

研究与试制

DOI:10.19453/j.cnki.1005-488x.2020.04.009

## 用于全息波导的阶梯光栅设计\*

袁 焯<sup>1</sup>, 冯奇斌<sup>2</sup>, 吕国强<sup>3</sup>

(1. 中航华东光电有限公司, 安徽芜湖 241002; 2. 合肥工业大学 光电技术研究院, 合肥 230009; 3. 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

**摘 要:** 基于标量理论计算了三阶任意宽度的台阶光栅的衍射效率, 发现当台阶宽度相等时光栅的衍射效率最高。采用基于严格耦合波的仿真软件分析了不同折射率下阶梯光栅高度和衍射效率之间的关系。仿真结果表明: 光栅材料的折射率分别为 1.52 和 1.74 时, 达到最大衍射效率时光栅高度分别为 700 nm 和 470 nm, 当光栅高度偏离最佳高度 100 nm 时, 衍射效率分别从 60% 降低到 56% 和 59% 降低到 47%。采用无掩模直写光刻技术制备了设计的三阶光栅, 实际测试了各级衍射效率和在波导系统中的显示效果。测试结果表明: -1 级衍射效率达到 49.7%, 波导耦出端成像清晰。研究设计的阶梯光栅具有制备周期短、成本低、效率高的优点。

**关键词:** 全息波导; 光栅; 衍射效率; 无掩模光刻

**中图分类号:** TN26    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1005-488X(2020)04-0291-04

## Step Grating for Holographic Waveguide System

YUAN Ye<sup>1</sup>, FENG Qibin<sup>2</sup>, LYU Guoqiang<sup>3</sup>

(1. AVIC Hua Dong Photoelectric Co., Ltd., Wuhu Anhui, 241002, CHN; 2. Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, CHN; 3. School of Instrumentation and Opto-electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, CHN)

**Abstract:** Holographic waveguide could effectively decrease the weight and volume of a near-eye display system. As an important component, incouple/outcouple grating could heavily affect the final display brightness. The diffractive efficiency of a three-step grating with random duty cycle was firstly calculated and it was found that the grating with the same step width presented the highest diffractive efficiency. The simulations based on rigorous couple wave theory were exploited to analyze how grating height could affect diffractive efficiency in the case of different refractive indexes. The simulation results showed that when the refractive efficiency of the grating was 1.52 and 1.74, the grating height should be 700 nm and 470 nm to guarantee the highest diffractive efficiency. When the grating height was 100 nm less than the designed height, the diffractive efficiency decreased from 60% to 56% and from 59% to 47%, respectively. The designed grating was prepared by maskless direct-writing lithog-

收稿日期: 2020-06-28

\* 基金项目: 安徽省科技重大专项 (No.17030901053)

作者简介: 袁焯 (1977—), 女, 助理研究员, 主要从事特种显示设备总体设计及可靠性技术方面的研究; (E-mail: yuanye08211@sina.com)

冯奇斌 (1970—), 女, 副教授, 主要从事立体显示、LED 背光等方面的研究;

吕国强 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事立体显示、液晶显示等方面的研究。

raphy. The measured  $-1$  order diffractive efficiency could reach 49.7% and the output image could be clearly displayed at the end of the waveguide. The proposed three-step grating presents the merits of short preparation duty, low cost and high efficiency.

**Key words:** holographic waveguide; grating; diffraction efficiency; maskless lithography

## 引 言

近眼显示已经在军事、娱乐、医疗领域获得广泛关注<sup>[1-3]</sup>。全息波导能有效降低近眼显示的重量和体积。作为全息波导系统的主要组成部分,耦入/耦出光栅在很大程度上影响了最终显示亮度。目前的光栅主要分为浮雕光栅和体全息光栅<sup>[4]</sup>。

当体全息光栅满足布拉格条件时,具有非常高的衍射效率,但当入射角偏离布拉格角时,衍射效率会急剧下降<sup>[5-7]</sup>。浮雕光栅要达到高的衍射效率,其光栅周期都比较小,通常需要采用电子束的加工方式<sup>[8]</sup>。电子束加工存在工艺复杂、加工时间长、加工成本高的问题。研究尝试设计一种大周期的光栅,实现较高衍射效率的同时,能够利用无掩膜光刻直写方式进行制备,以减低开发成本,缩短开发周期。

