

文章编号:1007-2780(2024)06-0752-09

采用丙烯酸酯双单体的高空间频率透射式 体全息 H-PDLC 光栅的研制

朱 宁, 郑继红*, 申 桐, 李 科, 刘悠嵘
(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 全息聚合物分散液晶(holographic-polymer dispersed liquid crystal, H-PDLC)体全息光栅因其化学状态稳定、制作简单、价格低廉等优势为全息光波导耦合器件提供了一个更优的思路。本文提出了采用复合型丙烯酸酯类高/低折射率匹配调制的 H-PDLC 透射式体光栅的研制。首先结合耦合波理论及分子扩散理论介绍了 H-PDLC 光栅的形成机理。然后,通过实验对不同官能度单体的光栅材料进行筛选,并研究其全息衍射特性。在此基础上,进一步采用提高引发剂含量的方式优化了高频体全息 H-PDLC 光栅性能。实验结果表明,该双单体的 H-PDLC 配方可实现在可见光波段透过率大于 90%,在空间频率为 973 lp/mm 下,衍射效率达到 90%,响应带宽为 99 nm;在 2 941 lp/mm 下,衍射效率为 75.4%,响应带宽为 29 nm。该 H-PDLC 光栅作为波导显示系统的耦合器件有可观的应用前景。

关键词: 聚合物分散液晶;透射式体全息光栅;衍射效率;波长响应带宽

中图分类号: O753⁺.2; O436 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2024-0114

Preparation of dual-monomer high spatial frequency H-PDLC grating based on acrylic polymer

ZHU Ning, ZHENG Jihong*, SHEN Tong, LI Ke, LIU Yourong

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering,
University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Holographic-polymer dispersed liquid crystal (H-PDLC) volume holographic gratings provide a better approach for holographic waveguide couplers due to stable chemical state, simple fabrication and low cost advantages. This article proposes the development of H-PDLC transmissive volume gratings using composite acrylic high/low refractive index matching modulation. Firstly, the formation mechanism of H-PDLC grating was introduced based on the combination of coupled wave theory and molecular diffusion theory. Then, grating materials with different functional monomers were screened through experiments, and holographic diffraction properties were studied. On this basis, the performance of high-frequency volume holographic H-PDLC gratings was further optimized by increasing the content of initiators. The experimental results show that the H-PDLC formulation of this dual monomer can achieve

收稿日期:2024-04-09;修订日期:2024-04-17.

基金项目:科技部重点研发计划(No.2018YFA0701802);国家自然科学基金(No.61975122)

Supported by National Key Research and Development Program (No.2018YFA0701802); National Natural Science Foundation of China(No.61975122)

*通信联系人, E-mail: jihongzheng@usst.edu.cn

a visible light transmittance of over 90%, with a diffraction efficiency of 90% and a response bandwidth of 99 nm at 973 lp/mm; At 2 941 lp/mm, the diffraction efficiency is 75.4% and the response bandwidth is 29 nm. The H-PDLC grating has considerable application prospects as a coupler in waveguide display systems.

Key words: holographic-polymer dispersed liquid crystal; transmittance volume holographic gratings; diffraction efficiency; wavelength response bandwidth

1 引言

全息聚合物分散液晶(holographic-polymer dispersed liquid crystal, H-PDLC)材料于1993年诞生于美国 Air Force 空军研究中心。该材料结合了液晶分子的电控双折射效应,又继承了聚合物单体易聚合固化的优点,是一种衍射性能“开”、“关”可调的高折射率调制度的新型全息光栅。当全息光场的明暗相间的条纹照射 H-PDLC 膜层时,液晶与聚合物之间发生两相分离,形成了在暗条纹下以液晶微滴为主的富液晶区域和在明条纹以聚合物聚合为主的富聚合物区域的折射率差型位相光栅。

近年来,由于AR/VR技术的快速发展,全息光波导的发展引发了学者们的探究兴趣。表面浮雕光栅是应用于全息光波导的主流^[1-2],相较于表面浮雕光栅,体全息光栅由于其高效的制备工艺、低廉的成本,有更加广阔的应用前景。美国 Digilens 公司在2019年推出了基于液晶/聚合物材料全息光栅波导的眼镜,其基于聚合物分散液晶的电控布拉格光栅技术所研制,已应用于美国军方航空电子抬头显示屏^[3]。但是,H-PDLC 高频体光栅的应用发展仍受限于许多方面,需要经过大量实验探索与解决。因此,国内外研究学者一直致力于改善 H-PDLC 材料的光电特性。在优化 H-PDLC 衍射性能以及相分离程度方面,学者们做出了许多研究。提高 H-PDLC 光电特性的方法有很多种,例如改变各组分的配方^[4]、在液晶中掺杂染料或者纳米粒子^[5-8]、改变所制作光栅的厚度^[9]等。近年来,有研究提出丙烯酸酯类单体的分子结构对改善 H-PDLC 光栅的电光性能有正面影响。含柔性亚甲基、甲基或醚类的丙烯酸酯类聚合物材料具有粘度较低、聚合速度快的优点而被广泛应用^[10-12]。S. S. Shim 等人在 H-PDLC 材料中添加了硅单体,实验表明掺杂 DVTMDS 的全息 H-PDLC 光栅衍射效率达到 85%,响应时间

