

聚合物全息光波导显示性能研究

杨蕊嘉¹, 于丹^{1*}, 郝佳奇¹, 高明泽², 张帅²

¹天津理工大学, 天津

²中国民航大学, 天津

收稿日期: 2022年10月17日; 录用日期: 2022年11月12日; 发布日期: 2022年11月22日

摘要

使用菲醌掺杂的聚甲基丙烯酸甲酯光致聚合物研制了新型全息光波导器件。该器件具有优良的光学性能, 能够实现不同波长激光的全反射传输。实验设计采用自由空间光与波导内传输光束干涉方式写入全息体光栅, 这种新颖特殊的耦合方式能够将记录光束直接耦合进入波导内传输, 而不需要其他耦合介质, 大大简化了光波导材料的制作流程并降低了成本。实验研究表明, 耦合写入光波导的全息光栅获得了理想的衍射光斑及图像信息再现效果, 为利用聚合物全息光波导研制近眼显示器提供了实验依据。

关键词

光波导, 全息光栅, 光致聚合物, 近眼显示

Study on Display Performance of Polymer Holographic Optical Waveguide

Ruijia Yang¹, Dan Yu^{1*}, Jiaqi Hao¹, Mingze Gao², Shuai Zhang²

¹Tianjin University of Technology, Tianjin

²Civil Aviation University of China, Tianjin

Received: Oct. 17th, 2022; accepted: Nov. 12th, 2022; published: Nov. 22nd, 2022

Abstract

A new holographic optical waveguide device was fabricated using phenoquinone doped polymethyl methacrylate (PMMA) photopolymer. The device has excellent optical properties and can realize the total reflection transmission under different laser wavelengths. The interference between free space beam and transmitted beam in the waveguide is designed to write the holo-

*通讯作者。

文章引用: 杨蕊嘉, 于丹, 郝佳奇, 高明泽, 张帅. 聚合物全息光波导显示性能研究[J]. 材料科学, 2022, 12(11): 1145-1151. DOI: 10.12677/ms.2022.1211126

graphic volume grating. This novel and special coupling mode can directly couple the recording beam into the waveguide for transmission without other coupling media, which greatly simplifies the fabrication process of optical waveguide material and reduces the cost. Experimental results show that the holographic grating coupled with the written optical waveguide can obtain the suitable diffraction spot and image information reproduction effect, which provides the experimental basis for the development of near-eye display using polymer holographic optical waveguide.

Keywords

Optical Waveguide, Holographic Grating, Photopolymer, Near-Eye Display

Copyright © 2022 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

近眼显示器是一类将图像信息通过光学成像元件投射到人眼中的显示装置[1] [2]。其贴近于人眼的透明显示器,既能够接收虚拟信息,也能够同时观察真实的外部世界。近眼显示装置可应用于头盔显示器、增强现实(AR)眼镜等军事与民用领域,具有广阔的市场需求和实用前景[3]。近眼显示技术的实用化和市场化主要受限于核心光学器件及新型显示方法的发展,目前还没有形成完美的解决方案。

基于光波导的近眼显示系统被研究者看作最具发展潜力的显示技术,光波导核心技术未来可能推动AR眼镜的普及[4] [5] [6] [7]。该类型近眼显示器需要将图像通过波导一端耦合进入波导内部,并在波导内通过全反射传输一定距离后到达输出端,再通过耦合输出光栅将信息显示至人眼。目前的光波导主要有几何光波导和衍射光波导两大类,其中几何光波导即阵列光波导需要堆叠镜面阵列,制造工艺复杂且成本高昂。衍射光波导中的衍射光栅能够替代传统的光学结构,具有技术上的优势。但是无论是利用光刻技术制造的表面浮雕光栅波导还是基于全息干涉技术制造的全息体光栅波导,由于受到制作工艺和生产成本的限制,目前都无法实现量产。

基于聚合物制作的光波导一般是先将光敏有机薄膜涂在玻璃基底上,然后用相干光分别记录写入光栅和读出光栅[8] [9] [10]。这种光波导利用非传统几何光学技术进行光耦合,不需要复杂的镜面阵列,但是受到材料的限制,清晰度和衍射效率均低于光刻光栅波导。本文设计的全息体光栅波导属于衍射光波导的一种,但是在结构上与常见的衍射光栅波导有明显的区别。具有高厚度的新型光致聚合物波导材料可直接制作成为光波导,结构简单、成本低廉。通过实验测试了耦合光栅写入能力与波导传输性能,材料良好的全息性能为改善聚合物全息光波导的显示性能提供了全新的研究方向。

