

激光与光电子学进展

用于平板波导显示的反射型体全息光栅制备

杨柳, 蒋世磊*, 季雪松, 张锦, 王玉瑾, 孙国斌

西安工业大学光电工程学院, 陕西 西安 710021

摘要 基于对全息平板波导显示系统中核心全息光学元件的研究, 采用双光束干涉法和相应的后处理工艺, 在石英玻璃为基底、重铬酸盐明胶为记录介质的全息干板上制备了具有折射率调制的反射型体全息光栅, 并研究了不同曝光强度、折射率调制度、水洗时间对光栅衍射效率的影响。实验结果表明, 经 441.6 nm 的 He-Cd 激光光源记录以及复杂的后处理工艺, 最终制备的反射型体全息光栅衍射效率最高可达到 61.8%, 在可见光入射条件下产生了明显的分光效果。制备的全息实验样片在满足全反射的前提下可进行波导传输, 为提高头戴式设备和增强现实等显示设备在传输过程中的衍射效率提供了一种新方法。

关键词 光栅; 微纳光学; 反射型体全息光栅; 平板波导; 衍射效率; 干涉

中图分类号 O436.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0305001

Preparation of Reflective Volume Holographic Grating for Plate Waveguide Display

Yang Liu, Jiang Shilei*, Ji Xuesong, Zhang Jin, Wang Yujin, Sun Guobin

School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, Shaanxi 710021, China

Abstract By studying the core holographic optical elements in the holographic plate waveguide display system, we prepare a reflective volume holographic grating with refractive index modulation on a holographic plate with quartz glass as substrate and dichromate gelatin as recording medium. The effects of different exposure intensity, refractive index modulation and water washing time on diffraction efficiency of grating are researched. Experimental results show that the diffraction efficiency of reflective volume holographic gratings can be improved by using 441.6 nm He-Cd laser light source and complex post-treatment process. The diffraction efficiency of reflective volume gratings can reach 61.8%. Under the condition of visible light incident, a remarkable light splitting effect is produced. The prepared holographic experimental sample can be transmitted by waveguide under the condition of total reflection, which provides a method to improve the diffraction efficiency of display devices such as head mounted display device and augmented reality during transmission.

Key words gratings; micro-nano optics; reflective volume holographic grating; plate waveguide; diffraction efficiency; interference

1 引言

近年来, 随着增强现实技术在军事行动、医疗

诊断和娱乐游戏等领域的广泛应用, 便携式显示系统成为新一代微型显示系统的主要发展方向。显示系统可分为折-衍混合式透镜组、棱镜组、投影系

收稿日期: 2021-04-10; 修回日期: 2021-05-11; 录用日期: 2021-05-13

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划(18JS053)、陕西省科技厅重点实验室项目(2013SZS14-P01)

通信作者: *jiangshilei8@163.com

统和平板波导等形式,其中,基于部分反射镜及自由曲面的几何型波导遇到了制造瓶颈,因此,人们逐渐将目光转向到平板光波导型显示的研究。平板波导可用于传输图像、实现光路折叠,使整个系统的体积更小、质量更轻、便携性更好,适合全天佩戴,是最具应用前景的方案之一^[1]。苹果公司研制的 Google Glass 眼镜、英国 BAE 公司研制的“Q-Sight”头盔显示系统、日本索尼公司研制的全息波导眼镜均是用全息技术制备的全息光学元件将图像信息耦合到平板波导中,提高了平板波导的状态感知能力,减小了显示系统的质量。

平板波导显示系统的应用范围很广,但全息波导显示技术也面临着各种难题,如高质量体全息光栅(VHG)的制备困难、高空间频率的全息光栅难以实现彩色显示、光源利用率低。国内外对全息波导显示系统中 VHG 的研究较多,也提出了许多相应的解决方法,如通过倾斜光轴减少衍射光谱的偏移^[2]、通过组合双层光栅提高耦合效率^[3]、通过交叠光波导扩展视场^[3]、使用变折射率 VHG 提高折射率调制度^[4],但设计的光学元件在制备方面进展缓慢,且对如何提高平板波导显示系统中全息光学元件衍射效率的研究较少。制作 VHG 的过程中,复杂的处理工艺使 VHG 出现条纹间距变化、调制分布不均等偏离理想状态的现象,导致 VHG 的技术指标与设计值不符,进而影响

其衍射效率。因此,本文对 VHG 的理论分析、工艺制备及衍射效率计算等方面进行了深入研究,并根据 VHG 的衍射特性结合实际工艺指导实验样片的制备,得到具有高衍射效率的反射型 VHG。