缩减到毫秒量级,有更好的电控效果^[13]。

目前,对高频光栅的全息性能,如衍射效率、波长响应带宽以及透过率等的研究还比较少。基于全息波导显示对高空间频率全息光栅的需求,本文研制了基于丙烯酸酯类体系的双单体聚合物分散液晶材料,在空间频率 973 lp/mm 下,衍射效率可达 90%,波长响应带宽为 99 nm;在 2 941 lp/mm 下,H-PDLC 光栅衍射效率提升至 75.4%,波长响应带宽为 29 nm,有望满足实际应用需求。

2 H-PDLC 光栅的基础理论

2.1 H-PDLC 光聚合反应过程

H-PDLC 材料是由聚合物基质以及液晶按照一定比例混合而成的胶体(感光材料一般包括液晶、单体、光引发剂、协引发剂、表面活性剂、交联剂和掺杂剂),基于相分离的方法使液晶微滴均匀分布于聚合物基质中。H-PDLC 的光聚合过程是一个复杂的反应体系,由两个相干光源在所制备的液晶盒表面形成干涉。如图 1 所示,在相干亮区,光引发剂吸收光子后产生活性中心,进而引发单体发生聚合,形成高分子网络,同时液晶分子将会被挤压至相干暗区;同时,相干暗区会受到浓度梯度的影响,单体会向相干亮区扩散并参加光聚合反应。最终,在液晶盒中形成富液晶相和富聚合物相的周期性分布的光栅结构。

H-PDLC 材料的成型过程与液晶扩散速率、液晶成核速率和体系的凝胶化速率有很大关系^[14],关乎整个体系的相分离程度,从而影响所

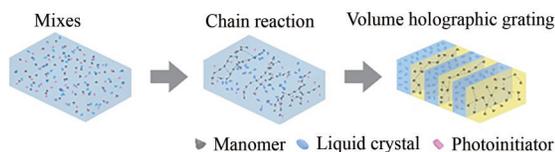


图1 全息聚合物分散液晶光栅的形成机理

Fig. 1 Formation mechanism of holographic polymer dispersed liquid crystal grating

制备的光栅的衍射效率等全息性能。因此,只有当液晶扩散速率大于液晶成核速率且大于整个体系的凝胶化速率,才能形成相分离结构较好的全息光栅结构。

2.2 体全息光栅与布拉格衍射

全息光栅从广义上可以被定义为薄全息光栅和厚全息光栅,其中厚全息光栅又被称之为体全息光栅。“薄”和“厚”体现的是记录介质厚度和干涉条纹间距之间的距离。当记录介质厚度大于干涉条纹间距时,被称作体全息;反之则为薄全息。这里,可以引入一个计算因子^[15]:

$$Q = 2\pi \frac{\lambda d}{n_{av} \Lambda^2}, \quad (1)$$

式中: Q 为 Klein-Cook 参数, n_{av} 是全息记录材料的平均折射率, λ 是记录波长, d 和 Λ 分别代表全息光栅的厚度和周期。当 Q 值远大于1时,该光栅属于体全息光栅^[16]。

体全息光栅的干涉条纹记录在介质内部,其衍射表现为记录介质的体效应,因此其衍射方向满足布拉格(Bragg)方程:

$$2\Lambda \sin \theta = \lambda, \quad (2)$$

式中: θ 表示入射光和干涉平面法线的夹角。就体光栅而言,大部分衍射光强集中于一级衍射级上,并且随着级次的增大,其衍射效率越来越低。

根据耦合波理论^[17],将再现光与衍射光方程进行耦合,可以得到衍射效率的定量求解:

$$\eta = \frac{\sin^2(\nu^2 + \xi^2)}{1 + \left(\frac{\xi}{\nu}\right)^2}, \quad (3)$$

式中,分别定义 ν 和 ξ 为光栅的调制参数和布拉格失配参数。对于非倾斜光栅而言,这两个参数可以计算为:

$$\nu = \frac{\pi n_1 d}{\lambda (\cos \theta_i \cos \theta_s)^{1/2}}, \quad (4)$$

$$\xi = \frac{\vartheta d}{2 \cos \theta_s},$$

式中, ϑ 表示布拉格失配量, d 为全息光栅的厚度, n_1 是代表光栅的折射率调制度, θ_i 和 θ_s 分别表示再现光入射夹角和衍射夹角。结合公式(3)~(4)可知,当再现光以布拉格衍射角进行再现时,可以避免布拉格偏移,从而可以得到光栅的最大衍射效率。

