

自由基聚合型光致聚合物中全息图像质量的动态特性研究

宋 伟 陶世荃 王大勇 万玉红

(北京工业大学应用数理学院, 北京 100124)

摘要 用实验方法研究了光致聚合物中全息存储再现图像质量的动态特性,以信噪比损失作为图像质量变化的衡量指标,进行了暗增长和均匀后曝光过程监测图像实验。实验结果表明,在暗增长和均匀后曝光过程中,再现图像强度和经历先增长后下降的动态过程。以噪声光栅的形成和发展对实验结果进行了初步的解释。以信噪比损失不大于 3 dB 为判据考察了全息图对暗反应和均匀后曝光过程的宽容程度,对于不同的记录条件确定了暗反应和均匀后曝光过程的特征时间。在特征时间内,再现图像的质量和强度都是可以接受的。在复用记录时,为保证所有全息图有均衡的衍射效率和良好的图像质量,必须考虑再现图像质量和强度的动态变化因素。

关键词 全息;光致聚合物;信噪比;暗增长;均匀后曝光

中图分类号 O438.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1209001

Experimental Research on the Dynamics of the Image Quality Reconstructed from Holographic Dual-Monomers Photopolymer

Song Wei Tao Shiquan Wang Dayong Wan Yuhong

(College of Applied Sciences, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract The dynamics of the image quality reconstructed from holographic photopolymer is experimentally investigated. In experiments, the intensity and quality of reconstructed images are monitored during dark enhancement and uniform post-exposure. The quality of reconstructed images is quantitatively evaluated based on the loss of signal-to-noise ratio. The experimental results show that the intensity and quality of reconstructed images suffers from non-monotonic changes during dark enhancement and uniform post-exposure, that is, increases at first, but decreases later from the highest value. These experimental results can be explained by the formation and development of noise gratings. The tolerance of image quality on uniform post-exposure and dark enhancement is evaluated based on the characteristic time, at which the signal-to-noise ratio of reconstructed images decreases a half of the original value. The experimental data show that during the characteristic time, both of quality and intensity of reconstructed images are acceptable. In multiplexed holographic storage, the dynamics of image quality should be considered in order to ensure uniform diffraction efficiency and good quality to all holograms.

Key words holography; photopolymer; signal-to-noise ratio; dark enhancement; uniform post-exposure (UPE)

OCIS codes 090.2900; 210.2860; 210.4810

1 引 言

用于全息存储的光致聚合物材料具有高灵敏度、高衍射效率、低成本、易于制作和不需要后期处

理等优点,被认为是最有潜力的海量高速光学信息存储的材料^[1]。

光致聚合物主要成份包括活性单体(单功能性

收稿日期: 2012-06-12; **收到修改稿日期**: 2012-07-23

基金项目: 国家自然科学基金(60477004)和北京市自然科学基金(4071001)资助课题。

作者简介: 宋 伟(1985—),男,博士研究生,主要从事光全息存储方面的研究。

E-mail: 123davidwsong@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 陶世荃(1946—),女,博士,教授,主要从事全息与光信息处理等方面的研究。E-mail: shqtao@bjut.edu.cn (通信联系人)

或多功能性单体)、引发剂(自由基类或阴/阳离子类)、光敏剂(必要时加入链转移剂)、成膜树脂以及增塑剂等^[2~4]。光致聚合物的全息记录机理是基于光诱导产生的聚合反应,其基本聚合方式可分为自由基聚合和阳离子聚合,本文所用材料为自由基聚合型。其反应过程一般描述为,物光、参考光在聚合物材料中干涉形成明暗条纹,明区发生光化学反应生成活性种子(自由基或阴/阳离子),这些活性种子引发单体聚合。光聚合有链锁反应的链增长过程,聚合成链生成高分子聚合物。聚合过程使活性单体浓度降低,明暗区域形成单体浓度梯度,单体从暗区向明区扩散。随着光聚合反应的持续进行,明区单体浓度大于暗区,而成膜树脂和单体之间的折射率差就形成了折射率调制度,成为体积位相型全息光栅^[5]。

光致聚合物中单体聚合和扩散过程的不断进行,使全息光栅的形成呈现复杂的动态过程。一般情况下,即使全息曝光停止,光栅衍射效率也会继续增长,即存在“暗增长”或暗反应现象。为了消除暗反应,使记录的全息光栅稳定,通常需要采用“光定影”,即用均匀光进行后续曝光,使残余单体进一步聚合。

