

数字光刻及其制作微光学元件的模拟研究

光学专业

研究生 段茜

指导教师 杜惊雷

近年来，以微光学、微电子、微机械为基础的 MEMS 和 MOEMS 技术迅猛发展，推动了微细加工技术的不断改进和提高，已在航空航天、光纤通信、光互联、光计算等高科技诸多领域展现出十分广阔的应用前景，将对整个信息化时代产生深远的影响，给传统光学、传统工业以及人们的生活带来根本性的变化。

微光学在设计理论和制作方法等方面也取得了长足的发展，为了进一步扩大微光学的应用领域，对其制作方法也提出了更多更高的要求。因此，研究方便有效的微光学元件制作新方法仍是目前国内外微光学领域研究的一个重要方向。本论文基于 DMD 和 MEMS 技术相结合的数字投影成像装置，提出可快速、并行、灵活地制作微光学元件的 DMD 实时灰度光刻新方法，并对这种数字光刻技术的成像理论、数字图形快速、精确优化的算法，以及数据传输等方面的问题做深入探讨和研究。建立适用于描述数字灰度光刻过程的全新、实用的部分相干理论模型，并基于该模型和优化设计基片曝光剂量分布的波前工程思想，提出合理调控扫描速度、扫描行间距、数字图形幅数、灰度结构和图形排列间距的系列数字图形设计方法，对实验工作的展开具有指导意义。

DMD 数字光刻技术具有不受限于任意三维面形结构，不需要常规掩模，不存在对位误差，并可对掩模图形实时修改和不需要昂贵设备以及制作周期短等优点，为产生任意三维连续微结构提供了一条有效的新途径，对发展微光学、MOEMS 有重要意义。

关键词：数字光刻技术，实时掩模，DMD，优化设计，微光学元件

Method and Simulation of Micro Optical Elements

Fabricated by Digital Lithography Technology

Major Optics

Postgraduate Xi Duan **Supervisor** Jinglei Du

In recent years, Micro-Machine System (MEMS) and Micro-optical-Machine System (MOEMS) technology based on micro-optics, microelectronic and micro-mechanical device rapidly develop, which drive the increasing improvement of micro-machining technique. It shows wide application prospect in a good many high-tech field of aerospace, optical fiber communication, optical interconnect, optical calculation and so on. It produces profound influence to the whole information age, and brings ultimate change of traditional optics, traditional industry and people living.

Micro-optics has acquired quite great progress in design theory and manufacturing method. For further extending application field of micro-optics, the manufacturing method of micro-optics is advised more new requests. Therefore, studying convenient and effective manufacturing new method of micro-optics is a important direction of domestic and overseas micro-optics field now. This paper presents new method of DMD real-time gray lithography of quickly, parallelly, neatly fabricate micro-optics, and profoundly discusses the imaging theory of digital lithography technology, quick and optimizing algorithm of digital image, and data transfer and so on. We build a fire-new, applied partially coherent model describing digital gray lithography process, and present serial digital image designing method of properly modulating scanning-velocity, row space, digital image numbers, gray configuration and image alignment space based on the model and the thought of wavefront project of optimizing substract exposure dose distribution. It supplies basis for micro-optical element fabrication and deeply development of digital lithography technology.

Through the development of this technique, the conventional photolithography is greatly simplified as a single DMD digital mask can replace a set of conventional masks. Alignment between different levels of masks in conventional photolithography is no longer necessary if the DMD digital mask is used. Because the mask design can be adjusted in real time, it is comparatively easy to change the

mask design to compensate any nonlinear effects in aerial imaging, in photo resist exposure, development and substrate etching process. Thus it gives a new and effective approach for the fabrication of the arbitrarily shaped microstructure with 3-D continuous relief, and has very important significance to the development of micro optics and MOEMS.

Keywords: digital lithography technology, real-time mask, DMD, optimizing design, micro-optical elements

第一章 引言

§ 1.1 微光学的形成及发展状况

微型化和智能化是近代工业和科技的主要发展方向。利用微细加工技术,二十世纪 70 年代发展了微电子学,使电路技术实现了微型化。但功能器件,如传感器、驱动器、执行器、调节器等仍是常规结构,尺寸上十分不配。到了 80 年代,出现了微机械及微电器,在硅平面上可做出杠杆,齿轮,微阀,微泵,微电机,微驱动源,微执行器等。这促使光学器件也向微型化发展。因此,在 80 年代中期以后出现了微光学。微光学(Micro Optics)作为现代光学的新兴分支,是光学与微电子学相互渗透、交叉而形成的前沿学科^[1],是研究微米、纳米级尺寸的光学元器件的设计、制作工艺及利用这类元器件实现光波的发射、传输、变换及接收的理论和技术的新技术。随着微光学的发展,人们不仅可以在硅芯片上制作出与衬底平行的微光学元件,更可以制作出与衬底垂直的三维光学微器件,例如各种折射、反射、衍射、全息、变折射率器件、波导器件,开始实现微光学平台(MOT)。几乎在所有的工程应用领域中,无论是现代国防科学技术领域,还是普通的工业领域,例如光纤通讯、信息处理、航空航天、生物医学、激光-机械加工和光计算技术,微光学元件都显示出越来越重要的应用价值和广阔的应用前景。

微光学平台与微机电系统(MEMS)结合最终出现了微光机电系统(MOEMS)^[2,3],开始实现工业科学上的两大追求——微型化和智能化。微光机电系统中的微光学元件在微电子和微机械装置的作用下能够对光束进行汇聚、衍射、反射等控制,从而可最终实现光开关、衰减、扫描和成像等功能^[4-7]。微光机电系统的出现极大地促进信息通讯、航天技术以及精密光学仪器的发展,对整个信息化时代将产生深远的影响,给传统光学、传统工业以及人们的生活带来根本性的变化。

§ 1.2 微光学元件的制作方法

微光学元件按照光传播原理可简单地分为两大类：衍射光学元件（Diffractive Optical Elements, DOEs）和折射性光学元件（Refractive Optical Element, ROEs）；若根据表面形成的浮雕结构，则可以分为多台阶和连续面型两种类型。随着微光学的不断深入发展，对具有良好面形和高衍射效率的微光学元件的需求与日俱增，微光学元件的制作方法是近年来国内外微光学领域研究的一个重要方向。

微光学元件的制作方法归纳起来有两种：机械加工方法和光学加工方法。机械加工方法主要有：光纤拉制（Drawing of Fiber Lenses）、超精度研磨（Ultraprecision Grinding）、注模（Moulding）、金刚石车削（Diamond Turning）等。机械加工方法工艺过程简单，但是难于实现阵列型器件和大规模廉价复制，而且不易制作非旋转对称微光学元件，如柱面透镜、任意不规则面型微光学元件。光学加工方法就是光刻（Photolithography），可实现制作多台阶或连续面形微光学元件，主要方法有二元图形多次套刻方法^[8]、直写法^[9, 10, 11]、移动掩模法^[12]、热熔法^[13, 14]、灰阶掩模法^[15, 16]。另外还包括梯度折射率方法、离子交换法、熔融表面张力法、全息法、LIGA 法等^[17]，这些方法虽不是很常用，但各有特点，分别适用于不同性能要求的元件。光学加工方法虽然工艺相对复杂、对环境要求较高，但能实现任意不规则面型微光学元件，且可以大规模复制。下面我们分别介绍光学光刻的几种主要方法。

1.2.1 二元套刻方法

二元套刻方法^[8]是利用超大规模集成电路（VLSI）处理技术的灵活性和精确性及计算机辅助设计（CAD）工具，在电解质基板，金属基板或者半导体基板上制作衍射微光学元件^[18]的方法。其工艺流程一般包括三个步骤：掩模设计及制作，图形转印和基片刻蚀。对于多相位的二元光学元件，则需要多次重复上述三步工艺过程，进行掩模的套刻加工，用量化的台阶去逼近理想的轮廓。图

1-1 是采用光刻方法加工 8 台阶二元衍射微光学元件的加工工艺原理, 采用三块不同的掩模板, 通过三次甩胶、曝光、显影、刻蚀等工艺实现 95%衍射效率的微光学元件。

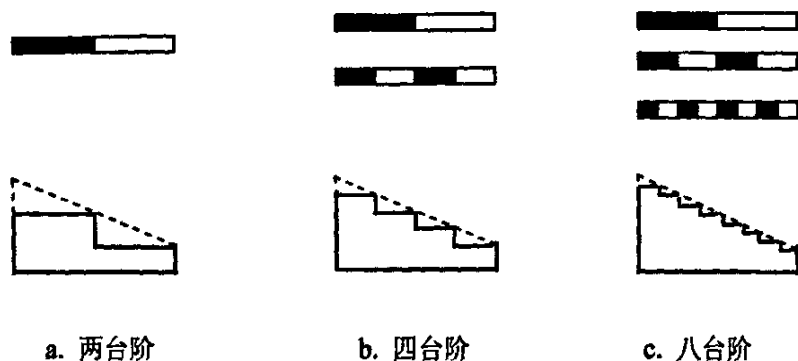


图 1-1 二元套刻方法制作 8 台阶衍射微光学元件原理

二元套刻方法虽然能实现各种复杂面形而得到广泛应用, 但受到光刻线宽分辨率的限制而不能制作较大数值孔径的微光学元件。且多次套刻, 所制作的浮雕结构由多台阶组成, 工艺流程复杂, 需要大型设备, 费用和时间成倍增加; 而且每套刻一次都会产生对准误差, 套刻次数愈多, 误差愈严重, 从而影响元件的最终质量。这种技术限制了微光学及微系统的发展。

1.2.2 直写法

直写法^[9, 10, 11]即通过直写装置控制光致抗蚀剂上不同位置的曝光光束能量, 显影后再经烘烤得到连续的微浮雕结构。直写的方法主要有两种: 激光直写^[19]和电子束直写^[20]。电子束直写方法制作精度较高, 适于加工最小线宽小于 $0.50\ \mu\text{m}$ 的元件; 激光直写方法多用于最小线宽大于 $0.50\ \mu\text{m}$ 的元件制作。

1.2.2.1 激光直写法

用激光直写法制作微光学元件时, 首先由元件表面的设计结构和抗蚀材料的显影特性计算确定表面各点所需的曝光剂量分布, 并将该数据存入计算机; 然后用激光对基片上抗蚀剂进行扫描式逐点曝光; 显影后得到与理想结构十分接近的台阶型或连续表面轮廓, 对其进一步刻蚀还可将抗蚀剂表面结构转移到

基片上。激光直写制作元件的具体工艺流程见图 1-2。

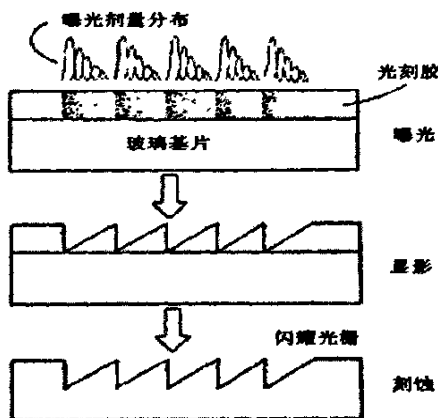


图 1-2 直写法制作微光学元件基本原理

激光直写法可一次写出多相位阶数或连续相位的微光学元件，避免了多次掩模套刻产生的对位误差。但不能精确控制轮廓深度，加工轮廓深度与曝光强度、扫描速度、抗蚀剂材料、显影液配方和温度状态以及显影时间等多种因素有关，任何一个因素的改变都会引起轮廓深度误差。

1.2.2.2 电子束直写法

电子束直写原理与激光束直写相同，基于电子束在抗蚀层表面曝光剂量与显影后抗蚀层高度的线性关系，将光学元件轮廓分布用曝光剂量的大小表示出来，再用该剂量的电子束对基片逐点曝光，显影后得到设计的连续表面轮廓。

电子束直写法存在的主要问题是：（1）轮廓深度难以控制和刻蚀图形变形。（2）由于电子束曝光量是靠每个格点的驻留时间来控制的，因此局部浮雕轮廓的深浅不仅与局部电子束曝光剂量有关，还与附近区域的曝光剂量有关，使抗蚀剂所得到实际曝光量与入射曝光量存在一定差距，显影后的实际轮廓也就和设计的轮廓存在差异。（3）曝光时间过长，元件制作费用较高。

1.2.3 移动掩模方法

移动掩模方法^[12]是一种通过移动掩模调制曝光量的连续面形微光学元件制作方法。其原理如图 1-3 所示,首先根据要求的面形设计掩模,再将掩模放在曝光系统的物面,并与平动台一起作连续的直线运动。光刻材料固定在投影曝光系统的像面,掩模图形以一定比例缩小投影在光刻材料上。当掩模静止时,光刻材料上是一个与掩模相同,尺寸缩小的投影像。掩模作连续平移或旋转运动,在光刻材料上就得到直线对称的或旋转对称的曝光分布。

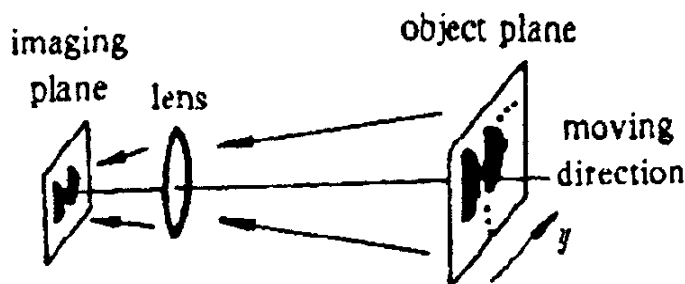


图 1-3 掩模移动曝光技术原理图^[12]

掩模移动法同直写法和灰度掩模法等方法相比,具有成本低廉,制作效率高,制作元件光学性能和阵列均匀性好等优点。但它只适合制作具有一定对称性的连续位相微光学元件。

1.2.4 热熔法

热熔法^[13,14]是采用抗蚀剂热熔成型的方法来制作微透镜阵列。首先进行基片清洗,再以合适的转速甩胶,从而形成厚度合适而且均匀的胶层。然后在具有适当孔径的圆形图案阵列的掩模遮蔽下进行紫外曝光,经过显影后在基底上就形成了相应的孤立的圆柱状胶体;再进行热处理,加热抗蚀剂至熔点以上某温度处,此时熔融的抗蚀剂借助表面张力的作用以及抗蚀剂层与基片的浸润程度,形成了以图案孔径为边界的光滑的球冠状凸起的平凸透镜。其工艺流程分为三步:(1)抗蚀剂基片在掩模的遮蔽下进行曝光;(2)对已曝光的抗蚀剂基片进行显影;(3)热熔成型。如图 1-4 所示。这些透镜可以就这样使用,或者做进一步处理:通过离子刻蚀,或通过譬如铸造、压模、注射成型等具体的复制技术,将光刻胶图形移至衬底材料上。

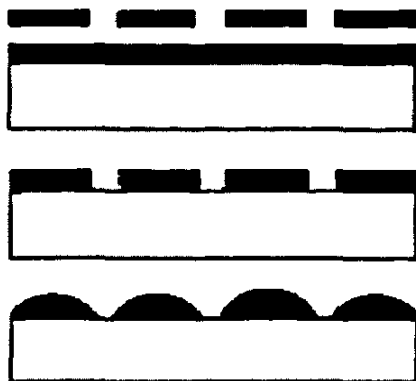


图 1-4 热蒸发法制作微透镜阵列工艺流程

热蒸发法具有工艺相对简单,对材料和设备要求不高,工艺参数稳定且易于控制,复制容易等优点,适于制作较大相对口径的微透镜。但填充因子小,且面形不容易控制和难于制作不规则面形,因此应用领域受到限制。

1.2.5 灰阶掩模方法

灰阶掩模法^[15,16]的原理是根据微光学元件所需面型,对掩模进行灰阶编码,形成相应的光强透过率分布函数,用灰阶掩模板来调制基片上不同的位置抗蚀剂的曝光量,根据抗蚀剂在曝光量不同的情况下经显影的抗蚀剂被溶解的厚度不同的特点,形成各种抗蚀剂浮雕图形,最后通过刻蚀,得到光学材料上的面形。见图 1-5 所示。从原理上讲,只要合理地编制灰阶掩模图形,就能够制作任意浮雕结构的微光学元件,该方法关键是正确地在掩模板上形成灰阶分布,即合理控制掩模板透过率的分布。灰阶掩模板可通过利用幻灯片精缩转印到黑白胶片中,或采用高能束敏感玻璃(High-energy-beam Sensitive Glass)等方法制作。图 1-6 为一制作菲涅耳透镜用的变灰阶掩模板,而图 1-7 即是利用该掩模板制作的菲涅耳透镜元件的剖面轮廓。

灰阶掩模方法具有设计灵活、能制作任意面形的微光学元件,但是多灰阶掩模制作困难,每增加一个灰阶就会大幅度地提高费用,灰阶数有限,而且光刻过程中图形传递的非线性难以控制,难于精确地控制面形。

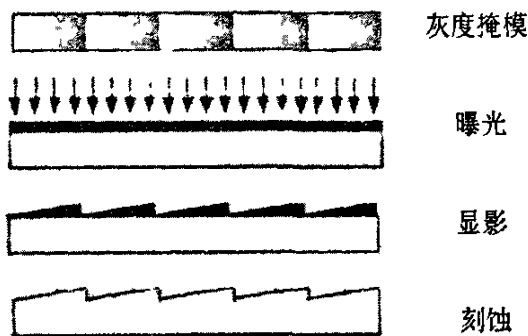


图 1-5 灰阶掩模法的制作原理

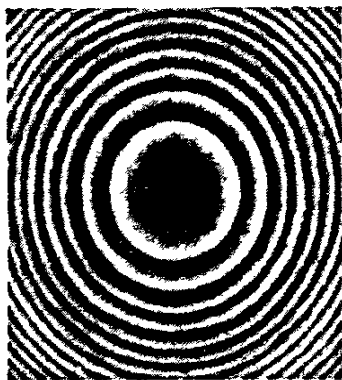


图 1-6 变灰阶菲涅耳透镜的掩模板

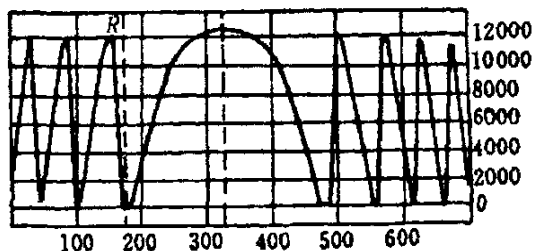


图 1-7 菲涅耳透镜剖面轮廓

1996 年, K. Reimer^[21]等人提出用半色调编码产生灰阶的掩模一次曝光制作微光学元件的方法受到人们的关注。1999 年, 有人提出了多自由度灰阶编码掩模法, 该方法发展了计算全息中的编码方法, 采用多自由度编码的新方法, 即在编码过程中增加单元开孔位置和形状这两个新的自由度, 增加了编码灵活性, 补偿成像过程及曝光显影过程中非线性因素引起的偏差, 实现了连续浮雕轮廓的微透镜阵列设计和制作^[22, 23, 24]。但现阶段这种方法也有不足之处: 首先由于脉冲宽度调制方法要求电子束直写的图形(可以是任意的多边形)比较复杂, 将增加制作时间; 其次, 图形编码的数据量较大, 需要运算速度较高、内存较大的计算机来完成; 再者, 受电子束直写分辨率的限制, 目前要直接制作面形细腻图形还有困难。

