

文章编号: 1005-5630(2020)04-0014-06

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.04.003

全息波导耦出光栅出瞳亮度均匀性的改善

王婉秋, 任雪畅, 炉庆洪, 刘凯航

(厦门大学物理科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 目前在 AR 领域, 存在着全息波导显示系统的耦出光栅出瞳亮度不均匀的问题, 设计并制作了一种衍射效率渐变的全息光栅以进一步提高显示光路中耦出光栅的出瞳亮度均匀性。提出移动遮挡板方案, 以实现分区域地改变全息干版的曝光时间, 使得到的全息光栅的衍射效率具有渐变特性, 并对实验结果进行研究和分析。结果表明, 系统中耦出光栅的出瞳亮度均匀性由 28.57% 提高到 57.14%。因此采用的全息光学元件的拍摄光路和曝光方法, 可以有效改善全息波导耦出光栅出瞳亮度均匀性。

关键词: 全息波导; 衍射效率; 耦出光栅; 亮度均匀性

中图分类号: O 438.1 **文献标志码:** A

Improvement of brightness uniformity of out-coupling grating in holographic waveguide

WANG Wanqiu, REN Xuechang, LU Qinghong, LIU Kaihang

(College of Physical Science and Technology, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: At present, there is a problem of uneven brightness of the out-coupling grating of the holographic waveguide display system in the field of AR. In this paper, a holographic grating with a diffractive efficiency gradient is designed and fabricated to further improve the brightness uniformity of out-coupling grating in the display optical path. Based on theoretical analysis and discussion, this paper proposes a scheme of moving the shutter to realize the change of the exposure time of the holographic plate by divisional region, so that the diffraction efficiency of the obtained holographic grating has a gradual characteristic. The final experimental results are studied and analyzed. The results show that the uniformity of the exit pupil brightness of the coupled grating in the system increases from 28.57% to 57.14%. Therefore, the photographic optical path and exposure method of the holographic optical element used in this paper can effectively improve the uniformity of the exit pupil brightness of the holographic waveguide coupling out grating.

Keywords: holographic waveguide; diffraction efficiency; out-coupling grating; brightness uniformity

收稿日期: 2019-11-25

作者简介: 王婉秋(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为全息光学中光栅结构、光学器件和计算全息编码。

E-mail: 19820171152783@stu.xmu.edu.cn

通信作者: 任雪畅(1978—), 女, 副教授, 研究方向为光全息与信息处理。E-mail: xuechangren@xmu.edu.cn

引言

随着信息时代不断发展,人们在生产生活中对近眼显示系统的性能要求越来越高,各种新型显示技术层出不穷,其中利用全息波导技术的显示系统是目前增强现实(AR)领域的研究热点。全息波导是利用耦入光栅、波导材料以及耦出光栅实现大出瞳、大视场的一种光学技术,这种技术结合了全息记录材料中光栅的衍射特性以及波导介质边界处光束的全反射特性,相比传统的光学系统具有更小的体积和更轻的质量,在便携/头戴式显示终端方面得到广泛应用,并在近年来增强现实和虚拟现实显示头盔方面取得一定成果^[1-6]。

在全息波导显示结构中,光束在通过耦出光栅衍射出波导的同时,还会在波导材料内表面发生全反射,衍射出光的次数视耦出光栅尺寸和入射角的大小而定,由于发生全反射,随着衍射次数的增加,入射到耦出光栅上的光强依次减弱,若耦出光栅的衍射效率一定,则会出现衍射出光不均匀的现象。为获得连续且均匀的扩展输出,需要优化波导系统结构和耦出光栅的衍射效率分布。

目前国内外的研究热点集中于在计算模拟手段上优化全息波导系统的结构来提高出瞳亮度均匀性的方向上。Whitehead^[7]提出一种由多个波导模块构成的拼接结构,每个模块各自具有一定的衍射效率特性,且可以根据需要从光束入射的一端增减模块数量,但这种结构的缺点是出瞳不连续。Shechter等^[8]分析了Shipley S1805型光刻胶的曝光强度与衍射效率曲线,并利用卤化银掩膜改变光的透过率,在紫光条件下记录了具有渐变衍射效率的输出光栅,但没有考虑具有一定宽度的输入光束经过光栅后的亮度均匀性;相广鑫等^[9]针对单反射面单波导板构型光栅设计与制造复杂的问题,提出一种L型单波导二维扩展构型,同时满足了大出瞳、大视场等显示要求;刘慕等^[10]对全息波导光栅的效率、视场角等方面进行理论推导和优化仿真,在实验中利用制作的单周期光栅对波导输出图像做了测试,得到了更大的视场角和衍射效率;李瑞华等^[11]设计了