已有的研究表明,暗反应和均匀后曝光(UPE)过程中光栅衍射效率都会有不同程度的增长^[6~8]。这些效应对于大规模复用的全息存储尤为重要,因为若在同一位置复用记录多个全息图(单点复用),后续的全息曝光对于前面已经记录的全息图而言,相当于均匀后曝光;而在部分重叠的全息复用(例如位移复用)中,已经记录的全息图将承受暗反应和均匀后曝光两种过程。充分考虑到这两种过程对全息图衍射效率的增长效应,已经为单一单体的光致聚合物材料设计了复用全息图等衍射效率曝光时序,使复用的全息图最终获得均衡的衍射效率^[8]。

虽然暗反应和均匀后曝光对全息图衍射效率的影响已经得到较为深入的研究,但在这些过程中全息图再现质量的演变还鲜有研究报道。高质量的存储才能读出有效信息,从全息存储材料中成功读取有效信息才能体现全息存储的潜力,因此有必要研究光致聚合物中暗增长和均匀后曝光过程对全息存储图像质量的影响。

在一种自由基聚合型的双单体光致聚合物材料^[9]中研究了暗增长和均匀后曝光过程对全息存储图像质量的影响。本文给出了基于自由基聚合原理的双单体光致聚合物中暗增长和均匀后曝光的理论模型及其数值模拟,给出了衍射光强度和再现图像

质量的实验监测结果。将实验结果和理论模型对照后发现,光致聚合物材料在持续光照后产生的噪声是不可忽视的因素。

2 双单体光致聚合物材料全息存储的暗增长和均匀后曝光效应

2.1 暗增长

暗增长是光致聚合物材料在全息记录中普遍存在的现象,就是在对记录介质进行全息曝光过程中,在尚未达到饱和和折射率调制度(即尚未消耗掉全部单体)时停止曝光,而折射率调制度仍然继续上升,直至饱和的现象。其原因在于单体的扩散机制在结束曝光后仍然存在,因而折射率调制度会继续增长。只有在亮条纹区域与暗条纹区域中的单体浓度重新平衡后,暗反应才会结束。

若全息记录时间为 t_w ,此时关闭物光和参考光,在 $t > t_w$ 时进入暗增长过程。利用聚合物材料中全息光栅简化扩散模型,暗增长过程中全息光栅折射率调制度随时间 t 的演变为^[10]

$$\Delta n(t) = \Delta n(t_w) + A_1 \left[1 - \exp\left(-\frac{t_w - t}{\tau_{D1}}\right) \right] + A_2 \left[1 - \exp\left(-\frac{t_w - t}{\tau_{D2}}\right) \right], \quad (1)$$

式中 $\Delta n(t_w)$ 为 t_w 时刻已记录光栅的折射率调制度, τ_{D1} 和 τ_{D2} 分别为两种单体的扩散时间常数, A_1 和 A_2 分别是与 t_w 时刻两种单体浓度有关的量。从折射率调制度可以计算出光栅的衍射效率为^[11]

