

文章编号:1007-2780(2020)10-1012-08

一种应用在增强现实领域的倾斜液晶/ 聚物体光栅的制备

刘明欢^{1,2,3*}, 付秀华¹, 王 菲¹, 唐 健², 宣 丽³, 冯东洋², 刘风雷²

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 浙江水晶光电科技股份有限公司 中央研究院, 浙江 台州 318015;

3. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:体光栅波导作为实现增强现实显示的一种方案,其核心是体光栅的制备。本工作提出了一种简单,易于搭建的非对称曝光的光路,制备的倾斜体光栅衍射效率高达 80%。使用 632.8 nm He-Ne 激光监测光栅的演化过程,结果表明光栅在 25 s 内反应结束,形成光栅。SEM 图像证明了光栅的倾斜特性,并与理论计算结果一致。制备的倾斜体光栅的衍射效率失谐曲线与耦合波理论取得了良好的一致性,其半高宽为 3.22°。倾斜体光栅可以被外界电场调谐,90% 以及 10% 调谐场强分别为 5.1 V/μm 以及 11.25 V/μm。本工作对倾斜/液晶聚物体光栅的制备提供了积极的指导和借鉴。
关键词:液晶/聚合物光栅;倾斜体光栅;衍射效率失谐;电场调谐

中图分类号:O753+.2; TP 217 文献标识码:A doi:10.37188/YJYXS20203510.1012

Fabrication of slanted liquid crystal/ polymer volume grating applied to augmented reality

LIU Ming-huan^{1,2,3*}, FU Xiu-hua¹, WANG Fei¹, TANG Jian², XUAN Li³,
FENG Dong-yang², LIU Feng-lei²

(1. Faculty of Optoelectronic Engineering,

Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Academia Sinica, Zhejiang Crystal-Optech Co., Ltd., Taizhou 318015, China;

3. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics,
Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Volume grating waveguide as a solution to realize augmented reality display, its core is the fabrication of volume grating. This work proposes a simple, easy-to-build asymmetric exposure optical path with a diffraction efficiency of up to 80% for the fabricated slanted volume grating. A 632.8 nm

收稿日期:2020-04-08;修订日期:2020-05-06.

基金项目:军委科技委基础加强重点项目(No.2019-JCJQ-ZD-320-00);国家自然科学基金重点项目(No.U1937201)
Supported by Key Project of Basic Strengthening of the Science and Technology Commission of the Military Commission (No.2019-JCJQ-ZD-320-00); Key Project of National Natural Science Foundation of China (No.U1937201).

*通信联系人, E-mail: liuminghuan13@mails.ucas.edu.cn

He-Ne laser was used to monitor the evolution of the grating. The results showed that the grating reaction was completed within 25 s, forming the resulting grating. The SEM image proves the tilt characteristics of the grating and is consistent with the theoretical calculation results. The diffraction efficiency detuning curve of the fabricated slanted volume grating shows a good agreement with the coupled wave theory, and its FWHM is 3.22° . The slanted volume grating can be switched by an external electric field. The 90% and 10% switching field strengths are $5.1 \text{ V}/\mu\text{m}$ and $11.25 \text{ V}/\mu\text{m}$, respectively. This work provides positive guidance and reference for the fabrication of slanted liquid crystal/polymer volume gratings.

Key words: liquid crystal/polymer grating; slanted volume grating; diffraction efficiency mismatch; electrical switching

1 引言

近些年来,基于增强现实(Augmented Reality, AR)的新型显示概念在国际消费类电子领域广受青睐^[1]。增强现实是将虚拟数字信息叠加在真实人类感知信息的智能显示方式,其代表性的沉浸感以及交互性会给消费者带来前所未有的体验。目前主流方案有基于传统光学的 Birdbath 折反方案、几何阵列波导方案、基于衍射光学的表面浮雕(Surface Relief Grating, SRG)以及体光栅波导方案(Volume Bragg Grating, VBG)^[2]。波导形式的 AR 显示,尤其是光栅波导,由于其轻薄的眼镜形态备受推崇。