2. 聚合物光波导材料

图 1(a)为光致聚合物波导材料的制备流程。本文所使用的光致聚合物材料为掺杂菲醌的聚甲基丙烯酸甲酯聚合物(以下简称为 PQ-PMMA),该材料具有高厚度、全息性能好、成本低廉等优点,十分适合用于全息光栅的记录与读取。材料的主要成分包括固态光敏剂菲醌(英文缩写 PQ)与液态单体甲基丙烯酸甲酯(英文缩写 MMA),以及固态热引发剂偶氮二异丁腈(英文缩写 AIBN);各成分的质量百分比为 PQ: AIBN: MMA = 1: 0.5: 98.5。材料采用热致聚合方法制备:首先按照成分比例使用磁力搅拌器均匀混合固态与液态原料;然后将混合溶液升温至 55℃进行预聚合 2~3 小时,等待混合溶液排除产生的气体并达到澄清状

态后进行后续加热聚合流程；采用超声振荡混合加热方式均匀加热混合溶液至 70℃ 左右，观察到液体略粘稠时将混合液体注入模具中；最后转移到真空箱中排出气泡，在 60℃ 干燥固化 48 小时，制备的光致聚合物脱模前的照片如图 1(b) 所示。聚合物材料需要脱模并打磨边缘呈一定角度，以便入射光能够耦合进入材料，经抛光打磨后的光波导材料如图 1(c) 所示，厚度在 200 μm ~5 mm 范围内可控。

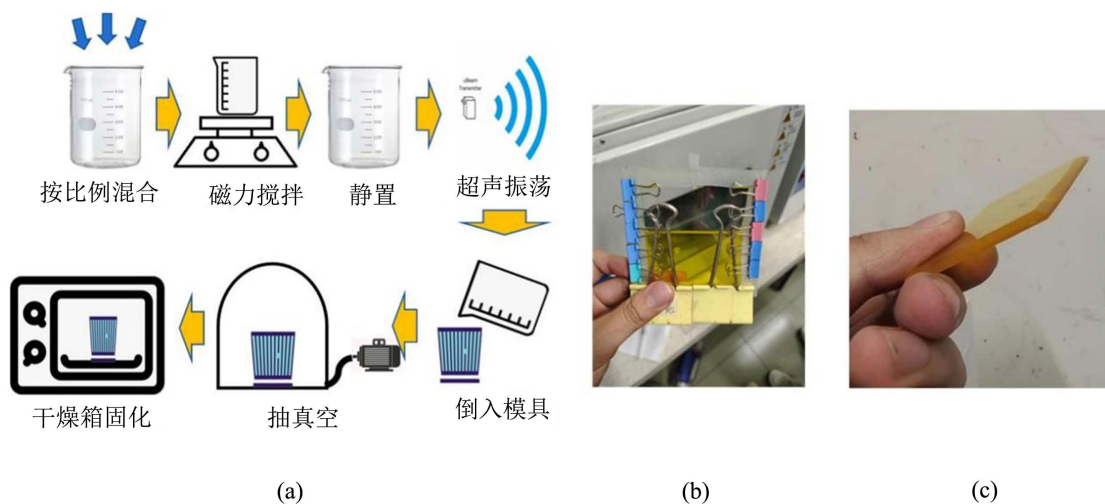


Figure 1. Polymer optical waveguide material (a) Preparation process ; (b) Undemoulded solid sample without polishing; (c) Optical waveguide photopolymer

图 1. 聚合物光波导材料(a)制备流程；(b)未脱模打磨的固体样品；(c)光致聚合物波导材料

3. 光波导原理及实验光路

图 2 为测试聚合物光波导全息显示性能的实验光路。分别采用 473 nm 和 532 nm 两种波长的 DPSS 激光作为光源，图中以波长 532 nm 的绿光为例(100 mW, 单纵模激光器, 长春新产业光电技术有限公司)。入射激光经过宽带分光棱镜被分为两束，其中一束参考光经反射镜反射后照射至扩束准直镜，而后通过长焦凸透镜会聚至材料侧面，能够保证入射角大于临界角，在材料内部发生全反射形成波导；另外一束物光经过扩束准直镜扩束，并可以加载图像进入光路，同样经过长焦汇聚透镜入射至材料表面，与内部的全反射光束发生干涉，形成全息体光栅。