## 1 阶梯光栅理论设计

考虑到实验室现有的无掩膜光刻机(德国海德堡公司生产的MLA100,分辨率为 $1\ \mu\text{m}$ )的加工能力,选用三阶台阶作为光栅的基础面型,如图1所示,光栅总高度为 $H$ ,周期为 $d$ ,每个台阶的宽度分别为 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ ,满足 $d_1+d_2+d_3=d$ ,每个台阶的高度为 $h$ , $h=H/2$ ,衍射角为 $\theta$ 。

位相影响因子 $\Phi(x)$ 可以表示为:

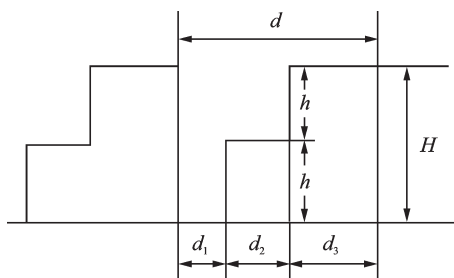


图1 三阶光栅示意图

Fig.1 Schematic of three-step grating

$$\Phi(x) = \begin{cases} \frac{2\pi}{\lambda} (n - \cos \theta) \cdot 0 & 0 < x < d_1 \\ \frac{2\pi}{\lambda} (n - \cos \theta) \cdot h & d_1 < x < d_1 + d_2 \\ \frac{2\pi}{\lambda} (n - \cos \theta) \cdot 2h & d_1 + d_2 < x < d_1 + d_2 + d_3 \end{cases} \quad (1)$$

其透射函数为:

$$T'(x) = \text{rect}\left(\frac{x}{d_1}\right) + \text{rect}\left(\frac{x - \left(\frac{d_1 + d_2}{2}\right)}{d_2}\right) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} (n - \cos \theta) \cdot h\right) + \text{rect}\left(\frac{x - \left(\frac{d_1 + d_2 + d_3}{2}\right)}{d_3}\right) \exp\left(i \frac{2\pi}{\lambda} (n - \cos \theta) \cdot 2h\right) \quad (2)$$

对公式(2)作傅里叶变换后可以得到任意台阶宽度的三阶光栅的衍射效率的复振幅函数,如公式(3)所示,进而可以得到该光栅的衍射效率,如公式(4)所示。

$$E = F(T'(x)) = \frac{d_1}{d} \text{sinc}\left(\frac{md_1}{d}\right) + \frac{d_2}{d} \text{sinc}\left(\frac{md_2}{d}\right) \exp(i(\phi - (d_1 + d_2)u)) + \frac{d_3}{d} \text{sinc}\left(\frac{md_3}{d}\right) \exp(i(2\phi - (d_1 + 2d_2 + d_3)u)) \quad (3)$$

$$\eta = EE^* \quad (4)$$

光栅周期 $d$ 设定为 $3\ \mu\text{m}$ ,入射光是波长为 $535\ \text{nm}$ 的绿光,折射率 $n$ 的变化范围为 $1.4\sim 1.8$ ,光栅高度 $H$ 的变化范围为 $300\ \text{nm}\sim 1000\ \text{nm}$ , $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 的变化范围为 $0\sim d$ ,但需要满足 $d_1+d_2+d_3=d$ 的约束条件。根据公式(3)和公式(4),可以求解得到任意 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 情况下的光栅衍射效率。计算结果表明:当 $d_1=d_2=d_3$ 时(三个台阶的宽度一样时),光栅的 $-1$ 级衍射效率最高。

## 2 阶梯光栅仿真分析

上述的设计是基于标量理论的。标量理论能

简化求解过程,但存在近似误差。故文中采用基于严格耦合波的仿真软件GSolver进行仿真分析。仿真模型如图2所示。

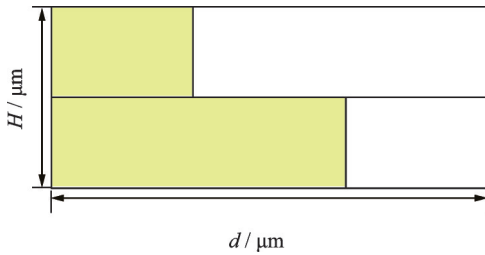


图2 三阶光栅仿真模型

Fig. 2 Simulation modeling of three-step grating

在模型中,  $d_1, d_2, d_3$  确定为  $1\ \mu\text{m}$ , 还需要确定的是光栅折射率  $n$  和光栅高度  $H$ 。取两种折射率进行分析, 分别设定为  $n_1=1.52$  和  $n_2=1.74$ 。图3是两种折射率下不同光栅高度时的衍射效率。