单片式的全息波导双色显示系统,在模拟软件中对二维扩瞳波导系统的出瞳均匀性进行了仿真优化;张攀等^[12]提出一种连续递增的衍射效率分布光栅模型,并对衍射效率进行分段加权平均和二次曲线拟合,得到了衍射效率曲线;彭飞等^[13]以提高中心视场的光强均匀性为目的,对光栅衍射效率分布曲线进行优化拟合,同样得到了随输出位置连续递增的衍射效率曲线。

之前的研究多数停留在计算或模拟阶段,并未真正设计并制作出能够改善耦出光栅出瞳均匀性的全息波导光栅结构,本文在记录手段上,利用曝光时间和强度与衍射效率之间的关系,采用优化一维移动遮挡板的移动步长、频率和次数等参数的方法,分区域改变曝光时间,使耦出光栅的衍射效率具备渐变的特点,最终提高出瞳亮度的均匀性。

1 全息波导系统结构及其出瞳均匀性

本文研究的是双区域一维拓展透射型全息波导结构,该结构包括耦入光栅、波导段和耦出光栅三个主要部分,其中耦入光栅和耦出光栅都是透射型光栅,且位于波导材料下表面。

如图1所示,入射光即外置投影设备中发出的图像光,经过一系列准直系统后,到达耦入光栅,耦入光栅使入射光发生衍射,进入波导材料中,衍射光的角度满足波导材料的全反射条件,因此可以在上下表面多次反射向前传播。当光线传播到耦出光栅时,每个光线与耦出光栅的交点即为衍射点,光线在衍射点处都会被衍射出波导系统进入人眼,因此可以实现拓展出瞳的效果。

在耦出光栅处,光束在波导材料内部经过多次衍射和反射,假设衍射和反射的次数为 N ,若耦出光栅的衍射效率均匀,则第一次到第 N 次中,每次衍射后出射光强度都与该次入射光强度的比例相同,但由于有衍射出光消耗光强,随着 N 增大,每次衍射的入射光强度逐渐减小,因此造成每次出射光强度减小,差异较大,均匀性较差,最终人眼接收到的图像虽然在一定方向上实现长度扩展,但亮度不均匀,也会造成视觉疲劳,这些现象导致这类显示产品无法满足人们的需要。

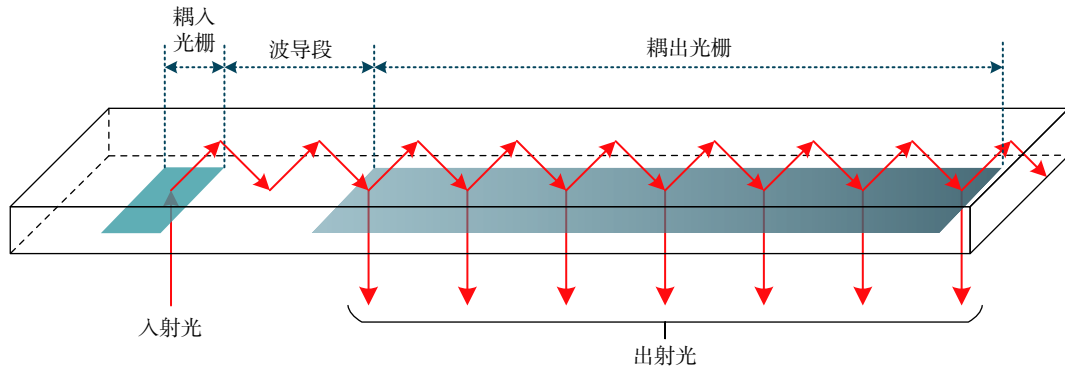


图 1 全息波导结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of holographic waveguide structure

因此，为保证输出光束的亮度均匀性^[14]，本文通过分区域地改变全息干版曝光时间和强度的方法使耦合出光栅的衍射效率按特定规律渐变，即光线先到达的部分设计成较低的衍射效率，后到达的部分设计成较高的衍射效率，最终使出瞳图案的显示亮度达到一定的均匀性。假设 I_N 和 η_N 分别为光束第 N 次反射后的光强和该反射位置处的衍射效率，则应满足

$$\eta_N = \frac{\eta_1}{1 - (N - 1)\eta_1} \quad (1)$$

即 N 较小时，衍射效率应较低， N 较大时，衍射效率应增大。

2 方案设计及参数说明

由式(1)可知，为使出瞳光线的光强分布尽量均匀，需优化耦合出光栅的衍射效率。本文采用优化一维移动遮挡板的移动步长、频率和次数等参数的方法，通过分区域地改变曝光时间来改变曝光量(E_0)，实验光路如图 2、3 所示。