液晶/聚合物光栅作为体光栅的一种典型代表,通过全息曝光光敏混合物制备而成,在相长干涉区光敏单体形成聚合物层,与此同时在相消干涉区由于光聚合诱导相分离形成液晶层,其衍射效率理论上可以达到 100%,可以有效提升系统的光效^[3-6]。光栅层的厚度通常只有几个微米并且制备成本低廉,非常利于 AR 眼镜的轻薄化以及降低成本。并且,由于液晶层的存在,光栅可以随外界施加电场开关^[7]。

在之前的工作中,利用非倾斜液晶/聚合物光栅作为布拉格分布反馈谐振器,使用外界激光器激励有机发光薄膜,形成定向激光出射,并未对倾斜体光栅的特性做探讨^[8]。在本工作中,搭建了制备倾斜体光栅的非对称形式的曝光光路,使用 632.8 nm He-Ne 激光器以 Bragg 角度入射对光栅的演化机制进行了实时监测,并对光栅形貌进行了扫描电子显微形貌表征(Scanning Electron Microscope, SEM)。推导了光栅周期随入射角

度的变化关系,指出了表面光栅周期、体光栅周期与光栅倾角的对应关系,并将衍射效率的实验失谐曲线与理论耦合波模型做比较,探讨了倾斜体光栅的电场调谐特性。

2 实验

2.1 材料准备

制备光栅的材料是一种光敏混合液体,包含单体 Dipentaerythritol hydroxyl pentaacrylate (DHPA, 58.8%, Sigma-Aldrich), 正性向列液晶 TEB-30A($n_o=1.522@589.0 \text{ nm}$, $\Delta n=0.17$, 29.4%, 石家庄永生华清液晶有限公司), 交联剂 N-vinylpyrrolidone (NVP, 9.8%, Sigma-Aldrich), 引发剂 Rose Bengal (RB, 0.5%, Sigma-Aldrich) 以及共引发剂 N-phenylglycine (NPG, 1.5% Sigma-Aldrich)。为确保混合均匀,上述混合物中加入搅拌子并在磁力搅拌器上以 3000 r/min (Revolutions Per Minute) 搅拌 24 h。由于材料对日光非常敏感,需对盛装材料的容器使用铝箔进行严格的密闭处理。

材料盒由两块厚度为 1.1 mm 、尺寸为 $2 \text{ cm} \times 2.5 \text{ cm}$ 的洁净玻璃基板制备而成,材料盒的边缘用胶水封装处理。材料盒的厚度为 $9 \mu\text{m}$,由低压缩特性的隔叠物控制。

在暗室环境下,使用注射器蘸取少量混合均匀的材料,并滴在材料盒的边缘,静止 6 h,在毛细扩散的作用下,材料最终将均匀填充整个材料盒。

2.2 倾斜光栅制备

经由连续运转 s 偏振的 532 nm 激光器(长春

新产业, 100 mW, 单纵模基横模 TEM_{00}) 出射的光束经过扩束、空间滤波后变为光强均匀的平面波。对入射光偏振态不敏感的分束器将光束分为强度比为 1:1 的物光波与参考光波, 参考光波经过反射镜转折后与物光波在样品处以夹角 θ 汇合, 两束光相干叠加在样品中形成液晶/聚合物光栅, 如图 1 所示。

波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器以布拉格角入射至样品表面(样品对 632.8 nm 光源不敏感), 出射光经偏振分束器后分别进入探测器 1、2 中, 以实时监测 p 光、s 光的衍射强度变化。

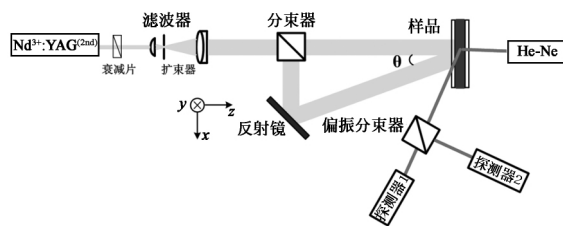


图 1 倾斜光栅制备光路示意图

Fig.1 Schematic illustration of a slanted grating fabrication optical path

光栅周期 Λ_s 由式(1)确定^[9]:

$$\Lambda_s = \frac{\lambda_r}{2n_{ave} \sin(\arcsin(\sin\theta/n_{ave})/2)}, \quad (1)$$

