

文章编号: 1005-5630(2024)01-0023-08

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.202303170066

富勒烯掺杂的光致聚合物的全息存储特性研究

李绍鑫, 刘悠嵘, 郑增荣, 朱宁, 邢陈陈, 郑继红

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 研究了富勒烯对六官能团脂肪族聚氨酯丙烯酸酯/环氧树脂 (RJ423/ EPIKOTE 828) 体系光致聚合物的全息性能的影响, 分析了富勒烯 (C_{60}) 材料以及曝光光强对光致聚合物衍射效率的影响。通过吸收光谱结合 X 射线衍射图谱分析, 掺杂的富勒烯既没有和聚合物中的其他成分发生化学反应, 也不影响材料本身的结构和结晶性能。实验结果表明, 富勒烯掺杂提高了单体聚合反应的速率, 并且参与活性单体分子之间的扩散。在光强 20 mW/cm^2 、时间 $40 \sim 50 \text{ s}$ 、厚度 $200 \mu\text{m}$ 时, 光致聚合物的衍射效率提升到 86% , 感光灵敏度达到 $1.32 \text{ cm}^2/\text{J}$, 收缩率降低了约 80% 。由于 C_{60} 促进聚合, 抑制体积收缩, 从而增强全息存储的稳定性, 经过全息图像存储实验对比, 证明该光致聚合物掺杂富勒烯之后具有优秀的全息存储性能, 同时也表明富勒烯掺杂的光致聚合物在全息存储领域具有较大的应用前景。

关键词: 衍射光学; 富勒烯; 衍射效率; 光致聚合物; 全息光存储

中图分类号: O 438.1 **文献标志码:** A

Study on holographic storage properties of fullerene-doped photopolymer

LI Shaoxin, LIU Yourong, ZHENG Zengrong, ZHU Ning, XING Chenchen, ZHENG Jihong
(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, the effect of fullerene on the holographic properties of photopolymers in the hexafunctional aliphatic polyurethane acrylate/epoxy resin (RJ423/EPIKOTE 828) system was studied, and the influence of fullerene (C_{60}) and exposure light intensity on photopolymers diffraction efficiency were analyzed. The absorption spectrum combined with X-ray diffraction pattern analysis illustrates that the doped fullerene does not chemically reacts with other components in the polymer, and does not impacts on its structure and crystallization properties. Experimental results demonstrate that fullerene doping can effectively increase the rate of monomer polymerization and participate in the diffusion between active monomer molecules. The diffraction efficiency of the photopolymer increases to 86% with the thickness of $200 \mu\text{m}$, which the photosensitivity reaches $1.32 \text{ cm}^2/\text{J}$ and the shrinkage rate is reduced by 5 times under the light intensity of 20 mW/cm^2 for time of $40 \sim 50 \text{ s}$. C_{60} may enhance the stability of holographic storage,

收稿日期: 2023-03-17

第一作者: 李绍鑫 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为全息光致聚合物。E-mail: 1075297008@qq.com

通信作者: 郑继红 (1975—), 女, 教授, 研究方向为聚合物液晶和信息光学。E-mail: Jihongzheng@sina.com

owing to the promotion of polymerization and the suppression of the shrinkage. The comparison of holographic image storage experiments illuminates that the photopolymer doped with fullerene has excellent holographic storage performance, which also shows that fullerene doped photopolymers have great application prospects in the field of holographic storage.

Keywords: diffractive optics; fullerene; diffraction efficiency; photopolymer; holographic optical storage

引 言

在当前存储技术中,以光盘存储为代表的光学数据存储,由于其对数据的随机访问,读取速率快以及可移动和材料廉价等特性,已被广泛应用。然而,随着数字信息的爆炸式增长,这些技术也不断的面临着挑战。例如,在传统的光存储技术中单个数据位的尺寸已经达到远场光学记录的极限;此外,由于数据是串行记录的,所以传输速率也将受到限制。这些问题和挑战引导了研究人员对下一代光学存储技术的探索。

