

# 预曝光对光聚合物全息性能的研究

郝佳奇, 于丹\*, 杨蕊嘉, 孙立萍

天津市量子光学与智能光子学重点实验室, 天津理工大学理学院, 天津

收稿日期: 2024年9月10日; 录用日期: 2024年10月22日; 发布日期: 2024年10月30日

---

## 摘要

通过全息图像研究了预曝光对丙烯酰胺光聚合物全息光栅的增强及其稳定性的影响。以全息图的相对衍射强度为参数来表征材料内部的扩散过程。曝光结束后使用非相干光读取光栅, 相对衍射强度提高数十倍。优化了预曝光能量和读取强度, 定量分析了相对衍射强度对单体浓度的依赖性。单体分子的扩散是影响全息图衍射强度增强的重要因素, 可以提高丙烯酰胺光聚合物体系的全息性能。本研究可促进丙烯酰胺光聚合物在全息光学元件开发中的实际应用。

---

## 关键词

全息光栅, 光致聚合物, 预曝光, 衍射强度

---

# Effect of Pre-Exposure on the Holographic Properties of Photopolymers

Jiaqi Hao, Dan Yu\*, Ruijia Yang, Liping Sun

Tianjin Key Laboratory of Quantum Optics and Intelligent Photonics, School of Science, Tianjin University of Technology, Tianjin

Received: Sep. 10<sup>th</sup>, 2024; accepted: Sep. 22<sup>nd</sup>, 2024; published: Oct. 30<sup>th</sup>, 2024

---

## Abstract

The enhancement of acrylamide photopolymer holographic gratings by pre-exposure and their stability were investigated by holograms. The relative diffraction intensity of the hologram was used as a parameter to characterize the diffusion process inside the material. After exposure, the grating is read with incoherent light, and the relative diffraction intensity is increased by tens of times. The pre-exposure energy and reading intensity were optimized, and the dependence of relative diffraction intensity on monomer concentration was quantitatively analyzed. The diffusion of monomer

\*通讯作者。

**molecules is an important factor affecting the enhancement of hologram diffraction intensity, which can improve the holographic properties of acrylamide photopolymer system. This study can facilitate the practical application of acrylamide photopolymers in the development of holographic optical components.**

## Keywords

**Holographic Grating, Photopolymer, Pre-Exposure, Diffraction Intensity**

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

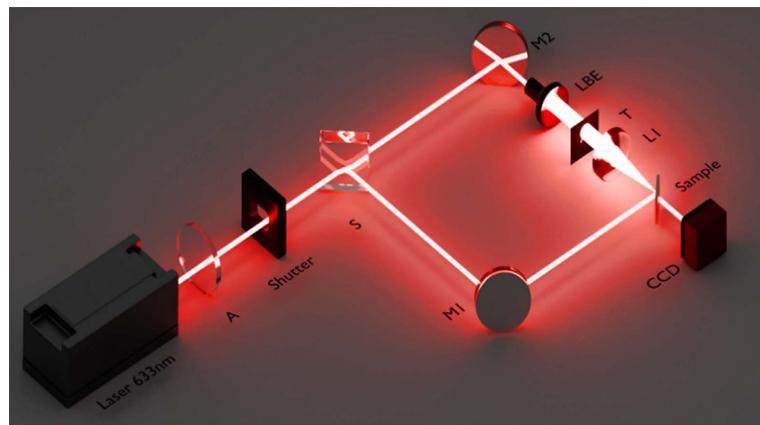
近年来,基于体光栅的衍射光学元件受到越来越多的关注[1]-[5]。丙烯酰胺光聚合物具有衍射效率高、成本低、无需后处理等优点,是一种极具潜力的衍射光学材料。然而,光栅的稳定性差,限制了这种材料的应用。此外,稳定、均匀的衍射效率也是衍射光学元件的重要特性之一。提高衍射效率是全息领域研究人员关注的重点。

以前的研究通过加入新成分丙烯酸、N-羟甲基丙烯酰胺、使用聚合度低的成膜物、增加膜的厚度和提升入射辐照度等,获得全息光栅的高衍射效率[5]-[7],然而,预曝光技术在改善材料全息特性方面的应用却鲜有报道。全息光栅的预曝光是改善衍射性能的有效手段之一。在短时间的记录曝光后,光聚合物的衍射效率会得到提高[8]-[10]。一般来说,这种现象归因于光化学反应。短时间曝光后,光敏成分无法完全消耗,再次曝光时单体分子亮区反应速度大于暗区反应速度,从而增强了调制度[11]。迄今为止,针对图像预曝光增强的定量分析,尤其是预曝光增强对记录图案的影响的研究还很少。在此,我们研究了丙烯酰胺光聚合物中预曝光对全息图的影响。我们观察并分析了预曝光能量和读取强度对增强效应的定量依赖关系。明显的增强现象为提高材料的衍射效率和响应提供了可能。

