

# 光学学报

## 大角带宽高衍射效率体全息光栅的设计和制备

鲁婷婷<sup>1</sup>, 冯奇斌<sup>2</sup>, 王梓<sup>2</sup>, 吕国强<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>合肥工业大学电子科学与应用物理学院, 安徽 合肥 230009;

<sup>2</sup>合肥工业大学特种显示技术国家工程实验室, 现代显示技术省部共建国家重点实验室, 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009;

<sup>3</sup>合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

**摘要** 高性能体全息光栅是全息波导的重要耦合元件, 角带宽小、平均衍射效率不高是制约体全息光栅性能的重要因素。以不对称倾斜记录为出发点, 设计并制备了大角带宽高衍射效率的体全息光栅。首先讨论在横电模式光和横磁模式光下体全息光栅的记录参数与其衍射效率的关系, 找到平均衍射效率较高的记录参数范围, 随后进一步分析在此范围内的记录参数与体全息光栅的角带宽的关系, 从而确定获得大角带宽高衍射效率体全息光栅的最佳记录参数。实验结果表明: 在参考光入射角度为 25°、信号光入射角度为 30° 时, 制备的体全息光栅的角带宽达到 ±14°, 衍射效率为 82%。

**关键词** 衍射; 体全息光栅; 衍射效率; 角带宽; 记录角度

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.0205001

## Design and Fabrication of Volume Holographic Gratings with Large Angular Bandwidth and High Diffraction Efficiency

Lu Tingting<sup>1</sup>, Feng Qibin<sup>2</sup>, Wang Zi<sup>2</sup>, Lü Guoqiang<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Electronic Science & Applied Physics, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

<sup>2</sup>National Engineering Laboratory of Special Display Technology, National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of Photoelectric Technology, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China;

<sup>3</sup>School of Instrumentation and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

**Abstract** High-performance volume holographic gratings are important coupling elements for holographic waveguides, and small angular bandwidth and low average diffraction efficiency are major factors restricting the performance of volume holographic gratings. In this paper, a volume holographic grating with large angular bandwidth and high diffraction efficiency is designed and prepared based on asymmetrical tilt recording. First, we discuss the relationship between the recording parameters and the diffraction efficiency of the volume holographic grating under transverse electric mode light and transverse magnetic mode light to find the range of recording parameters at high average diffraction efficiency. Then, the relationship between the recording parameters in this range and the angular bandwidth of the volume holographic grating is further analyzed, thereby determining the best recording parameters to obtain a volume holographic grating with large angular bandwidth and high diffraction efficiency. The experimental results show that when the incident angle of the reference light is 25° and the incident angle of the signal light is 30°, the angular bandwidth of the prepared volume holographic grating reaches ±14° and the diffraction efficiency is 82%.

**Key words** diffraction; volume holographic grating; diffraction efficiency; angular bandwidth; recording angle

**OCIS codes** 050.7330; 090.2890; 220.4610

收稿日期: 2020-07-08; 修回日期: 2020-08-13; 录用日期: 2020-08-26

基金项目: 安徽省科技重大专项(18030901002)

\* E-mail: guoqianglv@hfut.edu.cn

## 1 引言

随着市场上移动视频的广泛使用以及对显示设备的小型化和微型化的要求逐渐提高,增强现实(AR)/虚拟现实(VR)逐渐进入大众视野<sup>[1]</sup>。近年来,人们对近眼显示系统的原理和应用进行了大量的分析和讨论。现今在近眼显示波导系统中,可供选择的耦合光学元件种类有很多,如棱镜<sup>[2]</sup>、自由曲面元件<sup>[3]</sup>、浮雕光栅<sup>[4-5]</sup>、全息光学元件<sup>[6]</sup>(HOE)等。其中全息光学元件由于体积小、重量轻、功能多,成为全息波导近眼显示系统中拥有巨大潜力的耦合光学元件。全息波导系统使用体全息光栅(VHG)作为出入耦合器,其特征尺寸可达纳米级别,可以实现小型化和微型化<sup>[7]</sup>,同时其高度的波长选择性使得现实世界大部分环境光都可以直接通过而不发生衍射,实现透明显示<sup>[8]</sup>。这样的优势使体全息光栅在近眼显示领域具有巨大的潜力。然而体全息光栅过度的角度依赖性限制了其角带宽,从而限制了体全息光栅的应用范围。2012年,Shi等<sup>[9]</sup>提出通过角度复用来扩大视场,但是复用就必然涉及多次曝光,使其制备工艺繁琐,不易实现,同时制备出的体全息光栅衍射效率也很低。Han等<sup>[10]</sup>提出将曲面光学元件与体全息光栅组合使用,以扩大视场,但曲面光学元件的使用会带来严重的杂散光,从而造成鬼影。Mukawa等<sup>[11]</sup>通过倾斜光学引擎来扩大视场,但视场的增益效果不明显。