2 基本原理

2.1 平板波导传输原理

平板波导显示系统主要由微显示器、准直系统、VHG 和平板波导组成,传统反射型全息波导显示系统的传输过程结合了全息光学元件的记录与再现原理,如图 1 所示。其中,入耦合光栅和出耦合光栅为全息波导板两侧的工作平面,当光束由平面外侧垂直入射至平面波导板内并传播至入耦合光栅时,具有特定的衍射角,经 VHG 以角度 θ_1 衍射(反射)至波导内侧。平板波导显示系统在内侧反射时满足全息波导全反射条件,从而产生波导现象,以角度 θ_2 入射至出耦合光栅处,经衍射(反射)后垂直出射至人眼。为了消除色散现象,要求入耦合元件和出耦合元件的衍射(反射)角相等,即 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$,出入耦合光栅为光波导显示系统的核心组件,可以改变光线的传播途径,实现整个系统的小型化、轻便化。VHG 具有衍射效率高、衍射级次小、透射性强^[2]等特点,是一种理想的耦合光学元件,在新一代全息光波导显示系统的设计中得到了广泛应用。

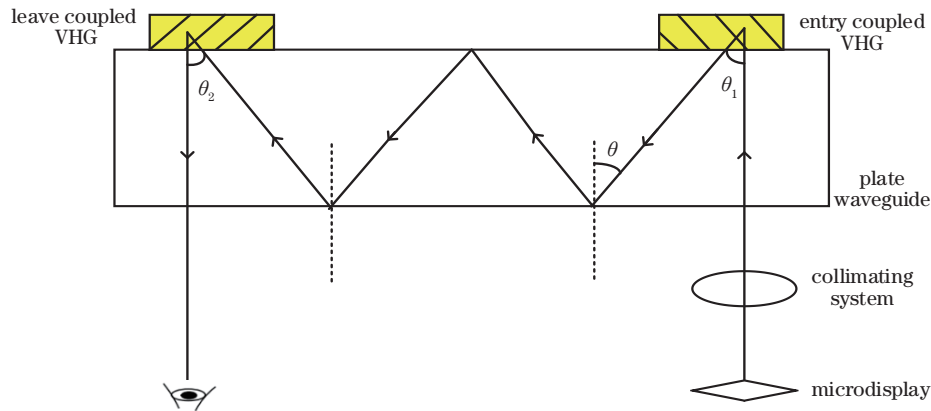


图 1 平板波导显示系统反射型波导传输的示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the reflective waveguide transmission of plate waveguide display system

图 2 为以布拉格角照射 VHG 时衍射光波的传输原理,可根据衍射原理及平板波导传输条件设计后续双光束干涉角度,从而得到满足波导传输且衍射效率较高的 VHG。其中, Λ 为光栅周期, θ_b 为布拉格角, n 为全息材料的折射率, n_0 为玻璃的折射率。

当光波照射在 VHG 上时,衍射光波服从布拉格定律^[5],可表示为

$$2n\Lambda \sin \theta_b = \lambda, \quad (1)$$

式中, λ 为空气中照明光的波长。设计制作 VHG 时,两束光波的夹角可表示为

$$2n\Lambda \sin \frac{\theta_{rec}}{2} = \lambda_{rec}, \quad (2)$$

式中, θ_{rec} 为两束记录光波的夹角, λ_{rec} 为记录光波的波长。由平板波导显示系统的原理可知,为了保证

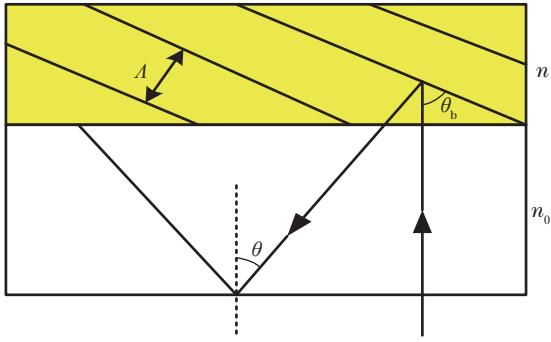


图 2 以布拉格角照射 VHG 的原理

Fig. 2 Principle of VHG irradiated with Bragg angle

光线在平板光波导内全反射传播,衍射角 θ 需满足全反射条件,即

$$\theta \geq \theta_c = \arcsin \frac{1}{n}, \quad (3)$$

式中, θ_c 为全内反射的临界角。基底采用石英玻璃 ($n=1.46, \theta \geq 43.2^\circ$), 根据三角关系可得到布拉格角 θ_b 。已知激光波长, 由布拉格条件可得到光栅周期以及两束记录平面波在介质内的夹角 θ_{rec} 。

2.2 Kogelnik 耦合波理论

由 Kogelnik 耦合波理论^[4]可知, 当光束以横电 (TE) 波入射且满足布拉格方程时, 反射型 VHG 的衍射效率可表示为

$$\eta = \tanh^2 \left(\frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta} \right), \quad (4)$$

$$\tanh(x) = \frac{\sinh(x)}{\cosh(x)} = \frac{\exp(x) - \exp(-x)}{\exp(x) + \exp(-x)}, \quad (5)$$

式中, d 为膜层厚度, $\Delta n = \Delta \epsilon / 2n$ 为介质的折射率调制度, $\Delta \epsilon$ 为振幅的变化量。