## 2. 材料和实验装置

我们研制了一种丙烯酰胺光聚合物记录全息光栅,用于全息图的写入和再现。该聚合物体系由聚乙稀醇(PVA)粘合剂、丙烯酰胺(AA)单体、N-N'亚甲基双丙烯酰胺(BMA)交联剂、用于红色激光(633 nm)的亚甲基蓝(MB)光敏剂和三乙醇胺(TEA)光引发剂组成[12]-[14]。首先,在70°C下将PVA(1788型)粉末溶解到去离子水中,形成混合溶液。同时,将其他成分(即AA、TEA、BMA、EB)按比例称重装入另一个瓶中。然后将PVA溶液混入瓶中并搅拌,直至混合液变得透明。2至3小时后,用微量移液管将混合溶液涂抹在玻璃片上,干燥36至48小时后进行全息实验。聚合物样品薄膜厚度约为100 μm。

图1为记录全息光栅的实验装置,使用双光束耦合光路在光聚合物中记录全息光栅。一束氦氖激光被平均分成两束,通过透明片加载了图像信息的透射光为物光,另一束反射光为参考光。通过光学快门控制曝光和读取时间,曝光结束后,关闭物光,使用相应布拉格角的弱参考光在现全息图。用不同曝光能量记录和读取时,再现图像的灰度值及其相对衍射效率是不同的。为了获得更好的衍射性能,选择了控制变量法,在短时间曝光下记录不同曝光能量和读取强度的实验图像。图像的灰度值可用于评估衍射增强效果。



**Figure 1.** Experimental setup for recording holographic grating. A is an attenuator, Shutter is an optical shutter, S is a spectroscope, M1 and M2 are mirrors, LBE is a laser beam expander, T is a transparent plate carrying information, and L1 is a short-focus lens

**图 1.** 记录全息光栅的实验装置。图中 A 为衰减器, Shutter 为光学快门, S 为分光镜, M1 和 M2 为反射镜, LBE 为激光扩束器, T 为承载信息的透明板, L1 为短焦透镜

### 3. 光化学反应与原理分析

在曝光条件过程中, 光聚合反应是通过光化学方法产生自由基或离子引发单体聚合的反应。为了弄清曝光后的暗扩散过程, 简要分析了光化学机理。内部复杂的光化学过程可简单描述为[6] [11] [15]。



式中,  $MB$ ,  $MB^{1*}$  和  $MB^{3*}$  分别代表光敏剂分子的稳态、单线态和三线态激发态,  $RMB$  代表半还原光敏剂。 $TEA$  和  $TEA^*$  分别代表三乙醇胺稳态和正离子自由基。系统中的单体  $M$  通过链式聚合反应( $n \geq 1$ )生成光诱导聚合物  $P$ 。随着聚合反应的发生, 亮区聚合物浓度增加, 单体浓度降低, 在亮暗边缘之间形成单体浓度梯度, 促进单体从暗区向亮区扩散。随着光化学反应的进行, 当明暗区域的单体达到平衡时, 链式反应终止。 $R_d$  是自由基的生成速率,  $R_i$  是引发反应的速率。单体消耗与引发反应的关系为

$$-\frac{\partial U(t)}{\partial t} = R_i + R_d \quad (4)$$

其中,  $U$  代表单体浓度,  $R_i$  一般远大于  $R_d$ ,  $f$  代表由于笼效应而发生反应的自由基分数,  $k$  是引发反应的速率常数。因此, 可以分别给出单体分子和相应光反应产物的时间演化[11]。

$$U(t) = U_0 \exp(-fk_d t) = U_0 \exp\left(-\frac{E}{E_\tau}\right) \quad (5)$$

$$P(t) = U_0 - U_t = U_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E}{E_\tau}\right) \right] \quad (6)$$