其中: λ_r 为激光波长, n_{ave} 为光栅的平均折射率, θ 为双光束的夹角。根据公式(1), 理论上连续改变双光束夹角 θ , 就可以连续改变倾斜光栅的周期 Λ_s 。光栅的倾角 α 由式(2)确定:

$$\alpha = \arcsin(\sin(\frac{\theta}{2})/n_{ave}), \quad (2)$$

光栅衍射效率 $\eta_{(p,s)}$ 随时间的演化定义为:

$$\eta_{(p,s)} = \frac{I_{diff-(p,s)}}{I_{inc-(p,s)}}, \quad (3)$$

其中: $I_{diff-(p,s)}$ 为 p, s 偏振光的衍射光强, $I_{inc-(p,s)}$ 为 p, s 偏振光的入射光强。

2.3 衍射效率失谐以及电场调谐特性

使用出射波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光器作为探测光源, 将样品放在带有高精度旋转台的夹具中, 使用探测器 1、2 记录透射光以及衍射光的强度检测样品衍射效率随旋转角度的变化关系, 光路中添加偏振片以控制入射光的偏振态, 如图 2 所示。

由于玻璃基板表面镀有氧化铟锡导电层 (Indium Tin Oxide, ITO), 因此可以对样品施加电场。旋转样品使衍射光强达到最大, 对样品施加

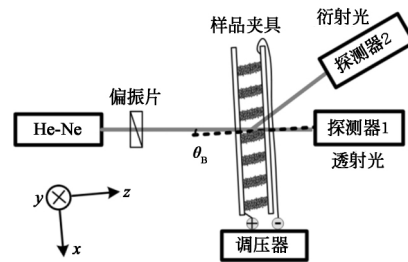


图 2 衍射效率失谐以及电场调谐测试示意图

Fig.2 Schematic illustration of diffraction efficiency mismatch and electrical switching measurement

电场, 记录样品衍射强度随施加电压的变化关系。

2.4 SEM 形貌表征

将样品上下基板拆解, 用液氮处理光栅表面, 用锐利的刀片切割光栅表面, 并将光栅浸泡在酒精中 24 h 以去除液晶, 将光栅薄膜粘在导电胶带并对表面进行喷金处理, 利用扫描电子显微镜 (Hitachi, S-4800) 检测光栅形貌。

3 结果与讨论

3.1 倾斜光栅演化特性

两束激光在样品表面汇合时, 会形成定域相干干涉条纹, 干涉场的强度分布 I_{total} 由式(4)给出:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\delta, \quad (4)$$

其中: I_1 、 I_2 分别为相干光束的强度, δ 为两相干光束的位相差。在本工作中, I_1 及 I_2 的强度大致相等。当 δ 为 2π 的整数倍时, 为相长干涉区, 此区域的光强极大。光敏单体在光引发剂的作用下反应生成单体自由基, 发生链式聚合形成聚合物层。相长干涉区的光敏单体不断被消耗, 与此同时, 为保持体系自由能极小, 在化学势的作用下, 相消干涉区的光敏单体也向相长干涉区扩散反应生成聚合物层; 当 δ 为 π 的奇数倍时, 为相消干涉区, 此区域的光强极小。相消干涉区域内不参加化学反应的液晶形成液晶层, 与此同时, 相长干涉区的液晶分子也向相消干涉区扩散, 最终形成液晶层与聚合物层交替排列的周期性结构^[3]。