全息存储(holographic data storage, HDS)突破了传统存储技术的密度限制,超越了二维,以三维形式写入数据。全息术这一概念首次出现在 1948 年,由英国科学家 Dennis Gabor 提出^[1],其主要内容为利用同一光源发出的两个彼此相干的激光在记录介质内相交,所产生的光学干涉图案作为材料介电常数的调制被记录到介质中。光致聚合物因其优良的光学性能,是目前全息记录材料的热门研究方向之一^[2-8]。2013 年,河南大学的研究人员在光致聚合物材料中加入金纳米粒子,研究了掺杂金纳米粒子前后的光致聚合物的全息特性,对掺杂金纳米粒子的光致聚合物样品进行全息参数测试,得出金纳米粒子在最优掺杂时材料的衍射效率提高了 15%,材料收缩率降至 0.8%^[9]。2022 年,福建师范大学的谭小地等通过将八甲基丙烯酰氧基聚倍半硅氧烷(Ma-POSS)引入到菲醌掺杂聚甲基丙烯酸甲酯(PQ/PMMA)光聚合物中,制备了星型高分子光致聚合物 POSS-PMMA/PQ。研究发现星型高分子 POSS-PMMA 可以显著提高 PQ/PMMA 光致聚合物的全息性能。分析表明,POSS 支链上大量残余的 C=C 键更容易与 PQ 发生反应以显著提升 POSS-PMMA/PQ 的光反应效率。并且,具

有增塑剂作用的星型聚合物 POSS-PMMA 使材料结构更加松散,有利于光引发剂 PQ 的扩散形成光栅。同时,POSS 材料的笼型 Si-O-Si 核心具有较好的结构强度,可以显著降低材料的收缩率^[10]。近几年,研究人员对光致聚合物的研究更加深入,不仅在材料中掺杂各种纳米粒子而且还对材料中的各种微观机制加以研究^[11-15],极大地推动了全息存储领域的材料研究。

富勒烯(C₆₀)作为一种刚性的球形纳米粒子,具有完美的空间对称结构,由于其优异的光学和电学性能,已广泛应用于太阳能电池、聚合物异质结构和聚合物光治疗等研究中^[16-18]。因此,可以利用其优异的光电性能和各向同性性质来提升材料的全息存储能力。

本文研究了 C₆₀ 掺杂的光致聚合物材料的全息性能,制备了掺杂不同浓度 C₆₀ 纳米粒子的光栅样品。通过对比不同样品的吸收光谱和 X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)图谱特性、体积收缩率,以及记录介质的光栅衍射效率、感光灵敏度、折射率调制度、角度选择性和全息图的记录与再现。实验结果表明,掺杂 0.03% 浓度的 C₆₀ 的全息光聚合物样品的衍射效率可以达到 80% 以上,具备高光敏性以及高折射率调制度,并且测得光致聚合物的体积收缩仅为 0.0795%。该光致聚合物材料在 532 nm 波长下的全息图像记录和再现显示出光致聚合物掺杂 C₆₀ 之后具有更加优异的光学存储性能,有望成为未来全息存储领域的备选材料之一。

1 材料和原理

1.1 原 理

光致聚合物根据单体的种类可以划分为:硫

醇-烯炔类、丙烯酸胺类和丙烯酸酯类光致聚合物, 其中丙烯酸酯类光致聚合物包含 DuPont 体系^[19]、PQPMMA^[20]。其中基于非醌掺杂的聚甲基丙烯酸甲酯(PQ/PMMA)是一种被广泛研究的光致聚合物材料, 有着制备简单, 存储密度高, 原材料价格低廉等优势。但由于 PQ 在 MMA 单体中溶解度有限(低于 1%), 导致 MMA 单体在聚合过程体积收缩较大。然而在双单体光致聚合物体系材料中活性单体和环氧树脂单体在聚合过程中交互形成高度稳定的三维结构, 能够解决传统光致聚合物体系收缩率高和稳定性差等问题^[21]。其主要是利用成膜树脂和活性单体之间的反应活性和折射率不一致的特点, 在样品曝光时, 两单体之间相互扩散、迁徙, 最终形成稳固的基体^[22]。曝光开始后亮处活性单体随着引发剂的反应开始快速聚合固化, 此时, 亮暗条纹处产生的浓度差导致单体扩散, 成膜树脂仍处于液态保证了材料的流动性, 这有利于活性单体推动 C₆₀ 纳米粒子一起扩散。同时由于 C₆₀ 纳米粒子具有刚性结构且该材料中特殊化学键与光引发剂之间的苯环具有较强的 π - π 相互作用, 不仅增强了引发剂活性, 使光致聚合反应速率大大加快, 而且在一定程度上提高了材料的抗收缩能力^[23], 该过程如图 1 所示。

