

文章编号: 0258-7025(2009)04-0983-06

绿敏聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物的 配方优化及全息存储特性

段晓亚 朱建华 魏 涛 陈倩倩 魏乃科

(四川大学物理科学与技术学院, 四川 成都 610064)

摘要 采用低分子量成膜剂、补充单体及多种光敏剂,开展了绿敏聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物的吸收光谱测试、染料浓度及膜层厚度优化研究,获得了高衍射效率及感光灵敏度的绿敏光致聚合物全息记录材料。实验仅需 20 mJ/cm^2 的曝光量即可获得 82% 的衍射效率,最大衍射效率可达 92% 以上。测试了该材料的角度选择性,对应的布拉格选择角宽度约为 0.57° ;开展了角度复用和空间复用全息存储实验,获得了清晰明亮的全息存储样品。

关键词 全息记录材料; 光致聚合物; 全息存储; 感光灵敏度; 衍射效率

中图分类号 O438.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL20093604.0983

Recipe Optimization and Holographic Storage Characteristics of Green Sensitive Polyvinyl Alcohol/Acrylamide-Based Photopolymer

Duan Xiaoya Zhu Jianhua Wei Tao Chen Qianqian Wei Naike

(Department of Physics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract By employing film-forming polymer with low molecular weights, supplementary monomers and different photosensitive reagents, a green sensitive polyvinyl alcohol/acrylamide based photopolymer with high diffraction efficiency and photosensitivity is reported, the absorption spectra, the effects of dye concentration and film thickness on diffraction efficiency and photosensitivity are studied systematically. Diffraction efficiency higher than 82% is obtained at the exposure level of 20 mJ/cm^2 , maximum diffraction efficiency can reach to 92%. Furthermore, the angular selectivity of the photopolymer is also tested and its corresponding Bragg selective angle width is 0.57° . The preliminary applications of angular and spatial multiplexing holographic storage are also demonstrated, bright and distinct holographic storage samples are obtained readily.

Key words holographic recording material; photopolymer; holographic storage; photosensitivity; diffraction efficiency

1 引 言

基于聚乙烯醇/丙烯酰胺体系的光致聚合物具有较高的感光灵敏度和衍射效率、制作方便、成本低等优点^[1~4],且该水溶性体系与油溶性体系^[5,6]相比还具有无毒环保的优点,引起了国内外研究人员的广泛关注。针对目前聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物空间分辨率不高的问题,徐敏等^[7]提出了一种采用低分子量的聚乙烯醇作为成膜剂来增大折射

率调制度、提高衍射效率及空间分辨率的新方法。实验表明采用低分子量的成膜剂及添加丙烯酸等补充单体可将红敏光致聚合物的分辨率从 $1000 \sim 2000 \text{ lines/mm}$ 有效提高到 3000 line/mm 以上。仅需 40 mJ/cm^2 的曝光量即可获得 85% 的衍射效率。

目前国内外已报道的绿敏聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物材料一般采用藻红 B,曙红 Y,赤藓红 B 等染料作为光敏剂。报道的最大衍射效率(38%

收稿日期: 2008-07-18; 收到修改稿日期: 2008-10-27

基金项目: 国家自然科学基金(60678044)资助课题。

作者简介: 段晓亚(1983-),女,硕士研究生,主要从事高分子全息记录材料及技术等方面的研究。

E-mail: duanxiaoya2005@yahoo.com.cn

导师简介: 朱建华(1970-),男,教授,博士生导师,主要从事信息光学和微光学等方面的研究。E-mail: zhujh@scu.edu.cn

~75%)及对应的曝光量(60~160 mJ/cm²)均有待进一步改善^[8~11]。本文在红敏光致聚合物优化配方的基础上,针对目前已报道的绿敏聚乙烯醇/丙烯酸酯体系光致聚合物材料感光灵敏度及衍射效率不高的问题,重点研究了基于赤藓红、曙红 Y 染料的两种绿敏光致聚合物中染料浓度及膜层厚度对材料全息记录特性的影响,获得了优化的绿敏光致聚合物配方。所记录的绿敏光致聚合物全息光栅的衍射效率及对应的感光灵敏度与国内外已报道结果均有明显的提高。在此基础上开展了该材料的全息存储特性及其在空间复用、角度复用全息存储方面的初步应用研究。