如图2所示,当再现光以布拉格角进行入射时,满足布拉格条件,即 $\xi=0$,此时 $\theta_s = \theta_B$,可以得

到最大衍射效率时全息光栅的折射率调制度 n_1 :

$$n_1 = \frac{\arcsin(\eta^{1/2}) \lambda \cos \theta_B}{\pi d}. \quad (5)$$

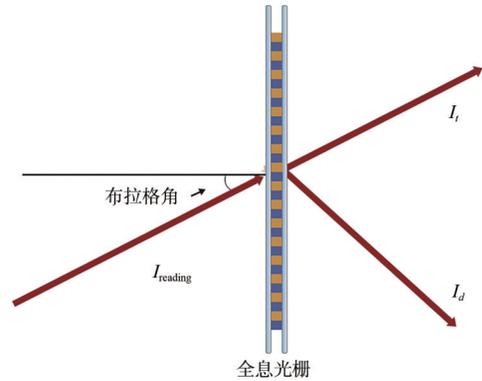


图2 透射式体全息布拉格角再现示意图

Fig. 2 Diagram of the reproduction of the Bragg angle of the transmissive volume hologram

3 双单体 H-PDLC 材料的优化

3.1 H-PDLC 溶液制备及液晶盒预处理

全息聚合物分散液晶溶液的制备方式主要有3种,分别为溶剂挥发相分离法(SIPS)^[18]、聚合引发相分离法(PSPS)^[19]和热致诱导相分离法(TIPS)^[20]。其中,溶剂挥发引发相分离法可以通过温度对H-PDLC性能进行调节,但是受制于溶剂蒸发的影响,容易有溶剂残留的情况出现,影响全息性能;聚合引发相分离法具有驱动电压低、响应速度快等优点;热致诱导相分离法的响应速度可以达到微秒量级,但是其需要更高的驱动电压。综合来看,聚合物引发相分离法更适合制备H-PDLC溶液。

实验中使用的液晶盒由两片25 mm×25 mm的ITO玻璃(由连云港旭尔石英科技有限公司提供)作为基底。由于全息实验对环境和实验器件有极高的要求,需要对玻璃基底进行多次清洁,玻璃基底上若有一些杂质、微粒子存在,会对液晶盒的制备造成影响,易产生气泡。所制备的液晶盒厚度控制在10 μm。将清洗好的玻璃放入喷粉机中,打开连接的气泵,在玻璃表面喷洒10 μm厚的间隔子。静置10 min后,将另一块玻璃覆盖在表面,使用封口胶对两块玻璃进行封边,经处理的液晶盒放入真空包装机中进行压缩封装。图3为制作好的液晶盒示意图。

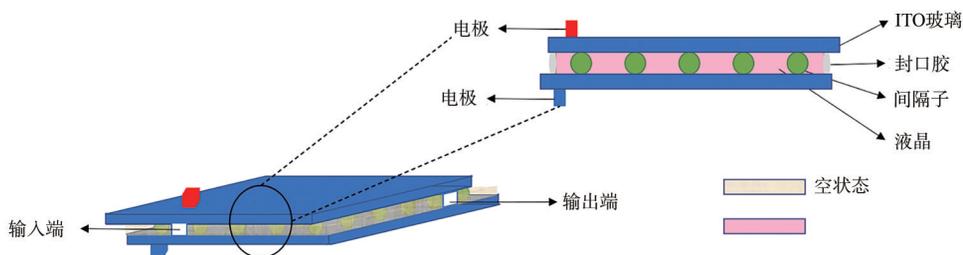


图 3 液晶盒示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the liquid crystal cell

首先将制备完成的 H-PDLC 溶液放置在加热台上进行加热,以降低体系的粘稠度,方便灌入到液晶盒中,加热时间为 10 min。随后用干净的玻璃棒蘸取少许溶液,滴在液晶盒中未封口处。由于毛细现象的存在,溶液会慢慢渗入并均匀填充到液晶盒中。之后将液晶盒中多余的溶液擦干,即可曝光。

在整个干涉实验中,尽量保持实验环境无尘、无杂音,减少气流振动对光聚合造成的串扰。由于 H-PDLC 溶液中含有光敏剂,实验应当在暗环境中进行,环境温度在 20~25 °C、湿度约为 60%。

3.2 全息干涉光路的搭建

本文使用偏振全息透射式双光束的方式搭建干涉光路进行实验研究。实验中选择波长为 532 nm、光束直径为 1.5 mm 的半导体激光器作为光源。如图 4 所示,光束依次经过衰减器(便于调节入射光强的大小)、小孔滤波(滤去杂散光以及高频信息)、透镜(调整光束为平行光入射)、光阑(调节干涉光斑区域)、λ/2 波片(控制两光束的曝光光强保持一致)和 PBS 分束器。PBS 将激光分为两束光,即物光和参考光。在 S 波方向上放入第二个 λ/2 波片以控制干涉光路为严格的 P-P 干涉。这是由于液晶分子在 H-PDLC 复合材料中存在取向问题,因此复合材料的衍射效率高度依赖探测光的偏振方向,所以此处需要严格控制

