

激光与光电子学进展

光栅波导增强现实显示系统误差像质分析与实验

黄战华^{1,2*}, 芦畅泰¹, 潘成^{1,2}, 伍圆军¹¹天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072;²天津大学四川创新研究院, 四川 成都 610200

摘要 光栅波导显示系统在生产加工和装调过程中,由于微纳加工设备的系统误差、累计误差和人为装调误差会影响系统成像质量产生重像、模糊等问题。为了解决上述问题,设计了一种一维扩瞳光栅波导并采用光线追迹仿真方法,分析了光栅波导平行度误差、光栅周期误差、系统装调误差对成像质量的影响。实验加工并装调测试了光栅波导的成像质量,通过控制波导平整度在 $0.3'$ 以内,光栅周期公差在 0.2 nm 以内,制造了一维出瞳扩展光栅波导,准直装调后达到了 $30 \times 12^\circ$ 视场角,实现了良好的增强现实显示效果和清晰的成像质量,对实际的量产制造具有指导意义。

关键词 光栅; 增强现实显示; 波导光栅; 杂散光; 误差分析

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP221304

Error Image Quality Analysis and Experiment of Augmented Reality Display System Based on Grating Waveguide

Huang Zhanhua^{1,2*}, Lu Changtai¹, Pan Cheng^{1,2}, Wu Yuanjun¹¹Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technology of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;²Sichuan Innovation Research Institute, Tianjin University, Chengdu 610200, Sichuan, China

Abstract In the process of production, processing and assembly of grating waveguide display system, due to the systematic error, cumulative error, and artificial assembly error of micro nano processing equipment, the imaging quality of the system will be affected, resulting in double image, blur, and other problems. In order to solve the above problems, this paper designs a one-dimensional pupil expanding grating waveguide, and uses the ray tracing simulation method to analyze the influence of grating waveguide parallelism error, grating period error, and system assembly error on the imaging quality. The imaging quality of the grating waveguide is processed and adjusted experimentally. By controlling the flatness of the waveguide within $0.3'$ and the grating period tolerance within 0.2 nm , a one-dimensional exit pupil extended grating waveguide is fabricated. After collimation and alignment, the $30 \times 12^\circ$ field of view angle is reached, good augmented reality display effect and clear imaging quality are achieved, which is of guiding significance for practical mass production.

Key words gratings; augmented reality display; waveguide grating; stray light; error analysis

1 引言

近年来,增强现实成为全球信息领域中重点应用领域之一,正处于快速发展时期^[1-5]。目前自由曲面技术^[6-7]、波导技术^[8-9]以及折衍射混合技术^[10]已经应用于增强现实领域,由于光栅波导系统具有占用空间小、质量轻、出瞳大等优点,在工业生产、教育、医疗、游戏娱乐等领域展示出了巨大的潜在价值^[11-13]。

尤勳等^[14]针对增强现实平视器中出现结构设计复杂和显色不均匀的问题,提出了一种新型的双层耦合光栅结构,实现高均匀性、大视场的彩色屏显;曾飞等^[15]使用分光棱镜和光栅相结合设计二维出瞳扩展,实现了大视场、高效率结构;相广鑫等^[16]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,实现了大出瞳、大视场等显示要求;黄战华等^[17]提出使用闪耀光栅与矩形光栅相

收稿日期: 2022-04-14; 修回日期: 2022-05-19; 录用日期: 2022-05-25; 网络首发日期: 2022-06-05

通信作者: *zhanhua@tju.edu.cn

结合设计二维出瞳扩展构型,实现了高效率,高均匀性等显示要求;高阳等^[18]提出了一种二维全息光栅光线追迹的误差分析方法,但是并未实验验证对成像质量的影响;杨柳等^[19]针对反射型全息光栅的制备,提出了一种加工工艺有效增加了光栅衍射效率。

综上所述,之前的研究大多集中在光栅波导的结构设计和优化设计,且大部分研究仅停留在计算和模拟阶段,对于制造和装调误差会对系统成像质量带来影响分析不足。本文针对以上问题,通过光线追迹仿真和实际加工装调进行分析误差对成像质量的影响,并合理设置公差制造一维出瞳扩展光栅波导,实现了良好的增强现实显示效果和清晰的成像质量。