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

式中 d 为聚合物材料厚度, λ 为全息记录波长, θ_i 和 θ_s 分别为读出光和衍射光与材料表面法线之间的夹角。图1为典型的暗反应过程拟合曲线,拟合参数

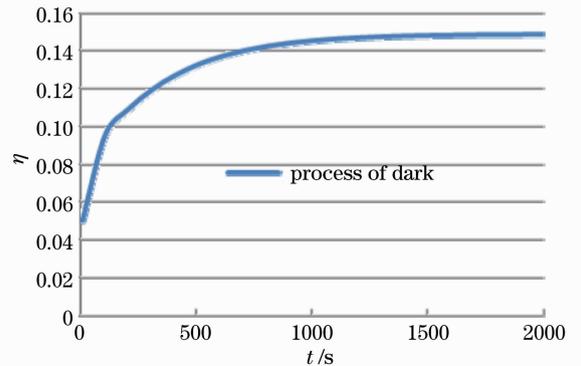


图1 暗增长过程衍射效率的动态演变

Fig. 1 Dynamic evolution of grating efficiency during dark enhancement

通过对材料性能的一系列测试得到,文献[10]给出了具体的测试方法。得到的所需参数为: $t_w = 12\text{ s}$, $\tau_{D1} = 18.76\text{ s}$, $\tau_{D2} = 319.32\text{ s}$, $\Delta n(t_w) = 7.13 \times 10^{-5}$, $A_1 = 1.88 \times 10^{-5}$, $A_2 = 3.51 \times 10^{-5}$, $d = 500\text{ }\mu\text{m}$, $\lambda = 532\text{ nm}$, $\theta_r = 28.4^\circ$, $\theta_s = 7.8^\circ$ 。由图1中曲线变化趋势可知,暗增长从光栅记录结束时刻 t_w 开始,光栅衍射效率不断增长直至饱和。

2.2 均匀后曝光效应

在均匀光照射下,光致聚合物中已记录的全息图的衍射效率继续增长的效应称为均匀后曝光效应。在均匀后曝光过程中,单体的扩散和聚合持续进行,记录光栅的折射率调制度不断增长,直到照明区域全部单体耗尽为止。

若全息记录时间为 t_w ,此时关闭记录光,在 $t > t_w$ 时用一束均匀光照射记录区域,即进入均匀后曝光过程。利用聚合物材料中全息光栅简化扩散模型,双单体光致聚合物中全息图在均匀后曝光过程中折射率调制度随时间的变化为^[10]

$$\Delta n(t) = \Delta n(t_w) + C_1 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{\tau_{p1}} + \frac{1}{\tau_{D1}} \right) (t - t_w) \right] \right\} + C_2 \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{1}{\tau_{p2}} + \frac{1}{\tau_{D2}} \right) (t - t_w) \right] \right\}, \quad (3)$$

式中 τ_{p1} 和 τ_{p2} 分别为两种单体的聚合时间常数, C_1 、 C_2 是与 t_w 时刻两种单体浓度有关的量。相应衍射效率也可结合(2)式计算得到。图2为典型的均匀后曝光过程拟合曲线,使用的参数为: $\tau_{p1} = 44.15$, $\tau_{p2} = 95.15$, $C_1 = 1.88 \times 10^{-5}$, $C_2 = 3.51 \times 10^{-5}$,其余参数 $[t_w, \tau_{D1}, \tau_{D2}, \Delta n(t_w), d, \lambda, \theta_r$ 和 $\theta_s]$ 与图1相同。由图2可知,均匀后曝光过程从单光栅记录结束时刻 t_w 开始,光栅衍射效率不断增长直至饱和。

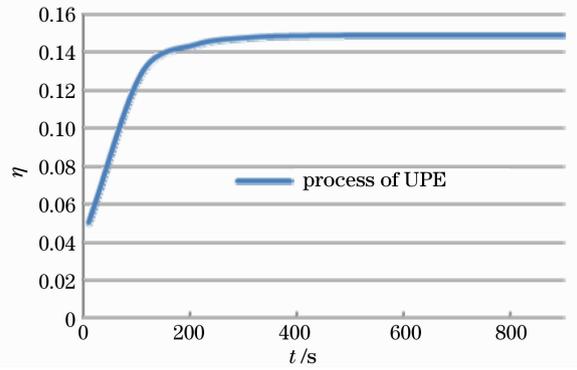


图2 均匀后曝光过程衍射效率的动态演变
Fig.2 Dynamic evolution of grating efficiency during uniform post-exposure

3 双单体光致聚合物材料全息图像质量实验

3.1 实验条件与过程

实验所采用的光致聚合物材料是一种自由基聚合型的双单体光致聚合物^[9]。两种单体分别为固态单体 N-乙烯咪唑(NVC)和液态单体 2-苯氧基乙基丙烯酸酯(POEA),这两种单体匹配后其共聚合能力大于各自的自聚合能力,提高了材料的光响应速度,增大了聚合物与成膜树脂之间的折射率差,提高了材料的全息性能。

记录材料若在曝光后发生收缩,会引起布拉格偏移,使原位读出时衍射光强显著下降,图像质量恶化。已有研究表明本实验所用材料的体积收缩率小于 0.5%^[9,12],对记录图像扫描读出的实验结果也表明读出最大图像强度位置即记录原位置,说明本材料的收缩效应可以忽略。