目前文献中所分析的大多是两束光对称入射所形成的均匀体全息光栅<sup>[12]</sup>,也有少部分研究涉及不对称记录<sup>[13]</sup>,但这些研究中都是随意给出角度,并未进行具体分析。鉴于不对称倾斜记录形成的不均匀相位的体全息光栅往往拥有较大的角带宽,本文提出了一种设计思路,就是基于不对称的角度倾斜记录,通过公式推导和仿真确定了体全息光栅满足在两种偏振光下都有较高的衍射效率和较大的角带宽的要求时的记录角度和特征参数,从而设计出大角带宽、高衍射效率的体全息光栅,并在实验测量中得以验证。

## 2 理论设计

体全息光栅记录在厚干板内,利用两束光在全息材料内的干涉引发的一系列化学反应形成的体全息光栅拥有体效应。一般这种内部化学反应都会造成内部折射率的连续变化,从而实现光的调制。这种折射率变化型的体全息光栅的记录方式有两

种:透射型和反射型。反射型的体全息光栅的波长带宽相对较小,角带宽较大,色彩串扰少,应用于波导系统时更具潜力<sup>[14]</sup>。所以本文讨论了反射型的体全息光栅,如图1所示,它进行记录时信号光和参考光从干板的两侧入射,通常情况下,信号光和参考光的入射角度相同(对称记录),即 $\theta_1 = \theta_2$ (其中 $\theta_1$ 为参考光的入射角度, $\theta_2$ 为信号光的入射角度)。图1中光栅内箭头表示光栅矢量方向。对称记录获得的体全息光栅角带宽一般来说都是相对较小的,通常只有 $\pm 3^\circ$ 左右。因此本文从倾斜不对称记录角度出发,在保证有较高的衍射效率条件下,推导出最佳记录角度值以获得大的角带宽,从而得到高性能的体全息光栅。

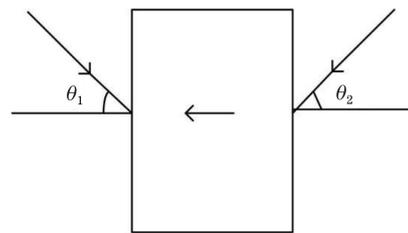


图1 反射型体全息光栅示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reflective volume holographic grating

由于本文只涉及体全息光栅的零级与一级衍射,所以为了简化计算过程,这里用Kogelnik理论<sup>[15]</sup>来对其进行理论分析。Kogelnik理论虽然是一种近似理论,但在忽略高级次衍射条件下,其对体全息光栅的一级衍射分析是准确的。

### 2.1 体全息光栅的偏振性

体全息光栅是有偏振性的,一般对于横电模(TE)光比较敏感,对横磁模(TM)光的敏感性相对较低,由于基于OLED的微显示器发射的光是非极化的,体全息光栅的衍射效率将近似等于TE光和TM光的衍射效率的平均值<sup>[16]</sup>。为了提高总体衍射效率,需要使体全息光栅对TE光和TM光都有较高的衍射效率。对于反射体全息光栅来说,其对TE光和TM光的衍射效率和总体衍射效率<sup>[17]</sup>分别为

$$\eta_{TE} = \tanh^2[\pi \Delta n d / (\lambda \sin \theta_b)], \quad (1)$$

$$\eta_{TM} = \tanh^2[\pi \Delta n d \cos(\theta_1 - \theta_2) / (\lambda \sin \theta_b)], \quad (2)$$

$$\eta = (\eta_{TE} + \eta_{TM}) / 2, \quad (3)$$

式中: $\theta_b$ 为布拉格条件下入射光与光栅条纹的夹角; $\Delta n$ 为折射率调制度; $d$ 为体全息光栅的厚度; $\lambda$ 为入射光的波长。

