眼3D显示具有极大指导意义。文中设计的新型RGB集成光栅有助于提高矢量光栅相位板的能量利用率,对于3D显示领域具有一定的应用价值。

参 考 文 献

- [1] 邢树军,曹良才,桑新柱,等.面向超多视点光场的虚拟立体内容生成技术综述[J].中国激光,2021,48(15):1509001.
- [2] 夏仲文,华鉴瑜,陈林森,等.基于微纳光子器件的光场裸眼3D显示技术[J].液晶与显示,2022,37(5):562-572.
- [3] 王勤,赵悟翔,邹翠明.基于视差和串扰的自由立体显示器视疲劳预测[J].光学技术,2019,45(5):617.
- [4] Hao Zhang, Yan Zhao, Cao Liangcai, et al. Three-dimensional display technologies in wave and ray optics: A review (Invited Paper)[J]. Chinese Optics Letters, 2014, 12(6): 060002.
- [5] Ma Q, Cao L, He Z, et al. Progress of three-dimensional light-field display (Invited)[J]. Chinese Optics Letters, 2019, 17(11): 111001.
- [6] Blanche P A. Holography, and the future of 3D display [J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(4): 446-459.
- [7] 邓儒,李文华,党伟.子像素排列方向对小间距LED裸眼3D显示系统串扰的影响[J].液晶与显示,2020,35(11):1120-1126.
- [8] 武延兵,李新国,董友梅,等.狭缝光栅开口率与裸眼3D显示串扰之间的关系[J].液晶与显示,2019,34(5):472-476.
- [9] 陈瑜,赵焱,曾祥耀,等.垂直/倾斜型交错狭缝光栅对立体显示效果的影响[J].液晶与显示,2019,34(7):659-666.
- [10] 张晓婷,陈芳萍,叶绿青,等.基于自由曲面的裸眼3D显示柱透镜光栅设计[J].光子学报,2017,46(12):1222002.
- [11] Liu F, Zhao J, Han T, et al. Screening for stereopsis using an eye-tracking glasses-free display in adults: A pilot study [J]. Frontiers in Medicine, 2022, 8: 3071.
- [12] 范钧,刘永志,吴非.基于渐变线光源的高亮度集成成像3D显示[J].红外与激光工程,2021,50(12):20210058.
- [13] 邢毓华,胡晓龙,杨琛.基于分层聚类二维视点合成的集成成像系统[J].量子电子学报,2021,38(1):2.
- [14] Petrov N, Khromov M, Sokolov Y. Multi-view 3D integral imaging systems using projectors and mobile devices [J]. Photonics, 2021, 8(8): 331.
- [15] Song M H, Jeong J S, Erdenebat M U, et al. Integral imaging system using an adaptive lens array [J]. Applied Optics, 2016, 55(23): 6399-6403.
- [16] Shi J, Qiao W, Hua J, et al. Spatial multiplexing holographic combiner for glasses-free augmented reality [J]. Nanophotonics, 2020, 9(9): 3003-3010.
- [17] Wan W, Qiao W, Huang W, et al. Multiview holographic 3D dynamic display by combining a nano-grating patterned phase plate and LCD [J]. Optics Express, 2017, 25(2): 1114-1122.
- [18] Hua J, Hua E, Zhou F, et al. Foveated glasses-free 3D display with ultrawide field of view via a large-scale 2D-metagrating complex [J]. Light: Science & Applications, 2021, 10(1): 1-9.
- [19] Huang T, Han B, Zhang X, et al. High-performance autostereoscopic display based on the lenticular tracking method [J]. Optics Express, 2019, 27(15): 20421-20434.
- [20] 范钧,吴非,吕国皎,等.基于可变孔径针孔阵列的集成成像3D显示[J].红外与激光工程,2018,47(6):0603005.
- [21] Fattal D, Peng Z, Tran T, et al. A multi-directional backlight for a wide-angle, glasses-free three-dimensional display [J]. Nature, 2013, 495(7441): 348-351.
- [22] Wan W, Qiao W, Pu D, et al. Holographic sampling display based on metagratings [J]. Iscience, 2020, 23(1): 100773.
- [23] Huang J, Hu Z, Gao X, et al. Unidirectional-emitting GaN-based micro-LED for 3D display [J]. Optics Letters, 2021, 46(14): 3476-3479.
- [24] Xu Y, Cui J, Hu Z, et al. Pixel crosstalk in naked-eye micro-LED 3D display [J]. Applied Optics, 2021, 60(20): 5977-5983.
- [25] Gao X, Xu Y, Huang J, et al. Circularly polarized light emission from a GaN micro-LED integrated with functional metasurfaces for 3D display [J]. Optics Letters, 2021, 46(11): 2666-2669.
- [26] 万文强.基于衍射光学的裸眼3D显示研究[D].苏州:苏州大学,2018:58-62.
- [27] Jang H T, Yi J C. Comparison of rigorous coupled-wave analysis and finite difference time domain method on dielectric gratings [C]. Republic of 2021 IEEE Region 10 Symposium (TEN-SYMP), IEEE, Jeju, Korea, 2021: 1-4.
- [28] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction [J]. JOSA, 1981, 71(7): 811-818.
- [29] 魏国军.用于衍射空间成像的连续变空频干涉光刻技术[D].苏州:苏州大学,2004.