

# 全息波导显示系统的实现与优化

刘 慕, 张宇宁\*, 沈忠文, 王保平

东南大学电子科学与工程学院教育部信息显示与可视化国际合作联合实验室, 江苏 南京 210096

**摘要** 在全息波导近眼显示系统中, 微像源发出的载像光波经过准直后, 被输入耦合光栅耦合入平板波导, 进一步在平板波导上下表面内进行全反射传播, 到达输出端后通过输出耦合光栅衍射出波导, 最终到达人眼。以真实的图像传输为目标, 对全息波导光栅的效率、视场角等方面进行理论分析和优化设计, 通过激光干涉曝光实验制作了光栅周期为 197 nm、光栅矢量与介质表面法线方向夹角为  $26^\circ$ 、厚度为  $7.5 \mu\text{m}$  的全息光栅, 光栅峰值效率大于 80%。结合波导光学设计, 进一步实现了图像的传输。

**关键词** 光学器件; 全息光栅; 衍射; 视场角

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0523003

## Realization and Optimization of Holographic Waveguide Display System

Liu Ao, Zhang Yuning, Shen Zhongwen, Wang Baoping

*International Joint Research Laboratory for Information Display and Visualization,*

*School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China*

**Abstract** In the near-eye display system of holographic optical waveguide, the carrier wave emitted from the micro-image source is collimated and then coupled into the slab waveguide by input coupling grating. The wave propagates through the upper and lower surfaces of the slab waveguide with total reflection. After reaching the output end, passing through output coupling grating, the wave propagates out of the waveguide and finally reaches the human eye. In order to achieve real image transmission, aspects such as the holographic diffraction efficiency and the field of view are theoretically analyzed and optimally designed. A holographic grating with grating period of 197 nm, grating vector angle of  $26^\circ$ , and thickness of  $7.5 \mu\text{m}$  is fabricated in the laser interference exposure experiment. The peak efficiency of the grating is more than 80%. Combined with waveguide optical design, we realize the image transmission.

**Key words** optical devices; holographic gratings; diffraction; field of view

**OCIS codes** 230.1950; 230.1480; 230.7390

## 1 引 言

最简单的近眼显示系统可以利用透镜将像源发出的载像光波直接汇聚到人眼, 形成一个投影在远处的虚像<sup>[1]</sup>。由于近眼系统视距很小, 要得到较大的视场和显示效果, 透镜需要占用一定的尺寸和重量。为了进一步减小体积和重量, 人们开始尝试利用曲面折返和衍射光学系统来实现载像光波的光路控制<sup>[2]</sup>。这类曲面光学系统能够得到较好的透射式成像质量, 但是出瞳大小和光学部件厚度等问题仍然没有好的解决办法。1995 年, 以色列 Amitai Y 等<sup>[3-5]</sup>提出一种全息波导的方案, 将全息元件用作耦合元件, 用平板波导进行图像传输。这种设计将成像和传像功能分离, 可以使透射式近眼显示系统进一步简化结构, 极大地减小尺寸和重量, 因此得到人们广泛的研究。

**收稿日期:** 2016-10-21; **收到修改稿日期:** 2016-12-27

**基金项目:** 国家自然科学基金青年科学基金(61405033)

**作者简介:** 刘 慕(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事信息显示方面的研究。E-mail: 230149070@seu.edu.cn

**导师简介:** 王保平(1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事信息显示方面的研究。E-mail: wbp@seu.edu.cn

\* **通信联系人.** E-mail: zyn@seu.edu.cn

全息波导显示系统被用来在使用者近眼处呈现微像源的一个放大的虚像。视场角(FOV)是全息波导显示系统的一个关键指标,大的 FOV 意味着人眼能看到更大的虚像。FOV 与像源尺寸、准直透镜、全息光栅、平板波导等以及各部件之间的光学匹配度、相对位置等均有很大关系,其中,全息光栅的相关指标是其中的难点和重点。本文将深入讨论这些关系,通过理论推导和仿真计算来设计一个单波长、较大视场的平面波导显示系统。