2 光栅波导系统原理

衍射光栅波导的基本原理就是光的全反射和衍射。图 1 为典型的光栅波导系统光路图,该系统由微图像源、准直光学系统、耦入耦出光栅及基底波导构成。首先由微型图像源发出带有图像信息的光束,该光束经过准直光学系统后变成不同角度的平行光,进入光栅波导到达耦入光栅,经衍射后光束在波导内以全反射的形式进行传输,当平行光束到达耦出光栅时,再次发生衍射改变传输方向从而使平行光束从波导出射,最终进入人眼。

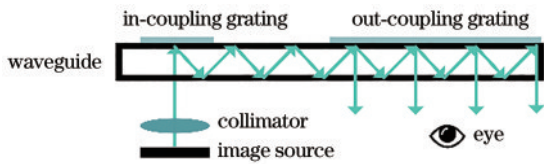


图 1 光栅波导系统光路图

Fig. 1 Grating waveguide system light path diagram

为了方便分析光波导中光线的走向,采用光线矢量形式来进行分析。图 2 为光束矢量示意图,将光线矢量分为 k_x 、 k_y 、 k_z 共 3 个分量进行分析。光线在光栅和波导中的传播过程主要分为:光线入射和出射波导时发生的折射过程;光线在波导内全反射过程;光线与光栅发生的衍射过程。假设入射光线矢量为 $\mathbf{A}(k_{xi}, k_{yi}, k_{zi})$, 出射光线矢量为 $\mathbf{B}(k_{xo}, k_{yo}, k_{zo})$, 表面法向量为 \mathbf{n} , 折射过程中入射光线与出射光线关系表示为

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} + \left[\sqrt{n_2^2 - n_1^2 + (\mathbf{A} \cdot \mathbf{n})^2} - (\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}) \right] \mathbf{n}, \quad (1)$$

式中: n_1 和 n_2 分别为折射前后介质折射率。

反射过程中入射光线与出射光线关系表示为

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} - 2(\mathbf{A} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n}. \quad (2)$$

衍射过程中入射光线与出射光线关系表示为

$$k_{xo} = k_{xi} + i \frac{2\pi}{T}, \quad (3)$$

$$k_{yo} = k_{yi}, \quad (4)$$

$$k_{zo} = \begin{cases} + (k_0^2 n_2^2 - k_{xo}^2 - k_{yo}^2)^{1/2}, & k_0^2 n_2^2 > k_{xo}^2 + k_{yo}^2 \\ -i (k_{xo}^2 + k_{yo}^2 - k_0^2 n_2^2)^{1/2}, & k_0^2 n_2^2 < k_{xo}^2 + k_{yo}^2 \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $k_0 = 2\pi/\lambda$, λ 为入射光线在真空中的波长; T 为光栅周期。

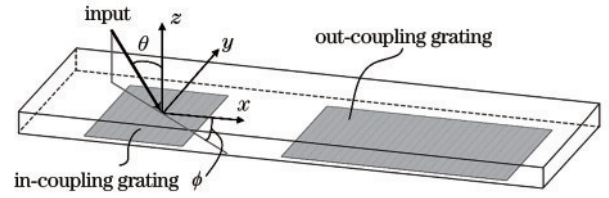


图 2 光束传播图

Fig. 2 Beam propagation diagram

3 成像质量分析

为了分析光栅波导系统成像质量,首先确定光栅波导系统参数。波导材料设定为 ZF13,波导折射率 1.79,为了方便实验加工耦入光栅的区域大小设为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,光栅周期为 416.67 nm ,耦出光栅区域大小为 $25 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,光栅周期为 416.67 nm ,建立光线追迹仿真模型如图 3 所示,其中采用对角线 0.6 英寸 (1 英寸 = 2.54 cm) 图像源,准直系统为焦距 21 mm 的四片式准直系统,人眼采用理想透镜进行模拟。

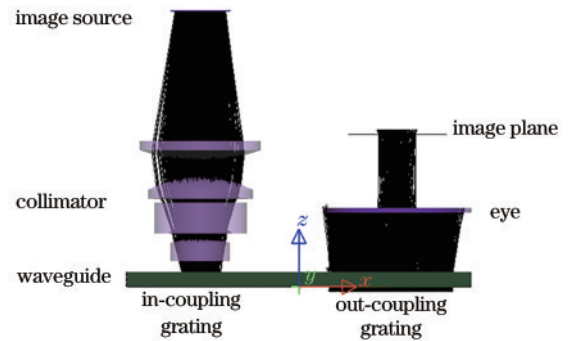


图 3 光栅波导系统光线追迹

Fig. 3 Raytracing of grating waveguide system

3.1 光栅波导平行度误差分析

如果波导基底是理想平行的,那么图像在波导中是以平行光的状态进行传播的,但是在实际生产中,波导基底可能存在微小角度的倾斜,如图 4 所示,在多次全反射过程中光线的误差就会迅速积累。为了分析波导不平度对成像质量的影响,假设下表面平行,分别从波导上表面 X 轴方向倾斜误差与 Y 轴方向倾斜误差来进行分析讨论。