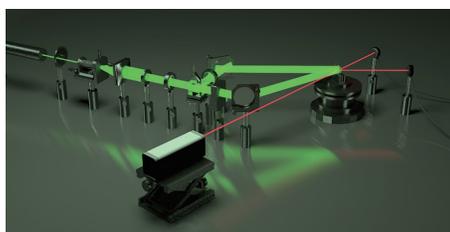


图 4 干涉和检测光路示意图

Fig. 4 Diagram of interference and detection optical path

探测光的偏振态,以免对液晶取向造成影响。在 P 波方向上放入一个快门便于实时监测衍射效率的变化,最后以两个反射镜将两束激光进行合光,合光位置即液晶盒的放置位置。本实验均在空间频率为 973 lp/mm 下进行。

实验采用对 H-PDLC 材料不敏感的波长为 633 nm 的红光作为探测光(图 4),并通过两个探测器分别采集曝光材料的衍射与透射光强,从而获得材料干涉过程中衍射效率的实时变化情况。为了便于实验研究,本文采用相对衍射效率进行计算:

$$\eta = \frac{I_1}{I_1 + I_0} \times 100\%, \quad (6)$$

式中, I_1 和 I_0 分别表示一级衍射光光强和零级透射光光强。

3.3 H-PDLC 材料体系的确定

3.3.1 单一单体的局限性

在全息 H-PDLC 材料中,预聚物单体的浓度在整个体系中占比超过 1/2。液晶和单体在体系中的浓度配比、单体与液晶分子折射率的匹配以及液晶浓度对所配置的全息光栅的衍射效率有着非常大的影响。其中液晶与单体在互相扩散过程中各组成材料的性质,特别是单体的官能度与折射率有关。一般认为,单体官能团数增加,聚合物与液晶的相容性变差,有利于体系的相分离。由于官能度单体聚合后会形成交联的稳定的网络状的三维结构从而将液晶分子挤出,有利于光栅的相分离结构,降低液晶分子的尺寸。但是高官能度的单体粘稠性会显著增加,凝胶化的时间会缩短,从而导致单体和液晶扩散尚未完成就已凝胶,不利于液晶分子与单体之间的分离。如图 5(a)所示,不同官能度单体 H-PDLC 样品的曝光剂量和衍射效率在一定时间内成正比,其最

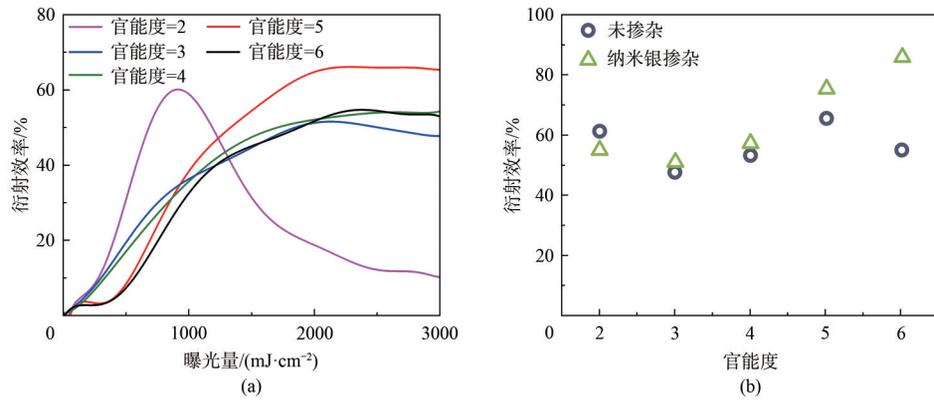


图 5 (a) 不同官能度单体衍射效率随曝光量的变化曲线; (b) 不同官能度单体对掺杂和未掺杂样品衍射效率的影响对比图。
Fig. 5 (a) Diffraction efficiency curves of monomers with different functionalities as exposure; (b) Comparison of the effects of different functional monomers on the diffraction efficiency of doped and undoped samples.

大衍射效率在 50%~70% 之间, 并且官能度对衍射效率的影响并不明显。

为了提高衍射效率与电光效应, 通常采取掺杂的方式增强材料弹性、稳定性以及折射率调制度^[21-22]。图 5(b) 是不同官能度单体掺杂纳米银的衍射效率随时间的变化。相比于未掺杂的 H-PDLC, 官能度越高对纳米掺杂的 H-PDLC 材料衍射效率的影响越大。这可能是由于高官能度单体形成使高维交联网状结构更能将纳米粒子排到液晶区域, 从而增大液晶和聚合物区域的折射率调制度, 提高衍射效率。实验证明, 高官能度单体对提高 H-PDLC 的电光效应有更大的优势。

高官能度单体对全息光栅的透过率和清晰度都会造成一定的影响。光栅会呈现出雾状或者乳白色结晶的情况, 不利于液晶显示方面的应用。造成这一现象的主要原因是高官能度丙烯酸酯类体系的快速聚合和弹性松弛导致全息光

栅光学质量不稳定、不均匀, 从而导致液晶分子在富聚合物相中随机分离, 液晶微滴变大, 使得光栅的散射增大。图 6 为不同官能度单体的透过率变化曲线。在单一单体的情况下, 三官能度和