其中,  $P(t)$  表示单体分子的初始浓度,  $E$  表示曝光通量,  $E_\tau = I_0/fk_d$  是与聚合速率相关的曝光常数,  $I_0$  是入射强度。由于扩散系数较低, 扩散过程与聚合过程是分离的, 因此短时间照射下单体分子的扩散可忽略不计[16] [17]。在光照条件下, 折射率调制与任意点的主成分密度成正比, 并按照渐近曲线增长。

$$\Delta n(t) = C_1 - C_2 \exp\left(-\frac{E}{E_\tau}\right) \quad (7)$$

其中  $C_1$  和  $C_2$  是两个常数。

单体在预曝光过程中的变化，即在调制光照射后，单体分子在亮区被消耗，然后在亮区和暗区未反应的单体分子由于浓度梯度的作用，从暗区扩散到亮区，最终达到稳定状态。参考光的再次照射引发了这些游离单体的激发和聚合。根据干涉条纹的特性，在亮条纹附近，这种光聚合作用更强烈，从而导致亮区聚合物分子浓度更高。同时，光聚合消耗的游离单体分子也会导致游离单体浓度  $U(x,t)$  随时间变化。由于它们在强度峰值处消耗较快，我们假定并近似认为游离单体的空间浓度为正弦曲线，相对于强度曲线的相移为  $180^\circ$ ，由此可得

$$U(x,t) = U_0(t) - U_1(t) \cos(Kx) \quad (8)$$

其中， $U_1(t)$  是游离单体度谐波项的振幅， $U_0(t)$  代表游离单体浓度的平均项。同时，游离单体扩散会使游离单体从聚合效率低的暗区移动到游离单体消耗强的亮区，从而使游离单体梯度趋于水平。材料密度的变化(由单体扩散引起)导致折射率的空间变化。根据模型[18]的求解方法可以得到相应的解析公式，其中  $\Delta n(t)$  是折射率调制体系。

$$\Delta n(t) = C_n m U \left\{ -\frac{1}{2} \exp\left(-I_0^{\frac{1}{2}} k t\right) + \frac{k I_0^{\frac{1}{2}} \tau \exp\left[-\frac{(k I_0^{\frac{1}{2}} \tau + 1)t}{\tau}\right] + 1}{2(k I_0^{\frac{1}{2}} \tau + 1)} \right\} \quad (9)$$

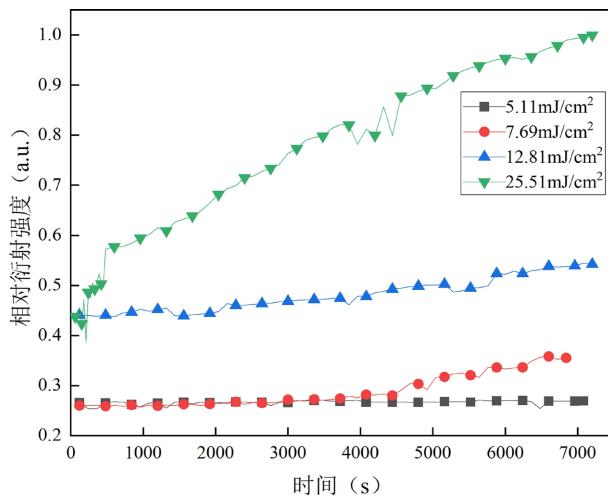
其中， $C_n$  为比例系数， $U$  为初始暴露单体的浓度， $\tau$  为扩散时间常数， $\tau = 1/DK^2$ 。通过上述公式，我们得到了扩散时间常数与折射率调制系统之间的关系。随后，我们分析了影响扩散时间常数的因素，主要是预曝光能量和读取光强度。

#### 4. 预曝光

在光栅形成时，预曝光可以提供足够的能量来激活单体，从而提高相应的衍射效率。在曝光能量较低时，聚合物的浓度会随着材料与光的反应而变化。在曝光过程中，单体浓度持续下降。一旦停止光照，由于反应中仍存在活性自由基，聚合物浓度的增加不会立即停止。自由基聚合反应仍在继续，导致单体继续被消耗。随着反应的进行，游离单体从暗区扩散到亮区，形成更高的浓度梯度。在曝光能量相对较高时，光与材料发生反应，材料的衍射效率很快达到最大值。不过，如果曝光能量较高，多余的光子可能会导致聚合物解聚，从而降低其衍射效率。

虽然聚合反应不会在照明关闭时立即停止[19][20]，然而，与整个实验时间相比，活性自由基的寿命通常很短，这导致自由基在曝光后的聚合作用可以忽略不计。因此，单体的扩散在体光栅的增强中起着主导作用。多篇文献报道了类似的实验结果，证明其具有普遍性和可重复性[11]。我们的实验结果也验证了其可靠性，为今后的相关研究奠定了坚实的基础。

在研究图像增强过程与预曝光能量之间的关系时，使用不同曝光能量，相同读取强度读出光栅，曝光能量是记录强度与曝光时间的乘积，本文通过控制曝光时间不变和改变记录强度来改变预曝光能量。