## 2 全息波导显示系统与结构

平板波导显示系统结构如图 1 所示,由微像源、准直光学系统、输入耦合光栅、平板波导、输出耦合光栅组成<sup>[6-7]</sup>。由微像源发出的载像光波经准直系统后成为一系列不同角度的平行光。输入耦合光栅是一个折射率分布呈正弦调制的反射全息光栅,载像光波经过它后在平板波导内衍射成更大的传播角度,以满足在波导平板中的内全反射条件,同时向输出耦合光栅方向传播。输出耦合光栅是一个与输入光栅对称的全息光栅,根据光学的互易定律,载像光波到达输出光栅后,耦合出光波导并被还原成与入射光波一致的平行光,最终到达人眼。

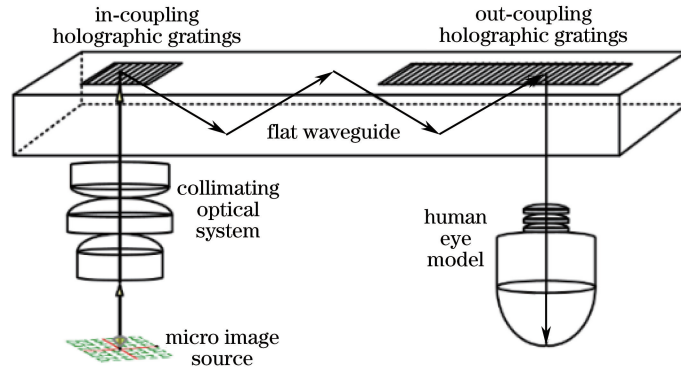


图 1 平板波导显示系统结构示意图

Fig. 1 Structural sketch map of flat waveguide display system

光波经过 2 种介质传播时满足折射定律:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_0, \quad (1)$$

式中  $n_0$  为空气折射率,  $\theta_0$  为入射角;  $n_1$  为波导介质折射率,  $\theta_1$  为折射角。

从微像源发出的光经准直后,形成发散角为  $\pm\theta_{\text{FOV}0}$  的平行光,该平行光从空气中进入折射率为  $n_1$  的波导时,发散角折射为

$$\pm\theta_{\text{FOV}1} = \pm \arcsin \frac{\sin \theta_{\text{FOV}0}}{n_1}. \quad (2)$$

入射光进入波导后受到输入耦合光栅的衍射,当入射光满足全息光栅的布拉格条件时,入射光和衍射光波矢与光栅矢量之间的夹角相等。确定光栅矢量方向,可以得到发散角为  $\pm\theta_{\text{FOV}1}$  的入射光被输入耦合光栅衍射后在平板波导内传播的最大和最小传播角  $\theta_{\text{max}}$  和  $\theta_{\text{min}}$ 。

同时,根据折射率为  $n_1$  的波导内全反射条件:

$$n_1 \sin \theta_{\text{CRI}} = n_0 \sin 90^\circ, \quad (3)$$

$$\theta_{\text{CRI}} = \arcsin \frac{1}{n_1}, \quad (4)$$

最小传播角  $\theta_{\text{min}}$  应该大于全反射临界角  $\theta_{\text{CRI}}$ , 否则  $\theta_{\text{min}}$  就由全反射临界角  $\theta_{\text{CRI}}$  决定。

载像光波在平板波导上下表面间以  $\theta$  角周期性反射并向前传播,如图 2 所示,  $\theta_{\text{min}} \leq \theta \leq \theta_{\text{max}}$ , 该  $\theta$  角同时决定了系统的 FOV, 图中,  $L_i$  为输入光栅长度,  $L_o$  为输出光栅长度,  $P_\theta$  为载像光波在波导内的传播周期。

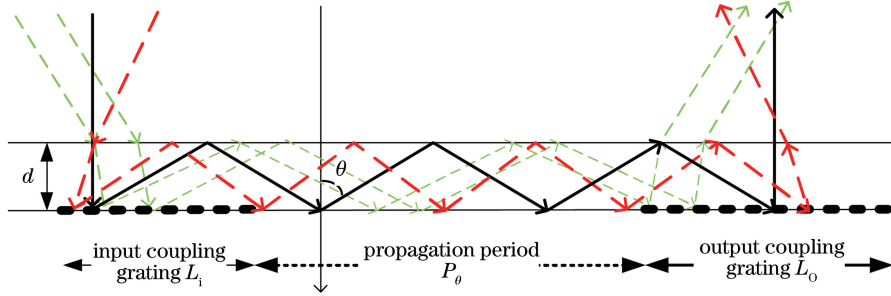


图 2 载像光波内全反射传播示意

Fig. 2 Diagram of image carrier-wave total internal reflection propagation

### 3 全息光栅特性

全息光栅有透射式和反射式 2 种形式,相比透射式体全息光栅,反射体全息光栅拥有更窄的波长带宽和更大的角度带宽<sup>[8]</sup>,而大角度带宽意味着能够得到更大的 FOV 角度  $\theta_{\text{FOV}}$ 。因而,推荐选用反射式全息光栅作为全息波导显示系统的输入输出耦合光栅。