2 光致聚合物干板的制备

作为全息记录材料的光致聚合物体系一般包含光敏剂、光引发剂、一种或多种单体、成膜剂等。全息干板采用丙烯酸酯作为主要单体,亚甲基双丙烯酸酯和丙烯酸作为促进剂和补充单体,三乙醇胺作为光引发剂,低分子量(9000)的聚乙烯醇作为成膜剂。除光敏染料以外的化学试剂的浓度配比均与红敏光致聚合物的优化配方一致^[7],分别是:聚乙烯醇质量分数 5%,丙烯酸酯质量分数 2.4%,亚甲基双丙烯酸酯质量分数 0.45%,丙烯酸体积分数 2%,三乙醇胺体积分数 0.2%。分别在安全灯下添加一定浓度的若丹明、曙红、曙红 Y 和刚果红、赤藓红等绿敏染料作为光敏剂制备好不同厚度的光致聚合物干板,置于温度 20~25 ℃,湿度 50%~70%的暗室中干燥两天备用。

3 绿敏光致聚合物的配方优化

3.1 吸收光谱测试

为了选择合适的绿敏染料,分别采用若丹明、曙红、曙红 Y 和刚果红、赤藓红等染料制备了 5 种不同的绿敏光致聚合物全息干板,使用日本岛津 UV2550 型紫外可见分光光度计对其吸收光谱进行了测试分析,吸收光谱如图 1 所示。

使用不同染料所制备的光致聚合物干板的吸收峰位置及吸收强度均不相同。为了获得更好的感光性能,要求所用的染料需与全息记录所用的激光光源相匹配。光谱测试表明,若丹明染料的最大吸收峰为 534 nm,曙红为 527 nm,曙红 Y 为 527 nm,刚果红在 513 nm 和 542 nm 处有很弱的吸收峰,赤藓红的最大吸收峰为 537 nm。除刚果红外其他 4 种染料

所制备的光致聚合物干板在波长 514 nm,532 nm 处均有较大的吸收,因此可以用输出波长 514.5 nm 的 Ar⁺ 激光器及输出波长为 532 nm 的倍频 Nd:YAG 连续波激光器作为记录光源。通过对以上 5 种光致聚合物干板进行初步的全息记录实验,从衍射效率及感光成像速度等指标综合考虑,选用曙红 Y 和赤藓红作为绿敏染料,进行进一步的实验优化。

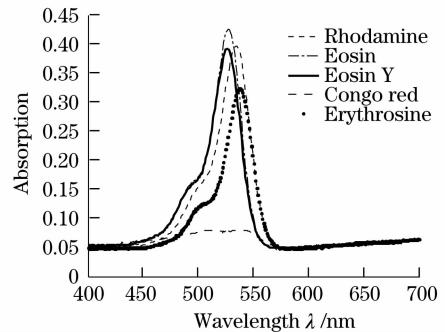


图 1 不同绿敏光致聚合物的吸收光谱比较
Fig. 1 Absorption spectra of different green sensitive photopolymers

3.2 染料浓度的优化及分析

为了测试染料曙红 Y 和赤藓红的浓度对光致聚合物干板衍射效率和感光灵敏度的影响,采用赤藓红及曙红 Y 染料制作了质量分数分别为 3×10^{-5} 、 4.5×10^{-5} 和 6×10^{-5} 的 6 种不同的全息干板,板的厚度均为 60 μm。由于所用染料的浓度均不高,在干板干燥过程中未见明显的染料析出现象。实验中利用 Ar⁺ 激光器发出的 514 nm 波长的绿色激光记录非倾斜透射全息光栅来考察光致聚合物全息干板的感光特性。为便于比较,所记录的全息光栅的空间频率固定为 1000 lines/mm。全息图记录完成后,采用红外灯均匀照明来对全息图进行热定影,这可以进一步漂白光敏染料,使得处理后的全息图吸收非常低,衍射效率高。

图 2(a)是采用 3 种不同浓度的赤藓红染料制备的光致聚合物全息光栅衍射效率与曝光量的关系曲线。当赤藓红质量分数为 3×10^{-5} 时,需要 120 mJ/cm² 的曝光量才能达到最大衍射效率 86%;质量分数为 4.5×10^{-5} 时,需要 120 mJ/cm² 的曝光量达到衍射效率 64.5%;质量分数为 6×10^{-5} 时,曝光量为 20 mJ/cm² 时便可达到 60.8% 的衍射效率,需要 100 mJ/cm² 的曝光量即可达到最大衍射效率 92%。可见赤藓红质量分数为 6×10^{-5} 的光致聚合物材料具有较高的曝光灵敏度,相同曝光量下其衍射效率也普遍高于其他两种,在全息记录性能上优于其他两种干板。