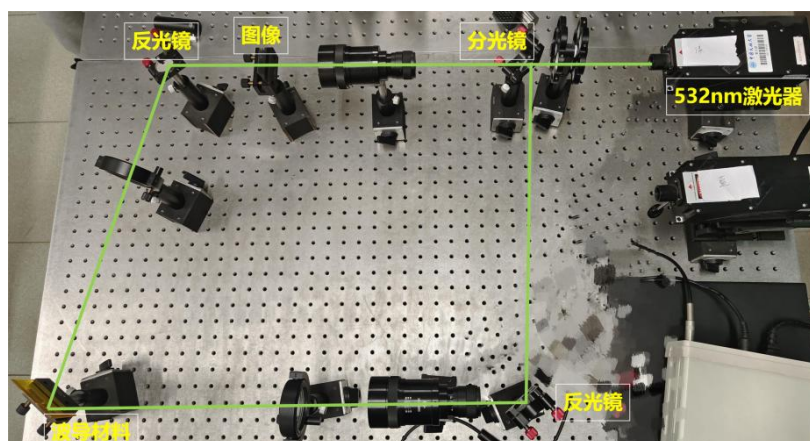


Figure 2. Experimental setup for optical waveguide display performance test

图 2. 光波导显示性能测试光路

聚合物光波导内全反射光束与外部加载的图像光束干涉形成体光栅的过程如图 3(a)所示。参考光束通过材料的倾斜表面耦合进入波导内部，并在波导内进行全反射传输；另外一束物光束垂直入射至材料表面，与波导内耦合光束发生干涉，分别在波导前端与后部形成输入与输出耦合体光栅，如图 3(b)所示。当物光携带图像信息入射至波导耦合输入光栅处，光栅将衍射光束通过波导内全反射传输至输出光栅处；经输出光栅衍射，将图像输出至人眼。

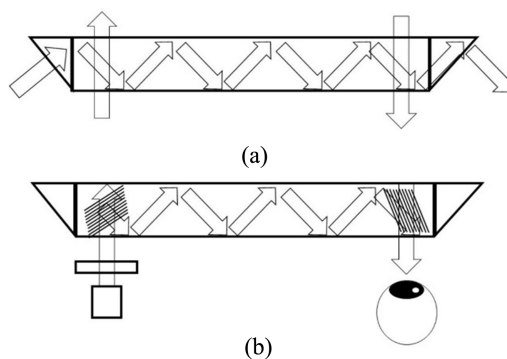


Figure 3. Principle diagram of polymer optical waveguide (a) Holographic grating recording process; (b) Image display process

图 3. 聚合物光波导原理示意图(a)全息光栅记录过程；(b)图像显示过程

4. 全息显示性能测试

根据 PQ-PMMA 光致聚合物的吸收谱可知，材料的吸收波段在 450~550 nm，实验中选择了绿光和蓝光两种激光波长记录全息光栅。图 4(a)为 532 nm 绿光作为干涉光束在波导内全反射传输过程，图 4(b)为 473 nm 蓝光作为干涉光束在波导内全反射传输过程。在暗室环境下能清晰地观察到激光在透明光波导材料内的全反射现象，证明本文制备的聚合物光波导材料可适用于不同波段激光的全息光栅记录与读取。

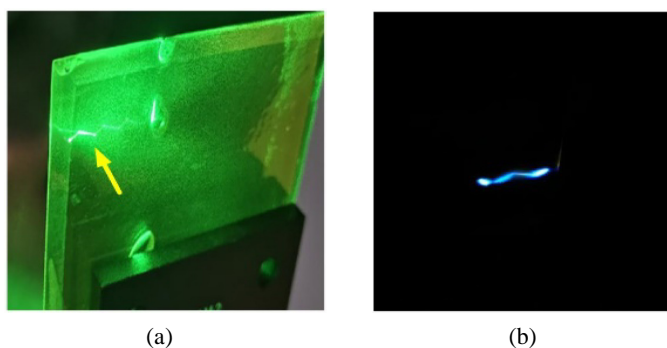


Figure 4. Total reflection transmission of coherent light in photopolymer waveguides (a) Green light coupling; (b) Blue light coupling

图 4. 聚合物光波导中干涉光的全反射传输(a)绿光耦合；(b)蓝光耦合

4.1. 蓝光全息光栅

实验测试了用蓝光光斑写入全息光栅后，经光波导耦合的透射和衍射图样。垂直于材料表面的光束与波导内全反射光束经过一定时间的曝光，将体光栅通过干涉方式写入波导。图 5(a)为记录光的直接透射光斑，能够看出光束保持良好的光斑形态。图 5(b)为写入全息光栅后，仅用读出光束获得的衍射光斑。衍射光斑亮度均匀，人眼能够直接观察，衍射效率较高。