满足布拉格条件时的光栅模型如图 3 所示,其中,  $z$  轴垂直于介质表面,  $x$  轴在入射平面内并平行于介质边界,  $y$  轴垂直于纸面。光栅矢量  $\mathbf{K}$  垂直于光栅条纹平面与  $z$  轴的夹角为  $\varphi$ ,  $\mathbf{K} = 2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda$  为光栅周期。对于反射光栅,光波从波导板内进入光栅,经光栅衍射后反射回波导板,选择与光栅折射率一样的波导板,则光栅边界内外介电参数都一致。入射光波波矢  $\mathbf{k}_1$ 、衍射光波波矢  $\mathbf{k}_2$  和光栅矢量  $\mathbf{K}$  之间满足闭合的矢量三角形条件<sup>[8]</sup>。当  $\mathbf{k}_1$  对应波长为  $\lambda$ ,  $\mathbf{K}$  对应周期为  $\Lambda$ ,  $\mathbf{k}_1$ 、 $\mathbf{K}$  之间夹角  $\theta_d = \theta_s - \theta_r$ , 在满足布拉格条件  $\cos \theta_d = \lambda / (2\Lambda)$  时,光栅对入射光波的峰值衍射效率最高;对于不满足布拉格条件的入射光波,随着偏差增大,其衍射效率将迅速降低至零。

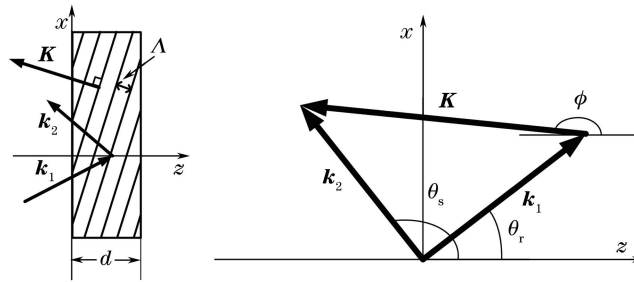


图 3 布拉格条件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of Bragg condition

根据 Kogelnik 耦合波理论<sup>[9]</sup>,当考虑无吸收反射体全息光栅时,介质电导率  $\sigma = 0$ ,平均折射率  $n_1 = \sqrt{\epsilon_1}$ ,折射率调制度  $\Delta n = \epsilon_1 / (2\sqrt{\epsilon_0})$ ,其中  $\epsilon_0$  为空气介电常数,  $\epsilon_1$  为光栅介质介电常数。

衍射效率为

$$\eta = \frac{\sinh^2 (\nu^2 - \xi^2)^{1/2}}{\sinh^2 (\nu^2 - \xi^2)^{1/2} + [1 - (\xi/\nu^2)]}, \quad (5)$$

式中  $\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos \theta_r \cos \theta_s)^{1/2}}$ ,  $\xi = \frac{\delta d}{2 \cos \theta_s}$ ,  $d$  为光栅介质厚度,  $\delta$  为描述入射光波偏离布拉格条件而定义的相位失配,其计算公式为

$$\delta = \Delta \theta \mathbf{K} \sin \theta_d - \Delta \lambda \mathbf{K}^2 / (4\pi n_1). \quad (6)$$

在满足布拉格条件时,  $\delta = 0$ ,  $\xi = 0$ , 此时衍射效率为

$$\eta = \tanh^2 \nu. \quad (7)$$

仅讨论角度失配的情况,令  $\Delta \lambda = 0$ ,  $\delta = \Delta \theta \mathbf{K} \sin \theta_d$ ,  $\xi = \frac{d \Delta \theta \mathbf{K} \sin \theta_d}{2 \cos \theta_s}$ 。