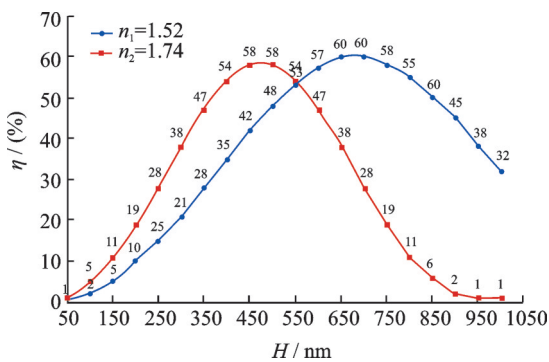


图3 不同折射率下的仿真结果

Fig. 3 Simulation results with different refractive indexes

由图3可以看出,当折射率为1.52时,光栅的衍射效率在光栅高度为700 nm左右时达到最大,随着折射率增加到1.74,最大衍射效率发生在光栅高度为470 nm左右。考虑实际制备的光栅高度和设计高度会存在一定的偏差,假设制备的光栅高度比设计高度小100 nm,当折射率为1.52时,光栅的衍射效率从60%降低为56%,而当折射率为1.74时,光栅的衍射效率则从59%降低为47%。当制备的光栅高度比设计高度小150 nm,折射率为1.52时,光栅的衍射效率从60%降低为52%,而当折射率为1.74时,光栅的衍射效率则从59%降低为42%。可以看出,采用折射率较小的材料制备光栅,其光栅的高度偏差对于衍射效率的影响相对较小。

### 3 实验与测试

德国海德堡公司的无掩膜光刻直写设备

(MLA100)是一台适用于实验室的台式光刻设备,具有制备3D形貌的加工能力。具体的制备流程如图4所示,包括清洗基底、旋涂光刻胶、前烘、曝光、显影。

研究选用正性光刻胶制备设计的三阶光栅。调研了EXP-1500和AZ4562两种正性光刻胶,选用折射率比较接近1.52的AZ4562。采用不同的曝光强度加工一批试样,并采用蔡司公司的激光共聚焦显微镜LSM700进行测试,其光栅高度和曝光强度之间的关系如表1所示。

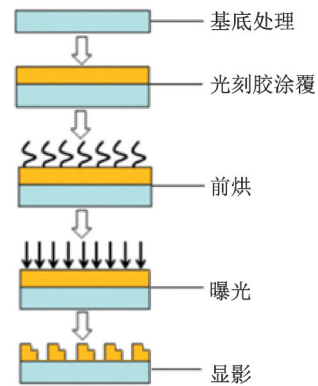


图4 无掩模光刻流程图

Fig. 4 Flow chart of maskless lithography

表1 AZ4562曝光强度和光栅高度的关系

Tab. 1 Relationship between exposure density and grating height when using AZ4562

曝光强度/( $\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	光栅高度/nm
40	/
60	540
80	890
100	1 190
120	1 650
140	2 670

根据上面的仿真,光栅高度为700 nm左右时,衍射效率达到最大。根据表1的结果,该光栅高度对应的曝光强度在  $60\ \text{mJ}/\text{cm}^2 \sim 80\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  范围内。对范围内的曝光强度进行细分,发现曝光强度为  $69\ \text{mJ}/\text{cm}^2$  时,制备的光栅高度为688 nm,如图5所示。

采用图6所示的测试系统测试制备光栅的衍射效率。系统包括发射波长为535 nm的激光器、准直透镜、制备的三阶光栅及光电探测器。激光进入三阶光栅后发生衍射,使用光电探测器测出不同衍射级别的电信号,该电信号的强度和入射光强度成正比。表2给出了设计的三阶光栅在0级和±1级的衍射效率。

