

分类号: TN305.7

学校代码: 10363

密 级: 公开

学 号: 2220110132



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻
优化方法研究

论 文 作 者 任博文

校 内 导 师 黄胜洲

校 外 导 师 杨阳

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 微纳光学设计与加工

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：TN305.7

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110132

基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻优化方法研究

RESEARCH ON DMD DIGITAL LITHOGRAPHY OPTIMIZATION METHOD BASED ON DYNAMIC BLUR EFFECT

学生姓名： 任博文

指导教师： 黄胜洲

校外导师： 杨阳

专 业： 机械

研究方向： 微纳光学设计与加工

论文答辩日期： 2025 年 5 月 9 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：任博文

日期：2025 年 5 月 9 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 __ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：任博文

指导教师签名：黄胜洲

日期：2025年5月9日

日期：2025年5月9日

基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻优化方法研究

摘要

基于数字微镜器件（DMD）的数字光刻技术因其灵活性好、成本低等优点，在微纳加工领域展现出巨大潜力。然而，由于 DMD 本身特殊的矩形阵列光学结构会导致光刻图案边缘锯齿化，从而影响光刻图形的质量。针对该问题，本文提出了基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻优化方法研究，结合子像素重叠技术机理，系统开展了 DMD 数字光刻边缘锯齿优化及线宽调控技术研究。主要研究内容总结如下：

（1）研究数字光刻系统关键光学元件的功能和原理，设计基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻系统，重点对压电陶瓷平台进行二次开发，从而为后续数字光刻技术的实验验证奠定基础。

（2）深入分析相干成像、非相干成像和部分相干成像理论，重点研究了 Abbe 成像算法和 Hopkins 成像算法。通过对比分析，选取 Hopkins 成像算法作为本文曝光成像仿真算法，并进行实验对比验证。

（3）研究图形子像素重叠技术，创建动态模糊效应核函数，提出动态模糊匹配子像素重叠方法。通过 Hopkins 光刻仿真实验与数字光刻实验，验证了动态模糊效应匹配子像素重叠优化光刻图形边缘锯齿的可行性。实验表明，优化曝光后的图形边缘粗糙度由 $1.67\mu\text{m}$

降低至 $0.27\mu\text{m}$ ，其优化效果明显。

(4) 基于动态模糊膨胀效应，研究多子图曝光及曲率模糊动态曝光技术，完成复杂图形处理，包括曲率分割子图、子图形边缘像素消除预处理。并通过 Hopkins 光刻仿真实验和数字光刻实验，验证了曲率模糊动态曝光技术的可行性。实验表明，光刻爱心圆环图形的边缘锯齿由 $1.5\mu\text{m}$ 降至 $0.21\mu\text{m}$ ，线宽误差率也降低至 $\pm 0.27\%$ 。

本文通过理论、仿真及实验相结合方式，证实了基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻优化方法的有效性和可行性，为微纳结构制造领域提供了新的思路。

关键词：数字光刻技术，边缘优化，动态模糊，子像素重叠，线宽调控

RESEARCH ON DMD DIGITAL LITHOGRAPHY OPTIMIZATION METHOD BASED ON DYNAMIC BLUR EFFECT

ABSTRACT

Maskless lithography technology based on Digital Micromirror Devices (DMD) has shown great potential in micro-nano fabrication due to its flexibility and cost-effectiveness. However, the inherent rectangular array optical structure of DMD causes jagged edges in lithographic patterns, which affects the quality of the lithographic images. To address this issue, this paper proposes a DMD digital lithography optimization method based on dynamic blur effect, combined with the mechanism of sub-pixel overlapping technology, and systematically conducts research on edge jaggedness optimization and line width control technology in DMD digital lithography. The main research contents are summarized as follows:

(1) The functions and principles of key optical components in the digital lithography system were studied, and a DMD digital lithography system based on dynamic blur effect was designed, with a focus on the

secondary development of the piezoelectric ceramic platform, thereby laying the foundation for subsequent experimental verification of digital lithography technology.

(2) Coherent imaging theory, incoherent imaging theory, and partially coherent imaging theory were deeply analyzed, with a focus on the Abbe imaging algorithm and the Hopkins imaging algorithm. Through comparison, the Hopkins imaging algorithm was selected as the exposure imaging simulation algorithm in this paper, and experimental comparative verification was conducted.

(3) The sub-pixel overlapping technology was studied, a dynamic blur effect kernel function was created, and a dynamic blur matching sub-pixel overlapping method was proposed. Through Hopkins lithography simulation experiments and digital lithography experiments, the feasibility of optimizing the edge jaggedness of lithographic patterns by dynamic blur effect matching sub-pixel overlapping was verified. The experiments showed that the edge roughness of the optimized exposure pattern was reduced from $1.67\mu\text{m}$ to $0.27\mu\text{m}$.

(4) Based on the dynamic blur expansion effect, multi-subgraph exposure and curvature blur dynamic exposure technology were studied to complete complex pattern processing, including: curvature segmentation subgraph, subgraph edge pixel elimination preprocessing. The feasibility of curvature blur dynamic exposure technology was verified through

Hopkins lithography simulation experiments and digital lithography experiments. The experiments showed that the edge jaggedness of the selected love ring was reduced from $1.5\mu\text{m}$ to $0.21\mu\text{m}$, and the line width error rate was also reduced to $\pm 0.27\%$.

Through the combination of theory, simulation, and experiment, this paper confirms the effectiveness and feasibility of the DMD digital lithography optimization method based on dynamic blur effect, providing new ideas for the field of micro-nano structure manufacturing.

KEY WORDS: digital lithography technology, edge optimization, dynamic blur effect, sub-pixel overlap, line width modulation

目录

摘要.....	I
ABSTRACT.....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 光刻技术研究现状.....	2
1.2.1 有掩模光刻.....	3
1.2.2 无掩模光刻.....	4
1.3 数字光刻图形质量优化研究现状.....	9
1.3.1 边缘优化抖动技术.....	10
1.3.2 时空协同调制技术.....	11
1.3.3 双 DMDs 协同调制技术.....	12
1.3.4 问题总结.....	13
1.4 研究主要工作.....	13
1.4.1 论文研究目的.....	13
1.4.2 论文研究内容.....	13
第 2 章 基于动态模糊的 DMD 数字光刻系统设计与搭建.....	16
2.1 系统总体结构.....	16
2.2 前端照明系统.....	16
2.2.1 曝光光源.....	16
2.2.2 光束准直和均光.....	18
2.3 光刻投影系统.....	19
2.3.1 数字微镜器件.....	19
2.3.2 投影物镜.....	21
2.4 三维纳米移动平台控制系统.....	22
2.5 基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻系统搭建与调试	24
2.5.1 数字光刻系统搭建.....	24
2.5.2 数字光刻系统调试.....	25

2.6 本章小结.....	26
第 3 章 数字光刻成像理论及算法仿真.....	27
3.1 相干成像理论.....	27
3.2 非相干成像理论.....	28
3.3 部分相干成像理论.....	29
3.3.1 Abbe 成像算法	30
3.3.2 Hopkins 成像算法	31
3.4 Hopkins 部分相干成像算法仿真	33
3.5 本章小结.....	34
第 4 章 动态模糊匹配子像素重叠的数字光刻优化方法研究.....	35
4.1 动态模糊匹配子像素重叠理论研究.....	35
4.1.1 子像素重叠理论研究.....	35
4.1.2 动态模糊效应核函数.....	36
4.1.3 动态模糊匹配子像素重叠技术原理.....	37
4.2 动态模糊匹配子像素重叠的仿真实验研究.....	39
4.2.1 动态模糊匹配子像素重叠技术掩模能量图.....	39
4.2.2 动态模糊匹配子像素重叠技术的仿真实验.....	40
4.3 动态模糊匹配子像素重叠技术的光刻实验研究.....	41
4.3.1 DMD 数字光刻工艺	41
4.3.2 氧阻聚效应改善.....	43
4.3.3 动态模糊匹配子像素重叠技术实验验证.....	44
4.4 本章小结.....	45
第 5 章 基于曲率模糊动态曝光技术的数字光刻优化研究.....	46
5.1 曲率模糊动态曝光技术理论研究.....	46
5.1.1 动态模糊膨胀效应原理.....	46
5.1.2 曲率模糊动态曝光技术原理.....	47
5.2 基于曲率模糊动态曝光技术的复杂图形处理.....	48
5.2.1 最小二乘法曲率拟合子图.....	48
5.2.2 子图像预处理.....	49
5.3 曲率模糊动态曝光技术实验测试.....	52

5.3.1 曲率模糊动态曝光技术仿真实验.....	52
5.3.2 曲率模糊动态曝光技术光刻实验.....	53
5.4 本章小结.....	55
第 6 章 总结与展望.....	56
6.1 总结.....	56
6.2 展望.....	57
参考文献.....	59
攻读学位期间发表的学术成果.....	65

插图目录

图 1-1 微纳结构的应用	1
图 1-2 有掩模光刻	3
图 1-3 电子束光刻原理	6
图 1-4 离子束光刻原理图	7
图 1-5 干涉光刻技术原理图	7
图 1-6 边缘优化抖动技术	10
图 1-7 协同调制技术	11
图 1-8 DMDs 协同调制技术	12
图 1-9 本文总体技术路线图	14
图 2-1 基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻系统原理图	16
图 2-2 UV-LED 实物图	18
图 2-3 照明系统示意图	19
图 2-4 DMD 结构图	19
图 2-5 微镜偏转原理图	20
图 2-6 DLP-6500	21
图 2-7 XYZ 100 型压电平台	23
图 2-8 E70. D3S 闭环压电控制器	23
图 2-9 DMD 数字光刻系统实物搭建	24
图 2-10 畸变预补偿原理图	25
图 2-11 二次开发系统图	26
图 2-12 部分二次开发代码	26
图 3-1 等效光源示意图	27
图 3-2 Abbe 成像算法原理图	30
图 3-3 Hopkins 部分相干成像仿真	33
图 3-4 模拟仿真与实验对比图	34
图 4-1 DMD 光刻图形锯齿状原理示意图	35
图 4-2 子像素重叠技术原理示意图	36

图 4-3 位移示意图	38
图 4-4 平台与曝光图形位置关系图	38
图 4-5 动态模糊匹配子像素重叠技术示意图	39
图 4-6 瞬时能量模拟图	39
图 4-7 运动模糊效果匹配像素重叠技术的三角形能量掩模图	40
图 4-8 动态模糊匹配子像素重叠技术仿真实验图	40
图 4-9 光刻工艺流程	41
图 4-10 KW-4A 匀胶机	42
图 4-11 浸曝原理图	44
图 4-12 动态模糊匹配子像素重叠技术光刻实验图	44
图 5-1 动态模糊膨胀效应示意图	46
图 5-2 多子图曝光原理示意图	47
图 5-3 位移路径示意图	48
图 5-4 曲率分割示意图	48
图 5-5 像素消除原理示意图	51
图 5-6 预处理前后光刻图形动态模糊膨胀效应对比	51
图 5-7 预处理前后能量图对比	52
图 5-8 曲率模糊动态曝光技术仿真对比	52
图 5-9 曲率模糊动态曝光技术仿真测量	53
图 5-10 曲率模糊动态曝光技术光刻实验测试	54

表格目录

表 2-1 CBT-39-UV LEDS 光源的基本参数	18
表 2-2 DLP-6500 型 DMD 参数	21
表 2-3 GCO-2101 型投影物镜的参数.....	22
表 2-4 压电平台具体参数	24
表 5-1 匀胶机具体参数	42

第1章 绪论

1.1 研究背景和意义

在现代科技前沿探索中，微纳加工技术作为支撑众多高新技术产业发展的基础性技术，其重要性不言而喻。而光刻技术作为微纳加工技术的核心组成部分，凭借独特技术优势，在微观尺度下制造大量高效率微结构，如图 1-1 所示。尤其在信息化高速发展当下，成为推动大规模集成电路产业持续进步的关键驱动力，对现代电子信息技术发展产生深远影响^[1-3]。

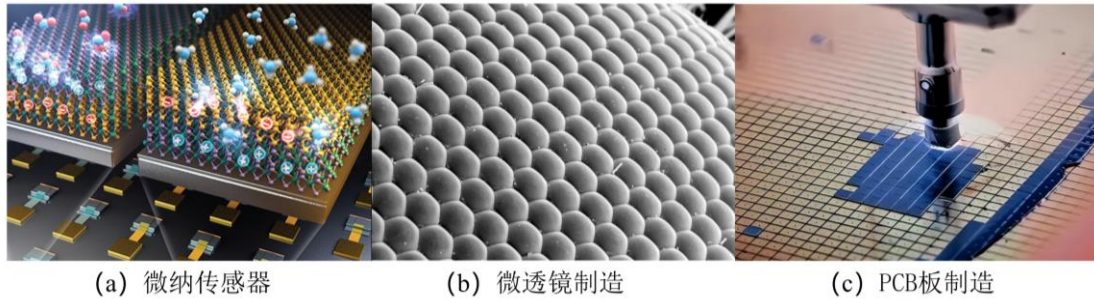


图 1-1 微纳结构的应用

光刻技术的基本原理，是利用特定波长光线将预先设计好的掩模图形转移到对光敏感的光刻胶材料上，涉及光的衍射、干涉以及光刻胶的光化学反应^[4]。光线通过掩模板图形结构在光刻胶表面形成特定光强分布，进而引发化学反应记录图形；再通过化学或物理刻蚀技术，将图形精确转移到半导体晶圆等衬底材料上，来构建精密器件基础结构^[5]。光刻过程关键要素包括高分辨率光刻机、高精度掩模板以及高感光度光刻胶等^[6-8]。光刻技术发展历经接触式曝光阶段（因结构简单、生产效率高被早期广泛应用，但掩模板与光刻胶直接接触易磨损污染、降低重复利用率，且图形转移易变形、边缘粗糙影响质量精度）、接近式曝光阶段（为克服接触式曝光缺点，通过保持掩模板与光刻胶微小间隙，提高掩模板重复利用率和光刻胶抗蚀能力，但因光的衍射效应，分辨率和精度仍难满足高端集成电路制造需求）、投影式光刻阶段（随着集成电路技术发展，采用精确缩小成像系统提高光刻分辨率，历经紫外到深紫外再到极紫外光刻，光刻分辨率不断提升推动集成电路集成度提高，但面临系统焦深减小、光学像

差校正困难等问题)^[9]。如今,随着对高精度器件需求增长,光刻图形结构复杂、特征尺寸缩小,对光刻技术提出更高要求,掩模板制作成本增加、光刻胶性能及光刻设备稳定性和精度等方面面临挑战^[10]。

为此,近年来无掩模光刻技术快速发展,摒弃对物理掩模板依赖,通过计算机控制光束直接在光刻胶上绘制图形,实现光刻数字化和智能化,简化了工艺流程、降低了成本、提高了灵活性和精度^[11]。下面主要从光刻技术的研究现状(有掩模光刻、无掩模光刻),数字光刻图形质量优化研究现状两方面进行具体阐述。

1.2 光刻技术研究现状

在现代半导体制造领域,光刻技术作为一项关键的基础技术,其发展历程伴随着不断的创新与突破,逐步形成了多种各具特点的光刻方式^[12]。基于掩模版的使用需求,现代光刻技术可明确分为掩模版依赖型和直接成像型两大技术体系。其中,掩模版依赖型工艺作为半导体制造领域的核心技术,其物理实现依赖于紫外光源、光掩模与光敏材料的三元协同机制。该技术流程包含精准的光学调控过程:首先由深紫外光源发射特定波段光束,经光掩模的微纳结构进行空间调制,形成预定图案的光场分布;随后该调制光场作用于涂布光刻胶的晶圆表面,引发光敏材料的光化学相变。通过显影工艺的差异化溶解效应,最终在基底表面实现掩模图案的高精度转印,这一过程构成了集成电路图形化的物理基础^[13]。这种光刻方式具有较高的光刻精度和生产效率,能够满足大规模集成电路制造中对图形精度和一致性的严格要求,是目前半导体工业生产中最常用的光刻技术之一^[14]。与之相对的无掩模版型光刻技术则摒弃了传统的掩模版,通过精确控制曝光粒子的偏转和走向,使曝光粒子直接作用在基片上进行光刻操作。这种光刻方式具有更高的灵活性和可编程性,能够快速实现不同图案的光刻加工,尤其适用于小批量、定制化的半导体器件制造以及新型器件的研发^[15]。在微机电系统(MEMS)制造中,无掩模版型光刻技术能够根据特定的设计需求,快速加工出复杂的三维结构,为微机电系统的创新发展提供了有力支持^[16]。

1.2.1 有掩模光刻

基于掩模版的光刻工艺体系中，接触式光刻、接近式光刻与投影式光刻构成三大基础曝光范式。作为半导体微纳加工领域的原始技术路径，接触式曝光通过掩模版与光刻胶涂覆基板直接接触以实现图形转印，其技术原理可解析为：深紫外光通过掩模版微图形进行近场衍射传输，在光敏胶层形成对应曝光量分布，经显影工序的溶解选择性差异最终完成基材表面图形构筑。根据接触界面力学耦合度差异，该技术细分为真空耦合、刚性接触和弹性接触三种模态，其中界面压力与图形保真度呈显著正相关。但该技术存在固有缺陷：掩模版与光刻胶的机械接触导致表面污染及图形损伤，引发掩模使用寿命的指数级衰减，此特性严重制约了其在先进制程中的工程适用性，相较于其他曝光方式，其使用时间较短^[17]，其原理如图 1-2(a)所示。

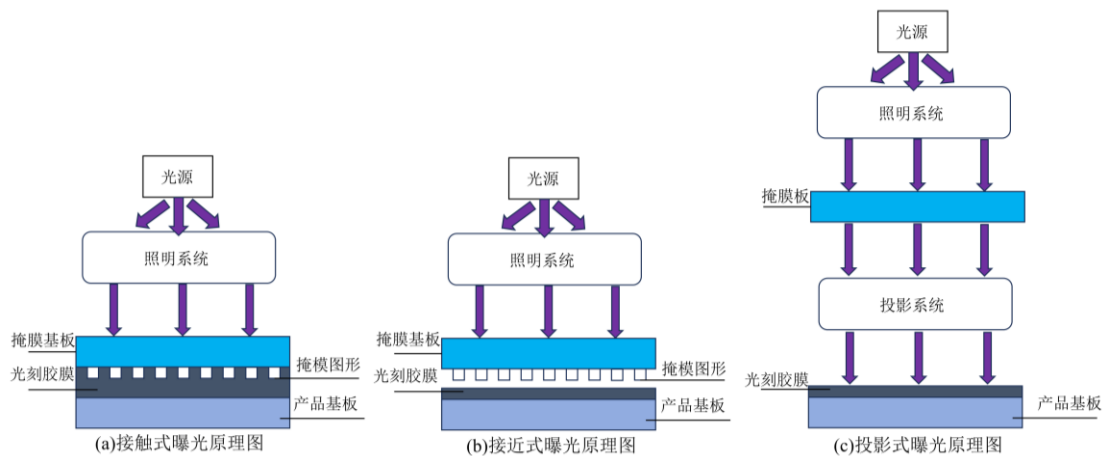


图 1-2 有掩模光刻

鉴于接触式曝光对掩模版造成的损坏问题，业界在此基础上开发出了接近式曝光技术，其原理如图 1-2(b)所示。这种方式有效解决了掩模版易损的问题，但受限于衍射效应的影响，接触式曝光和接近式曝光的光刻分辨率难以进一步提升。在 20 世纪中期，这两种曝光方式在光刻领域占据主导地位^[18]。

随着技术的不断进步，投影式曝光技术应运而生，其原理可参考图 1-2(c)。在投影光刻技术架构中，系统通过远场成像原理将掩模版作为物面标定，经复消色差透镜组实现图形的缩微成像至光敏胶层。该技术的突破性创新体现在双重物理机制优化：采用非接触式曝光机制彻底消除界面机械损伤，同时运用夫琅禾费衍射抑制技术有效控制波前畸变。这种复合技术路径不仅使掩模版服役

周期呈数量级延长，更在晶圆级量产中展现出卓越工艺可靠性——既通过光路冗余设计降低单位器件的制造成本，又借助离轴照明技术使特征尺寸逼近光学衍射极限，为纳米级集成电路制造提供了关键光学解决方案^[19]。

经过长时间的技术沉淀和持续改进，有掩模光刻技术已达到了较高的成熟度。在现有光刻技术范式中，掩模依赖型图形转移方法正面临严峻的工程化挑战。其根本性制约源于“固定掩模-单次图形”的物理匹配机制，当处理晶圆级多尺度异构图形时，必须执行复杂的掩模组动态切换及纳米级拼接工艺。这种技术经济性双螺旋制约效应，正驱动产业界加速探索第三代智能光刻路径：一方面通过深度学习驱动的计算光刻引擎，实现掩模图形的动态重构与误差补偿；另一方面开发基于可编程相变材料的自适应掩模系统。这种技术演进方向不仅契合后摩尔时代多维异构集成的制造需求，更为未来量子芯片制造提供了可扩展的图形化解决方案，无掩模光刻技术正是在这样的背景下逐步发展起来的^[20]。

1.2.2 无掩模光刻

在半导体制造领域的持续发展进程中，无掩模光刻技术凭借其在降低传统光刻加工成本方面的显著潜力，成为了新一代光刻技术研究的焦点。作为一种极具创新性的光刻技术，无掩模光刻展现出了诸多传统光刻技术难以企及的优势，这些优势使其在半导体制造行业中备受关注^[21-25]。

传统光刻工艺依赖昂贵的掩模版，而掩模版的生产、维护、更换等，需要花费很多资金和时间成本。与之相比，从根本上减少了相关费用支出，无掩模光刻技术摒弃了掩模版这一耗材。同时，大大提升了效率以及灵活性。在生产过程中，能够对不同的光刻图案需求做出快速反应，使生产周期大大缩短，生产效率得到提高，不需要频繁更换掩模版。在传统光刻技术中，无掩模光刻工艺可以简化工艺流程，使不确定性、复杂性在生产环节得到降低，进一步提升生产稳定性和可靠性^[26]。

尽管无掩模光刻技术在微纳制造领域展现出显著优势^[27]，但其在大面积均匀曝光和高速量产方面仍存在技术瓶颈。具体而言，当曝光面积超过 $100\text{mm}\times 100\text{mm}$ 时，边缘区域的线宽均匀性可能恶化至 $\pm 15\%$ 以上；而在量产效率方面，其曝光速度通常局限在 $10\text{-}20\text{mm}^2/\text{s}$ ，难以满足现代半导体制造对大于 $100\text{mm}^2/\text{s}$ 的产能需求。

从技术路线上，无掩模光刻可分为带电粒子束和光学两大技术体系，带电粒子束光刻：电子束光刻，采用 5-100keV 的高能电子束进行直接写入，可实现小于 5nm 的特征尺寸^[28]。但其吞吐量受限于串行写入模式，通常仅为 0.01-0.1mm²/s。离子束光刻，利用 30-200keV 的聚焦离子束（如 Ga⁺）进行图案化，其更大的质量带来更强的材料相互作用，在三维纳米结构加工中表现出独特优势^[29]。