利用光线矢量计算波导不平行后相邻出射光线偏转角度,其中主要计算中心视场(0,0)、上视场(0,6)、下视场(0,-6)、左视场(-15,0)、右视场(15,0)五条光线,结果如图 5 所示,可以看出,在波导平行度 $\pm 2'$

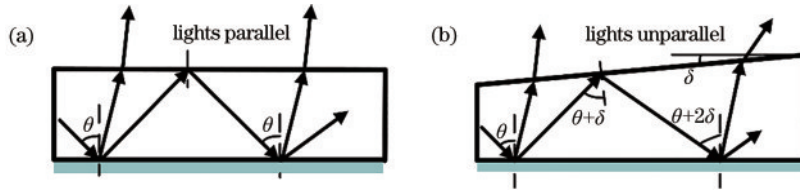


图 4 光栅波导示意图。(a)波导平行;(b)波导倾斜

Fig. 4 Diagram of grating waveguide. (a) Parallel waveguide; (b) tilted waveguide

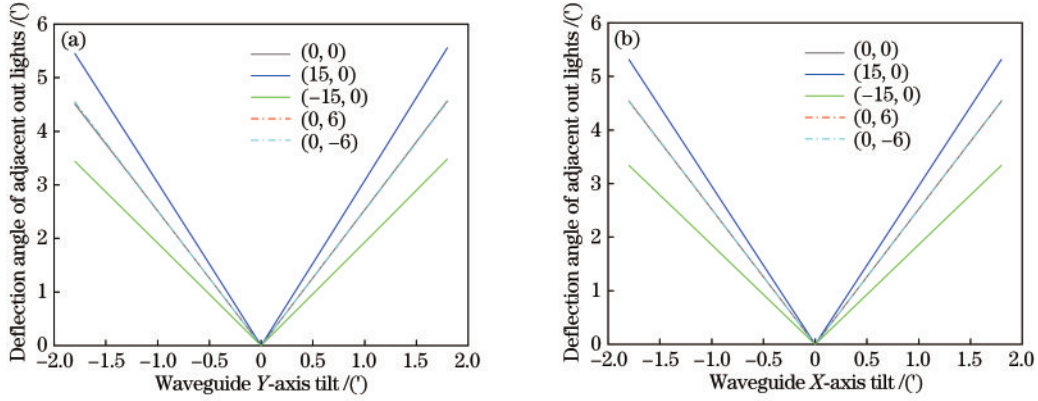


图 5 光栅波导平行度与光线角度偏转关系图。(a)波导 X 轴方向倾斜;(b)波导 Y 轴方向倾斜

Fig. 5 Relationship between waveguide substrate irregularity and light deflection angle. (a) Waveguide X-axis tilt; (b) waveguide Y-axis tilt

的范围内,不同视场相邻扩瞳光线偏转角与波导平行度为线性关系,其中:波导平行度对右视场光束的影响为 3.0' 偏转/1' 波导平行度;对左视场光束的影响为 1.9' 偏转/1' 波导平行度;对上中下视场光束的影响为 2.5' 偏转/1' 波导平行度。可以发现,右视场对波导平行度的影响最为敏感。

通过仿真系统模拟成像后,如图 6 所示,同样可以看出波导平行度对右视场光线影响最大,波导板 Y 方

向波导倾斜如图 6(a) 所示,出现重影现象且右视场最明显,波导板 X 方向波导倾斜如图 6(b) 所示,图像出现倾斜且右视场倾斜角度最大。问题产生的主要原因是右视场光线在波导中全反射次数最多,导致其累积的误差也最大。由于人眼的分辨率可以达到 1', 所以为了消除波导不平度对成像质量的影响,根据图 5 可得波导基底的加工公差应控制在 0.3' 以内。