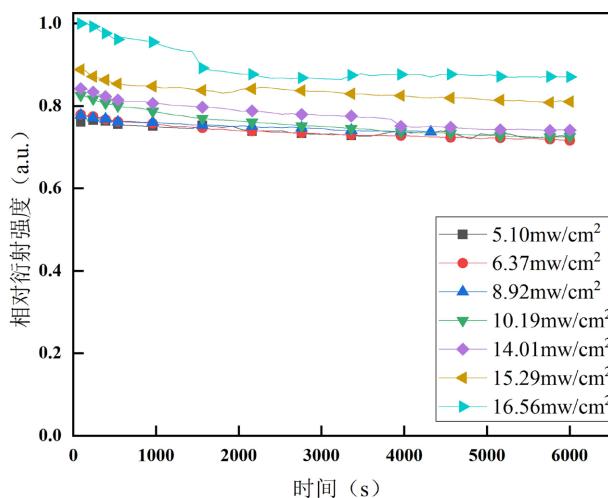


**Figure 2.** The comparison results under different exposure intensities when the reading intensity is  $1.27 \text{ mw/cm}^2$

**图 2.** 读取强度为  $1.27 \text{ mw/cm}^2$  时不同曝光强度下的对比结果

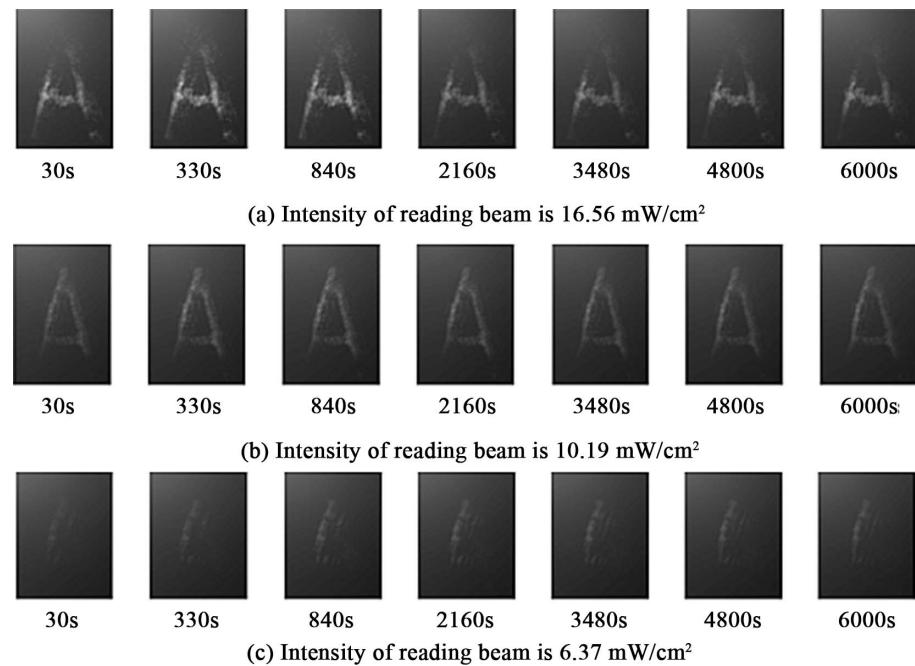
四种曝光能量分别为  $5.11 \text{ mJ/cm}^2$ 、 $7.69 \text{ mJ/cm}^2$ 、 $12.81 \text{ mJ/cm}^2$  和  $25.51 \text{ mJ/cm}^2$ 。实验图像在室温下获得，时间  $t=0$  表示停止曝光的时刻。图 2 显示了在读取强度为  $1.27 \text{ mW/cm}^2$  时，不同曝光能量下衍射效率随时间的变化情况。实验结果表明，曝光后的相对衍射强度很低，在较小的曝光能量下，相对衍射强度的增加很小，但总体稳定性很好。当曝光能量为  $5.11 \text{ mJ/cm}^2$  时，相对衍射效率从 26.60% 增加到 26.95%，增幅小于 1%，这种实验现象并不理想。随着曝光能量的增加，相对衍射强度呈缓慢增长趋势，继续增加曝光能量，可以观察到相对衍射强度的显著增长。当曝光能量增加到  $25.51 \text{ mJ/cm}^2$  时，相对衍射效率从 43.78% 增加到 100%，增加了 50% 以上。这证明，使用较大的曝光能量有利于获得较高的相对衍射强度。