§ 1.3 数字灰度光刻技术

以上介绍的几种微光学元件的制作方法都各有其优缺点,可分别用于制作不同性能要求的元件。从工艺原理和制造工艺上看,现有的制作方法存在的主要问题要么制作工艺相对复杂,各工艺参数对最终像质的影响复杂,像质的可控性较差,要么得到任意的面形和折射率分布较为困难。设计机动性小,费用昂贵,设备复杂,制作周期长,工艺烦琐或技术稳定性差是这些制作方法的应用受到限制的主要原因。因此研究方便有效的微光学元件制作新技术仍然是目前光刻技术发展的一个重要方向和前沿。

美国德州仪器公司推出的可用于取代光刻掩模的数字光处理(DLP, Digital Light Processing)技术,使投影式无掩模光刻技术成为可能。一种DLP技术与实时波前工程技术相结合的全数字、自动化、高对准精度的光刻加工新概念——数字光刻术悄然诞生。与传统光刻技术有很大不同,所谓数字光刻过程是用计算机优化产生的一系列“虚拟”的数字图形控制投影曝光设备把图形一幅幅地投影到基片上,理论上甚至可通过分析光学检测系统反馈回来基片的光场分布的数字信息,实时优化调控下一时刻数字图形的结构,以获得最佳的光刻图形质量^[26]。目前这一技术在国际上尚处于探索研究阶段,适应光刻设备的需要的DLP中的关键技术DMD(Digital Micromirror Device)仍在发展完善中,但该技术具有全数字、低图形畸变、高对准精度,高效自动化、低成本(无需掩模加工、检测和修补)、使用方便灵活、应用的范围广等众多优点,与其它光刻技术相比,其潜在优势十分明显,为大规模,快速,灵活制作台阶或连续微光学元件开辟了一条新的道路。

§ 1.4 本论文的目的、意义和主要内容

本论文以发展微光学元件制作新方法为目标,结合投影光刻系统的并行性和可编程数字化器件DMD的灵活性,提出快速灵活制作微光学元件DMD实时灰度光刻新方法,对数字光刻成像理论、快速精确的数字图形优化算法以及数据传输等方面的问题做深入探讨和研究。

全文共分五章:

- 第一章 详细介绍几种微光学元件制作方法及其优缺点,说明本论文的研究目的和意义。
- 第二章 简要介绍了几种典型的空间光调制器,着重介绍了数字微反射镜装置(DMD)的结构、特性、工作原理和发展方向等,为基于DMD的数字掩模光刻成像系统的建立提供了理论基础。
- 第三章 将数字微反射镜装置(DMD)与投影光刻系统相结合,建立了快速部分相干成像系统模型,讨论了数字灰度光刻成像的原理和方法,并给出了DMD光刻成像的模拟结果。
- 第四章 在已建立DMD快速部分相干模型的基础上,讨论了DMD灰度光刻成像原理,给出了DMD制作微光学元件的模拟结果。为消除或减小图像光场分布不均匀性,研究了数字光刻扫描曝光方法,并分析了扫描速度、扫描行间距、DMD帧频对曝光质量及系统运行效率的影响结果。在兼顾成像质量与运行效率的基础上,提出选取合适的参数扫描曝光,为下一步实验工作的展开提供依据。最后,采用显影阈值法对曝光显影的非线性影响进行预校正,获得较为满意的结果。
- 第五章 对本文的工作进行总结,并提出一些展望。

参考文献:

1. H.P.赫尔齐克. *微光学元件、系统和应用*, 北京: 国防工业出版社, 2002.
2. Parriaux O M. Microoptical Technologies for Measurement, Sensors, and Microsystems. *SPIE*. 1997, 3099:33-57.
3. Feldman M R. Microoptics Integration and Assemblies. *SPIE*. 1998,3289:9-72.
4. D.J. Nagel M.E. Zaghloul. MEMS: micro technology, mega impact. *IEEE Circuits & Device*, 2001,17(2): 14-25.
5. 张兴, 跨世纪的新技术—微机电系统(MEMS). *电子科学导报*, 1999(4): 2-6.
6. L YLin, E L Goldstein, R W Tkach. Free2space micromachined optical switches with

- submillisecond switching time for large2scale optical crossconnects. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, 10(4): 525-527.
7. 杨忠山. 微细加工技术在生物医学中的应用. *中国医疗器械杂志*, 2002, 26(5): 347-351.
 8. 张羽, 杨坤涛等. 二元光学元件的制作技术与进展. *光学仪器*, 2005, 27(2): 80-85.
 9. Stefan Haselbeck, Horst Schrelber, Johannes Schwlder, et al. Microlenses fabrication by melting a photoresist on a base layer. *Opt.Eng.*, 1993, 32(6): 1322-1324.
 10. E.-B.Kley, B.Schnabel, U.D.Zeitner. E-Beam Lithography – an Efficient Toll for the Fabrication of Diffractive and Microoptical Elements. *SPIE*, 1997, 3008: 222-228.
 11. Michael T.Gale, Markus Rossi, Jorn Pedersen. Fabrication of ontinuous-relif micro-optical element by direct laser writing in photoresists. *Opt.Eng.*, 1994, 33(11): 3556-3566.
 12. Chen Bo, Guo Lurong, Tang Jiyue, Xu Ping, Zhou Mingbao. Novel method for parabolic grating. *SPIE*, 1996, 2687: 142-149.
 13. Z.D.Popovic, R.A.Sprague and G.A.Neville. Technique for monolithic fabrication of microlens arrays. *Appl.Opt.*, 1988, 27: 1281-1284.
 14. Stefan Haselbeck, Horst Schrelber, Johannes Schwlder, et al. Microlenses fabrication by melting a photoresist on a base layer. *Opt. Eng.*, 1993, 32(6): 1322-1324.
 15. Thomas J. Suleski and Donald C.O'Shea. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: I. Commercial slide imagers. *Appl.Opt.*, 1995, 34(32): 7507-7517.
 16. Donald C.O'shea and willie S.Rockward. Gray-scale masks for diffractive-optics fabrication: II. Spatially filtered halftone screens. *Appl.Opt.*, 1995, 34(32): 7518-7526.
 17. 金国藩, 严瑛白, 邬敏贤. 二元光学, 北京: 国防工业出版社, 1998. 317-318.
 18. Veldkamp, W. B., Swanson, G. J.. Developments in fabrication of binary optical elements. *SPIE*, 437, 54.
 19. Haruna M, Takahashi M, Wakahayashi K, et al. Laser beam lithographed micro-Fresnel lenses. *Applied Optics*, 1990, 29(34): 5120-5126.
 20. Lee S H. Diffractive and miniaturized optics. Bellingham, Washington USA: *SPIE optical engineering press*, 1993, 1-379.
 21. K.Reimer, W.Henke, H.J.Quenzer. One-level Gray-tone design mask data preparation and pattern transfer. *Microelectronic Engineering*, 1996, Vol.30: 559-562.

22. J. Su, Y. Guo, etc. A New Method to Design Half-tone Mask for the Fabrication of Continuous Micro Relief Structure. Proc. *SPIE*, 1999, Vol.3680.
23. Jun Yao, Jingqin Su, Jinglei Du, Yixiao Zhang, Fuhua Gao, Yongkang Guo and Zheng Cui. Coding Gray-tone Mask for Refractive Microlens Fabrication. *Microelectronic Engineering*, 2000,53:531-534.
24. Jun Yao, Jinglei Du, Yixiao Zhang, Fuhua Gao, Yongkang Guo. Fabrication of refractive microlens with coding gray-tone mask. *SPIE*, 1999, Vol.3749: 760-761.
25. Kin Foong ,Chan Zhiqiang. High-resolution maskless lithography. *Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems*, 2003, 2(4): 331-339 .

第二章 DMD 数字微镜装置及 DLP 技术

§ 2.1 引言

20 世纪 80 年代以后,随着高新技术的蓬勃兴起,人类进入了一个“信息爆炸时代”,对光学信息处理的大容量和并行性提出了更高的要求,原有的以串行输入/输出为基础的各种光调制器已经不能满足,能实时地或快速地二维输入、输出的传感器以及具有运算功能的二维器件便应运而生,这些器件即为空间光调制器^[1]。空间光调制器有时也被叫做光学调制器、光阀、光学动态滤波器等,它被广泛应用于电光转换、相干光与非相干光转化、图像增强、光学运算等各个方面,在光学信息处理领域具有重要地位^[2-5]。近年已经成功地应用到模式识别和机器人视觉的信息处理中,它不仅可用作强度和位相的输入和输出器件^[6,7],相位滤波器件^[8],还可用于相关识别^[9],自适应系统^[10,11]等,并有希望在未来的光计算机中作为接口器件。

本章简要介绍了几种典型的空间光调制器,着重介绍了数字微反射镜装置(DMD)的结构、特性、工作原理和发展方向等,为基于 DMD 的数字掩模光刻成像系统的建立提供了理论基础。

§ 2.2 空间光调制器(SLM)

空间光调制器是由英语 Spatial light Modulator 直译过来,常缩写成 SLM。空间光调制器可以形成随 x y 坐标变化的振幅(或强度)透过率 $A(x, y) = A_0 T(x, y)$, 或者形成随坐标变化的相位分布 $A(x, y) = A_0 T e^{i\theta(x, y)}$, 或者形成随坐标变化的不同的散射状态。顾名思义,它是一种对光波的空间分布进行调制的器件。空间光调制器能对光波的某种或某些特性(例如相位、振幅或强度、频率、偏振态等)的一维或二维分布进行空间和时间的变换或调制。也就是说,其输出光信号是随控制(电的或光的)信号变化的空间和时间的函数。

§ 2.2.1 空间光调制器的基本结构与分类^[12]

空间光调制器基本结构是由许多基本的独立单元组成的一维线阵或二维阵列，这些独立单元既可以是物理上分割的小单元，也可以是无物理边界的、连续的整体，只是由于器件材料的分辨率和输入图像或信号的空间分辨率有限，而形成的一个一个的小单元。每个单元都可以独立地接受光信号或电信号的控制，并按此信号改变自身的光学性质（透过率、反射率、折射率等），从而对通过它的光波进行调制或变换；习惯上，把这些小独立单元称为空间光调制器的“像素”；控制这些像素光电信号称为“写入光”或“写入电信号”，把照明整个器件并被调制的光波称为“读出光”；经过空间光调制器后的输出光波称为“输出光”。

显然，读出光应该能照明空间光调制器的所有像素，并能接收写入光或写入电信号传递给它的信息，经调制或变换转换成输出光。按读出光工作方式分，可有透射式或反射式。而写入光或写入电信号应含有控制调制器各像素的信息，并把这些信息分别传送到调制器相应的各像素位置上的过程称为“寻址”（或“编址”）。当读出光通过调制器时，其光学参量（振幅、强度、相位或偏振态）就受到空间光调制器各单元的调制，结果变成了一束具有新的光学参量空间分布的输出光。如果采用写入光实现这一过程，称为光寻址；采用写入电信号时，称为电寻址。

光寻址通常采用一个二维光强分布的图像作为写入光，通过一个光学系统成像在空间光调制器的像素平面上，并使写入光的像素与空间光调制器的像素一一对应，从而实现寻址。光寻址时，所有像素的寻址同时完成，所以它是一种并行寻址。其特点是寻址速度快，且像素大小原则上只受写入光成像光学系统分辨率的限制。采用电寻址时，因为电信号是一个时间序列，原则上只能依次地输送到调制器的各个像素上去，所以电寻址是一种串行寻址方式。电寻址与光寻址相比有一些弱点，由于串行方式，使它的信息处理速度降低；由于电极几何尺寸和透过率的限制，其分辨率和填充系数（像素的有效通光面积与像素的总面积之比）都有所降低。但电寻址方式将光学信息处理与现代电子技术、特别是计算机—多媒体技术相结合，构成光电混合系统的有效方式，因此应用非常广泛。

目前，国际上报道的已实用化的空间光调制器不下 40 余种，其工作原理和

结构不同, 特性也不尽相同。

§ 2.2.2 空间光调制器的基本性能参数^[12]

对空间光调制器而言, 功能不同, 其具体技术性能参数也不同, 不可能要求每个性能参数都最佳。现就它们的主要技术性能参数介绍如下:

1. 输入—输出特性曲线

空间光调制器的透过率或输出光强随写入信号的变化曲线称为输入—输出特性曲线, 简称特性曲线或响应曲线。如图 2-1 所示, 纵坐标为透过率(或反射率)或输出光的(相对)强度; 横坐标为写入信号的大小, 对光寻址空间光调制器, 其单位用光能密度单位(J/m^2); 对电寻址空间光调制器, 其单位用信号电压单位(V)。

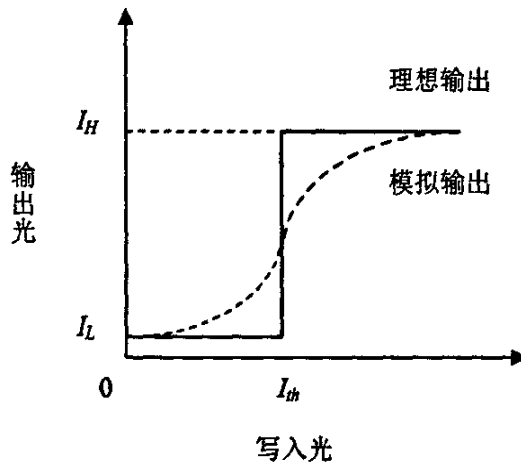


图 2-1 理想的阈值特性

2. 灵敏度

不同类型的空间光调制器, 其灵敏度的含义也不同。大致可有三种定义: 阈值灵敏度、指定值灵敏度和特性曲线斜率。阈值灵敏度是指透过率(或反射率)产生刚可察觉的变化所需要的最小写入信号大小; 指定值灵敏度是指透过率(或反射率)的变化达到某一特定值所需写入信号的大小; 特性曲线斜率是透过率(或反射率)的改变量与输入信号改变量之比, 即透过率(或反射率)对输入信号的微商, 它表示透过率(或反射率)随输入信号变化的灵敏度, 通

常指特性曲线上直线段（线性部分）的斜率。

3. 对比度

对比度又称反差。对于振幅或强度调制器，对比度可定义为最大输出与最小输出之比

$$\gamma = \langle I_{\max} \rangle / \langle I_{\min} \rangle \quad (2-1)$$

式中， $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别是在空间均匀的写入信号下的最大和最小光强（或透过率）， $\langle \rangle$ 表示对空间求平均。这是由于器件材料和功能的非均匀性造成每个像素的输出特性并非完全一致。

4. 灰阶数

对空间光调制器而言，在其动态范围之内，可以分辨的灰阶数目是有限的，该灰阶值数目称为灰阶数。灰阶数为 2 的器件称为二元的，其余统称为多灰阶的。

5. 分辨率

空间光调制器的分辨率是指通过器件后输出光所能分辨的最大空间频率。对光寻址空间光调制器，单位为每毫米线对数 (lp/mm)；对电寻址空间光调制器，通常用单位长度上的像素数作为分辨率，单位是 pixel/mm 或 1/mm。一般认为两个像素构成一个线对。

6. 空间一带宽积 (SBP)

对于分辨率在各个方向上相同的器件，若分辨率以 pixel/mm 为单位，空间一带宽积等于分辨率平方与工作面积的乘积。对电寻址空间光调制器，空间一带宽积恰好等于像素数目。

7. 单幅信息容量

单幅信息容量是指，当空间光调制器的所有像素都受到写入信号的调制并保持稳定时，输出光所能携带的最大信息容量。它等于灰阶数的以 2 为底的对数与空间一带宽积的乘积，单位为比特 (bit)：

$$C = SBP \cdot \log_2 N \quad (2-2)$$

式中，C 为单幅信息容量，SBP 为空间一带宽积，N 为灰阶数。

8. 响应速度

响应速度或响应时间,是指写入信号作用到器件上并得到相应的输出光所需时间。对空间光调制器来说,可以用与电脉冲相同的前(后)沿时间或写入时间来描述其响应速度。

9. 帧频

帧频是指空间光调制器在单位时间里所能处理的图像帧数,单位为帧/秒(frame/s)。从某种意义上说,它反映了空间光调制器处理信息的速度。

10. 信息流量

信息流量(throughout)等于单幅信息容量与帧频的乘积。它是空间、时间特性的一个综合指标,单位为 bit/s。

11. 存储(记忆)时间

空间光调制器对读出光的调制作用,在写入光被撤除之后并不会立即消失,而是要继续保持一段时间,这段时间称为存储时间。对用于信息存储的器件,存储时间越长越好;对于用于变换和运算等功能的器件,存储时间则越短越好,以利于提高信息处理速度。

以上参数分别描述空间光调制器各个不同方面的性能。其中,1—4项描述了空间光调制器的输入特性,5—7项描述了空间光调制器的空间特性,8—11项描述了空间光调制器的时间特性。

下面,我们选择一些典型的空間光调制器,对它们的工作原理、结构及特性一一简要介绍。

§ 2.3 液晶光阀^[13]

液晶是一种有机化合物,一般由棒状柱形对称的分子构成,具有很强的电偶极矩和容易极化的化学团。对这种物质施加外场(电、热、磁等),液晶分子的排列方向和液晶分子的流动位置就会发生变化,即能改变液晶的物理状态。如对液晶施加电场,它的光学性质就发生变化,这就是液晶的电光效应。

比较典型的液晶空间光调制器是硫化镉(CdS)向列相液晶光阀,它是利用液晶混合场效应制成的一种光寻址空间光调制器,用硫化镉(CdS)作为光电导层而得名。其结构示意图如图 2-2 所示。

这种液晶光阀的主要功能是实现图像的非相干/相干转换。其工作过程是,

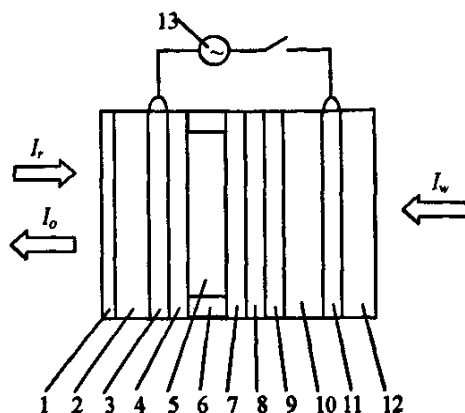


图 2-2 硫化镉液晶光阀示意图^[13]: 1.介质膜; 2, 12.平板玻璃; 3, 11.透明电极; 4., 7.液晶分子取向膜层; 5.液晶; 6.隔圈; 8.多层介质膜反射镜; 9.隔光层; 10.光导层; 13.电源