定义在近布拉格条件下,光栅衍射角度选择性曲线主瓣两侧第一过零点对应的角度差为选择角带宽:

$$\Delta\Psi = \frac{\lambda (\pi^2 + \nu^2)^{1/2}}{\pi n d |\sin \theta_s|} \quad (8)$$

#### 4 数值仿真与计算

以系统 FOV 设定为  $\pm\theta_{\text{FOV0}} = \pm 15^\circ$  为例,取常用的 K9 玻璃作为光波导,其与光栅介质折射率同为  $n_1 = 1.5$ ,由(2)式可计算得出  $\pm\theta_{\text{FOV1}} = \pm 10^\circ$ ,由(4)式得出波导中内全反射临界角  $\theta_{\text{CR1}} = 42^\circ$ 。为满足系统在空气中 FOV 为  $30^\circ$  的要求,在波导中光波的最小传播角应在  $42^\circ \sim 62^\circ$  之间。因而,对于输入全息光栅,在输入光波垂直入射时,满足布拉格条件的衍射角为  $52^\circ$ ,近布拉格条件的选择角大小为  $20^\circ$ 。选择波长  $\lambda$  为 532 nm 的绿色单波长像源,对(7)、(8)式进行建模和仿真,进一步关注光栅效率及选择角与光栅厚度、折射率调制度以及入射角之间的关系,优化光栅参数,以实现全息光栅对系统 FOV 设定条件的要求。

影响光栅效率和选择角带宽最大的 2 个因素是光栅介质厚度  $d$  和介质材料的折射率调制度  $\Delta n$ 。先讨论光栅厚度与选择角及一阶衍射效率的关系,选择一个较为合适的光栅厚度。在满足布拉格条件时,如图 4 所示,在介质折射率为 1.5,折射率调制度为 0.035,光波垂直于光栅界面入射时,随着光栅厚度的增加,光栅选择角带宽下降很快,而光栅一阶衍射效率增大至接近 1。因而,在应用于波导显示时,选择较小的光栅厚度,适当降低光栅峰值效率来换取较大视场也是非常值得的。图 5 为光栅选择角、效率与折射率调制度的关系。在光栅厚度为  $5 \mu\text{m}$ ,介质折射率为 1.5,光波垂直于光栅界面入射时,随着光栅介质折射率调制度的增加,光栅选择角增大,同时光栅一阶衍射效率也增大至接近 1。

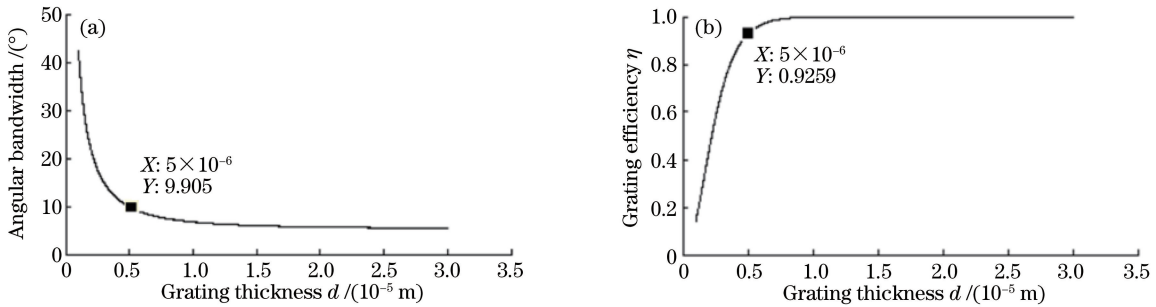


图 4 光栅厚度与(a)选择角带宽、(b)光栅效率之间的关系

Fig. 4 Relationship between thickness and (a) angular bandwidth, (b) grating efficiency of the grating