光学无掩模光刻^[30-34]：干涉光刻，基于多光束干涉原理，可制备周期极低的亚波长结构，在光子晶体和超材料制造中应用广泛。但其图案灵活性受限，主要适用于周期性结构。数字光刻，采用数字微镜器件或液晶空间光调制器作为图形发生器，结合高数值孔径投影系统，可实现 1-10μm 的特征尺寸，同时保持>50mm²/s 的曝光速度。其数字化特性支持实时图形更新，为个性化器件制造提供了灵活解决方案。

（1）电子束光刻

电子束光刻技术自 20 世纪 60 年代起逐步演进，早期的电子束由钨丝阴极发射，但其亮度和均匀性较差。随后，研发的 LaB6 阴极、冷场发射阴极和热场发射阴极显著提升了性能^[35]。电子束光刻技术通过调节电磁场强度和方向，精确控制电子束的偏转和聚焦，以逐点扫描方式在光刻胶表面完成图案刻写^[36-39]，其原理图如图 1-5 所示。

电子束光刻技术在微纳制造领域具有重要的应用价值。在集成电路领域，主要采用电子束技术制备高精度光刻掩模版，尤其是在 0.18μm 及以上技术节点上，其关键尺寸控制精度可达±2nm，对制造 X 射线掩模版和相移掩模版具有不可替代的作用。在微纳加工领域，该技术广泛应用于制备衍射光学元件，如特性尺寸在 100 纳米以下的微光学元件，微透镜阵列，以及在低维材料图案化中的特殊应用，如量子点和纳米线等。其直接写入模式，尤其适合小批量、多品种的生产需求，可以节省 40~60%的研发周期，是电子束技术的核心优势。然而，这一技术在技术上也面临显著挑战：其效率低，采用曝光时间长、难以满足量产需求的单点串行曝光方式；绝缘衬底电荷积累问题特别显著，造成电子束偏转，花纹失真^[40]。虽然有诸如电束能量的涂覆导电层或优化等解决方案，但执行起来依然困难重重^[41]。

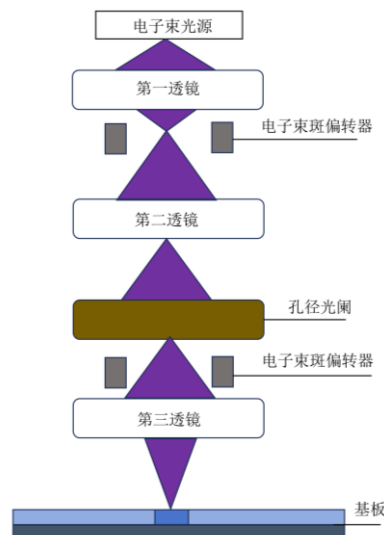


图 1-3 电子束光刻原理

（2）离子束光刻

离子束光刻技术是光刻技术领域的重要分支（如图 1-6），对半导体制造和微纳加工等关键行业具有显著的重要性^[41-45]。其基本原理是将金属液态原子电离成带正电的离子，然后通过电磁场加速这些离子，使其获得足够的动能。电磁透镜将离子聚焦成狭窄且稳定的束流，从而精确地投射到涂有光刻胶的基片上，实现图形的精准转移^[46]。根据是否使用掩模版，离子束光刻可分为有掩模和无掩模两种模式。有掩模模式通过掩模版进行曝光，适用于图案固定的场合；而无掩模模式则直接利用离子束进行曝光，提供了更高的灵活性。离子束光刻技术的优点是具有更大的离子质量和更小的散射率，可以达到高精度的光刻效果，尤其是在分辨率上，比电子束光刻^[47]的光刻性能更好。但是，离子光刻技术也面临着一系列的挑战，首先，它的工作环境要求极高，必须在高真空条件下进行，这样才能避免由于离子与气体分子的碰撞而造成的能量损耗和散射，这在提高设备成本的同时，技术难度也得到了相应的提高。其次，它在光刻胶中的穿透能力比较弱，因为离子的质量比较大，这就限制了它在应用场景中的适用性，需要更厚的光刻胶。而且由于制造成本高、工艺复杂，涉及多个子系统，如高精度的离子源、电磁场控制、技术难度大、对参数优化要求高的电磁透镜和真空系统等，进一步制约了离子束光刻^[48]的推广应用。目前，由于对图形精度的要求极高，离子光刻技术主要应用于光学掩版的制作，其高精度特性恰恰符合了这一需求^[49]。为了扩大其应用范围，推动其在更多领域的广泛应用，

未来研究人员需要重点解决环境要求、穿透能力限制以及对离子光刻的成本和技术复杂度等问题^[50]。

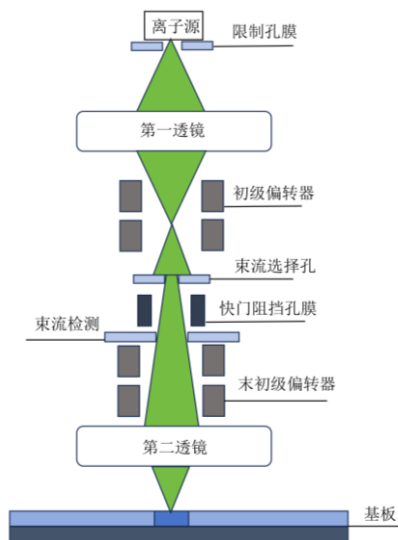


图 1-4 离子束光刻原理图

(3) 干涉光刻技术

作为一种创新独特的光刻技术手段，干涉光刻技术近年来在尖端科技领域受到广泛关注，如微纳加工、半导体制造等。该技术的工作原理是以双光束或多光束相干叠加作用于光雕胶面，进而达到目标光雕纹样的产生，是基于光的干涉现象而进行的。该过程与傅里叶变换理论密切相关，根据该理论，可以在光刻胶上产生预期的光刻图案，通过精确调控各光束频率的高低和正弦图像的大小^[51]。此外，干涉光刻技术与利用光的干涉特性来记录 and 再现物体信息的全息成像法有异曲同工之处，其原理图如图 1-7 所示。

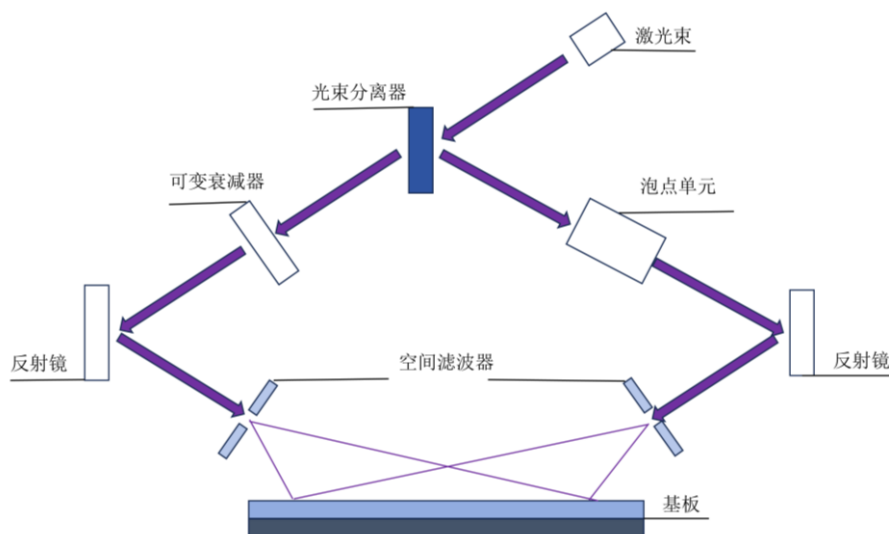


图 1-5 干涉光刻技术原理图

干涉式光刻技术在具体的工作机制中，借助于激光等相干光源，将光束分束，从而使其形成具有特定相位关系的多个子光束，如多束光纤束、多束纤束等。这些子光在空间中传播并相互干涉，从而形成一个稳定的干涉条纹图案。当这些干涉条纹作用于光刻胶时，干涉条纹的图案信息就会被记录下来，因为光强的分布而相应地发生物理或化学上的变化。

干涉光刻工艺所形成的纹样具有较高的对比度，对光刻纹样的辨识度和精确度有明显的区分度。其次，干涉光刻技术曝光面积更大，使得更大尺寸的图案能够在一次曝光的过程中进行处理，制作效率也得到了很大的提高。此外，干涉光刻技术对光刻胶和光源的要求相对较低，这就意味着更广泛的材料和设备可以在实际应用中进行选择，这使得技术的应用门槛有所降低。同时，该技术的工艺流程比较简单，不需要复杂的光学系统，也不需要精密的对齐设备，从而降低了设备的造价，降低了操作的难度和成本^[52]。

然而，在干涉光刻工艺上也有不足之处。光强分布和光束中的相位分布很难在光刻过程中得到完全精确的控制。光强和相位的微小波动会导致干涉条纹的稳定性受到影响，进而影响光刻图案的质量和精确度^[53]。该技术在面对复杂的三维微结构或细节精细的图案时，往往不能精确地达到所期望的设计要求，最终经过迭代而形成的图形也只能近似于所期望的结果。这在一定程度上限制了在一些应用场景中使用对图案精确度和复杂程度要求非常高的干涉光刻技术。

（4）数字光刻技术

基于数字微镜器件（DMD）的无掩模数字光刻技术是数字光刻技术领域的一种新型技术，近年来在半导体制造、微纳加工等前沿科技领域崭露头角，展现出了巨大的发展潜力。该技术的核心元件是数字空间光调制器，它由众多微型单元有序排列而成，赋予了这项技术独特的优势和广泛的应用前景^[54-58]。

在 DMD 无掩模光刻技术架构中，系统由高均匀度照明模块、数字微镜阵列驱动模块、高数值孔径投影光学组和六自由度精密工件台构成关键技术矩阵^[59]。其核心技术突破体现在：基于微机电系统（MEMS）致动原理，通过纳秒级电致响应实现每片微镜 $\pm 12^\circ$ 的独立偏转控制，结合数字光场重构算法，可在毫秒级时间尺度完成任意复杂图形的实时空间调制，实验数据显示其图形刷新速率达 10 kHz 量级，较传统方案提升 4 个数量级^[60]。该技术的范式革新体现在三个

维度：首先，采用虚拟掩模替代物理掩模板，通过光场数字化技术使掩模制备周期缩短 95%，单次制造成本降低 83%^[61]；其次，基于光场可编程特性实现图形切换的零时延响应，消除传统工艺中掩模对准的机械迟滞效应，使套刻精度提升至亚 50 纳米级；再者，通过波前优化算法与离焦容限增强技术的协同作用，在保持 128nm 特征尺寸解析度的同时，将焦深扩展至传统投影光刻的 2.7 倍，为三维异质集成芯片制造提供关键支撑。这种技术路径不仅满足晶圆级直写光刻的工业化量产需求，更为光子集成电路、超表面器件等新兴领域提供了可重构的微纳制造解决方案^[62]。

1.3 数字光刻图形质量优化研究现状

基于 DMD 的数字光刻技术以其无需掩模、高效和低成本的特点，在集成电路制造、生物芯片开发以及军事工程等领域得到了广泛应用。作为该技术发展的核心方向之一，分辨率的提升直接关系到器件加工的精度和集成度。为了增强分辨率，研究重点集中在优化光刻图案的平滑性、校正邻近效应、提高边缘特征的分辨能力、突破光学衍射极限以及提升横向分辨率等方面^[63]。

数字光刻是以投影为基础的光刻技术，其工作原理是通过 DMD 生成数字掩膜图案，再经过一定比例的投影镜缩小后，在光刻胶上形成图像。因此，直接提高分辨率的方法是采用倍率较高的投影机镜面。但这一方法也带来了两个显著的挑战，一是单个曝光面积的缩小，二是焦点深度的缩小。单一曝光面积的缩小，意味着整体图案在进行大面积图形曝光时，需要经过多重曝光拼接，将整体图案分割成多个子掩模，使得光刻效率明显降低。另外，高倍率投影物镜的焦深较浅，而光刻胶厚的不均匀性、对焦系统的误差以及实际加工中光学器件安装的精度问题，都需要有一定焦深的投影物镜。焦深度的降低，不仅需要更均匀的光刻胶涂层和更高精度的对焦系统，还需要更高的精度来安装光学器件，从而提高整体成本^[64]。

因此，如何在保持单次曝光面积和足够焦深的同时提升分辨率，即平衡光刻效率、成本和分辨率三者之间的关系，成为当前研究的核心问题之一。目前，方法有以下几种。

1.3.1 边缘优化抖动技术

国内研究人员提出了一种边缘优化抖动技术提升 DMD 光刻图形质量的方法 [65,66]。这一技术将 DMD 子模式错位叠加与连续扫描曝光相结合，开创了提升光刻图形质量的新路径，如图 1-6 所示。

首先，根据图形数据生成多个子图形，其次，将这些子图形在曝光图形边缘锯齿处曝光。在实验过程中，采用 1/2 子像素重叠，实验结果表明，这种技术能够有效优化树形图形边缘锯齿，从而有效提升边缘的平滑度。

通过与静态曝光光刻系统的对比分析，使用二维移动平台可以显著扩大曝光面积，提升曝光精度，并增加位移速度。此外，连续扫描曝光技术是通过选择高频率帧和大面积 DMD（数字微镜设备）有效区域，以及通过高速数据滚动来实现的。在移动平台以恒定速度移动的同时，DMD 设备保持静止状态。图形数据按行顺序输入到 DMD 中，从而实现 DMD 中显示图形的滚动更新。在不缩减 DMD 微镜尺寸或利用抖动技术减少投影透镜放大倍率的前提下，这种技术可以有效优化光刻图案的线性边缘 [67]。

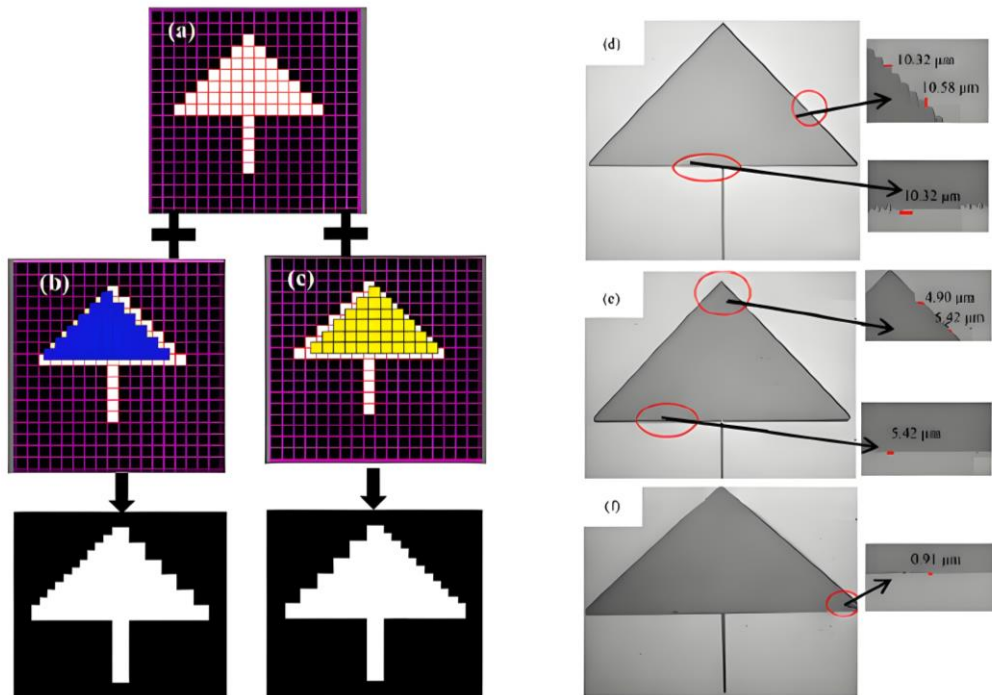


图 1-6 边缘优化抖动技术 [68]

1.3.2 时空协同调制技术

国内学者提出一种时空协同调控技术，从时空协同调制理论分析出发，通过理论计算、仿真模拟和实验验证相结合来研究微透镜数字光刻平滑表面动态调控机制，通过空间调制和时间调制两个关键环节，

实现对光刻图案边缘平滑度、线宽精度和线位置准确性的精确控制(如图 1-9 所示)。空间调制部分，利用压电陶瓷平台(PZS)的微移动能力，结合 DMD 的灵活图案生成，通过子图模式提取和微镜阵列的精确移动，优化了线中心位置的精度和线边缘的粗糙度;时间调制则通过控制曝光时间来维持一致的线宽，通过引入最优子模式曝光时间的概念，以确保在不同微移动步数下，能够精确控制写入的线宽。

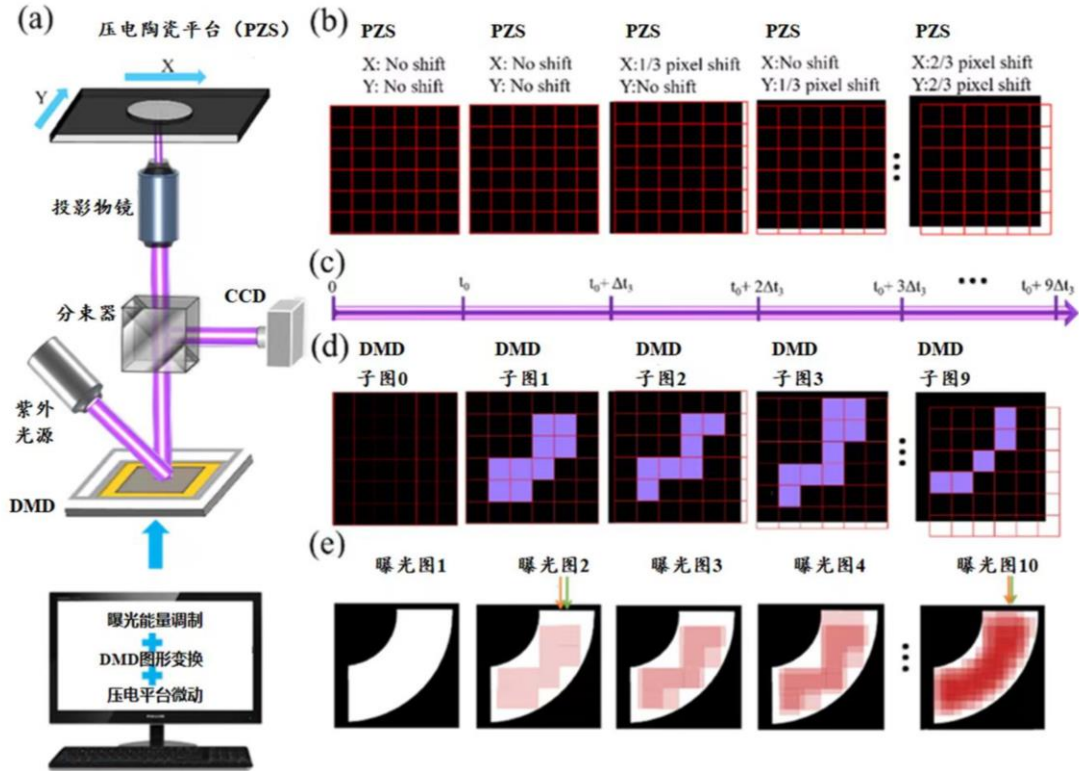


图 1-7 协同调制技术^[69]

在实验设计上，假设首先定义了一个改善因子 N ，基于所需的图案边缘锯齿，通过 PZS 的微移动，将每个像素点的距离划分为 $1/N$ ，从而提高了光刻图案的保真度。实验中，通过模拟 PZS 的微移动，使用 DMD 像素网格提取对应的掩模子模式，并在 PZS 移动到相应位置时曝光相应的子模式。此外，还通过实验确定非零子模式的曝光时间与光刻图案线宽误差之间的关系，从而获得最

优曝光时间。此方法不仅极大的提高了图形边缘锯齿，并且有效的控制了图形的线宽误差，如图 1-7 所示。

1.3.3 双 DMDs 协同调制技术

本研究提出了 DMDs 协同调制光刻技术，以有效增强光刻图形的边缘平滑度。特别是，国内学者提出的光刻方法创造性地将两个错位的 DMD 与它们的协同调制相结合，以实现更好的平滑度，而不是通常增加投影镜头的去放大因子或减小阶梯形状光刻图案通过使用 DMD 协同曝光形成的图形证明了与单个 DMD 光刻相比，更好的平滑度。1/2 DMD 像素错位和 1/4 DMD 像素错位的协同曝光都是形成阶梯形状光刻图案的实现。实验结果表明，当增加协同曝光的次数时，锯齿边缘可以近似于一条直线。对部分锯齿进行了误差分析，进一步证明了使用协同调制光刻技术可以有效地提高边缘平滑度，同时保证光刻质量，如图 1-8 所示。

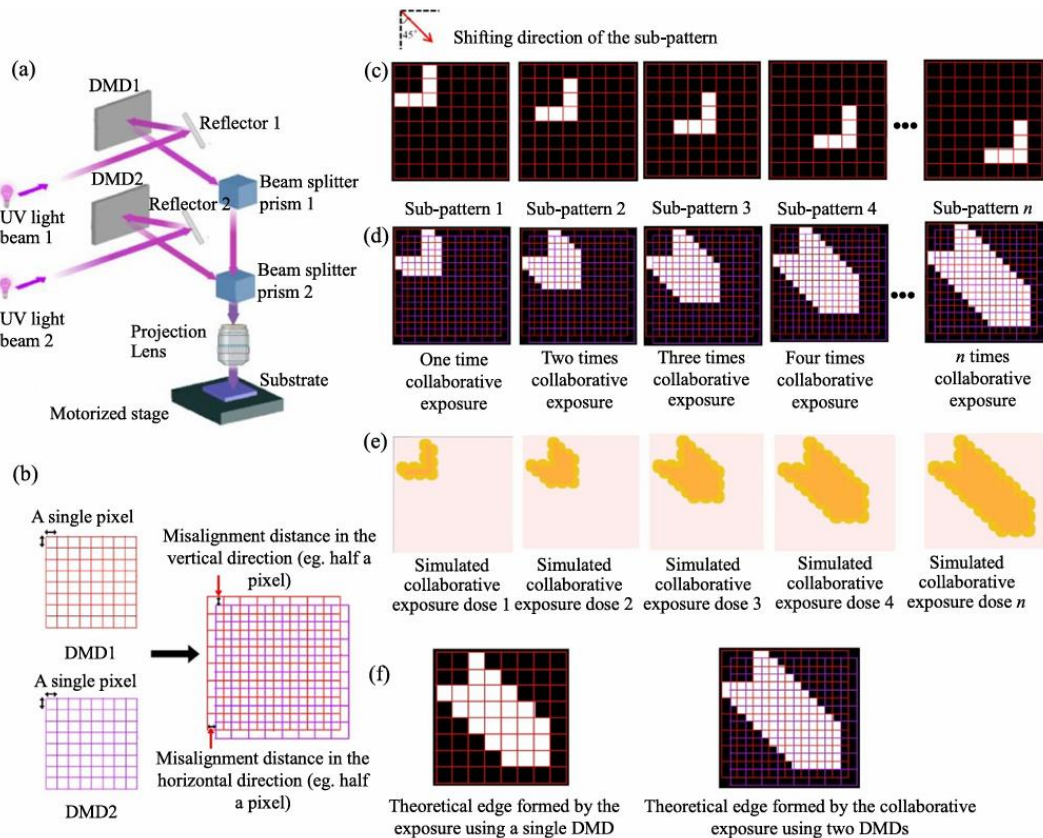


图 1-8 DMDs 协同调制技术^[70]