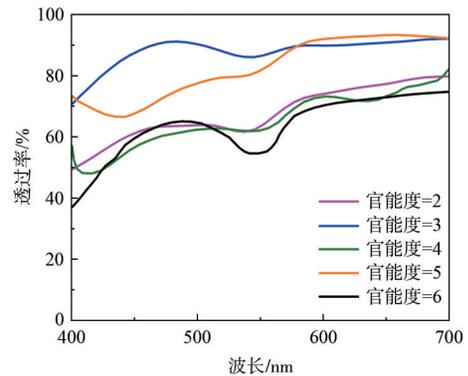


图 6 不同官能度单体光栅透过率曲线
Fig. 6 Transmittance curves of gratings with different functionalities

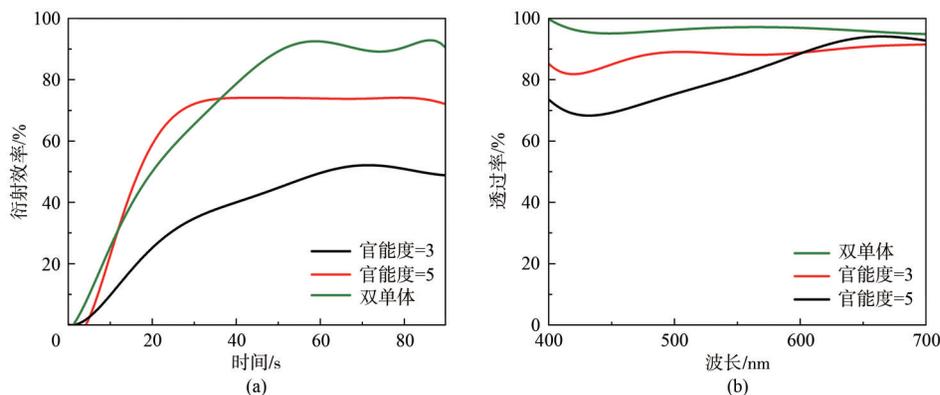


图 7 单一单体和双单体的衍射效率变化曲线 (a) 和透过率变化曲线 (b)
Fig. 7 (a) Diffraction efficiency variation curves and (b) transmittance change curves of single-monomer and dual-monomer

五官能度的单体光栅透过率优于其余官能度的单体,并且光栅的雾度小,较为清晰,其余样品均呈淡红色,且透过率较低。

3.3.2 双单体与单一单体的比较

单一单体很难在衍射效率和透过率上同时取得好的效果。为了解决这一问题,本文选择将低官能度单体和高官能度单体以一定比例混合,以达到拥有高交联网状结构的同时还保持合适的粘稠性。图7为三官能度和五官能度单体以及双单体的衍射效率和透过率情况。

从图7可以看出,对于双单体H-PDLC而言,

其最大衍射效率可以达到90%,相较于单一单体拥有更高的衍射效率,并且双单体的透过率均大于90%。表1为确定的双单体H-PDLC材料配方。图8为两种单体所对应的化学结构示意图。

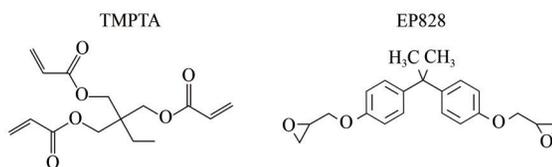


图8 两种单体的化学结构式

Fig. 8 Chemical structural formulas of two monomers

表1 双单体体系材料配方

Tab. 1 Materials of dual-monomer system

成分	名称	化学式	作用
单体1	TMPTA	$\text{CH}_2=\text{CHCOOCH}_2)_3\text{CCH}_2\text{CH}_3$	光聚合反应的主体
单体2	EP828	$\text{C}_{20}\text{H}_{28}\text{ClNO}_4$	光聚合反应的主体
液晶	TEB50	—	提供折射率差、可电控
光引发剂	RB	$\text{C}_{20}\text{H}_2\text{Cl}_4\text{I}_4\text{Na}_2\text{O}_5$	吸收光子、引发光聚合
交联剂	NVP	$\text{C}_6\text{H}_9\text{NO}$	改善体系聚合速率
协引发剂	NPG	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_2$	控制单体自由基固化速率

4 高空间频率下H-PDLC光栅的全息特性

4.1 高频H-PDLC光栅全息特性

随着光栅空间频率的增大,其周期减小,导致整个反应过程减短,液晶微滴受挤压,无法快速扩散至相干暗区,从而不容易形成更好的相分离结构。图9(a)是空间频率为2941 lp/mm时,光栅衍射效率的变化曲线,此时衍射效率较低。图9(b)为光栅SEM图,其中光栅的聚合物层为致密区域,液晶层表现为暗区域,该区域是进行SEM检测之前使用乙醇溶液浸泡24h洗去液晶层而显现出来的结果。可以观察到,此时液晶区域和聚合物区域的边界清晰,液晶在聚合物区域有很大的残留。