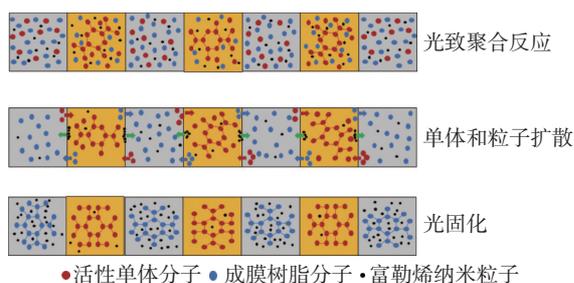


图 1 掺杂富勒烯的光致聚合物光栅形成过程

Fig. 1 Forming process of photopolymer gratings doped with fullerene

1.2 RJ423/EPIKOTE828 体系光致聚合物

六官能团脂肪族聚氨酯丙烯酸酯与环氧树脂体系聚合物(RJ423/EPIKOTE828)由低折射率、高官能度的 RJ423 单体和高折射率的成膜树脂单体组成, 能最大程度地发挥 RJ423 作为高官能团单体在光固化后促进形成高度稳定的三维结构, 从而提高光致聚合物材料的全息性能和抑制

材料的体积收缩^[24]。体系聚合物所用到的试剂如下。

活性单体: 六官能团脂肪族聚氨酯丙烯酸酯(RJ423: 透明液体, $n = 1.495$);

成膜树脂: 环氧树脂(EPIKOTE 828: 透明液体, $n = 1.5719$);

光引发剂: 二茂钛(IRGACURE 784, TI: 橙黄色粉末, 纯度: 98%)。

纳米粒子: 南京先丰纳米高纯度富勒烯纳米粒子(C₆₀, 棕黑色粉末, $n = 1.813$, 纯度: 99.9%);

部分材料结构如图 2 所示。

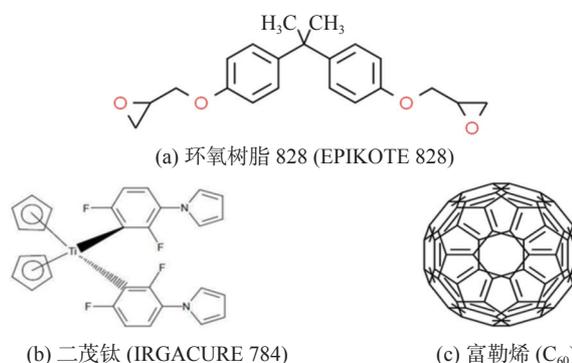


图 2 部分材料结构图

Fig. 2 Material structure diagram

1.3 样品制备

在 RJ423/EPIKOTE 828 体系下的光致聚合物是由两种单体、光引发剂加上纳米粒子按照一定的配比组成的。具体步骤如下。

(1)用电子天平称取一定质量的各种试剂, 称好后将试剂放在暗室条件下混合, 最后加入富勒烯纳米粒子(C₆₀), 充分搅拌至引发剂溶解之后用超声波振荡机进行恒温加热振荡 8~10 h。

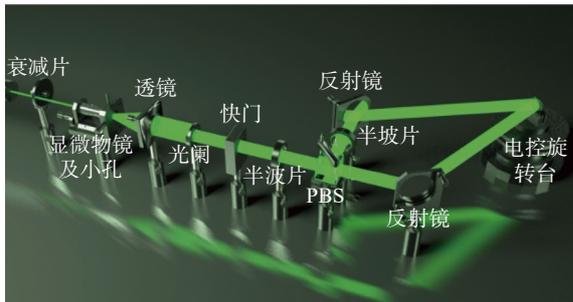
(2)取出药品检查是否振荡至均匀澄清且无明显的沉淀, 冷藏静置 24 h 药品制备完成, 之后进行冷藏密封保存待取用。

(3)通过一次性滴管将药品吸取滴在制备好的简易样品盒一侧开口, 药品受到气压虹吸, 均匀地填满样品盒, 最后用胶水封住开口后样品制作完成, 全过程保持暗室红光下操作。上述简易样品盒是将两片高透玻璃完全清洁后粘合而成(其中单片玻璃厚度为 1.115 mm), 玻璃中间通

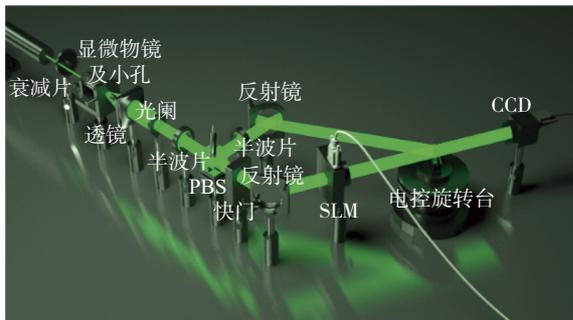
过控制垫片来调节样品厚度。最后，在加热台上放置 0.5 h 加热静置待取用。

1.4 实验光路

实验所用到的曝光光路包括衰减片、显微滤波系统、孔径光阑、半波片、偏振分光棱镜 (polarizing beam splitter, PBS)、反射镜、电子快门、电控旋转台以及曝光支架。激光由激光器 (Coherent Verdi V2, 532 nm) 发出, 经过扩束滤波准直后, 通过调整孔径光阑控制光斑半径为 0.5 cm, 之后再利用两个半波片将被 PBS 分开的两束光调成具有相同偏振状态 (S-S 偏振) 和相同光强大小的光, 最后两束光在电控旋转台上放置材料处的靶面完全重合产生干涉, 干涉光路的两臂夹角为 26°, 实验光路如图 3(a) 所示。在图 3(a) 中加入空间光调制器 (SLM) 以及 CCD 相机, 得到如图 3(b) 所示的全息存储光路。



