

文章编号:1005-4642(2025)08-0048-05

利用低成本液晶屏实现液晶空间光调制器

李禹喆^a, 吴科霖^a, 蒋梦恬^a, 王若峰^a, 刘蔚佳^a, 杨明^{a,b}, 杨光^{a,b}

(华中科技大学 a. 物理学院; b. 物理国家级实验教学示范中心, 湖北 武汉 430074)

摘要: 基于液晶技术的共同原理, 采用改进的液晶屏替代液晶空间光调制器, 用于调制光学信息实验. 该方法有效再现了液晶空间光调制器在模拟常见衍射图样和加载全息图方面的应用, 模拟光栅衍射及模拟小孔衍射的效果与预期一致, 全息图的复现效果显示信息损失极少, 全息图被准确复现. 在保持实验效果的前提下, 该方法显著降低了实验成本.

关键词: 液晶屏; 液晶空间光调制器; 光学全息; 衍射

中图分类号: O438.1

文献标识码: A

DOI: 10.19655/j.cnki.1005-4642.2025.08.008

液晶空间光调制器(Liquid crystal spatial light modulator, LCSLM)是通过液晶元件精确控制光特性^[1]的光电设备, 在成像、投影、模拟光学元件、强度调制、光束整形^[2]、光场调控^[3]、量子比特逻辑门^[4]、光学全息^[5]等实验研究中都有重要应用^[6]. 然而, 高昂的成本限制了 LCSLM 在教育领域的普及, 导致大多数学生缺乏相关的学习资源. 本文探索了使用低成本的液晶显示屏(Liquid crystal display, LCD)替代 LCSLM 的可行性, 通过电信号改变液晶分子的排列, 在实验中实现类似 LCSLM 的光学信息调制.

1 工作原理

LCSLM 的工作原理与手机、电脑和投影仪的液晶显示屏基本一致, 通过对液晶施加电场来改变液晶分子的排列, 从而利用液晶的折射率各向异性改变光的特性, 如偏振、相位和强度. 具体来说, LCSLM 通过精确控制每个像素的液晶分子取向, 实现对光的调制(图 1). LCD 主要通过液晶分子取向, 改变光的偏振方向从而调节屏幕的透光率. 基于液晶技术的共同原理, 用改进的 LCD 有望在部分应用中发挥 LCSLM 的作用.

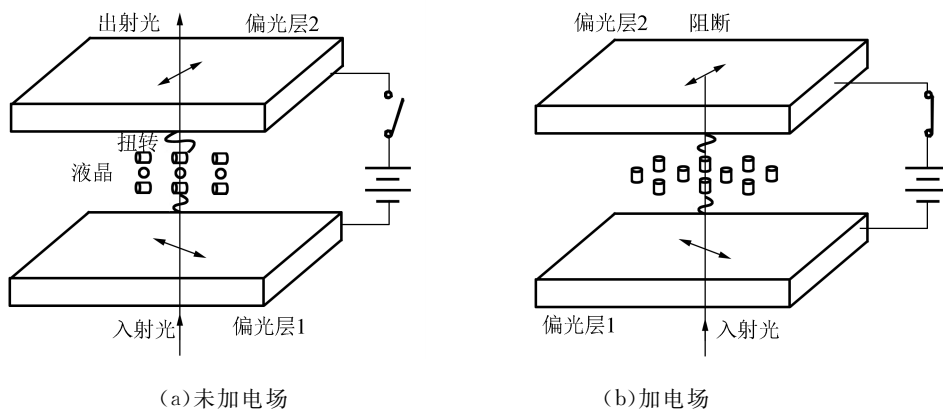


图 1 LCSLM 的原理示意图

收稿日期: 2024-07-26; 修改日期: 2024-10-18

作者简介: 李禹喆(2003—), 男, 北京人, 华中科技大学物理学院 2022 级本科生. E-mail: 2567820349@qq.com

通信作者: 杨明(1969—), 男, 吉林长春人, 华中科技大学物理学院副教授, 博士, 从事非平衡态统计物理教学与科研工作. E-mail: yangming@hust.edu.cn

2 实验器材

投影仪内部所用的液晶屏(图 2)为透射式 LCD,将其通过主板连接电脑(图 3). 主板用于实现 LCD 与电脑的连接及电源供给,使用配套的投影仪主板即可,但若 LCD 能直接连接电脑,则可以省略主板.