4.2 引发剂对高频光栅的性能优化

为了进一步提高高频H-PDLC体全息光栅的衍射效率,经过对比发现,光引发剂RB在样品中的含量对衍射效率有较大的影响。对不同含

量RB的样品进行优化,并通过SEM扫描检测观察不同含量的光引发剂光栅的表面形貌。实验发现,当光引发剂RB的含量(质量分数)为0.8%和1.0%时的样品具有相对较为清晰的相分离结构,其衍射效率如图10(a),含量为0.8%的光栅衍射效率可以达到67.2%,含量为1.0%的光栅衍射效率可以达到75.4%。这是由于光引发剂可以增加光聚合速率,整个材料体系的光敏性会有所提高,导致单体迅速聚合,亮条纹处的单体会被迅速消耗,进而亮暗处单体浓度差增大,亮区液晶会被挤压至暗条纹处,有利于结构的相分离。但是引发剂含量过高并不能很好地与单体相容,会发生反应不完全的情况。从图10(b)光栅透过率曲线可以看出,过高的含量降低了光栅的透过率,因此引发剂的含量不宜过高。

图11分别为RB含量(质量分数)为0.3%、0.5%、0.8%和1.0%的光栅SEM图,高浓度下的相分离结构明显优于低浓度下的样品。图12是该样品的AFM形貌图,可知光栅槽深约为50nm。

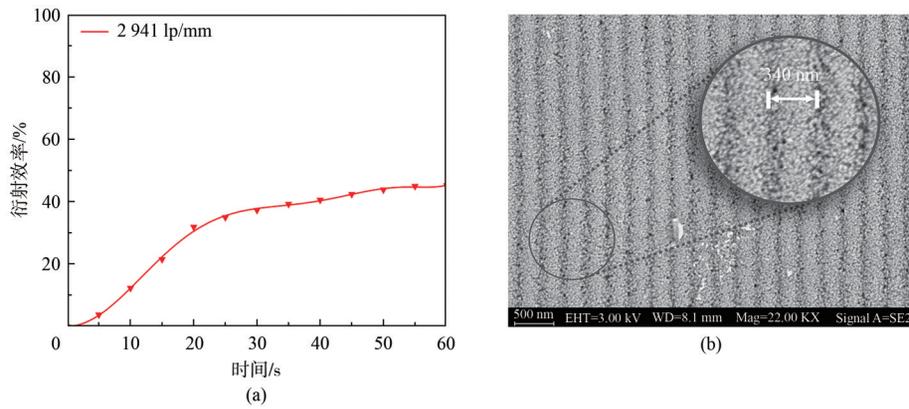


图9 空间频率为 2941 lp/mm 时 (a) 衍射效率变化曲线和 (b) 光栅形貌

Fig. 9 (a) Diffraction efficiency curve and (b) grating morphology of the sample at spatial frequency 2941 lp/mm

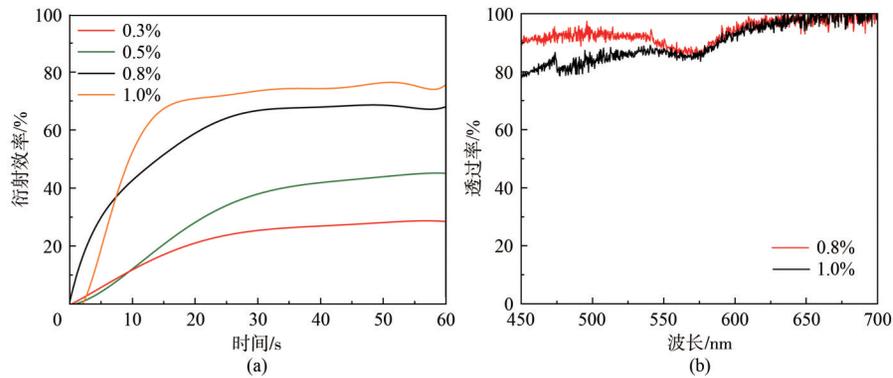


图 10 (a) 衍射效率随引发剂含量(质量分数)变化曲线;(b) 透过率曲线($w(\text{RB})=0.8\%$, $w(\text{RB})=1.0\%$)。

Fig. 10 (a) Curves of diffraction efficiency versus initiator content (mass fraction); (b) Transmittance curves ($w(\text{RB})=0.8\%$, $w(\text{RB})=1.0\%$).