1.3.4 问题总结

DMD 数字无掩模光刻技术，凭借成本较低、光刻效率高以及可大面积光刻的优势，在众多领域得到了广泛应用。如何在数字光刻系统中实现效率、成本与光刻图形边缘平滑度的三者关系有效平衡，始终是该技术研究的重点方向之一。摆动光刻技术、时空协同调制技术以及双 DMDs 调控技术，均是在不采用高倍率投影物镜以确保单次曝光面积的前提下，用于增强光刻图形边缘平滑度的技术，在光刻效率、成本和光刻图形质量之间达成了良好的平衡。但是边缘抖动优化技术仅能达到一半左右的优化效果且难以对复杂图形进行曝光；时空协同技术虽能大幅度优化曝光图形边缘锯齿且能对复杂图形进行优化，但是其优化过程极为繁琐，需要大量子图，整体效率极低；双 DMDs 调控技术同样优化效果一般且由于需要多个 DMD 芯片导致成本较高。

1.4 研究主要工作

1.4.1 论文研究目的

本文在深入剖析摆动光刻技术、时空协同调制光刻技术和 DMDs 调控技术的基础上，提出了基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻技术。该技术同样是一种在保证单次曝光面积的前提下增强光刻图形边缘平滑度的光刻技术。与摆动光刻技术相比，其优化程度更高，对复杂图形的处理更为完善；相较于时空协同技术，显著降低了子图数量与曝光次数，提高了光刻效率，简化了光刻流程；相较于 DMDs 数字光刻技术，成本更低，且光刻系统的搭建更为便捷。因此，本文所提出的光刻技术为增强数字光刻的图形质量提供了一种全新的方法。

1.4.2 论文研究内容

针对 DMD 数字光刻系统在微纳加工精度方面存在的技术瓶颈，本研究开展了系统性理论创新和工程优化。研究工作主要包含三个技术层面：首先，建立了基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻系统，深入分析了像素量化误差的产生机理；其次，创新性地提出了基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻提高光刻图形边缘平滑度的方法；最后，通过数值仿真和实验验证相结合的方法，验证了所提出增强方法的有效性。具体研究路线如图 1-9 所示。

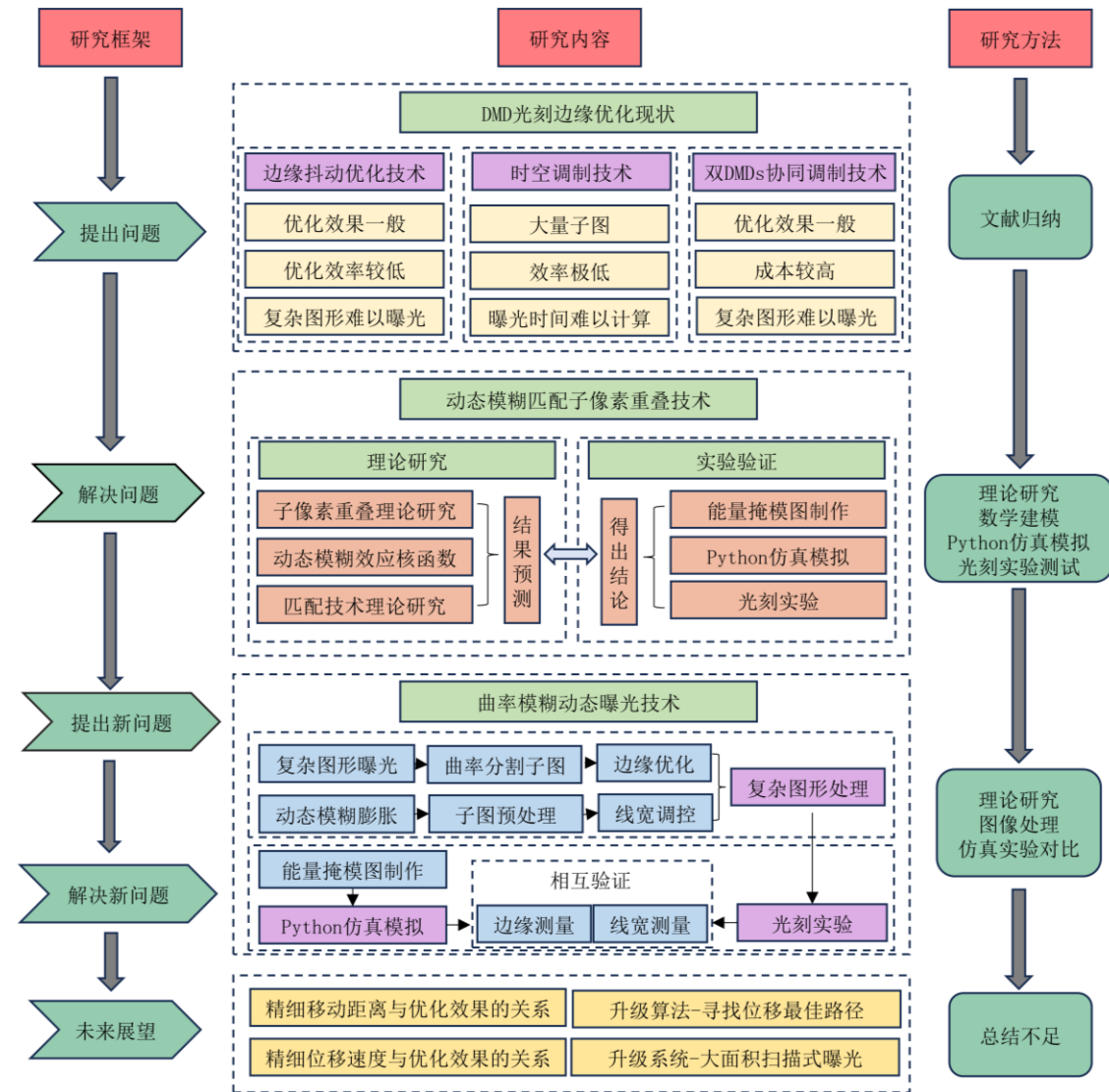


图 1-9 本文总体技术路线图

论文一共分为六个章节，各章节内容如下：

第 1 章：绪论。首先阐述了数字光刻技术的研究背景，对比分析了有掩模光刻与无掩模光刻的技术特征，重点评述了 DMD 数字光刻图形质量增强技术的国内外研究现状，明确了本研究的创新点和章节架构。

第 2 章：基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻系统设计与实现。详细阐述了 DMD 芯片的微机电结构和工作原理，针对照明均匀性这一关键技术瓶颈，设计工程散射体结合透镜组的照明方案，详细介绍了系统各组成部分的构成。最后，对压电陶瓷平台进行二次开发，为后续实验奠定基础（本章部分内容已发表在中科院四区期刊《JLMN - Journal of Laser Micro / Nanoengineering》）。

第 3 章：DMD 无掩模光刻的部分相干成像理论研究。系统阐述了相干与非

相干成像的理论体系，对比分析了 Hopkins 和 Abbe 两种部分相干成像算法的适用场景。通过 Python 建立 DMD 数字光刻成像仿真模型，并进行实验验证。

第 4 章：动态模糊效应匹配子像素方法研究。本章首先对子像素重叠技术原理进行深入研究，建立了动态模糊效应核函数，通过仿真验证理论分析，并介绍了此方法的光刻流程，最后基于仿真结果，对此方法进行了实验验证，通过测量优化前后的曝光图形边缘粗糙度验证了该方法的有效性（本章内容已发表在中科院二区 TOP 期刊《Optics Express》）。

第 5 章：曲率动态模糊曝光技术研究。首先对动态模糊膨胀效应进行研究，在动态模糊效应匹配子像素重叠的基础上，设计了曲率动态模糊曝光技术，详细说明了它的具体实施方式，通过实验对比，验证其有效性（本章内容已发表在中科院二区 TOP 期刊《Optics & Laser Technology》）。

第 6 章：总结与展望。对本文研究内容进行了简要总结，归纳了本文的创新点，并对未来工作进行了展望。

第 2 章 基于动态模糊的 DMD 数字光刻系统设计与搭建

本系统主要由前端照明系统、光刻投影系统和三维纳米移动平台三部分构成，各光学器件通过精细测量计算后选择。同时，为满足本文动态模糊效应技术的实验需求，详细地对三维移动纳米平台进行了二次开发研究。

2.1 系统总体结构

本文设计的基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻系统，其原理图如图 2-1 所示。该系统由前端照明系统、光刻投影系统和三维纳米移动平台控制系统组成：前端照明系统由曝光光源，透镜组组成，光刻投影系统由 DMD、反射镜和投影物镜组成，三维纳米移动系统由三维纳米移动平台和压电陶瓷控制平台组成。当曝光光源开启后，光线通过透镜组射到已输入曝光图像的 DMD 芯片上，然后反射到反射镜上，再由反射镜反射经过投影物镜，最终照射到三维纳米移动平台上的光敏树脂上成像。

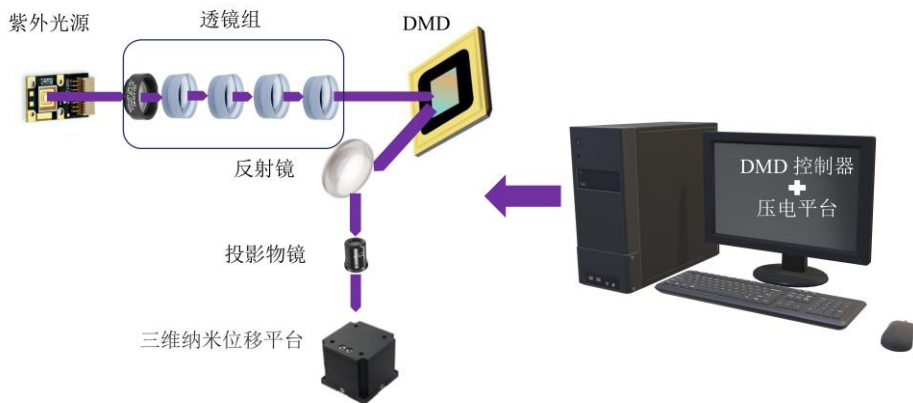


图 2-1 基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻系统原理图

2.2 前端照明系统

2.2.1 曝光光源

通常情况下，DMD 数字光刻系统会选用单色光作为光源，其中曝光光源多采用紫外光，这是由于紫外光的波长短。根据瑞利判据，在光刻成像过程中，较短的波长能够有效减小艾里斑尺寸，进而提高光刻系统的分辨率。而参考光

源，由于其作用并非参与光刻胶的光化学反应，为避免对曝光过程产生干扰，一般会选择波长与曝光光源差异较大的红光。

在整个光刻系统中，曝光光源及其相关的准直和匀光环节直接决定光刻质量^[71]。曝光光源的选择丰富多样，常见的选择一般为：高压汞灯、激光器和UV-LED。

（1）高压汞灯

高压汞灯利用高压汞蒸气放电发光，属于非相干光源，其光谱在近紫外波段有 365nm 和 436nm 两条强谱线。上世纪因其造价便宜成为常见曝光光源，但在使用中暴露出诸多缺点，包括发热量大需外加冷却设备、寿命短需频繁更换、光谱范围大需外加滤光装置以及体积大不适合小型系统。

（2）激光器

激光光源凭借其优异的光学特性，在光刻领域得到广泛应用，主要采用准分子激光器和半导体激光器作为曝光光源。然而，激光的高度时空相干性会引发散斑效应，导致光强分布不均匀性超过 20%，严重影响光刻图形质量。虽然可以通过旋转漫射器实现光束匀化，或采用多帧曝光技术降低散斑对比度，但这些方法会加速光学元件老化，使使用寿命缩短此外，激光光源系统价格昂贵，主要用于高端光刻设备。

（3）UV-LED

UV-LED 是紫外发光二极管，从图能看到它的光源谱线单一，集中在 365nm 附近，不需要滤光装置。它通过通电、断电就能控制发光，曝光控制时不用光电快门。而且它是冷光源，发热量小，对散热要求低。在光刻系统里，UV-LED 有谱线单一、结构简单、控制方便、寿命长等优点，特别适合用在低成本小型化的光刻系统中。

综合对比，本文系统选用 LUMINUS 公司的型号为 CBT-39-UV LEDs 的 UV-LED，如图 2-2 所示，具体参数见表 2-1 所示。



图 2-2 UV-LED 实物图

表 2-1 CBT-39-UV LEDS 光源的基本参数

参数	数值	单位
质心波长	405	nm
电流密度	1.54	A/mm^2
辐射通量	5.5	Ω
辐射通量密度	1.41	W/mm^2
发射面积	3.9	mm^2
发射区域尺寸	1.87×2.09	$mm \times mm$
动态电阻	0.02	Ω
热阻	75	$^{\circ}C/W$

2.2.2 光束准直和均光

尽管 UV-LED 光源具有体积紧凑、近似点光源的特性，但其光束发散角较大，且光强呈高斯分布，导致光能在传输过程中的利用率通常低于 40%。为提高光学系统效率，需要采用高效的匀光准直系统来改善光束质量。

传统的准直方案采用工程散射体与双胶合消色差透镜的组合，但实验表明该方案存在光束均匀性仅能较低、边缘光强衰减严重以及存在明显色差效应等局限。为此，本研究提出了一种改进型准直系统，其功能在于采用透镜组替代传统双胶合消色差透镜，并增加场镜来优化边缘视场光强，使整体均匀性提升，在保证光束质量的同时，将系统光能利用率大大提高，显著提升了系统性能，如图 2-3 所示。

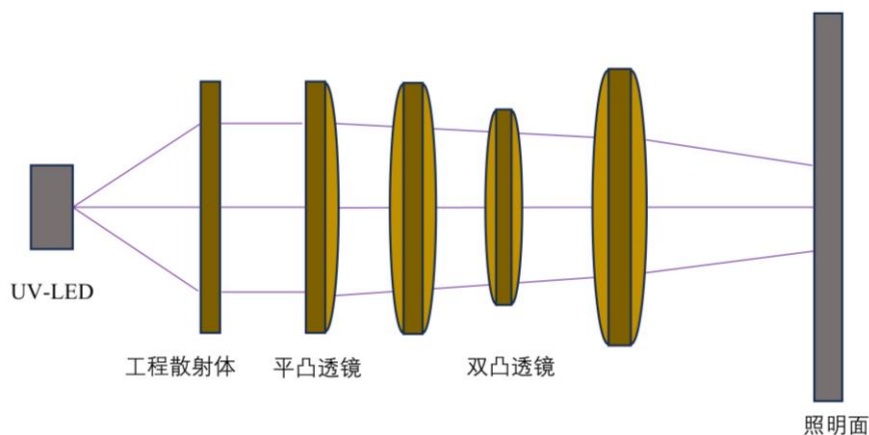


图 2-3 照明系统示意图

2.3 光刻投影系统

2.3.1 数字微镜器件

数字微镜器件 DMD 作为整个系统的核心器件，它能对前端照明系统的光，依据数字掩模进行空间光调制，生成含掩模信息的光图像，作用类似传统光刻掩模板。目前 DMD 应用广泛，除光刻外，还广泛应用于 DLP 投影显示、3D 视觉等领域。其结构如图 2-4 所示，由众多可翻转微反射镜构成，镜中心有通孔，镜间有微小间隙。多年发展下来，DMD 性能显著提升，如微反射镜数量增多、尺寸减小、翻转角度增大等。DMD 中的微反射镜数量已经由早期的 848×400 发展到 2560×1600 ，微反射镜的尺寸由 $17\mu\text{m}$ 做小到 $5.4\mu\text{m}$ ，微反射镜翻转的角度也从 $\pm 10^\circ$ 增大到 $\pm 12^\circ$ [72]。

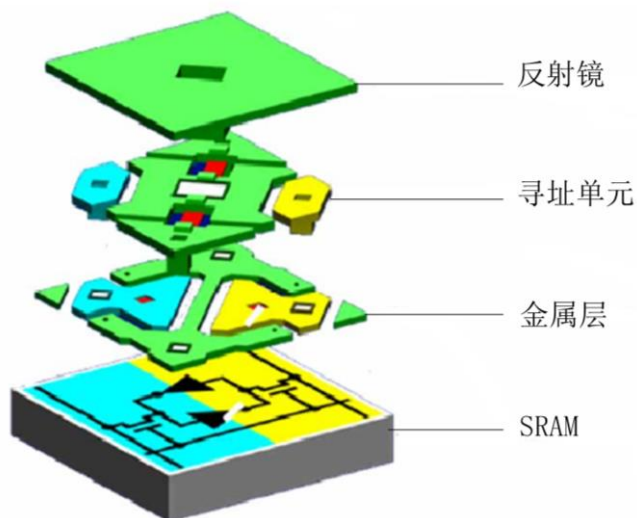


图 2-4 DMD 结构图

DMD 通过二进制信号控制各微反射镜的翻转角度，实现对空间光的调制。每个微反射镜有 reset（翻转 0° ，无信号输入时所处状态）、on（输入“1”，翻转 $+12^\circ$ ，反射光至投影物镜，像平面成亮点）、off（输入“0”，翻转 -12° ，反射光至光吸收体，像平面成暗点）三种状态^[73]。当要显示数字掩模时，其会转化为二进制信号，控制各微反射镜的翻转角度，如图 2-5 所示。

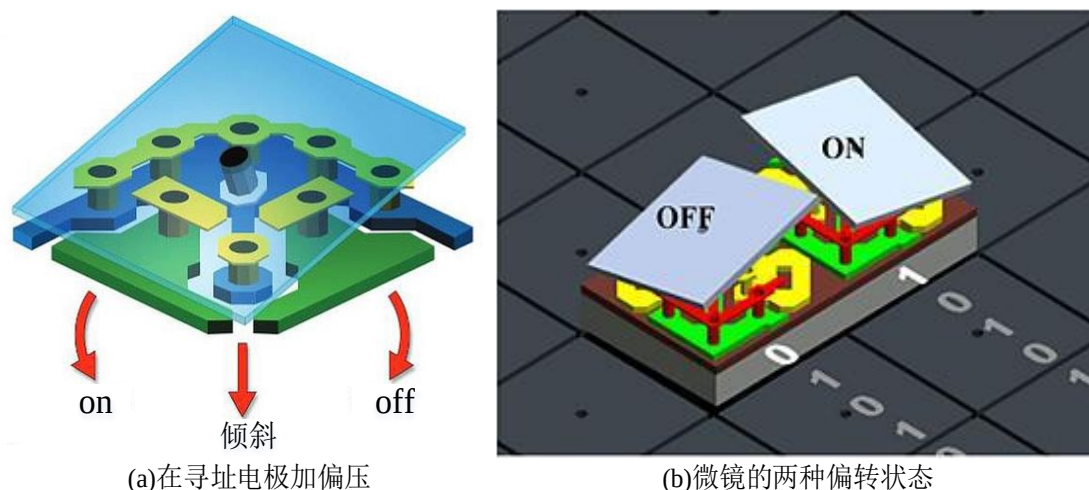


图 2-5 微镜偏转原理图^[73]

本研究所构建的 DMD 数字光刻系统采用德州仪器 TI 公司开发的 XGA 系列数字微镜器件，并配备厦门辛同科技公司研发的 DLP-6500 控制平台。该系统的硬件结构和性能参数分别如图 2-6 和表 2-2 所示。该 DMD 器件采用先进的微机电系统（MEMS）制造工艺，集成超过 2.07 百万个铝制微镜，构成 1920×1080 的空间光调制阵列。与传统 DMD 器件相比，该型号在多个技术指标上实现显著突破：微镜单元尺寸缩减至 $7.56\mu\text{m}$ ，面积缩小约 40%；阵列填充因子提升至 92%，光学效率提高 35%；集成度提升约 300 倍，为高分辨率图形化提供了硬件基础。

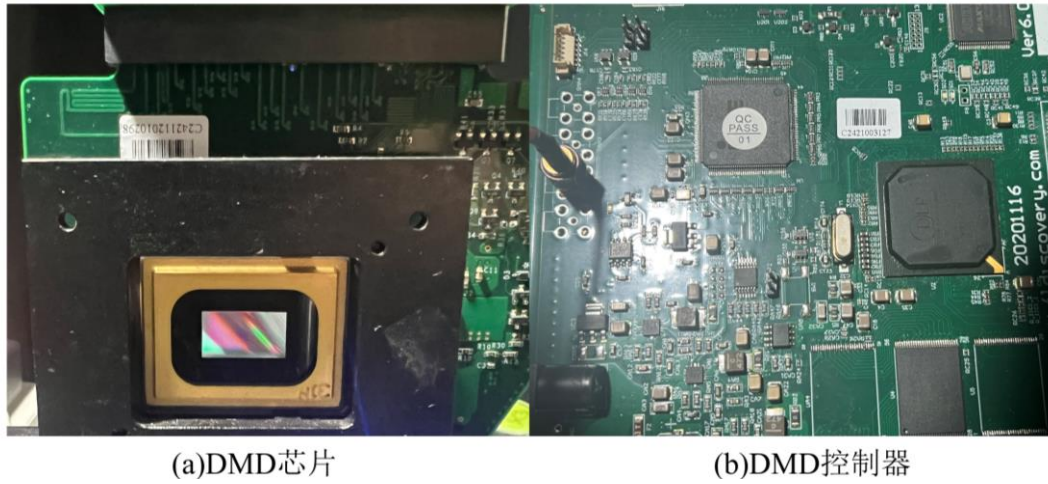


图 2-6 DLP-6500

表 2-2 DLP-6500 型 DMD 参数

参数	数值	单位
本征分辨率	1920×1080	/
DMD 整体尺寸	14.515×8.164	mm×mm
微镜间距	1	μm
单微镜尺寸	7.56×7.56	μm
反转角度	±12	°
最高帧频	9523	Hz
时钟频率	400	Hz
供电电压	5	V

2.3.2 投影物镜

投影成像系统的核心光学元件是投影物镜，作为光路传输的终端环节，其性能参数直接决定了光刻系统的图形转移精度。投影物镜承担着将 DMD 调制后的空间光精确传递至基片的关键功能，其通过特定的光学倍率，将 DMD 表面的数字图案缩微转印至涂覆光刻胶的基片表面，形成预定尺寸的图案。这一光学传递过程需要严格控制像差，以确保图形转移的保真度。