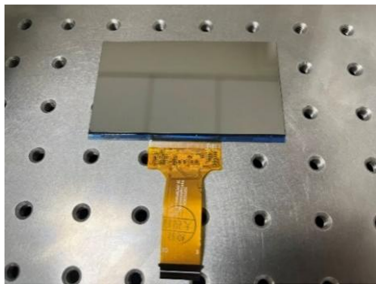


图 2 液晶屏

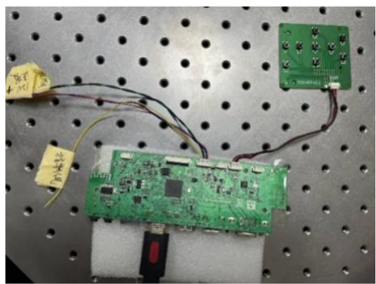


图 3 控制主板

实验采用的 LCD 是投影仪屏幕,其分辨率为 $1\,280\times720\text{ pixel}$,在显微镜下测得单个像素大小

(对角线)为 $67\text{ }\mu\text{m}$,在激光照射下投影仪屏幕透光性较好.

3 效果检验

3.1 模拟光栅衍射

在光学实验中,LCSLM 可用于模拟光栅. 为了验证 LCD 的效果,搭建如图 4 所示的光路,在 LCD 上显示图 5 所示光栅常量不同的衍射光栅. 利用激光束照射 LCD,即可在白屏上得到衍射图样,如图 6 所示.

图 6(a)的衍射图样是由 LCD 的像素结构引起的. LCD 的像素排列构成整齐的二维光栅,因此图 6(a)为典型的二维光栅衍射特征. 将图 5(a)替换为图 5(b)的光栅时,由于在横向有一半的像素不能透光,所以衍射光栅的光栅常量变为了 2 倍,因此可以看到图 6(b)中的横向亮点之间的间距变为了原来的 $1/2$. 继续增大光栅的间隔后,图 6(c)在原有结构产生的衍射图样周围明显呈现出周期性多缝衍射的典型特征,即单缝衍射和多缝干涉的叠加,这与预期基本相符.