如图 2、3 所示，由氩氖激光器 L 光源发出的光，经分束镜 BS 分束后，反射光经反射镜 M1 反射后，依次通过空间滤波器 SF1 和透镜 L1，再经过固定挡板 B1 和可移动挡板 RB1，最后垂直照射在全息记录干版 HP 上；透射光先后经过反射镜 M2、M3 反射，又经过空间滤波器 SF2 和透镜 L2，再经过固定挡板 B2 和可移动挡板 RB2，最后以 60° 的入射角照射在全息记录干版 HP 上，两束光在全息干版表面发生干涉现象。

本文将耦合出光栅划分为七个小区域，图 4 为

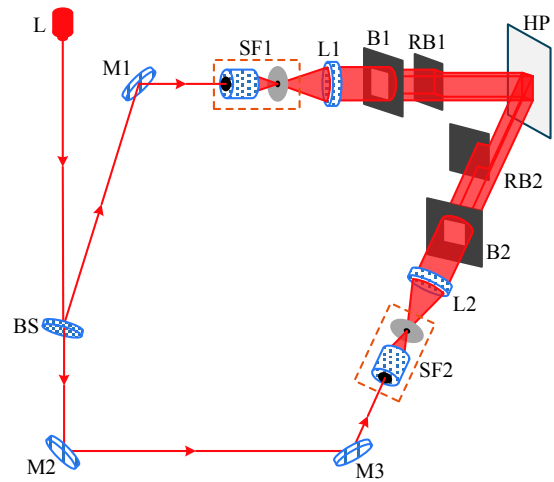


图 2 记录方案采用的光路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the optical path used in the recording scheme

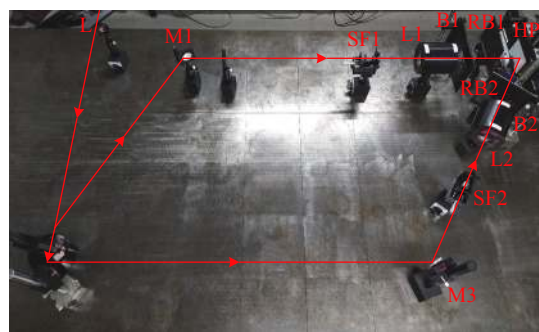


图 3 记录方案采用的光路实物图

Fig. 3 Recording the optical path of the scheme

区域划分示意图。由式(1)可知，理想情况下，第一个小区域到第七个小区域的衍射效率应为 14.29%、16.67%、20.00%、25.00%、33.33%、50.00%、100.00%，但实际条件下，本文所用到的 CH-RD 型银盐全息干版的衍射效率最高值不

超过 20%，且不同全息记录材料的衍射效率随曝光量变化的曲线($E_0-\eta$ 曲线)也不尽相同，因此需要探究 CH-RD 型银盐全息干版的衍射效率的变化规律，再根据这一规律确定耦出光栅各个小区域的全息曝光方案。对于绝大多数全息记录材料的 $E_0-\eta$ 曲线来说，在一定曝光量内，衍射效率随曝光量增加而呈线性增加，曝光量达到一定值后，曲线趋于平缓。因此，以图 4 为例，耦出光栅各个小区域的曝光时间应 t 从左到右依次增加，具体的曝光时间需通过进一步实验验证得到。

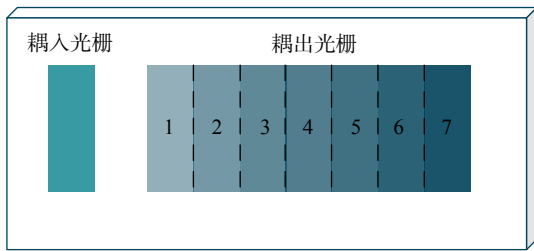


图 4 光栅区域划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of grating area division

拍摄全息干版时，保持两路光的强度比1:1 不变，在两条光路中，固定挡板的作用是遮挡不必要的光线，得到符合记录需要的光照区域，再通过移动遮挡板的方法，改变耦出光栅中每个小区域的曝光时间，最终改变全息片的曝光量。

由于光线在波导材料中传播时会发生全反射现象，且在记录光栅时入射角度为 60° ，全息记录材料厚度为 2 mm，所以在理想状态下，每个衍射点之间的距离应为 7 mm，因此图 4 耦出光栅上每一个小区域的宽度为 7 mm，一维可移动遮挡板的步长也设置为 7 mm。

