

文章编号: 1001-3806(2008)05-0545-03

## 一种抗湿性光聚物在不同厚度下的全息特性

孙彩霞, 王素莲, 李若平, 路海, 唐道广, 黄明举\*  
(河南大学 光学与光电技术研究所, 开封 475001)

**摘要:** 为了得到一种抗湿性光致聚合物在不同厚度下的全息特性, 采用在介质中记录透射光栅等和理论分析的方法, 取得了样品全息特性参量衍射效率、感光灵敏度、折射率调制度、动态范围在不同厚度下的数据。结果表明, 随着厚度的增加, 衍射效率出现了先增大而后减小的趋势; 感光灵敏度和折射率调制度持续减小; 动态范围呈先增大而后减小然后再增大的趋势。通过对不同厚度下各全息特性参量的对比发现, 此种光致聚合物存在最佳厚度。

**关键词:** 全息; 光致聚合物; 衍射效率; 感光灵敏度; 折射率调制度; 动态范围

**中图分类号:** O438.1 **文献标识码:** A

### Holographic characteristic parameters of a water-resistant photopolymer in different thickness

SUN Cai-xia, WANG Su-lian, LI Ruoping, LU Hai, TANG Dao-guang, HUANG Ming-ju  
(Institute of Optics & Optoelectronics Technique, Henan University, Kaifeng 475001, China)

**Abstract** The holographic characteristic parameters of the material such as the diffraction efficiency, the exposure sensitivity, the refractive index modulation and the dynamic range with different thickness were studied. As the thickness of the photopolymer increases, the diffraction efficiency increases at first and then decreases, the exposure sensitivity and the refractive index modulation decreases continuously, the dynamic range decreases at first and then increases. And the trends of these changes are simply analyzed in theory. From the contrast of the holographic characteristic parameters in different thickness, it can be seen that this photopolymer has an optimal thickness.

**Key words** holography; photopolymer; diffraction efficiency; exposure sensitivity; refractive index modulation; dynamic range

### 引 言

随着知识经济的迅速发展, 全球的信息量以成倍的速度增长, 在现有的存储技术均接近物理极限仍不能满足要求的情况下, 人们都在千方百计地寻找新的具有超高密度、超大容量和超高速度的信息存储技术。光学全息存储因其具有 3 维体存储和并行读写的能力, 以及易实现超高密度、超大容量和超高速等优点而成为当今国际上信息存储领域的研究热点之一<sup>[1-3]</sup>。在厚的全息存储介质中记录体全息光栅, 将传统的 2 维信息存储扩展到 3 维体信息存储, 密度较光盘要高 3 个以上数量级<sup>[4]</sup>。所以, 厚度是体全息存储材料最重要的基本参量之一, 增加材料的厚度有利于增大体全息存储的密度和容量<sup>[5]</sup>。折射率调制度和动态范围对其也有一定的影响; 而且曝光灵敏度还涉及到超

高速度的要求。所以, 在增加厚度以提高全息存储材料的存储容量的同时, 也综合考虑其曝光灵敏度、最大折射率调制度和动态范围等全息特性参量对全息存储材料的影响。国际上有的光致聚合物的衍射效率最大能达到 99%, 灵敏度为  $5\text{mJ}/\text{cm}^2$ , 最大折射率调制度可以达到  $10^{-2} \sim 10^{-3}$ ; 国内全息存储材料研制方面也得到了长足的发展。由于以三乙醇胺 (triethanolamine, TEA) 为光引发剂的光致聚合物, 虽然具有较高的衍射效率、高的灵敏度、良好的塑型性, 但样品有严重的吸水现象, 致使对光的散射加重, 衍射效率大幅度降低; 以 N-苯基甘氨酸 (N-phenylglycine, NPG) 为光引发剂的光致聚合物不易吸水, 膜表面保持干燥, 抗湿性好, 所制备的膜对环境不敏感, 材料的稳定性增加。即以 TEA 和以 NPG 为光引发剂的光致聚合物各有优缺点<sup>[6]</sup>。综合考虑, 在此实验中则以 TEA 和 NPG 共同为光引发剂, 以聚乙烯醇 (polyvinyl alcohol, PVA) 为粘结剂, 以丙烯酸 (acrylamide, AA) 和 N,N'-亚甲基双丙烯酰胺 (N,N'-methylenebisacrylamide, BAA) 为单体, 以赤藓红 B (ERB) 和亚甲基蓝 (methylene blue, MB) 为