投影物镜的关键性能指标包括：

(1) 缩放倍率

缩放倍率定义为像高与物高的比值，其数学表达式为：

$$H = -\frac{l_1}{l_2} \quad (2-1)$$

其中, H 指缩放倍率, l_1 、 l_2 为掩模尺寸和投影尺寸。

(2) 成像分辨率

空间分辨率 R 表征系统的最小可分辨特征尺寸, 根据瑞利判据可表示为:

$$R = K \frac{\lambda}{NA} \quad (2-2)$$

其中, λ 为曝光光源波长, K 为工艺因子, NA 为物镜数值孔径。

从上式可知, 在曝光波长和工艺因子确定的情况下, 投影物镜的数值孔径与理论分辨率呈反比关系, 即增大数值孔径可有效提升系统的极限分辨率。然而, DMD 器件的物理结构引入了额外的约束条件: 微镜单元之间存在约 $1\ \mu\text{m}$ 的周期性间隙, 当系统分辨率过高时, 这些间隙会在成像过程中产生明显的莫尔条纹, 即所谓的栅格化效应。通过理论计算和实验验证, 确定最佳的 NA 取值范围, 在保证足够分辨率的同时, 避免出现图像伪影。

本文选择了大恒广电的 GCO-2101 型透镜, 具体参数见表 2-3。

表 2-3 GCO-2101 型投影物镜的参数

参数	数值	单位
倍率	4	倍
工作距离	34.7	mm
焦距	36.26	mm
数值孔径	0.1	/
齐焦距离	45	mm
机械筒长	160	mm
物方视场	5	/

2.4 三维纳米移动平台控制系统

本研究选用芯明天公司 P11 XYZ 100 系列压电纳米定位平台作为核心运动执行机构。该平台采用创新的单块柔性铰链结构设计, 通过有限元拓扑优化方法实现了机械结构的整体性能提升。其核心驱动机制基于压电陶瓷的逆压电效应, 结合杠杆放大原理, 可实现 $100\mu\text{m}$ 量级的大行程运动。平台内置高精度电容传感器, 在闭环控制模式下定位精度可达亚纳米级 ($<1\text{nm}$)。独特的无摩擦柔性导向系统具有极高技术优势, 结构示意图如图 2-7 所示, 其紧凑型设计特别

适用于微纳加工领域的精密定位需求。

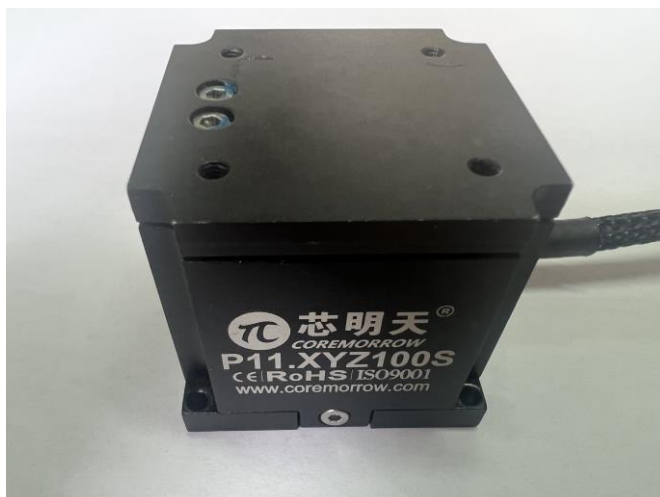


图 2-7 XYZ 100 型压电平台

此压电平台配备了 E70.D3S 压电陶瓷平台，如图 2-8 所示。其具备三通道模拟信号输入接口，可实现与多源控制信号的无缝集成。控制器支持通过外部接口进行工作模式切换，并配备专用上位机软件进行电压、位移等关键参数的精确调控，特别适用于需要高可靠性的多自由度精密定位场景，包括倾斜、俯仰及偏摆等复杂运动模式，具体参数见表 2-4 所示。



图 2-8 E70. D3S 闭环压电控制器

表 2-4 压电平台具体参数

参数	数值	单位
开环行程	CH1=110.58	μm
	CH2=106.92	
	CH3=113.91	
闭环行程	CH1=109.70	μm
	CH2=104.97	
	CH3=111.92	
分辨率	3	nm
负载	100	g

2.5 基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻系统搭建与调试

2.5.1 数字光刻系统搭建

数字光刻系统严格遵循光学工程规范进行组装，系统布局如图 2-9 所示。为确保曝光图形的质量，系统实施以下精密装调流程。

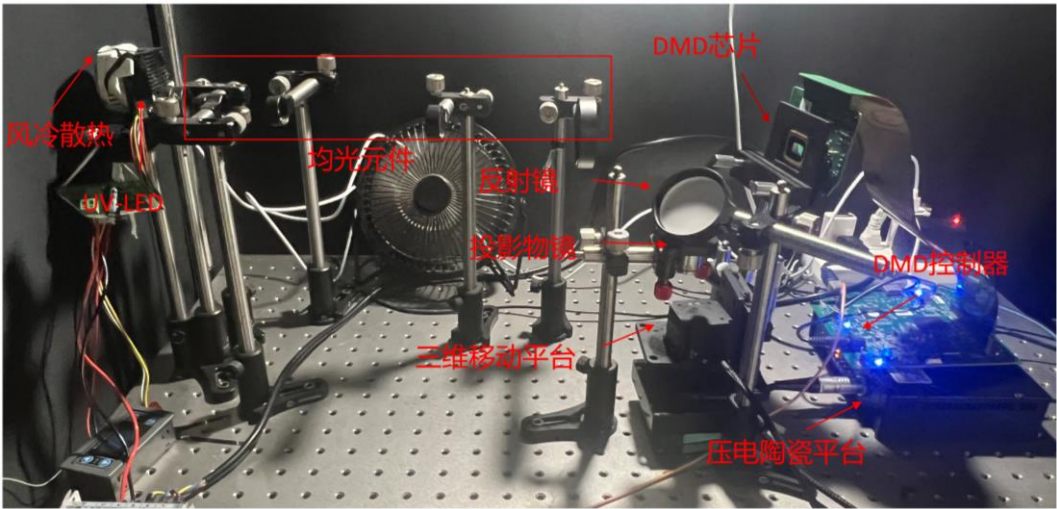


图 2-9 DMD 数字光刻系统实物搭建

首先，使用高精度水平仪校准光学隔振平台，并固定激光光源。随后，按照光学设计方案搭建照明光路，确保匀光准直元件的共轴度，直至 DMD 表面光斑的均匀性、尺寸及光强分布均达到设计指标。在 DMD 图形控制软件中输入预设的数字掩模图案后，需精确调整入射光束与 DMD 表面呈 24° 夹角，并确保紫外光斑完全覆盖 DMD 有效工作区域，以保证光束经调制后能垂直进入后续光学系统。

投影物镜的安装需进行垂直度校准，确保入射光束与物镜光轴严格对准。最终，实时监测基片表面图案质量，利用压电平台的三维纳米定位功能，将基片精确调节至投影系统的焦深范围内，实现高保真图形转移。

2.5.2 数字光刻系统调试

系统搭建完成后，需要对整个系统进行多次测试与调试，方可进行实验。实验系统中常见问题为失焦和曝光图形产生畸变。当曝光图形很模糊且成形很差时，需通过三移动平台采用二分法调节焦距，直至曝光成像达到正常精度。由于DMD系统要求精度极高，各光学元件位置略有出入便会导致曝光图形产生畸变。当曝光图形产生巨大畸变时，首先检查光源均匀性，其次检查匀光元件与DMD芯片是否在同一光轴上，最后检查样品台是否水平。当曝光图形畸变较小或者为有规律畸变时，除上述方法，也可采用图形畸变预补偿的方法，如图2-10所示。通过对掩模图进行补偿处理，便可消除畸变，得到正常曝光图形。



图 2-10 畸变预补偿原理图

为满足动态模糊技术的实验需求，本系统对压电陶瓷平台上位机进行了 C# 二次开发，C# 界面如图 2-11 所示，部分二次开发代码如图 2-12 所示。红线正方形框内为二次开发新增功能，空白输入端依次为 X，Y，Z 轴距离（单位为微米），位移时间（单位为 s），按键端依次为三路位移开始按键，三路归零按键，循环按键。在本文实验中，计算出 X，Y 轴移动距离后，输入数据，点击循环按键，平台即可移动至输入位移相应位置后并回到原始点，重复这一过程直至时间结束。将循环按键信号与 DMD 控制器曝光信号同步，当曝光开始时，三维纳米移动平台同时开始位移；时间结束后，两者同时停止工作。

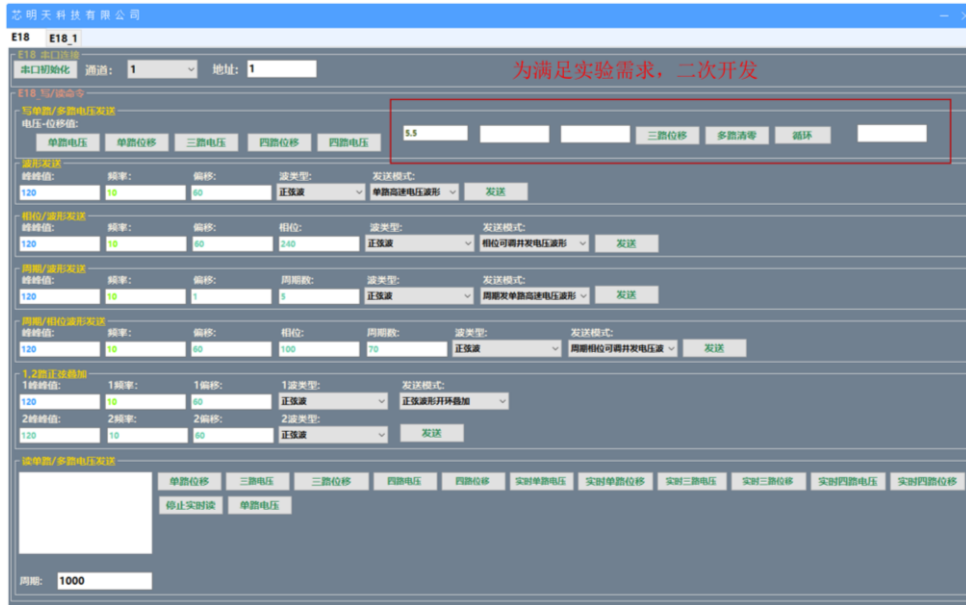


图 2-11 二次开发系统图

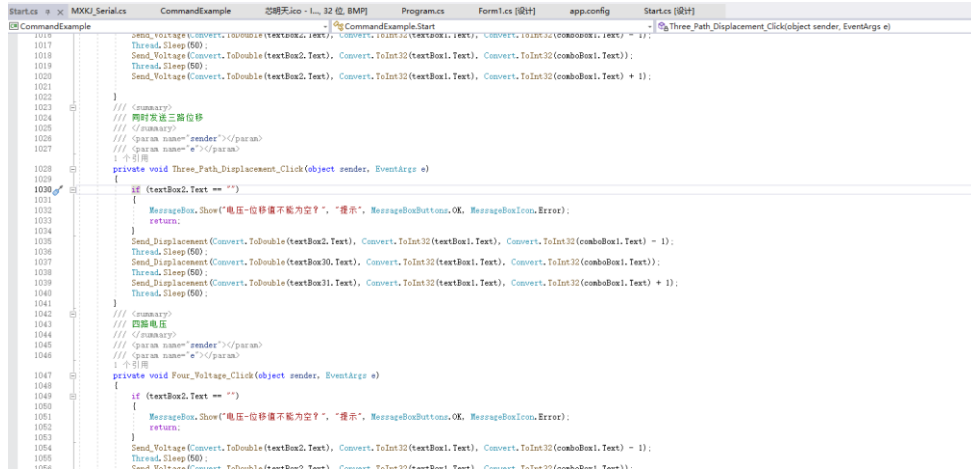


图 2-12 部分二次开发代码

2.6 本章小结

本章系统性介绍了DMD数字光刻系统的整体架构与关键技术模块，首先从系统层面阐述了数字光刻系统的基本组成和工作原理，构建了完整的系统框架；随后，重点分析了各核心子系统的设计与实现，包括采用UV-LED光源的前端照明系统、基于工程散射体和透镜组的复合光学准直均光系统、具备高数值孔径的投影成像系统以及集成压电陶瓷驱动器与电容传感器的三维纳米定位平台；最后，详细阐述了基于动态模糊效应的系统调试流程，包括光路对准、参数优化等关键步骤，并对压电陶瓷平台进行二次开发，通过系统级集成与优化，为后续实验研究奠定了坚实的技术基础。

第3章 数字光刻成像理论及算法仿真

3.1 相干成像理论

在理想化的相干成像理论模型中，假设光源为理想点源（体积趋近于零），此时辐射光场具有完美的空间相干性和时间相干性^[74]。然而，实际物理系统中不存在严格的点光源，任何具有有限尺寸的光源都会引入部分相干效应。因此，完全相干成像系统在工程实践中更多表现为一种理论极限，其实际应用必须考虑扩展光源带来的部分相干效应，这为光学系统设计引入了额外的复杂度。

根据几何光学原理，当理想点光源 P 位于透镜前焦点且与光轴严格重合 $(f_x, f_y) = (0, 0)$ 时，入射光线经透镜折射后将形成平行于光轴的准直光束，如图 3-1(a)所示。然而，当点光源偏离光轴至光轴外位置时，即使仍处于前焦平面，输出光束将产生偏转，这种非平行性将导致后续光学系统的像差增大，影响成像质量。

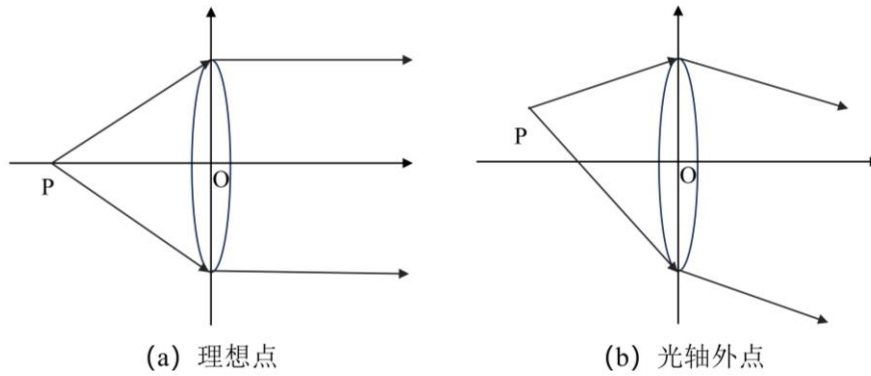


图 3-1 等效光源示意图^[75]

在成像系统里，像是通过次波相干叠加形成的，具体来说，在相干照明条件下，像的复振幅分布 $U_1(x, y)$ 等于物面复振幅分布 $U_0(x, y)$ 与脉冲响应函数 $O(x, y)$ 的卷积。

$$U_1(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U_0(x', y') O(x - x', y - y') dx' dy' \quad (3-1)$$

对上式行傅立叶变换得：

$$G_2(f_x, f_y) = H(f_x, f_y)G_1(f_x, f_y) \quad (3-2)$$

其中 $G_2(f_x, f_y) = H(f_x, f_y)G_1(f_x, f_y)$ 、 $H(f_x, f_y)$ 和 $G_1(f_x, f_y)$ 分别是 $U_1(x, y)$ 、 $O(x, y)$ 和 $U_0(x, y)$ 的傅立叶变换。

要是满足特定条件 $H(f_x, f_y) = 1$ ，系统就可实现理想成像。但实际的光学成像系统都受限于衍射，光瞳的大小对最大分辨率有约束。在相干照明的情况下，相干传递函数等同于系统的光瞳函数：

$$H(f_x, f_y) = A(\lambda d f_x, \lambda d f_y) \quad (3-3)$$

$$A(\lambda d f_x, \lambda d f_y) = A = \begin{cases} 0 & \text{在出瞳外} \\ 1 & \text{在出瞳内} \end{cases} \quad (3-4)$$

由此可得出光学系统的截止频率为：

$$\begin{cases} f_{cx} = \frac{x}{d} \\ f_{cy} = \frac{y}{d} \end{cases} \quad (3-5)$$

在该光学传递函数模型中，参数 d 代表像距这一关键几何量。从频域分析的角度，相干照明在系统中表现出显著的低通滤波特性：其传递函数在空间频率域呈现明显的截止特性，当空间频率低于特征截止频率时，系统表现出全通特性；而当空间频率超过时，系统传递函数急剧衰减。这种频率选择特性导致高频空间调制信息的丢失，在时域表现为光刻胶图形的边缘调制传递函数下降，具体反映为图形侧壁轮廓的锐度降低，边缘斜率从理想的垂直状态退化为平滑过渡的斜坡特征。

3.2 非相干成像理论

在非相干光学成像体系中，其本质特征在于扩展光源各发光点产生的子波列之间不存在稳定的相位关系，导致光场叠加时干涉项相互抵消。与相干照明系统相比，非相干照明引入了随机相位调制，使得光场统计特性呈现完全不同的行为模式，这种复杂性使得传统的复振幅描述方法失效。

基于非相干成像系统的统计光学特性，光强传递函数成为描述系统性能的核心参数。根据线性系统理论，像面光强分布可表示为：

$$I_2(x, y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} I_1(x', y') |O(x - x', y - y')|^2 dx' dy' \quad (3-6)$$

式中， $I_1(x, y)$ 为物面光强分布， $I_2(x, y)$ 像面光强分布， $|O(x - x', y - y')|^2$ 为脉冲响应函数，物和像的光强分布关系由上式进行傅立叶变换可得到：

$$G_2(f_x, f_y) = H(f_x, f_y) G_1(f_x, f_y) \quad (3-7)$$

式中， $H(f_x, f_y)$ 为非相干成像系统的光学传递函数， $G_1(f_x, f_y)$ 、 $G_2(f_x, f_y)$ 分别为物面和像面的光强分布， $H(f_x, f_y)$ 有：

$$H(f_x, f_y) = F \{ |O(x, y)|^2 \} \quad (3-8)$$

可简化为：

$$H(f_x, f_y) = F[O(x, y)] \otimes F[O(x, y)] = A(\lambda d f_x) \otimes A(\lambda d f_y) \quad (3-9)$$

通过傅里叶变换的数学工具，可以证明非相干成像系统中的点扩散函数与出瞳函数在频域存在严格的傅里叶变换对关系。基于这一数学对应性，结合维纳-辛钦定理，可以推导出非相干成像系统的光学传递函数的解析表达式。特别地，系统的空间频率响应特性由截止频率决定，其理论表达式为：

$$\begin{cases} f_{ox} = \frac{2x}{dx} \\ f_{oy} = \frac{2y}{dy} \end{cases} \quad (3-10)$$

3.3 部分相干成像理论

在实际光学成像系统中，扩展光源的物理特性决定了其既不能简化为完全相干光源，也不能等同于理想非相干光源。从光场统计理论的角度，可将偏离光轴的扩展光源分解为多个非相干点源的线性叠加，而光轴附近的发光区域则表现出部分相干特性。这种混合相干性的光源被称为部分相干光源，相应的成像系统则构成了部分相干成像体系。

DMD 数字光刻系统的成像特性与部分相干理论表现出高度一致性。在数学建模方面，部分相干成像主要采用两种等效的理论框架：基于互强度传播的 Hopkins 模型和基于角谱分解的 Abbe 模型。Hopkins 模型采用四维传输交叉系数

描述系统特性，而 Abbe 模型则通过二维点扩散函数的线性叠加来表征成像过程。这两种模型为系统的数值仿真和实验验证奠定了理论基础。

3.3.1 Abbe 成像算法

如图 3-2 所示，Abbe 基于波动光学理论提出了透镜成像的衍射模型。该模型的核心物理机制是：点光源产生的准直平面波经物面衍射后，在物镜后焦面形成夫琅禾费衍射谱，这些离散的衍射级次在频谱面形成特征衍射斑。随后，各衍射斑作为次级波源，其发出的球面波在像面发生相干叠加，实现空间频率的重构。

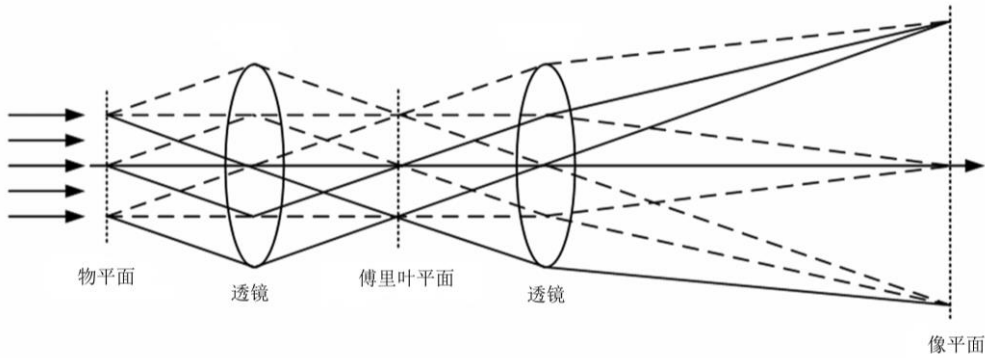


图 3-2 Abbe 成像算法原理图^[76]

Abbe 成像模型的数值实现可分解为以下四个物理过程：光源离散化，将扩展光源分解为统计独立的点源集合，满足 Van Cittert-Zernike 定理；衍射过程，每个点源产生的平面波经掩模调制，形成包含多级衍射的角谱分布；空间滤波，衍射光场通过投影物镜的有限孔径，实现频域滤波；像面合成，各点源贡献的光强分布按非相干叠加原理积分，最终获得像面光强分布。这一理论框架为部分相干成像系统的数值模拟提供了严格的物理基础。

其中，点光源 S 在成像平面的强度分布，表示为：

$$I_s(x, y) = \left| \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N P(f_i, g_j) M(f_i - f_s, g_j - g_s) e^{-2\pi i(f_i x + g_j y)} \right|^2 \quad (3-11)$$

曝光光源经离散后的非相干光源在像平面形成的光强分布为：

$$I(x, y) = \frac{\sum_s J_s I_s(x, y)}{\sum_s J_s} \quad (3-12)$$

其中, $I_s(x, y)$ 代表经点光源 S 照射后, 掩模图形在像平面的光强分布。

Abbe 成像算法与 Hopkins 算法在计算架构上存在本质区别。Abbe 方法通过快速傅里叶变换直接计算扩展光源采样点集 S 在像面的光强分布, 避免了复杂的传输交叉系数矩阵计算。该算法的计算复杂度与光源采样密度呈线性关系: 设光源离散化采样点为 Q , 则需要进行 Q 次独立的傅里叶变换运算。此外, 算法的计算流程与掩模图案强相关, 每次掩模图案变更都需重新执行完整的傅里叶变换计算序列。这种计算特性导致 Abbe 算法在逆光刻优化等需要频繁更新掩模图形的应用场景中计算效率较低。