为了更好地突出本方法的优点，本文还增设对照组，且对于对照组中耦出光栅部分的曝光

时间也进行了研究，以求真实地反应对照组的出瞳不均匀性以及本文记录方案对出瞳均匀性的优化，以避免实验结果的偶然性。对照组的耦出光栅部分并不采用分区域曝光方法，而是整块区域同时曝光相同的时间，采用的曝光时间从 4.0 s 到 14.0 s 不等，曝光方案如表 1 所示，结果表明，曝光时间为 8.0 s 时衍射效率最高、均匀性最好，因此将这一曝光条件作为最终的对照条件。

表 1 对照组曝光时间参数

Tab. 1 Exposure time parameter in the control groups

曝光条件	耦入光栅 t	耦出光栅 t
对照条件1	10.0	4.0
对照条件2	10.0	6.0
对照条件3	10.0	8.0
对照条件4	10.0	10.0
对照条件5	10.0	12.0
对照条件6	10.0	14.0

因此本文在拍摄全息光栅时，采取的曝光时间方案参数如表 2。

将在这四种条件下拍摄的全息光栅还原在光路中，用一块白屏接收衍射出瞳的光斑。图 5 为测量各个光斑光功率值的光路图。其中，光束照射到全息干版后在波导系统中传播，在出瞳方向放置白屏以接收出瞳光斑，在干版与白屏之间放置小孔光阑和置物台，小孔用来保证每次只允许一个光斑的光通过，置物台上的光功率计可以测出每个光斑的功率值，本文将对测量得到的数据进行分析并对出瞳均匀性进行评估。

本文用到的激光器是氦氖激光器，所用红光

表 2 曝光时间参数

Tab. 2 Exposure time parameter

曝光条件	耦入光栅 t	耦出光栅 t						
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
对照条件	10.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
实验条件A	10.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0	14.0	16.0
实验条件B	10.0	4.0	5.0	6.0	7.0	9.0	11.0	13.0
实验条件C	10.0	4.0	6.0	8.0	10.0	11.0	12.0	13.0



图 5 测量光路图

Fig. 5 Optical path for measurement

波长为 632.8 nm，功率为 28.45 mW，两束记录光的入射角度分别是 90°和 60°，波导部分是玻璃，厚度为 2 mm。

3 实验结果及分析

光路再现时，在四种不同的实验条件下拍摄的全息光栅都可以发生衍射出瞳，并在白屏上得到一系列的光斑分布，图 6、7、8、9 分别列出了四种条件下的再现光斑分布情况。可以看出，相比对照组得到的光栅，实验条件 A 得到的光栅出瞳亮度均匀性没有明显提高且亮度明显下降，实验条件 B、C 拍摄的光栅出瞳均匀性有明显提升，接下来利用如图 5 所示的测量光路图对以上的光斑功率值进行测量，并对每一列光斑的功率值曲线进行近似优化，最终得到的功率分布情况如图 10 所示。

从图 10 可以看出，四种条件中，条件 B 实验组得到的光斑均匀性变化起伏较小，且光斑功率值较高。接下来采用如下方法进一步分析上述得到的光功率数值：首先求出每一组数值的标准差 α ，再求出每一组数值的平均值 a ，最后找出这一组数值在 $(a \pm 0.5\alpha)$ μm 范围内的比例，作为光斑亮度均匀度 β ，最终得到的结果如表 3 和图 11 所示。

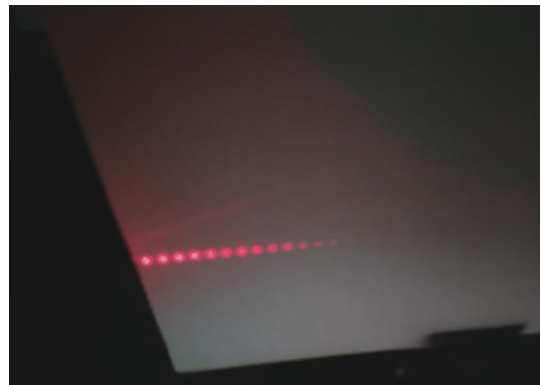


图 6 对照组条件时的出射光

Fig. 6 Out-coupling light in the control condition



图 7 条件 A 时光栅的出射光

Fig. 7 Out-coupling light in the condition A



图 8 条件 B 时光栅的出射光

Fig. 8 Out-coupling light in the condition B

从表 3 和图 11 中的结果可以看出：条件 A 均匀度较差的原因可能是曝光时间呈直线型变化，不符合衍射效率与曝光强度的关系曲线^[1]；条件 C 均匀度未有明显提高，是因为光线先到达的区域衍射出光亮度较高，导致后到达区域的