图 3 为折射率调制度 Δn 和膜层厚度对反射型 VHG 衍射效率的影响, 其中, 入射波长为 441.6 nm,

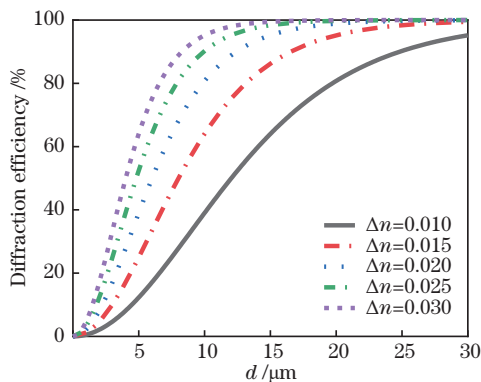


图 3 反射型 VHG 衍射效率随厚度的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of reflective VHG diffraction efficiency with thickness

入射角为 30° 。可以发现, 当折射率调制度 Δn 确定时, 反射型 VHG 的衍射效率呈类似对数函数的增加趋势, 当膜层厚度较小时, 衍射效率不断增加; 当膜层厚度增大到一定值时, 衍射效率呈缓慢增加, 直至达到 100%。原因是 Δn 较大时, 不需要太大的膜层厚度就能实现较高的衍射效率。对于反射型 VHG, 当膜层厚度 d 达到一定值时, 已经达到了最高衍射效率。因此, 只能通过提高折射率调制度 Δn , 才能得到高衍射效率、高质量的 VHG。

2.3 记录与再现原理

VHG 通过在厚介质中记录物体信息得到的三维干涉图样, 再现显示出体效应^[5]。图 4 为两束光分别从记录材料两侧入射时反射型 VHG 的记录与再现原理。用参考光 O 、物光 R 记录光栅时, 光束行进方向满足布拉格条件, 即两束光波在记录介质内部会发生耦合。此时, 若用参考光 O 照射光栅表面, 衍射光波的方向 R' 与物光 R 的方向相同; 同理, 若用物光 R 照射光栅表面, 衍射光波的方向与参考光 O 的方向相同。

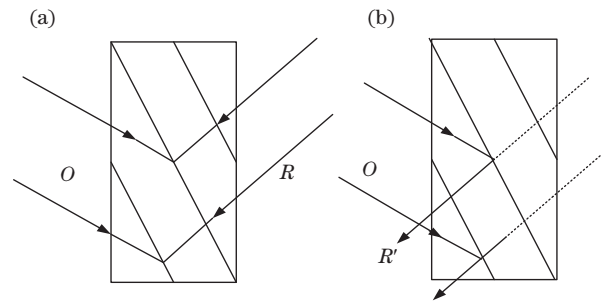


图 4 反射型 VHG 的记录与再现原理。(a) 记录过程; (b) 再现过程

Fig. 4 Recording and reproducing principle of the reflective VHG. (a) Recording process; (b) reproduction process

3 分析与讨论

对体光栅 Kogelnik 耦合波理论的研究发现, 折射率调制度和膜层厚度是决定光栅衍射效率的主要因素。其中, 折射率调制与记录介质相关且光栅写入过程基于全息曝光过程。记录介质应该是一种对光敏感的材料, 必须能转化成厚度可控的薄膜, 并提供折射率调制度; 且折射率调制度越大, 衍射效率越高。重铬酸盐明胶 (DCG) 可以实现高折射率调制度和厚度, 是厚光栅的良好记录材料^[6]。图 5 为利用 DCG 制备 VHG 的工艺流程图, 主要包括清洗干燥、胶液旋涂-匀胶制版、光栅记录、后处理-水洗和脱水、封装保存等过程。