图 3 为倾斜液晶/聚合物光栅衍射效率随时间演化特性。在最初发生化学反应的 10 s 时间内, p 光与 s 光的衍射效率均随时间推移缓慢增

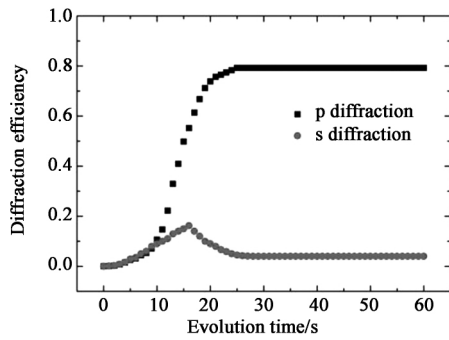


图 3 倾斜液晶/聚合物光栅衍射效率随时间演化特性
Fig.3 Time evolution characteristics of an slant liquid crystal/polymer grating

长并且保持良好的 consistency,此阶段为氧气等可以参与化学反应的反应物质的消耗阶段。从第 10 s 开始,光栅形成随时间的推移开始呈现相分离特性,液晶分子开始发生取向,p 光与 s 光的衍射效率随时间变化呈现明显的非一致性。p 光衍射效率随时间推移一直上升至最大值 0.80 后不再发生变化,其中 10~20 s 是光化学反应的剧烈阶段,20~25 s 时光化学反应趋于平缓,25 s 后光化学反应基本停止,p 光的衍射效率是由于液晶层的有效折射率 n_{eff} 与聚合物层的折射率 n_p 之间的折射率差造成的;s 光衍射效率在 16 s 达到最大值 0.16 后开始下降,最终变为 0.04 不再发生变化。s 光衍射效率不为 0,是由于聚合物层的折射率 n_p 与液晶的寻常光折射率 n_o 不匹配,即 $n_p \neq n_o$ 造成的。p 光衍射效率 η_p 与 s 光衍射效率 η_s 的比值高达 20,即制备的倾斜液晶聚合物光栅呈现明显的各向异性,并且液晶分子的排列依然沿着水平方向^[10-11]。

入射光强度为 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 3.0 mW/cm² 时,倾斜光栅的衍射效率分别为 47%, 70%, 80%, 62%, 28%, 即光栅的衍射效率对入射光强度存在一定的依赖关系,在最佳光强附近制备光栅时,光栅的衍射效率较高。

3.2 倾斜体光栅形貌及特性

图 4 是倾斜体光栅的扫描电镜图像,显示的是聚合物层的电镜图像,聚合物层之间的孔隙是液晶层,已在样品准备过程中溶解于酒精。可以清晰地观察到光栅的倾斜排列特性,即光栅层倾斜于上下玻璃基板排列,并且光栅的一致性良好。根据扫描电镜图像得到光栅的倾角为 16.5°,表面

光栅周期为 650 nm。根据式(1)和(2), θ 为 52°, n_{ave} 为 1.536, 计算得出光栅表面周期 Λ_s 为 650.8 nm, 倾角 α 为 16.58°。因此,实际计算值与理论值高度吻合。

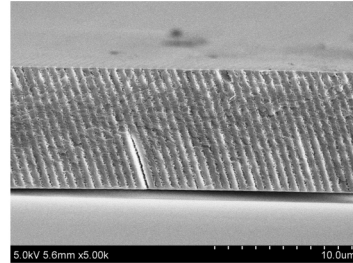


图 4 倾斜光栅扫描电镜图像
Fig.4 SEM image of a slanted grating

光栅的体系由 Q 参数决定^[12]:

$$Q = \frac{2\pi\lambda_p d}{n_{ave}\Lambda_s^2}, \quad (5)$$

其中: $\lambda_p = 632.8$ nm 为探测光波长, $d = 9 \mu\text{m}$ 为光栅厚度, $n_{ave} = 1.536$ 为倾斜光栅的平均折射率, Λ_s 为光栅的表面周期。当 $Q \gg 1$ 时(实际理论参照值 $Q > 4\pi$), 为 Bragg 体光栅; 当 $Q \ll 1$ 时(实际理论参照值 $Q < 0.3$), 为 Raman-Nath 光栅。在本工作中, $Q = 55$, 因此制备的倾斜光栅为 Bragg 体光栅。