作者简介: 孙彩霞 (1981-), 女, 硕士研究生, 主要从事光全息信息存储研究。

\* 通讯联系人。E-mail: hmj@163.com

收稿日期: 2007-04-15; 收到修改稿日期: 2007-12-05

光敏剂,制备了不同厚度的抗湿性光致聚合物厚膜,并对它们的各全息特性参量进行了计算和理论分析。通过对不同厚度下各全息特性参量的对比发现:此种光致聚合物存在最佳厚度。

## 1 样品的制备

制备方法如下<sup>[7]</sup>:在普通实验室条件下(室温 20℃~22℃、相对湿度为 40%~70%),取适量的各实验药品按实验步骤依次溶于去离子水中搅拌制得到 30mL 的均匀混合溶液。然后取不同量的混合溶液滴涂在 6.0cm×6.0cm 干净的光学玻璃片上。在暗室中自然干燥 24h~48h 固化后得到厚度分别为 95μm, 105μm, 140μm, 163μm, 191μm, 211μm 的光致聚合物厚膜。此种光致聚合物厚膜的各组分含量见表 1。

Table 1 Concentrations of the composition of the photopolymer film

| com position | con centration              |
|--------------|-----------------------------|
| PVA          | 0.08(mass fraction)         |
| AA           | 0.34mol/L                   |
| BAA          | 0.057mol/L                  |
| TEA          | 0.375mol/L                  |
| NPG          | $1.06 \times 10^{-2}$ mol/L |
| MB           | $3 \times 10^{-3}$ mol/L    |
| EAB          | $3 \times 10^{-3}$ mol/L    |

## 2 实验装置

对于体全息存储,衍射效率不仅直接影响页面再现时的亮度,而且决定了在同一体积中可以存储的页面数目<sup>[4]</sup>。用图 1 所示的光路图进行透射性衍射光栅的记录。其中 M 是反射镜,BS 是渐变分束镜,SH<sub>1</sub>,

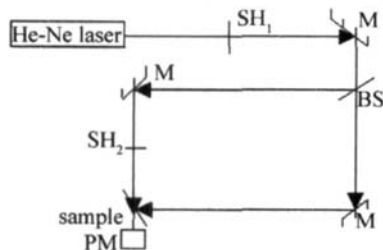


Fig 1 The experimental setup for diffraction efficiency

SH<sub>2</sub> 是快门,PM 是功率能量计, sample 是要测的光致聚合物厚膜。He-Ne 激光器发出的波长为 632.8nm 光束被分束器 BS 分成两束光强比为 1:1 的参考光和物光。记录非倾斜光栅时参考光束、物光束对称入射到样品上,光束与样品法线夹角  $\theta$  均为 45°,当关闭快门 SH<sub>2</sub>,用参考光来读出衍射光强。

## 3 结果和讨论

### 3.1 不同厚度下的衍射效率

厚度是影响光致聚合物衍射效率的因素之一,在

理论上衍射效率和厚度存在如下关系<sup>[8]</sup>:

$$\eta = \sin^2 \nu = \sin^2 \left[ \frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \theta} \right] \quad (1)$$

式中,  $\lambda$  是入射光波长、 $\theta$  是介质中再现光束和法线之间的夹角、 $\Delta n$  是介质的折射率调制度。从上式可以看出,在  $\lambda$ 、 $\theta$  一定的条件下,衍射效率先随着介质的厚度  $d$  的增加而增加。若调制参量  $\nu = k \frac{\pi}{2}$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ) 时,此时介质的衍射效率能达到最大。此时的厚度称为最佳的介质厚度<sup>[5]</sup>。从上述理论分析结果来看,此光致聚合物存在一个最佳厚度,那么就可以解释图中出现的变化趋势。