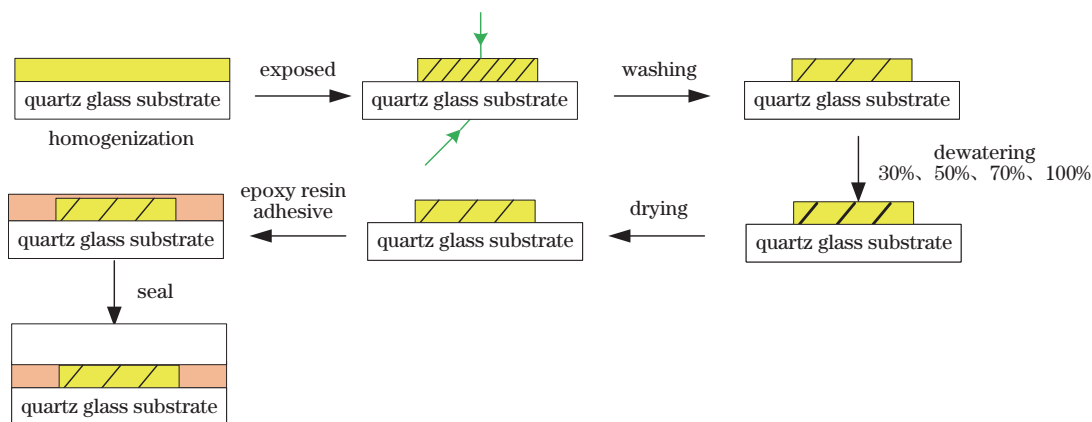


图 5 基于 DCG 制备 VHG 的流程图

Fig. 5 Flow chart of preparing VHG based on DCG

实验采用 DCG 感光胶液涂布法制备全息干版, 刮涂法就是在质量分数为 5.5% 的明胶溶液中按比例(水、敏化剂、坚膜剂的质量比为 40:6:1)加入质量分数为 5% 的敏化剂(重铬酸铵)和质量分数为 5% 的坚膜剂(硫酸铬钾)配置成感光液;用玻璃棒在水平放置的玻璃基片上均匀涂覆感光液,在暗黑环境中使其在光学平台上自然流平 24 h,使 DCG 膜变硬,增加干板的初始硬度,并进行曝光与后处理工艺。经曝光、后处理工艺得到的 VHG 具有折射率调制结构,DCG 内部的 Cr^{6+} 离子曝光后形成不溶于水的 Cr^{3+} 离子,从而在相邻的明胶分子之间形成一个交联键,在未曝光区域与曝光区域之间产生硬度差,进而通过水洗显影方法清除未发生反应的离子,使明胶吸水充分膨胀,然后经过异丙醇进行脱水收缩。全息干板内部硬度不同,造成的膨胀和收缩也不同,从而使明胶分子链沿着曝光条纹方向撕裂形成缝隙,进一步形成高衍射效率的 VHG。

基于双光束干涉法设计的反射型记录曝光系统如图 6 所示,其中, L 为中心波长为 441.6 nm 的 He-Cd 激光器, M_1 、 M_2 为反射镜, S 为控制曝光时间的快门。经 L_1 、 L_2 扩束准直系统发射出一束光斑直径为 10 mm 的准直平行光, BS 为分光比为 1:1 的分光镜,可将入射光波分为一束物光和一束参考光,参考光和物光之间的夹角为 120° ,即 $\theta_1 = 30^\circ$ (制备的实验样片需满足全反射条件,设计的衍射角度即再现角度为 50° ,根据布拉格条件计算的记录角 θ'_{DCG} 为 120°)。全息记录曝光片由 DCG 和厚度为 1 mm 的石英玻璃基片组成。由于 DCG 介质的感光波段为 350~540 nm,因此选择激光波长为 441.6 nm 的 He-Cd 激光器,该激光器的相干长度可达 30 cm,具有能量高、单色性好的优点。基于干涉记录、衍射再现的原理,将具有振幅和相位信息的物光波与参考光波干涉产生的干涉条纹以强度分布形式记录成 1 张全息图^[7]。

实验设计的再现光波长为 632.8 nm,将记录元

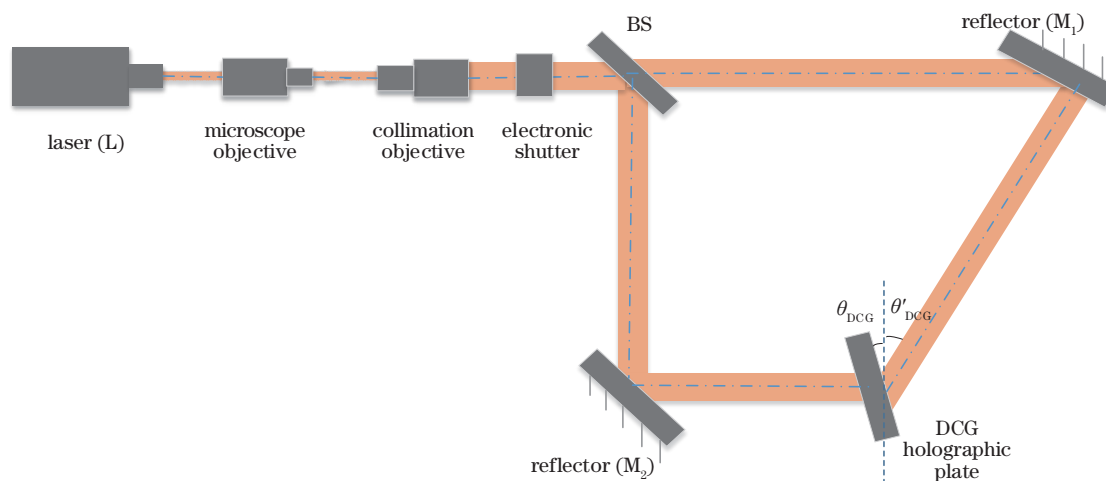


图 6 双光束非对称反射型干涉的记录光路

Fig. 6 Recording optical path of double-beam asymmetric reflective interference

件按一定角度倾斜,由 Kogelnik 耦合波理论^[5]可知,当记录光波长与再现光波长不同时,其再现时的光束角度也会发生变化。计算结果表明,将光学元件的角度转动 $\theta_{DCG} = 13^\circ$,就能实现变波长条件下的平行光入射,从而满足显示系统的传输要求。实验样片衍射效率的测试方法可表示为负一级光强 I_{-1} 与入射光强 I_0 之比,即 $\eta = I_{-1}/I_0$ 。分别从涂胶厚度与曝光时间、折射率调制度、后处理工艺三个方面分析影响衍射效率的因素,从而为平板波导显示系统中核心光学元件的制备提供一种新工艺。