图 5 示意性地给出了倾斜体光栅的表面周期 Λ_s , 体周期 Λ_v 以及光栅倾角 α 之间的关系:

$$\Lambda_v = \Lambda_s \cos\alpha. \quad (6)$$

在本工作中,体周期 Λ_v 为 623.7 nm。并且,表面光栅矢量、体光栅矢量的模值与各方向的分量存在如下关系:

$$\begin{cases} k_s^2 = k_{gx}^2 + k_{gy}^2 \\ k_v^2 = k_{gx}^2 + k_{gy}^2 + k_{gz}^2 \end{cases}, \quad (7)$$

其中: $k_s = 2\pi/\Lambda_s$, $k_v = 2\pi/\Lambda_v$ 。代入数据, k_{gz} 为 $2.87 \mu\text{m}^{-1}$ 。在后续工作中,将重点阐述 k_s (k_{gx} , k_{gy}) 以及 k_v (k_{gx} , k_{gy} , k_{gz}) 对于光栅耦合实现 AR 增强现实显示的重要性。当一束光从低折射率介

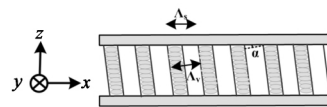


图 5 倾斜体光栅示意图
Fig.5 Schematic illustration of a slanted volume grating

质射入高折射率介质,根据 Snell 折射定律,即使入射角为 90° ,入射光也不能在高折射率介质内部形成全内反射(Total Internal Reflection, TIR)以导波的形式在波导内传播,可以根据式(8)、(9)表述:

$$n_{\text{low}} \sin \theta_{\text{in}} = n_{\text{high}} \sin \theta_{\text{refractive}}, \quad (8)$$

$$n_{\text{high}} \sin \theta_{\text{critical}} = n_{\text{low}} \sin 90^\circ. \quad (9)$$

其中: n_{low} , n_{high} , θ_{in} , $\theta_{\text{refractive}}$ 以及 θ_{critical} 分别为低折射率介质、高折射率介质的折射率、入射角、折射角以及全内反射的临界角。根据式(8)和式(9),当入射角度为 90° 时,介质内部刚好发生全内反射,但这种情况理论上无法实现。因此,需要借助外部耦合过程,光栅耦合是一个很好的方法^[12-13]。对于倾斜体光栅,入射波矢 k_{in} 、衍射波矢 k_{dif} 以及光栅波矢量 k_G 之间满足如下关系:

$$\vec{k}_{\text{dif}} = \vec{k}_{\text{in}} - n \vec{k}_G, \quad (10)$$

其中: n 为整数。入射光将会被衍射至衍射光中,合理的选择光栅参数,就可以使衍射光以导波的形式在倾斜体光栅、玻璃基板以及空气组成的复合波导中以导波的形式传播。这部分工作,将会在后续工作中做重点讨论。

表 1 给出了倾斜体光栅表面周期、倾角、体周期、Q 值以及 k_{gz} 随夹角的变化关系。随着夹角的增加,倾斜体光栅倾角、Q 值以及 k_{gz} 均增大,表面周期与体周期均减小,并且光栅衍射效率变化幅度不大。为实现 AR 显示,一个需要考虑的因素就是倾斜体光栅可以支持的视场角(Field Of View, FOV),为支持更大的 FOV,光栅周期需要小些,适当降低光栅的厚度,并兼顾 Q 值的变化使光栅工作在 Bragg 体系,仅有一个衍射级次。