但是，预曝光能量不能无限地增加，为了提高稳定性，我们采取了在曝光结束时进行光固定的方法。曝光结束后，关闭物光和参考光，并使用非相干光均匀照射材料 5 分钟后，关闭非相干光，使用相应布拉格角的弱参考光再现全息图，相对衍射强度和全息图的实验结果分别如图 3 和图 4 所示。



**Figure 3.** The temporal evolution of different readout energies under a non-coherent light exposure of  $16.56 \text{ mJ/cm}^2$  for 5 minutes

**图 3.**  $16.56 \text{ mJ/cm}^2$  的曝光能量下，非相干光照射 5 min 后，不同读取能量的时间演化



**Figure 4.** Temporal evolution of grayscale hologram. (a) Intensity of reading beam is  $16.56 \text{ mw/cm}^2$ . (b) Intensity of reading beam is  $10.19 \text{ mw/cm}^2$ . (c) Intensity of reading beam is  $6.37 \text{ mw/cm}^2$

**图 4.** 灰度全息图的时间演化。(a) 读取光强度为  $16.56 \text{ mw/cm}^2$ ; (b) 读取光强度为  $10.19 \text{ mw/cm}^2$ ; (c) 读取光强度为  $6.37 \text{ mw/cm}^2$

实验结果表明，使用非相干光固定后，光栅的衍射强度在较长时间内比较稳定，曝光能量比较高的光栅的衰减程度较大，曝光能量比较低的光栅的衰减程度相对较小，但所有光栅的衍射效率都没有增强。从图 3 和图 4 中我们还发现，全息图衍射效率的稳定值随着读取强度的增加而增加，由于光栅预曝光后的衍射效率增强与成分的扩散直接相关。在接下来的实验中，将首先分析读取强度对全息图衍射效率的影响。而在研究影响衍射效率增强的因素时，如果预曝光能量过强，将无法形成弱光栅，因此不能使用过高的预曝光能量。在后续实验中，我们将选择合适的预曝光能量。