3.1 涂胶厚度与曝光时间对衍射效率的影响

为了寻求最佳衍射效率,研究了不同曝光量与光栅衍射效率的关系。一般情况下,曝光量与曝光时间有关,对于 He-Cd 激光器,通过可调节曝光时间的电子快门控制曝光量,将曝光时间从 10 s 逐渐

增加到 60 s,通过不断测试得到合适的曝光时间,并根据实验现象实时调整实验条件,从而得到符合传输要求的实验样片。

表 1 为不同曝光时间全息干板介质的厚度,主要通过刮涂法(将基底放在水平光学实验平台上,用针管分别取不同体积的明胶胶液,并快速准确地均匀涂附在基底上,制作简便且能根据使用需求制作任意厚度的厚膜干板)控制全息干板的膜层厚度,并采用轮廓仪测量。其中,滴涂量为 0.1 mL 的样片编号为 1~6,膜层厚度约为 $9.5 \mu\text{m}$;滴涂量为 0.2 mL 的样片编号为 7~12,膜层厚度约为 $20 \mu\text{m}$;滴涂量为 0.3 mL 的样片编号为 13~18,膜层厚度约为 $31 \mu\text{m}$ 。环境温度为 20°C 、湿度为 36%,用功率计测得物光光强 $k_{\text{object}} = 0.505 \text{ mW}$,参考光光强 $k_{\text{reference}} = 0.541 \text{ mW}$ 。

表 1 不同曝光时间下全息干板介质的厚度

Table 1 Thickness of the holographic plate medium under different exposure time

unit: μm

Dripping volume / mL	Exposure time / s					
	10	20	30	40	50	60
0.1	9.3017	9.4946	8.8836	9.7699	9.5491	9.9585
0.2	20.4098	21.9038	22.0770	19.2999	20.5048	20.8477
0.3	30.8932	30.7802	31.5166	33.8034	30.0831	32.2907

不同涂胶厚度、不同曝光时间光学家片的衍射效率如图 7 所示,其中,数据上方的数值为对应样片的编号。可以发现,在相同膜厚下,光学家片的衍射效率随曝光时间的增加逐渐增加;当曝光时间过量时,开始缓慢降低;当曝光时间为 50 s 时,衍射效率最大,此时继续增加曝光时间不会提升光栅的衍射效率,表明此时曝光过度。在相同曝光时间和实验条件下,不同膜厚产生的衍射效率不同,当曝光时间为 10 s 时,滴涂量为 0.3 mL、膜层厚度为 $31.9 \mu\text{m}$ 的元件 13 衍射效率明显优于元件 1、7,原因是折射率调制度一定时,厚度与衍射效率成正比例关系。总体来看,元件 11 的衍射效率最高,即曝光时间为 50 s、滴涂量为 0.2 mL、膜层厚度 $20.5 \mu\text{m}$ 、水洗时间为 6 min、4 次脱水时间分别为 40 s、40 s、50 s、60 s 时的衍射效率为 61.8%,此时实验样片的分光效果最明显。全息干板本身对记录光存在一定的吸收作用^[8],当曝光时间较短(曝光能量较少)时,全息干板内部未被完全光致还原,导致 VHG 的膜层厚度和折射率调制度较低,产生的衍射效率也较低,如图 7 中的样片 1 和样片 7;当曝光能量较大时,参考光与物光之间的光强比较

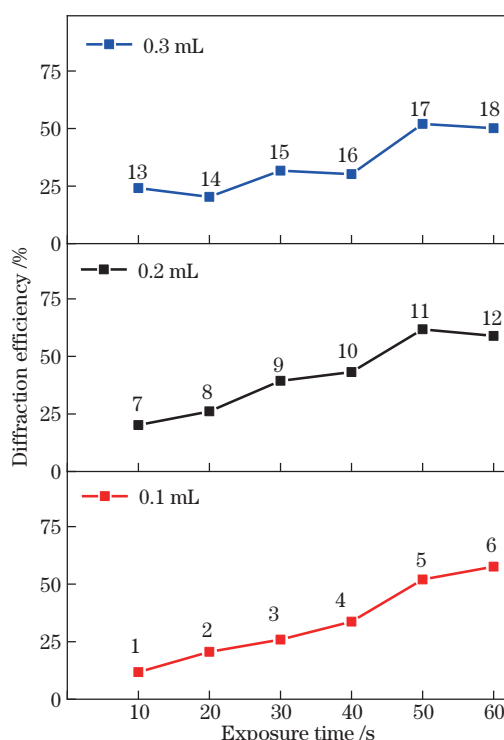


图 7 不同滴涂量下元件的衍射效率

Fig. 7 Diffraction efficiency of the element under different dispensing volume

大,导致明胶硬度和全息干板内部条纹折射率调制不均匀,进一步降低了衍射效率。由耦合波理论可知,对于反射型 VHG,膜层厚度与折射率调制共同影响衍射效率,当折射率调制较低、膜层厚度较高时,产生的衍射效率也较低,因此,提高衍射效率最好的办法是同时增加膜厚与折射率调制。