表 1 倾斜体光栅表面周期,倾角,体周期,Q 值以及 k_{gz} 随夹角的变化关系

Tab.1 Dependence of slanted volume grating surface period, slant angle, volume period, Q value and k_{gz} on cross-section angle

| 角度/ $^\circ$ | 表面周期/nm | 倾角/ $^\circ$ | 体周期/nm | Q 值 | $k_{\text{gz}}/\mu\text{m}^{-1}$ | 衍射效率/% |
|--------------|---------|--------------|--------|-------|----------------------------------|--------|
| 36 | 887.7 | 11.6 | 508.9 | 29.56 | 1.45 | 72.6 |
| 44 | 744.9 | 14.1 | 720.2 | 41.99 | 2.12 | 76.3 |
| 52 | 650.8 | 16.6 | 623.7 | 55 | 2.87 | 80 |
| 60 | 586.9 | 19 | 555.5 | 67.62 | 3.685 | 84.4 |
| 70 | 536.7 | 21.93 | 497.0 | 81.16 | 4.72 | 82.3 |
| 80 | 507.8 | 24.74 | 461.2 | 90.33 | 5.70 | 76.8 |

3.3 布拉格失谐特性

根据耦合波理论,当入射探测光偏离 Bragg 角度时,光栅的衍射效率将发生失谐,并由式(11)描述^[14]:

$$\eta = \sin^2(\nu^2 + \xi^2)^{1/2} / (1 + \xi^2/\nu^2). \quad (11)$$

参数 ν 以及 ξ 由式(12)、(13)决定

$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda_p (c_r c_s)^{1/2}}, \quad (12)$$

$$\xi = 2\pi \Delta \theta d \sin(\varphi - \theta_{\text{Bragg}}) / (2c_s \Lambda_s), \quad (13)$$

其中: Δn 为倾斜体光栅的折射率调制量, φ 为光栅倾角的余角, θ_{Bragg} 为光栅内部的 Bragg 衍射角, $c_r = \cos \theta_B$ 以及 $c_s = -\cos(\theta_{\text{Bragg}} - 2\varphi)$ 为倾斜因子。本工作中,倾斜体光栅的折射率调制量 $\Delta n = 0.0224$ 根据琼斯矩阵方法计算得出^[15]。

对于 Bragg 倾斜体光栅,其衍射特性由式

(14)描述^[16]:

$$m\lambda_p = 2n_{\text{ave}} \Lambda_s \sin \theta_{\text{Bragg}}, \quad (14)$$

其中: m 为衍射级次, m 只可以取 1 或者 -1,这是 Bragg 体光栅的典型特征。代入数值后, θ_{Bragg} 为 18.45° ,考虑到光栅倾角为 16.6° ,实际入射角度为 2.85° 。图 6 为入射角偏离 Bragg 角时,倾斜体光栅的实验与理论失谐曲线,实际曲线与理论曲线吻合良好。失谐曲线呈现明显的非对称性,以 Bragg 角度为中心,当角度增加时出现极小值时角度变化为 3.4° ,当角度减小时出现极小值时角度变化为 3.25° 。失谐曲线的半宽高(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 3.22° ,这对于实现一定视场的 AR 显示是不足的,在后续的工作中,将会降低光栅的厚度并提高材料的折射率调制量提升倾斜体光栅的失谐半宽高。

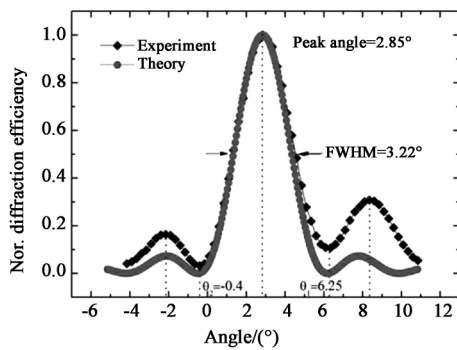


图 6 倾斜体光栅实验与理论失谐曲线

Fig.6 Experimental and theoretical Bragg mismatch curves for a slanted volume grating

3.4 电场调谐特性

由于正性向列液晶层的存在,在外加电场的作用下,倾斜体光栅将被调谐。图 7 示意性给出倾斜体光栅调谐示意图。未施加电场时,液晶倾向于沿着水平 x 方向排列。此时,当 p 偏振入射光以 Bragg 角入射时,由于液晶层与聚合物层存在空间折射率调制,入射光能量将会被衍射至 +1 级;施加电场后,液晶倾向于沿着垂直 y 方向排列。此时,当入射光以 Bragg 角入射时,由于液晶层与聚合物层存在空间折射率调制消失,入射