将待转换的一非相干图像通过一光学系统（作为写入光 I_w ）从器件右侧成像到光导层上，同时有一束线偏振相干光（作为读出光 I_r ）从器件左侧射向液晶层，其偏振方向与液晶层左端的分子长轴方向一致，由于高反射膜的作用，这束光将两次通过液晶层，最后从左方出射，通过一个偏振轴方向与 I_r 偏振方向相垂直的检偏器，得到输光 I_o 。

§ 2.4 泡克尔斯读出光调制器 (PROM)

泡克尔斯读出光调制器^[12] (Pockels Readout Optical Modulator, 简称 PROM) 是一种利用电光效应制成的光学编址型空间光调制器。其性能比较好，目前已得到实际的应用。

为了满足实时处理的要求，陆续出现了多种结构原理的器件，有的是把光敏薄膜与铁电晶体结合起来；有的则利用本身具有光敏性能的光致导电晶体制成。其中硅酸铋 (BSO) 晶体材料制成的空间光调制器得到了较快的发展，BSO 不但具有光电导效应，而且还具有线性电光效应。它的半波电压比较低，对 $\lambda=400\sim450\text{nm}$ 的蓝光较灵敏（光子能量较大），而对 600nm 的红光（光子能量较小）的光电导效应很微弱。由于光敏特性随波长的剧烈变化，材料对蓝光敏感，对红光不敏感，所以可用蓝光作为写入光，用红光作为读出光，从而可减少读出光和写入光之间的互相干扰。

BSO-PROM 空间光调制器可作成透射式也可作成反射式, 在 BSO 晶体的两侧涂 $3\mu\text{m}$ 厚的绝缘层, 最外层镀上透明电极就成为透射式器件。如果在写入一侧镀上双色反射层用以反射红光而透射蓝光, 就构成反射式的器件。图 2-3 为反射式 PROM 的结构示意图, 反射式结构不但能降低半波电压, 而且消除了晶体本身旋光性的影响。

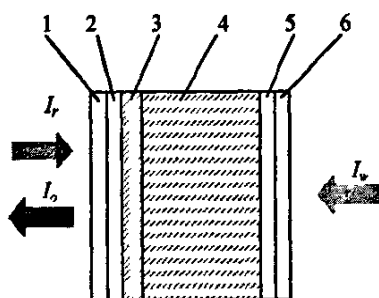


图 2-3 反射式硅酸铋空间光调制器结构示意图^[12]

1, 6 透明电极; 2, 5 绝缘层; 3 双色反射层;
4 硅酸铋晶体

PROM 的工作过程概括起来说就是, 首先在外电场的帮助下建立 BSO 的内电场, 实现 BSO 的擦除与激发^[12]。然后, 通过短波长光的光电导效应, 把空间光强分布转换成空间电压(电场)分布, 实现图像的写入。最后, 通过长波长的线性电光效应把空间电压分布恢复成光强(振幅或相位)分布, 实现图像的输出。其典型的性能参数^[12]如下: 灵敏度为 $5\text{--}600\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 的写入光通量; 对比度 >500 , 最大可达 10^4 ; 分辨率为 $100\text{lp}/\text{mm}$; 有效工作面积约 4cm^2 , 最大 $35\times 35\text{mm}^2$; 工作波长: 写入光 $400\text{--}500\text{nm}$, 读出光 $600\text{--}800\text{nm}$ 。

§ 2.5 表面形变空间光调制器^[12]

表面形变(Deformable Surface)空间光调制器的面形可以在写入信息的控制下发生变化, 读出光在其表面反射或透射时受到相位或振幅调制。用做形变材料的物质也很多, 例如, 热塑材料、弹性材料、液体、塑料或金属薄膜、玻璃薄膜板和电致伸缩材料等。表面形变空间光调制器常常根据所用材料或工作模式来命名, 除少数器件工作在透射模式外, 大多数表面形变空间光调制器以反射模式工作。近期发展起来的变形反射镜器件(Deformable Mirror Devices),

就是采用连续的反射镜薄膜或分立的反射镜工作的, 例如倾斜微镜 (Tilting Micromirror), 光栅光阀 (Grating Light ValveTM, GLV), 数字微反射镜装置 (Digital Micromirror Device, 简称 DMD) 等。我们将在 2.7 节中对 DMD 进行详细介绍。

§ 2.6 其它类型的空间光调制器

§ 2.6.1 声光空间光调制器

声光空间光调制器是利用声光效应来进行光调制的器件。声光空间光调制器与前面所介绍的空间光调制器相比, 有两个不同点: 其一写入信息的空间分布不是固定的, 而是以声速在缓慢地运动; 其二写入信息只沿一维空间 (平行于声波的传播方向) 分布, 因此声光调制器最适宜用来进行一维图像 (或信息) 的光学并行处理。

§ 2.6.2 磁光空间光调制器 (MOSLM)

磁光空间光调制器^[12]是利用对铁磁材料的诱导磁化来记录写入信息, 利用磁光效应来实现对读出光的调制。

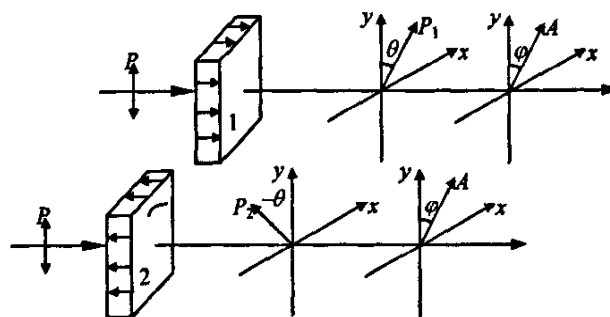


图 2-4 磁光调制器的信息读出^[12]

MOSLM 优点是写入速度快, 单个像素开关速度达 10ns 量级, 帧率高于 100Hz。像素为 128×128 的阵列器件帧频达 2000Hz。它的存储特性非常稳定。对比度高于 200: 1, 速度可达 1000: 1。现有阵列像素数有 128×128、256×256

和 512×512 等多种。MOSLM 的主要缺点是对读出光能利用率比较低。MOSLM 的这一限制,是由于它本质上是一个二元器件,每个像素只有两个状态可供选择,不能进行多灰阶操作。目前有各种方法弥补这一缺陷^[14]。MOSLM 已在光学模式识别、白光信息处理、图像编码、光学互联及可编程光学器件等方向得到应用。

以上介绍的是基于电光、声光和磁光效应的空间光调制器。此外,近几年还出现有铁电陶瓷(PLZI)调制器、微通道板(MSLM)调制器、多量子阱调制器、自电光效应器件调制器等^[12]多种空间光调制器,在此不再一一介绍。

§ 2.7 数字微反射镜装置(DMD)

近年来,随着大规模集成电路技术、微机电系统(MEMS)技术和微光学技术的发展,一种构思极为巧妙的电寻址空间光调制器—数字微反射镜装置(Digital Micromirror Device,简称 DMD)问世。数字微反射镜装置,简称数字微镜,它是美国德克萨斯州仪器公司(Texas Instruments Corporate:简称 TI)的专利产品。由美国德克萨斯仪器公司(TI)的一名科学家 L.J.Hornbeck 在 1982 年发明的^[16-17],最开始这种器件称作变形反射镜装置(Deformable Mirror Devices),后来随着这种器件结构的不断完善成型,直到现在的数字微反射镜装置(Digital Micromirror Device),并且已实现产品商业化。

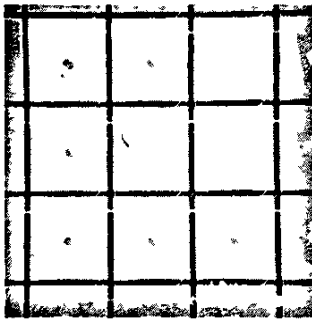
DMD 被研制出来之后, TI 公司一直在寻找和扩大它的用途。目前它主要应用于数字投影显示(Digital Projection Display)及高清晰度电视(HDTV)显示中^[18,19],其表现出来的优越性能,引起了科技界和工业界的广泛兴趣。随后 DMD 作为一种光学信息处理系统接口器件逐渐广泛应用于光信息处理研究中。为此, TI 公司还专门为使用 DMD 作为空间光调制器的投影仪产品注册了一项专利,注册商标为 DLP(Digital Light Processing),即数字光学处理。除了数字投影显示这项主要用途之外, DMD 还可以用于印刷产业中作硬拷贝(hardcopy)^[20];制作新型显示器和扫描仪;全息摄影^[21];数字掩模光刻成像^[22]等。不过相对于 DMD 用于数字投影显示,这些应用大部分还只是处于研究阶段或者受限制的应用阶段。

DMD 作为一种反射式电寻址空间光调制器,与液晶光阀等空间光调制器相

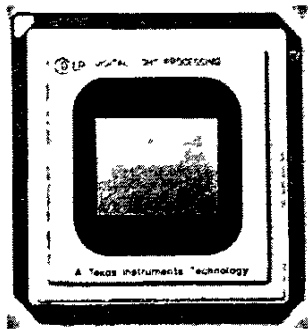
比，有显著的性能优势。下面我们逐一介绍其基本结构、工作原理及特点。

§ 2.7.1 DMD 的基本结构^[23, 24]

DMD 可以有多种解析度规格：640×480 (VGA)，800×600(SVGA),1024×768(XGA)及 1280×1024(SXGA)等。图 2-5 为一 1024×768 (XGA) 的 DMD 芯片装置示意图，装置中间部分是 1024×768 块可偏转的微反射镜，外面由玻璃窗口封装。



(a) DMD 部分微镜阵列



(b) 封装的 DMD 芯片

图 2-5 DMD 芯片装置示意图

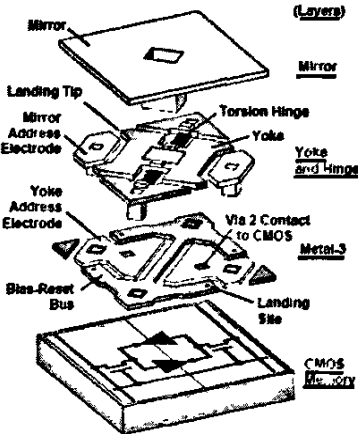


图 2-6 DMD 微镜单元分解图

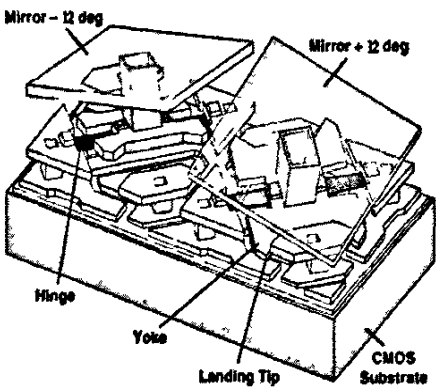


图 2-7 两个偏转的 DMD 微镜像素

图 2-6 示出了 DMD 微镜单元的分解图。DMD 单元的分解图共有 4 层^[25]：第一层是微反射镜单元，每个镜面的尺寸为 $16\mu\text{m} \times 16\mu\text{m}$ ，用铝箔制成；第二层是扭臂梁—铰链和微镜的寻址电极；第三层是 3 金属层，主要由扭臂梁寻址电极、偏置/复位电极和“着陆平台”（landing pads）组成；第四层是采用大规模集成电路标准 CMOS 工艺，在硅基底上制作的静态存储器（RAM）。微镜与扭臂梁相连接，而扭臂梁通过铝铰链悬置在铰链支撑柱上，微反射镜可以绕铰链轴旋转。铰链支撑轴连接到偏置/复位电极，偏置/复位电极给每个微镜提供偏压。微镜寻址电极和扭臂梁寻址电极连接到静态随机存储器。

器件工作时，在反射镜上加负偏压，一个寻址电极上加 +5V（数字 1），另一个寻址电极接地（数字 0），这样在微镜与微镜寻址电极，扭臂梁与扭臂梁寻址电极之间就形成一个静电场，产生一个静电力矩，使反射镜绕扭臂梁旋转，直到接触“着陆平台”为止。由于“着陆平台”的限制，使镜面的偏转角度 θ 保持一定值（ $\pm 12^\circ$ ），且在 DMD 整个面积上有很好的 consistency。在扭矩的作用下，反射镜将一直锁定于该位置上，直到复位信号出现为止。这样，每一个单元都有三个稳态： $+12^\circ$ （开）、 -12° （关）和 0° （无信号）。图 2-7 显示了一对 $+12^\circ$ 和 -12° 偏转的微镜单元。

§ 2.7.2 DMD 的工作原理^[26,27]

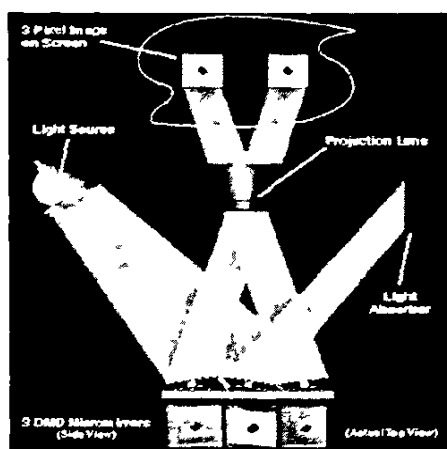


图 2-8 DMD 工作原理图

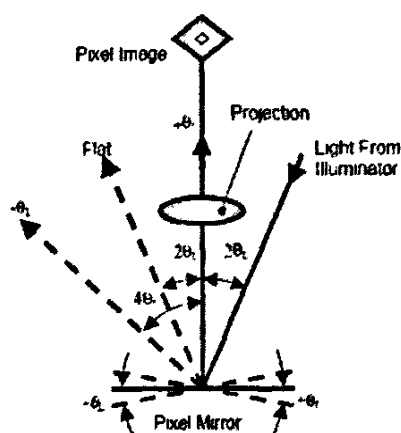


图 2-9 DMD 工作原理示意图

DMD 作为空间光调制器,用于数字投影成像系统,是说明其工作原理的很好实例。如图 2-8 所示。光源发出的光束与光学系统光轴的夹角为 2θ ,当某一像素被寻址电极电压驱动,使反射镜偏转 $\theta = +12^\circ$ 时,它反射的光束刚好沿光轴方向通过投影物镜成像在屏上,形成一个亮的像素。当反射镜偏离平衡位置 -12° 时,反射的光束将不能通过投影物镜,因此像面上呈现出一个暗的像素。控制信号二进制的“1”和“0”状态,分别对应于微镜 $+12^\circ$ 和 -12° 两个稳定状态(以微镜平行于基板的位置作为 0°),也就是 DMD 微镜的“开”和“关”两个状态。当带有掩模图形数据控制信号序列被写入 CMOS 电路时,DMD 对入射光进行调制,掩模图形就可以在像面上显示。

§ 2.7.3 DMD 的特点

DMD 空间光调制器的原理简单,一般来说附属设备及系统结构就越紧凑,其结果是高效率及高度的稳定性。此外,DMD 可以用成熟的大规模集成电路技术制造,这就为它的商品化创造了条件。巧妙的构思加上集成电路的制造工艺,使 DMD 在分辨率、亮度、对比度、灰阶、色保真度及响应时间等主要性能参数上都达到了目前显示技术的创记录的水平。

DMD 具有以下特点^[28]:

(1) 高分辨率

这是由 DMD 的像素尺寸及制造工艺决定的。DMD 微镜像素的几何尺寸是不变的,但是 DMD 阵列可以加宽,如图 2-10 所示,DMD 芯片对角线尺寸随分辨率的提高而增大。DMD 有 640×480 (VGA), 800×600 (SVGA), 1024×768 (XGA) 及 1280×1024 (SXGA) 等多种解析度规格,特别是适用于高宽比 16:9 宽屏幕电视的 DMD,器件尺寸 $37 \times 22 \text{ mm}$,一个 DMD 上的像素数为 1920×1080 ,达到 N 制电视制式器件的 5 倍以上。完全符合高清晰度电视的要求。

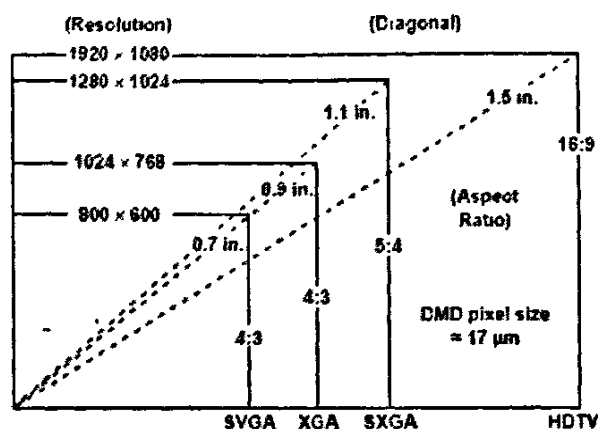


图 2-10 DMD 分辨率 VS 芯片对角线尺寸

(2) 高亮度

DMD 完全靠反射镜阵列的反射, 反射面积约为像素面积的 89%。反射镜用铝箔制成, 因此具有很高的反射系数, 约为 88%, 再扣除光在扭臂梁、支撑柱及反射镜边缘的散射、衍射, 有效反射率达到 61%。

(3) 对比度、灰阶及色保真度

在 DMD 的关态(OFF)下, 从反射镜上反射的光束与光轴的夹角为 4θ , 约 40° , 被仪器四壁专门设计的吸收介质吸收, 只有少量散射光进入投影物镜, 因此对比度可达到 1000:1, 目前改良的技术已达到 2000:1 以上。作为一个数字化的反射空间光调制器, 它的灰阶及色保真度由开态(ON)的占空比决定, 而占空比由脉冲调制来控制, 目前 DMD 的灰度一般能做到 8bit(256 级)甚至 10bit(1024 级)。三原色各 8bit 的混合效果产生 256^3 即 1600 万中不同的颜色, 无论灰阶还是色保真度都达到 HDTV 的要求。

(4) 可靠性

由于 DMD 的调制功能是通过微反射镜的扭转实现的, 人们自然会担心在反复的转动下扭臂梁铰链的可靠性, 其实这点担心是没有必要的。因为 DMD 不仅通过了所有的标准半导体资格测试, 而且还证明了在模拟操作环境中, 它的生命期超过 10 万个小时。测试证明, DMD 历经 765×104 个周期未发生任何问题, 这相当于投影电视或投影仪正常使用 76000h。

(5) 响应时间

由于扭臂梁非常薄(约 $0.05\text{--}0.1\text{ }\mu\text{m}$), 微型反射镜的重量很轻, 转动惯量

极小, 因此响应时间非常快, 从完全的开态到完全的关态约 $10\mu s$ 。因此单板式 DMD 投影仪可以在常规 TV 的 $1/3$ 帧的时间内读完全部 RGB 三色信号, 因此可以说 DMD 作为空间光调制器是“数字化投影技术的革命”。