$$n = n_0 + \Delta n' + \Delta n' \cos(K \cdot r) = n_0 + C_f \exp\left(-\frac{a_g T}{2}\right) \cosh\left[a_g \left(\frac{T}{2} - z\right)\right] + C_x \exp\left(-\frac{a_g T}{2}\right) \cos(K \cdot r), \quad (6)$$

式中, $\Delta n'$ 为光栅间的折射率变化, K 为入射波矢量的模, $\cos(K \cdot r)$ 为电场波函数, T 为介质感光膜的厚度, a_g 为感光膜的吸收系数, C_f 和 C_x 为常数, 其值与制备过程及介质本身的特性有关。一般情况下, 对于 DCG 介质, C_f 取负值, 从而推断出曝光处理后介质的折射率小于曝光前介质的折射率。以 (6) 式为依据, 根据制备的实验样片衍射效率分析实验误差, 结果表明, 折射率调制度的变化是实验结果与理论存在差异的主要原因。因此, 需要对折射率调制度进行测量。测量得到涂胶后未经曝光的全息干板折射率为 n_1 、涂胶后经过激光曝光的全息干板折射率为 n_2 , 其中, 两个光学样片的涂胶量、DCG 溶液的质量分数、老化时间等均相同, n_1 与 n_2 的差值即为折射率调制度 Δn 。

用椭偏仪分别测量波长在 600~650 nm 曝光前后介质的折射率, 结果如图 8 所示。可以发现, DCG 全息干板的折射率在波长增加时呈减小趋势。此外, 当波长为 632.8 nm 时, 曝光前全息干板的折射率 n_1 为 1.525, 曝光后光学样片的折射率 n_2 为 1.489, 折射率差值为 0.036, 即以 DCG 作为介质曝光形成的反射型 VHG 折射率调制度为 0.036。

上述方法虽然能测量曝光前后介质折射率差

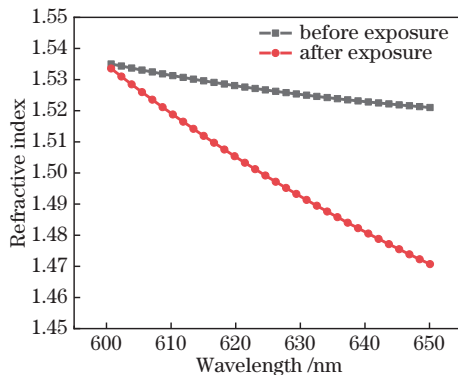


图 8 全息干板的折射率

Fig. 8 Refractive index of the holographic plate

3.2 折射率调制度对光栅衍射效率的影响

在石英玻璃基底上方制备材料为 DCG 的全息干板, 激光曝光后该区域干板内部的折射率会发生变化, 与未曝光区域存在折射率差 Δn , 从而得到具备折射率调制度的光栅结构。一般情况下, 全息记录介质在完成曝光后, 介质感光膜的折射率^[9]可表示为

的变化量, 但不能直接表示介质内部折射率变化的分布情况。实际制备工艺中, 水洗时间、脱水时间、吹风温度、干燥时间均会不同程度导致实验样片内部折射率调制度下降, 最终影响衍射效率。因此, 根据全息干涉曝光实验过程中的膜层厚度、曝光能量、后处理工艺等条件, 在波长为 632.8 nm 时仿真计算了反射型 VHG 折射率调制度分别为 0.01、0.02、0.03、0.036 时的衍射效率, 结果如图 9 所示。

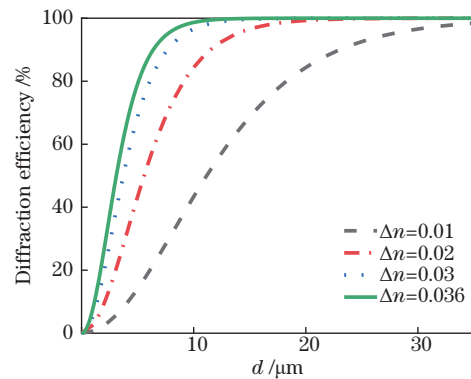


图 9 衍射效率随折射率调制度的变化曲线

Fig. 9 Variation curve of diffraction efficiency with refractive index modulation

折射率调制度的大小主要与记录介质的性质有关, 如 DCG 的质量分数、温度、硬度, 而制备合适初始硬度的 DCG 是得到高效率全息光学元件的关键。如果初始硬度太小, 最终会得到完全不透明的浮雕全息图; 相反, 若初始硬度太大, 会影响全息光学元件的衍射效率。因此, 分别制备了质量分数为 5%、5.5%、6% 的明胶溶液进行曝光及后处理, 测试结果表明, 质量分数为 5.5% 的溶液硬度更适合在本实验中使用。

