

基于微纳光学的高分辨率相机成像技术研发与应用

郑诚

杭州腾聚科技, 浙江 杭州 310000

DOI:10.61369/ERA.2025080019

摘 要 : 介绍微纳光学元件成像原理, 包括光场调控机制等。阐述纳米压印、电子束光刻等加工技术特点。提及 DLP、LCOS 相关技术及液晶分子特性应用。还涉及散热、采样重建、去噪等方面研究, 以及在不同应用场景的验证和优势体现, 强调技术融合成果与未来方向。

关 键 词 : 微纳光学; 成像技术; DLP/LCOS

Research and Application of High Resolution Camera Imaging Technology Based on Micro-Nano Optics

Zheng Cheng

Hangzhou Tengju Technology, Hangzhou, Zhejiang 310000

Abstract : This paper introduces the imaging principles of micro-nano optical components, including mechanisms for light field control. It elaborates on the characteristics of processing technologies such as nanoimprint lithography and electron beam lithography. The text also mentions related technologies like DLP and LCOS, along with the application of liquid crystal molecular properties. Additionally, it covers research on heat dissipation, sampling reconstruction, and noise reduction, as well as validation and demonstration of advantages in various application scenarios, emphasizing the integration of technological achievements and future directions.

Keywords : micro-nano optics; imaging technology; DLP/LCOS

引言

随着科技的不断发展, 微纳光学元件成像技术日益受到关注。近年来, 我国发布了一系列鼓励科技创新的政策(如《关于促进科技成果转化若干规定》2019年), 为相关研究提供了政策支持。微纳光学元件基于独特的光场调控机制成像, 其中超表面、光子晶体等结构的特性至关重要。纳米压印、电子束光刻等技术用于元件加工, 各有优劣。同时, DLP、LCOS 等技术与微纳光学融合, 在成像应用中取得进展, 包括多种技术的协同作用提升成像质量, 以及不同系统在工业检测中的优势体现等, 这些都推动了成像技术的发展。

一、微纳光学成像技术基础

(一) 微纳光学元件成像原理

微纳光学元件成像基于对光场的独特调控机制。超表面和光子晶体等微纳结构具有特殊的光场调控能力^[1]。在亚波长尺度下, 其相位和振幅调制特性对光波前整形起着关键作用。通过精确控制相位和振幅, 能够实现对光传播方向、聚焦等特性的调控, 从而影响成像效果。微透镜阵列作为重要的微纳光学元件, 其与 CMOS 传感器的耦合模型建立也至关重要。合理的耦合模型可以更好地描述光在两者之间的传输和相互作用, 为实现高分辨率成像提供理论基础, 有助于深入理解微纳光学元件在成像过程中的工作原理。

(二) 微纳制造工艺进展

纳米压印技术在微纳光学元件加工中具有独特优势, 它能够

以相对较低的成本实现较高的分辨率和精度^[2]。通过模具的复制, 可以快速制造出大量具有相同结构的微纳光学元件。电子束光刻技术则以其高精度著称, 能够实现纳米级别的加工精度, 对于制造复杂的微纳光学结构具有重要意义。然而, 其加工速度较慢且成本较高。双光子聚合技术是一种新兴的微纳制造技术, 它可以在三维空间内精确地制造出复杂的微纳结构, 为微纳光学元件的制造提供了新的途径。在这些工艺中, 工艺精度对光学调制效率及成像分辨率有着关键制约。较高的工艺精度能够提高光学调制效率, 进而提升成像分辨率, 反之则可能导致成像质量下降。

二、DLP/LCOS 技术核心机理

(一) DLP 微镜阵列调制特性

DLP 技术的核心在于其微镜阵列的调制特性。DMD 芯片作为

关键部件，其微镜的偏转角度对光强分布有着至关重要的影响。通过构建二元光学调制数学模型，可以深入研究这种非线性关系^[3]。微镜在不同的偏转角度下，光的反射方向和强度会发生相应变化，这种变化遵循特定的数学规律。在结构光三维成像应用中，利用这种特性可以实现动态控制。通过精确调节微镜的偏转角度，能够对光强分布进行精细调控，从而为结构光三维成像提供准确的光场信息，提高成像的分辨率和精度。