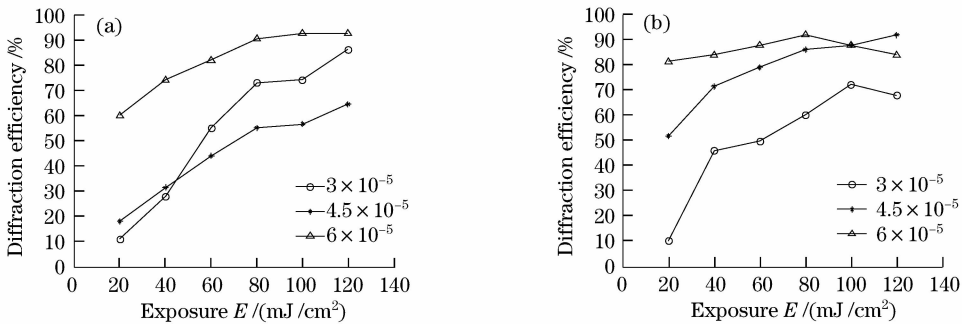


图 2 不同赤藓红浓度(a)和曙红 Y 浓度(b)的光致聚合物全息光栅的衍射效率与曝光量的关系曲线

Fig. 2 Diffraction efficiency as a function of exposure for different concentration of erythrosine dye (a) and eosin Y (b)

图 2(b)是采用 3 种不同浓度的曙红 Y 染料制备的光致聚合物全息光栅衍射效率与曝光量的关系曲线。当曙红 Y 质量分数为 3×10^{-5} 时,需要 100 mJ/cm² 的曝光量才能达到最大衍射效率 72.5%;质量分数为 4.5×10^{-5} 时,需要 120 mJ/cm² 的曝光量达到最大衍射效率 92%;曙红 Y 质量分数为 6×10^{-5} 时,曝光量为 20 mJ/cm² 时可达 82% 的衍射效率,仅需 80 mJ/cm² 的曝光量即可达到最大衍射效率 92%。显然,染料质量分数从 3×10^{-5} 增加到 6×10^{-5} ,材料的曝光灵敏度及衍射效率有明显的升高,即曙红 Y 质量分数为 6×10^{-5} 的光致聚合物材料具有更为优良的全息记录性能。

比较图 2(a)中赤藓红质量分数为 6×10^{-5} 及图 2(b)中曙红 Y 质量分数为 6×10^{-5} 的光致聚合物的曝光曲线还可以发现,尽管两种干板均可达到 92% 的最高衍射效率,但后者在相同曝光量下可获得更高的衍射效率,达到最大衍射效率所需的曝光量也小于前者,即采用曙红 Y 染料的绿敏光致聚合物的全息记录性能优于采用赤藓红染料的绿敏光致聚合物。

表 1 已报道的绿敏聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物的全息记录性能比较

Table 1 Comparison of holographic recording characteristics of different green sensitive polyvinyl alcohol/acrylamide-based photopolymers which have been reported

	Green sensitive dye	Maximum diffraction efficiency/%	Exposure for maximum diffraction efficiency / (mJ/cm ²)
Reference 8	Yellowish eosin	75	70
Reference 9	Erythrosine B	50	60
Reference 10	Erythrosine B	55	100
Reference 11	Safranin T	40	130

表 1 给出了目前国内外已报道的几种绿敏聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物的全息记录性能,列出了其所用染料、最大衍射效率及所需的曝光量。

对比以上结果可以看出,制备的曙红 Y 质量分数为 6×10^{-5} 的光致聚合物仅需 20 mJ/cm² 的曝光量即可达到 82% 的衍射效率,曝光量为 80 mJ/cm² 时可达最大衍射效率 92%。可见本文报道的光致聚合物材料在最大衍射效率及感光灵敏度等指标上均优于国内外已报道的结果。经过初步分析后认为其原因在于我们的光致聚合物配方中采用了低分子量的聚乙烯醇作为成膜剂,并且在体系中添加丙烯酸作为促进剂和补充单体,其作用在于^[4,7]:

1) 小分子量聚乙烯醇的分子链结构更短,相互之间的缠结更少,这样的成膜剂可以使其他组分均匀地分散其中,提高感光胶的成膜性能,有助于提高成像质量;

2) 小分子量聚乙烯醇可以降低感光胶的粘度,这样光聚合反应过程中单体迁移受到的阻力小,一方面可以更容易地从暗区向明区迁移,提高感光成像速度;另一方面可以促使更多的单体在明区聚合,增大明区的折射率,从而提高材料的折射率调制度,增大衍射效率;

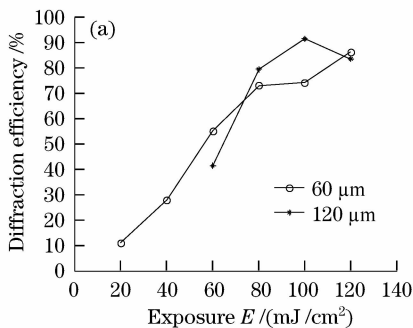
3) 丙烯酸的作用有两个:一是保持感光膜层中一定的湿度,在光化学反应过程中可使产生的自由基更易移动,从而提高反应速度,即提高了体系的感光灵敏度;二是作为单体参与光化学反应,增加折射率调制度,提高衍射效率。

3.3 膜层厚度对衍射效率及灵敏度的影响

合适的厚度为光致聚合反应提供了一个恰当的反应空间,厚度的增加可使单位体积内的单体量增多,为达到有效的折射率调制度提供了保证。厚度还与材料的角度选择性直接相关,决定了在记录材料的同一位置处以角度复用全息存储方式可以记录的全息图数目,即对存储密度有重要影响。

图 3(a)给出了赤藓红质量分数为 3×10^{-5} ,厚度分别为 60 μm 和 120 μm 的 1000 lines/mm 光致聚合物全息光栅的衍射效率与曝光量的关系曲线。

60 μm 的干板在曝光量为 120 mJ/cm^2 时最大衍射效率可达到 86%，120 μm 的干板在曝光量为



100 mJ/cm^2 时最大衍射效率可达到 91.5%，厚板的感光灵敏度及最大衍射效率均有所提高。

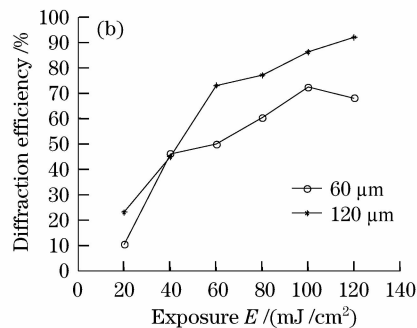


图 3 赤藓红染料(a)和曙红 Y(b)光致聚合物全息光栅衍射效率与曝光量的关系曲线

Fig. 3 Diffraction efficiency as a function of exposure for holographic grating of different thickness of erythrosine dye (a) and eosin Y dye (b)

图 3(b)给出了曙红 Y 染料质量分数为 3×10^{-5} ，厚度分别为 60 μm 和 120 μm 的 1000 lines/mm 光致聚合物全息光栅的衍射效率与曝光量的关系曲线。60 μm 的干板在曝光量为 100 mJ/cm^2 时最大衍射效率可达到 72.5%，而 120 μm 的光致聚合物干板在 100 mJ/cm^2 曝光量时可达 86% 的衍射效率，在相同的曝光量下，厚度为 120 μm 的光致聚合物干板的衍射效率普遍高于厚度为 60 μm 的光致聚合物干板。

从图 3 可以看出厚板的衍射效率普遍比薄板的高，可见适当地增加厚度可使感光灵敏度得到提高。这种现象可以认为是随单位体积内的单体量增大，聚合时迁移的距离缩短，从而加速单体聚合。但是随着厚度的增加，板对光的吸收、反射愈加严重，而且还易引起皱缩效应造成布拉格角度的偏移^[12~13]，故板须保持在适当的厚度。

4 空间复用及角度复用全息存储实验

4.1 角度选择性测试

由 Kogelnik 的耦合波理论，无吸收体积型透射相位光栅的衍射效率可表示为^[14]

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

其中 ξ 表示布拉格失匹配因子， ν 为光栅的有效光学厚度，可表示为

$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda (\cos \theta_r \cos \theta_s)^{1/2}}, \quad (2)$$