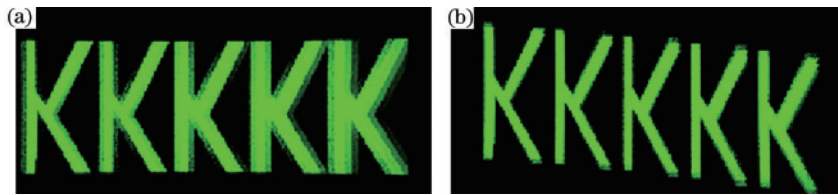


图 6 光栅波导平行度成像仿真图。(a)Y 轴方向 6' 倾斜;(b)X 轴方向 6' 倾斜

Fig. 6 Simulation diagrams of grating waveguide parallelism imaging. (a) 6' tilt in Y-axis direction; (b) 6' tilt in X-axis direction

3.2 光栅周期误差分析

在制备衍射光栅的过程中,由于其结构尺度属于微纳范畴,微纳制造工艺可能由于仪器精度、加工流程

等原因会对所制备的衍射元件产生一些加工误差。如图 7 所示,在微纳加工过程中,光栅加工周期与设计周期局部产生误差后,衍射光线角度也将产生偏转。

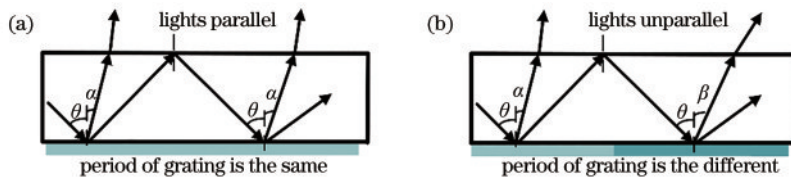


图 7 光栅周期误差示意图。(a)波导周期相同;(b)波导局部周期不同

Fig. 7 Diagram of grating period error. (a) Waveguide period is the same; (b) local period of the waveguide is different

通过计算可以得出 416.67 nm 光栅周期偏差对不同视场衍射角度的偏差关系,结果如图 8 所示,可以看出,在光栅周期在 ±4 nm 偏差范围内,光栅周期偏差对不同视场具有相同的影响,影响为每 1 nm 周期偏差 5.9' 偏转。

通过仿真系统模拟成像后,如图 9 所示,同样可以看出,光栅局部周期偏差对不同视场具有相同的影响,

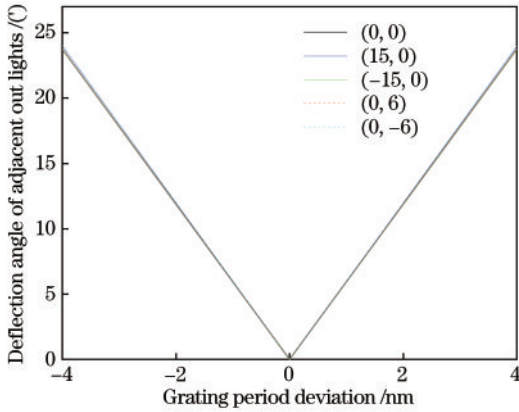


图 8 光栅周期偏差与出射光线角度偏转关系图
Fig. 8 Diagram of relationship between grating period deviation and angle deflection of outgoing light

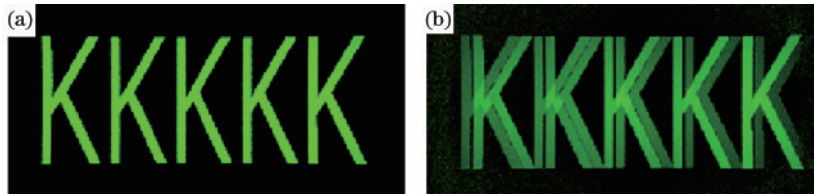


图 9 仿真图。(a)光栅周期正常的仿真图;(b)光栅局部周期产生 4 nm 误差后的仿真图
Fig. 9 Simulation diagrams. (a) Simulation diagram of normal grating period; (b) simulation diagram of grating with 4 nm error generated by local period