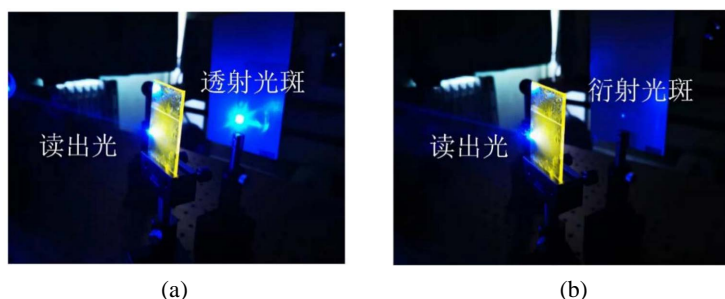


Figure 5. Blue light spots write to holographic grating through optical waveguide (a) Transmission spot; (b) Diffraction spot
图 5. 蓝光光斑通过光波导耦合写入全息光栅(a)透射光斑; (b)衍射光斑

为了优化曝光时间,提高全息光栅衍射效率,实验测量了不同曝光条件下,曝光结束后衍射效率随时间的变化见图6。由图6(a)~(c)可知当关闭在光波导内传输的记录光后,聚合物材料内部的光化学反应继续进行使得衍射效率在短时间内仍能继续升高,但是反应结束后光产物的扩散会导致衍射效率随时间下降。拟合衍射效率曲线得到不同曝光时间对应的下降曲线时间常数值见图6(d),曝光时间为200 s时具有最大的时间常数,衍射效率曲线也最平稳。

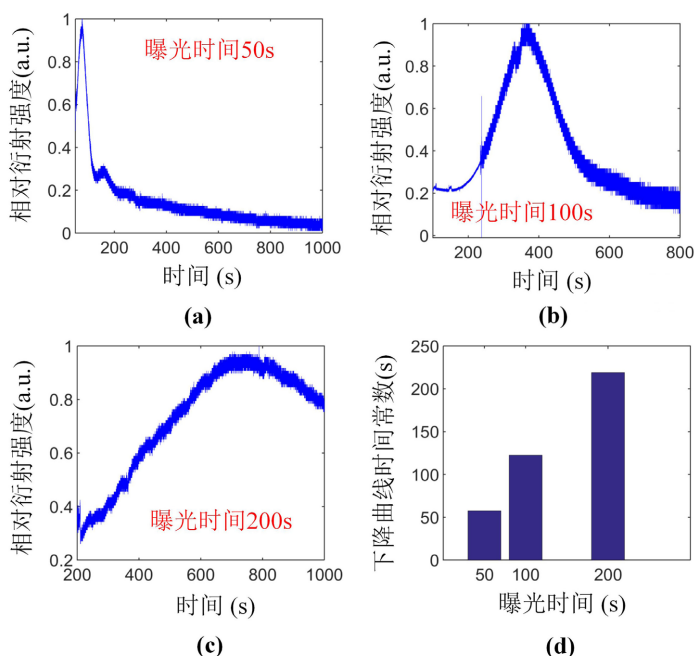


Figure 6. Blue light holographic grating exposure time optimization (a) (b) (c) Diffraction efficiency changes with time under various exposure time; (d) Decay time constant changes with exposure time

图 6. 蓝光全息光栅曝光时间优化(a)(b)(c)不同曝光时间下,衍射效率随时间的变化(d)下降时间常数随曝光时间的变化

4.2. 绿光全息光栅

实验还测试了在光波导中用绿光加载文字图片信息的衍射效果。物光束经过印有文字“中”的透明片,再垂直照射至光波导材料表面,曝光结束后移走透明片再读取衍射图像。图7(a)为文字图片的透射图像,由于相机原因,部分反光较强。光波导的衍射图像如图7(b)所示,文字清晰可见,基本没有变形扭曲和噪声光斑,光波导耦合写入全息光栅具有良好的光学质量,证明了该波导对图像的衍射能力。