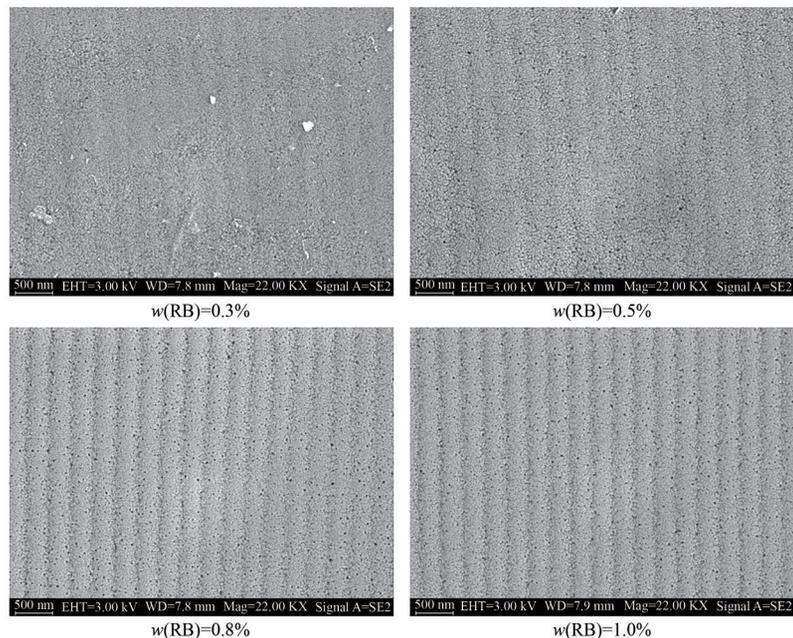


图 11 不同引发剂含量的光栅形貌图

Fig. 11 Grating morphology images of grating samples with different initiator contents (mass fraction)

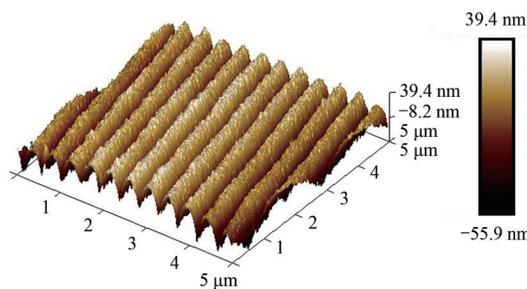


图 12 $w(\text{RB})=1.0\%$ 时光栅原子力显微镜扫描图
Fig. 12 AFM image of grating at the ration of $w(\text{RB})=1.0\%$

4.3 波长响应带宽的分析

波长带宽是体全息光栅特性的重要衡量标准之一。对于 H-PDLC 光栅样品,完成透过率检测之后,旋转样品直至 Bragg 衍射角处,此时透过率光谱会在记录光波长处产生凹陷,定义凹陷峰 1/2 的位置所对应的波长带宽即为半波带宽。如图 13,低频下基础样品的半波带宽可以达到 99 nm;高频下的半波带宽有明显的锐减,当空间

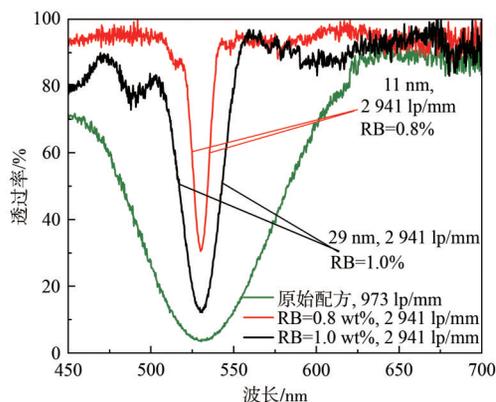


图 13 波长响应带宽曲线
Fig. 13 Curves of wavelength response to bandwidth

频率为 2 941 lp/mm 时,半波带宽为 29 nm。根据衍射理论,随着光栅周期的减小,波长带宽与其成正比。其中 RB 的含量(质量分数)为 0.8% 时的带宽小于 1.0% 时的带宽,这是由于光栅的效率制约着波长带宽的大小。并且,在空间频率为 973 lp/mm 和 2 941 lp/mm 时光栅的折射率调制度分别为 0.02 和 0.015。图 14 为所制备的光栅样品图。

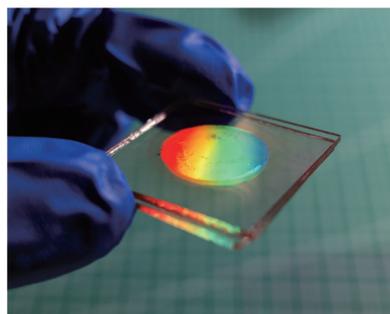


图 14 光栅样品图
Fig. 14 Grating sample image

5 结 论

本文采用丙烯酸酯类全息材料提出了一种双单体 H-PDLC 体系。通过大量实验探究了该体系下全息光栅的全息特性,研究了高空间频率下衍射效率与光栅形貌的关系,同时对光栅的波长响应带宽进行了探索。结合透过率光谱以及衍射效率的曲线,得到在空间频率为 973 lp/mm 和 2 941 lp/mm 下,其衍射效率分别可以达到 90% 和 75.4%,两者的响应带宽分别达到 99 nm 和 29 nm。本文所提出的 H-PDLC 为波导显示耦合器件提供了一个新的解决方案。

参 考 文 献:

[1] 崔易平. 面向新一代车载抬头显示的光波导研究 [D]. 北京:北京交通大学,2023.
CUI Y P. Investigation on optical waveguide for next-generation vehicle-mounted head-up display [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023. (in Chinese)

[2] DAI G Y, YANG H, YIN L Q, *et al.* Compact pupil-expansion AR-HUD based on surface-relief grating [J]. *Optics Express*, 2024, 32(5): 6917-6928.