§ 2.7.4 DMD 与液晶显示屏 (LCD) 的性能对比

作为空间光调制器, DMD 与液晶显示屏 (LCD) 相比, 有显著的性能优势。DMD 的分辨率在 1000dpi 以上, 填充因子约为 89%, 有效反射率达 61%, 现在已商品化的透射式薄膜晶体管液晶显示器 (TFT-LCD), 分辨率和填充因子一般都比较低, 分辨率在 50—200dpi 之间, 填充因子 < 70%, 光透射率为 20%—40%; DMD 对比度可达 1000:1, 而 LCD 最高不超过 700:1; DMD 响应时间约 $10\mu s$, LCD 响应时间为 50ms—100ms, 与 DMD 相比减慢了几个数量级, 尽管现在铁电液晶采用了性能良好的近晶型铁电液晶, 使器件的响应速度显著提高, 对比度也有很大改善, 但仍然落后于 DMD, 且铁电液晶技术相对还不成熟且制造困难; DMD 可以在模拟或数字模式下工作, 而 LCD 大多采用模拟操作方式; DMD 光学调制范围很宽, 可以均匀覆盖整个可见光波段, 甚至延伸到紫外和红外波段, 而 LCD 非常依赖波长且在紫外光下不是非常稳定; DMD 功耗很低, 在高达 5KHz 的帧频下工作也不会引起明显的热耗散, 而 LCD, 如果没有足够冷却液晶板, 过多的热量将破坏其偏振旋转。

§ 2.8 数字光学处理(DLP)技术

利用 DMD 的纯数字调节能力实现其在光电系统中的应用叫做数字光学处理 (DLP)。DLP 投影技术是美国德州仪器公司在 1996 年研发出来的, 利用 1、2 或 3 个 DMD 构成的三种基本 DLP 系统已经商品化了, 并广泛的用于投影显示。

§ 2.8.1 DLP 实现灰度量化

DMD 是一种反射式显示器件, 其镜面的反射只有亮和暗两种状态, 因此当微反镜阵列显示灰度图像时, 只能通过数字控制信号脉冲宽度的大小来调整每

个微镜“开”“关”的时间比例，称为二元脉冲宽度调制^[29]。

当 DMD 微反射镜偏转时，入射光就被反射入或反射出投影透镜孔径，从而产生一束数字光脉冲，人眼对一帧图像中多个数字脉冲的整合来形成完整的图像。DMD 微镜的偏转时间约为 2 微秒，DMD 的机械开关时间约为 15 微秒（包括微镜着陆和锁定）。

下面我们以 4 位二进制（16 个灰度等级）视频数据的脉冲序列为例，来说明二元脉冲宽度调制（PWM）技术，见图 2-11。脉冲序列信号的每一位代表了微反射镜的开或关（0 或 1）的时间段，这些时间段的相对值为 2^0 、 2^1 、 2^2 、 2^3 ，即 1、2、4、8。最短的时间段（1）称为最低有效位（the Least Significant Bit，LSB），LSB 占一个帧时的 $1/(2^N-1)$ ，N 为数据位数。最长的时间段（8）称为最高有效位（the Most Significant Bit，MSB）。因此，一个帧时（例如 1/50 秒）被分为 4 个独立的时间段，时间片的长短与该位的二进制的加权值呈比例，即 LSB 分配到 1/15 个帧时，LSB+1 分配到 2/15 个帧时，LSB+2 分配到 4/15 个帧时，LSB+3 分配到 8/15 个帧时。

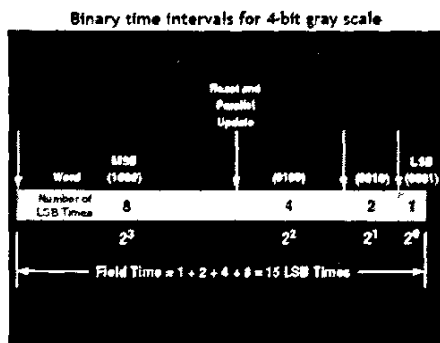


图 2-11 4 位 PWM 脉冲序列图样

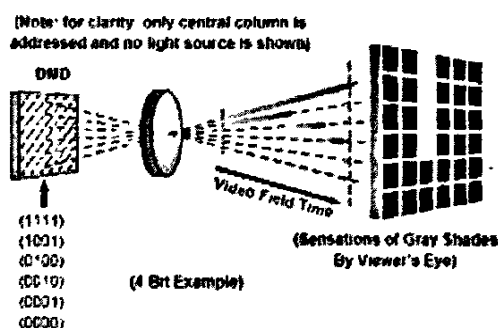


图 2-12 DMD 的 4 位二元脉冲宽度调制原理

DMD 的 4 位二元脉冲宽度调制（PWM）原理如图 2-12 所示。二元控制信号“1”驱动 DMD 微镜偏转到“开”的位置，“0”驱动 DMD 微镜偏转到“关”的位置。例如，数字 10 在 4 位二进制表示为 1010，在此种情况下，在 LSB+1 时间段和 LSB+3 时间段中，DMD 处于“开”的状态，在 LSB 时间段和 LSB+2 时间段中 DMD 处于“关”状态。人眼的视觉系统经过对这一显示序列的整合，产生相当灰度 10 的视觉效果。同理，数字 7 用 4 位二进制表示为 0111，

它由 LSB、LSB+1、LSB+2 这三时间段来组合表示。通过 4 个时间段的开关组合,就可以产生 2^4 (16) 个等间隔的灰度级 (0, 1/15, 2/15, 3/15.....15/15)。对于 N 位的二进制数据就可以产生 2^N 个等间隔的灰度。观察到的灰度正比于 DMD 微镜“开”状态的时间在一个帧时中所占的比值。

§ 2.8.2 DLP 投影仪工作原理^[30]

单 DMD 投影系统如图 2-13 所示,该系统按时序彩色模式工作。把输入信号分成 RGB 三色数据,依次写入到 DMD 的静态 RAM 中。从光源发出的光,通过一个旋转的红绿蓝 (RGB) 三原色滤色镜构成的调色盘滤波,将红、绿、蓝三基色光以时间顺序投向 DMD 芯片,被 DMD 反射的光再经投影透镜成像在屏幕上。调色盘与视频信号严格同步,在每一帧的时间间隔内转一圈,在调色盘的范围内再分别用像素 ON/OFF 的占空比调节 R、G、B 的强度比,从而在一帧的时间间隔内合成所要求的颜色。例如,要产生一张全白的图片, DMD 上的镜片就会全部旋转到“开”的位置,将经过色盘的三色光线反射到投影机的镜头,加上人眼的视觉暂留,就会看到 R、G、B 三色混合的白光。若要投射红光, DMD 上的镜片则会在色盘旋转到红色时才偏转到“开”的位置,这时投射出来的就是红光。由于每种颜色的灰阶都是 8bit (即 256 种),因此总共可以产生 256^3 (≈ 1600 万) 种不同颜色。

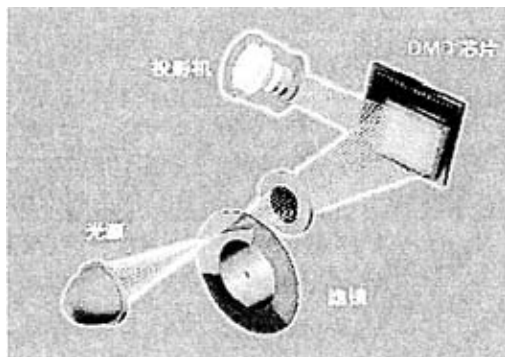


图 2-13 单 DMD 投影系统示意图^[30]

实现彩色显示的另一种方法是组合三个 DMD。每种主色各使用一个 DMD,

这种高效的三片型投影系统用于大屏幕电影和高亮度场合使用。用一棱镜系统把白光分成红、绿和蓝三色光,每种彩色光照明一个分立的 DMD。在一个帧时,每种主色光连续不断地射向各自专用的 DMD,因此有较多的光抵达到屏幕上产生一个光亮的投影图像。

由于数字技术的采用,DLP 投影仪产生的图像灰度等级达 256—1024 级,色彩达 256^3 — 1024^3 种,图像噪声消失,画面质量稳定,精确的数字图像可不断再现,而且历久弥新。

§ 2.8.3 DMD 的性能及发展方向

随着 DLP 技术日趋成熟,TI 公司对其应用的兴趣也从科学及工程领域扩展到其他领域,寻找着更为广阔的非数字投影显示市场。为了使 DMD 有更广泛的应用机会,一批灵活的产品已经制造出来并广泛地应用在系统开发上。在 DMD Discovery™ 1000 产品家族,用一种灵活的 DMD 控制器^[31]来代替标准的 DLP 数字视频格式程序。灵活的控制让开发者可以定义自己的数据格式和微镜的反应时间,并且可以让 0.7 XGA DDR DMD 以它最高 7.6Gb/s 的速度工作。

Discovery™ 1000 芯片包括图 2-14 及图 2-15 中的 0.7 XGA DDR DMD、Discovery™ 控制器、USB 用户接口软件和一个全面的文件包等。由于具有灵活控制器,因此能得到宽的帧频和亮度。控制板上有一个 USB 接口,当 2003 年升级到 USB2.0 时,可支持几百个二进制数据帧/秒。还有一个带 64 位 (60MHz DDR) 数据线和 16 个控制线的 HI-SPEED 端口,该端口可以支持多种数据源接口和存储功能,使帧频达到 9700 帧/秒。

经过近几年的发展,DMD 性能有了很大的提高。例如,PWM 能力的提供使数据载入速度从单数据率 (SDR) 增加到双数据率 (DDR);微镜的倾斜角度从 $\pm 10^\circ$ 增加到 $\pm 12^\circ$ 等。下一代的 DMD 会在数据吞吐能力和镜的转换速度上提高,利用 LVDS 数据接口,0.7 XGA 的数据速度将从现在的 7.6Gb/s 显著提高,从而提高帧频。

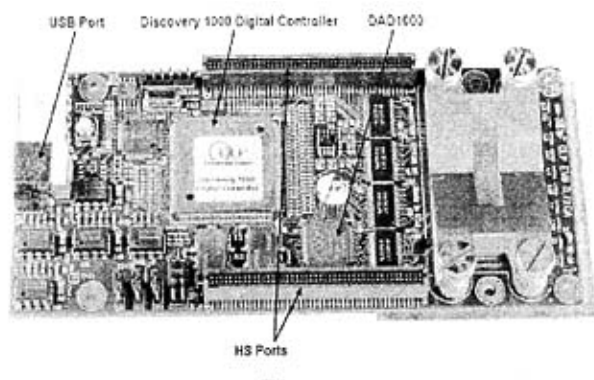


图 2-14 Discovery™ 1000 控制器板（正面）

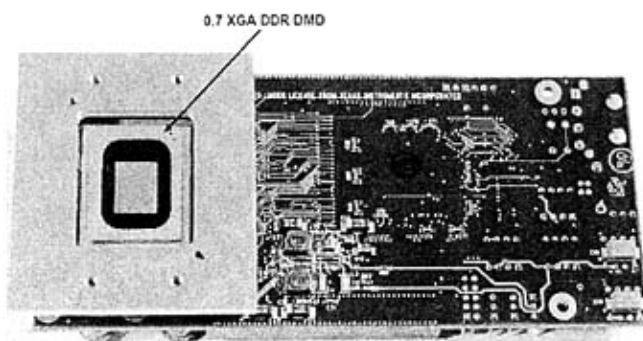


图 2-15 Discovery™ 1000 控制器板（背面）

§ 2.9 小结

本章介绍了空间光调制器的基本结构、分类及性能参数，对常见的空间光调制器，如液晶光阀、PROM、声光及磁光空间光调制器等作了简单说明。详细介绍了数字微反射镜装置的结构、工作原理及特点（包括高分辨率，高亮度，高对比度等），并将其与液晶显示屏比较，突出其性能优势。最后，说明了 DLP 技术实现灰度量化的原理，其灰阶是由微镜对入射光的二元脉冲宽度调制获得，量化的灰阶等级正比于微镜在一帧中“开”状态所占的时间比。这为基于 DMD 的数字掩模光刻成像系统的建立提供了理论基础。

参考文献:

1. 李育林, 傅晓理. *空间光调制器及其应用*, 北京: 国防工业出版社, 1996.
2. H. K. Liu, J.A.Davis, R. A.lilly. Optical data processing properties of a liquid crystal television spatial light modulator. *Opt Lett.*, 1985, 10 :635.
3. F. Mok, J. diep, H.K.Liu, et al.. Real time computer generated holograph by means of a liquid crystal television spatial light modulator. *Opt Lett.*, 1986, 11: 748.
4. F.T.S.Yu, S. Jutamulia, J. W.Lin, et al. Adaptive real time pattern recognition using a liquid crystal TV based joint transform correlator. *Appl. Opt.*, 1987, 26: 1370.
5. 员智省. *液晶空间光调制器纯相位调制及其应用研究*. 西安: 中国科学院西安光学精密机械研究所, 1998.
6. Jan Grinberg, Jacobson A D, Bleha W P, et al. A new real-time non-coherent to coherent light image converter--the hybrid field effect liquid crystal light valve. *Opt. Eng.*, 1975, 14: 217.
7. Kallman Robert R, Goldstein Dennis H. Phase-encoding input images for optical pattern recognition, *Opt. Eng.*, 1994, 33(6): 1806.
8. Horner Joseph L, Gianono Peter D. Phase only matched filtering. *Appl. Opt.*, 1984, 23(6): 812.
9. Wang Re Q, Cartcoright C M, Soutar C, et al.. Real time color image correlation with a color liquid crystal television and a Fresnel Holographic filter. *Appl. Opt.*, 1999, 32(5): 715.
10. Dou R and Giles M. Closed- loop adaptive optics system with a liquid crystal television as a phase retarder. *Opt Lett.*, 1995, 20(1): 583.
11. Love G, et al. Binary adaptive optics- atmospheric wave-front correction using a half- wave phase shifter. *Appl Opt.*, 1995, 34: 6058.
12. 陈家璧. *光学信息技术原理及应用*. 北京: 高等教育出版社, 2001:162-199.
13. 范志新. *液晶器件工艺基础*. 北京邮电大学出版社, 2000.
14. 赵达尊, 张怀玉. *空间光调制器*. 北京: 北京理工大学出版社, 1992.
15. Hornbeck, Larry J.. 128 * 128 Deformable mirror device, *Conference Record of 1982 International Display Research Conference*, 1982, 76-79.
16. Hornbeck, Larry J.. 128 multiplied by 128 Deformable mirror device, *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1983, 30(5): 539.

17. Hornbeck, Larry J. 128 multiplied by 128 Deformable mirror device. *Oil and Gas Journal* 1982, 24(2): 199.
18. R.J. Gove, V. Markandey, S. Marshall. High Definition Display System Based on Digital Micromirror Device. International Workshop on HDTV (HDTV'94), International Institute for Communications, Turin, Italy (October 1994).
19. G. Sextro, T. Ballew, and J. Iwai. High-Definition Projection System Using DMD Display Technology. *SID 95 Digest*, 1995: 70-73.
20. W.E. Nelson and R.L. Bhuvu, Digital Micromirror Device Imaging Bar for Hardcopy. Color Hardcopy and Graphic Arts IV. *SPIE, Vol. 2413*, San Jose, CA (February 1995).
21. Ryder S. Nesbitt, Steven L. Smith, Raymond. Holographic recording using a digital micromirror device. *SPIE*. 1999, 3637: 12-20.
22. Kevin., J.Kearneyt, Zoran Ninkov. Characterization of a digital micromirror device for use as an opticalmask in imaging and spectroscopy. *SPIE*, 1998, 3292: 81-92.
23. J.B. Sampsell. An Overview of Texas Instruments Digital Micromirror Device (DMD) and Its Application to Projection Displays. *Society for Information Display Internatl. Symposium Digest of Tech. Papers*, 1993, 24:1012-1015.
24. Henry Chu. DMDTM Superstructure Charaterization. *TI Technical Journals* ,1998.
25. Larry J .Hornbeck. DMD Architecture. *TI Technical Journals*, 1994.
26. Peter F. Van Kessel, Larry J. Hornbeck. A MEMS-Based Projection Display. *Proceedings of the IEEE*, 1998, 86(8).
27. L.J. Hornbeck. Current Status of the Digital Micromirror Device (DMD) for Projection Television Applications. *International Electron Devices Technical Digest*, 1993, 381-384.
28. Larry J .Hornbeck. Deformable-Mirror Spatial Light Modulators. *SPIE*, 1150:86-88.
29. Zhou Jing xian ,Wu Rong zhi. Digital Micromirror Device. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays(液晶与显示)*, 2003, 18(6): 445-449(in chinese).
30. Larry J .Hornbeck. Digital Light ProcessingTM for High-Bright,High-Resolution Applications. *SPIE*, 3031: 27-31.
31. DMD DiscoveryTM 1000 Controllor Board&Starter Kit Product Preview. Document Number:720-0001-001,2002.