3.3.2 Hopkins 成像算法

根据 Hopkins 成像算法, 光学成像系统可用如下各式表达:

$$I(f, g) = \iiint_{-\infty}^{+\infty} TCC(f'g', f'', g'') M(f', g') M^*(f'', g'') df' dg' df'' dg'' \quad (3-13)$$

$$I(x, y) = F^{-1} \{ I(f, g) \} \quad (3-14)$$

其中, f, g 表示频域坐标, “*” 为复共轭, x, y 表示空间坐标, $I(x, y)$ 、 $I(f, g)$ 分别为空间光强和空间光强的二维傅立叶变换, $M(f, g)$ 是掩模 $M(x, y)$ 的傅立叶变换, $TCC(f'g', f'', g'')$ 为交叉传输系数 (Transmission Cross Coefficient, TCC), 作为光学成像系统的核心表征参数, 定义了一个与掩模图案无关的四维频域传递函数。该函数通过二维卷积积分的形式, 完整描述了从照明光源到像平面的全光路传递特性。当光学系统的关键参数 (包括数值孔径 NA、成像倍率 M 和空间分辨率) 保持恒定时, TCC 矩阵具有不变性特征, 即 DMD 加载的图形变化不会影响 TCC 的数值, 其数学表达式为:

$$TCC(f', g', f'', g'') = \iint P(f + f', g + g') P^*(f + f'', g + g'') J(f, g) df dg \quad (3-15)$$

在上式中, $J(f, g)$ 表征光源的角谱分布函数, 描述了光源在不同传播方向上的光强分布特性。对于理想的科勒照明系统, 传统照明条件下的光源函数 $J(f, g)$ 可表示为:

$$J(f, g) = \begin{cases} \frac{\lambda^2}{\pi(\sigma NA)^2} & \sqrt{f^2 + g^2} \leq \sigma \frac{NA}{\lambda} \\ 0 & \sqrt{f^2 + g^2} > \sigma \frac{NA}{\lambda} \end{cases} \quad (3-16)$$

其中， σ 表示系统的部分相干因子（ $\sigma \in [0,1]$ ）：当 $\sigma = 0$ 时，系统退化为完全相干成像；当 $\sigma = 1$ 时，系统表现为完全非相干成像。 λ 为照明光源的中心波长， NA 为系统的数值孔径，其定义为：

$$NA = n \sin \theta \quad (3-17)$$

系统的脉冲响应函数 $P(f, g)$ 定量表征了透镜对空间频率的滤波特性。在理想光学系统假设下，圆形孔径光瞳的频域响应函数 $P(f, g)$ 可解析表示为：

$$P(f, g) = \begin{cases} \frac{\lambda^2}{\pi(NA)^2} \sqrt{f^2 + g^2} \leq \frac{NA}{\lambda} \\ 0 \quad \sqrt{f^2 + g^2} > \frac{NA}{\lambda} \end{cases} \quad (3-18)$$

考虑到 Hopkins 成像算法的计算复杂度，直接计算全视场光强分布在普通计算平台上难以实现，提出了一种基于本征函数分解的快速算法 SOCS (*Sun of systems*)，将部分相干成像系统分解为多个完全相干系统的加权叠加，并将传输交叉系数 $TCC(f', g', f'', g'')$ 表示为：

$$TCC(f', g', f'', g'') = \sum_i \sigma_i H_i(f', g') H_i^*(f'', g'') \quad (3-19)$$

上述公式可化简为：

$$\begin{aligned} I(f, g) &= \iiint \sum_i \sigma_i H_i(f', g') H_i^*(f'', g'') M(f', g') M^*(f'', g'') df' dg' df'' dg'' \\ &= \sum_i \sigma_i (H_i(f', g') M(f', g')) \otimes (H_i(f', g') M(f'', g''))^* \\ &= \sum_i \sigma_i \left| H_i(f', g') \otimes M(f', g') \right|^2 \end{aligned} \quad (3-20)$$

对上式进行傅立叶变换，结果如下：

$$\begin{aligned} T(x, y) &= F^{-1}(I(f, g)) \\ &= \sum_i \sigma_i \left| h_i(x, y) \otimes M(x, y) \right|^2 M[i, j] \end{aligned} \quad (3-21)$$

在 SOCS 算法的数学框架中，定义了一组特征卷积核 $h_i(x, y)$ ，其中每个 $h_i(x, y)$ 都是传输交叉系数（TCC）矩阵的特征函数。这些卷积核与其对应的本征值构成了算法的基础。SOCS 算法的核心思想是通过特征值分解，将部分相干

成像系统解耦为多个正交的完全相干子系统的线性叠加^[77]。

在实际工程应用中，通常采用截断近似方法：仅保留前 N 个较大本征值对应的子系统，而忽略其余贡献较小的项。随着保留项数 N 的增加，计算精度呈单调递增趋势，但计算复杂度也随之上升。因此，在实际应用中需要根据精度要求和计算资源，在算法收敛性和计算效率之间进行权衡优化。

3.4 Hopkins 部分相干成像算法仿真

与 Abbe 方法相比，Hopkins 方法在 DMD 数字光刻仿真中更具优势，特别适用于处理一些相干光源和复杂的光学系统。Hopkins 方法利用传输交叉系数矩阵对光学系统的成像特性进行高效描述，使计算量大大降低，特别适用于处理 LED 或汞灯等 DMD 系统中常见的复杂掩膜图案和一些相干光源。此外，Hopkins 方法在支持大规模仿真任务的同时，还能更精确地模拟镜像差和瞳孔功能的影响，满足 DMD 数字光刻系统对高效率、高精度仿真的需要。与之相比，Abbe 方法虽然理论上可行，但其计算复杂度高，资源消耗大，对于实时或大型模拟场景的应对难度较大。因此，在 DMD 数字光刻仿真中，Hopkins 方法的实用性更强，效率也更有优势。

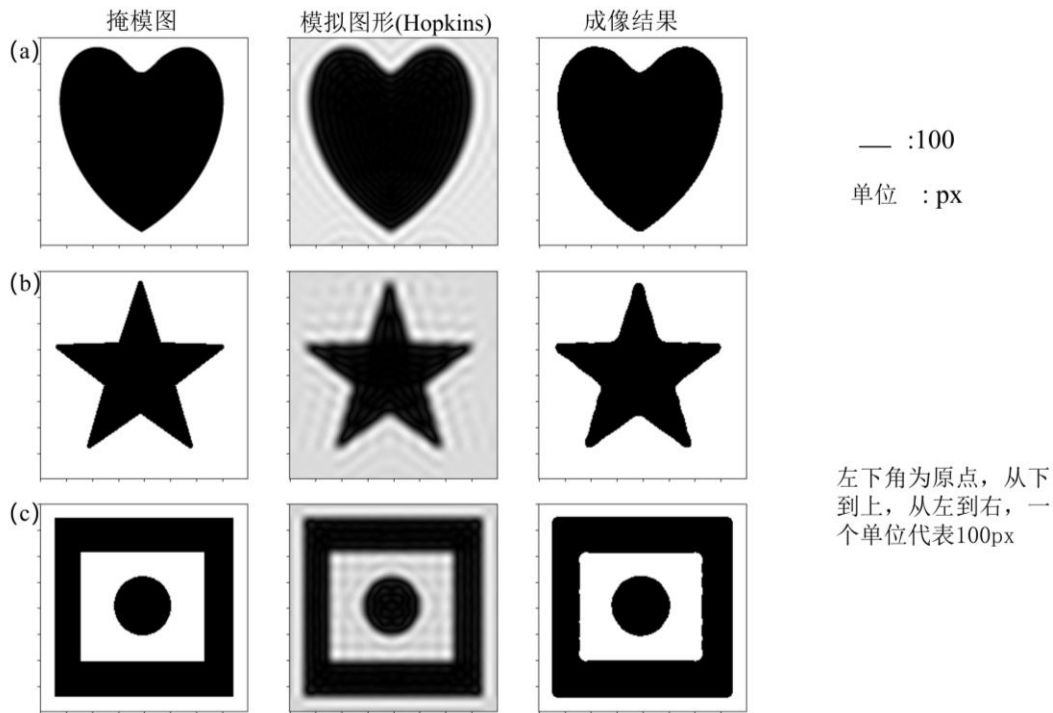


图 3-3 Hopkins 部分相干成像仿真

因此，本研究采用 Hopkins 部分相干成像算法构建了 DMD 数字光刻仿真成

像系统。通过 Python 编程实现了算法核心模块，包括传输交叉系数矩阵计算、特征值分解以及空间像计算等功能。为验证算法的有效性与可靠性，本文选取了几组典型的测试图案作为掩模图导入至 Hopkins 成像仿真系统。仿真结果表明，Hopkins 仿真成像系统能够准确预测 DMD 数字光刻的光强分布，如图 3-3 所示。

为进一步验证本算法模拟曝光的可靠性，将大量相同的掩模版导入 Python 仿真实验与 DMD 光刻实验作对比，得出此算法模拟成像的有效性与可靠性，随机抽取一组对比图，如图 3-4 所示结果，通过对比图可知，仿真实验结果与光刻实验结果基本一致，且很好的描述出光学临近效应。

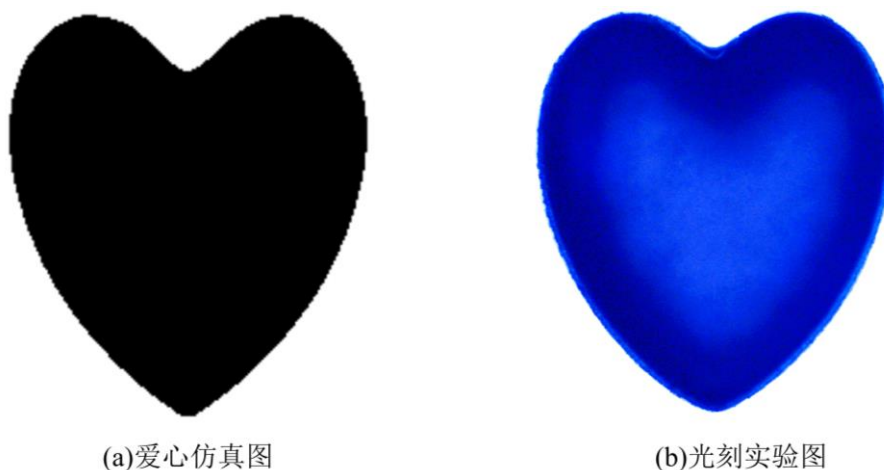


图 3-4 模拟仿真与实验对比图

3.5 本章小结

本章系统研究了 DMD 无掩模光刻的理论基础。首先基于傅里叶光学理论，从相干成像系统的光学传递函数出发，定量分析了曝光系统的空间频率响应特性，建立了图像传递能力的数学模型。随后，引入非相干成像理论，深入剖析了两种成像机制的本质差异。基于上述理论框架，本章重点探讨了部分相干成像的两大算法体系：Hopkins 算法和 Abbe 算法。通过对比分析，选择 Hopkins 算法作为基础，编写 Python 代码为本文的模拟仿真，通过多组实验证明，此算法的可靠性与稳定性，为后续仿真实验验证奠定基础。

第 4 章 动态模糊匹配子像素重叠的数字光刻优化方法研究

4.1 动态模糊匹配子像素重叠理论研究

DMD 作为数字光刻技术中的核心元件，主要由数量众多且排列紧密的方形微镜阵列组成。这些方形微镜在微观尺度下整齐有序地分布，每个微镜都具备独立的控制能力，能够通过快速翻转来调制光线的反射方向，以此实现对光刻图案的精确控制。然而，正是这种微观结构特性，在数字光刻过程中引发了一些问题。在曝光环节，当光线通过 DMD 上的微镜阵列投射到光刻胶上时，由于微镜呈方形，且以离散的方式对光线进行反射控制，使得曝光形成的微结构边缘无法达到理想的平滑状态，而是呈现出明显的锯齿状，如图 4-1 所示。

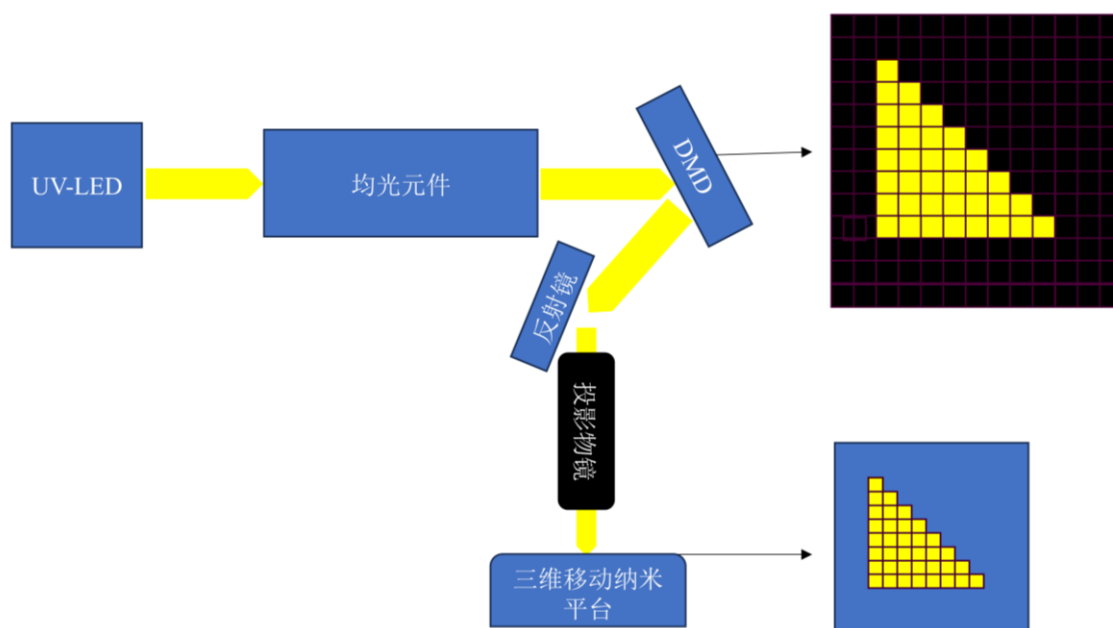


图 4-1 DMD 光刻图形锯齿状原理示意图

4.1.1 子像素重叠理论研究

为解决上述问题，在不改变投影物镜倍率的条件下，国内外学者提出了各种优化技术，见绪论 1.3。实际原理为子像素的重叠技术，在 DMD 数字光刻系统中，子像素重叠平滑技术是一种用于改善图形边缘质量的关键技术。其核心原理是通过对 DMD 微镜的精确控制，利用多个子像素的叠加曝光来实现边缘平滑。具体而言，DMD 微镜可以在亚像素级别进行微调，使得每个像素的曝光区

域能够部分重叠，从而在图形边缘形成渐变过渡效果。这种技术能够有效减少图形边缘的锯齿效应，显著提升光刻图形的分辨率和边缘平滑度，原理图如图 4-2 所示。当像素重叠使锯齿边长为之前的 $1/2$ 时，理论优化效果能使边缘粗糙度降低至 $1/2$ ；当像素重叠使锯齿边长为之前的 $1/3$ 时，理论优化效果能使边缘粗糙度降低至 $1/3$ ；以此类推，当像素重叠使锯齿边长为之前的 $1/n$ 时，理论优化效果能使边缘粗糙度降低至 $1/n$ ；当无限多重像素优化（ n 无限大）时，在理论上能够达到完全平滑的效果。但是，在实际实验中，过多重叠次数会导致曝光能量不均匀，实际曝光图形成像质量较差，且步骤繁琐，及其影响曝光效率。

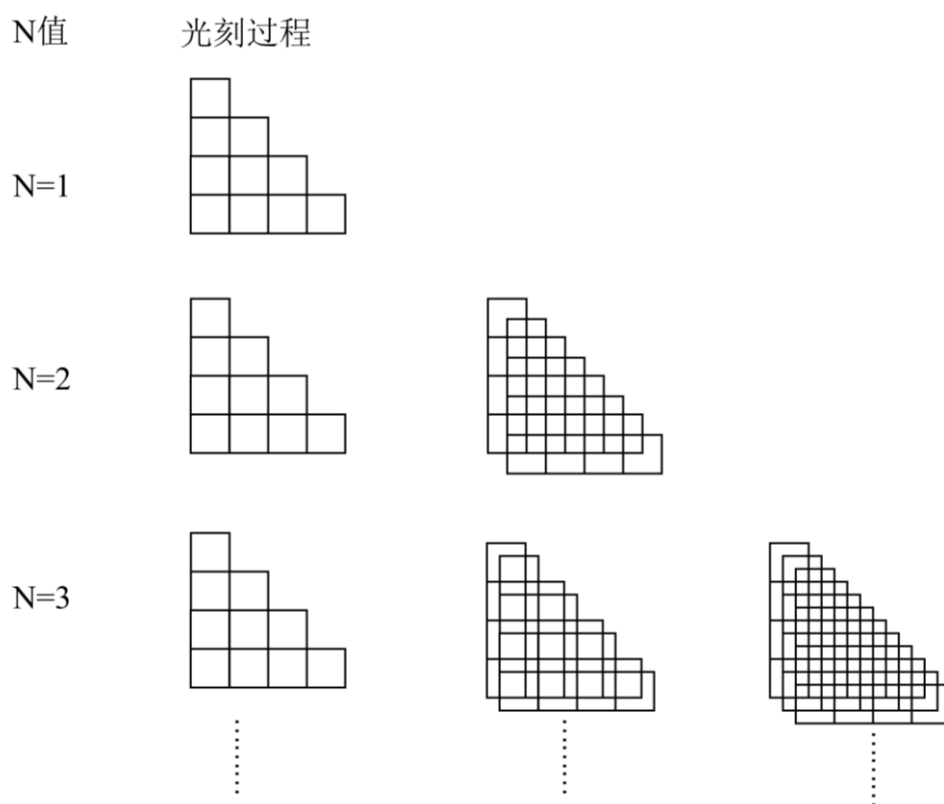


图 4-2 子像素重叠技术原理示意图

4.1.2 动态模糊效应核函数

由于三维纳米移动 运动平台和投影镜头在曝光过程中是连续的相对运动，因此产生的效果不仅仅是简单的像素叠加。此时，需要考虑运动模糊的影响。在现实世界中，曝光是接收到一定的光，在感光材料上产生化学反应，最终固化或产生其他效果的过程。如果在此过程中曝光光束和物体位置之间存在相对变化，则会导致入射光发生变化，从而导致曝光结果模糊。因此，本文引入了

motion blur 内核函数，也称为 motion blur filter 或 motion blur matrix。它是一个二维函数，用于模拟图像的运动模糊效果。

将模糊的方向和距离表示为二维向量 (x, y) ，此向量的大小 $length$ 表示模糊的长度，可以表示为：

$$length = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (4-1)$$

然后，构造一个 $kernel_size \times kernel_size$ 矩阵，并将矩阵中心周围长度范围内的元素设置为 $\frac{1}{((length*2+1)^2)}$ ，对于矩阵中的每个元素 $M[i, j]$ ，如果 i, j 位于矩阵的中心，并且与中心的距离小于或等于 $length$ ，数学公式可表示为：

$$M[i, j] = \frac{1}{((length*2+1)^2)} \quad (4-2)$$

$$M[i, j] = 0 \quad (4-3)$$

最后，对矩阵进行归一化，使矩阵中所有元素的总和为 1，得：

$$M_N = \frac{M}{\text{sum}(M)} \quad (4-4)$$

这里， M 是模糊内核矩阵， i 和 j 是矩阵中元素的索引， $length$ 是运动模糊的长度， $\text{sum}(M)$ 是矩阵中所有元素的总和。本文将 $kernel_size$ 设置为 2。需要注意的是，在使用此运动模糊内核功能时，请根据长度的大小调整 $kernel_size$ 。否则，如果某些元素不在核矩阵的有效范围内，则会影响模糊效果的生成。

4.1.3 动态模糊匹配子像素重叠技术原理

本文使用等腰直角三角形对其斜边进行优化来验证所提出的方法，像素叠加的过程如图 4-3 所示。需要注意的是，每个网格代表一个像素，该方法中使用的曝光方法是连续移动的曝光。图中所示的模式是在一个方向上暴露的终点和下一个位移的起点，如图 4-3 所示。从原始位置的曝光开始，平台同时向上，向左移动半个像素距离，直到到达图中 4-3 (b) 所示的位置，再回到初始位置后，完成一个循环。

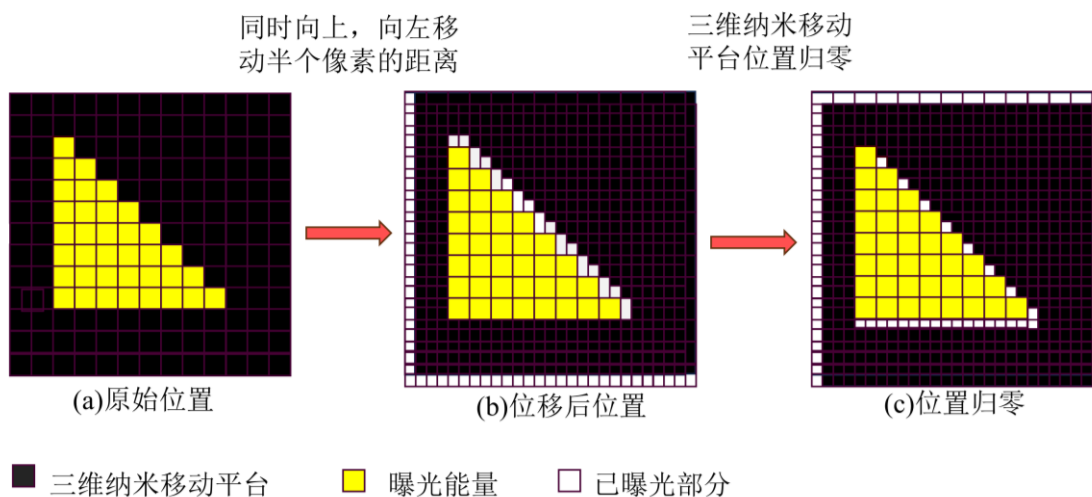


图 4-3 位移示意图

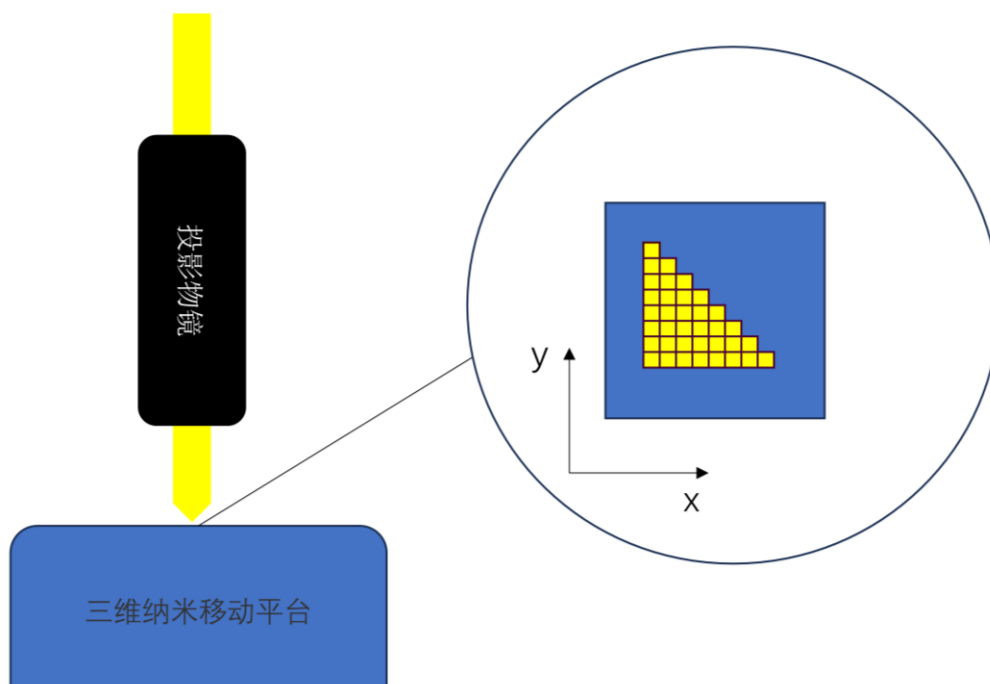


图 4-4 平台与曝光图形位置关系图

在整个曝光过程中，三维纳米移动平台按照所示路径来回循环，以完成像素叠加，且会产生动态模糊效应，达成双重优化的效果，预测效果如图 4-5 所示。从示意图可以预测，动态模糊效应匹配子像素重叠技术的曝光图像的边缘平滑度的优化程度将超过 $1/2$ 。