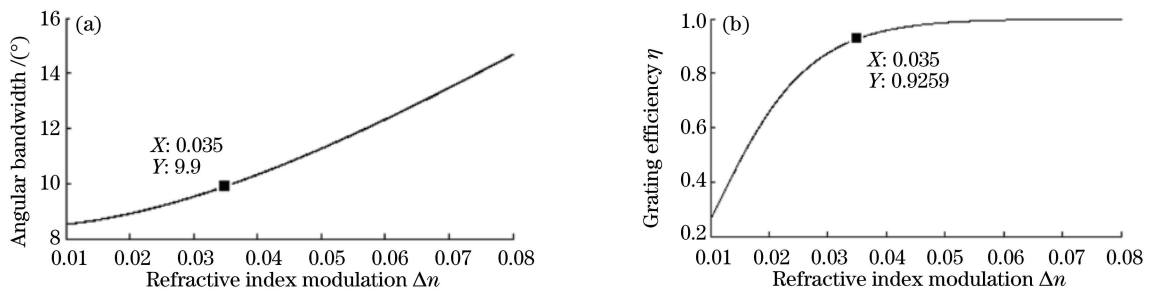


图 5 介质折射率调制度与(a)选择角带宽、(b)光栅效率之间的关系

Fig. 5 Relationship between medium refractive index modulation and (a) angular bandwidth, (b) grating efficiency

选择光栅厚度为  $5 \mu\text{m}$ ,折射率调制度为 0.035,根据布拉格条件,计算得出光栅周期为 194 nm,光栅矢量与  $z$  轴正方向夹角  $\varphi$  为  $154^\circ$ ,入射光  $\mathbf{k}_1$  垂直于光栅界面,与  $z$  轴正方向夹角  $\theta_r$  为  $0^\circ$ ,一阶反射光  $\mathbf{k}_2$  与  $z$  轴正方向夹角  $\theta_s$  为  $128^\circ$ ,则  $\mathbf{k}_2$  在波导内(图 2)的传播角  $\theta$  为  $52^\circ$ 。其光栅示意图与布拉格条件下  $\mathbf{K}$  矢量圆图如图 6 所示。

Kogelnik 耦合波理论对光栅厚度、布拉格条件等做了一定的理想化假设,并忽略了光栅的高阶衍射。在与光波长相比拟的光栅周期尺寸下,精确的全息光栅模拟与计算需要用到严格耦合波算法<sup>[10]</sup>,图 7 是对



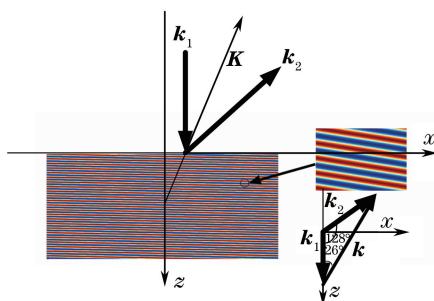


图 6 光栅厚度为  $5\ \mu\text{m}$ , 折射率调制度为 0.035 时布拉格光栅及矢量图

Fig. 6 Bragg grating and vector with the grating thickness of  $5\ \mu\text{m}$  and refractive index modulation 0.035

图 6 所示的光栅采用基于严格耦合波算法仿真得到的光栅带宽和光栅内电场强度。从图 7 中可以看出, 基于严格耦合波算法得到的一阶反射光栅峰值效率和入射角带宽, 由于考虑了高阶衍射的原因, 与前述基于 Kogelnik 耦合波理论计算得到的效率和角度带宽相比有一定的降低, 更接近实际情况。根据光栅内电场强度可以判断, 在满足布拉格条件时, 反射光的主要能量方向与之前计算的一致。