布拉格条件下各角度的几何关系如图2所示,

其中,  $\phi$  为光栅条纹的倾斜角,  $\theta_r$  为全反射角。为了使设计的体全息光栅能应用于全息波导, 需要再现光的衍射光传播时满足全反射定律, 即  $\theta_r = \theta_1 + \theta_2 > \arcsin(1/n_1) = 41^\circ$ , 其中  $n_1$  为波导基底折射率, 这里取 1.5。综合考虑波导体积、光程耗损等因素, 本文取  $\theta_r = 55^\circ$ , 即  $\theta_1 + \theta_2 = 55^\circ$ 。对于体全息光栅, 其内部的各个角度满足

$$\theta_1 + \theta_2 = 55^\circ, \quad (4)$$

$$\theta_b + \phi - \theta_1 = \pi/2, \quad (5)$$

$$\phi = (\theta_1 + \pi - \theta_2)/2. \quad (6)$$

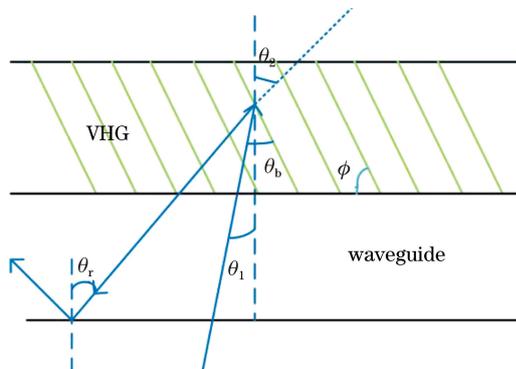


图 2 布拉格条件下各角度的几何关系

Fig. 2 Geometric relationship of angles under Bragg conditions

本文为了先确定记录角度对衍射效率的影响, 这里取体全息光栅的初始特征参数为:  $\Delta n = 0.02$ ,  $d = 15 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 532 \text{ nm}$ 。在此初始条件下, 利用仿真软件得到记录角度与衍射效率的关系图, 如图 3 和图 4 所示。

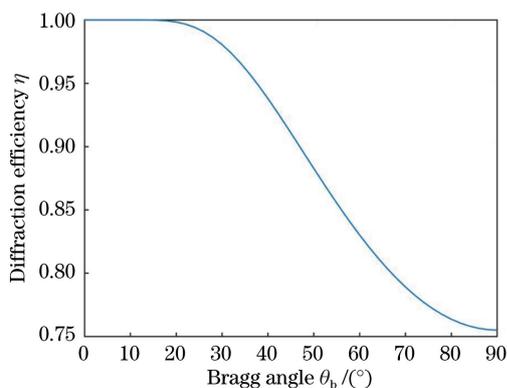


图 3 布拉格角度与衍射效率的关系

Fig. 3 Relationship between Bragg angle and diffraction efficiency

从图 3 中可以看出体全息光栅的衍射效率在一定范围内随着布拉格角度的增大而降低。之前的研究都是以衍射效率取最高值为标准, 本文为了平衡衍射效率和角带宽的关系, 这里保证衍射效率在 90% 以上即可, 根据图示关系,  $\theta_b$  应小于  $40^\circ$ 。从