(a) 全息干涉光路



(b) 全息存储光路

图 3 光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the optical path

在全息曝光实验中使用光功率计来接收并显示激光对材料曝光后的零级衍射光和一级衍射光的光强, 每 5 s 记录一次零级衍射光和一级衍射光, 读取时间设为 0.5 s。衍射效率 η 表示为^[25]

$$\eta = \frac{I_1}{I_1 + I_0} \quad (1)$$

式中: I_1 为一级衍射光强; I_0 为材料透射的光强。折射率调制度 Δn 是一个用来表征材料的全息存储性能的重要数值^[26], 对材料衍射效率的影响也是十分的关键, 其具体表示为

$$\Delta n = \frac{\arcsin(\sqrt{\eta_{\max}})\lambda \cos\theta}{\pi d} \quad (2)$$

式中: λ , θ 为入射光波长以及信号光和参考光之间夹角的一半; η_{\max} 为光栅最大衍射效率; d 为光致聚合物的厚度。全息材料对入射光的响应速度即为全息材料的感光灵敏度^[27] (单位: cm^2/J), 由 S 表示

$$S = \frac{\Delta n}{It} \quad (3)$$

式中 I 、 t 分别为曝光光强、曝光时间。

2 结果与讨论

2.1 材料全息性能分析

将 RJ423、环氧树脂、光引发剂按照样品制备步骤配制好, 分别在其中掺杂 0.01%、0.03% 和 0.05% 浓度的富勒烯, 最后灌入样品盒中得到 4 个掺杂不同浓度的样品, 样品中材料具体配比如表 1 所示。

表 1 材料各成分配方表
Tab. 1 Material ingredient formula table

样品名称	RJ423	EP828	IG784	C ₆₀
样品一	48.5%	48.5%	3%	0
样品二	48.5%	48.5%	3%	0.01%
样品三	48.5%	48.5%	3%	0.03%
样品四	48.5%	48.5%	3%	0.05%

之后将制备的 2.45 mm 厚 (样品厚度 200 μm 左右) 的片状材料, 放置到材料架上, 调整激光器输出功率和衰减片使单束光强度为 15 mW/cm^2 。随后使用电子快门, 控制每次的曝光时间为 5 s, 测量时间为 0.5 s, 入射角为 13°, 测量在曝

光强度一样时, 不同掺杂浓度下材料衍射效率随曝光时间的变化关系, 具体结果如图 4 所示。

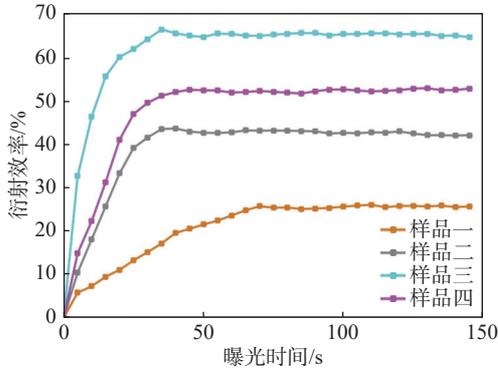


图 4 不同掺杂浓度下样品衍射效率随曝光时间变化关系

Fig. 4 Diffraction efficiency versus exposure time at different doping concentrations

如图 4 所示, 随着曝光时间的增加, 各样品衍射效率趋于稳定, 其中掺杂富勒烯样品的衍射效率明显比未掺杂的更高, 这是由于富勒烯作为各向同性的刚性纳米粒子, 在光栅形成过程中, 由于活性单体往亮条纹处扩散, 导致暗条纹处的单体浓度比其他地方更低, 这样的浓度差使得富勒烯纳米粒子往暗条纹扩散, 形成强度更强的全息光栅, 从而提高了样品的衍射效率。当掺杂浓度为 0.03% 时, 材料的全息衍射效率提升至 67% 左右, 为 4 个样品中衍射效率最高的。同时, 对比样品三与样品一的变化曲线发现, 样品三不仅在衍射效率上高于样品一, 而且光致聚合反应的灵敏度明显高于样品一, 这是由于在光致聚合反应过程中富勒烯与光引发剂 Irgacure 784 的苯环之间有较强的 π - π 相互作用^[23], 使得富勒烯对光引发剂吸收到光子而发生光解离进而引发光聚合反应的过程具有明显的促进作用。根据所测得数据计算可知, 样品三相比于样品一, 衍射效率提高了 41%, 感光灵敏度提高了 3 倍, 折射率调制度提高了 80%。各样品的具体全息性能参数如表 2 所示。