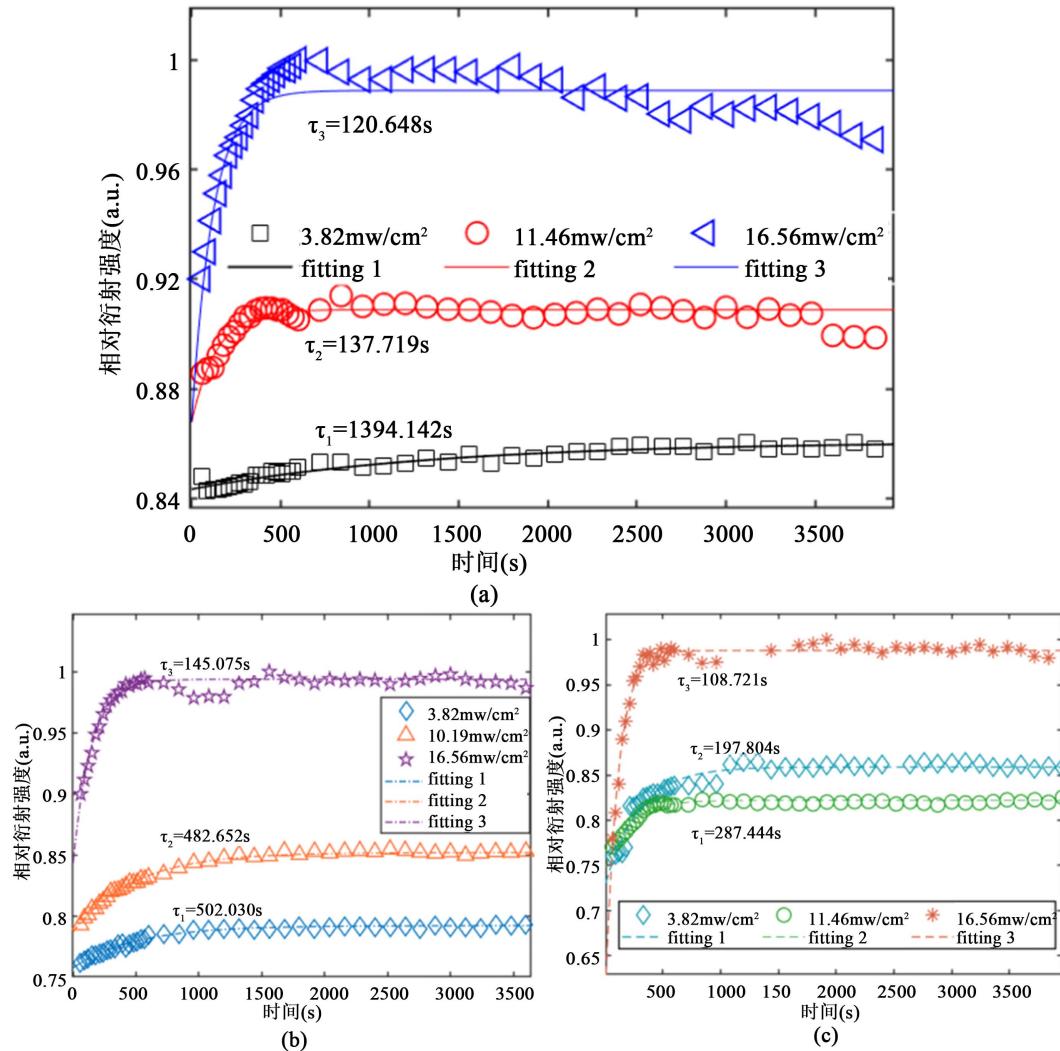
## 5. 全息图的读取能量

为了研究预曝光对衍射效率增强的影响，我们选择了相同预曝光能量下的不同读取强度，并多次重复实验，观察相对衍射强度与读取强度之间的关系。图 5 显示了相同的预曝光能量下不同的读取强度，全息图相对衍射强度的时间演变。图中可以明显看出，所有的光栅在曝光后都显示出先增强后稳定的趋势。实验结果表明，读取强度的增加会显著提高相对衍射效率。这种高衍射效率可能是由于自由基的反应速率和组分的扩散速率引起的，更有利于增强光栅[21]。

记录光关闭后，剩余的活性自由基被纳入暗反应过程。自由基聚合过程需要较长的反应时间。实验结果表明，随着样品中记录的光强度的增加，反应时间也相应缩短。这种现象是可以理解的，因为高光强可以刺激更多的单体自由基参与聚合反应，从而在相同的时间内产生更多的聚合产物。同时，由于各组分的高扩散速率，活性自由基被迅速消耗，这也是反应时间缩短的一个原因。

我们在实验中发现了一个非常有趣的实验现象。在不同的曝光能量下，相对衍射强度会随着读取强度的增加而增加。这是由于不同曝光能量下形成的光栅都是弱光栅，即使使用原始光束读取，读取时间很短，随着光强的增加，会刺激更多的单体自由基参与聚合反应，形成更高的浓度梯度，增强光栅。图

5(a)和图 5(b)所有实验结果都与结论一致, 而图 5(c)则有两条曲线与规律不符。这可能是由于实验材料的不均匀性或聚合度造成的, 但整体的实验规律还是一致的, 随着读取能量增加, 相对衍射强度增加, 时间常数减小。



**Figure 5.** (a) Time evolution of reading intensity at 3.82 mw/cm<sup>2</sup>, 11.46 mw/cm<sup>2</sup> and 16.56 mw/cm<sup>2</sup> for exposure energy of 7.64 mJ/cm<sup>2</sup>. (b) Time evolution at exposure energy of 16.56 mJ/cm<sup>2</sup> for 3.82 mw/cm<sup>2</sup>, 10.19 mw/cm<sup>2</sup> and 16.56 mw/cm<sup>2</sup>, respectively. (c) Time evolution at an exposure energy of 22.93 mJ/cm<sup>2</sup> for reading intensities of 3.82 mw/cm<sup>2</sup>, 11.46 mw/cm<sup>2</sup> and 16.56 mw/cm<sup>2</sup>, respectively.  $\tau$  is the time constant

**图 5.** (a) 曝光能量为 7.64 mJ/cm<sup>2</sup> 时, 读取强度在 3.82 mw/cm<sup>2</sup>、11.46 mw/cm<sup>2</sup> 和 16.56 mw/cm<sup>2</sup> 下的时间变化; (b) 曝光能量为 16.56 mJ/cm<sup>2</sup> 时, 读取强度在 3.82 mw/cm<sup>2</sup>、10.19 mw/cm<sup>2</sup> 和 16.56 mw/cm<sup>2</sup> 下的时间变化。(c) 曝光能量为 22.93 mJ/cm<sup>2</sup> 时的时间变化, 读取强度分别为 3.82 mw/cm<sup>2</sup>、11.46 mw/cm<sup>2</sup> 和 16.56 mw/cm<sup>2</sup>。 $\tau$  是时间常数