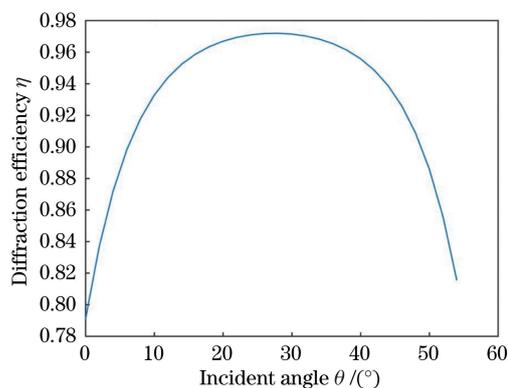


图 4 入射角度与衍射效率的关系

Fig. 4 Relationship between incident angle and diffraction efficiency

图 4 中可以看到: 随着入射角度的增大, TM 光的衍射效率先上升后下降; 当入射角为  $25^\circ \sim 30^\circ$ , 衍射效率都能达到 95% 以上。为了保证在 TE 光以及 TM 光下, 体全息光栅都可以取得较高的衍射效率, 布拉格角度范围应为  $20^\circ < \theta_b < 40^\circ$ , 此时  $25^\circ \leq \theta_1 < 30^\circ$ , 结合这两个式子, 再根据 (4)~(6) 式, 得到入射角  $\theta_1$  的范围应为  $25^\circ \leq \theta_1 \leq 27^\circ$ 。为了简化实验参数,  $\theta_1$  取整数。根据 (4) 式, 满足布拉格角度范围的  $(\theta_1, \theta_2)$  有三组, 分别为  $(25^\circ, 30^\circ)$ 、 $(26^\circ, 29^\circ)$  和  $(27^\circ, 28^\circ)$ 。本文在设定  $\theta_1 + \theta_2 = 55^\circ$  的基础上, 从各个角度之间的关系以及两种偏振光下记录角度与衍射效率的关系, 得到本文需要的三组不对称记录角度的数值。

## 2.2 体全息光栅的角带宽

对于体全息光栅的性能, 首要考虑衍射效率, 其次则为角带宽, 角带宽是指衍射效率下降一半时对应的角度范围。大的角带宽可以保证更大的视场, 具有大角带宽的体全息光栅应用于全息波导时更有前景。上面的仿真分析中已经得到拥有较高的衍射效率的三组不对称角度值, 接下来结合体全息光栅的角带宽公式<sup>[13]</sup>, 探讨高性能体全息光栅最佳的记录角度, 其中体全息光栅角度偏移公式如下:

$$\eta = 1/[1 + (1 - \xi^2/v^2)/\sinh^2(v^2 - \xi^2)^{1/2}], \quad (7)$$

$$v = \pi d \Delta n / [\lambda (\cos \theta_1 \cos \theta_2)^{1/2}], \quad (8)$$

$$\xi = \Delta \theta k d \sin \theta_1 / (2 \cos \theta_2), \quad (9)$$

式中:  $k$  为体全息光栅矢量大小;  $\Delta \theta$  为角度偏移量;  $v$  和  $\xi$  为实值参数, 分别表示角度灵敏度和波长灵敏度。将上面三组不对称角度值代入 (7)~(9) 式, 得到三组情况下的体全息光栅的角带宽情况。图 5 为入射角分别为  $25^\circ$ 、 $26^\circ$ 、 $27^\circ$  时衍射效率随角度偏移的变化曲线, 可以明显看出当入射角为  $25^\circ$  时, 角

带宽有最大值,接近±13°。

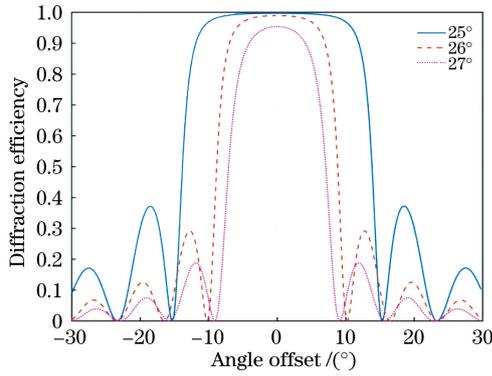


图 5 不同记录角度下衍射效率与角度偏移量的关系  
Fig. 5 Relationship between diffraction efficiency and angle offset at different recording angles