表 2 样品全息性能参数

Tab. 2 Sample holographic performance parameters

样品名称	衍射效率/%	感光灵敏度	折射率调制度
样品一	25.74	0.42	4.39×10^{-4}
样品二	43.73	0.79	5.96×10^{-4}
样品三	66.91	1.32	7.91×10^{-4}
样品四	52.68	0.89	6.70×10^{-4}

在确定掺杂浓度之后, 曝光光强对材料的衍射效率也有很大影响。

2.2 曝光光强选择

采用图 3 所示的全息干涉光路, 控制每个样品厚度为 200 μm 左右, 在掺杂浓度为 0.03% 的条件下测试了 10 mW/cm^2 、15 mW/cm^2 、20 mW/cm^2 和 25 mW/cm^2 光强下样品的衍射效率随曝光时间的变化, 变化关系如图 5 所示。

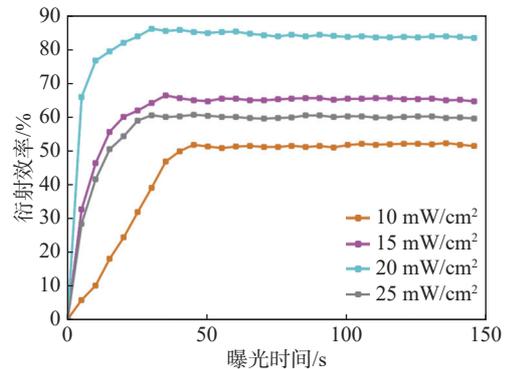


图 5 不同光强下样品衍射效率与随曝光时间的变化关系

Fig. 5 The relationship between diffraction efficiency and exposure time at different light intensities

如图 5 所示, 曝光时间在 0~50 s 时, 材料中光致聚合反应剧烈, 样品的衍射效率迅速提升。其原因是当激光照射光聚合物材料时, Irgacure 784 引发剂分子的以钛为中心的二自由基产物 [Ti] 在丙烯酸酯单体存在下引发聚合, 引发两单体之间发生自由基聚合反应^[28]。其中 10 mW/cm^2 光强曝光样品的最高衍射效率仅为 40%, 这是由于光强不足, 光引发剂产生自由基效率较低, 导致光致聚合反应速率较慢, 进而使得活性单体从暗条纹往亮条纹处的扩散速率变慢, 随着曝光时间的推移, 活性单体逐渐在暗条纹处固化, 而此时再曝光已经不能形成新的光栅结构, 因此衍射效率较低。随着光强的增加, 当曝光强度达到 20 mW/cm^2 时, 其衍射效率达到 86.41%, 同时材料的折射率调制度为 9.8×10^{-4} , 感光灵敏度为 $1.32 \text{ cm}^2/\text{J}$ 。当光强继续增加到 25 mW/cm^2 时, 样品衍射效率明显降低, 这是因为曝光强度过高导致活性单体固化速度过快, 不能形成稳定的光栅结构。

2.3 材料微观分析

考虑到富勒烯 C_{60} 的固有光吸收, 并且它可

以促进光敏剂分子的光化学反应，因此通过光谱仪以及 XRD 衍射仪对材料进行表征，根据表征结果来分析掺杂富勒烯之后，材料的光谱特性以及微观结构是否发生改变。

如图 6(a)所示，两种样品的吸收光谱曲线非常相似，材料在掺杂前后其吸收峰值没有发生明显偏移，结合富勒烯在 PQPMMA 体系中的作用^[23]，这表明掺入的富勒烯纳米粒子没有与聚合物中的其他成分发生化学反应。两者的最大吸收峰位都在 450 nm 附近，且在 532 nm 附近光吸收系数不高使得绿色激光器可作为合适光源，以避免过度的光吸收而导致再现光的衰减。三种材料的 XRD 图谱如图 6(b)所示，纯 C₆₀ 显示的结晶峰出现在角度 $2\theta \approx 10.81^\circ$ 、 17.69° 、 20.77° 、 28.07° 、 30.87° 和 32.73° ，但这些峰在掺杂之后的材料中消失，这表明掺杂富勒烯不影响材料本