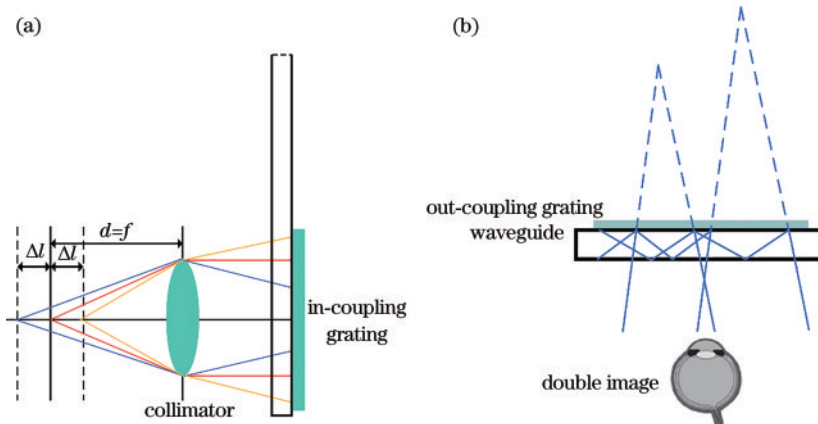


图 10 示意图。(a)镜组离焦光束传播示意图;(b)离焦后观测重像示意图
Fig. 10 Diagrams. (a) Diagram of defocused beam propagation of mirror group; (b) diagram of observed duplicate image after defocusing

如图 11 所示,通过仿真系统模拟成像后,可以观测到离焦后出现图像倍增现象并且由于右视场光束扩瞳次数更多而导致重像数量越多。由于人眼的分辨率可以达到 1',通过计算可以得出本结构离焦误差 Δl 应

光栅局部周期偏差会产生重像影响光栅波导的成像质量。由于人眼的分辨率可以达到 1',所以为了消除光栅周期局部偏差对成像质量的影响,根据图 8 可得,光栅周期加工公差应控制在 0.2 nm 以内。

3.3 装调误差分析

光栅波导显示系统中,无论采用哪种耦合器,输入的光束都应该保持准直进入波导,但是装调误差,会导致经过镜组的光束不准直输出,从而影响显示系统的成像质量,装调误差主要包括镜组离焦误差与微显示器倾斜误差对成像质量的影响。

为了方便分析装调离焦误差对成像质量的影响,将准直镜组准直系统假设成薄凸透镜成像。如图 10(a)所示,对于光栅波导显示系统光束准直传播时,微显示器与薄透镜之间的距离为 $d=f$,像平面位于无穷远处,如果存在离焦误差相当于 $d \neq f$ 。当 $d=f+\Delta l$ 时,微显示器上一点的光束呈现会聚状态;当 $d=f-\Delta l$ 时,微显示器上一点的光束呈现发散状态。光束在光栅波导传播过程中由于离焦误差会导致光束随着传播距离长短发生变化,因此每次出瞳扩展都将产生一个距离不同的图像,此时如果探测器接收面位于两次扩瞳的重叠位置,同时接收来自两个扩瞳的光线,则会出现重像问题,如图 10(b)所示。

该控制在 0.04 mm 内。
当微显示器存在装调误差倾斜误差时,如图 12 所示,微显示器上只有中心位置光束处于准直状态,其余位置光束均处于非准直状态且离焦量各不相同。如图

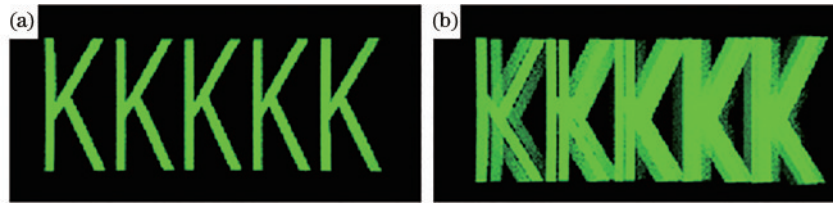


图 11 仿真图。(a)光束准直传播成像仿真图;(b)离焦 1 mm 成像仿真图

Fig. 11 Simulation diagrams. (a) Simulation diagram of beam collimation propagation imaging; (b) simulation diagram of 1 mm defocus imaging

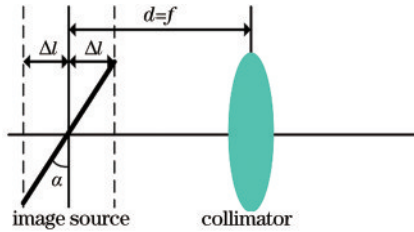


图 12 微显示器倾斜示意图

图 12 Schematic diagram of micro display tilt

13 所示,通过仿真系统模拟成像后可以发现左视场出现重像,右视场出现模糊问题。由于人眼的分辨率可以达到 1',通过离焦误差 Δl 和图像面源尺寸可以计算

出本结构系统的倾斜误差应该控制在 18' 内。

装调误差会导致光束经过准直镜组没有准直平行出射,而是以会聚或者发散的方式出射,图像不是无穷远处,又由于光栅波导出瞳扩展原理,每次扩瞳都会产生新的像点,就会导致观测到图像出现重像的问题。因此在光栅波导系统中,传播的光束应该保持准直,以减轻图像重像和模糊的影响。