综上所述,本文确定了所要设计的高性能体全息光栅的最佳记录参数,即参考光的入射角为 25°,信号光的入射角为 30°。

### 2.3 体全息光栅的特征参数

图 6 为所设计的体全息光栅的记录图。图 7 为体全息光栅应用于楔形波导时的复现图。在上面的论述中,本文确定了两干涉光束的记录角度,即参考光入射角  $\theta_1$  为 25°,信号光入射角  $\theta_2$  为 30°。由于参考光入射角偏离光栅法线且与光栅法线成 25°,而在全息波导系统中光线是准直耦入耦出的,所以图 7 中波导两端的楔形角  $\theta_w$  应为 25°,这个楔形角与体全息光栅记录时的倾斜角互余,故可算出图 6 中体全息光栅记录的倾斜角  $\theta_m$  为 65°。本文已经得到所需要的最佳记录参数,据此去优化体全息光栅的特征参数。体全息光栅的特征参数主要是厚度与折射率调制度。如图 8 所示,厚度在一定程度上与衍射效率成正比,但实际上随着厚度的增加,光栅会产生很多杂散光,对光的吸收也在加强,所以在保证衍射效率在 90% 以上的情况下,本文仍取其厚度为 15  $\mu\text{m}$ 。下面讨论折射率调制度对衍射效率的影响。

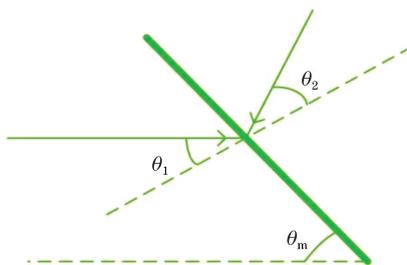


图 6 体全息光栅记录图

Fig. 6 Recording diagram of volume holographic grating

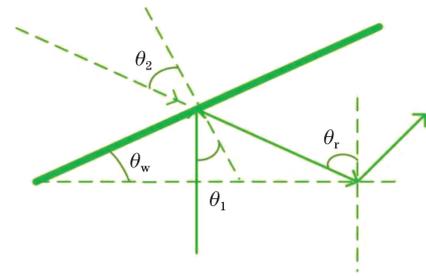


图 7 体全息光栅复现图

Fig. 7 Reproduction diagram of volume holographic grating

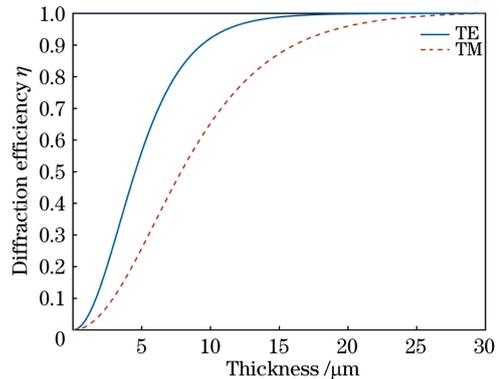


图 8 厚度与衍射效率的关系

Fig. 8 Relationship between thickness and diffraction efficiency

如上所述,  $\theta_1 = 25^\circ, \theta_2 = 30^\circ$ , 厚度  $d = 15 \mu\text{m}$ , 通过改变折射率调制度, 观察在 TE 光和 TM 光下体全息光栅的衍射效率的变化。根据(2)、(3)式, 可以得到折射率调制度与体全息光栅衍射效率的关系图, 如图 9 所示。从图 9 来看, 虽然折射率调制度越大越好, 但受实验制备条件与材料的制约,  $\Delta n$  无法达到很大的值。所以在确保 TE 光和 TM 光下衍射效率都可达 90%, 取  $\Delta n$  为 0.03, 从而降低制备难度。

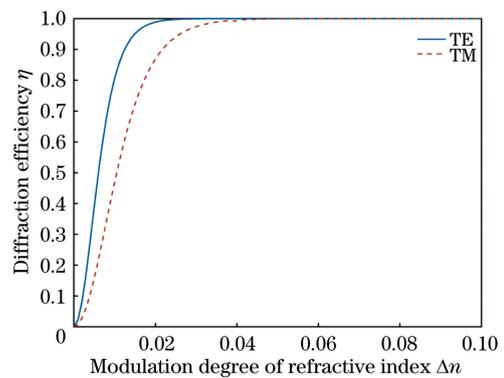


图 9 折射率调制度与衍射效率的关系

Fig. 9 Relationship between modulation degree of refractive index and diffraction efficiency