身的晶体结构和结晶性能。

2.4 材料收缩率与布拉格偏移量

光聚合反应会导致预聚物从液态变为凝胶态，使光致聚合物材料的体积发生改变。这种变化不仅会导致光栅的间距发生改变，同时也会使光栅的方向和角度产生偏移，这种变化称为布拉格偏移^[15]。在记录过程中，全息存储质量与材料的收缩率密切相关，它不但使最优读出条件状态发生改变，而且还会导致信息丢失，从而对全息图的存储质量产生很大的影响。因此光致聚合物材料收缩率越低，重建的全息图质量就越好。

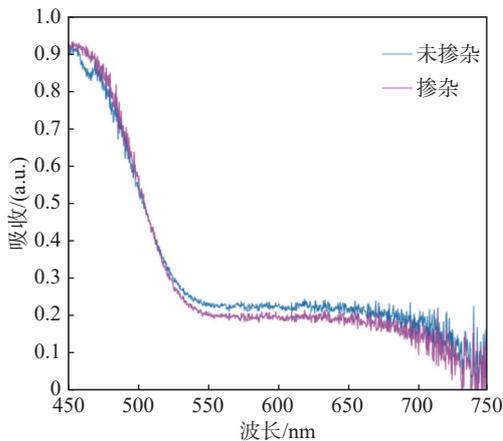
光栅衍射效率随角度变化可以通过控制电动旋转台来测量，进一步推断衍射效率 η 随角度偏移量的变化为

$$\eta = \frac{\sin^2 \sqrt{\nu^2 + \left(\frac{\Delta\phi\pi d}{\lambda}\right)^2}}{1 + \left(\frac{\Delta\phi \cos \phi}{\Delta n}\right)^2} \quad (4)$$

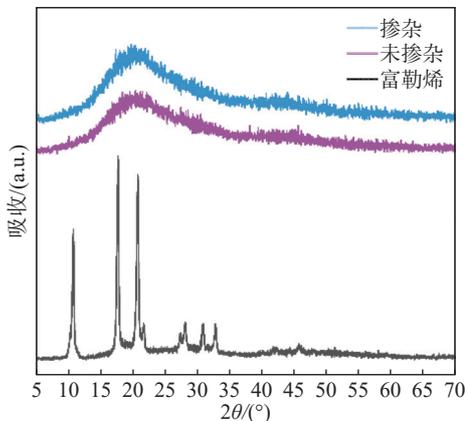
$$\nu = \frac{\pi \Delta n d}{\lambda \cos \phi} \quad (5)$$

式中： ϕ 为光栅的布拉格角； d 为材料的厚度； λ 为入射光的波长； Δn 为光栅的折射率调制度。

利用电脑控制电动旋转台，首先录下初始的 0 级和 1 级衍射光强，然后每转 $1.25 \times 10^{-3}^\circ$ 记录下 0 级和 1 级衍射光强。其中曝光完之后光栅最大衍射效率在 13° 附近，其衍射效率随布拉格偏移角归一化关系如图 7 所示。



(a) 聚合物样品吸收光谱



(b) 富勒烯与掺杂和未掺杂样品 XRD 谱图

图 6 样品谱图

Fig. 6 Sample spectra

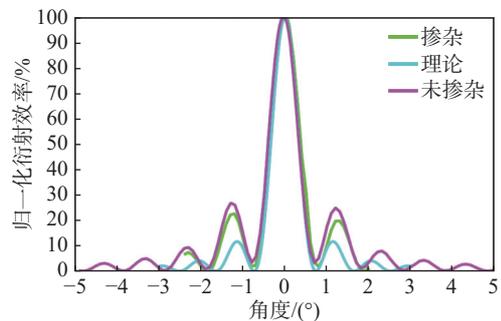


图 7 材料的衍射效率随布拉格偏移角度的变化

Fig. 7 Variation of diffraction efficiency of materials with Bragg shift angle

从图 7 可以看出，在全息材料曝光后，其布拉格角发生了很小的偏移，通过测得的数据可知，掺杂与未掺杂富勒烯样品的偏移量分别在

0.02°和 0.08°时, 衍射效率最大。根据体积收缩率(σ)的公式

$$\sigma = 1 - \frac{\tan \phi}{\tan(\phi + \Delta\phi)} \quad (6)$$

代入所测得的数据可算得富勒烯掺杂的样品收缩率为 0.0795%, 未掺杂的样品收缩率为 0.397%, 两者对比发现掺杂比未掺杂的样品体积收缩率降低了约 80%, 这是由于双单体体系光致聚合物在曝光时会快速形成三维网格刚性结构, 且活性单体官能度越高, 环氧基体的交联密度越强, 机械强度就越高, 但丙烯酸酯单体比例过高, 将使环氧基体过分具有刚性, 会阻止丙烯酸酯单体在光照时的迁移和扩散, 从而导致样品收缩率极低。同时, 富勒烯纳米粒子是刚性纳米粒子, 在光致聚合反应中扩散到暗条纹处, 促进形成暗条纹的同时降低聚合物收缩率。