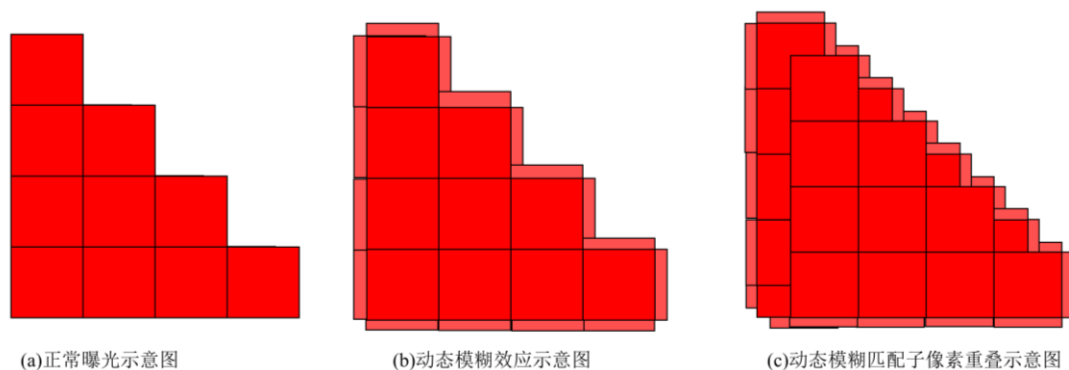


图 4-5 动态模糊匹配子像素重叠技术示意图

4.2 动态模糊匹配子像素重叠的仿真实验研究

4.2.1 动态模糊匹配子像素重叠技术掩模能量图

为验证动态模糊匹配子像素重叠技术的有效性，首先进行 Hopkins 算法仿真成像实验。在无移动的正常曝光中，整束光都指向基板上的相同位置，因此在曝光过程中的任何时刻，曝光在基底的能量形状与掩模版图形一致。但是，在动态模糊匹配子像素重叠技术中，三维移动平台快速移动，导致曝光产生动态模糊效应。基于之前创建的运动模糊内核函数，使用 Python 对移动曝光进行了模拟实验。由于 Python 代码中图像的最小分辨率仅为 1 像素，因此无法显示移动半个像素距离的结果。因此，将整个曝光图像放大了 10 倍，边缘达到 10 个像素的距离，并按照上述方式移动它，其移动距离为 5 个像素。在曝光期间的任意时刻，DMD 光刻系统直写至光刻胶上的曝光能量如图 4-6 所示。

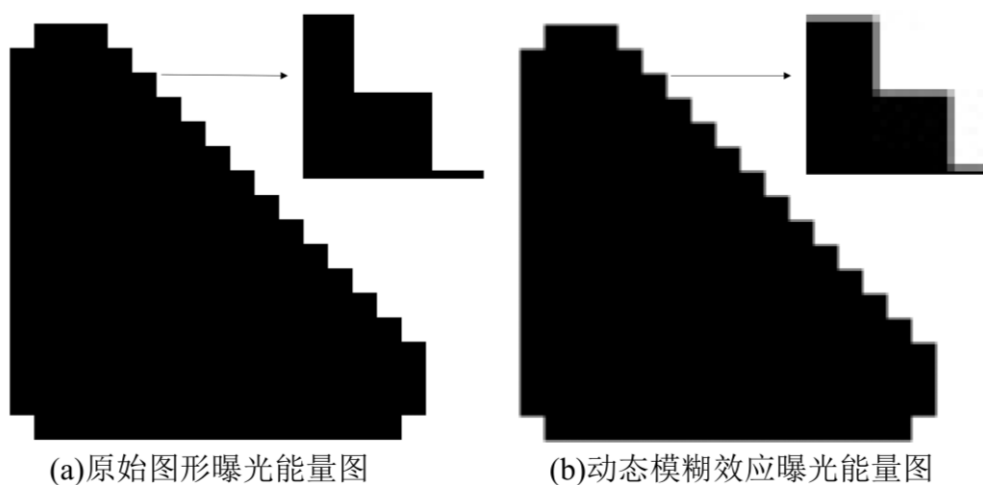


图 4-6 瞬时能量模拟图

将运动模糊效应曝光能量图像通过 Python 进行重叠，得到基于运动模糊效果匹配像素重叠技术的三角形能量掩模图，如图 4-7 所示。

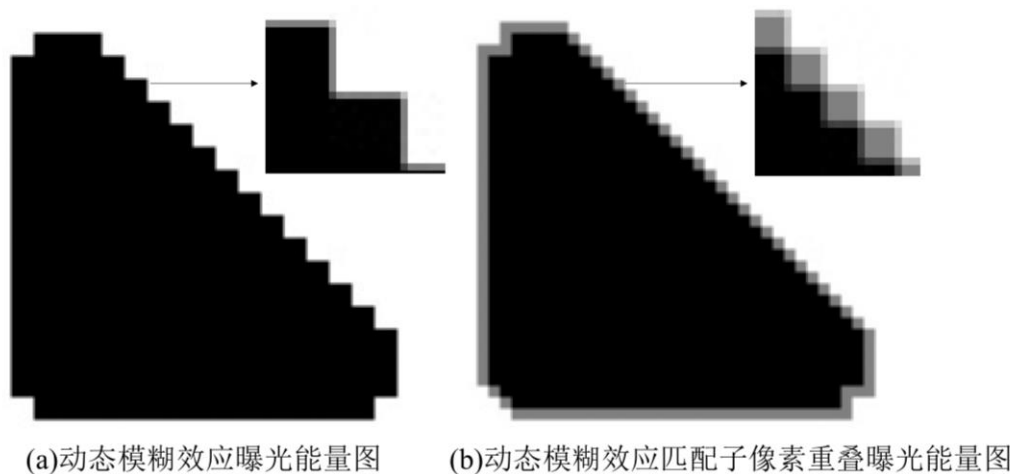


图 4-7 运动模糊效果匹配像素重叠技术的三角形能量掩模图

4.2.2 动态模糊匹配子像素重叠技术的仿真实验

分别采用 python 曝光模拟代码对普通三角形掩模图和基于动态模糊效果匹配像素重叠技术的三角形掩模图进行曝光，得到图 4-8 所示的仿真图。从最终的仿真结果中可以看出，经过优化的三角形斜边锯齿获得极高的优化效果，验证了动态模糊效应匹配子像素重叠技术的有效性。

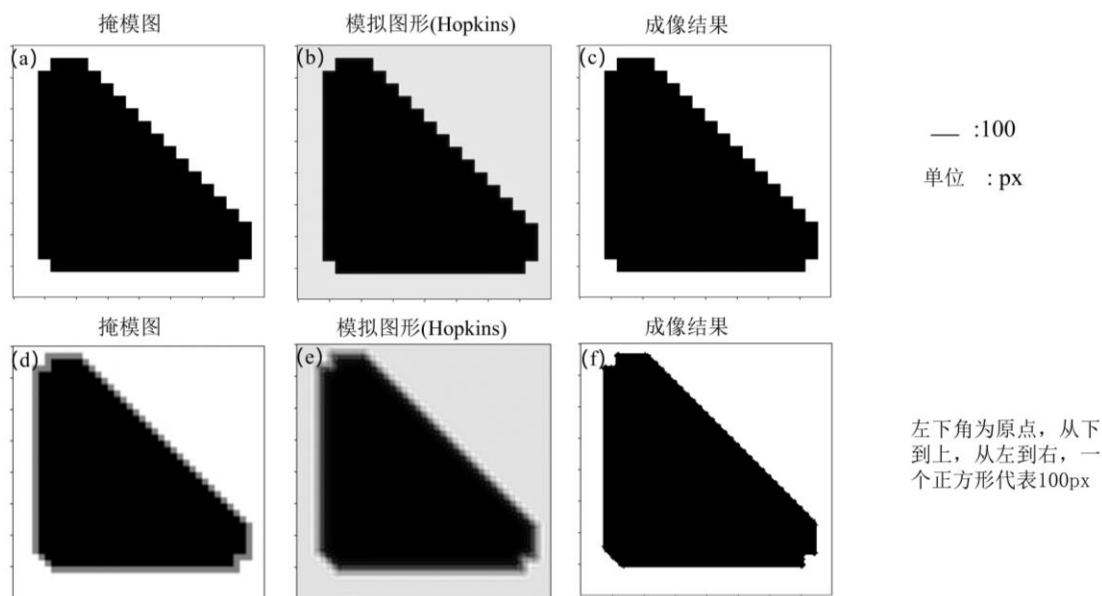


图 4-8 动态模糊匹配子像素重叠技术仿真实验图

4.3 动态模糊匹配子像素重叠技术的光刻实验研究

在本研究中，选用 ESUN 公司生产的光敏树脂作为光固化材料。该材料是光固化增材制造领域的核心功能材料，其化学成分主要包括，光引发剂和预聚物（如环氧丙烯酸酯）、活性稀释剂（如丙烯酸酯单体），光敏聚合物及其它功能添加剂。在紫外光辐照下，光引发剂吸收光子能量，发生 Norrish I 型或 II 型裂解，产生具有高反应活性的自由基。这些活性中间体通过链式反应机制，引发不饱和双键的断裂和重组，形成三维交联网络结构，实现从液态到固态的相变。

与传统光刻胶相比，光敏树脂在光刻工艺中具有显著优势：简化工艺流程，无需前烘和后烘热处理；采用水或乙醇等环保型溶剂即可完成显影，避免使用有毒有机溶剂；固化速度快，可实现秒级图形化；机械性能优异。其光刻工艺过程如图 4-9 所示。

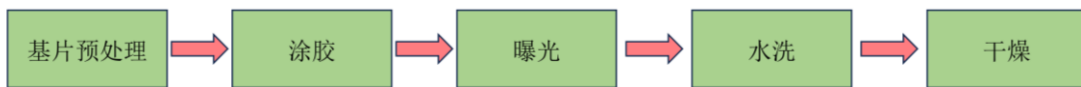


图 4-9 光刻工艺流程

4.3.1 DMD 数字光刻工艺

（1）基片处理

在实验准备阶段，基片清洁处理是确保光刻质量的关键步骤。基片表面的污染物（包括颗粒物、有机残留及指纹等）会显著降低光敏树脂的界面结合强度。特别是在树脂液态阶段，污染物可能作为成核中心，导致固化过程中产生缺陷，影响最终结构的形貌精度和机械性能。

本研究选用 24mm×24mm，厚度 0.13mm 规格的一次性方形盖玻片作为基片。虽然一次性使用避免了重复使用导致的表面损伤和树脂残留问题，但在制造、运输和存储过程中仍会引入微量污染物。因此，实验采用严格的清洗流程：首先将盖玻片浸入异丙醇溶液中超声清洗 5 分钟，去除表面颗粒物；随后使用无尘室专用擦镜纸沿单一方向擦拭，避免交叉污染。整个操作过程需佩戴无粉手套，使用防静电镊子夹取，以最大限度降低人为污染风险。

(2) 涂胶

涂胶工艺的核心目标是在基片表面制备具厚度均匀、无气泡、高质量的薄膜。为实现这一目标，本研究采用 KW-4A 型精密匀胶机（如图 4-10 所示,具体参数见表 5-1）进行旋涂工艺。具体操作流程如下：基片固定，将预处理后的盖玻片置于匀胶机真空吸盘上，启动真空吸附系统，确保基片在高速旋转时的稳定性；参数设置，根据光刻胶粘度和目标膜厚，优化设置匀胶参数；旋涂过程：在低速阶段进行定量滴胶，随后切换至高速模式，利用离心力使树脂均匀铺展。通过调节转速和时间，可将膜厚控制在 10-100 μm 范围内，厚度均匀性可达 $\pm 2\%$ 。该工艺的关键在于精确控制转速曲线和旋涂时间，以避免产生边缘堆积和气泡等缺陷，确保后续光刻图形的质量。



图 4-10 KW-4A 匀胶机

表 5-1 匀胶机具体参数

参数	数值	单位
1 档转速	500-2000	r/min
1 速匀胶时间	0-18	s
2 档转速	1000-8000	r/min
2 速匀胶时间	0-60	s
电机功率	40	W
供电电压	220	V

（3）曝光

为确保光刻图形的成像质量，曝光前需要进行精确的调焦操作。调焦过程采用专用调焦掩模和参考光源（通常为可见光波段），通过精密位移台调节基片位置，直至在基片表面观察到清晰的掩模图像。由于投影物镜存在色差现象，即不同波长的光线在通过光学系统时会产生焦距差异。根据色散理论，短波长光的焦距较近，而长波长光的焦距较远。在本文系统中，曝光光源的焦距比参考光源更靠近物镜约，这一距离称为色差补偿距离，可通过系统标定实验确定。因此，在获得清晰参考像后，需要将基片向物镜方向移动距离，才能实现曝光光源的精确聚焦。

为验证调焦精度，建议进行预曝光实验：选择典型测试图形，在最佳焦平面附近进行步长进行阶梯曝光，通过对比不同位置的图形质量，确定最优曝光焦面。这种方法可将调焦误差控制在 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内，确保光刻图形的质量。

（4）水洗

本研究选用的光敏树脂具有水溶性特性，这使得后处理工艺更加环保和便捷。显影过程采用去离子水作为清洗溶剂，将曝光后的基片浸入清洗槽中，通过物理冲刷和溶解作用去除未固化树脂。

（5）干燥

清洗后的光刻结构表面残留的水渍会带来双重负面影响。首先，水渍形成的液膜会散射入射光，降低光学显微镜的成像对比度，影响结构表征；更重要的是，水分子在微纳结构表面的长时间滞留会导致毛细力效应，这种效应可能引发结构变形甚至局部塌陷，形成深度可达数百纳米的表面缺陷。为避免上述问题，本研究采用温和干燥方案：使用乳胶气吹球的局部精细处理。

4.3.2 氧阻聚效应改善

光敏树脂在光固化过程中的自由基聚合反应易受氧阻聚效应的影响。该效应的物理化学机制可概括为：光引发剂淬灭：分子氧（ O_2 ）与光引发剂激发态发生能量转移，导致引发效率降低；自由基捕获：氧气与活性自由基反应生成过氧自由基；链终止反应：过氧自由基通过双基终止或氢转移反应终止链增长；这些反应导致固化层表面形成粘性未固化层。为克服氧阻聚效应，本研究采用浸没式曝光工艺，如图 4-11(c)所示。该方法具有双重优势：通过精确控制曝光

剂量，避免“过曝光”导致的过度交联和“欠曝光”引起的固化不完全；在树脂表面形成液体隔离层，将氧气浓度降低至 0.1% 以下，使氧阻聚效应减弱 80% 以上。

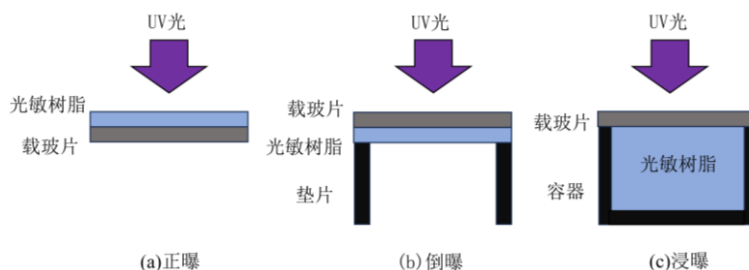


图 4-11 浸曝原理图

4.3.3 动态模糊匹配子像素重叠技术实验验证

基于以上工艺流程，将曝光材料放置在三维移动平台上。光源和平台在计算机上同步控制。打开光源后，平台开始同步移动，向上和向左移动半个像素的距离（本 DMD 的微镜大小为 $7.56\mu\text{m}$ ，投影物镜为 4 倍，因此实际一个像素的距离约为 $1.89\mu\text{m}$ ，半个像素的距离约为 $0.9\mu\text{m}$ ），一旦它到达所需位置，它就会重置为零。重置过程包括向右和向下半个像素，然后重复整个过程。当光强设置为 $8.11\text{ mw}/\text{cm}^2$ 时，整个过程大约需要 5-6 秒，可以根据光源的强度进行适当调整。曝光完成后，平台停止移动，处理曝光的基板，并将其放在显微镜下观察其边缘，然后将其与未优化的曝光图像进行比较，如图 4-12 所示。

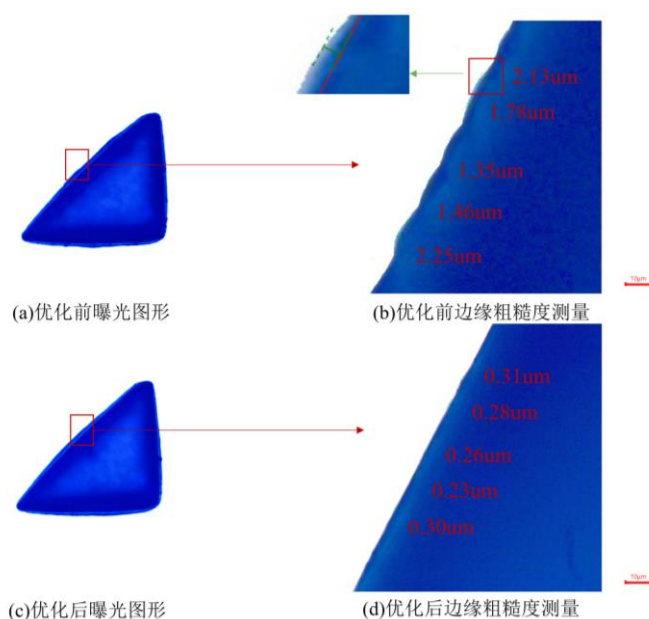


图 4-12 动态模糊匹配子像素重叠技术光刻实验图

在三角形边缘的最低点，绘制一条平行于斜边的直线，并选择这条线上的 5 个点来测量边缘的平滑度。5 个未优化点的平均值为 $1.79\mu\text{m}$ ，优化后的平均值为 $0.28\mu\text{m}$ ，明显低于未优化点的边缘平滑度。理论上，当子像素叠加位移一般像素距离时，边缘平滑度的粗糙度应该减少一半。然而，在实际实验中，边缘平滑度粗糙度很难提升一半。然而，基于动态模糊匹配子像素重叠的 DMD 数字光刻技术，对曝光图像的边缘粗糙度优化结果明显小于普通曝光图像边缘粗糙度的一半，实验结果与上述仿真结果高度吻合，也证明了所提方法的有效性和可行性。

4.4 本章小结

本章介绍了动态模糊匹配子像素重叠技术，首先，通过分析了子像素重叠理论和动态模糊效应核函数，绘制动态模糊匹配子像素重叠技术的原理图并预测该技术的效果，通过 Python 仿真成像验证了预测的正确性；其次，详细介绍了数字光刻的工艺步骤，通过实验和理论双重验证选择浸曝作为本文的曝光技术；最后，通过三维纳米移动平台与光源的同步控制，进行基于动态模糊效应匹配子像素重叠光刻实验，优化前后的曝光结果边缘粗糙度由 $1.79\mu\text{m}$ 提升为 $0.28\mu\text{m}$ ，验证了基于动态模糊效应匹配子像素重叠的优化效果。

第5章 基于曲率模糊动态曝光技术的数字光刻优化研究

由于复杂微纳结构需求的提高，动态模糊匹配子像素重叠技术难以对复杂图形进行优化处理，且通过 Python 仿真与光刻实验发现，单纯的动态模糊效应匹配子像素重叠优化方法会导致图形产生动态模糊膨胀效应，整个曝光图形会变大，且相同时间内，位移距离越大，此影响越严重。为解决以上问题，本文提出曲率模糊动态曝光技术。

5.1 曲率模糊动态曝光技术理论研究

5.1.1 动态模糊膨胀效应原理

从上文动态模糊效应图片便可看出，动态模糊效应的曝光能量图边缘有多出的部分，这是由于动态模糊膨胀效应。动态模糊效应产生膨胀效应的原理主要与物体在曝光时间内的运动有关。当物体在图像传感器前移动时，由于曝光时间内物体的位置不断变化，其成像会形成一条连续的轨迹，导致物体边缘模糊并向外扩展，从而在视觉上产生膨胀的效果。这种效应在物体运动位移距离较大时尤为明显（见图 5-1），因为轨迹的延长和边缘的模糊会使得物体看起来比实际尺寸更大。膨胀效应的具体表现还受到运动方向的影响，例如线性运动会使物体在运动方向上拉长，而旋转运动则会使边缘形成弧形模糊。这种现象在摄影、光刻和计算机视觉等领域中具有重要意义，需要在设计和分析中加以考虑，以避免对图像质量或测量精度造成不利影响。

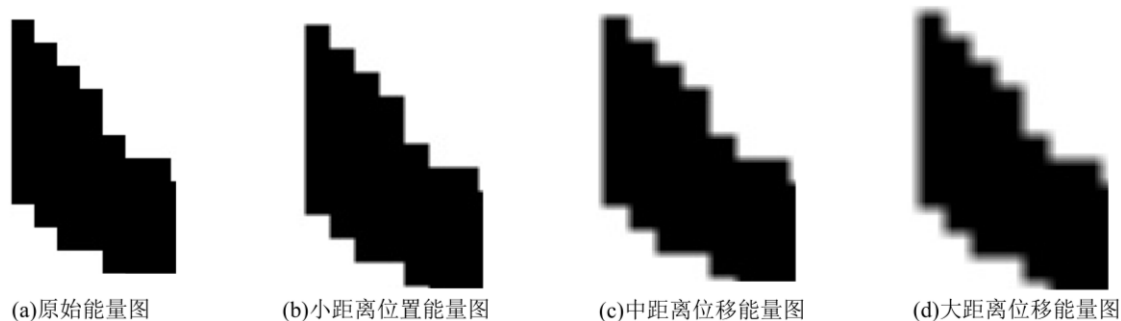


图 5-1 动态模糊膨胀效应示意图

5.1.2 曲率模糊动态曝光技术原理

由于动态模糊效应匹配子像素重叠技术难以对复杂图形进行优化，且动态模糊膨胀效应使曝光图形整体尺寸放大，因此本文提出曲率模糊动态曝光技术。曲率模糊动态曝光技术的基础原理为多子图曝光（原理如图 5-2 所示，将六边形均分为六块，每次曝光一块子图，完成六个步骤后即可得到完整的曝光光刻图形），将复杂图形分割为多个简单子图，进行重叠补偿计算（若有弯曲边缘将通过计算公式拟合成直线），如图 5-3 所示。此时，对动态模糊膨胀效应进行计算，利用 Python 图形处理代码对各子图边缘进行像素消除，得到预处理后的子图，各子图采用动态模糊匹配子像素重叠技术依次曝光后，即可得到完整的边缘优化后的曝光图形，且线宽可以得到精确的调控。