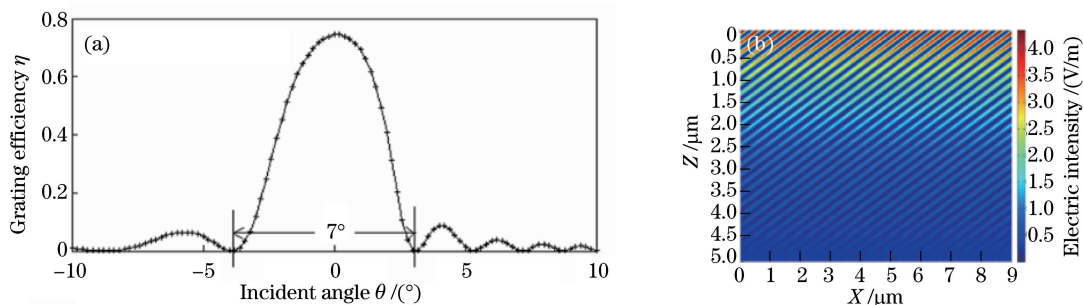


图 7 (a) 选择角带宽; (b) 光栅内电场强度

Fig. 7 (a) Angular bandwidth; (b) electric intensity in grating

在上述仿真中, 单个光栅选择角为  $7^\circ$ , 还不能达到设定 FOV 大小, 因此, 进一步利用复用技术<sup>[11]</sup>, 在记录光栅时, 通过使物光和参考光同步且对称地相对于记录材料的表面法线而变化, 同时记录数个互相平行但长度不同的光栅矢量, 最终使光栅选择角得到成倍的扩展。在设计每个光栅的衍射角带宽范围拼接处时, 需要精确计算和仔细处理, 光栅矢量间隔太大会使拼接处形成凹陷, 从而造成整个系统中部分视场的缺失, 如图 8(a) 所示; 合适的处理光栅矢量间隔可使光栅角度带宽顶部平坦, 从而使系统视场保持完整, 如图 8(b) 所示。

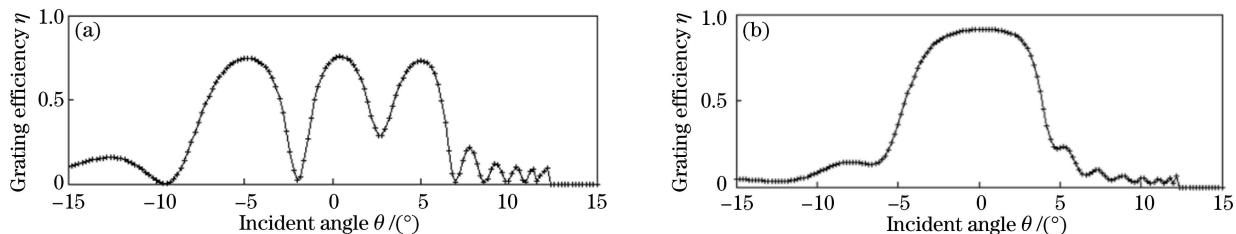


图 8 (a) 光栅矢量间隔过大, 复合光栅存在拼接缺陷; (b) 光栅矢量间隔选择合理, 复合光栅顶部平滑

Fig. 8 (a) Grating vectors' interval is too large and the composite grating has splicing defect;

(b) grating vector' interval is reasonable, the top of the composite grating is smooth

通过计算, 选择光栅周期分别为 192, 194, 197, 200, 202 nm 的 5 个平行光栅矢量, 该平行方向与光栅介质表面法向方向夹角同为  $26^\circ$ 。利用上述 5 个光栅矢量制备复合光栅, 以拓展光栅选择角带宽, 其仿真结果如图 9 所示, 拓展后的光栅选择角带宽接近  $20^\circ$ 。理论上进一步并行更多光栅可以拓展得到更大的选择角。然而, 由于记录材料的光敏感动态范围是有限的, 要得到较多的复用光栅数量, 需要较大折射率调制度的材料, 因此, 在同一层介质中不能通过这种方法无限制地增加角带宽。通过复用技术可获得的最大角带宽由记

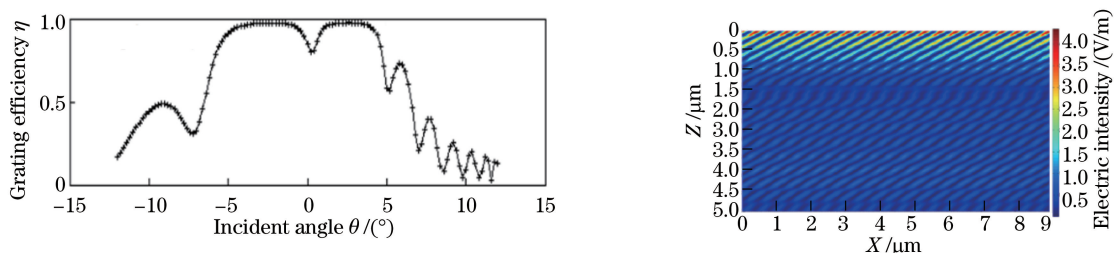


图 9 (a) 复合光栅拓展选择角带宽; (b) 6°入射时光栅内的电场强度

Fig. 9 (a) Composite grating extended angular bandwidth; (b) electric field intensity in grating with the incident angle of 6°  
录介质厚度、最大折射率调制度和光敏感响应特性共同决定。