图 2 所示的是不同厚度下光致聚合物的衍射效率随曝光时间的变化。从图 2 中还可以看出,当光致聚

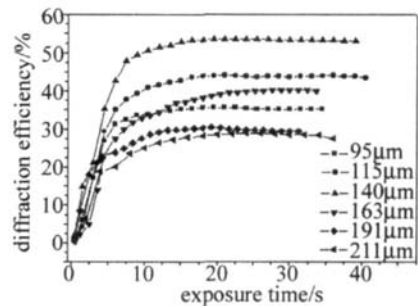


Fig 2 The diffraction efficiency vs exposure time with the different thickness

合物介质的厚度很小时,衍射效率也很小;当厚度增加并达到 140μm 时衍射效率达到最大值;再增加光致聚合物材料介质的厚度,衍射效率反而变小。所以,此光致聚合物存在有一最佳厚度,大小为 140μm。理论上带入各参量值时,最佳厚度在 140μm 左右,综合实验条件得到了最佳厚度为 140μm。从图 2 又可以看见,衍射效率达到最大时所用的时间都比较短,这可能因为厚膜本身的质量比较好,光散射比较小,吸收的入射光光强相应地增大;又因为两种光引发剂提供的光引发系统更充分,光化学反应也就越快。综合考虑这两种情况,那么达到最大衍射效率所用的时间更短。

### 3.2 不同厚度下的感光灵敏度

记录介质的感光灵敏度直接影响到存储器写入及写出过程的速率。对此光致聚合物来说,感光灵敏度也是重要的考查参量之一。感光灵敏度是指记录介质受到光照后其响应的灵敏程度。对不同厚度的介质感光灵敏度也有所不同。通过实验结果和相关的计算,从图 3 可知:随着薄膜厚度的增加感光灵敏度是持续减小。原因可能是随着样品厚度的增加,介质中所包含的光敏剂和单体均大量增加,而要聚合反应充分,必须使样品中作为光敏剂的染料全部漂白、单体全部聚合,在此过程中自然就需要更多的曝光能量<sup>[4]</sup>。所以

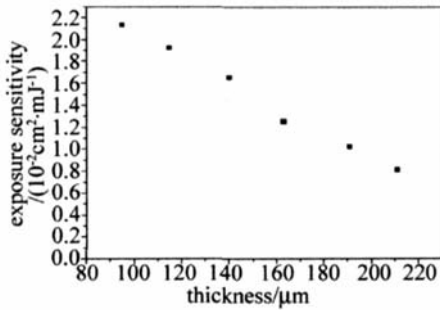


Fig 3 The exposure sensitivity vs thickness

当厚度持续增加时,充分反应所需要的曝光能量逐渐增大,那么光致聚合物材料的感光灵敏度就逐渐减小。综上所述,出现了如图 3 所示的光致聚合物材料曝光灵敏度值持续下降的趋势。但因为此光致聚合物组成了更有效的光引发系统,故感光灵敏度总体上都比较大。

### 3.3 不同厚度下的折射率调制度

当在介质材料中记录全息信息时,参考光和物光在样品内部形成了干涉花样。亮条纹区光强较强,单体聚合较快,形成的聚合物浓度较大;干涉花样的暗条纹区相应光强较弱,单体不易聚合,聚合物浓度很小。因此,聚合物浓度的非均匀分布产生了折射率调制,在样品中,记录了折射率调制的位相型全息图<sup>[9]</sup>。所以,折射率调制度的大小是衡量全息存储材料记录全息图像质量的重要参量。根据耦合波理论<sup>[10]</sup>,材料所具有的最大衍射效率  $\eta_{\text{max}}$  和最大折射率调制度  $\Delta n$  存在如下关系:

$$\Delta n = \sin^{-1}(\eta_{\text{max}})^{1/2} \lambda \cos\theta / (\pi d) \quad (2)$$

式中,  $d$  是材料的厚度,  $\lambda$  是记录所用波长,  $\theta$  是记录时参考光的入射角。

从图 4 可看出,  $\Delta n$  的值随厚度的增加而持续减小。这种结果和感光灵敏度的结果一样,在理论上它

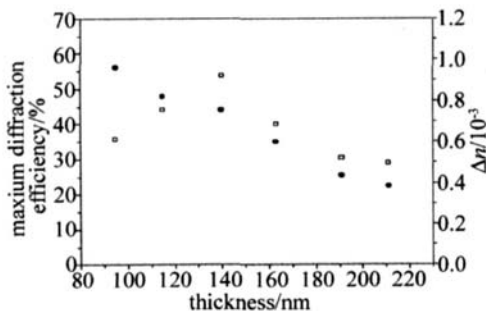


Fig 4 The refractive modulation vs thickness

的讨论过程也和感光灵敏度类似。不同的只是最大衍射效率和厚度的变化之间存在的关系对其的影响。通过计算和讨论发现,此结果和参考文献 [11] 中的结果基本相同。

### 3.4 不同厚度下的动态范围

对高密度存储材料来说,动态范围是一个重要参

量。它是确定材料复用度和存储容量的主要参量,常用  $M^{\#}$  表示。其定义是<sup>[6]</sup>:

$$M^{\#} = \sqrt{\eta M} \quad (3)$$

式中,  $M$  是可存储的总全息图数目,  $\eta$  是最终每个全息图的衍射效率,要直接利用此式来确定  $M^{\#}$ , 需知道可存储的全息图数量和每个全息图的衍射效率。此处根据高密度全息存储的均分饱和衍射效率的原理,利用参考文献 [4] 中的方法来确定此材料的动态范围。不同厚度记录材料的动态范围计算结果如图 5 所示。从

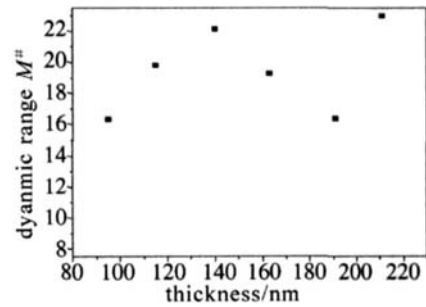


Fig 5 Dynamic range vs thickness

图 5 可以看出,随着光致聚合物厚度的增加,衍射效率也在增加,在此过程中光致聚合物的动态范围也相应地增加,其后光致聚合物厚度持续增加,衍射效率出现减小的趋向,光致聚合物的动态范围也相应地减小;但光致聚合物厚度再持续增加时,衍射效率继续减小,但是动态范围却增大。出现这种情况的原因解释如下:动态范围不但与介质的衍射效率有关,而且和在介质中可存储的总全息图数目也有关系。当介质厚度增加到一定程度时,在介质中可存储的总全息图数目值也相应地增加,虽然此时衍射效率有所减小,但是介质的动态范围却有所增加,这符合理论关系 (3) 式。

## 4 结 论

在实验中制备了不同厚度的光致聚合物厚膜,并计算了不同厚度下的光致聚合物厚膜的特性参量。各值的变化趋势并不是随厚度的增加而单一的增加或减小,所以从理论上对各种变化进行了简要的分析。对不同厚度下的各参量进行了比较,发现在厚度为  $105\mu\text{m} \sim 163\mu\text{m}$  时,此种光致聚合物薄膜介质的各参量值能达到最佳。此种光致聚合物的理想厚度可取值为  $140\mu\text{m}$ 。

### 参 考 文 献

- [1] GAN F X. Digital optical disk recording technique [M]. Beijing Science Press 1998 306 (in Chinese).
- [2] YN Q, ZHUA IFX, LIR P, *et al*. Study on the holographic characteristics of a red sensitive photopolymer [J]. Laser Technology, 2007, 31 (2): 123-126 (in Chinese).

和光腰  $w$  处的光强时间的变化得到的光强起伏方差, 与 ANDREWS 等人的理论分析值进行了比较, 见图 6

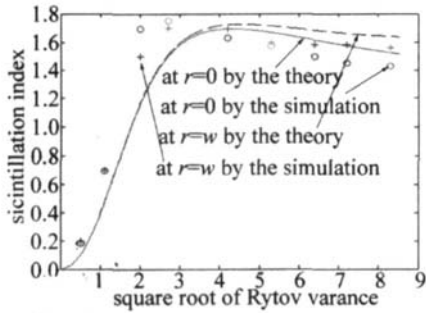


Fig 6 The compare of the theory and simulation

由图可知: (1) 从理论得到的光轴和光腰处的光强起伏方差图像可以看出, 同一高斯光束在同一传输距离的情况下, 当湍流比较弱时, 光强起伏会随着湍流的加强而变大, 但当湍流强度增加到一定程度时, 光强起伏方差不会随湍流的增大而增大, 达到峰值后, 光强起伏方差反而会随着湍流的加强有一定的下降, 最后趋近于某一饱和值, 这个结论也得到了很多实验的证实<sup>[9]</sup>; (2) 光轴和光腰的光强起伏方差大小会有所不同, 随着湍流的加强, 光腰处的起伏要比光轴上稍大; (3) 模拟的结果和理论分析的静态统计值有很好的吻合。由于在计算高斯光束光强起伏时选用的是对接受面上的光轴和光腰处随时间的起伏情况的分析, 所以, 对每一种湍流强度下高斯光束的传输都要进行大量的模拟计算, 从图中可以看出, 在一定的条件下和误差容许的范围内, 模拟结果和理论值吻合得较好。