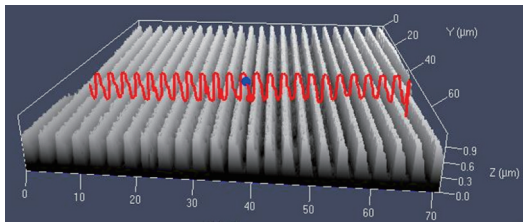


图 5 三阶光栅测试结果

Fig. 5 Test result of three-step grating

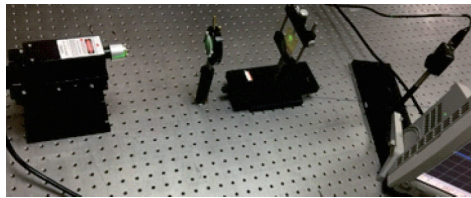


图 6 三阶光栅测试系统

Fig. 6 Test system of three-step grating

表 2 光栅衍射效率测试结果

Tab. 2 Practical measurement of diffraction efficiency

衍射级次	-1	0	1	所有级次
探测电压 / mV	53.8	7.8	22.1	108.2
衍射效率 $\eta$ / (%)	49.7	7.2	20.4	

从表 2 中可以看出,制备的三阶光栅的-1 级衍射效率为 49.7%,和仿真得到的 60% 的衍射效率相比,主要是因为实际制备的光栅高度没有达到设计值,而且由于光刻胶的坍塌特性,台阶侧面无法做到严格的 90°垂直面,也会造成衍射效率的下降。另外,光刻胶的折射率和设计的 1.52 也存在一定偏差,对衍射效率也会造成影响。

为了验证设计的光栅在波导系统中的实际效果,课题组首先采用使用光学胶将光栅绑定在波导上的方法,但由于是手工粘接,存在耦入/耦出光栅无法完全对称、光学胶厚度不均等问题,成像效果不理想。然后课题组采用直接在波导材料上光刻的方法,形成光栅和波导一体的结构(波导材料为 K9 玻璃,折射率为 1.516,厚度为 5 mm)。如图 7 所示,左侧耦入光栅中输入 H 字母,经过波导的传输,在右侧耦出端清晰显示 H 字母,而且耦出端的 H 字母亮度没有明显的降低,说明设计的三阶光栅具有较高的衍射效率。

## 4 结 论

为了缩短衍射光栅的制备周期,减少开发成

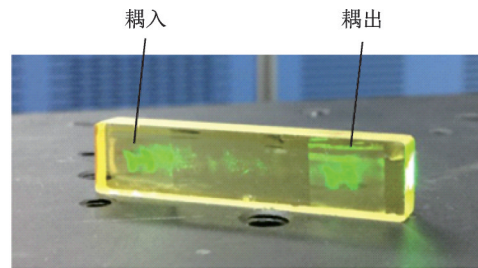


图 7 三阶光栅实际显示效果

Fig. 7 Practical holographic waveguide system with three-step gratings

本,降低开发风险,设计了一种大周期台阶结构的光栅。针对周期为 3  $\mu\text{m}$  的三阶光栅,经过分析,台阶高度和宽度等分时,衍射效率最高。研究分析了两种折射率下光栅高度和衍射效率的关系,发现和折射率较高的材料相比,采用折射率较低的材料制备的光栅对于高度的偏差比较不敏感。采用无掩膜直写光刻工艺制备了耦入/耦出光栅,测试了实际的衍射效率,并搭建了全息波导系统验证了图像传输效果。研究设计的三阶光栅具有制备周期短、成本低、衍射效率高的优点。

## 参 考 文 献

- [1] Gao Yuan, Liu Yue, Cheng Dewen, et al. A review on development of head mounted display[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(6): 897-904.
- [2] Shibata Takashi. Head mounted display[J]. Displays, 2002, 23(1-2): 57-64.
- [3] Cakmakci Ozan, Roll and Jannick. Head-worn displays[J]. Journal of Display Technology, 2006, 2(3): 199-21.
- [4] Zhang Yue, Fang Fengzhou. Development of planar diffractive waveguides in optical see-through head-mounted display [J]. Precision Engineering, 2019, 60: 482-496.
- [5] Xiao Jiashang, Liu Juan, Lv Zhenlv, et al. On-axis near-eye display system based on directional scattering holographic waveguide and curved goggle [J]. Optics Express, 2019, 27(2): 1683-1692.
- [6] Bianco G, Ferrara M A, Borbone F, et al. Volume holographic gratings: fabrication and characterization [P]. Proceedings of SPIE Optics and Optoelectronics, 2015: 950801-1-950801-6.
- [7] Piao JingAi, Gang Li, Piao Meilan, et al. Full color holographic optical element fabrication for waveguide-type head mounted display using photopolymer [J]. Journal of Optical Society of Korea, 2013, 17(3): 242-248.
- [8] Raphael Moulart, Rene Rotinat, Fabrice Pierron, et al. On the realization of microscopic grids for local strain measurement by direct interferometric photolithography [J]. Optics & Lasers in Engineering, 2007, 45(12): 1131-1147.