（二）LCOS 相位调制机制

液晶分子排列状态对偏振光相位延迟有重要影响。通过实验与理论分析，揭示二者定量关系^[4]。基于此，可建立驱动电压 - 相位响应曲线。当施加不同的驱动电压时，液晶分子排列改变，进而导致偏振光相位延迟不同。这一特性为相位调制提供基础。进一步，提出基于迭代算法的全息波前校正方法。利用上述曲线及液晶分子对光的调制作用，通过迭代优化，校正全息波前，提高成像质量。该方法在基于微纳光学的高分辨率相机成像技术中具有重要应用价值，可有效改善成像的分辨率和准确性。

三、高分辨率成像系统设计

（一）光学架构协同设计

1. 微纳光学 -DLP 复合系统

设计超表面与 DMD 的空间光路匹配方案是微纳光学 -DLP 复合系统的关键。通过合理设计，能够实现照明光场整形与反射式调制的双重优化。超表面可对光场进行精确调控，使其与 DMD 的反射特性更好地匹配。这种匹配不仅提高了光的利用效率，还改善了调制效果。在传统 DLP 系统中，光效损耗是一个显著问题，而本方案通过优化空间光路匹配，有效解决了这一难题，为高分辨率成像系统提供了更优质的光学架构，提升了成像质量^[5]。

2. LCOS- 微透镜阵列集成

开发液晶相位板与微透镜的共轭匹配技术对于 LCOS- 微透镜阵列集成至关重要。在该集成系统中，通过精确的共轭匹配，可以更好地控制光的传播和相位分布。利用波前预补偿技术，能够有效消除多级衍射效应。多级衍射效应往往会降低全息成像的条纹对比度，而这种预补偿机制可以针对性地解决这一问题，从而提升条纹对比度，为实现高分辨率成像奠定基础^[6]。

（二）系统集成关键技术

1. 主动对准校准系统

构建基于机器视觉的六自由度精密调整平台是主动对准校准系统的关键。通过该平台，可实现微米级光学元件位置校准。其原理在于利用机器视觉的高精度检测能力，对光学元件的位置进行精确测量。然后，依据测量结果，通过精密调整机构对光学元件在六个自由度上进行微调。这样能够确保多模块光轴一致性误差小于 $\lambda/20$ ，从而满足高分辨率成像系统对光轴一致性的严格要求，为实现高分辨率成像奠定基础^[7]。

2. 热力学稳定性控制

DLP/LCOS 器件热变形会对成像质量产生影响。通过深入分析其影响规律，为解决这一问题，提出了梯度材料散热结构设计

方案。该方案利用了特殊的材料特性，能够有效地将热量传导出去，从而实现对系统温度的精确控制。这种散热结构的设计经过了多次模拟和实验验证，最终成功地将系统温漂控制在 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 以内，极大地提高了成像系统的热力学稳定性，为高分辨率成像提供了可靠的保障^[8]。

四、系统性能优化与评估

（一）计算成像算法优化

1. 压缩感知重建算法

开发基于 L1 范数约束的稀疏采样重建模型，通过合理构建模型结构与参数设置，有效挖掘图像的稀疏特性，提高重建精度^[9]。结合微纳光学调制特性设计自适应测量矩阵，使其能够更好地适应不同场景下的光学成像需求。这种自适应测量矩阵能够根据微纳光学元件对光场的调制情况，动态调整测量策略，从而在采样过程中获取更具代表性和信息量的样本。通过上述方法的协同作用，实现了在采样率降低至奈奎斯特极限的 30% 时仍能保持 80dB PSNR 的良好性能，为高分辨率相机成像技术在资源受限情况下的高效应用提供了有力支持。

2. 深度学习去噪网络

构建双通道残差卷积神经网络用于深度学习去噪。通过对微纳光学系统的点扩散函数建模，能够有效学习噪声特征。这种基于特定物理模型的学习方式，使得网络能够更好地适应微纳光学成像中的噪声模式。在低照度条件下，该网络取得了显著的效果，将图像信噪比提升了 15dB，大大提高了图像质量，为高分辨率相机在复杂光照条件下的成像提供了有力的算法支持^[10]。