第三章 数字灰度光刻成像模型

§ 3.1 引言

随着光刻技术的发展,对掩模加工精度的要求也愈来愈高,由于掩模制作复杂且费用昂贵,光掩模的制作加工已成为制约光刻技术发展的一大瓶颈^[1],尤其是在国内,还未达到实用化的阶段。针对这一情况,近年新兴的将空间光调制器用于无掩模光刻成像技术,成功地避免了掩模制作加工困难的问题,大大简化了传统光刻的一些繁琐工艺流程,为大规模,快速,灵活制作台阶或连续微光学元件开辟了一条新的道路。

光刻成像过程是一个复杂的多参量变化过程,通过多次曝光实验来确定最优实验参数,将使得曝光实验和观察测试的过程繁杂、费用增高,有较大的局限性。而计算机模拟具有快速、经济、灵活的特点,因此基于光刻成像理论的研究,通过计算机模拟光刻成像过程提供指导性参数,对掩模的优化和曝光试验的顺利进行有重要的意义。本论文将数字微反射镜装置(DMD)与投影光刻系统相结合,利用了前者的灵活性和后者的并行性,提出了 DMD 实时掩模光刻技术,并根据 DMD 实时掩模技术的特点,讨论了数字光刻成像的原理和方法,建立快速部分相干成像系统模型,给出了 DMD 光刻成像的模拟结果。

§ 3.2 数字灰度光刻成像原理及装置

在上一章中,我们讨论了空间光调制器的概念和原理以及几种典型的空间光调制器,基于 DMD 独特的性能优势(高分辨率、高亮度、高对比度、高可靠性、数字控制、响应时间短等),这为我们把它显示的图形直接视作掩模进行微光学元件的制作提供了可行性,从而制作微光学元件的掩模图形就可以通过计算机方便地随时制作和修改,称之为实时掩模。DMD 空间光调制器的数字灰度光刻成像原理如图 3-1 所示,光经 DMD 反射后,通过透镜在其焦平面上滤波,再由缩小透镜组成像在基片上。由于 DMD 可以产生灰度图形,因此可以用来制作连续表面形微结构^[2,3]。

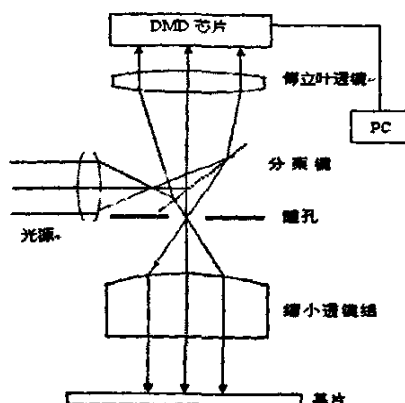


图 3-1 DMD 数字灰度光刻成像系统示意图

随着数字光刻技术的发展，一些 SLM 陆续被应用到光刻系统中，作为图形发生器取代了传统的光掩模投影成像。许多公司（如 ASML, Ball semiconductor, MIT 等）都建立了自己的数字光刻成像系统，下面我们介绍几种典型的产品装置。

§ 3.2.1 基于 SLM 的缩小投影成像装置

(1) ASML 公司的数字投影光刻成像装置

图 3-2 是 ASML 公司的数字投影光刻成像装置^[4]。光从光源出射后经分束镜分束，照射到倾斜微镜^[4]（Tilting Micromirror）上，再经倾斜微镜反射后通过一个缩小的投影透镜组滤波成像在扫描平台上，最后经平台扫描曝光获得较大面积的光刻图形，其分辨率可达 150nm。ASML 公司使用倾斜微镜作为 SLM，其基本结构如图 3-3 所示，它是通过不同的偏转角度来获得各个灰度等级的。

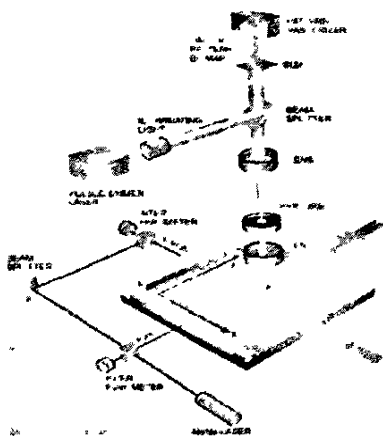
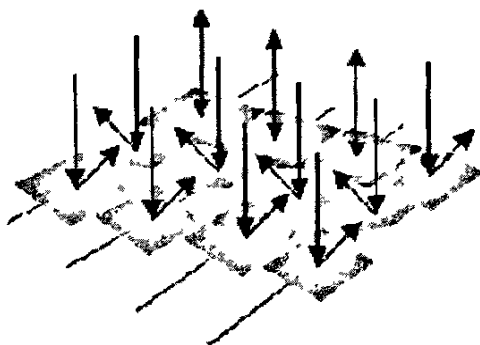
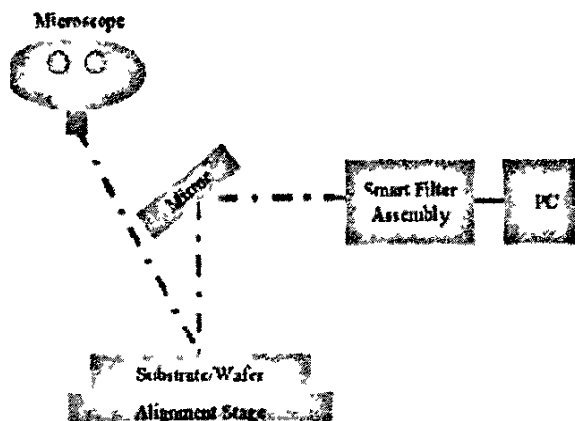
图 3-2 ASML 的数字投影成像装置^[4]

图 3-3 Tilting Micromirror 的结构

(2) Intelligent 公司的数字投影光刻成像装置

图 3-4 是 Intelligent 公司的 SF-100 投影光刻系统^[5]。该系统通过一项专利技术 (Smart Filter Technology) 将光学图像投影成像在基底上, 其分辨率为 $5\mu\text{m}$ 。

图 3-4 Intelligent 的 SF-100 投影光刻系统^[5]

以上两种装置像面光强分布要严格用部分相干成像理论来计算。

§ 3.2.2 基于 SLM 和 MEMS 技术相结合的投影成像装置

(1) MIT 的数字投影光刻成像装置^[6]

图 3-5 是 MIT 的数字投影成像装置。激光出射的光束经透镜滤波准直后照

射到光栅光阀^[6] (Grating Light ValveTM, GLV), 经 GLV 反射后投影成像在可扫描的基片平台上, 且在到达基底前, 通过一个波带片阵列 (Zone-plate Array) 聚焦滤波。该系统的分辨率为 150nm。

光栅光阀的基本结构如图 3-6 所示, 通过隔一系列带上下移动改变光的方向, 隔一系列的可动带被静电力拉下来, 则反射光强度也逐渐降低, 但衍射光强度相应地增强。当可动带被拉下 $\lambda/4$ 时, 衍射光最强。GLV 具有良好的灰度渐变精度, 像素具有很小的几何尺寸, 填充因子高。

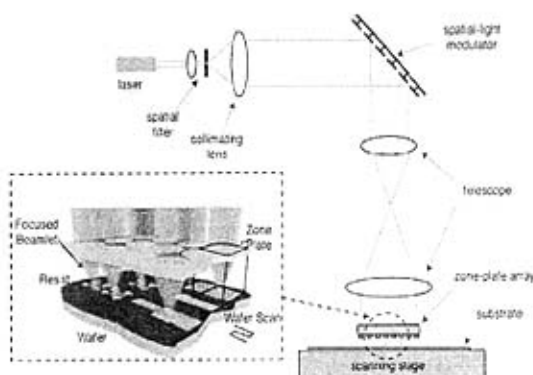


图 3-5 MIT 投影成像系统^[6]

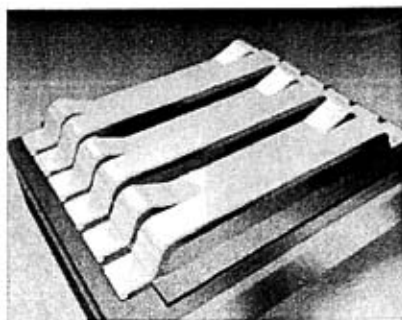


图 3-6 GLV 基本结构

(2) Ball Semiconductor 公司的数字投影光刻成像装置^[7]

Ball Semiconductor 公司的 DMD 投影光刻成像装置如图 3-7 所示。该系统包含光源、准直透镜、反射镜、DMD、放大投影透镜组、微透镜阵列、空间滤波器阵列、缩小投影透镜组、光刻胶基底和扫描平台。其工作原理是：光源产生强准直照明，经反射镜反射后入射到 DMD 表面，DMD 形成的空间像经过一个低数值孔径 ($NA=0.12$)，放大倍率为 3 的投影放大透镜组成像在微透镜阵列表面，经过合成微透镜及空间滤波器阵列——Integrated MLSFA (micro-lens and spatial filter array) 聚焦滤波后，形成一个点阵光斑，再通过一个高数值孔径 ($NA=0.5$)，放大倍率为 0.2 的投影缩小透镜组，将点阵光斑投影成像到光刻胶上。基底光斑的直径取决于投影透镜组的 NA 和微透镜的 NA，随着扫描平台运

动, 同步改变点阵光斑的图样, 基底光刻图样产生^[8]。其空间分辨率达到 $1.5\ \mu\text{m}$ 。

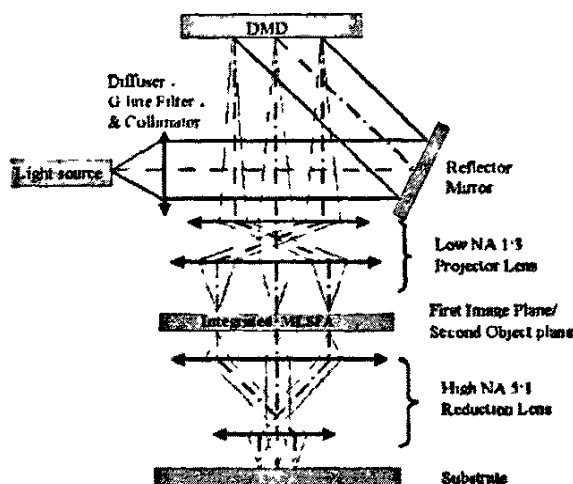


图 3-7 Ball Semiconductor 的投影光刻系统^[7]

以上两种基于 SLM 和 MOE 相结合的投影成像装置, 其基底上的点阵光斑在光刻过程的某一瞬时, 不再具有 DMD 微镜像素的几何特征, 是一系列高斯分布的独立小光点。因此, 曝光后基片上的总曝光量分布可看成是单个微镜形成的曝光分布与设计图形的加权卷积。

由此可见, 采用不同的数字光刻成像系统, 应建立与之相适应的成像模型来描述, 从而为光刻实验的开展提供适合的理论依据。

§ 3.3 DMD 部分相干成像系统模型

照明光源、DMD 的工作特点和成像系统的结构决定了数字光刻系统的成像机理。通过对成像机理的分析, 建立一个简单实用的光刻成像模型来描述成像过程, 对曝光实验的开展具有指导意义。

上一节我们已分析了两类数字光刻成像装置的成像机理, 基于 SLM 和 MOE 相结合的投影成像装置, 其光学结构虽较基于 SLM 的缩小投影成像装置稍为复杂, 但因使用 MOE 聚焦滤波后, 像面光强分布是一系列高斯分布的独立小光点, 即各单元在像面上得到的光强分布之间完全不相干, 其分辨率较高, 加工灵活,

因此我们选用基于 SLM 和 MOE 相结合的投影成像装置，建立了一个特殊的部分相干成像模型来描述其成像过程：采用相干成像理论求出单个微镜像面光强分布，整个 DMD 微镜阵列的像面光强分布看作单个微镜像面光强分布的加权卷积。

§ 3.4 DMD 单个微镜成像

我们建立的数字光刻成像模型，DMD 微镜阵列像面光强的分布是用微镜单元像面光强分布的非相干叠加来表征的。下面分析单个微镜的成像情况，图 3-8 是处于“开”状态的 DMD 微镜单元，铝箔镜片呈正方形，边长为 $16\mu\text{m}$ ，相邻微镜间的间隙为 $1\mu\text{m}$ ，中心不透光区域是边长约 $2\mu\text{m}$ 的正方形^[9]。

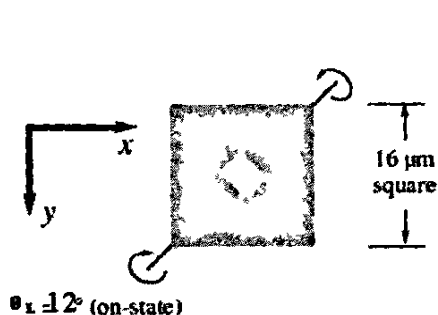


图 3-8 DMD 微镜单元结构

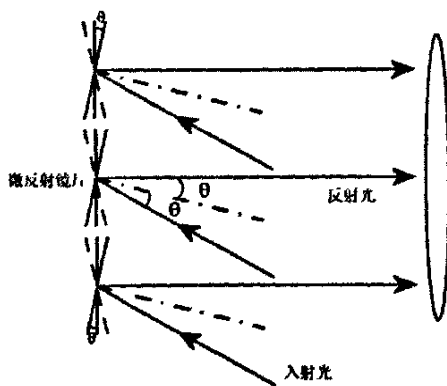


图 3-9 DMD 微镜反射成像

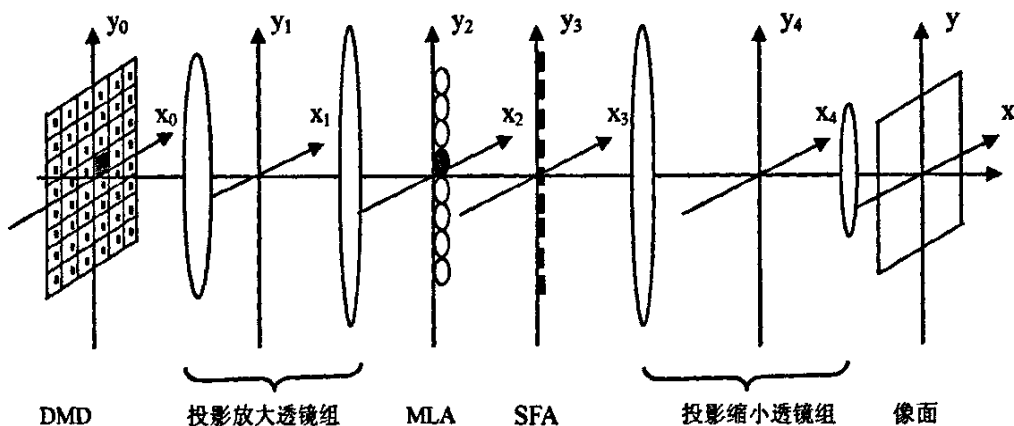


图 3-10 DMD 数字光刻成像装置示意图

借鉴 Ball Semiconductor 公司的数字光刻装置, 作出 DMD 微镜成像示意图, 见图 3-10。

设单个微镜物面光场分布为 $u_0(x_0, y_0)$

坐标面 1 上的复振幅分布是物光场的傅立叶变换, 即

$$U_1(\xi_1, \eta_1) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} u_0(x_0, y_0) \exp(-i2\pi(\xi_1 x_0 + \eta_1 y_0)) dx_0 dy_0$$

式中, ξ_1, η_1 分别为沿 X 和 Y 方向的空间频率: $\xi_1 = \frac{x_1}{\lambda f_1}, \eta_1 = \frac{y_1}{\lambda f_1}$

经坐标面 1 后复振幅分布为 $U_1(\xi_1, \eta_1) \cdot H_1(\xi_1, \eta_1)$

$H_1(\xi_1, \eta_1)$ 是放大透镜组的光瞳函数

单个微镜在微透镜表面的像场分布应为:

$$u_2(x_2, y_2) = F^{-1}\{U_1(\xi_1, \eta_1) \cdot H_1(\xi_1, \eta_1)\} = u_0(x_2, y_2) * h_1(x_2, y_2)$$

式中, $h_1(x, y) = F^{-1}\{H_1(\xi_1, \eta_1)\}$ 是滤波器的脉冲响应函数

经微透镜聚焦后, 单个微镜在微透镜后焦面上的光场分布:

$$u_3(x_3, y_3) = \frac{1}{i\lambda f} e^{\frac{i\pi}{\lambda f}(x_3^2 + y_3^2)} F\{u_2(x_2, y_2)\}$$

其中 f 为微透镜的焦距

经过空间滤波器滤波后, 在坐标面 3 上的复振幅分布 $u_3(x_3, y_3) \cdot t(x_3, y_3)$

$t(x_3, y_3)$ 是空间滤波器的振幅透过率函数

在坐标面 4 上的复振幅分布为 $u_3(x_3, y_3) \cdot t(x_3, y_3)$ 的傅立叶变换

$$U_4(\xi_4, \eta_4) = F\{u_3(x_3, y_3) \cdot t(x_3, y_3)\}$$

经坐标面 4 后的复振幅分布为 $U_4(\xi_4, \eta_4) H_2(\xi_4, \eta_4)$

$H_2(\xi_4, \eta_4)$ 是缩小透镜组的光瞳函数

单个微镜在基片平台上的像场分布:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= F^{-1}\{U_4(\xi_4, \eta_4)H_2(\xi_4, \eta_4)\} \\ &= [u_3(x, y)\nu(x, y)] * h_2(x, y) \\ &= \frac{1}{i\lambda f} e^{\frac{i\pi}{\lambda f}(x^2+y^2)} F^{-1}\{F\{U_1(\xi, \eta)H_1(\xi, \eta)\nu(\xi, \eta)\} \cdot H_2(\xi_4, \eta_4)\} \end{aligned}$$

像面光强分布:

$$I(x, y) = |u(x, y)|^2 = \left| \frac{1}{i\lambda f} F^{-1}\{F\{U_1(\xi, \eta)H_1(\xi, \eta)\nu(\xi, \eta)\} \cdot H_2(\xi_4, \eta_4)\} \right|^2$$

下面我们着重分析成像装置中的合成微透镜及空间滤波器阵列——Integrated MLSFA^[10]。微透镜阵列 (MLA) 应与 DMD 的像精确匹配, 含 1024×768 个微透镜像素, 如图 3-11 所示, 微透镜阵列单个像素与单个 DMD 像一一对应。当 DMD 图样被它相应的微透镜聚焦后, 一个 1024×768 像素空间滤波器阵列 (SFA) 用来滤除 DMD、光学透镜系统和微透镜阵列产生的高频成分或噪声, 在微透镜后焦面上得到点阵小光斑。

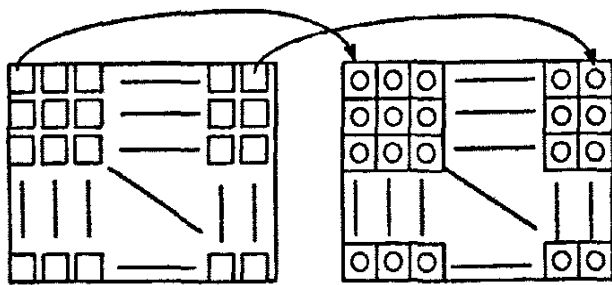


图 3-11 微透镜阵列单个透镜与 DMD 单个微镜像精确匹配

(1) 微透镜阵列^[10]

对单个微透镜, 聚焦光斑的直径可由方程 3-1 估算。

$$D = \frac{1.64\lambda}{NA} = \frac{1.64\lambda}{2\rho} f \quad (3-1)$$

其中, λ 是入射光波长, ρ 是微透镜半径, f 是微透镜焦距。

为了同 DMD 单个微镜像匹配, 微透镜半径 ρ 用下式估算:

$$\rho = a \cdot b \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \quad (3-2)$$

其中, a 是放大投影透镜组的放大倍率, b 是 DMD 单个微镜像素边长。(对 SVGADMD, b 为 $17\mu\text{m}$)。所以, 当 a , b , λ 一旦选定, 微透镜聚焦光斑的直径只取决于微透镜的焦距。例如, Ball Semiconductor 公司 h 线激光照明的 $10\mu\text{m}$ 分辨率无掩模光刻系统, 它放大投影透镜组的放大率为 1, 因此

$$\rho = 1 \cdot 17 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 12.02\mu\text{m}, \text{ 焦距直径 } D = \frac{1.64\lambda}{2\rho} f = 0.02763f。 \text{若要使 } D \leq 5\mu\text{m},$$

则 $f \leq 181\mu\text{m}$ 。对 $20\mu\text{m}$ 分辨率系统, $\rho = 36.06\mu\text{m}$, $D = 0.00921f$, 要使 $D \leq 18\mu\text{m}$, 则 $f \leq 1954\mu\text{m}$ 。因此, 当设计微透镜时, 应根据焦距的需要选取合适的焦距。

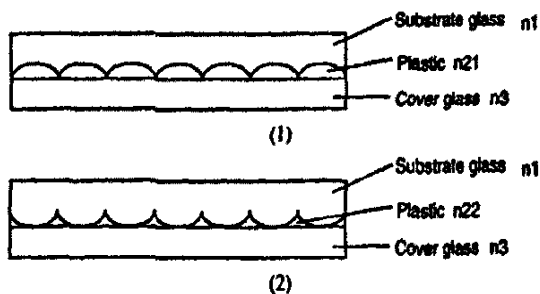


图 3-12 微透镜阵列结构^[10]