### 3 仿真分析

综上所述,本文所要制备的体全息光栅的记录角度和特征参数都已经确定,即参考光的入射角度为  $25^\circ$ ,信号光的入射角度为  $30^\circ$ ,并且厚度为  $15\ \mu\text{m}$ ,折射率调制度为 0.03。由于折射率调制度与本文一开始设定的初始值有偏差,同时也为了验证最终设计的光栅在 TE 和 TM 光下都有大的角带宽,并且其衍射效率也很高,进行以下的仿真分析。其中体全息光栅在 TE 光和 TM 光下的角度偏移公式<sup>[17]</sup>分别为

$$v_{\text{TE}} = \pi \Delta n d / (\lambda \sin \theta_b), \quad (10)$$

$$v_{\text{TM}} = \pi \Delta n d \cos(\theta_1 - \theta_2) / (\lambda \sin \theta_b), \quad (11)$$

从而可得

$$\xi = \Delta \theta k d \sin(\phi - \theta_1) / (2C_s), \quad (12)$$

$$\eta = 1 / \left\{ 1 + \frac{1 - \xi^2 / v^2}{\sinh^2(v^2 - \xi^2)^{1/2}} \right\}, \quad (13)$$

$$C_s = \cos(\theta_b - 2\phi). \quad (14)$$

根据(10)~(14)式,得到在 TE 和 TM 光下的角度偏移图,如图 10 所示。

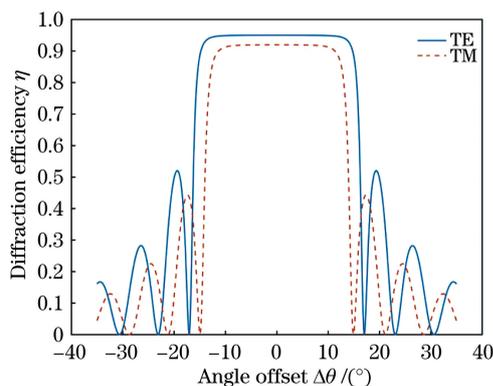


图 10 TE 和 TM 偏振光下的体全息光栅的角带宽  
Fig. 10 Angular bandwidth of volume holographic grating under TE and TM polarized light

图 10 是在设计的参数下,TE 光以及 TM 光的角偏移对衍射效率的影响,可以看出此时两种情况下的角带宽都接近  $\pm 15^\circ$ ,并且衍射效率达到 90%,满足本文的初始设计要求。

### 4 实验制备

本文所研究的体全息光栅为实验室制备得到。体全息光栅的制备分为 4 个步骤:清洗基底、旋涂材料、曝光、后处理。本文使用北京光谱印宝科技有限责任公司的 GJ-01 型绿敏干板,激光器为长春新产业光电技术有限公司的 MGL-FN-532 型绿光激光器。本文制备体全息光栅的主要工作集中在曝光以及后处理两部分。其中曝光尤为重要,体全息光栅基于全息原理,主要是由两束相干光在光致聚合物<sup>[18]</sup>里发生干涉,此时光致聚合物就会发生一系列化学反应,以折射率连续变化的形式记录光栅,这个过程对曝光参数的精度以及环境的要求极高,图 11 为设计的曝光设计图。

图 11 中 laser 为绿光激光器,用来产生相干光;S 为快门,用来控制曝光时间;BS 为分束镜,用于将光束分为信号光和参考光;SF 为空间滤波器,用于滤除高频噪声与干扰并进行扩束;CL 为傅里叶透镜,用于准直光斑;A 为光阑,用于控制光斑的大小;M 为反射镜,用于调控光线的方向;VPH 为体全息干板,用于记录体全息光栅。本文通过采用分振幅法获得两束能量一致的相干光以进行干涉,控制圆形光斑直径大小为  $15\ \text{mm}$  的两束光发生干涉。按照图 11 的设计在实验室搭建光路,为了满足全息实验对振动的要求,本文使用了气浮平台,且光致聚合物选用光敏材料,整个实验在暗室下进行,同时保持安静的环境。根据材料初始曝光量,本文在不同的曝光光强以及时间里制备所设计的体全息光栅。