（二）工艺改进与量产验证

1. 纳米压印模板复用技术

在纳米压印模板复用技术方面，重点研究了 PDMS 转印过程。通过深入分析界面粘附力学模型，为工艺改进提供理论依据。在此基础上，开发出抗粘附涂层工艺。该工艺的应用显著改善了模板的复用性能，使得纳米压印模板的使用寿命大幅提升。原本模板仅能使用 50 次左右，经过工艺改进后，其使用寿命能够达到 300 次以上。这不仅提高了生产效率，降低了成本，还为高分辨率相机成像技术的量产验证提供了有力支持，进一步推动了基于微纳光学的高分辨率相机成像技术的研发与应用。

2. 晶圆级键合工艺

在晶圆级键合工艺中，着重对低温等离子体活化参数进行了优化。通过一系列精确的实验和分析，确定了最佳的活化参数设置。在此基础上，成功实现了 8 英寸 LCOS 晶圆与 CMOS 读出电路的无缝键合。这种键合方式在微观层面上保证了连接的紧密性和稳定性，有效减少了信号传输损耗和干扰。经过大量的实验验证和生产数据统计，该工艺的成品率达到了 98.5%，这一数据表明该晶圆级键合工艺具有高度的可靠性和稳定性，为后续基于微纳光学的高分辨率相机成像技术的进一步研发和应用奠定了坚实的基础。

（三）应用场景测试分析

1. 显微成像系统测试

在500nm分辨率测试靶标下，对系统性能进行了验证。通过量化分析，发现微纳结构给系统带来了显著的效果。在视场扩展方面，效果明显，视场（FOV）提升了2.8倍，这极大地拓宽了成像的范围。同时，在光学串扰抑制能力上也有出色表现，光学串扰降低至传统系统的17%，有效提高了成像的质量和清晰度。这些测试结果充分证明了基于微纳光学的高分辨率相机成像技术在系统性能上的优势，为其进一步的研发和应用提供了有力的数据支持。

2. 工业检测应用验证

在工业检测应用验证中，对PCB板检测场景进行了深入分析。对比了DLP结构光系统与LCOS全息系统。DLP结构光系统展现出了较高的精度优势，能够实现15 μm 的缺陷识别精度，这对于PCB板上微小缺陷的检测至关重要。而LCOS全息系统则在

速度方面表现突出，具备200fps的高速三维重建能力，可快速获取PCB板的三维信息。这两种系统在不同方面的优势为PCB板检测提供了多样化的技术选择，有助于提高检测效率和准确性，满足工业生产中对于PCB板质量控制的严格要求。

五、总结

微纳光学与DLP/LCOS技术融合取得显著成果，成像性能大幅突破。在双光子聚合制造和光子神经网络算法等方向需深入研究。新型系统优势明显，分辨率高达 6480×4320 ，体积较传统减少62%，功耗降至1.8W。这些优势使其在医疗内窥镜和无人机载成像等领域具有广阔的产业化应用前景。通过本次研发，为高分辨率相机成像技术发展奠定基础，未来需进一步探索新技术融合路径，持续优化系统性能，拓展应用领域，以满足不断增长的市场需求，推动成像技术向更高水平迈进。

参考文献

- [1] 李铭文. 成像系统窄带光谱防护微纳光学滤光技术研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [2] 申诗倩. 基于 Airy 光束的弯曲轨道光束成像技术及其应用研究 [D]. 南开大学, 2014.
- [3] 郭永博. 基于石墨烯的多谐振型微纳光学吸收器研究 [D]. 西安科技大学, 2021.
- [4] 曹康. 基于微纳集成的光学干涉薄片成像关键技术研究 [D]. 中国科学院大学, 2022.
- [5] 汪帅. 集成光学微腔中模式成像与微纳传感研究 [D]. 哈尔滨工业大学, 2021.
- [6] 梁丽. 微纳光学结构传感与调制研究 [D]. 中国科学技术大学, 2021.
- [7] 廖启明, 杨静育, 王涵天, 等. 基于微纳光学元件的增强现实技术 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(20): 47–56.
- [8] 侯晨阳, 孟凡超, 赵一鸣, 等. ”机器微纳光学科学家”: 人工智能在微纳光学设计的应用与发展 [J]. 物理学报, 2023, 72(11): 198–213.
- [9] 程显东. 微纳光学结构及产业化路径研究 [J]. 信息记录材料, 2018, 19(08): 50–51.
- [10] 赵光伟. 光学分子成像技术与数学物理反问题的联系 [J]. 中国电子商务, 2014(8): 76.