微透镜阵列的结构如图 3-12 所示, 是一个三层结构。首先在基底玻璃上制作出微透镜阵列, 然后用塑料填充, 最后再粘合一覆盖层。设物距为 $-l$, 像距为 l' , 物方折射率为 n , 像方折射率为 n' 。

由几何光学知物像距公式

$$\frac{n'}{l'} - \frac{n}{l} = \frac{n' - n}{r} \quad (3-3)$$

设物距无穷大, 则像距 l' 等于焦距, 方程 (3-3) 可写作

$$r = \frac{n' - n}{n'} f \quad (3-4)$$

假设微透镜为球透镜, 则微透镜的曲率半径 r 等于半径 ρ , 当粘合覆盖层后, 光线有一焦点位移 $\Delta l'$, 因此, 方程 (3-4) 改为

$$r = \frac{n' - n}{n'} (f - \Delta l') \approx \frac{n' - n}{n'} \left[f - d \cdot \left(1 - \frac{1}{n_{\text{cover}}} \right) \right] \quad (3-5)$$

其中, f 是微透镜的焦距, d 是覆盖层的厚度, n_{cover} 是覆盖层的折射率。

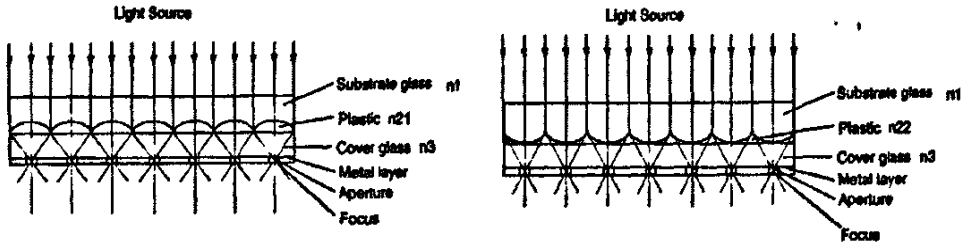


图 3-14 MLSFA 工作原理示意图^[10]

采用 MEMS 加工技术, 微透镜阵列和空间滤波器阵列结合成一体^[7], 且微透镜阵列的焦距 f 恰好等于覆盖层的厚度, 如图 3-14 所示。因此,

$$r \approx \frac{n' - n}{n'} \left[d - d \left(1 - \frac{1}{n_{\text{cover}}} \right) \right] = \frac{(n' - n) \cdot d}{n' \cdot n_{\text{cover}}} \quad (3-6)$$

由方程 (3-6) 知, 如果已知基底玻璃、塑料、覆盖层的折射率和覆盖层的厚度, 就可计算出微透镜的曲率半径。例如, 基底玻璃和覆盖层均为人造石英, 其折射率在波长 405nm 时为 1.46。填充塑料折射率为 1.6 (并且透明度高于 95%), 假如覆盖层的厚度为 $100 \mu\text{m}$, 计算得出微透镜的曲率半径 $r = 5.99 \mu\text{m}$ 。

(2) 空间滤波器阵列^[10]

空间滤波器阵列 (SFA) 用来滤除 DMD、光学透镜系统和微透镜阵列产生

的高频成分或噪声。空间滤波器是一个 1024×768 像素的微孔径阵列，小孔的直径限制了微透镜聚焦光斑的直径，而小孔直径取决于微透镜焦距和曲率半径，通常取小孔的直径 d ：

$$d \leq \frac{0.66\lambda}{r} f \quad (3-7)$$

其中， λ 是入射光的波长， f 是微透镜的焦距， r 是微透镜的曲率半径。但如果取小孔直径 d 太小，滤波的时候将损失太多能量，因此要选择合适的小孔直径。

(3) DMD 单个微镜成像模拟

根据图 3-10 所示的 DMD 微镜成像装置示意图，对单个微镜处于“开”状态的像面光强分布进行了模拟分析。模拟参数如下：入射光波长 365nm，放大投影透镜组数值孔径 0.12，放大倍率 1，缩小投影透镜组数值孔径 0.5，缩小倍率 5。微透镜焦距 $100 \mu\text{m}$ ，曲率半径 $5.99 \mu\text{m}$ ，滤波器孔径 $4.00 \mu\text{m}$ 。

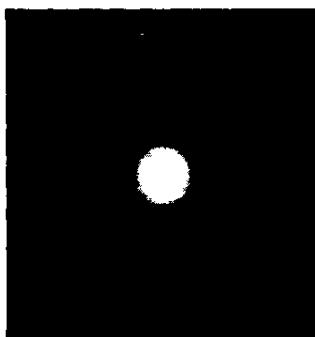


图 3-15 单个微镜像面
光强二维分布

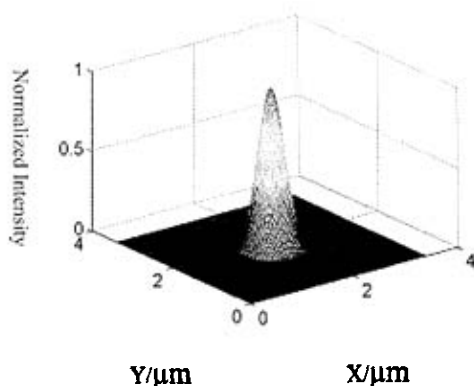


图 3-16 单个微镜像面
光强三维分布

图 3-15 及图 3-16 分别是单个微镜像面光强的二维及三维分布，窗口宽度为 $3.4 \mu\text{m}$ ，中心亮斑直径 $0.45 \mu\text{m}$ ($1/e$ 光强点)。

§ 3.5 DMD 阵列的成像

我们建立的成像模型中，整个 DMD 阵列成像的光强分布由所有的单个微镜点成像光强在不同的位置非相干叠加来表征，当移动平台静止时，DMD 阵列的像面光强可用下式来表示：

$$I_i(x, y) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M I_0(n, m) \cdot [\delta(x - nd, y - md) * r(x, y)] \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{W}, \frac{y}{W}\right) \cdot |h(x - nd, y - md)|^2 \quad (3-8)$$

$$(m = 0, 1, 2, \dots, M; n = 0, 1, 2, \dots, N)$$

其中 d 为像素单元的边长， M, N 为 DMD 阵列对应的 x, y 方向的像素个数， δ 函数表征 DMD 阵列的周期性结构， $I_0(n, m)$ 为掩模图形的第 (m, n) 个像素的平均光强， $\text{rect}(x/W, y/W)$ 为限制 DMD 阵列宽度的矩形函数， W 为 DMD 阵列几何宽度， $|h(x - nd, y - md)|^2$ 为系统的强度点扩展函数。

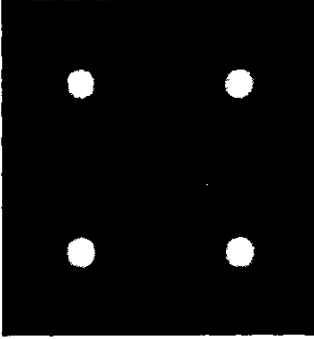


图 3-17 DMD 微镜阵列像面
光强二维分布（2×2，全开）

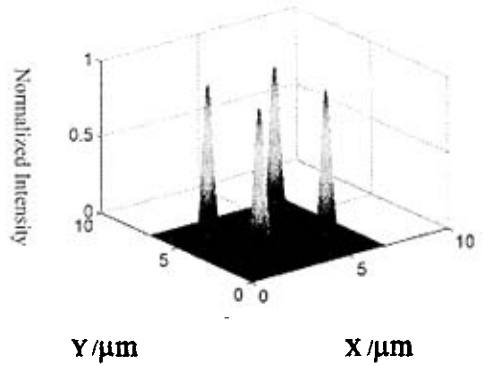


图 3-18 DMD 微镜阵列像面
光强三维分布（2×2，全开）

由图 3-17 及图 3-18 可知，DMD 单个微镜像被聚焦成一个个独立的小光点，需要移动基片平台扫描曝光才能形成连续的曝光量分布。当基片平台扫描曝光时，DMD 阵列像面光强分布可表示为：

$$I_i(x, y, t) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M I_0(n, m) \cdot [\delta(x - nd - vt, y - md - pb) * r(x, y)] \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{W}, \frac{y}{W}\right) \cdot |h(x - nd - vt, y - md - pb)|^2 \quad (3-9)$$

$$(m = 0, 1, 2, \dots, M; n = 0, 1, 2, \dots, N; p = 0, 1, 2, \dots)$$

其中 t 为扫描曝光时间, v 为扫描速度, b 为扫描行间距, p 为 Y 方向扫描步距的次数, 其余参数含义同式 (3-8)。我们将在下一章具体讨论扫描方式, 并给出扫描曝光后微光学元件曝光剂量的模拟结果。

§ 3.6 小结

本章基于 SLM 与 MEMS 技术相结合的数字光刻成像装置, 建立了快速部分相干成像系统模型, 并给出了 DMD 光刻成像的模拟结果。DMD 实时掩模技术不需要制作常规掩模及所需的昂贵设备, 无需套刻, 从而不存在对位误差, 而且费用低廉, 设计灵活性大, 制作周期特别短, 不受限于任何特殊的表面形状, 以及可以对掩模实时修改, 因此 DMD 实时掩模技术具有极为广泛的应用前景。

参考文献:

1. H. G. Craighead. Nanoelectromechanical systems. *Science*, 2000, 290: 1532 .
2. Lars Erdmann, Arnaud Deparnay, Falk Wirth, et al..MEMS based lithography for the fabrication of microoptical components. *SPIE*, 5347:79-84.
3. Kevin J. Kearney and Zoran Ninkov: Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy. *SPIE*, 1996, 3292 :81-92.
4. G.P. Watson, V. Aksyuk , D.M. Tennant. Comparison of tilting and piston mirror elements for 65 nm node spatial light modulator optical maskless lithography. *Journal of Vacuum Science and Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 2004, 22(6):3038-3042.
5. Hand A. Lithography. *Semiconductor International*, 2001, 24(9):44.
6. Rajesh Menon, Amil Patel, David chao, et al.. Zone-Plate-Array Lithography(ZPAL): Optical

- Maskless Lithography for cost-Effective Patterning. *Proc. Of SPIE*, 2005, 5751:330-339.
7. Kin Foong Chan, Zhiqiang Feng, Ren Yang, et al.. High Resolution Maskless Lithography by the Integration of Microoptics and Point Array Technique. *Proc. Of SPIE*, 2003, 4985:37-43.
 8. Wenhui Mei, T. Kanatake, A. Isikawa. Moving Exposure System and Method for Maskless Lithography system. *U.S.A patent* no. 6,379,867 B1.
 9. Frank Bitte, Gerd Dussler, Tilo Pfeifer, G.Frankowski. MicroScan: a DMD based optical surface profiler. *SPIE*, 2000, 4093:309-318.
 10. Ren Yang, Kin Foong Chan, Zhiqiang Feng. Design and Fabrication of Microlens and Spatial Filter Array by self-Alignment. *SPIE*, 2003, 4985:26-35.

第四章 数字光刻扫描方式设计与分析

§ 4.1 引言

一种新技术要走向实用化, 通常需要经历不断完善的过程。因此根据 DMD 实时掩模技术的成像特点, 开展对 DMD 数字光刻系统扫描方式的设计与分析, 对进一步发展 DMD 实时掩模技术具有重要的意义。

本章在已建立 DMD 快速部分相干模型的基础上, 讨论了 DMD 灰度光刻成像原理, 给出了 DMD 制作微光学元件的模拟结果。DMD 数字光刻成像系统结构决定了相邻像素间存在较大间隙, 这将严重影响光刻图形的成像质量, 必须予以消除。且曝光显影过程中存在的许多非线性因素, 也将影响良好面形的生成。因此我们提出采用粗动台上叠加精动台的双层结构工作台, 矢量曝光与光栅扫描曝光相结合的扫描方式消除像素间间隙影响, 并分析了扫描速度、扫描行间距、DMD 帧频对曝光质量及系统运行效率的影响结果。在兼顾成像质量与运行效率的基础上, 提出选取合适的参数扫描曝光, 为数字光刻技术的深入发展提供理论和实验依据。最后, 采用显影阈值法对曝光显影的非线性影响进行预校正, 获得较为满意的结果。

§ 4.2 DMD 灰度光刻成像

§ 4.2.1 DMD 灰度光刻成像原理

在 DMD 灰度光刻成像中, DMD 的灰阶由 DMD 微镜对入射光进行二元脉冲宽度调制获得的。DMD 灰阶掩模继承了传统的灰阶掩模技术优点。对三维面型的连续微结构, 一般是将三维面型转化成灰度(透过率)不同二维掩模, 从而调制各点的曝光强度来形成所需的曝光量分布^[1], 其曝光量可表达为:

$$\phi_{gray}(x, y) = \int_0^T I_i(x, y, t) dt \quad (4-1)$$

式中, $I_i(x, y, t)$ 为 t 时刻基片上曝光强度分布, T 为曝光时间。

§ 4.2.2 数字光刻制作微光学元件方法

基于以上原理和部分相干成像理论模型,我们进行了用 DMD 实时灰阶掩模技术制作微透镜过程的计算机模拟。微透镜及其阵列作为一种非常典型和常用的微光学器件通常是微小化和集成化的光学系统的重要组成部分,在光计算、光信息处理、光通讯等方面有许多重要应用^[2],例如利用微透镜阵列实现灵巧的光束扫描,构成光学形状识别系统^[3],与 CCD 集成提高探测器阵列的填充因子^[4]等。由于微透镜及其阵列具有广泛的应用范围,下面我们采用 DMD 实时灰度光刻技术制作微透镜。微透镜的三维面型函数可表示为:

$$\frac{x^2 + y^2}{R^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1 \quad (0 \leq z \leq h, x^2 + y^2 \leq R^2) \quad (4-2)$$

式中, R 为微透镜的最大口径半径, h 为矢高, 如图 4-1 所示。

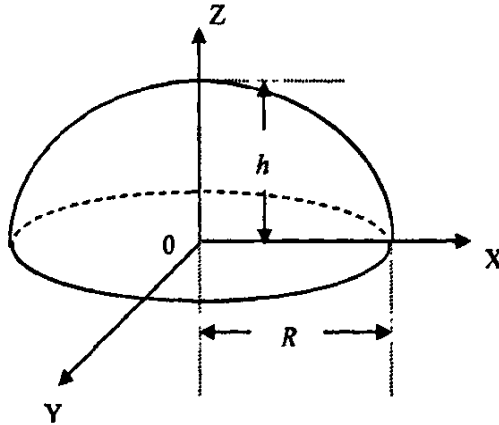


图 4-1 微透镜三维面形示意图

微透镜具有连续的三维面型, 因此需要将三维面型转化成灰度不同的二维掩模, 从而调制各点的曝光强度来形成所需的曝光量分布。

图 4-2 是微透镜理想的曝光剂量分布，图 4-3 是 DMD 显示的微透镜掩模图形。

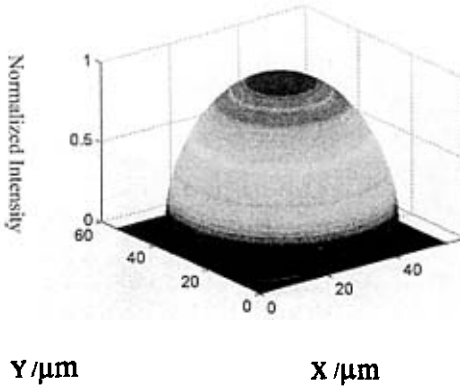


图 4-2 微透镜理想的曝光剂量分布

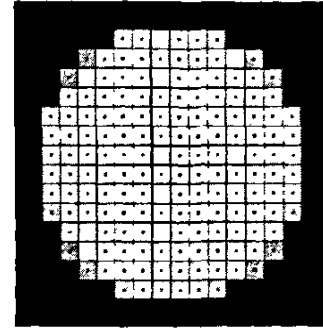


图 4-3 DMD 显示的微透镜掩模图形

图 4-4 及图 4-5 是未扫描曝光基片上的曝光剂量分布曲线，由一系列波峰组成，相邻波峰之间存在较大间隙，需要优化设计扫描方式、扫描速度、系列数字图形幅数、排列间距等来获得最佳曝光剂量分布。