其中 Δn 是折射率调制度， d 是光栅厚度， λ 是再现光波长， θ_r 和 θ_s 分别是照明光波和衍射光波与光栅平面法线的夹角。

当再现光波长与记录波长一致时，可用再现光波入射角与布拉格角 θ_b 之间的偏移量 $\delta\theta$ 来表示 ξ

$$\xi = \frac{Kd \sin(\Phi - \theta_r)}{2 \cos \theta_s} \delta\theta, \quad (3)$$

K 表示光栅的传播矢量，等于 $2\pi/\Lambda$ ， Λ 表示光栅的周期。 Φ 表示光栅传播矢量与光栅表面法线的夹角。

对非倾斜体积型透射光栅而言， $\Phi = \pi/2$ ， $\theta_r = -\theta_s$ ，这时

$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta_r}, \quad \xi = \frac{2\pi n d \sin \theta_b}{\lambda} \delta\theta, \quad (4)$$

其中 n 为光栅的平均折射率。

由公式(1)可知，随着布拉格失匹配因子的增加，相位型体积透射全息光栅的衍射效率急剧下降。当光栅的衍射效率下降到零时，相应的布拉格偏移因子 ξ 约为 2.72，这时布拉格选择角宽度 $\Delta\theta$ 可由公式(4)推导出^[15]

$$\Delta\theta = \frac{2.72\lambda}{2\pi n d \sin \theta_b}. \quad (5)$$

对所制备的空间频率 1000 lines/mm，膜层厚度 60 μm ，平均折射率 1.5 的光致聚合物透射体积光栅的角度选择性进行了测量，并与理论值进行了对比，结果如图 4 所示。

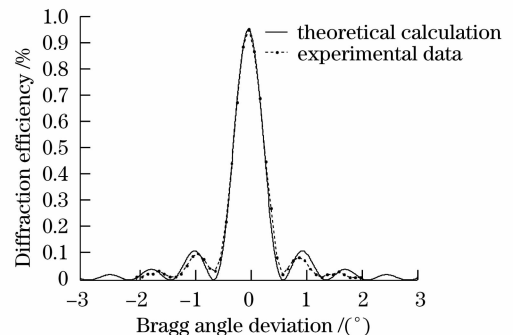


图 4 透射型光致聚合物体积相位光栅的角度选择性曲线

Fig. 4 Angular selectivity curve of a photopolymer volume transmission grating

由图 4 可以看出,当再现光波的入射角与布拉格角之间的偏移量增加时,全息光栅的衍射效率从峰值很快下降到零。实验测得的演化趋势曲线与理论值吻合得较好,其对应的布拉格选择角宽度曲线主瓣的半高全宽(FWHM)约为 0.57° 。这样就保证了在全息记录材料的同一位置处可以通过改变参考光角度记录多幅全息图,而不会在再现时引起全息图之间的干扰,产生串话。

4.2 复用全息存储实验

为了验证该光致聚合物用于全息存储的可能性,采用图 5 所示的典型傅里叶变换全息图记录光路来进行全息存储实验。分束器将入射的 Ar^+ 激光分为两束,其中一束(物光)经过空间滤波和准直后照射在物面上,物面位于傅里叶变换透镜的前焦面。将全息干板放置在傅里叶变换透镜的后焦面附近,用来记录物体的傅里叶变换谱与参考光干涉后形成的干涉条纹。

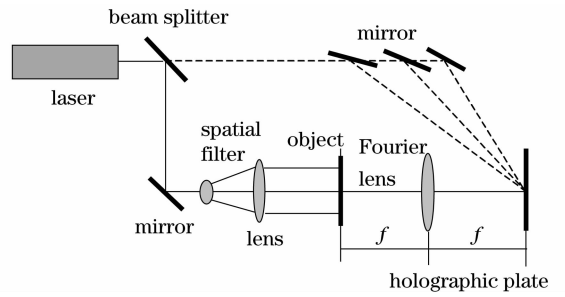


图 5 空间复用和角度复用全息存储实验装置图
Fig. 5 Experimental setup for spatial and angular multiplexing holographic storage

在图 5 中通过平行地移动全息干板,以空间复用全息存储方式在干板的不同位置记录下多幅全息图。图 6(a)是其中三幅全息图的光学再现图像。可以看出再现像有很高的亮度和清晰度,且相互之间无串扰。由于每幅全息图的记录面积大约 0.5 mm^2 ,从而采用空间复用全息存储方式在 1 cm^2 的面积上可以存储超过 150 幅的全息图,存储密度超过 1 Gbits/cm^2 。