3.3 后处理工艺对光栅衍射效率的影响

曝光完成后, 通常用温度为 25 °C 左右的流水对实验样片进行冲洗。实验中用流动的去离子水冲洗, 以冲洗掉未参与光化学反应的 Cr^{6+} 离子, 同时使

明胶充分膨胀,促进 DCG 胶膜内部 Cr^{3+} 离子与明胶大分子的充分结合,进一步增大折射率差。最后,在不同质量分数的异丙醇中进行脱水处理。大量实验测量结果表明,通过调整和控制 DCG 干板的记录条件、曝光量以及后处理工艺条件可以得到性能接近理论预计结果的 VHG。用质量分数为 30%、50%、70%、100% 的异丙醇进行脱水处理,如果脱水过程中浓度梯度较大,胶膜沿厚度方向的脱水速率不同,表面脱水较快而内部脱水较慢,导致胶膜沿着厚度方向有不同程度的膨胀,形成光栅常数和折射率调制都不一样的光栅结构。在脱水 100% 的过程中,折射率调制度随着厚度方向会逐渐凸显,最终完全显示,出现了明显的分光效果。

实验过程中可以发现,曝光量直接影响显影后

VHG 折射率调制度的大小,进而影响衍射效率。若曝光不足,未被光致还原的重铬酸盐干燥后出现结晶,进而形成散粒噪声,如图 10(a) 所示。此外,折射率调制度大小还与环境的温度、湿度密切相关。当实验后处理不当,如水洗、脱水时间不充分(水洗时间为 3 min,4 次脱水时间分别为 20 s、20 s、20 s、50 s),会导致光学表面未曝光区域产生乳白色的噪声,影响光栅表面质量,如图 10(b) 所示。若整个工艺流程有差异(曝光时间较短且水洗脱水时间不充分),还会导致衍射效率低,分光效果不明显,如图 10(c) 所示。图 10(d) 表现出了明显的分光效果,表明此时的衍射效率较高。因此,综合考虑各方面的因素,合理选择实验环境,制备的 VHG 才能满足实际应用的需求。

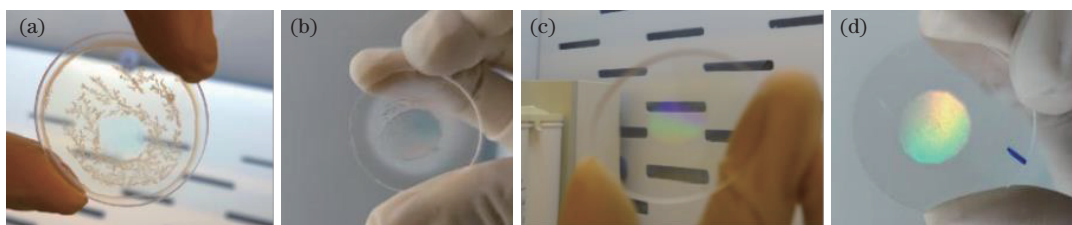


图 10 处理工艺对衍射效率的影响。(a)曝光不足;(b)水洗处理不当;(c)处理流程不当;(d)具有分光效果的光栅元件
Fig. 10 Effect of processing technology on diffraction efficiency. (a) Underexposure; (b) improper water washing treatment; (c) improper processing flow; (d) grating element with light splitting effect

3.4 平板波导验证

图 11(a) 为 He-Ne 激光器(波长为 632 nm)的再现过程,计算得到 VHG 的负一级衍射角度为 51° ,大于介质的全反射角 43° ,从而产生波导现象。图 11(b) 为反射型 VHG 在玻璃基底上形成的波导现象,经 He-Ne 激光器发出的入射光垂直入射至石英玻璃基底时,VHG 的负一级光使衍射后的光线方向发生偏转,在基底满足全反射条件时进行反射。

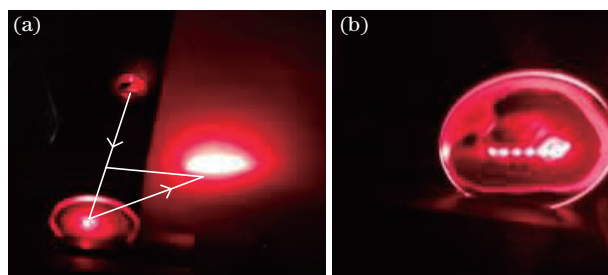


图 11 反射型 VHG 的平板波导显示现象。(a)衍射角度;(b)波导现象

Fig. 11 Display phenomenon of the reflective VHG plate waveguide. (a) Diffraction angle; (b) waveguide phenomenon