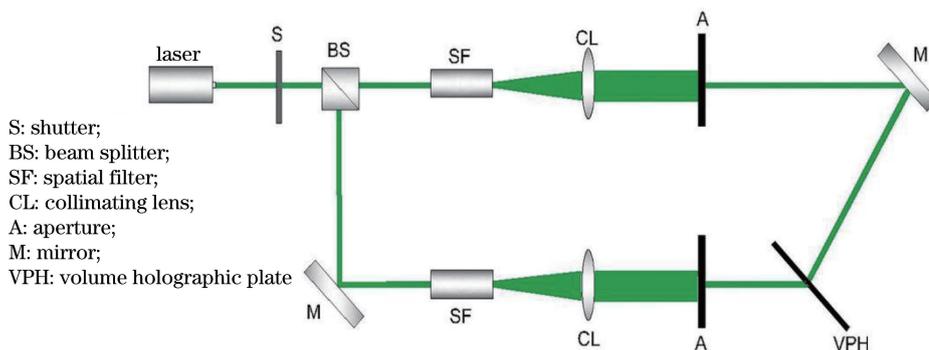


图 11 全息曝光原理图

Fig. 11 Schematic diagram of holographic exposure

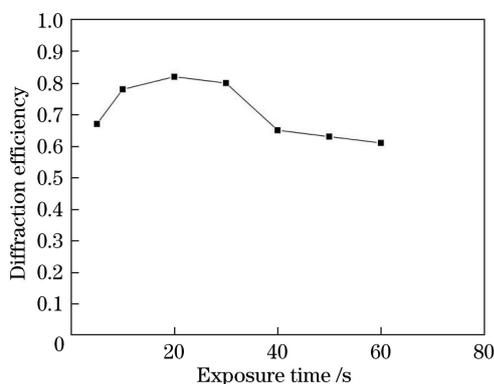


图 12 曝光时间与衍射效率的关系

Fig. 12 Relationship between exposure time and diffraction efficiency

如图 12 所示,在保持曝光光强为 5 mW 的情况下,改变曝光时间,测得所制备的体全息光栅的衍射效率。通过实验得出:当曝光光强为 5 mW、曝光时间为 20 s 时,即总曝光量为 100 mJ 的情况下,制备得到最高衍射效率为 82% 的光栅。此时,对这块光栅样品进行角度验证,这里主要通过手动转动样品来测量其角带宽,在衍射效率下降为最高衍射效率的一半时,角带宽为  $\pm 14^\circ$ ,衍射效率与角带宽虽然低于理论值,但误差在容许范围内。这种误差的出现可能是由于材料的性能衰退,也有可能是由于环境以及噪声的影响。材料的性能衰退主要体现在折射率调制度的降低,这个对体全息光栅的影响主要体现在衍射效率的下降方面,具体情况可以参考图 9 中折射率调制度与体全息光栅的衍射效率的关系。其中所用材料是厂家现做的,性能较为良好,所以曝光干涉时的环境和噪声是实验存在误差的主要因素。后期可以通过反复实验,尽量营造更为安静的黑暗环境,从而适当地提高体全息光栅的衍射效率。

## 5 结 论

提出了基于倾斜不对称的记录来设计大角带宽、高衍射效率体全息光栅的方法并成功制备出所设计的光栅。该方法通过预先设定记录角度总值,通过分析体全息光栅角度关系和其记录角度对两种偏振光的衍射效率和角带宽的影响,推导出最佳的不对称记录角度值,随后通过优化得到所需的特征参数,即得到参考光的入射角为  $25^\circ$ ,信号光的入射角为  $30^\circ$ ,体全息光栅厚度为  $15 \mu\text{m}$ ,折射率调制度为 0.03。最后利用简易的实验条件以及绿光光敏材料来制备样品,实验制备出的体全息光栅的角带宽达到  $\pm 14^\circ$ ,衍射效率为 82%。实验结果证明理