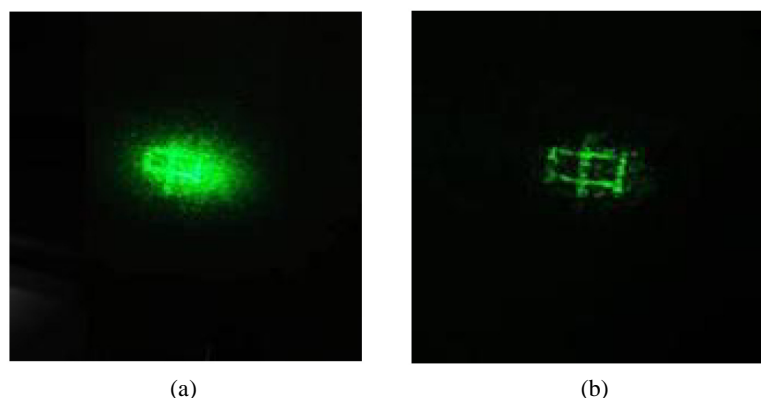


Figure 7. Green light loads the image into the optical waveguide (a) Transmission image; (b) Diffraction image
图 7. 绿光加载图像耦合写入光波导(a)透射图像; (b)衍射图像

5. 结论

本文研制了一种新型聚合物光波导材料，PQ-PMMA 光致聚合物具有优异的全息性能，可制备成为毫米量级厚度的材料，对样品进行打磨可直接制备成光波导材料，避免了复杂苛刻的制备流程，降低了光波导成本。实验测试了不同波长激光的全息光栅记录和传输能力，蓝光和绿光光源均能观察到波导内的全反射现象。采用自由空间光与波导内传输光束干涉方式写入全息体光栅，能够将空间光束直接耦合进入波导内传输，而不需要其他耦合介质。实验观察了曝光结束后，光栅衍射效率随时间的变化，进而优化了记录全息光栅的曝光时间。再现的光斑衍射效率高，图像清晰无变形，能够用人眼直接观察。实验结果表明新型聚合物光波导具有优良的全息显示性能，对于推动全息光波导近眼显示器的研制能够起到积极的促进作用。

基金项目

本论文感谢天津市教委科研项目(自然科学)(2017KJ238)的资助。

参考文献

- [1] 刘昇, 张宇宁, 沈忠文, 王保平. 全息波导显示系统的实现与优化[J]. 光学学报, 2017, 37(5): 302-309.
- [2] 彭飞, 张攀, 杨德兴, 康明武, 马百恒. 全息波导显示系统中输出光栅的优化[J]. 光子学报, 2015, 44(2), 22-27.
- [3] Shen, Z.W., Zhang, Y.N., Liu, A., Weng, Y.S. and Li, X.H. (2020) Volume Holographic Waveguide Display with Large Field of View Using a Au-NPs Dispersed Acrylate-Based Photopolymer. *Optical Materials Express*, **10**, 312-322. <https://doi.org/10.1364/OME.380826>
- [4] 郭峰, 赵建林, 顾刚. 屏显全息组合镜的衍射特性研究[J]. 光子学报, 2004, 33(3): 350-352.
- [5] Kress, B. and Shin, M.M. (2013) Diffractive and Holographic Optics as Optical Combiners in Head Mounted Displays, Session: Wearable Systems for Industrial Augmented Reality Applications. *The 2013 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, Zurich, 8-12 September 2013, 1479-1482. <https://doi.org/10.1145/2494091.2499572>
- [6] Robert, C. (2008) Sol-Gel Planar Lightwave Circuits for Sensing and Telecommunications. Doctor Thesis, Dublin City University.
- [7] Martha-Elizabeth, B., Benjamin, W., et al. (2012) Monolithic Integration of Optical Waveguide and Fluidic Channel Structures in a Thiol-Ene/Methacrylate Photopolymer. *Optical Materials Express*, **2**, 1-8. <https://doi.org/10.1364/OME.2.001548>
- [8] Fernández, R., Bleda, S., et al. (2019) Holographic Waveguides in Photopolymers. *Optics Express*, **27**, 827-840. <https://doi.org/10.1364/OE.27.000827>
- [9] Tolstik, E., Romanov, O., Matusevich, V., Tolstik, A. and Kowarschik, R. (2014) Formation of Self-Trapping Wave-

guides in Bulk PMMA Media Doped with Phenanthrenequinone. *Optics Express*, **22**, 3228-3233.
<https://doi.org/10.1364/OE.22.003228>

- [10] 刘琪, 于丹, 杨蕊嘉, 罗再励, 廖祥羽, 张旭. 光致聚合物在全息存储装置中的应用研究[J]. 传感器技术与应用, 2022, 10(2), 84-90.