### 5 系统实验与测试

利用图 10 所示过程<sup>[12]</sup>,制备了光栅周期为 197 nm、光栅矢量与介质表面法线方向夹角为 26°、介质厚度为 7.5 μm 的全息光栅,其光栅性能测试结果和仿真对比如图 11 所示。与仿真相比,实际制备的光栅峰值效率稍低,角度带宽稍小,这主要是由于制备过程中对主要参数的控制精度和非理想性造成的。图 9 所示复合光栅的曝光过程更为复杂,其在保证光栅向量平行的前提下,保证光栅周期在 10 nm 范围内精确控制是非常困难的工作。所制备的光栅性能测试结果和仿真对比如图 12 所示,可以看到角度带宽有一定扩展,但仍有很大的非理想性。

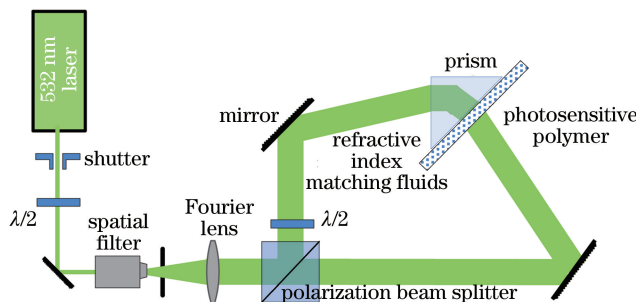


图 10 激光干涉制备全息光栅示意图

Fig. 10 Schematic diagram of the preparation of holographic gratings fabricated by laser interference

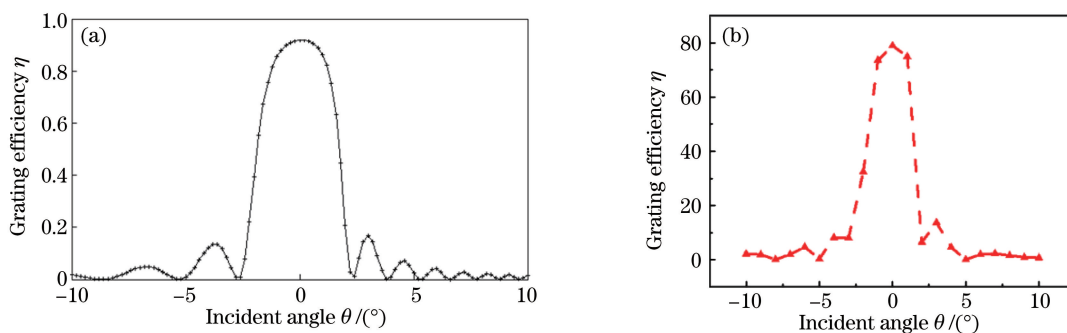


图 11 光栅选择角带宽的(a) 仿真结果与(b) 测试数据

Fig. 11 (a) Simulation result and (b) test data of the angular bandwidth of grating

利用所制备的光栅作为输入输出耦合光栅,进一步实现了全息光波导显示系统,其实验光路如图 13 所示,由微像源、准直透镜和波导光栅组成图 1 所示系统。其系统演示效果如图 14 所示,图 14(a)为像源输出图像,图 14 (b)为经过波导光栅后输出的图像在亮环境下的显示效果,图 14(c)为经波导光栅输出后暗环境下的显示效果。

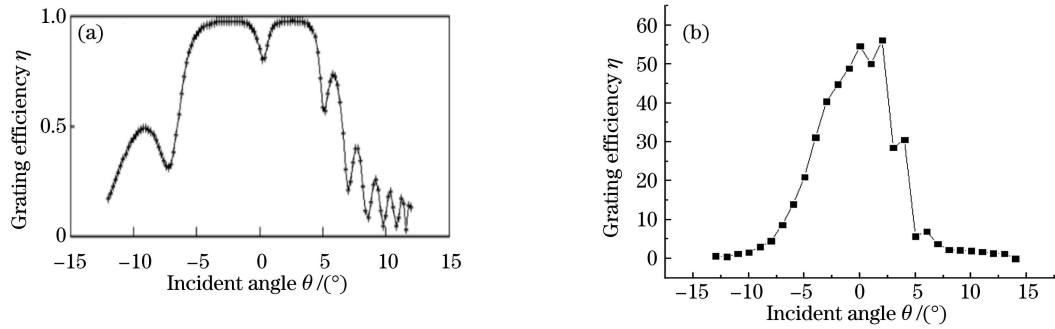


图 12 复合光栅选择角带宽的(a) 仿真结果与(b) 测试数据

Fig. 12 (a) Simulation result and (b) test data of the angular bandwidth of composite grating