### 3 结论

大气湍流造成的光强起伏一直是困扰着近地激光工程应用的一个重要影响因素, 虽然由于大气湍流的随机性造成了分析的难度, 但是通过理论上的分析和数值模拟可以得到高斯光束通过湍流之后的光强起伏的统计参量, 这对近地激光应用将会有很积极的作用。

#### 参考文献

- [1] WU J YANG Ch P. The theory of optic trans it in the atmosphere [M]. Beijing Beijing University of Posts and Telecommunications Press 2005: 155-189( in Chinese).
- [2] ZHANG Y X, TAO Ch K. Wave structure function of light wave propagating in turbulent atmosphere [J]. Laser Technology, 2004, 28(4): 337-339( in Chinese).
- [3] HILL R J CLIFFORD S F. Theory of saturated fluctuations in the laser radiation intensity in a turbulent medium [J]. Soviet Russia Physics JETP, 1981, 39: 605-614.
- [4] MARTIN J Simulation of wave propagation in random media theory and application [J]. SPIE, 1992, 6652: 192-197.
- [5] ZHANG H M. The research of simulation of laser trans it in the atmosphere turbulence [D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics of Chinese Academy of Sciences, 2005: 9-11( in Chinese).
- [6] WANG Sh F, ZHU Z Q. Contemporary principles of optics [M]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China Press, 1998: 86-114 ( in Chinese).
- [7] ANDREW S L C, AL-HABASH M A, HOPEN C Y, *et al*. Theory of optical scintillation Gaussian-beam wave mode [J]. Wave Random Media 2001( 11): 271-291.
- [8] ANDREWS L C, HILL P S R L. Laser beam propagation through random media [M]. Bellingham, USA: SPIE Optical Engineering Press, 2001: 1-20.
- [9] PARRY G. Measurement of atmospheric turbulence induced intensity fluctuations in a laser beam [J]. Optica Acta, 1981, 28(5): 715-728.
- [10] YE H, WANG H, MAO H F, *et al*. Exposure characteristics of photopolymer holographic gratings [J]. Laser Technology, 2007, 31(2): 175-178( in Chinese).
- [11] MA J CHO I S. Ruggedized digital holographic data storage with fast access [J]. Optical & Quant Electron, 2000, 32(1): 383-392.
- [12] HUANG M J YAO H W, CHEN Zh Y, *et al*. The effect of the thickness of photopolymer on high density holographic recording [J]. Acta Photonica Sinica, 2002, 31(2): 246-249( in Chinese).
- [13] GONG Q X, WANG S L, HUANG M J *et al*. Study on holographic properties of a water resistant acrylic-ole-based photopolymer [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2005, 11(2): 233-237 ( in Chinese).
- [14] HUANG M J WANG S L, WANG A R, *et al*. A wideband sensitive holographic photopolymer [J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(5): 268-270.
- [15] TAO Sh Q, WANG D Y, JIANG Zh Q, *et al*. Holographic data storage [M]. Beijing: Beijing Polytechnical University Press, 1998: 61-71( in Chinese).
- [16] YAO H W, HUANG M J CHEN Zh Y, *et al*. Preparation of green sensitive photopolymer and investigation of its holographic [J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(5): 632-635( in Chinese).
- [17] BETZIG E, TRAUTMAN J K. Near-field optics microscopy, spectroscopy, and surface modification beyond the diffraction limit [J]. Science, 1992, 257(6): 189-195.
- [18] GALLEGO S, ORTUNO M, NEIPP C, *et al*. Physical and effective optical thickness of holographic diffraction gratings recorded in photopolymers [J]. Optics Express, 2005, 13(6): 1939-1947.

(上接第 547 页)