利用指数函数拟合折射率调制的相对衍射效率增强曲线, 时间常数  $\tau$  与在给定空间频率下获得的扩散系数之间的关系可写成  $\tau = 1/DK^2$ , 其中  $D$  是扩散系数,  $K = 2\pi/\Lambda$ ,  $\Lambda = 0.338 \mu\text{m}$ ,  $\theta$  是基于样品外 78° 的记录角度。条纹间距按  $\Lambda = \lambda/2n' \sin \theta$  计算, 其中  $\lambda$  是记录光束的波长,  $n'$  是样品的折射率。单个光栅中的扩散系数可通过公式计算得出。如表 1 所示

结果表明，随着读取能量的增加，全息图的扩散系数显著增加，导致时间常数明显缩短。记录图像的衍射效率增强可归因于单体从暗区向亮区的扩散。实验结果与理论预测结果非常吻合。其他系统中也有类似的分子扩散实验结果，常数  $D$  大于参考文献[22]中的  $10^{-19} \sim 10^{-20} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

**Table 1.** Comparison of dynamic parameters in the enhancement process of holograms with different reading intensity at low exposure energy

**表 1. 低曝光能量下不同读取强度全息图增强过程动态参数比较**

预曝光能量( $\text{mJ}/\text{cm}^2$ )	读取强度( $\text{mw}/\text{cm}^2$ )	时间常数 $\tau$ (s)	扩散系数 $D$ ( $10^{-17}\text{m}^2/\text{s}$ )
7.64	3.82	1394.142	0.208
	11.46	137.719	2.100
	16.56	120.648	2.4000
16.56	3.82	502.030	0.576
	10.19	482.652	0.600
	16.56	145.075	1.990
22.93	3.82	287.444	1.010
	11.46	197.804	1.460
	16.56	108.721	2.660

这说明如果适当增加读取强度，相对衍射强度会有一定程度的增加。扩散过程仍然是衍射效率增强的主要因素，因为指数函数的时间常数通常与组分的扩散系数有关。

## 6. 结论

本文通过实验研究了预曝光对丙烯酰胺全息性能的影响，实验测试了不同曝光能量，不同读取强度下全息图的时间演化。结果表明，预曝光能量和读取强度的增加会显著提高相对衍射效率，并且随着读取能量增加，时间常数减小，此外，均匀曝光也会加速相对衍射强度的稳定。从理论上分析了单体的扩散过程和折射率调制度变化过程，曝光结束后计算不同读取强度下光栅演化的扩散系数。本文的研究结果可以加速对光化学过程的理解，相应的预曝光技术也可以为全息增强技术的应用提供重要依据。

## 基金项目

本论文感谢天津市 2023 大学生创新创业训练计划项目(202310060115)，教育部产学合作育人项目《基于数字化全息光学平台的物理实验研究》和横向项目《全息存储试验仪》的资助。

## 参考文献

- [1] Liu, H., Yu, D., Wang, W., Geng, Y. and Yang, L. (2014) Mutual Diffusion Dynamics as Matter Transfer Mechanism in Inorganic Nanoparticles Dispersed Photopolymer. *Optics Communications*, **330**, 77-84.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.05.033>
- [2] Yu, D., Liu, H., Geng, Y., Wang, W. and Zhao, Y. (2014) Radical Polymerization in Holographic Grating Formation in PQ-PMMA Photopolymer Part I: Short Exposure. *Optics Communications*, **330**, 191-198.  
<https://doi.org/10.1016/j.optcom.2014.05.072>
- [3] Li, H., Qi, Y. and Sheridan, J.T. (2014) Three-Dimensional Extended Nonlocal Photopolymerization Driven Diffusion Model Part I Absorption. *Journal of the Optical Society of America B*, **31**, 2638-2647.  
<https://doi.org/10.1364/josab.31.002638>
- [4] Jeong, Y., Jung, B., Lee, J. and Park, J. (2011) Reaction-Controlled Diffraction Grating of Photopolymer for Use of