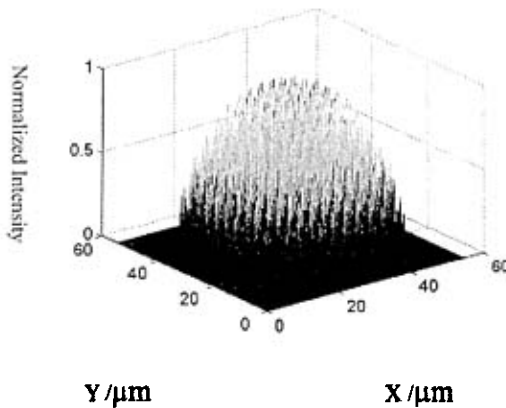


图 4-4 微透镜曝光剂量分布

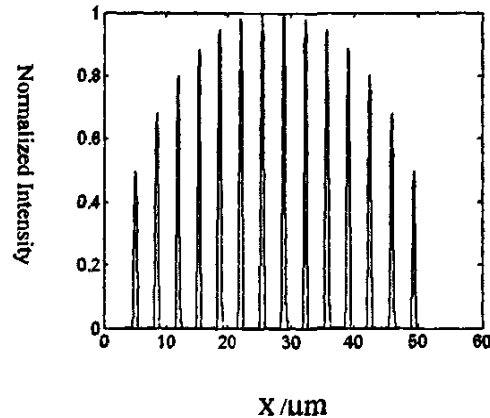


图 4-5 微透镜截面曝光剂量分布曲线

此外，我们还进行了用 DMD 实时掩模制作微轴锥镜及柱透镜过程（未扫描曝光情况下）的计算机模拟。

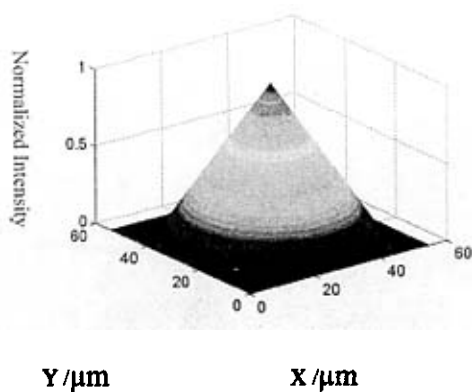


图 4-6 微轴锥镜理想曝光剂量分布

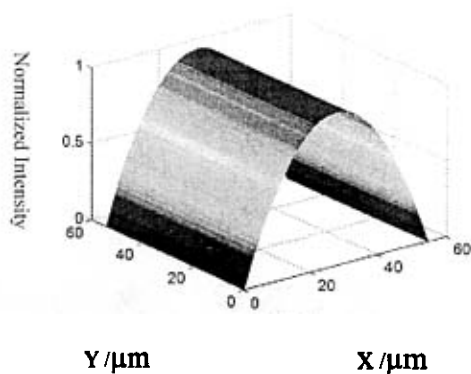


图 4-7 柱透镜理想曝光剂量分布

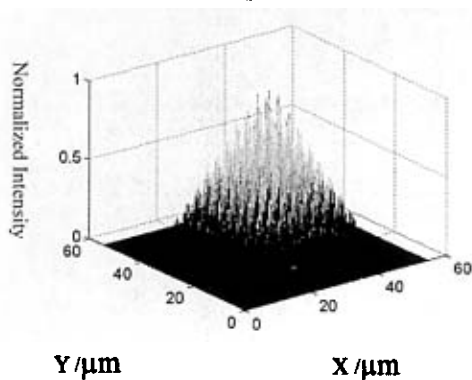


图 4-8 微轴锥镜模拟曝光剂量分布

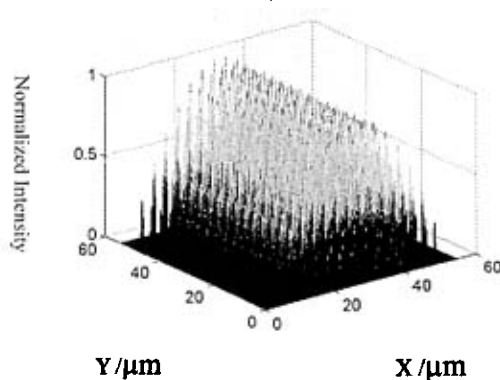


图 4-9 柱透镜模拟曝光剂量分布

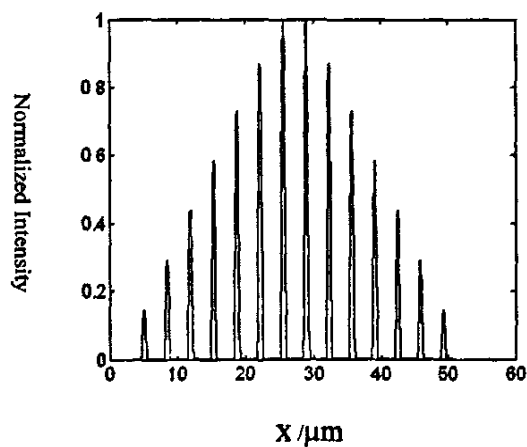


图 4-10 微轴锥镜截面曝光剂量分布曲线

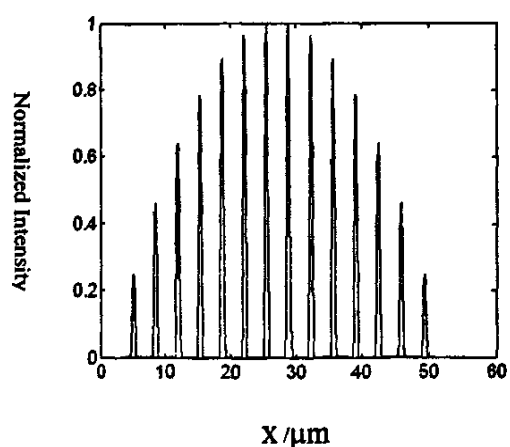


图 4-11 柱透镜截面曝光剂量分布曲线

§ 4.3 相邻像素间间隙的影响

对于相邻像素间间隙的影响,可直接利用数字光刻系统中的二维 X-Y 工作台扫描曝光进行消除。首先介绍二维精密工作台。

§ 4.3.1 二维精密工作台简介

精密工作台作为精密工程中的一种典型结构,在精密加工、精密测试和精密机械中被广泛应用。因此,精密工作台定位控制系统的研究越来越受到人们的重视。国外(如美国、日本等)在微位移控制技术方面研究的比较多,技术已经比较成熟,已研制出行程 50mm、定位精度达 $\pm 0.01\mu\text{m}$ 的精密工作台。国内许多单位(如清华大学、东南大学、长春光机所等)也在从事这方面的工作^[5,6],也已研制出行程在几十至几百微米精密工作台,定位精度达到 $\pm 0.05\mu\text{m}$ 。2003 年,清华大学研制成功了国内第一台纳米级精度的气浮运动工作台,采用高直线度的直线导轨、高性能静压气浮轴承,引进超精密电机、检测等世界一流的关键部件,采取粗动台上叠加精动台的双层结构,开发了超精密运动控制器,在较高的运动速度和加速度及大行程运动条件下,定位精度已经达到 12nm。图 4-12 是清华大学研制的超精密气浮微动台装置图。

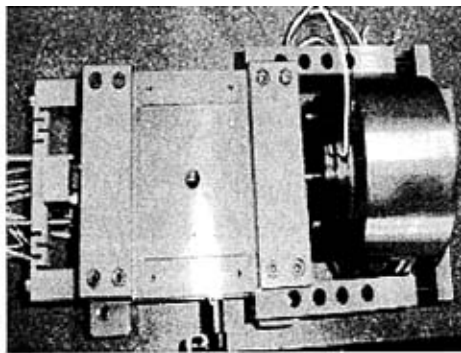


图 4-12 清华大学研制的超精密气浮微动台

§ 4.3.2 系统扫描方式设计

曝光系统可以按其曝光方式分为矢量扫描与光栅扫描曝光^[7]。矢量扫描与光栅扫描的区别在于矢量扫描曝光只在曝光图形部分扫描，而光栅扫描对整个曝光场扫描，但 DMD 只在曝光图形部分处于“开”状态。图 4-13 是两种扫描方式的比较。光栅扫描式曝光机的特点是速度快，但分辨率比较低，因此普遍用于掩模板制作。矢量扫描方式是有图形才扫描，没有图形则不扫描。矢量扫描曝光机一般都有较高的分辨率，但扫描速度要比光栅扫描式低得多。但其高分辨率使这类机器成为纳米图形曝光的有力工具。

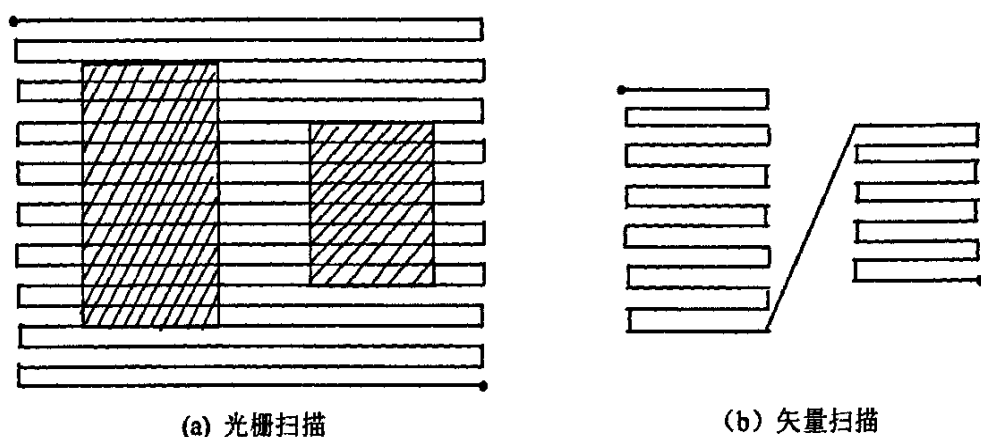


图 4-13 曝光系统扫描方式比较

大面积样品的曝光是通过 DMD 的开合与工作台移动实现的。因此，如果曝光图形大于 DMD 灰度阵列光斑范围，那么一个完整的图形需要由多个曝光场拼接而成。图 4-14 说明了这种图形分割曝光的工作方式。现在的二维扫描工作台，具有很高的定位精度，但拼接误差总是存在的，典型的电子束曝光系统，场拼接误差一般在 30~60 nm。由于我们设计的 DMD 光斑尺寸为 0.8 μm ，因此场拼接误差对于我们制作微光学元件的曝光质量影响不大。

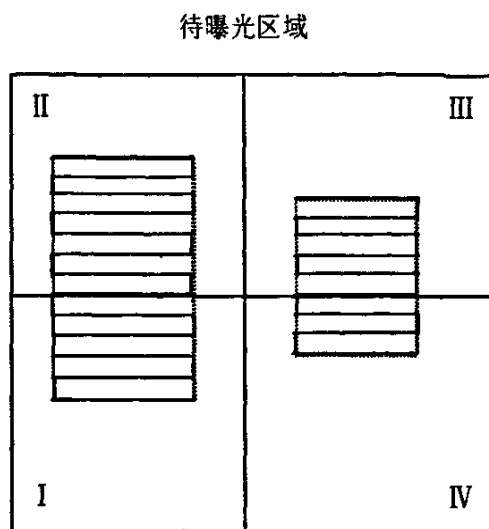


图 4-14 曝光图形按曝光场分割示意图
(I、II、III、IV为该图形跨越的四个曝光场)

§ 4.3.3 实验装置（系统）工作原理

根据 DMD 实时掩模技术的成像特点，我们实验拟采用粗动台上叠加精动台的双层结构纳米级定位精度的气浮工作台，矢量曝光与光栅扫描曝光相结合的扫描方式。其主要技术参数如下：粗动工作台行程 $120\text{mm} \times 120\text{mm}$ ，速度为 100mm/s ，定位精度为 $\pm 1\mu\text{m}$ ；微动工作台被固定在粗动台上， x, y 行程 $\pm 10\mu\text{m}$ ，扫描速度 $1 \sim 10\text{mm/s}$ (典型值)，位置测量分辨率约 10nm ，扫描线定位精度 12nm 。图 4-15 是扫描曝光过程的抽象模型。

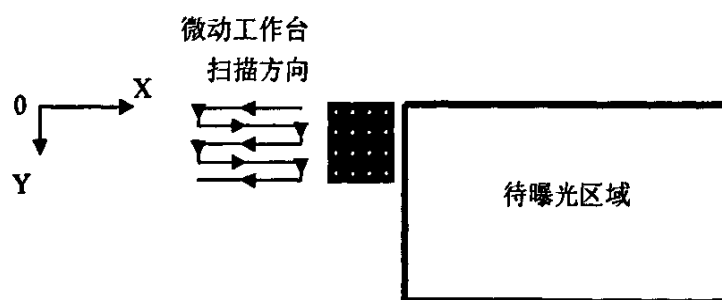


图 4-15 扫描曝光过程的抽象模型

系统工作状态为, 根据 DMD 阵列光斑的大小及微动工作台扫描范围, 将待曝光区域分成若干个小分区 (尽量使 DMD 阵列光斑不重复扫描, 以提高系统的运行效率)。系统位置初始化, 运行微动 x-y 工作平台, 输入第一个分区图像的子图像文件到 DMD 上, 激光照明 DMD, 系统对光刻胶感光。微动平台运行到下一位置, 再输入下一个子图像……, 直到同一个分区所有图形都记录完成。再运行粗动工作台到下一个分区进行图像光刻……, 直到所有分区曝光完成为止。DMD 阵列光斑在每个小分区内进行光栅扫描, 从一个分区到另一个分区以矢量扫描方式移动。微动工作台光刻胶基片上曝光子图像的位置由微动工作台的扫描速度、扫描行间距以及 DMD 的帧频共同决定, 微动工作台的扫描速度和 DMD 的帧频决定了曝光子图像在 X 方向的间距, 扫描行间距决定了曝光子图像在 Y 方向的间距。而每一个分区子图像文件的数字结构可由设计图形的理想曝光剂量预先设置储存, 通过计算机 (使用灵活 DMD 控制器或标准 DLP 数字视频格式程序) 控制切换, 且保证与工作台位置精确同步。

在扫描曝光过程中, 使用连续激光器, 输出功率为 P , DMD 阵列光斑宽度 L 为定值, 工件台以匀速 v 经过光斑, 曝光场中第 i 点的曝光剂量:

$$D_i = \frac{\eta PL}{Av} \quad (4-3)$$

其中, η 为光学系统的传输效率, A 为 DMD 阵列光斑的等效面积。

如果使用脉冲激光器, 重复频率为 f , 则曝光场中每个点经过光斑阵列时接受的激光脉冲个数为:

$$N = fL/v \quad (4-4)$$

曝光场中第 i 点获得的总能量即为其曝光剂量:

$$D_i = \frac{\eta}{A} \sum_{k=1}^N E(k) \quad (4-5)$$

其中, N 为脉冲个数, $E(k)$ 为第 k 个激光脉冲的单脉冲能量。

§ 4.3.4 模拟结果及分析

下面,我们模拟微透镜通过基片平台扫描曝光后的曝光剂量分布。如图 4-16 所示,待曝光区域是微透镜理想曝光剂量分布,图 4-17 是根据 DMD 扫描阵列光斑尺寸划分的四个小分区。(其中周围像素不足的地方用零像素扩充)

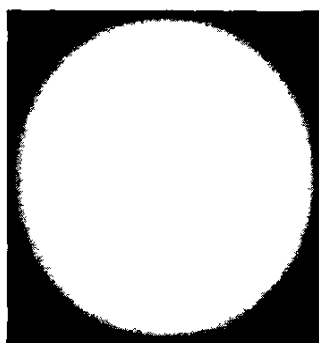


图 4-16 微透镜理想曝光剂量

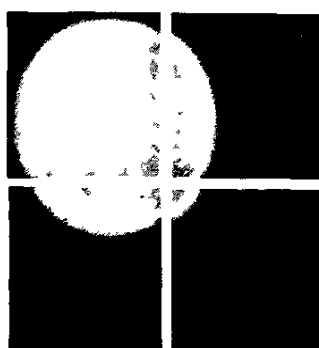


图 4-17 微透镜曝光区域的四个小分区

模拟参数如下:采用 2×2 DMD 阵列光斑扫描,其面积为 $6.8 \mu\text{m} \times 6.8 \mu\text{m}$,单个光斑直径 $0.45 \mu\text{m}$ ($1/e$ 光强点),微透镜直径 $12.8 \mu\text{m}$,焦距 $20.3 \mu\text{m}$ 。每个小分区面积为 $10.2 \mu\text{m} \times 10.2 \mu\text{m}$ 。扫描速度 1mm/s ,扫描行间距 $0.4 \mu\text{m}$,DMD 的帧频 2500 frame/s 。

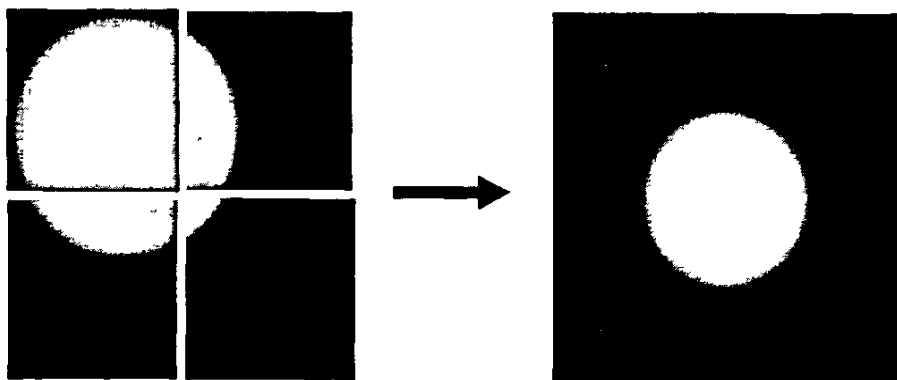


图 4-18 微透镜曝光剂量二维分布

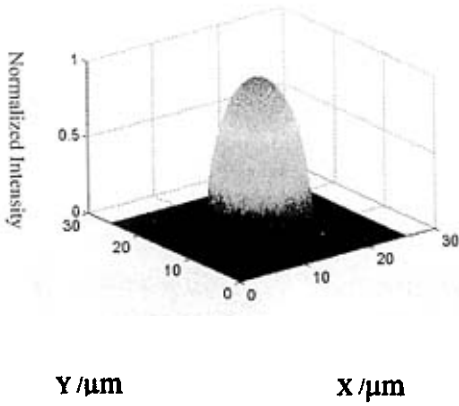


图 4-19 微透镜曝光剂量三维分布

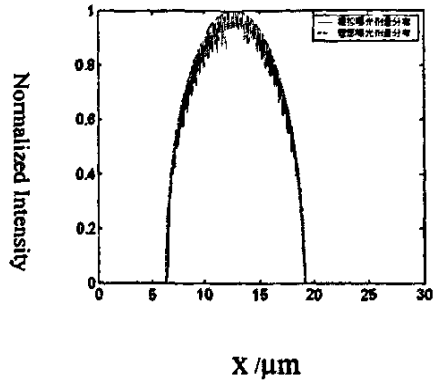


图 4-20 微透镜曝光剂量
截面分布曲线

通过以上模拟结果可以看出，经过二维精密工作台扫描曝光后，相邻像素间的间隙消除，曝光能量明显匀化。此外，我们还模拟了轴锥镜、柱透镜扫描后的曝光剂量分布。

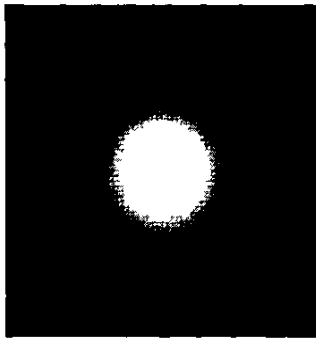


图 4-21 轴锥镜曝光剂量二维分布

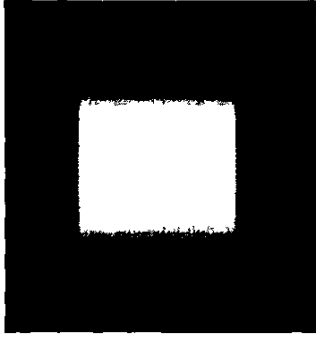
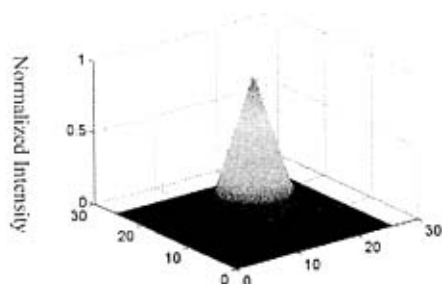


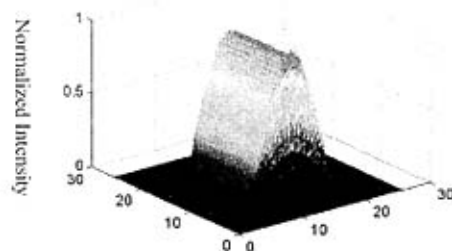
图 4-22 柱透镜曝光剂量二维分布



Y/μm

X/μm

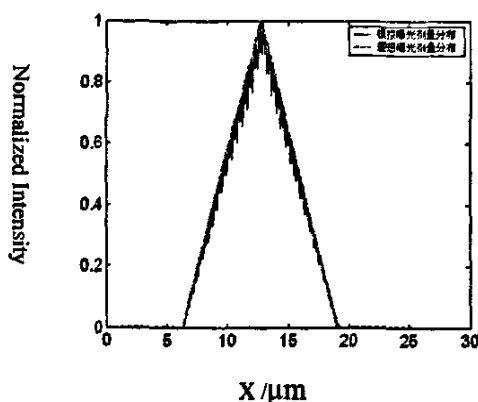
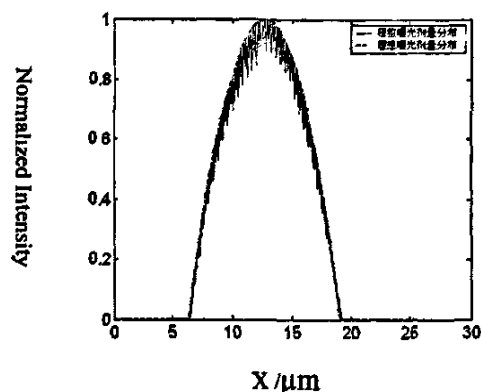
图 4-23 轴锥镜曝光剂量三维分布