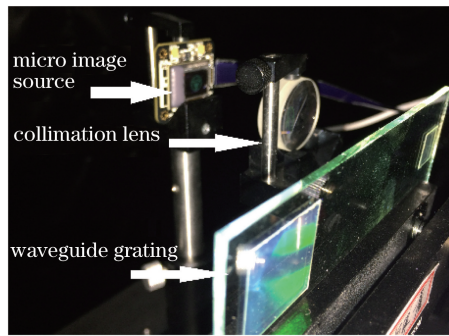


图 13 全息光波导成像实验光路

Fig. 13 Experimental optical path of holographic optical waveguide

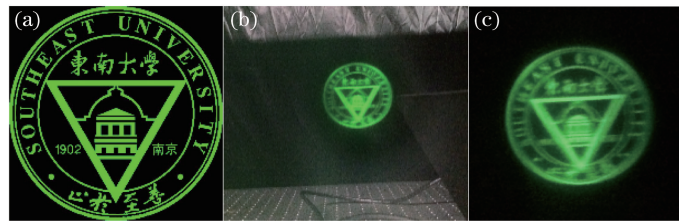


图 14 全息波导显示系统演示实测结果。(a) 原图；(b) 亮环境；(c) 暗环境

Fig. 14 Experimental results of holographic waveguide display system. (a) Original picture; (b) bright environment; (c) dark environment

## 6 结 论

围绕全息光波导显示系统的 FOV 参数,分析了全息光栅相关参数的设计和优化。考虑加工难度,制作了光栅周期为 197 nm、光栅矢量与介质表面法线方向夹角为  $26^\circ$ 、介质厚度为  $7.5 \mu\text{m}$  的全息光栅以及 FOV 拓展复合光栅。并利用单周期光栅作为输入输出耦合光栅制作全息光波导,对整个显示系统显示图像的功能做了测试。为进一步制备性能更优良的全息光波导显示系统提供了理论分析依据和现实指导。

## 参 考 文 献

- [1] Levola T. Diffractive optics for virtual reality displays[J]. Journal of Society for Information Display, 2006, 14(5): 467-475.
- [2] Maimone A S. Computational see-through near-eye displays[M]. Chapel Hill: University of North Carolina at Chapel Hill Graduate School, 2015.
- [3] Shechter R, Reinhorn S, Amitai Y, *et al.* Planar holographic elements with uniform diffraction efficiency[J]. Applied Surface Science, 1996, 106(1): 369-373.
- [4] Shechter R, Amitai Y, Friesem A A, *et al.* Planar holographic configuration for efficient imaging [J]. Optics

- Communications, 1996, 132(3): 221-226.
- [5] Amitai Y, Reinhorn S, Friesem A A. Visor-display design based on planar holographic optics [J]. Applied Optics, 1995, 34(8): 1352-1356.
- [6] Pan J W, Hung H C. Optical design of a compact see-through head-mounted display with light guide plate[J]. Journal of Display Technology, 2015, 11(3): 223-228.
- [7] Collinson R P G. Introduction to avionics systems[M]. New York: Springer, 2011.
- [8] Tao Shiquan, Jiang Zhuqing, Wan Yuhong, *et al.* Optical holography technology and its application [M]. Beijing: Science Press, 2013.  
陶世荃, 江竹青, 万玉红, 等. 光学体全息技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [9] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[J]. The Bell System Technical Journal, 1969, 48(9): 2909-2949.
- [10] Moharam M G, Gaylord T K. Rigorous coupled-wave analysis of planar-grating diffraction[J]. Journal of the Optical Society of America, 1981, 71(7): 811-818.
- [11] Han J, Liu J, Yao X C, *et al.* Portable waveguide display system with a large field of view by integrating freeform elements and volume holograms[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 3534-3539.
- [12] Xia L, Wang Y. A green-color portable waveguide eyewear display system[C]. SPIE, 2013, 8913: 89130W.