实验光路如图3所示。波长为 457 nm 的激光

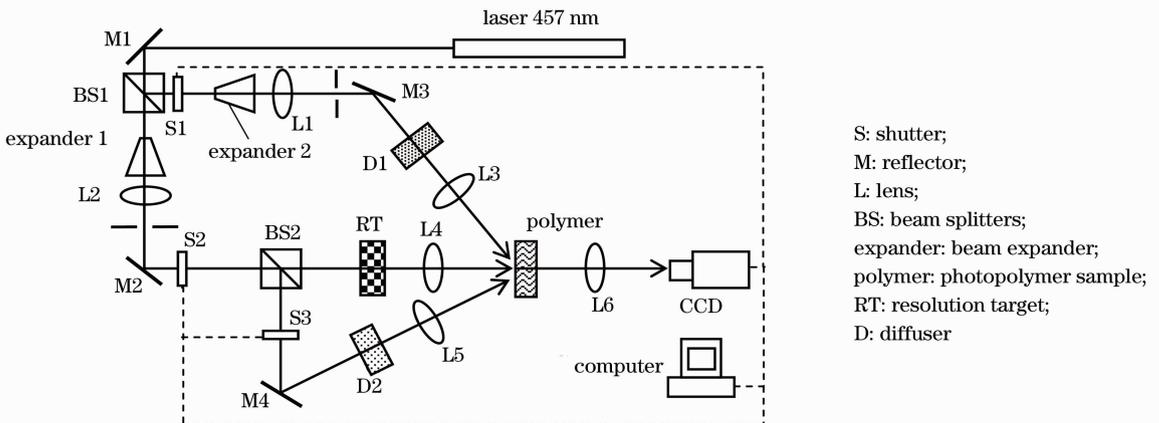


图3 实验光路示意图

Fig.3 Scheme of experimental setup

束经过分束器 BS1 分为两束,并分别经过扩束和准直;一路将散射器 D1(平均颗粒尺寸为 $5 \mu\text{m}$)成像到样片上作为参考光,另一路经 BS2 又分为两束,其中一束受到分辨率板(RT)调制成为物光束,与参考光在记录材料中干涉记录傅里叶变换全息图;另一路经过散射器 D2(平均颗粒尺寸为 $50 \mu\text{m}$)调制后照射到材料的同一区域上,作为均匀照明光。全息记录的总光强为 $15 \mu\text{W}/\text{mm}^2$,物光、参考光与均匀光三光束的光强比为 $1:2:2$ 。物光垂直入射到记录材料表面,参考光和均匀光与物光夹角都为 45° 。

进行暗增长监测读出图像实验时,物光、参考光首先在材料上记录一段时间 t_w ,然后关闭记录光,每隔 5 s 用参考光读出一张图像。进行均匀后曝光监测读出图像实验时,也是在全息记录时间 t_w 后关闭记录光,然后打开均匀光持续照射记录区域,每隔 5 s 用参考光读出一张图像。

3.2 实验数据处理

实验中用 CCD 采集图像数据。在实验进行过程中,CCD 已经关闭自动增益控制与背景光自动调整功能,故只要小心避免图像的过饱和,图像的平均灰度值 G 便可以反映图像强度变化。令监测过程 $t = 0$ 时刻,即 t_w 时长的全息记录结束时,读出图像平均灰度值为 G_0 ,计算出其他图像平均灰度 G_n 与 G_0 的比值 I_n ,得到以记录结束时的图像强度进行归一化的图像强度曲线 I_n 为

$$I_n = \frac{G_n}{G_0}. \quad (4)$$

图像质量用信噪比来评价。二值图像的信噪比定义为^[13]

$$R_{\text{SN}} = \frac{I_1 - I_0}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_0^2}}, \quad (5)$$

式中 I_1 和 I_0 分别是图像中“1”(亮)像素和“0”(暗)像素的平均光强, σ_1 和 σ_0 分别是“1”像素和“0”像素

的标准差,如图 4 所示。选取相同面积的亮区和暗区,分别计算像素灰度的平均值和标准差,即可依(5)式计算出图像的信噪比。

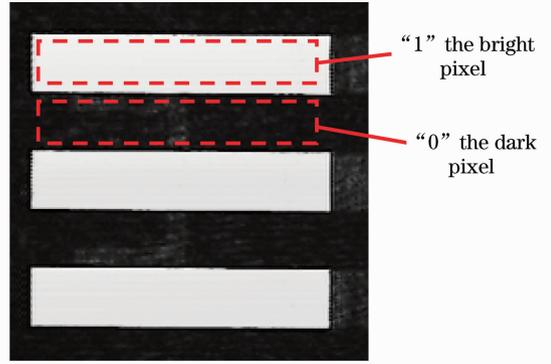


图 4 信噪比计算方法示意图

Fig. 4 Method of SNR calculation

评价一系列图像的质量变化,可以采用信噪比损失系数 R_{LSN} 进行描述。 R_{LSN} 定义为^[14]