在实际加工装配过程中上述误差往往会混合在一起出现,如图 14 所示,通过仿真系统模拟光栅局部周期为 4 nm、光栅波导 Y 轴方向 6' 倾斜、离焦 1 mm、误差同时存在时的成像,可以看出,图像中出现了重像和模糊问题。

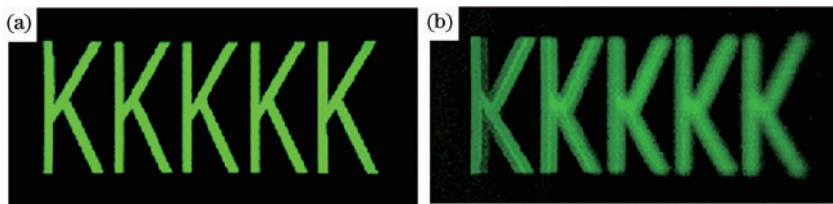


图 13 仿真图。(a) 光束准直传播成像仿真图;(b)微图像源倾斜 5° 成像仿真图

Fig. 13 Simulation diagrams. (a) Simulation diagram of beam collimation propagation imaging; (b) simulation diagram of micro image source tilting 5°



图 14 三种误差同时存在模拟成像仿真图

Fig. 14 Simulation diagram of analog imaging with three errors at the same time

4 成像质量测试实验

光栅波导加工工艺流程如图 15 所示。主要流程为:1)使用电子束曝光技术和离子束刻蚀技术制作母版,并对模板进行清洗和表面处理;2)将聚合物压在带有纳米结构的母版上,在一定温度和压力下保持一段时间之后,就形成了带有纳米结构的聚合物;3)在玻璃基底上均匀涂有压印胶,然后使用带有纳米结构的聚合物进行压印;4)在一定温度和压力保持一段时间后,进行脱模,形成最终的微纳结构。

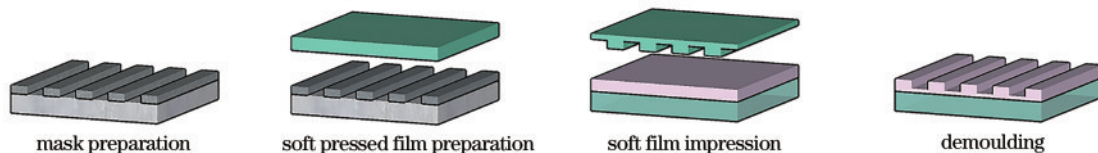


图 15 光栅波导加工工艺流程

Fig. 15 Grating waveguide processing technology

通过微纳加工工艺制作光栅,加工后的光栅波导如图 16 所示,可以看到明显的衍射光线,其中光栅波导的基本参数如下:波导厚度为 3 mm,光栅周期为 416.67 nm,波导折射率为 1.79。

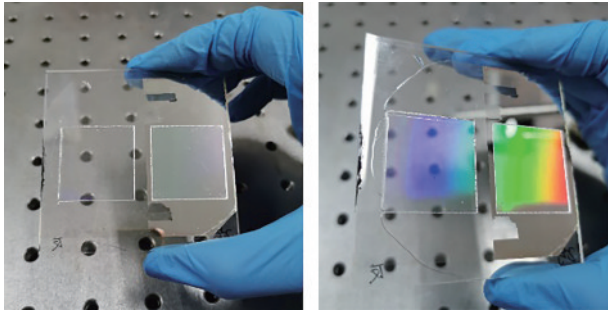


图 16 衍射波导光栅
Fig. 16 Diffractive waveguide grating

然后,设计了光栅波导成像测量实验,其中成像质量测试设备主要由图像源、准直镜组、待测光栅波导元件、固定支架和模拟人眼观测的拍照设备组成。搭建的成像测试装置如图 17(a)所示,使用高亮度