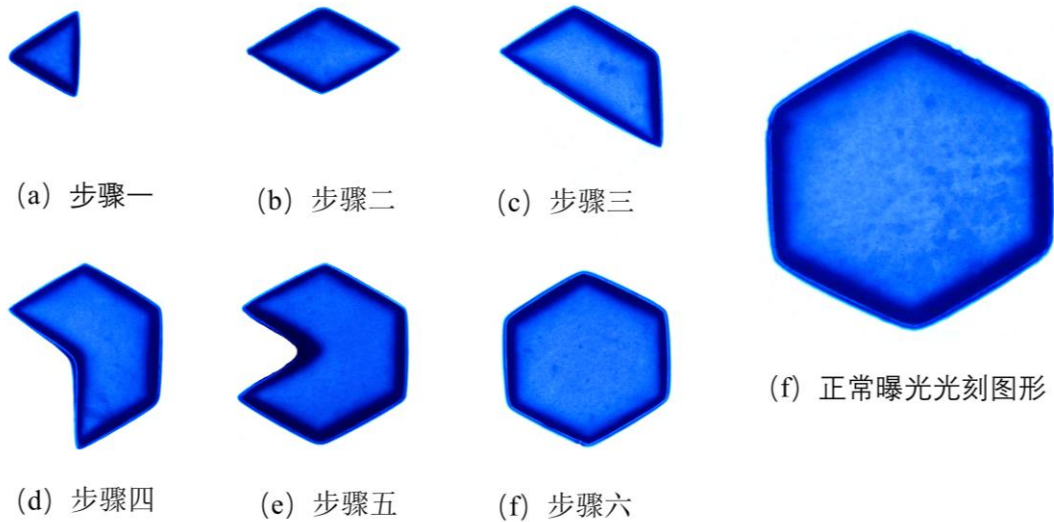


图 5-2 多子图曝光原理示意图

基于所述子图像的拟合斜率 a 来设计三维纳米移动平台的移动路径，在对角线循环运动中，沿 y 轴移动的距离、沿 x 轴移动的距离与斜率的关系如下：

$$\frac{L_y}{L_x} = a \quad (5-1)$$

当 a 大于 1 或小于 -1 时， x 轴上的位移距离为半个像素，且 $L_y = L_x a$ 。当 a 大于 -1 且小于 1 时， y 轴上的位移距离为半个像素，且 $L_x = \frac{L_y}{a}$ ，当 a 等于 1 或

者-1 时, x 轴、 y 轴位移距离均为 $1/2$ 像素距离, 如上章等腰三角形优化方法所示。

如图 5-3 所示, 当拟合直线斜率为 $-1/2$ 时, 图像 (b) 为曝光开始时位移平台与 DMD 像素的相对位置。在曝光过程中, 位移平台沿对角线移动, 到达图 (c) 所示的相对位置, 然后沿对角线移回原点, 如图 (b) 所示。这个过程是重复的; 曝光后, 它会返回到初始位置, 如图 (d) 所示。

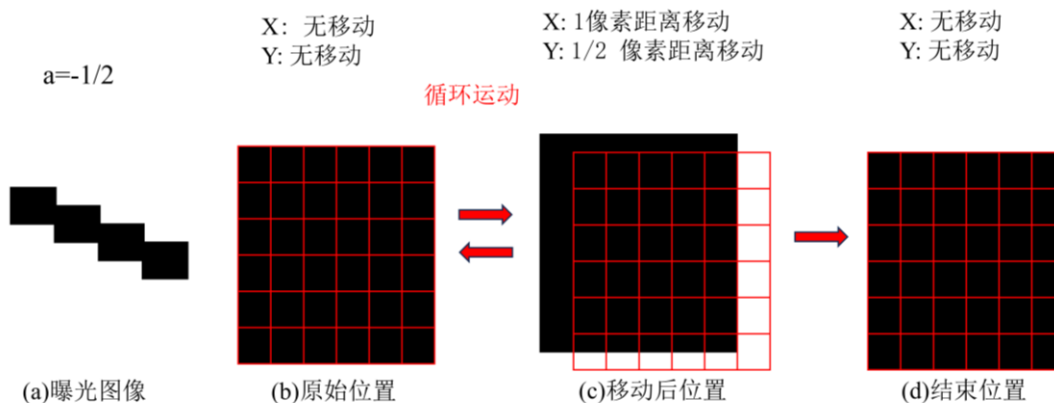


图 5-3 位移路径示意图

5.2 基于曲率模糊动态曝光技术的复杂图形处理

5.2.1 最小二乘法曲率拟合子图

为优化复杂图形边缘锯齿, 首先对其进行分割, 把复杂曲率图形转换为多个较简单直线图形进行动态模糊效应匹配子像素重叠曝光。本文选取爱心圆环作为曝光图像, 通过最小二乘法 Python 算法对图形进行分割, 得到如图 5-4 所示的子图像。

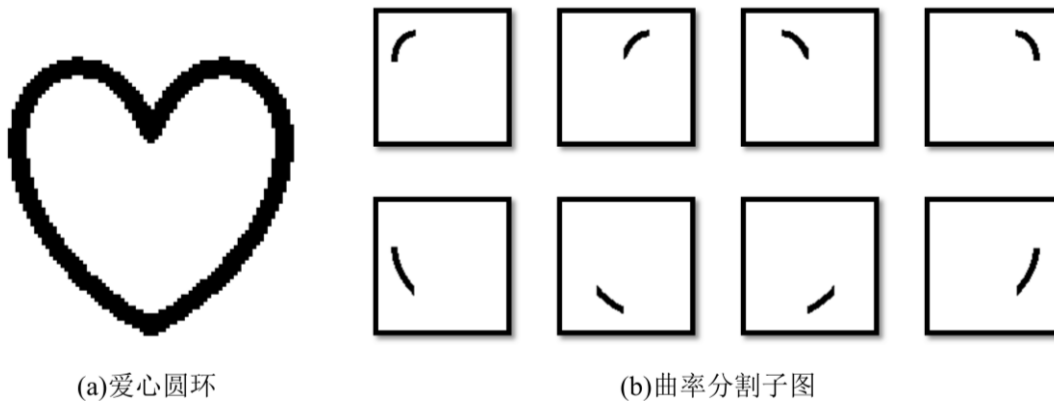


图 5-4 曲率分割示意图

通过最小二乘法对各弯曲子图进行拟合，得到拟合直线的斜率，最小二乘法公式为：

$$\sum_{i=1}^N [y_i - (a + bx_i)]^2 \quad (5-2)$$

对上式 a 和 b 求偏导，得：

$$\hat{a} = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (5-3)$$

$$\hat{b} = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (5-4)$$

参数 a 和 b 的最优值通过求解，得：

$$\hat{a} = \frac{(\sum x_i^2)(\sum y_i) - (\sum x_i)(\sum x_i y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (5-5)$$

$$\hat{b} = \frac{N(\sum x_i y_i) - (\sum x_i)(\sum y_i)}{N(\sum x_i^2) - (\sum x_i)^2} \quad (5-6)$$

最小二乘法需注意相关系数 r ，定义为：

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5-7)$$

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}, \bar{y} = \frac{\sum y_i}{n} \quad (5-8)$$

r 表示两个变量之间的函数关系与线性度之间的一致性程度 $r \in [-1, 1]$ 。对于 $|r| \rightarrow 1$ ， x 和 y 之间的线性关系很好。对于 $|r| \rightarrow 0$ ， x 和 y 之间没有线性关系，因此拟合没有意义

5.2.2 子图像预处理

尽管动态模糊效应可以通过匹配子像素重叠来优化图案的边缘，但动态模糊效应会使实际曝光图案的边缘变大，从而导致实际曝光的图案略大于未优化的图案。为解决这一影响，基于上述动态模糊效应核函数，建立以下数学模型。

K 表示的 `kernel_size` 表示模糊核的大小，通常是一个边长为 K 的方阵。 L 表示运动模糊的长度，即运动方向上的模糊程度。图像分辨率 R 表示图像中的像素数。

$$k_1 = \frac{K}{L} \quad (5-9)$$

其中 k_1 是模糊内核的大小与模糊长度的比率。此比率反映了模糊内核的大小与模糊长度的影响。比率越大，模糊内核越大，模糊效果越明显。

内核对图像的影响如下所示：

$$m = \frac{K}{R} \quad (5-10)$$

其中， m 表示 `kernel` 对 `image` 的比例，即 `kernel` 对 `image` 的影响范围。

实际图像大小的动态模糊效应、实际像素大小的扩展以及模糊内核大小、模糊长度和图像分辨率之间的关系如下：

$$z = k_1 m \quad (5-11)$$

11)

$$I = zR \quad (5-12)$$

z 表示模糊效果的局部膨胀程度，即模糊内核大小与模糊长度乘以图像中模糊内核范围的比率。 z 值越大，模糊效果局部膨胀越大。

实际曝光中产生的局部效应可以表示为：

$$r = \frac{vT}{f} \quad (5-13)$$

$$A = rf \quad (5-14)$$

其中， r 表示图像放大的比率。 A 表示图像放大的量。 v 表示三维纳米移动平台的速度。 T 表示曝光时间， f 表示对象的焦距。

通过上述数学建模，根据各子图的位移路径计算动态模糊效应的影响，使用 Python 图形边缘像素消减代码，处理由动态模糊效应而扩展膨胀的部分，原理如图 5-5 所示，将图形边缘像素消除以达到补偿动态模糊膨胀效应的效果。

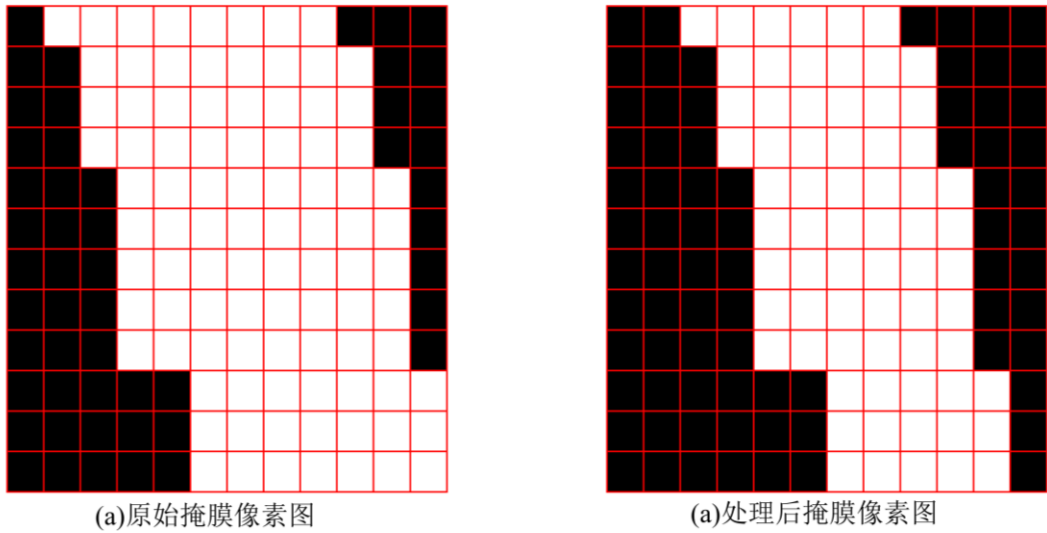


图 5-5 像素消除原理示意图

以三角环为曝光图像，通过观察曝光结果内圈的大小，可以清楚地看到模糊动态曝光的局部扩展效果和预处理对这种负面影响的消除效果。图 5-6(a) 显示了预处理的曝光图像，内圈的两个直角边分别为 $61.2\mu\text{m}$ 和 $60.7\mu\text{m}$ 。图 5-6(b) 显示了未经预处理的曝光图像，内圈的两个直角边分别为 $57.5\mu\text{m}$ 和 $57.0\mu\text{m}$ 。图 5-6(c) 是增大移动距离后的曝光图像，内圈的两个直角边分别为 $53.0\mu\text{m}$ 和 $52.1\mu\text{m}$ 。实验结果表明，曲率动态模糊对图案边缘影响明显，且相同时间内，位移距离越大，局部扩展越严重，经过预处理的图形线宽精度基本符合实验需求。

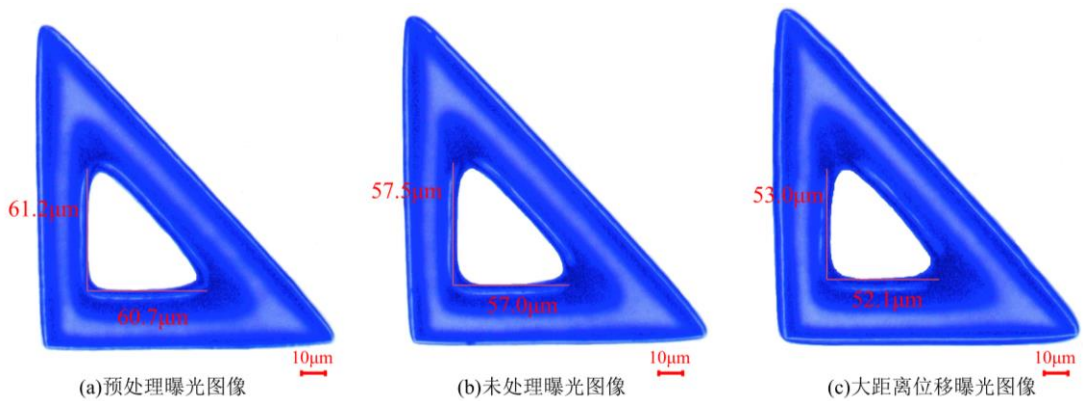


图 5-6 预处理前后光刻图形动态模糊膨胀效应对比

5.3 曲率模糊动态曝光技术实验测试

5.3.1 曲率模糊动态曝光技术仿真实验

将预处理后的子图导入动态模糊效应 Python 代码，得到动态模糊效应能量图，再导入 Python 图形重叠代码（此过程可见第 4 章，与动态模糊匹配子像素重叠技术一致）。最后，将各重叠后的子图重新拼接到一起，获得曲率模糊动态曝光技术的仿真掩模能量图，如图 5-7 所示。



图 5-7 预处理前后能量图对比

将优化前后的掩模图图像导入到 Python 模拟成像代码中，进行二进制处理得到曝光结果对比图，如图 5-78 所示。

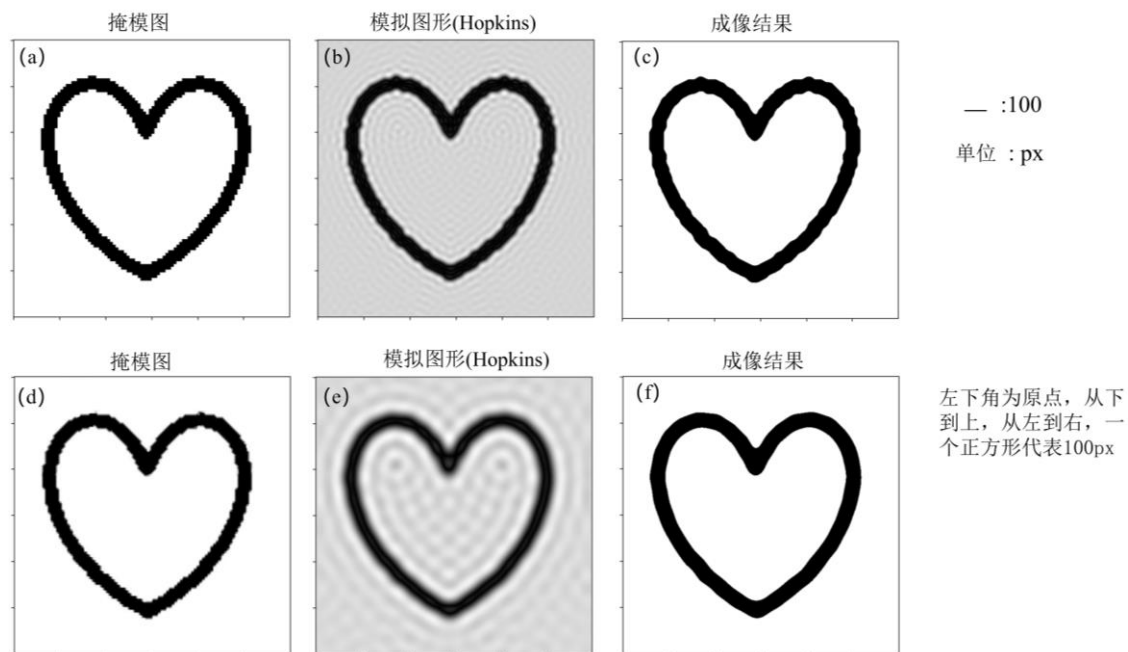


图 5-8 曲率模糊动态曝光技术仿真对比

通过仿真实验结果，可以观察到曲率模糊动态曝光技术对复杂图形曝光的边缘具有极好的优化效果。将成像结果等比放大单独提取以测量线宽，优化前的曝光结果中选择了 97px、98px、174px 三种线宽（px 代表像素，1px 代表一个像素），对应的 98px、98px、174px 三种线宽来自优化的曝光结果，如图 5-9 所示。三个位置的线宽只有 1px 的偏差，说明曲率模糊动态曝光技术不仅在匹配子像素动态模糊效果的同时优化了边缘，也大大消除了它对曝光图形线宽的负面影响。

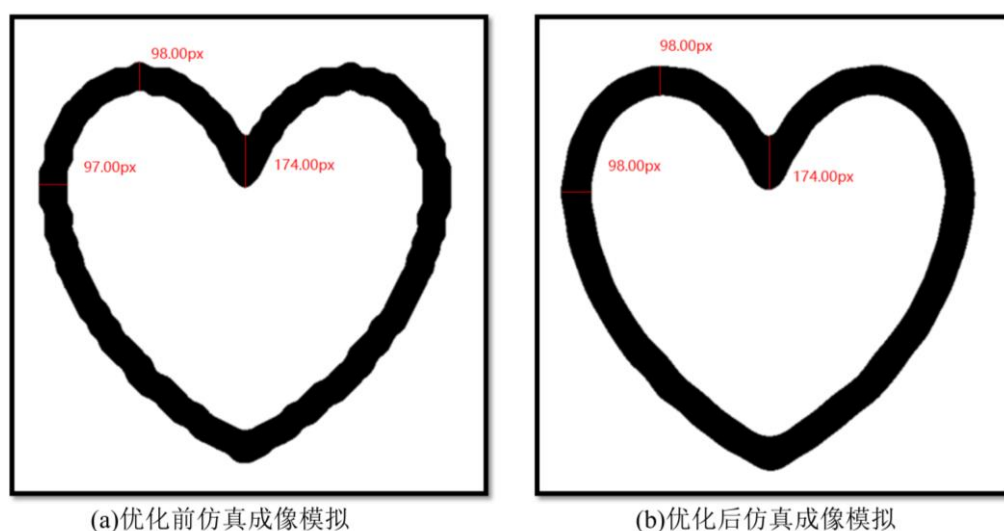


图 5-9 曲率模糊动态曝光技术仿真测量

5.3.2 曲率模糊动态曝光技术光刻实验

基于第 4 章所述光刻工艺，通过浸泡法将光敏树脂和基板放置在移动平台上。将预处理后的子图掩模图分别导入 DMD 控制器，将计算得的各子图位移路径分别导入三维纳米移动平台，子图与其位移路径数据序列一致。当光源被打开时，光束照射在光敏树脂上，平台根据导入的数据开始移动，子图依次曝光。当光照强度为 $8.11\text{mW}/\text{cm}^2$ 时，子图的曝光时间约为 6-7 秒。在各子图曝光完成后，DMD 控制器和三维移动纳米平台短暂暂停，以便在下一个子图和位移数据加载准备就绪时继续该过程。各子图全部曝光后，形成原始合成图，在显微镜下观察其边缘，优化前后实验对比如图 5-10 所示。

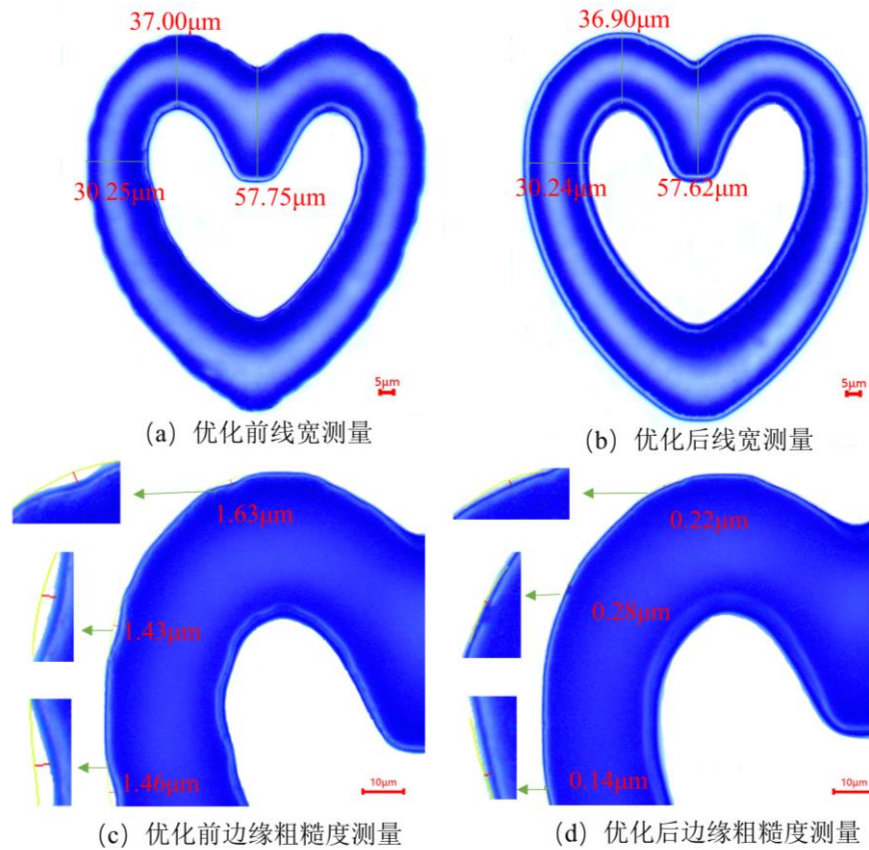


图 5-10 曲率模糊动态曝光技术光刻实验测试

为了评估这项技术优化的影响，在实验中选择了三个不同的图像曝光点来测量线宽。未经优化的爱心圆环线宽测量值记录为 57.75 μm 、37.00 μm 和 30.25 μm 。优化后的爱心圆环相同点的线宽分别为 57.62 μm 、36.90 μm 和 30.24 μm ，线宽误差率仅为 $\pm 0.27\%$ ，证明了曲率模糊动态曝光技术的精确性。此外，为了量化锯齿状缺陷，再次选择了三个测量位置。在优化之前，锯齿状缺陷非常明显，分别为 1.63 μm 、1.43 μm 和 1.46 μm ，平均为 1.5 μm 。在经过曲率模糊动态曝光技术优化后，这些数字显著减少到 0.22 μm 、0.28 μm 和 0.14 μm ，平均缺陷尺寸仅为 0.21 μm 。