$$R_{\text{LSN}} = 10 \times \lg \left(\frac{R_{\text{SN}_0}}{R_{\text{SN}_m}} \right), \quad (6)$$

式中 R_{SN_0} 为初始图像的信噪比, R_{SN_m} 为系列中第 m 幅图像的信噪比。在本实验中 R_{SN_0} 就是全息记录刚结束时再现图像的信噪比; R_{SN_m} 是在后续的第 m 次采集到的图像的信噪比。 R_{LSN} 的值越大,表明图像信噪比恶化越严重,而若 $R_{\text{LSN}} < 0$ 表明系列中图像的信噪比有所改善。

3.3 实验结果

分别用 $t_w = 6 \text{ s}$ 和 12 s 进行了全息图像记录,随后对每个全息图进行了暗增长或均匀后曝光过程,监测再现图像的质量。再现图像系列表现出相同的特征,即图像的强度和信噪比均呈现明显的先增长后下降的变化趋势,图 5 为一组典型的图像。图 5 (a) 为记录 $t_w = 12 \text{ s}$ 刚完成时的再现像,图 5 (b)、(c)、(d) 分别为均匀后曝光 30、75、155 s 后的读出图像。

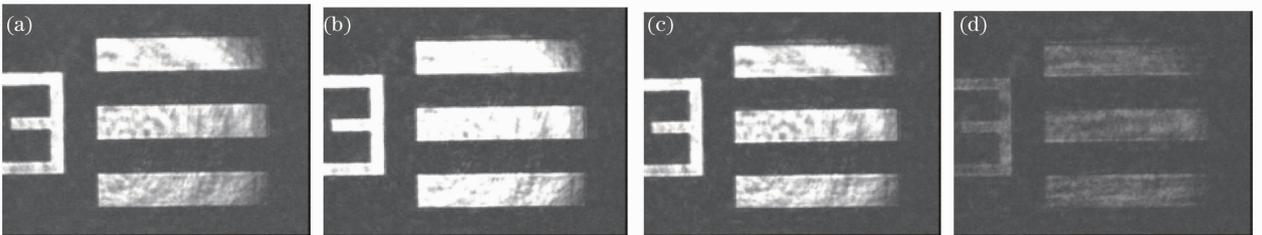
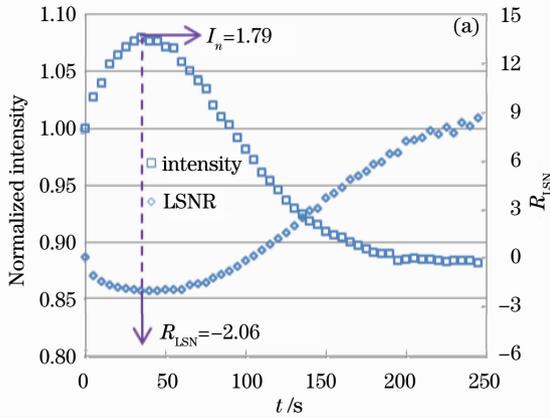


图 5 $t_w = 12 \text{ s}$, 经过不同时间均匀后曝光的图像。(a) 0 s, $R_{\text{LSN}} = 0$; (b) 30 s, $R_{\text{LSN}} = -3.14$; (c) 75 s, $R_{\text{LSN}} = 0.18$; (d) 155 s, $R_{\text{LSN}} = 6.63$

Fig. 5 Reconstructed image in uniform post-exposure with different exposure time in the condition that $t_w = 12 \text{ s}$. (a) 0 s, $R_{\text{LSN}} = 0$; (b) 30 s, $R_{\text{LSN}} = -3.14$; (c) 75 s, $R_{\text{LSN}} = 0.18$; (d) 155 s, $R_{\text{LSN}} = 6.63$