此时,玻璃表面仍是反射型 VHG,可认为光线以 $\theta = 51^\circ$ 入射再现,光线会垂直出射,经基底表面反射后又垂直入射至反射型 VHG 中。此时,玻璃基底表面会形成波导现象。重复该过程,直到玻璃上方不存在 VHG 结构时,会以全反射方式进行光线传输,直至从玻璃基底出射,从而形成波导现象。可以发现,波导的光强较强,只有很少一部分光被垂直出射出去,大部分光都可以继续向前传输。

为了分析图 11 中的波导现象,仿真分析了波导现象的产生原理,结果如图 12 所示。采用的玻璃基底结构参数:直径 φ 为 30 mm、厚度为 1 mm,基底表面产生的反射型 VHG 尺寸 $x_1 = 12.5$ mm, x_2 为玻璃直径, h 为基底厚度。计算结果表明,在一个周期的传输过程中,光线的传输距离 $T = 2d \tan \theta$,每 2.5 mm 会产生一个波导现象,在整个 VHG 尺寸范围内,会产生 5 个波导现象。光线垂直入射至体光栅最终形成的波导现象与图 11(b) 相同,这表明此时的衍射效率、入射角度、衍射角度等参数均符合设计要求。

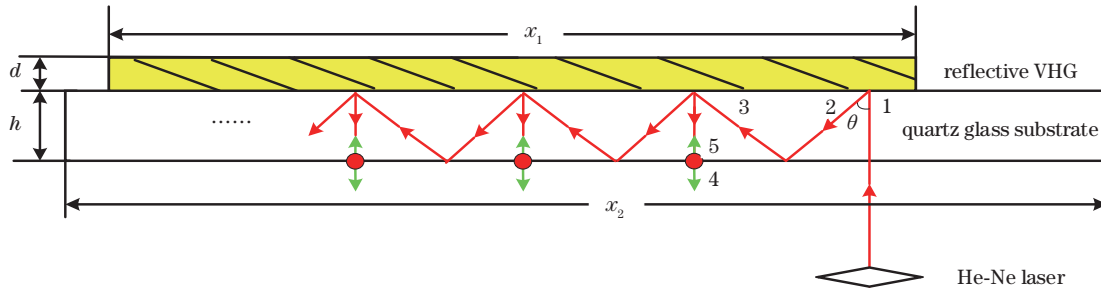


图 12 波导现象的原理

Fig. 12 Principle of the waveguide phenomenon

4 结 论

基于 Kogelnik 耦合波理论、平板波导的传输过程、干涉记录衍射再现的原理,利用双光束非对称干涉曝光方法制备了反射型 VHGs。用 DCG 为记录介质,通过对曝光时间和后处理工艺条件的探索,得到了衍射效率较高的全息光学实验样片,最佳工艺参数:曝光时间为 50 s、水洗时间为 5 min、4 次脱水时间分别为 50 s、50 s、60 s、90 s,衍射效率最高可达到 61.8%。实验制备的 VHGs 能产生明显的波导现象,满足实际应用需求,在辅助医疗领域、游戏娱乐领域、移动导航领域等领域具有广阔的应用前景。

参 考 文 献

[1] Wang L H, Wang G, Huang L Q, et al. Study on monochromatic holographic planar waveguide display system[J]. Journal of Applied Optics, 2019, 40(2): 241-245.
王龙辉,汪岗,黄丽琼,等.一种单色全息平板波导显示系统的研究[J].应用光学,2019,40(2):241-245.

[2] Shi Z Y. Study on the diffraction characteristics of novel coupled grating applied on holographic waveguides[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
石在耀.应用于全息波导的新型耦合光栅衍射特性研究[D].南京:东南大学,2018.

[3] Weng Y S. Research on optical coupling technologies applied for full-color waveguide displays[D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
翁一士.彩色波导显示光学耦合技术研究[D].南京:东南大学,2019.

[4] He T B. Research on analysis for diffraction characteristics of varied-refractive-index volume holographic gratings and fabricating technologies[D].

Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2014.

何天博.变折射率体全息光栅衍射特性分析与制作工艺研究[D].长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2014.

[5] Tao S Q, Jiang Z Q, Wan Y H. Optical volume holography technology and application[M]. Beijing: Science Press, 2013.

陶世荃,江竹青,万玉红.光学体全息技术及应用[M].北京:科学出版社,2013.

[6] Yu C. Research on diffractive optical elements applied in novel display technologies[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.

于超.应用于新型显示技术的衍射光学器件研究[D].杭州:浙江大学,2018.

[7] 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.

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.

[8] Wang J C, Liu P, Guo H Q. Methods for controlling reconstruction wavelength and bandwidth of DCG narrow bandwidth reflection filter[J]. Laser Journal, 2000, 21(4): 18-20.

王金城,刘鹏,郭欢庆.DCG窄带反射滤光片再现波长和带宽的控制方法[J].激光杂志,2000,21(4):18-20.

[9] Ren Y F. Diffraction mechanism of dichromate gelatin and silver halide holographic recording materials[D]. Changsha: Central South University, 2005.

任宇芬.重铬酸盐明胶和卤化银全息记录材料衍射率机理研究[D].长沙:中南大学,2005.