通过对图像和数据的比较分析，验证了所提出的曲率模糊动态曝光技术不仅有效地缓解了复杂图形中的边缘缺陷，而且显著减少了动态模糊对线宽精度的影响，这一进步证明了该技术能够提高光刻工艺的保真度和质量。对比现有复杂图形边缘优化技术，在达到上述数据的优化效果前提下，曲率模糊动态曝光技术仅需 8 张子图，而时空协同技术需要上百张子图，DMDs 调控技术需要 7 个 DMD 芯片。由此，可以看出曲率模糊动态曝光技术的优越性。

5.4 本章小结

本章首先说明了动态模糊效应匹配子像素重叠技术的弊端，介绍了动态模糊膨胀原理后，提出了曲率模糊动态曝光技术，并介绍了多子图曝光技术的原理。然后详细介绍了最小二乘法子图曲率分割及子图边缘像素消除预处理的过程。最后进行了 Python 模拟曝光成像仿真以及 DMD 数字光刻系统实验，选取复杂图形爱心圆环的边缘锯齿由 $1.5\mu\text{m}$ 降至 $0.21\mu\text{m}$ ，线宽误差率也降低至 $\pm 0.27\%$ ，验证了曲率模糊动态曝光技术对复杂图形边缘锯齿优化的有效性，及对线宽精度控制的准确性。同时，对比现有的先进技术，体现曲率模糊动态曝光技术高效率，低成本，高性能的优越性。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

在数字光刻系统中，光刻效率、成本和分辨率之间的平衡是至关重要的。本文深入剖析了摆动光刻技术、时空协同调制技术、DMDs 调制技术提升分辨率的具体方式，同时探讨了这些技术在提高分辨率过程中产生的新问题。

针对 DMD 数字光刻边缘锯齿难以消除的问题，本研究提出了一种基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻技术。该技术的核心优势在于，无需更换高倍率投影物镜就能增强横向分辨率。不更换物镜不仅保障了单次曝光的面积，使光刻效率不会降低，还在一定程度上有效平衡了光刻效率、成本和分辨率之间的关系。此外，在曝光复杂图形时，这项技术也具备明显的优势。

本文主要完成了以下工作：

(1) 通过国内外现状研究，分析了有掩模光刻技术和无掩模光刻技术，尤其是基于 DMD 的数字无掩模光刻技术的研究背景和发展现状。针对数字光刻系统中边缘锯齿优化问题，提出了一种基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻优化方法。

(2) 根据传统的 DMD 数字光刻系统，设计了基于动态模糊效应的 DMD 数字光刻系统，对系统内关键的光学元件的功能及原理进行研究和选型，重点对数字光刻系统进行二次开发和调试，为后续实验奠定了基础。

(3) 分析了相干成像理论、非相干成像理论和部分相干成像理论，重点研究了 Abbe 成像算法和 Hopkins 成像算法，通过对比，选取 Hopkins 成像算法作为本文曝光成像仿真算法，并进行实验对比验证。

(4) 验证动态模糊效应匹配子像素重叠技术的有效性，首先建立动态模糊效应核函数，通过 Python 仿真对优化前后的掩模进行曝光，对比曝光结果，理论上验证了本方法的可行性；其次，研究曝光工艺，通过 DMD 数字光刻系统进行光刻实验，通过优化前后实验结果对比，图像边缘平滑度由平均值 $1.79\mu\text{m}$ 提升至 $0.28\mu\text{m}$ ，表明了该技术的有效性。

(5) 由于动态模糊匹配子像素重叠技术的局限性, 本文提出曲率模糊动态曝光技术。首先对动态模糊膨胀效应, 多子图曝光原理及曲率模糊动态曝光技术原理进行分析。完成复杂图形处理, 包括, 曲率分割子图, 子图形边缘像素消除预处理, 并通过 Hopkins 光刻仿真实验和数字光刻实验, 验证了曲率模糊动态曝光技术的可行性。通过数字光刻实验对比可得, 图像边缘平滑度由平均值 $1.5\mu\text{m}$ 提升至 $0.27\mu\text{m}$, 线宽误差率也降低至 $\pm 0.27\%$, 表明了该技术的有效性 & 准确性。

本文创新点如下:

(1) 针对 DMD 数字光刻图形边缘锯齿化难以消除问题, 提出一种动态模糊匹配子像素重叠数字光刻技术。以子像素重叠技术为基础, 增加了动态模糊效应补偿双重优化光刻图形的边缘锯齿。并通过仿真与数字光刻实验对比验证, 结果显示该技术对光刻图形边缘锯齿具有显著的优化效果, 具有成本低, 效率高等优势。

(2) 针对复杂图形线宽难以调控的问题, 提出一种曲率模糊动态曝光技术。基于多子图曝光技术, 通过曲率分割技术及子图像边缘像素消除预处理对复杂图形进行处理。然后对所得处理后的子图依次进行动态模糊匹配子像素重叠技术曝光, 得到完整优化后曝光图形。最后通过仿真和数字光刻实验验证, 结果显示该技术在低成本和高效率的前提下, 能够有效的优化复杂不规则图形的边缘锯齿且能够精准调控线宽。

6.2 展望

本文虽然验证了曲率模糊动态曝光技术对复杂图形边缘平滑度的提升, 以及线宽的准确控制, 但是在实验和总结的过程中, 发现还是有很多问题需要深入研究。

(1) 本文动态模糊效应位移路径计算方法是基于理论上的最优路线, 实际实验中, 最优效果为位移路径距离略低于理论计算距离。后续, 将通过系统实验研究精细位移距离与优化效果之间的关系, 寻求实际最优位移距离。

(2) 本文虽提出位移速度对动态模糊效应的影响,但是并未具体研究。后续,通过实验研究确定精细位移速度对动态模糊效应及优化效果之间的关系,寻求最优且可控的最优位移速度。

(3) 本文位移路径规划方法是参考现有文献所得,后续可以升级 Python 算法,将任意图形导入算法,算法模拟各种位移路径曝光所得曝光结果,并判断最优位移路径,最终通过实验来验证。

(4) 本文 DMD 数字光刻系统单次曝光面积较小,因此曝光图形较小,后续可以二次开发三维纳米移动平台来同步 DMD 控制器功能,如通过扫描式曝光来实现更大面积曝光图形。

参考文献

- [1] Du B, Zhang H, et al. Super-resolution imaging with direct laser writing-printed microstructures[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2020, 124(35): 7211-7216.
- [2] Kim J B, Jeong K H. Batch fabrication of functional optical elements on a fiber facet using DMD based maskless lithography[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16854-16859.
- [3] Choi J, Kim G, Lee W S, et al. Method for improving the speed and pattern quality of a DMD maskless lithography system using a pulse exposure method[J]. Optics Express, 2022, 30(13): 22487-22500.
- [4] Dinh D H, Chien H L, Lee Y C. Maskless lithography based on digital micromirror device (DMD) and double sided microlens and spatial filter array[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 407-415.
- [5] Lee J, Lee H, Yang J. A rasterization method for generating exposure pattern images with optical maskless lithography[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32: 2209-2218.
- [6] Guo X, Chen J T, Zhao Y Y, et al. Optical proximity correction of hot-spot patterns with subwavelength size in DMD maskless projection lithography[J]. Optics Letters, 2024, 49(4): 810-813.
- [7] Martins L, Kulyk B, Theodosiou A, et al. Laser-induced graphene from commercial polyimide coated optical fibers for sensor development[J]. Optics & Laser Technology, 2023, 160: 109047.
- [8] Wang T W, Dong X Z, et al. Consistent pattern printing of the gap structure in femtosecond laser DMD projection lithography[J]. Optics Express, 2022, 30(20): 36791-36801.
- [9] Rao C H, Singh A P, Kothuru A, et al. Fineline circuits realization with liquid photoresist and DMD-based photolithographic technique for space electronics applications[J]. Journal of Micro/Nanopatterning, Materials, and Metrology, 2022, 21(1): 011003-011003.
- [10] Li J, Wu C, Chu P K, et al. 3D printing of hydrogels: Rational design strategies and emerging biomedical applications[J]. Materials Science and Engineering: R: Reports, 2020, 140: 100543.
- [11] Zhang Y, Li D, Liu Y, et al. 3D-bioprinted anisotropic bicellular living hydrogels boost osteochondral regeneration via reconstruction of cartilage–bone interface[J]. The Innovation,

- 2024, 5(1).
- [12] Wei H, Wu Z, Wei Y, et al. 3D printed Fabry-Perot acoustic probe with a glass horn tube[J]. Optics & Laser Technology, 2024, 168: 109977.
- [13] Chien H L, Lee Y C. Three dimensional maskless ultraviolet exposure system based on digital light processing[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2020, 21(5): 937-945.
- [14] Kim K, Han S, Yoon J, et al. Lithographic resolution enhancement of a maskless lithography system based on a wobulation technique for flow lithography[J]. Applied Physics Letters, 2016, 109(23).
- [15] Li Q K, Liu H, et al. Analysis and correction of the distortion error in a DMD based scanning lithography system[J]. Optics Communications, 2019, 434: 1-6.
- [16] Kang M, Han C, Jeon H. Submicrometer-scale pattern generation via maskless digital photolithography[J]. Optica, 2020, 7(12): 1788-1795.
- [17] 陈宝钦. 光刻技术六十年[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(9): 0922031.
- [18] 李立文. 光学光刻设备发展和展望[J]. 电子测试, 2016 (5): 125-125.
- [19] Harriott L R. Limits of lithography[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(3): 366-374.
- [20] 李艳秋. 光刻机的演变及今后发展趋势[J]. 微细加工技术, 2003 (2): 1-5.
- [21] Tallents G, Wagenaar E, Pert G. Lithography at EUV wavelengths[J]. Nature photonics, 2010, 4(12): 809-811.
- [22] 窦银萍. 6.7 nm 输出波长 Gd 靶激光等离子体极紫外光源的研究[D]. 长春理工大学, 2015.
- [23] 韦晓茹. 激光直写系统的软硬件设计[D]. 苏州大学, 2003.
- [24] Pimpin A, Srituravanich W. Review on micro-and nanolithography techniques and their applications[J]. Engineering journal, 2012, 16(1): 37-56.
- [25] Matsumoto H, Nomura H, Kimura H, et al. Current performance and future plans on electron multi-beam mask writers toward high-NA EUV era[C]//Novel Patterning Technologies 2023. SPIE, 2023, 12497: 47-55.
- [26] Niewczas M. IC Masks-The Challenges of the Newest Technologies[C]//2022 29th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and System (MIXDES). IEEE, 2022: 11-14.
- [27] Zhou J, Zhang D, Liu Y, et al. Record-breaking frequency of 44 GHz based on the higher order

- p mode of surface acoustic waves with LiNbO
- ₃
- /SiO
- ₂
- /SiC heterostructures[J]. Engineering, 2023, 20: 112-119.
- [28] Yang H, He P, Ou K, et al. Angular momentum holography via a minimalist metasurface for optical nested encryption[J]. Light: Science & Applications, 2023, 12(1): 79.
- [29] Jiang T, Song X, Mu X, et al. Macrophage-compatible magnetic achiral nanorobots fabricated by electron beam lithography[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 13080.
- [30] Li Z, Chen Y, Zhu X, et al. Fabrication of single-crystal silicon nanotubes with sub-10 nm walls using cryogenic inductively coupled plasma reactive ion etching[J]. Nanotechnology, 2016, 27(36): 365302.
- [31] Yang W, Liu Q, Wang H, et al. Observation of optical gyromagnetic properties in a magneto-plasmonic metamaterial[J]. Nature communications, 2022, 13(1): 1719.
- [32] 赵珉, 刘桂英, 陈宝钦, 等. 电子束零宽度线曝光及其应用[J]. 微纳电子技术, 2013, 50(2): 106-111.
- [33] 罗晓斌, 于肇贤. 电子束曝光中低能电子散射的模拟[J]. 微纳电子技术, 2009, 46(1): 55-59.
- [34] Liu Q, Zhao J, Guo J, et al. Sub-5 nm lithography with single GeV heavy ions using inorganic resist[J]. Nano Letters, 2021, 21(6): 2390-2396.
- [35] Yang J K W, Berggren K K. Using high-contrast salty development of hydrogen silsesquioxane for sub-10-nm half-pitch lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2007, 25(6): 2025-2029.
- [36] Yang J K W, Cord B, Duan H, et al. Understanding of hydrogen silsesquioxane electron resist for sub-5-nm-half-pitch lithography[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2009, 27(6): 2622-2627.
- [37] Chen Y, Yang H, Cui Z. Effects of develop conditions on the contrast and sensitivity of hydrogen silsesquioxane[J]. Microelectronic Engineering, 2006, 83(4-9): 1119-1123.
- [38] 赵珉, 朱齐媛, 陈宝钦, 等. 新型抗蚀剂的电子束曝光性能研究[J]. 半导体技术, 2013, 38(6): 458-463.
- [39] Strobel S, Harry K J, Duan H, et al. Electrochemical development of hydrogen silsesquioxane by applying an electrical potential[J]. Nanotechnology, 2011, 22(37): 375301.

- [40] Duan H, Manfrinato V R, Yang J K W, et al. Metrology for electron-beam lithography and resist contrast at the sub-10 nm scale[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2010, 28(6): C6H11-C6H17.
- [41] 仲健魁, 黄元申, 倪争技, 等. 全息离子束摆动刻蚀凸面闪耀光栅制备技术[J]. *光学仪器*, 2021, 43(3): 86-94.
- [42] Aoyagi Y, Namba S. Blazed ion-etched holographic gratings[J]. *Optica Acta: International Journal of Optics*, 1976, 23(9): 701-707.
- [43] 杨媛丽, 王永祯, 王爱玲. 光固化快速成型中光敏树脂固化机理研究[J]. *材料开发与应用*, 2006(06): 8-10.
- [44] 徐向东, 王占山, 洪义麟, 等. 全息离子束刻蚀衍射光栅[J]. *物理*, 2004, 33(05): 0-0.
- [45] de A. Mello B, da Costa I F, Lima C R A, et al. Developed profile of holographically exposed photoresist gratings[J]. *Applied optics*, 1995, 34(4): 597-603.
- [46] 汪海宾, 刘全, 吴建宏. Ar⁺ 离子束刻蚀制作凸面闪耀光栅[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(4): 405002--1.
- [47] 沈中, 葛之江, 张连台. 航天超光谱成像仪原理分析[J]. *航天返回与遥感*, 2002, 23(2): 28-34.
- [48] 沈中, 葛之江, 张连台. 航天超光谱成像技术原理及其发展现状[J]. *航天器工程*, 2001, 10(4): 45-52.
- [49] 刘全, 吴建宏, 郭培亮, 等. 高衍射效率凸面闪耀光栅的研制[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(3): 0313001.
- [50] Mahajan S, Abdelsalam M, Suguwara Y, et al. Tuning plasmons on nano-structured substrates for NIR-SERS[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2007, 9(1): 104-109.
- [51] Zhang P, Yang S, Wang L, et al. Large-scale uniform Au nanodisk arrays fabricated via x-ray interference lithography for reproducible and sensitive SERS substrate[J]. *Nanotechnology*, 2014, 25(24): 245301.
- [52] Chirumamilla M, Das G, Toma A, et al. Optimization and characterization of Au cuboid nanostructures as a SERS device for sensing applications[J]. *Microelectronic engineering*, 2012, 97: 189-192.
- [53] Xie C, Sun S X, Jia E S. Fabrication of micro-helix structures via two-photon polymerization based on dynamic multifocus holograms[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(24): 2402402.

- [54] Xiong Z, Liu H, Chen R, et al. Illumination uniformity improvement in digital micromirror device based scanning photolithography system[J]. Optics Express, 2018, 26(14): 18597-18607.
- [55] He X, Ma Y C, Li J, et al. Method and application of femtosecond laser processing on non-flat surfaces[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(17): 1714009.
- [56] Balli F, Sultan M, Lami S K, et al. A hybrid achromatic metalens[J]. Nature communications, 2020, 11(1): 3892.
- [57] Wei S, Cao G, Lin H, et al. A varifocal graphene metalens for broadband zoom imaging covering the entire visible region[J]. ACS nano, 2021, 15(3): 4769-4776.
- [58] Ma Z C, Hu X Y, Zhang Y L, et al. Smart compound eyes enable tunable imaging[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(38): 1903340.
- [59] Li L F, Zhang L R, Xu L Q, et al. Research progress on femtosecond laser fabrication of nonlinear photonic crystals[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(8): 0802401.
- [60] Dinh D H, Chien H L, Lee Y C. Maskless lithography based on digital micromirror device (DMD) and double sided microlens and spatial filter array[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 113: 407-415.
- [61] 姜旭,杨絮,刘红,等.基于运动补偿的 DMD 无掩模光刻拼接误差校正[J].光电工程, 2020, 47(6):6.
- [62] 吴晨枫.基于 DMD 无掩模光刻系统中的关键技术研究[D].西安电子科技大学,2018.
- [63] Xu J, Xu Y, Hong L, et al. DMD maskless lithography stitching error correction based on motion compensation[J]. Opto-Electronic Engineering, 2020, 47(6): 190387-1-190387-6.
- [64] Qin L. Study on characteristics of LCoS phase modulator applied in near infrared wavelength[D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [65] Xie X W. Research of phase retrieval problem based on digital micro-mirror device[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [66] Goorden S A, Bertolotti J, Mosk A P. Superpixel-based spatial amplitude and phase modulation using a digital micromirror device[J]. Optics express, 2014, 22(15): 17999-18009.
- [67] 张志敏.曲面 3D 微结构数字掩模光成型关键技术研究[D]. 南京航空航天大学,2016.
- [68] Chen R, Liu H, Zhang H, et al. Edge smoothness enhancement in DMD scanning lithography system based on a wobulation technique[J]. Optics express, 2017, 25(18): 21958-21968.

- [69] Guo S, Lu Z, et al. Lithographic pattern quality enhancement of DMD lithography with spatiotemporal modulated technology. *Optics Letters* 46.6 (2021): 1377-1380.
- [70] Zhang J, Luo N, Chen D. Edge smoothness enhancement of digital lithography based on the DMDs collaborative modulation[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2024, 34(7): 075011.
- [71] Dudley D, Duncan W M, Slaughter J. Emerging digital micromirror device (DMD) applications[C]//MOEMS display and imaging systems. SPIE, 2003, 4985: 14-25.
- [72] Saggese S, Thomas T. DVimage spatial light modulator: a new real-time interface for the Texas Instruments Discovery 3000 DMD chipset[J]. *Projection Displays XII*, 2007, 6489: 56-65.
- [73] 陈荣环. 基于 DMD 的扫描光刻系统图案生成质量优化方案的研究[D]. 东北师范大学, 2018.
- [74] 袁志军. 基于 DMD 的高速高精度空间光调制系统[D]. 上海交通大学, 2018.
- [75] 梁力文. 无掩模光刻的部分相干照明与成像研究[D]. 广东工业大学, 2018.
- [76] 丁翔宇. 基于数字微镜芯片的无模光刻微加工技术研究[D]. 中国科学技术大学, 2014.
- [77] Cobb N B. Fast optical and process proximity correction algorithms for integrated circuit manufacturing[M]. University of California, Berkeley, 1998.

攻读学位期间取得的学术成果

一. 论文发表情况

- [1] Edge smoothing optimization method in DMD digital lithography system based on dynamic blur matching pixel overlap technique[J]. Optics Express, 2024, 32(2): 2114-2123. (中科院二区 TOP) 导师第 1, 本人第 2
- [2] Method for Improving Pattern Quality of DMD Lithography System Using Curvature Blur Dynamic Exposure Technique. Optics & Laser technology, 2025. 187(9): 112839. (中科院二区 TOP) 导师第 1, 本人第 2
- [3] An Efficient Surface Smoothing Method for Microstructures Based on Vibration-assisted Digital Grayscale Lithography [J]. Journal of Laser Micro/Nanoengineering, 2024, 19(2): 1-5. (中科院四区) 导师第 1, 本人第 2

二. 专利申请情况

- [1] 一种基于三维移动曝光提高光刻分辨率的系统及方法。CN202311165016.3 (发明专利实审)
- [2] 一种基于曲率动态模糊曝光技术提高 DMD 数字光刻平滑度的方法。CN202510140462.1 (实申)

三. 主持或参与项目情况

- [1] 安徽省质量工程项目, 2024xscx100。 (主持)
- [2] 安徽省自然科学基金项目, 2308085MF210。 (主要参与人)
- [3] 安徽省高校重大项目, 2022AH040138。 (主要参与人)
- [4] 安徽省高校自然科学研究重大项目, JNFX2023015。 (主要参与人)

四. 获奖情况

- [1] 2025 届安徽省优秀毕业生
- [2] 安徽工程大学学术之星

致谢

行文至此，意味着我的硕士求学生涯即将画上句点。回首这段充满挑战与成长的旅程，心中唯有感恩。在此，我谨以最诚挚的笔墨，向所有给予我支持与帮助的人表达最深切的谢意。

首先，我要衷心感谢我的导师黄胜洲教授。感谢您在我科研道路上的悉心指导与无私付出。从论文选题、实验设计到成果凝练，您始终以渊博的学识、严谨的治学态度和敏锐的学术洞察力为我指明方向。您不仅教会我如何做研究，更以豁达的胸怀和谦和的为人让我明白“治学先修身”的道理。能师从黄老师，是我求学路上最大的幸运。

感谢谢芳琳师姐和蒋铖玮师兄在科研和生活上的指引与帮助，你们的经验分享让我少走了许多弯路；感谢同门唐远卓、田照伟的并肩作战，那些共同实验、激烈讨论学术问题的日子将成为最珍贵的回忆；感谢潘佳妮师妹和吴东杰，邵永康，何思文师弟的协助与支持，你们的活力和热情为实验室增添了无限生机。

特别感谢我的父母和家人，你们是最坚实的后盾。二十余载求学路，是你们无条件的支持与包容，让我在挫折时重拾勇气，在迷茫时找到方向。感谢我的女朋友张玉萍，你的理解、陪伴与鼓励，是我在科研低谷时最温暖的慰藉，未来之路，愿与你携手同行。

感谢好友张红松、方钊、王城的真诚相伴，难忘我们互相倾诉、把酒言欢的青春时光；感谢室友朱祖浩、孙开亮的包容与关照，让异乡求学的日子充满家的温馨。

最后，谨以此文献给所有在逆境中依然坚持理想的人。学术之路道阻且长，但每一份善意都如同星光，照亮前行的方向。未来我将怀着这份感恩继续探索，不负所托，不负热爱。

尚德敏学 唯实惟新