OLED 微显示器作为图像源进行测试,测试图如图 17(b)所示。

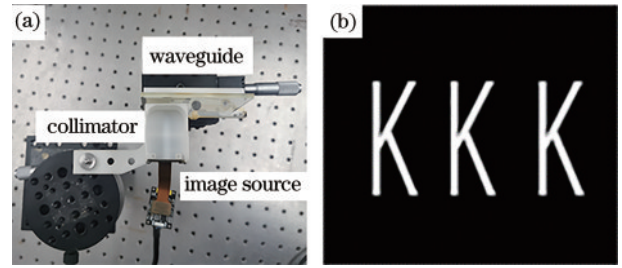


图 17 光栅波导成像。(a) 图像测试装置图; (b) 测试图
Fig. 17 Grating waveguide imaging. (a) Image test device; (b) test figure

在加工过程中,积累了一些品质不佳的光栅波导,其成像质量如图 18 所示。其中:图 18(a)图像整体出现重像问题,与图 9 光栅周期误差成像仿真图相符;图 18(b)图像出现重像问题且右视场影响大于左视场,与图 6 波导基底平行度仿真图相符;图 18(c)图像出现重像和模糊的问题,与图 11 装调误差仿真图相符。



图 18 光栅波导成像测试图。(a)局部光栅周期变化导致重影;(b)光栅波导平整度导致重影;(c)装调误差导致成像模糊重影
Fig. 18 Grating waveguide imaging test chart. (a) Ghosting caused by local grating periodic change; (b) ghosting caused by grating waveguide tilt; (c) imaging blur and ghosting caused by assembly error

在实际生产中,往往误差是混合在一起出现的,其中出现重像的根本原因是出瞳扩瞳后的光线之间存在夹角,相同角度的扩瞳光线不是平行出射,导致进入人眼后会聚于不同点,从而形成重像现象。搭建实验装置测量问题光栅出瞳扩展后光线间的夹角,实验示意图如图 19 所示。

通过测量屏幕 1 位置处扩瞳距离 L_1 , 屏幕 2 位置处扩瞳距离 L_2 和屏幕 1、2 之间的距离 D , 就可以计算出

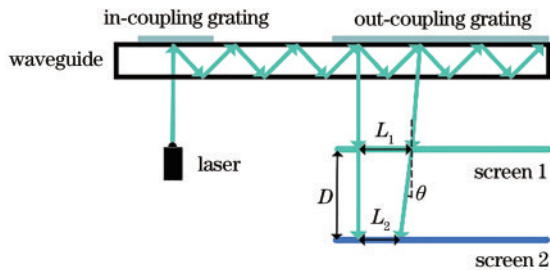


图 19 出瞳扩展光线测试图
Fig. 19 Exit pupil expansion light test chart

扩瞳光线偏转角,扩瞳光线偏转角 θ 为

$$\theta = \arctan \frac{L_1 - L_2}{D} \quad (6)$$

通过测量计算得到,图 18(a)光栅扩瞳光线存在 20' 角度偏转,图 18(b)光栅扩瞳光线存在 8' 角度偏转。为了得到良好的成像质量,加工过程中控制波导平整度公差在 0.3' 以内,光栅周期公差在 0.2 nm 以内,镜组与微显示器保持平行且光束准直出射,最终实现了清晰的成像质量,视场内没有重像和模糊问题且能清晰看到图像源显示的图像,测试效果如图 20 所示。

最后通过实验可以测得该系统的视场角度,测量原理如图 21 所示。通过测量有限距离 S 和此处两端端点间距 P , 根据视场角的计算公式可知,测量制造的一维出瞳扩展光栅波导可以达到 $30 \times 12^\circ$ 视场角。

$$\Phi = 2 \arctan \frac{P}{2S} \quad (7)$$



图 20 成像质量好测试图

Fig. 20 Test chart of good imaging quality

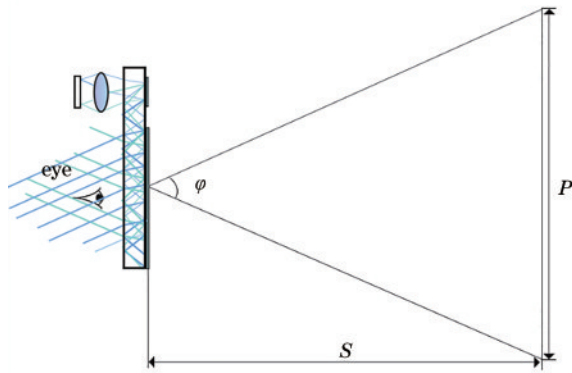


图 21 视场角测量示意图

Fig. 21 Schematic diagram of field angle measurement

5 结 论

本文通过光线追迹模拟和实际加工装调对光栅波导显示系统成像质量进行分析,发现光栅局部周期误差会导致重像问题,波导不平行度会导致重像和图像倾斜问题,装调过程中镜组离焦误差与微显示器倾斜误差会导致成像出现重像和模糊问题。通过控制波导平整度公差为 $0.3'$,光栅周期公差为 0.2 nm ,制造了一维出瞳扩展光栅波导达到 $30 \times 12^\circ$ 视场角,实现了良好的增强现实显示效果和清晰的成像质量。该研究对实际的量产制造具有指导意义,后续工作将研究增强现实系统成像质量测量问题。