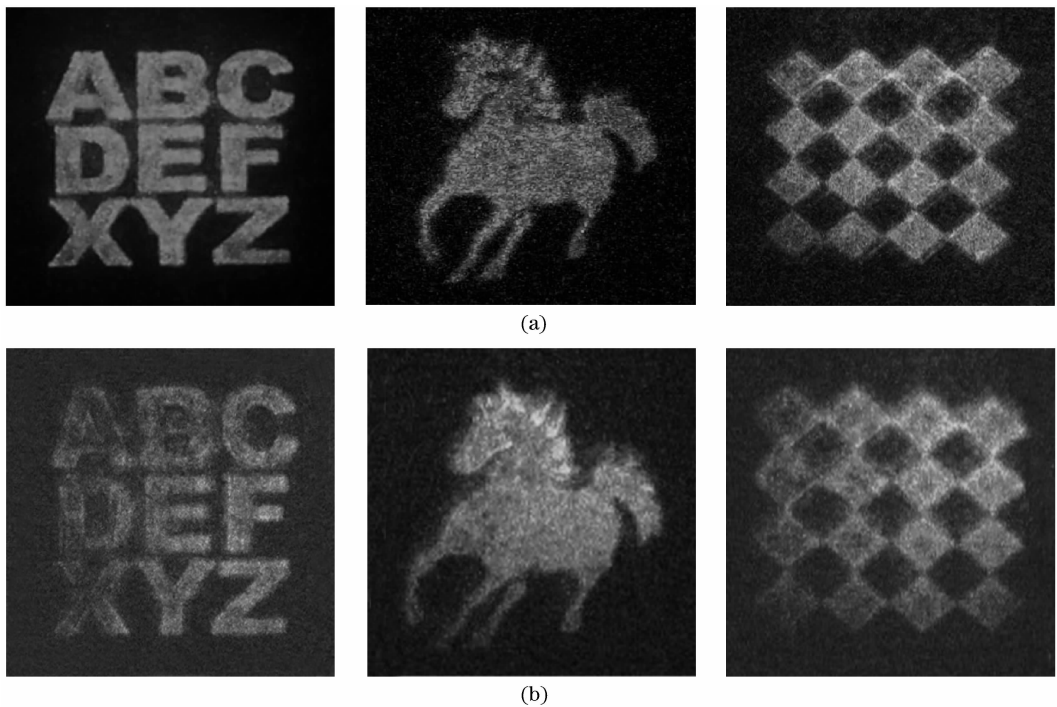


图 6 采用光致聚合物进行空间(a)和角度(b)复用全息存储的再现图像

ig. 6 Reconstructed images of photopolymer by spatial (a) and angular (b) multiplexing holographic storage

在图 5 中通过改变参考光的角度,可以角度复用全息存储方式在干板的同一位置处记录多幅全息图。图 6(b)是其中三幅全息图的光学再现图像,再现像清晰且相互之间无明显的串扰。

利用角度复用在光致聚合物材料上进行多幅全息图的存储时,为了避免相邻全息图之间的串话,记录角之间的间隔必须大于布拉格选择角,故所使用的全息记录材料的布拉格选择角宽度越小,理论上

可以获得更高的存储密度。通过之前的实验测试,知道膜厚 $60\text{ }\mu\text{m}$ 的 1000 lines/mm 光致聚合物全息光栅的布拉格选择角大约是 0.57° 。因此,如果将参考光的入射角度从 30° 改变到 60° ,则在干板的同一位置处角度复用存储的全息图数目将可超过 50 幅。