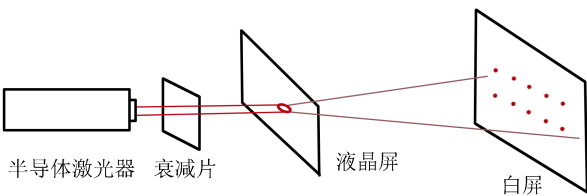


图 4 LCD 模拟元件光路示意图

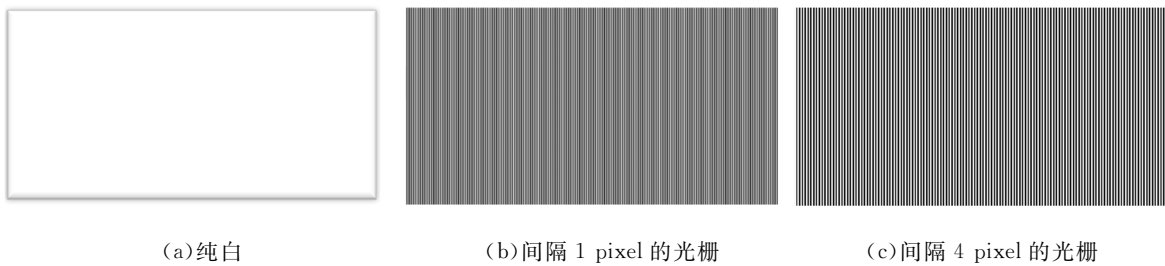


图 5 LCD 上显示的衍射结构

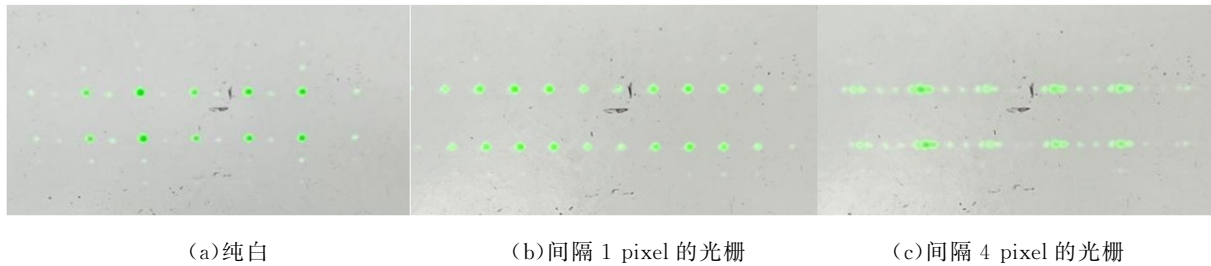


图 6 图 5 衍射结构对应的衍射图样

激光在透过 LCD 后产生的衍射亮点尺寸较小,为了更清晰地观测衍射图样,实验对入射激光进行扩束处理.扩束后,衍射图样中图 6(a)所示的每个亮点被放大为亮斑,其分布保持不变.

3.2 模拟小孔衍射

为了评估 LCD 作为 LCSLM 在实际应用中的表现,在 LCD 上模拟了三角形孔、六边形孔和圆孔 3 种典型的孔形结构,并观察其衍射效果.该 LCD 对这些孔型图案的显示是通过多个平行四边形的像素点进行近似,像素排列结构与显示效果如图 7 所示.

实验通过摄像机聚焦于单个亮斑,观测孔型

结构的衍射图样,如图 8 所示.各种孔型结构的衍射图样完整地呈现了自身特征,与理论计算及常规实验结果基本一致.衍射图样由 LCD 自身的二维光栅结构产生,而显示孔型结构后,衍射图样则表现为二维光栅衍射与小孔衍射的叠加.

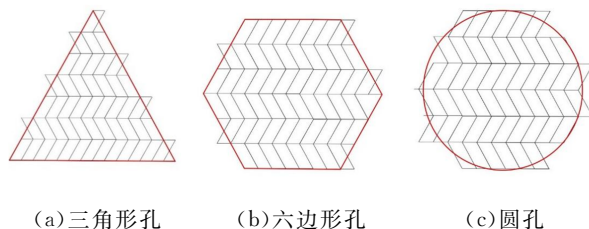


图 7 LCD 像素显示小孔图案的示意图

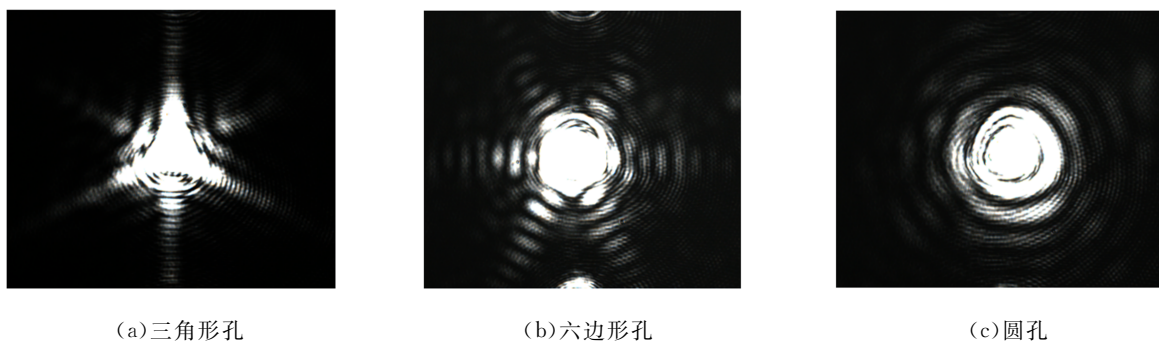


图 8 各孔型结构对应的衍射图样

3.3 光学全息应用效果

3.3.1 实验方法

实验装置如图 9 所示,包括光学底座、学生电源、半导体激光器(532 nm)、衰减片、扩束镜、准直镜、LCD、摄像机、控制主板和电脑.



1. 半导体激光器 2. 衰减片 3. 扩束镜
4. 准直镜 5. LCD 6. 摄像机 7. 学生电源

图 9 实验装置

1) 生成全息图

运用 Matlab 编写并运行数字全息程序,将需要复现显示的图像导入到程序中得到图像的计算全息图^[7].全息图的生成代码是在模拟马赫-曾德尔干涉光路,实际实验需要调节光路直至出现干涉条纹后调整合束镜,让 2 束光有轻微的夹角,使其能够产生离轴全息,之后将待测物放入图 10 所示光路,由摄像机拍摄全息图.具体代码先使用菲涅尔-基尔霍夫衍射积分计算函数模拟物光波,再将计算结果与一定角度的参考光干涉从而模拟数字全息图^[8].