均匀后曝光监测和暗反应监测的数据处理结果分别如图 6 和图 7 所示。为了易于比较,将监测到的



在同一记录条件下,光栅在某一过程中的衍射强度和信噪比损失随时间的变化放在同一张图中。

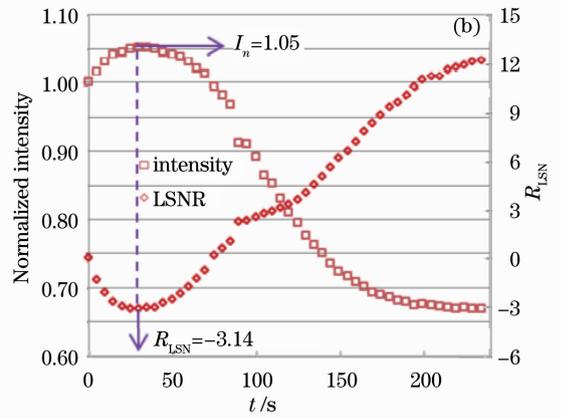
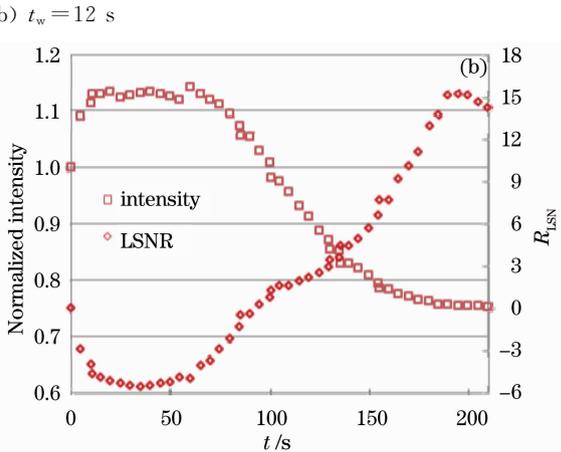
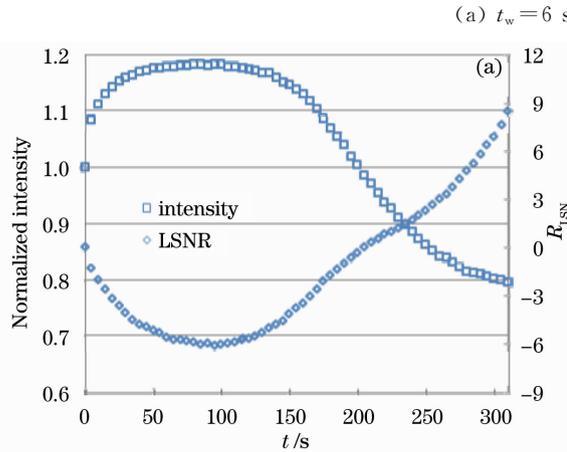


图 6 均匀后曝光监测读出图像归一化光强度与信噪比损失动态变化情况。(a) $t_w=6\text{ s}$; (b) $t_w=12\text{ s}$

Fig. 6 Normalized intensity and loss of signal to noise ratio of the readout images in uniform post-exposure.



(a) $t_w=6\text{ s}$; (b) $t_w=12\text{ s}$

图 7 暗增长过程监测读出图像归一化光强度与信噪比损失动态变化情况。(a) $t_w=6\text{ s}$; (b) $t_w=12\text{ s}$

Fig. 7 Normalized intensity and loss of signal to noise ratio of the readout images in dark enhancement. (a) $t_w=6\text{ s}$; (b) $t_w=12\text{ s}$

图 6 所示的均匀后曝光过程表现出以下特点: 1)再现图像的强度和信噪比同步发生变化,在全息记录12 s条件下,均匀后曝光约 30 s,得到了读出强度、质量同时达到最好的图像,即 $R_{\text{LSNR}}=-3.14$,归一化强度值 $I_n=1.05$,而在全息记录 6 s 条件下,均匀后曝光曝光 35 s,读出强度、质量同时达到最好的图像 $R_{\text{LSNR}}=-2.06$, $I_n=1.79$; 2)读出图像强度和信噪比达到最优后,图像强度并未趋于饱和而是逐渐下降,图像质量亦同步变差; 3)全息记录时间较短时,这种动态变化过程较为缓慢。