该光致聚合物全息记录材料具有良好的环境稳定性,全息图在通常的实验室环境下可长期保存,不加任何保护措施,所记录的图像已保存半年以上,未

见明显的退化现象。

5 结 论

通过引入低分子量的聚乙烯醇作为成膜剂并添加丙烯酸作为促进剂和补充单体,开展绿敏染料优选、染料浓度及膜层厚度优化等研究工作,有效地提高了绿敏聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物全息记录材料的感光灵敏度及衍射效率。所记录的透射体积相位光栅仅需 20 mJ/cm^2 的曝光量即可获得 82% 的衍射效率,最大衍射效率可达 92% 以上。初步实验表明该绿敏光致聚合物全息材料具有良好的角度选择性,在角度复用及空间复用高密度数字全息存储等领域有良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 S. Martin, C. A. Feely, J. T. Sheridan *et al.*. Applications of a self-developing photopolymer material: Holographic interferometry and high efficiency diffractive optical elements [C]. *SPIE*, 1998, **3294**:60~70
- 2 Yao Huawen, Huang Mingju, Chen Zhongyu *et al.*. Optimization of two-monomer-based photopolymer used for holographic recording[J]. *Mater. Lett.*, 2002, **56**(1-2):3~8
- 3 R. Mallavia, A. Fimia, C. Garcia *et al.*. Two dyes for holographic recording material panchromatic ion pair from rose bengal and methylene blue[J]. *Mod. Opt.*, 2001, **48**(6):941~945
- 4 Guo Xiaowei, Xie Andong, Wu Donglan *et al.*. Research on improving diffraction efficiency of red-sensitivity acrylamide-based photopolymer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9):1238~1242
郭小伟, 谢安东, 伍冬兰 等. 基于丙烯酰胺为单体的红敏光致聚合物衍射效率增强的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9):1238~1242
- 5 Paul M. Hubel, Michael A. Klug. Color holography using multiple layers of du pont photopolymer[J]. *SPIE*, 1992, **1667**:215~224
- 6 Zhang Cunlin, Yu Meiwen, Yang Yongyuan *et al.*. Noval photopolymer holographic recording material and application [J]. *Acta Optica Sinica*, 1993, **13**(8):728~733
张存林, 于美文, 杨永源 等. 新型防潮的光致聚合物全息记录材料及其应用[J]. *光学学报*, 1993, **13**(8):728~733
- 7 Xu Min, Zhu Jianhua, Chen Li *et al.*. Spatial resolution of polyvinyl alcohol/acrylamide based photopolymer holographic recording material [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(4):616~620
徐 敏, 朱建华, 陈 力 等. 红敏聚乙烯醇/丙烯酰胺体系光致聚合物全息记录材料的空间分辨力增强研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(4):616~620
- 8 E. Fernandez, C. Garcia. Optimization of a thick polyvinyl alcohol-acrylamide photopolymer for data storage using a combination of angular and peristrophic holographic multiplexing [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(29):7661~7666
- 9 Gong Qiaoxia, Wang Sulian, Huang Mingju *et al.*. Study on holographic properties of a water-resistant acrylamide-based photopolymer [J]. *J. Functional Materials and Devices*, 2005, **11**(2):233~237
弓巧侠, 王素莲, 黄明举 等. 一种新型绿敏光致聚合物及全息特性研究[J]. *功能材料与器件学报*, 2005, **11**(2):233~237
- 10 Yao Huawen, Huang Mingju, Chen Zhongyu *et al.*. Preparation of green sensitive photopolymer and investigation of its holographic data storage characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8):1021~1024
姚华文, 黄明举, 陈仲裕 等. 绿敏光致聚合物的制备及其光全息存储性能研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8):1021~1024
- 11 Xiao Yong, Sun Caixia, Tang Daoguang *et al.*. A new safranin T sensitized photopolymer for holographic recording [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(4):2278~2283
肖 勇, 孙彩霞, 唐道广 等. 番红花红 T 光敏感光致聚合物全息存储材料[J]. *物理学报*, 2008, **57**(4):2278~2283
- 12 Huang Mingju, Yao Huawen, Chen Zhongyu. The effect of the thickness of photopolymer on high-density holographic recording parameters[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2002, **31**(2):246~249
黄明举, 姚华文, 陈仲裕. 厚度对光聚合物高密度全息存储记录参数的影响[J]. *光子学报*, 2002, **31**(2):246~249
- 13 Zhuo Duhua, Tao Shiquan, Shi Mingquan *et al.*. Shrinkage of photopolymer for holographic recording materials [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2007, **34**(11):1543~1547
褚渡华, 陶世荃, 施盟泉 等. 全息记录材料光致聚合物的收缩率 [J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1543~1547
- 14 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick hologram gratings [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48**(9):2909~2947
- 15 Chen Li, Jianhua Zhu, Jianfeng Li *et al.*. Spatial resolution enhancement of a red-sensitive acrylamide based photopolymer and its holographic applications [C]. *SPIE*, 2005, **5939**:93~101