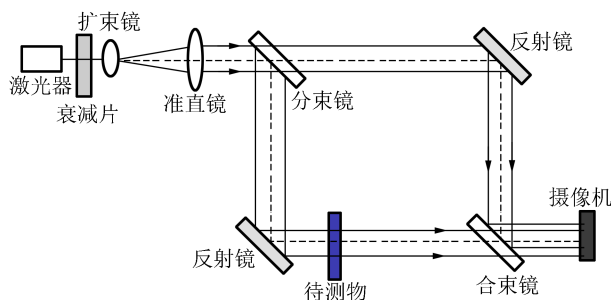


图 10 马赫-曾德尔干涉光路示意图

2) 调节光路

参照图 9 搭建光路,首先调节激光扩束和准直系统,当激光扩束到合适大小后,放入准直镜,调节扩束镜与准直镜位置,直至激光光斑大小变化幅度较小且亮度均匀,且光斑大小随距离略微缩小从而方便摄像机记录。调节完毕后将 LCD 和摄像机放入光路,保证各器件同轴等高。

3) 加载全息图

调整电脑分辨率为 $1\,280 \times 720$ pixel,使其与 LCD 的分辨率相匹配,将采集的全息图通过电脑

加载到 LCD 上。

4) 调节成像

当再现光(激光光斑)入射 LCD,转动衰减片控制光强直至显示器上显示的光强合适,之后调节摄像机/光屏和 LCD 的位置,采集成像。

3.3.2 全息图的光学复现效果

使用“华科”字样检验 LCD 作为 LCSLM 的效果,原图、计算得到的全息图和经 LCD 实现光学复现图如图 11 所示。可以看出,信息损失较少,全息图被较为准确地复现。

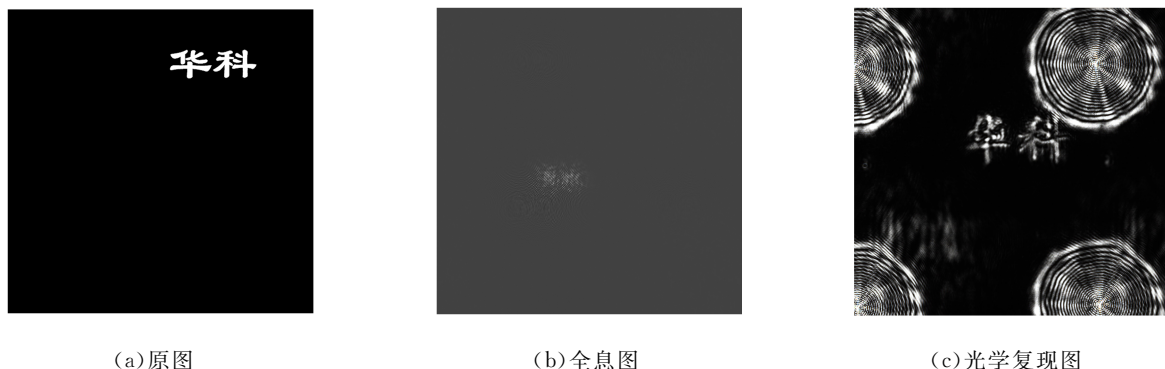


图 11 原图、全息图和光学复现图

3.3.3 效果对比

使用商用 LCSLM(大恒“SLM-T2”)进行全息光学复现,效果如图 12 所示。LCD 与 LCSLM 的参量及成本对比如表 1 所示。由此可见,利用 LCD 替代 LCSLM 应用于全息图的光学再现可行且有效。采用 LCD 显著降低了仪器的成本,同时复现效果差异较小,能够满足观察实验现象的要求。

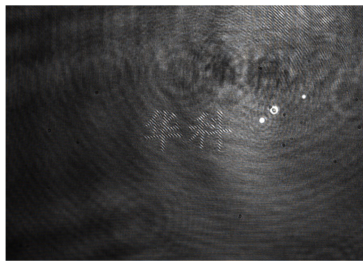


图 12 商用 LCSLM“华科”字样全息图光学复现

表 1 LCD 与 LCSLM 的参量及成本对比

器材	分辨率/pixel	像素/ μm	成本/元
LCD	$1\,280 \times 720$	67	228
LCSLM	$1\,024 \times 768$	26	19\,800