2.5 全息存储

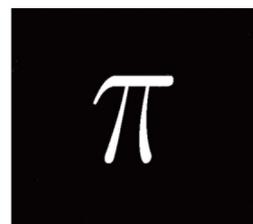
使用图 3(b)所示光路, 其中空间光调制器(SLM)是德国 HOLOEYE 公司旗下的产品, 型号为 LC 2002(透射式), 分辨率为 832×624, 工作面积为 266 mm×200 mm, 像素间距为 32 μm , 帧率为 62。CCD 相机为大恒图像公司的水星一代工业相机, 型号为 MER-500-7UC-L, 分辨率为 2592×1944, 像元尺寸为 2.2 μm , 信噪比为 44 dB, 动态范围 70.1 dB, 帧率为 7。

利用富勒烯掺杂和未掺杂的聚合物材料进行图像 π 记录并且读出。被记录图片与记录后读出的结果如图 8 所示。

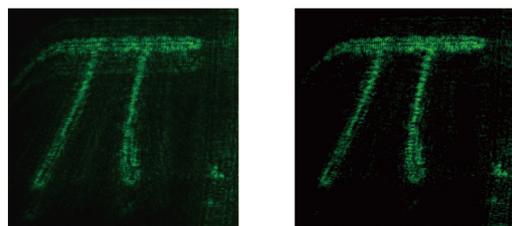
如图 8(b)、(c)所示, 记录后该图案的再现图像无明显失真, 可以看出所制备的实验材料的光学质量良好。但是对比掺杂和未掺杂材料明显可以看出掺杂富勒烯的材料进行图像存储后的质量明显高于未掺杂的样品。这表明所制备的基于富勒烯掺杂的双单体体系下的光致聚合物材料具有更好的全息存储能力。

3 结 论

本文在基于双单体体系光致聚合物材料中引入 C_{60} , 显著提高了光致聚合物全息存储特性。



(a) 被记录图像



(b) 未掺杂材料记录后读出图像 (c) 掺杂材料记录后读出图像

图 8 全息图像存储

Fig. 8 Holographic image storage

最佳 C_{60} 掺杂浓度为 0.03%, 其不仅可以促进光引发剂光解离进而提高光致聚合反应速率, 而且参与单体扩散从而形成更高强度的全息光栅。掺杂后的材料在 532 nm 波长的激光照射下, 光强 20 mW/cm^2 、厚度 200 μm 时, 光栅最大衍射效率达到 86.41%, 折射率调制度为 9.8×10^{-4} , 感光灵敏度为 1.32 cm^2/J , 同时其样品体积收缩率仅为 0.0795%。利用光致聚合物材料进行全息图像存储, 对比存储后的图像明显可以看出掺杂富勒烯材料的样品存储后的图像质量明显高于未掺杂的样品, 关于 C_{60} 掺杂光致聚合物材料展现出更好的全息存储能力。因此掺杂 C_{60} 之后的光致聚合物材料在全息性能和全息存储效果上都有明显的提高, 故掺杂富勒烯(C_{60})光致聚合物是有望应用于高密度全息存储。

参考文献:

- [1] FREEMAN R G, GRABAR K C, ALLISON K J, et al. Self-assembled metal colloid monolayers: an approach to SERS substrates[J]. *Science*, 1995, 267(5204): 1629 – 1632.
- [2] NOBUKAWA T, NOMURA T. Correlation-based multiplexing of complex amplitude data pages in a holographic storage system using digital holographic techniques[J]. *Polymers*, 2017, 9(8): 375.
- [3] 王珩, 徐世峰, 马佳, 等. 丙烯酸胺光致聚合物全息存储性能研究 [J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2017, 34(6):