论设计是可行且可靠的。此方法为分析、制备不均匀相位的体全息光栅提供了理论依据,并且这种倾斜不对称角度记录下的体全息光栅可以用于楔形全息波导,从而提高了体全息光栅的实用性。

## 参 考 文 献

- [1] Maimone A, Georgiou A, Kollin J S. Holographic near-eye displays for virtual and augmented reality[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2017, 36(4): 1-16.
- [2] Wu Z M, Liu J, Wang Y T. A high-efficiency holographic waveguide display system with a prism in-coupler[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2013, 21(12): 524-528.
- [3] Cao C, Liao S, Liao Z Y, et al. Design of off-axis reflective optical system with large field-of-view based on freeform surfaces[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(8): 1122001.  
操超, 廖胜, 廖志远, 等. 基于自由曲面的大视场离轴反射光学系统设计[J]. *光学学报*, 2020, 40(8): 1122001.
- [4] Zheng Z Z, Yang Z, Xiu L C, et al. Development and application of high diffraction efficiency short-wave infrared convex shining grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(12): 1205002.  
郑志忠, 杨忠, 修连存, 等. 高衍射效率短波红外凸面闪耀光栅的研制与应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(12): 1205002.
- [5] Liu Q, Wu J H, Guo P L, et al. Fabrication of convex blazed grating with high diffraction efficiency[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0313001.  
刘全, 吴建宏, 郭培亮, 等. 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制[J]. *中国激光*, 2019, 46(3): 0313001.
- [6] Amitai Y, Friesem A A, Weiss V. Holographic elements with high efficiency and low aberrations for helmet displays[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(16): 3405-3416.
- [7] Murakami E, Oguro Y, Sakamoto Y. Study on compact head-mounted display system using electro-holography for augmented reality[J]. *IEICE Transactions on Electronics*, 2017, E100. C(11): 965-971.
- [8] Li G, Lee D, Jeong Y, et al. Holographic display for see-through augmented reality using mirror-lens holographic optical element[J]. *Optics Letters*, 2016, 41(11): 2486-2489.
- [9] Shi R, Liu J, Zhao H Z, et al. Chromatic dispersion correction in planar waveguide using one-layer volume holograms based on three-step exposure[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4703-4708.
- [10] Han J, Liu J, Yao X, 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): 3534-3549.
- [11] Mukawa H, Akutsu K, Matsumura I, et al. A full-color eyewear display using planar waveguides with reflection volume holograms[J]. *Journal of the Society for Information Display*, 2009, 17(3): 185-193.
- [12] Zhang D, Zhao C Q, Xu W D, et al. Locking of the fringe position and period in large-size holographic grating exposure[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(2): 0205001.  
张栋, 赵成强, 徐文东, 等. 大尺寸全息光栅曝光中条纹平移和周期的锁定[J]. *光子学报*, 2018, 47(2): 0205001.
- [13] Piao M L, Kim N. Achieving high levels of color uniformity and optical efficiency for a wedge-shaped waveguide head-mounted display using a photopolymer[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(10): 2180-2186.
- [14] Yu L L. The study on the preparation of reflective volume holographic grating[D]. Nanjing: Southeast University, 2017: 6-16.  
余琳琳. 反射型体全息光栅的制备研究[D]. 南京: 东南大学, 2017: 6-16.
- [15] Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings[M] // *Landmark Papers on Photorefractive Nonlinear Optics*. Singapore: World Scientific, 1995: 133-171.
- [16] Guo J J, Tu Y, Yang L L, et al. Holographic waveguide display with a combined-grating in-coupler[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(32): 9293-9298.
- [17] Liu H. Volume phase holographic grating used for beam combination of RGB primary colors[D]. Suzhou: Soochow University, 2014: 10-20.  
刘辉. 体位相全息光栅用于 RGB 三色光合束[D]. 苏州: 苏州大学, 2014: 10-20.
- [18] Yamagishi Y, Ishizuka T, Yagishita T, et al. Holographic recording material containing poly-N-vinylcarbazole[J]. *Proceedings of SPIE*, 1986, 0600: 14-19.