暗增长过程中再现图像的动态变化与均匀后曝光大体相同,如图 7 所示,只是图像强度增长接近最大值时,上升与下降都比较缓慢。

3.4 实验结果讨论

衍射效率定义为衍射光强度与入射光强度的比

值,实验中保持入射光强基本恒定,因此衍射光强与衍射效率成正比。在暗增长和均匀后曝光过程中,衍射光强(表现为图 6 和图 7 中的读出图像强度)并未如理论预期那样单调上升并趋于饱和(如图 1 和图 2 所示),而是经历先增长后下降的动态过程。对此可以用噪声光栅的形成和发展进行初步解释。

以往的研究表明^[15],即使光致聚合物薄片仅被一束相干光持续照明,材料中也会逐渐产生噪声光栅,其结果使得入射光被噪声光栅散射,偏离预定的入射方向。噪声光栅与光敏剂(染料)的光致漂白作用的共同结果,使得直透光的强度呈现先略有上升后逐渐下降的复杂动态过程。这就很好地解释了均匀后曝光过程中衍射效率的下降,主要是因为散射噪声使得参与衍射的光强减小,导致衍射光强下降。暗反应过程中虽然没有光照,但单体浓度梯度引起

的单体扩散具有随机的性质,也会在一定程度上引入随机噪声。在衍射光强降低噪声增强的双重效应下,图像的 R_{LSN} 增大,图像质量逐渐恶化。

可以用 $R_{\text{LSN}} < 3$ dB (即图像信噪比不低于初始值的一半) 作为判据,考察光致聚合物中全息光栅对暗反应和均匀后曝光过程的宽容程度。分别用 Δt_{UPE} 和 Δt_{Dark} 表示均匀后曝光和暗反应过程中 R_{LSN} 增加到 3 dB 对应的时间,并把这段时间称为均匀后曝光和暗反应过程的特征时间。根据图 6 和图 7 的结果,在不同记录条件下的特征时间列于表 1 中。同时在表 2 中列出了经历特征时间后,即当 $R_{\text{LSN}} = 3$ dB 时,均匀后曝光和暗反应过程再现图像的归一化强度值,分别用 $I(\Delta t_{\text{UPE}})$ 和 $I(\Delta t_{\text{Dark}})$ 表示。

表 1 均匀后曝光和暗增长过程中图像质量的特征时间
Table 1 Characteristic time of image quality during UPE and dark enhancement for different recording conditions

	$\Delta t_{\text{UPE}}/\text{s}$	$\Delta t_{\text{Dark}}/\text{s}$
$t_w = 6$ s	140	260
$t_w = 12$ s	110	130

表 2 再现图像归一化强度在特征时间的值

Table 2 Normalized intensity of reconstructed image at the characteristic time of UPE and dark enhancement for different recording conditions

	$I(\Delta t_{\text{UPE}})$ (a. u.)	$I(\Delta t_{\text{Dark}})$ (a. u.)
$t_w = 6$ s	0.92	0.84
$t_w = 12$ s	0.85	0.87

由表 1 可知,对于图像质量而言,暗反应过程比均匀后曝光过程有更好的宽容程度,这也与上文中关于噪声的讨论一致,即均匀光的长时间照射会引入可观的噪声。全息记录条件对特征时间也有明显的影响,这是因为在初始记录的全息图较弱(t_w 较短)的情况下,作为“种子”的噪声光栅也较弱且增长较慢,同时留给后续过程的衍射效率增长余地更大。

由表 2 可知经历特征时间后再现图像的归一化强度是它们各自相对于初始值的强度,当 $R_{\text{LSN}} = 3$ dB 时,暗增长和均匀后曝光过程再现图像强度下降不大,都不到 20%。

在特征时间内,暗反应与均匀后曝光过程中再现图像质量将下降一半,图像强度下降不是很多。可以认为在此期间内,再现图像的强度和质量都是可以接受的。

4 结 论

实验结果表明,在暗增长和均匀后曝光过程中,衍射效率(表现为读出图像强度)并未如理论预期那样单调上升并趋于饱和,再现图像的强度和质量经历先增长后下降的动态过程。对此可以用噪声光栅的形成和发展进行初步的解释。均匀后曝光过程中散射噪声使得参与衍射的光强减小,导致衍射光强下降;暗反应过程中,衍射光强降低及噪声增强双重作用,使得再现图像的 R_{LSN} 增大,图像质量逐渐恶化。用 $R_{\text{LSN}} < 3$ dB 作为判据,考察全息光栅对暗反应和均匀后曝光过程宽容度的特征时间,发现在特征时间内图像强度下降不大,图像的强度与质量都是可以接受的。