[3] 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.

[4] GAO H Q, ZHANG S F, SAEED M H, *et al.* Study on the morphologies and electro-optical properties of cyano-phenyl-ester liquid crystals/polymer composite films prepared by a stepwise polymerisation [J]. *Liquid Crystals*,

- 2020, 47(10): 1497-1506.
- [5] ZHAO Y, GUO P L, LI X H, *et al.* Ultrafast photonics application of graphdiyne in the optical communication region [J]. *Carbon*, 2019, 149: 336-341.
- [6] SHU C, ZHAO Z W, HAN Y P, *et al.* Dependency-aware and latency-optimal computation offloading for multi-user edge computing networks [C]. 2019 16th Annual IEEE International Conference on Sensing, Communication, and Networking (SECON). Boston: IEEE, 2019.
- [7] CHAI T, LI X H, FENG T C, *et al.* Few-layer bismuthene for ultrashort pulse generation in a dissipative system based on an evanescent field [J]. *Nanoscale*, 2018, 10(37): 17617-17622.
- [8] SHU Y Q, GUO J, FAN T J, *et al.* Two-dimensional black arsenic phosphorus for ultrafast photonics in near- and mid-infrared regimes [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(41): 46509-46518.
- [9] ANUJA K J, DESHMUKH R R. An overview of HPDLC films and their applications [J]. *Liquid Crystals*, 2022, 49(5): 589-604.
- [10] LI W B, CHENG Z H, PAN G H, *et al.* Effects of the mixture composition on the microstructure of polymer matrix and light scattering properties of liquid crystal/photo-polymerizable monomers composites [J]. *Optical Materials*, 2008, 31(2): 434-439.
- [11] ZHANG L, LIU Y W, SHI Z Q, *et al.* Effects of alkyl chain length of monomer and dye-doped type on the electro-optical properties of polymer-dispersed liquid crystal films prepared by nucleophile-initiated thiol-ene click reaction [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(7): 658-672.
- [12] MOUQUINHO A, FIGUEIRINHAS J, SOTOMAYOR J. Digital optical memory devices based on polymer-dispersed liquid crystals films: appropriate polymer matrix morphology [J]. *Liquid Crystals*, 2020, 47(5): 636-649.
- [13] SHIM S S, CHO Y H, YOON J H, *et al.* Effects of silicone monomer on the grating formation of holographic PDLC [J]. *European Polymer Journal*, 2009, 45(8): 2184-2191.
- [14] BUNNING T J, NATARAJAN L V, TONDIGLIA V P, *et al.* Effects of eliminating the chain extender and varying the grating periodicity on the morphology of holographically written Bragg gratings [C]//*Proceedings of SPIE 2651, Liquid Crystal Materials, Devices, and Applications IV*. San Jose: SPIE, 1996: 44-55.
- [15] MONTEMEZZANI G, ZGONIK M. Light diffraction at mixed phase and absorption gratings in anisotropic media for arbitrary geometries [J]. *Physical Review E*, 1997, 55(1): 1035-1047.
- [16] BUNNING T J, NATARAJAN L V, TONDIGLIA V P, *et al.* Holographic polymer-dispersed liquid crystals (H-PDLCs) [J]. *Annual Review of Materials Science*, 2000, 30(1): 83-115.
- [17] KOGELNIK H. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *Bell System Technical Journal*, 1969, 48(9): 2909-2947.
- [18] MASCHKE U, COQUERET X, LOUCHEUX C. Polymer-dispersed liquid crystal materials prepared by electron-beam-initiated polymerization [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1995, 56(12): 1547-1555.
- [19] AHMAD F, JAMIL M, JEON Y J, *et al.* Comparative study on the electrooptical properties of polymer-dispersed liquid crystal films with different mixtures of monomers and liquid crystals [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2011, 121(3): 1424-1430.
- [20] SMITH G W. A thermodynamic model for solubilities in phase-separated systems: polymer-dispersed liquid crystals [J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals Science and Technology. Section A: Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 1993, 225(1): 113-130.
- [21] DIAO Z, KONG L, YAN J, *et al.* Electrically tunable holographic waveguide display based on holographic polymer dispersed liquid crystal grating [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(1): 72-76.
- [22] GASONOO A, AHN H S, LEE J, *et al.* Polymer dispersed liquid crystal for enhanced light out-coupling efficiency of organic light emitting diodes [J]. *Journal of IKEEE*, 2020, 24(1): 140-146.

作者简介:



朱宁,女,硕士研究生,2021年于金陵科技学院获得学士学位,主要从事聚合物分散液晶全息光栅的相关研究。
E-mail:ningzhu98@163.com



郑继红,女,博士,教授,2003年于上海理工大学获得博士学位,主要从事聚合物分散液晶、全息波导显示、光学检测等相关研究。E-mail:jihongzheng@usst.edu.cn