使用 LCD 基本能够达到与商用 LCSLM 相近的复现效果。光路调节难度相较于常规光路略高,一般需要 $30 \sim 60$ min 后能看到现象,调节的主要难点在于激光扩束镜与准直镜的配合。一方面要确保光斑的亮度均匀,避免仅复现图案的部分区域明亮可见;另一方面,准直效果须足够好,准直镜中心要在光轴上,否则会导致最终成像出现局部畸变。但在使用商用 LCSLM 时也存在以上的光路调节要求,只是能看到模糊图像的容错范围略大,因此 LCD 与商用 LCSLM 实现高质量复现全息图的难度并无明显差异。

4 结束语

传统 LCSLM 的应用场景受限于成本高,低成本的 LCD 作为具有数字控制的二维空间光相位调制器具有应用和推广潜力。本文通过实验验证了 LCD 模拟光学器件及全息成像的性能,足以达到实验教学及课堂演示效果。此外由于可编程性和低成本,LCD 还可以实现多种光学应用场景并作为开放性的信息光学实验平台,用于学生自主探索,开展相关的课题和毕业设计,可以有效激发学生的兴趣并提高学生的探究能力。尽管 LCD

作为 LCSLM 在实验教学和基本应用中展示了优势,但其在更复杂的应用场景,如相位调制^[9]、光束整形、器件开发^[10-11]等,实际效果还有待进一步验证和提升。

参考文献:

- [1] YANG Y Q, FORBES A, CAO L C. A review of liquid crystal spatial light modulators: Devices and applications [J]. *Opto-Electronic Science*, 2023, 2 (8):230026.
- [2] HYDE M W, BOSE-PILLAI S, VOELZ D G, et al. Generation of vector partially coherent optical sources using phase-only spatial light modulators [J]. *Physical Review Applied*, 2016, 6(6):064030.
- [3] 周源,李润泽,于湘华,等. 基于液晶空间光调制器的光场调控技术及应用进展(特邀)[J]. *光子学报*, 2021, 50(11):1123001.
- [4] ABOURADDY A F, GIUSEPPE D G, YARNALL T M, et al. Implementing one-photon three-qubit quantum gates using spatial light modulators [J]. *Physical Review A: Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 2012, 86(5):050303.
- [5] 曾铨锴. 基于空间光调制器的数字全息显微成像动态显示技术研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2022.
- [6] 高宇,高星,武耀霞,等. 液晶空间光调制器在高校光学实验教学中的应用探讨[J]. *大学物理实验*, 2021, 34(6):45-48.
- [7] 潘武,田贻丽. 光学全息的数字实现[J]. *光学精密工程*, 2005, 13(S1):15-20.
- [8] 屈玉福,陈沛戎. MATLAB 光学仿真实用教程[M]. 北京:电子工业出版社, 2022.
- [9] CALERO V, GARCÍA-MARTÍNEZ P, ALBERO J, et al. Liquid crystal spatial light modulator with very large phase modulation operating in high harmonic orders [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(22):4663-4666.
- [10] LI S Q, XU X W, VEETIL R M, et al. Phase-only transmissive spatial light modulator based on tunable dielectric metasurface [J]. *Science*, 2019, 364(6445):1087-1090.
- [11] JANG S W, CHOI W, KIM S, et al. Complex spatial light modulation capability of a dual layer in-plane switching liquid crystal panel [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1):8277.

Using low-cost liquid crystal display to implement liquid crystal spatial light modulator

LI Yuzhe^a, WU Kelin^a, JIANG Mengtian^a, WANG Ruofeng^a,
LIU Weijia^a, YANG Ming^{a,b}, YANG Guang^{a,b}

(a. School of Physics; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education,
Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Based on the common principles of liquid crystal technology, an improved liquid crystal display (LCD) was used to replace the liquid crystal spatial light modulator (LCSLM) for modulating optical information experiments. The method effectively demonstrated the applications of LCSLM in simulating common diffraction patterns and loading holograms. The simulation of diffraction effects for gratings and small apertures matched the expected results. The reconstructed hologram showed minimal information loss and hence the hologram could be accurately reproduced. While maintaining comparable experimental results, this method significantly reduced the cost of conducting such experiments.

Key words: liquid crystal display; liquid crystal spatial light modulator; optical holography; diffraction

[编辑:任德香]