- 92 – 96.
- [4] LIU Y, FAN F L, HONG Y F, et al. Volume holographic recording in Al nanoparticles dispersed phenanthrenequinone-doped poly(methyl methacrylate) photopolymer[J]. *Nanotechnology*, 2019, 30(14): 145202.
- [5] 柳澎. 新型快响应光致聚合物的体全息存储研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [6] SHIN C W, KIM N, KIM J H, et al. Fabrication of holographic input coupler for optical storage device using photopolymer[C]//Proceedings of SPIE 5742, Practical Holography XIX: Materials and Applications. San Jose: SPIE, 2005: 284 – 291.
- [7] LIU H P, YU D, WANG W B, et al. Mutual diffusion dynamics as matter transfer mechanism in inorganic nanoparticles dispersed photopolymer[J]. *Optics Communications*, 2014, 330: 77 – 84.
- [8] 马晨, 张保民, 王富强, 等. 基于双化学反应体系的绿敏环氧树脂基光致聚合物全息存储材料 [J]. *发光学报*, 2013, 34(5): 565 – 572.
- [9] 薛晓渝. 掺杂金纳米粒子光致聚合物材料全息存储特性研究 [D]. 郑州: 河南大学, 2013.
- [10] HU P, LI J H, JIN J C, et al. Highly sensitive photopolymer for holographic data storage containing methacryl polyhedral oligomeric silsesquioxane[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(18): 21544 – 21554.
- [11] LI J H, HU P, ZENG Z Y, et al. Phenanthraquinone-doped polymethyl methacrylate photopolymer for holographic recording[J]. *Molecules*, 2022, 27(19): 6283.
- [12] 陈会心. 掺杂与未掺杂纳米粒子的光致聚合物的制备、记录及显示研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [13] LIU Y R, LV H Q, KANG B, et al. Diffusion kinetics investigations of the dual monomer system in the photopolymer holographic material[C]//Proceedings of SPIE 12066, AOPC 2021: Micro-optics and MOEMS. Beijing: SPIE, 2021.
- [14] PI H S, LI W P, SHI Z W, et al. Effect of glycerol on an N-vinylpyrrolidone-based photopolymer for transmission holography[J]. *Polymers*, 2021, 13(11): 1754.
- [15] ROGERS B, MARTIN S, NAYDENOVA I. Study of the effect of methyldiethanolamine initiator on the recording properties of acrylamide based photopolymer[J]. *Polymers*, 2020, 12(4): 734.
- [16] 李金芮. 含富勒烯微纳结构调控及其光、电性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [17] 谢广宇, 吕晗, 陈雪, 等. 富勒烯 C₆₀ 的发现、结构、性质与应用 [J]. *炭素*, 2021(3): 34 – 42.
- [18] 李进, 王雨帆, 杜伯学, 等. 环氧树脂/富勒烯纳米复合材料空间电荷注入特性 [J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(13): 4974 – 4981.
- [19] GAMBOGI W J JR, WEBER A M, TROUT T J. Advances and applications of dupont holographic photopolymers[C]//Proceedings of SPIE 2043, Holographic Imaging and Materials. Quebec City: SPIE, 1993: 2 – 13.
- [20] LUO Y, GELSINGER P J, BARTON J K, et al. Optimization of multiplexed holographic gratings in PQ-PMMA for spectral-spatial imaging filters[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(6): 566 – 568.
- [21] 万晓君, 嵯渡华, 施盟泉, 等. 双固化型全息用光致聚合物的研制及其全息性质研究 [C]//第六届中国功能材料及其应用学术会议论文集 (1). 武汉: 国家仪表功能材料工程技术研究中心, 2007.
- [22] 康彪, 吕画青, 刘悠嵘, 等. 采用双单体的丙烯酸酯类光致聚合物材料的全息特性研究 [J]. *光子学报*, 2022, 51(5): 0509001.
- [23] HU P, CHEN Y X, LI J H, et al. Impact of fullerene on the holographic properties of PQ/PMMA photopolymer[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 221: 109335.
- [24] 张保民, 马晨, 郭晋红, 等. EVA 热熔胶膜用于环氧树脂类光致聚合物全息存储卡的制备工艺研究 [J]. *光电工程*, 2015, 42(1): 39 – 44.
- [25] 姚华文, 陈仲裕, 候立松, 等. 作为光存储材料的有机光致聚合物材料研究进展 [J]. *物理学进展*, 2001, 21(4): 459 – 468.
- [26] MECHAHOUGUI S, GESBERT D, MEYRUEIS P. Study of the influence of processing baths on the modulation profile of volume holographic gratings[J]. *Optics & Laser Technology*, 1995, 27(5): 293 – 297.
- [27] JEONG Y C, LEE S, PARK J K. Holographic diffraction gratings with enhanced sensitivity based on epoxy-resin photopolymers[J]. *Optics Express*, 2007, 15(4): 1497 – 1504.
- [28] LIU Y R, SHEN T, KANG B, et al. Enhancement of holographic performance and stability of photopolymer materials by introducing epoxy resin and dyes[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 156: 108580.

(编辑: 张 磊)