在设计复用记录的存储方案时,为了保证所有全息图有均衡的衍射效率和良好的图像质量,必须考虑再现图像质量和强度的动态变化因素。对于单点复用,要使总曝光时间不大于均匀后曝光过程特征时间;对于部分重叠的复用,要保证每一区域曝光时间不大于均匀后曝光过程特征时间,同时总曝光时间不大于暗反应特征时间,使得存储完成后能够读出有效信息。

致谢 感谢中国科学院理化技术研究所赵榆霞研究员为本文工作提供光致聚合物样品。

参 考 文 献

- H. J. Coufal, D. Psaltis, G. Sincerbox. Holographic Data Storage[M]. New York: Springer Press, 2000. 106~109
- Gong Qiaoxia, Huang Mingju, Gu Donghong *et al.*. Effects of monomers and binders in the photopolymer on holographic data storage properties [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25** (3): 396~401
弓巧侠, 黄明举, 顾冬红等. 光致聚合物中单体及粘结剂对全息性能的影响[J]. *光学学报*, 2005, **25**(3): 396~401
- Wang Longge, Li Feitao, Zhao Lei *et al.*. Study of holographic characteristics of a photopolymer doped with TiO_2 nanoparticle [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(12): 3103~3107
王龙阁, 李飞涛, 赵磊等. 掺杂 TiO_2 纳米颗粒的光致聚合物全息特性的研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(12): 3013~3017
- Duan Xiaoya, Zhu Jianhua, Wei Tao *et al.*. Recipe optimization and holographic storage characteristics of green sensitive polyvinyl alcohol/acrylamide-based photopolymer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 984~988
段晓亚, 朱建华, 魏涛等. 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[J]. *中国激光*, 2009, **36**(4): 984~988
- Pan Zuren, Yu Shizhang. Free Radical Polymerization [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1981. 36~45
潘祖仁, 于石璋. 自由基聚合[M]. 北京: 化学工业出版社, 1983. 36~45
- V. Moreau, Y. Renotte, Y. Lion. Characterization of DuPont photopolymer; determination of kinetic parameters in a diffusion

- model[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(17): 3427~3435
- 7 H. P. Liu, D. Yu, X. C. Li *et al.*. Diffusional enhancement of volume gratings as an optimized strategy for holographic memory in PQ-PMMA photopolymer[J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(7): 6447~6454
- 8 Q. L. Zhai, S. Q. Tao, X. Y. Song *et al.*. Investigation on mechanism of multiple holographic recording with uniform diffraction efficiency in photopolymers[J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(13): 10871~10880
- 9 S. Q. Tao, Y. X. Zhao, Y. H. Wan *et al.*. Dual-wavelength sensitized photopolymer for holographic data storage [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2010, **49**(8): 08KD01
- 10 Zhai Qianli. Holographic Disc Storage on Photopolymer [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011. 28~32
翟千里. 基于光致聚合物的盘式全息存储[D]. 北京:北京工业大学, 2011. 28~32
- 11 H. Kogelnik. Coupled wave theory for thick holograms gratings [J]. *The Bell System Technical Journal*, 1969, **48** (9): 2909~2947
- 12 Zhou Duhua, Tao Shiquan, Shi Mengquan *et al.*. Shrinkage of photopolymer for holographic recording materials[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1544~1547
嵯渡华, 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): 1544~1547
- 13 G. P. Nordin, P. Asthana. Effects of cross talk on fidelity in page-oriented volume holographic optical data storage [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(18): 1553~11555
- 14 M. Y. Qin, S. Q. Tao, G. Q. Liu *et al.*. Effect of scattering noise on the data fidelity of holograms recorded in photorefractive crystals[J]. *Material Research Society Proceedings*, 2001, **674**: V2.6
- 15 S. Q. Tao, H. Y. Wang, X. J. Wan *et al.*. Scattering noise properties of holographic photopolymers by means of real-time transmittance analysis [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, **25** (8): 2896~2899

栏目编辑: 何卓铭