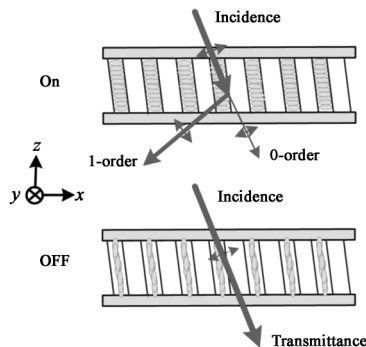


图 7 倾斜体光栅调谐示意图

Fig.7 Schematic illustration of a slanted volume grating

光直接出射^[17]。

图 8 是倾斜体光栅归一化衍射效率随施加电场强度的变化关系。液晶分子相对于水平方向的倾角随施加电场不断增加,最后变为 90° ,衍射效率也不断降低。衍射效率降低至 90% 以及 10% 所需要的场强分别为 $5.1 \text{ V}/\mu\text{m}$ 和 $11.25 \text{ V}/\mu\text{m}$,意味着通过施加电场是可以控制倾斜液晶/聚合物体光栅的衍射效率,可以根据人为需要决定光栅的工作状态。

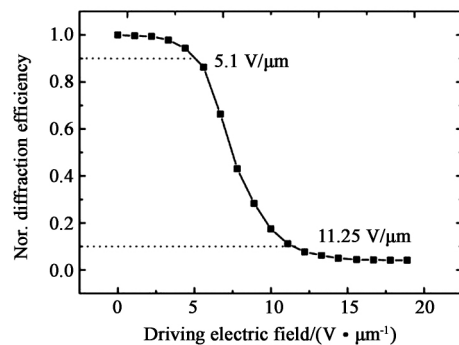


图 8 归一化衍射效率随场强的变化关系曲线

Fig.8 Normalized diffraction efficiency as a function of driving electric field

4 结 论

制备了一种基于液晶/聚合物层对入射光进行空间调制,衍射效率高达 80% 的倾斜体光栅。搭建了非对称形式的曝光光路,并使用 632.8 nm He-Ne 激光对倾斜体光栅的演化过程进行了实时监测。扫描电镜图像证实了光栅的倾斜特性,并与理论计算结果一致,给出了倾斜体光栅表面周期与体周期之间的关系式。倾斜体光栅具有外界电场调谐特性,光栅的衍射效率失谐实验曲线与耦合波理论吻合良好。在下一步工作中,我们将深入探讨利用倾斜液晶/聚合物体光栅实现增强现实显示的理论方案与实验方法。

参 考 文 献:

[1] KRESS B C. Digital optical elements and technologies (EDO19): applications to AR/VR/MR [C]//*Proceedings of SPIE* 11062, *Digital Optical Technologies* 2019. Munich, Germany: SPIE, 2019: 1106222.
 [2] KRESS B C. Optical waveguide combiners for AR headsets: features and limitations [C]//*Proceedings of SPIE* 11062, *Digital Optical Technologies* 2019. Munich, Germany: SPIE, 2019: 110620J.
 [3] BUNNING T J, NATARAJAN L V, TONDIGLIA V P, et al. Holographic polymer-dispersed liquid crystals (HPDLCs) [J]. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 2000, 30: 83-115.