- Phase Stable Holographic Optical Element. *Applied Physics Letters*, **98**, Article 101103. <https://doi.org/10.1063/1.3562032>
- [5] Wang, H., Wang, J., Liu, H., Yu, D., Sun, X. and Zhang, J. (2012) Study of Effective Optical Thickness in Photopolymer for Application. *Optics Letters*, **37**, 2241-2243. <https://doi.org/10.1364/ol.37.002241>
- [6] 郭小伟, 谢安东, 伍冬兰, 朱建华. 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.
- [7] 弓巧侠, 黄明举, 顾冬红. 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.
- [8] Wang, J., Sun, X., Luo, S. and Jiang, Y. (2009) The Shift of Bragg Angular Selectivity Curve in Darkness in Glass-Like Photopolymer for Holographic Recording. *Optical Materials*, **32**, 261-265. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2009.07.023>
- [9] Veniaminov, A. and Bartsch, E. (2002) Diffusional Enhancement of Holograms: Phenanthrenequinone in Polycarbonate. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, **4**, 387-392. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/4/4/304>
- [10] Yu, D., Liu, H., Wang, J., Jiang, Y. and Sun, X. (2011) Study on Holographic Characteristics in ZnMA Doped PQ-PMMA Photopolymer. *Optics Communications*, **284**, 2784-2788. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.02.055>
- [11] Liu, H., Yu, D., Li, X., Luo, S., Jiang, Y. and Sun, X. (2010) Diffusional Enhancement of Volume Gratings as an Optimized Strategy for Holographic Memory in PQ-PMMA Photopolymer. *Optics Express*, **18**, 6447-6454. <https://doi.org/10.1364/oe.18.006447>
- [12] Ortuño, M., Gallego, S., García, C., Neipp, C., Beléndez, A. and Pascual, I. (2003) Optimization of a 1 mm Thick PVA/Acrylamide Recording Material to Obtain Holographic Memories: Method of Preparation and Holographic Properties. *Applied Physics B*, **76**, 851-857. <https://doi.org/10.1007/s00340-003-1229-0>
- [13] Gallego, S., Ortuño, M., Neipp, C., Márquez, A., Beléndez, A., Fernández, E., et al. (2006) 3-Dimensional Characterization of Thick Grating Formation in PVA/AA Based Photopolymer. *Optics Express*, **14**, 5121-5128. <https://doi.org/10.1364/oe.14.005121>
- [14] Yao, H., Huang, M., Chen, Z., Hou, L. and Gan, F. (2002) Optimization of Two-Monomer-Based Photopolymer Used for Holographic Recording. *Materials Letters*, **56**, 3-8. [https://doi.org/10.1016/s0167-577x\(02\)00406-8](https://doi.org/10.1016/s0167-577x(02)00406-8)
- [15] Mahilny, U.V., Marmysh, D.N., Stankevich, A.I., Tolstik, A.L., Matusevich, V. and Kowarschik, R. (2005) Holographic Volume Gratings in a Glass-Like Polymer Material. *Applied Physics B*, **82**, 299-302. <https://doi.org/10.1007/s00340-005-2006-z>
- [16] Popov, A., Novikov, I., Lapushka, K., Zyuzin, I., Ponosov, Y., Ashcheulov, Y., et al. (2000) Spectrally Selective Holographic Optical Elements Based on a Thick Polymer Medium with Diffusional Amplification. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, **2**, 494-499. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/2/5/324>
- [17] Gleeson, M.R., Kelly, J.V., Close, C.E., O'Neill, F.T. and Sheridan, J.T. (2006) Effects of Absorption and Inhibition during Grating Formation in Photopolymer Materials. *Journal of the Optical Society of America B*, **23**, 2079-2088. <https://doi.org/10.1364/josab.23.002079>
- [18] Piazzolla, S. and Jenkins, B.K. (2000) First-Harmonic Diffusion Model for Holographic Grating Formation in Photopolymers. *Journal of the Optical Society of America B*, **17**, 1147-1157. <https://doi.org/10.1364/josab.17.001147>
- [19] Moreau, V., Renotte, Y. and Lion, Y. (2002) Characterization of Dupont Photopolymer: Determination of Kinetic Parameters in a Diffusion Model. *Applied Optics*, **41**, 3427-3435. <https://doi.org/10.1364/ao.41.003427>
- [20] Colvin, V.L., Larson, R.G., Harris, A.L. and Schilling, M.L. (1997) Quantitative Model of Volume Hologram Formation in Photopolymers. *Journal of Applied Physics*, **81**, 5913-5923. <https://doi.org/10.1063/1.364378>
- [21] Zhao, G. and Mouroulis, P. (1994) Diffusion Model of Hologram Formation in Dry Photopolymer Materials. *Journal of Modern Optics*, **41**, 1929-1939. <https://doi.org/10.1080/09500349414551831>
- [22] Veniaminov, A.V. and Sedunov, Y.N. (1996) Diffusion of Phenanthrenequinone in Poly(Methyl Methacrylate): Holographic Measurements. *Vysokomolekularne Soedineniya. Ser.A Ser.B Ser.C-Kratkie Soobshcheniya*, **38**, 59-63.