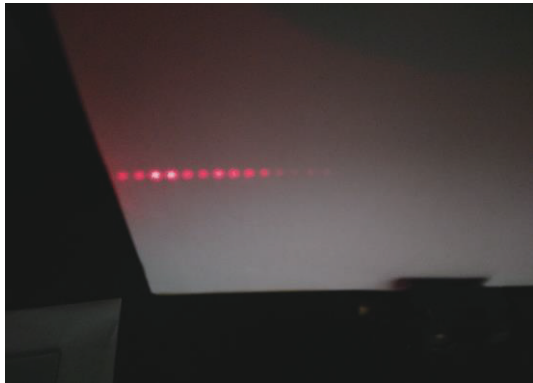


图 9 条件 C 时光栅的出射光

Fig. 9 Out-coupling light in the condition C

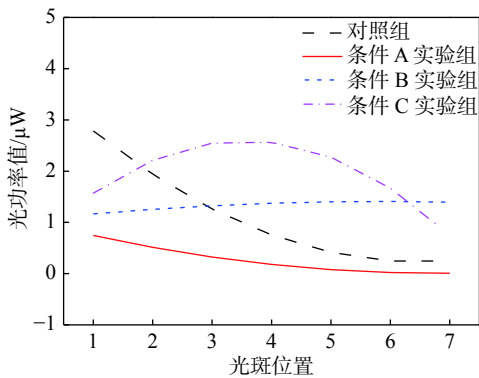


图 10 光功率数值的分布情况

Fig. 10 Distribution of light power

表 3 各列光斑的亮度均匀度比较
 Tab. 3 Comparison of brightness uniformity of each column

曝光条件	亮度均匀度 β
对照组	28.57%
条件A实验组	14.29%
条件B实验组	57.14%
条件C实验组	28.57%

光亮度大幅减弱; 条件 B 实验组光斑的亮度均匀性最好, 且这一曝光条件可以将耦出光栅出瞳亮度均匀度提高约 29%。

4 结 论

本文提出了一种有效的记录方案, 通过改变

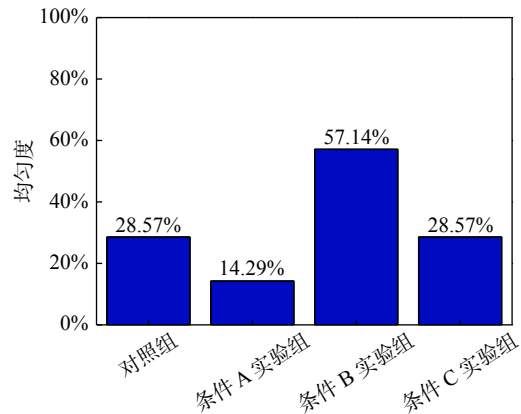


图 11 各列光斑亮度均匀度对比

Fig. 11 Comparison of brightness uniformity of each column

全息波导耦出光栅记录过程中的曝光量, 得到渐变的衍射效率, 从而改善了一维拓展出瞳的全息波导系统中耦出光栅出瞳亮度的均匀性, 该系统可以用于 AR/VR 眼镜产品中实现较高的图像显示亮度均匀性, 在未来的工作中, 可以进一步推广到可实现二维扩展的三区域光栅结构, 将衍射效率的渐变规律应用于二维平面的图像上, 以进一步提高显示亮度的均匀性。

参考文献:

- [1] 周海宪, 程云芳. 全息光学——设计、制造和应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 高阳, 何永学, 赵龙波, 等. 全息波导元件的光线追迹及误差分析 [J]. 电光与控制, 2017, 24(7): 75 – 80.
- [3] 刘玉杰, 李文强, 丁全心, 等. 全息波导板构型优化 [J]. 电光与控制, 2015, 22(2): 69 – 72.
- [4] PAN C, LIU Z Y, PANG Y J, et al. Design of a high-performance in-coupling grating using differential evolution algorithm for waveguide display[J]. *Optics Express*, 2018, 26(20): 26646 – 26662.
- [5] YU C, PENG Y F, ZHAO Q, et al. Highly efficient waveguide display with space-variant volume holographic gratings[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(34): 9390 – 9397.
- [6] YANG L L, TU Y, SHI Z Y, et al. Efficient coupling to a waveguide by combined gratings in a holographic waveguide display system[J]. *Applied Optics*, 2018, 57(35): 10135 – 10145.

(下转第 46 页)