- [4] KAKIUCHIDA H, OGIWARA A, MATSUYAMA A. Multiple Bragg diffractions with different wavelengths and polarizations composed of liquid crystal/polymer periodic phases [J]. *ACS Omega*, 2017, 2(9): 6081-6090.
- [5] 翟庆峰,李敬,汪尔康.基于高分子聚合物及毛细玻璃管的固态单纳米孔通道在分析化学中的应用[J].*分析化学*, 2018,46(6):814-825.
ZHAI Q F, LI J, WANG E K. Application of single solid state nanopore/nanochannel based on polymer membrane and glass nanopipette in analytical chemistry [J]. *Chin. J. Anal. Chem.*, 2018, 46(6): 814-825. (in Chinese)
- [6] 周晓毓,赵建伟,马贵敏,等.基于阳离子共轭聚合物荧光共振能量转移结合杂交链式反应信号扩增检测端粒酶活性[J].*分析化学*,2019,47(7):1006-1013.
ZHOU X Y, ZHAO J W, MA G M, *et al.* A cationic conjugated polymer-based fluorescence resonance energy transfer strategy for telomerase activity assay combining with signal amplification of hybridization chain reaction [J]. *Chin. J. Anal. Chem.*, 47(7): 1006-1013. (in Chinese)
- [7] WALDERN J D, GRANT A J, POPOVICH M M. DigiLens switchable Bragg grating waveguide optics for augmented reality applications [C]//*Proceedings of SPIE 10676, Digital Optics for Immersive Displays*. Strasbourg, France; SPIE, 2018: 106760G.
- [8] 刘明欢,李大禹,姚丽双,等.基于液晶/聚合物光栅选频的高效率有机半导体激光器[J].*液晶与显示*,2017,32(11): 853-860.
LIU M H, LI D Y, YAO L S, *et al.* High efficiency organic semiconductor laser using a liquid crystal /polymer grating as an oscillation cavity [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017, 32(11): 853-860. (in Chinese)
- [9] SUN X H, TAO X M, YE T J, *et al.* Diffraction measurement and analysis of slanted holographic polymer dispersed liquid crystal [J]. *J. Appl. Phys.*, 2005, 98(4): 043510.
- [10] FASANELLA A, CASTRIOTA M, CAZZANELLI E, *et al.* Molecular orientation of E7 liquid crystal in POLICRYPS holographic gratings: a micro-Raman spectroscopic analysis [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2012, 558(1): 46-53.
- [11] 黄文彬,邓舒鹏,刘永刚,等.全息液晶/聚合物透射光栅光学各向异性的研究[J].*物理学报*,2012,61(9):094208.
HUANG W B, DENG S P, LIU Y G, *et al.* Study on anisotropic diffraction properties of holographic dispersed liquid crystal transmission grating [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2012, 61(9): 094208. (in Chinese)
- [12] LIU M H, LIU Y G, ZHANG G Y, *et al.* Organic holographic polymer dispersed liquid crystal distributed feedback laser from different diffraction orders [J]. *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2016, 49(46): 465102.
- [13] 石胜辉,王鑫,赵明富,等.基于氧化石墨修饰长周期光纤光栅的传感特性[J].*光学精密工程*,2019,27(11): 2305-2314.
SHI S H, WANG X, ZHAO M F, *et al.* Sensing characteristics of long period fiber grating functionalized with graphite oxide [J]. *Opt. Precis. Eng.*, 2019, 27(11): 2305-2314. (in Chinese)
- [14] KOGELNIK H. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell Syst. Tech. J.*, 1969, 48(9): 2909-2947.
- [15] CAPUTO R, TREBISACCE I, DE SIO L, *et al.* Jones matrix analysis of dichroic phase retarders realized in soft matter composite materials [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(6): 5776-5784.
- [16] LIU M H, LIU Y G, PENG Z H, *et al.* Self-orientation effect of liquid crystals on holographic polymer-dispersed liquid crystal and distributed feedback lasers [J]. *Appl. Phys. B*, 2017, 123(7): 208.
- [17] PENG H Y, NI M L, BI S G, *et al.* Highly diffractive, reversibly fast responsive gratings formulated through holography [J]. *RSC Adv.*, 2014, 4(9): 4420-4426.

作者简介:



刘明欢(1990—)男,吉林公主岭人,博士,2018年于长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事全息液晶/聚合物光栅,全息偏振光栅以及有机激光器等方面的研究。E-mail: liuminghuan13@mails.ucas.edu.cn