参 考 文 献

- [1] Xiong J H, Hsiang E L, He Z Q, et al. Augmented reality and virtual reality displays: emerging technologies and future perspectives[J]. Light: Science & Applications, 2021, 10: 216.
- [2] Dewen C, Qiwei W, Yue L, et al. Design and manufacture AR head-mounted displays: a review and outlook[J]. Light: Advanced Manufacturing, 2021, 2(3): 350-369.
- [3] Zhang Y, Fang F Z. Development of planar diffractive waveguides in optical see-through head-mounted displays

[J]. Precision Engineering, 2019, 60: 482-496.

- [4] 姜玉婷, 张毅, 胡跃强, 等. 增强现实近眼显示设备中光波导元件的研究进展[J]. 光学精密工程, 2021, 29(1): 28-44.
Jiang Y T, Zhang Y, Hu Y Q, et al. Development of optical waveguide elements in augmented reality near-eye displays[J]. Optics and Precision Engineering, 2021, 29(1): 28-44.
- [5] 史晓刚, 薛正辉, 李会会, 等. 增强现实显示技术综述[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1146-1161.
Shi X G, Xue Z H, Li H H, et al. Review of augmented reality display technology[J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1146-1161.
- [6] 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.
- [7] Talha M M, Chang J, Wang Y T, et al. Design, tolerancing and stray light analyses of a freeform HMD optical system[J]. Optik, 2010, 121(8): 750-755.
- [8] 鲁婷婷, 冯奇斌, 王梓, 等. 大角带宽高衍射效率体全息光栅的设计和制备[J]. 光学学报, 2021, 41(2): 0205001.
Lu T T, Feng Q B, Wang Z, et al. Design and fabrication of volume holographic gratings with large angular bandwidth and high diffraction efficiency[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(2): 0205001.
- [9] 杨光华, 王宇, 李璟, 等. 增强型相位光栅衍射效率研究[J]. 光学学报, 2021, 41(12): 1205001.
Yang G H, Wang Y, Li J, et al. Diffraction efficiency of enhanced phase grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(12): 1205001.
- [10] 姜洋, 孙强, 谷立山, 等. 折/衍混合自由曲面式头戴显示器光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(3): 508-514.
Jiang Y, Sun Q, Gu L S, et al. Design of optical system of HMD using hybrid refractive/diffractive and free-form surfaces[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(3): 508-514.
- [11] Wiederhold B K, Riva G. Annual review of cybertherapy and telemedicine: a decade of VR[M]. San Diego: Interactive Media Institute, 2005, 3: 65-76.
- [12] Sielhorst T, Feuerstein M, Navab N. Advanced medical displays: a literature review of augmented reality[J]. Journal of Display Technology, 2008, 4(4): 451-467.
- [13] Cameron A A. Optical waveguide technology and its application in head-mounted displays[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8383: 83830E.
- [14] 尤劭, 黄战华, 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): 1005001.
You M, Huang Z H, Cai H Y. Design of double-layer coupling gratings for full-color helmet mounted display [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(10): 1005001.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 黄战华, 马云飞, 尤勤, 等. 新型波导型准直投影系统中衍射光栅的设计[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030501.
Huang Z H, Ma Y F, You M, et al. Design of diffraction grating in new type of waveguide collimated projection system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 030501.
- [18] 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.
Gao Y, He Y X, Zhao L B, et al. Ray tracing and error analysis of holographic waveguide[J]. Electronics Optics & Control, 2017, 24(7): 75-80.
- [19] 杨柳, 蒋世磊, 季雪淞, 等. 用于平板波导显示的反射型体全息光栅制备[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(3): 0305001.
Yang L, Jiang S L, Ji X S, et al. Preparation of reflective volume holographic grating for plate waveguide display[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(3): 0305001.