Y/μm

X/μm

图 4-24 柱透镜曝光剂量三维分布

图 4-25 轴锥镜曝光剂量
截面分布曲线图 4-26 柱透镜曝光剂量
截面分布曲线

微动工作台的扫描速度，扫描行间距以及 DMD 的帧频共同决定的微动工作台上曝光子图像的位置将直接影响最终曝光质量。下面我们以微透镜为例，具体分析这些参数对曝光剂量分布的影响结果。

§ 4.3.5 扫描行间距对曝光质量的影响

扫描行间距决定了曝光子图像在 Y 方向的间距，图 4-27 是扫描速度及 DMD 帧频一定，扫描行间距不同的情况下，微透镜曝光剂量的二维分布。模拟参数如下：扫描速度 0.5mm/s，DMD 帧频 1250 frame/s。从模拟结果可以看出，随着扫描行间距的减小，曝光能量在 Y 方向逐渐匀化，相邻像素间间隙消除。下

面以均方差为判据, 分析比较不同参数扫描曝光情况下微透镜曝光剂量的分布结果。定义均方差:

$$rms = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (A_i - A'_i)^2}{n}} \quad (4-6)$$

其中, A_i 为理想曝光剂量分布, A'_i 为扫描后曝光剂量分布的模拟结果, n 为抽样点数。

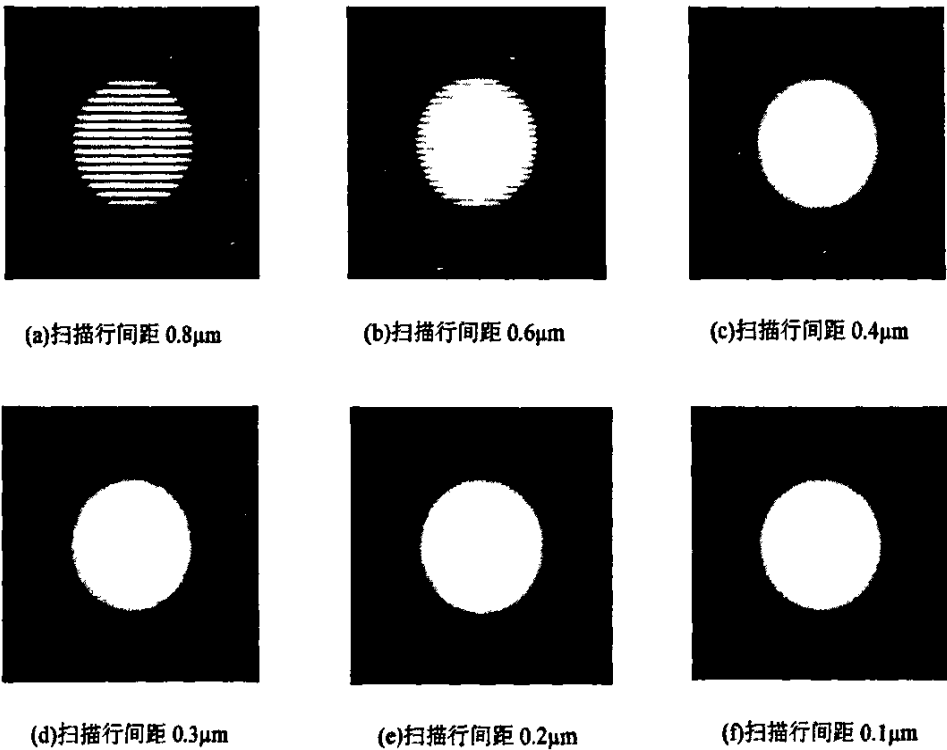


图 4-27 扫描速度及 DMD 帧频一定, 不同扫描行间距的情况下
微透镜曝光剂量的二维分布

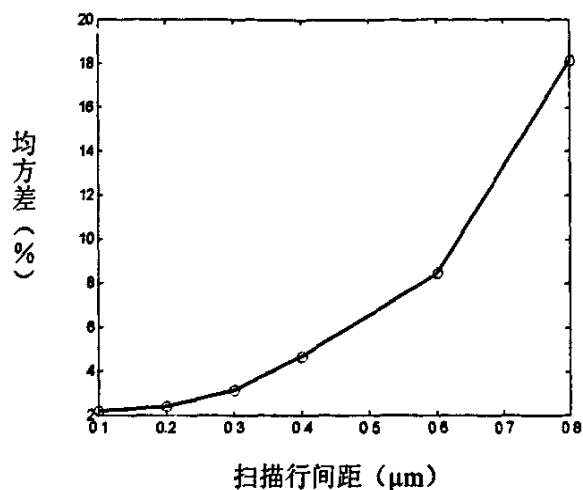


图 4-28 不同扫描行间距情况下微透镜曝光剂量的均方差

图 4-28 为不同扫描行间距情况下，微透镜曝光剂量的均方差。随着扫描行间距的减小，均方差也逐渐减小。因此选择较小的扫描行间距，可以得到曝光质量较好的光刻图形。但是扫描行间距的减小会增加扫描曝光的时间，降低系统的运行效率。因此在上述模拟参数情况下(扫描速度 0.5mm/s , DMD 帧频 1250 frame/s)，选择扫描行间距 $0.4\sim 0.5\mu\text{m}$ ，既能有效消除相邻像素间间隙，也使系统保证了一定的运行效率。

§ 4.3.6 扫描速度对曝光质量的影响

图 4-29 是扫描行间距及 DMD 帧频一定，不同扫描速度情况下，微透镜曝光剂量的二维分布。其中，扫描行间距为 $0.5\mu\text{m}$ ，DMD 帧频 2000 frame/s 。当扫描行间距及 DMD 帧频一定时，扫描速度越小，微透镜在 X 方向曝光质量越好。图 4-30 反映了不同扫描速度情况下微透镜曝光剂量的均方差。这里我们选择扫描速度 $0.6\sim 0.8\text{mm/s}$ ，可以得到能量较均匀的曝光图形，也使系统保证了一定的运行效率。

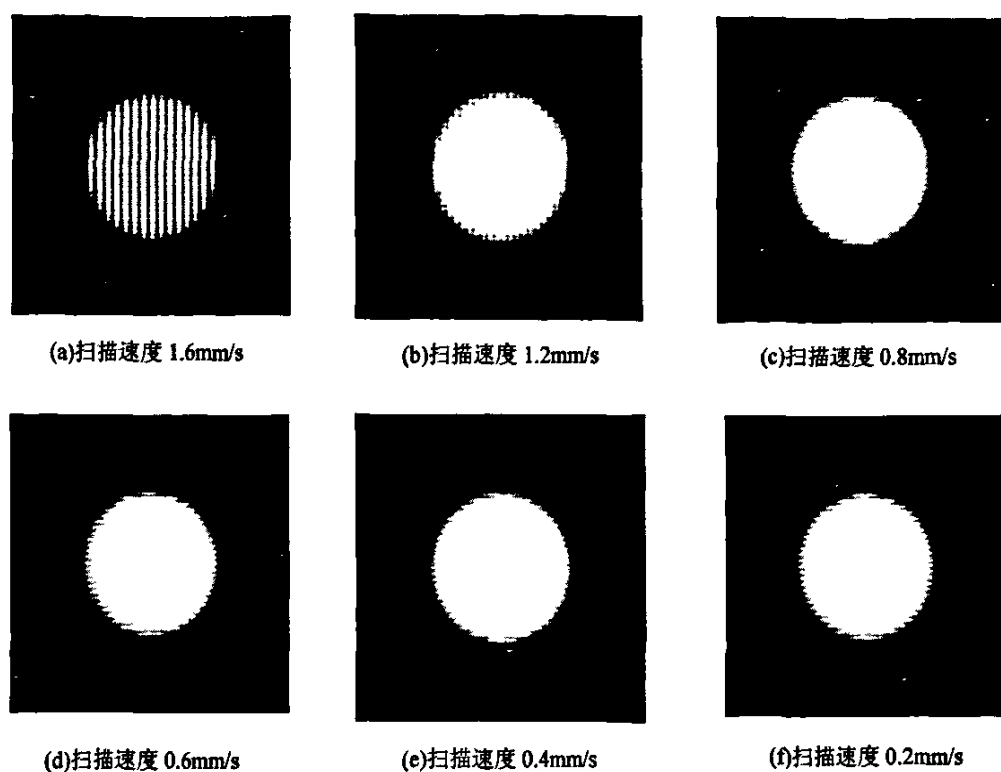


图 4-29 扫描行间距及 DMD 帧频一定，不同扫描速度情况下微透镜曝光剂量的二维分布

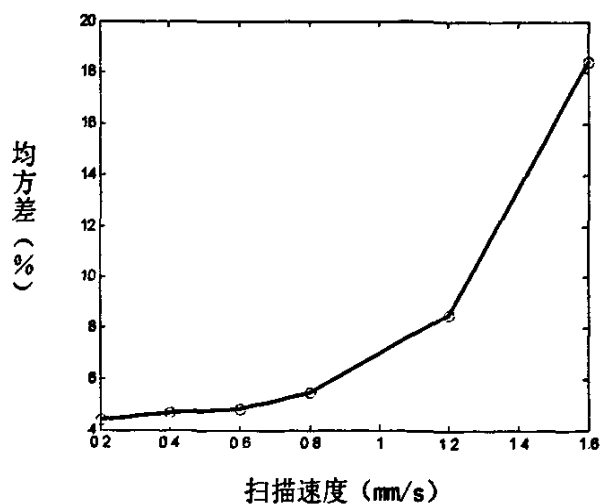


图 4-30 不同扫描速度情况下微透镜曝光剂量的均方差

§ 4.3.7 DMD 帧频对曝光质量的影响

图 4-31 是扫描行间距及扫描速度一定，不同 DMD 帧频情况下，微透镜曝光剂量的二维分布。其中，扫描行间距为 $0.3\mu\text{m}$ ，扫描速度 0.8mm/s 。当扫描行间距及扫描速度一定时，随着 DMD 帧频的增加，微透镜在 X 方向曝光质量越好。图 4-32 是不同 DMD 帧频情况下微透镜曝光剂量的均方差，当 DMD 的帧频大于 2000 frame/s 时，微透镜的曝光质量较好。但 DMD 的帧频受数据传输容量的限制，通常最高为 5000 frame/s （使用灵活控制器可达 9700 frame/s ），同时 DMD 帧频的增加也会增加写入储存的数据量，因此应根据扫描行间距及扫描速度的具体数值选择合适的 DMD 帧频。

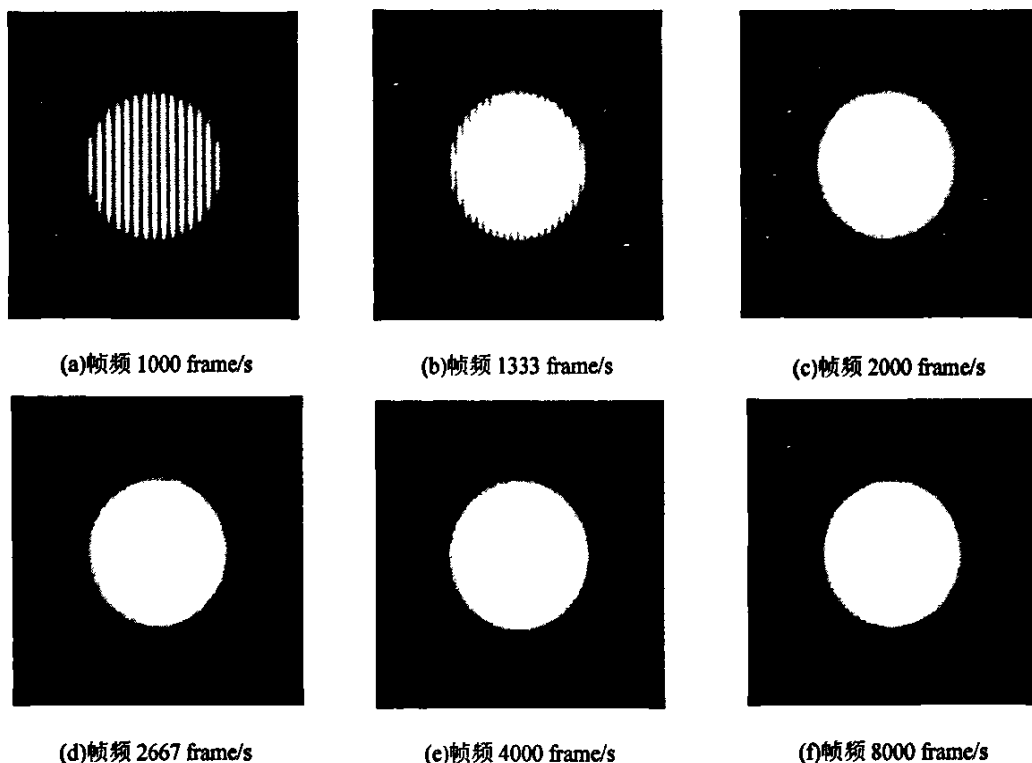


图 4-31 扫描行间距及扫描速度一定，不同 DMD 帧频情况下微透镜曝光剂量的二维分布

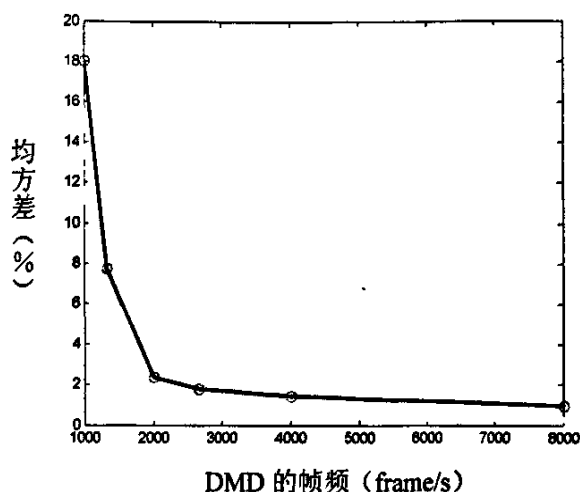


图 4-32 不同 DMD 帧频情况下微透镜曝光剂量的均方差

§ 4.3.8 扫描速度、扫描行间距以及 DMD 的帧频对曝光质量的共同作用结果

我们已分别讨论了扫描行间距、扫描速度及 DMD 帧频对曝光质量的影响，事实上，由微动工作台的扫描速度、扫描行间距以及 DMD 的帧频共同决定了微动工作台光刻胶基片上曝光子图像的扫描步距。其中，微动工作台的扫描速度和 DMD 的帧频决定了曝光子图像在 X 方向的间距，扫描行间距决定了曝光子图像在 Y 方向的间距。一般说来，总是希望每个小分区相邻曝光子图像排列尽可能紧密，这样将越逼近设计的理想曝光能量。在扫描曝光过程中，保证 DMD 传输的灰度图像与工作台位置精确同步。在扫描速度一定的情况下，DMD 帧频越高，曝光子图像在 X 方向排列越紧密；在 DMD 帧频一定的情况下，扫描速度越小，曝光子图像在 X 方向排列越紧密。但 DMD 的帧频受数据传输容量的限制，通常最高为 5000 frame/s（使用灵活控制器可达 9700 frame/s），扫描速度的典型值为 1~10mm/s，如果扫描速度太小，将会降低整个系统的运行效率，因此合理控制扫描速度和 DMD 的帧频对曝光质量至关重要。且在扫描速度及 DMD 帧频均一定的情况下，扫描线行间距越小，曝光子图像在 Y 方向排列越紧密，曝光质量越好，但扫描间距的减小也会降低系统的运行效率。图 4-33、

4-34、4-35 是在扫描速度一定, 不同 DMD 帧频及扫描行间距的情况下, 微透镜曝光剂量的模拟分布图, 其中扫描速度为 0.5mm/s 。

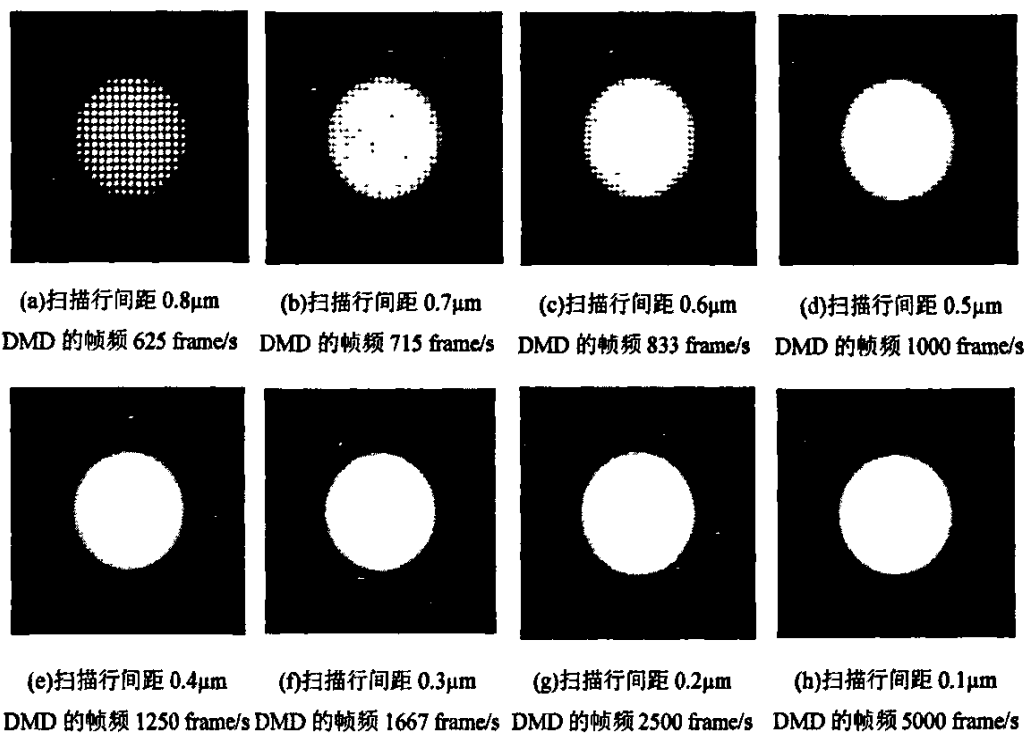
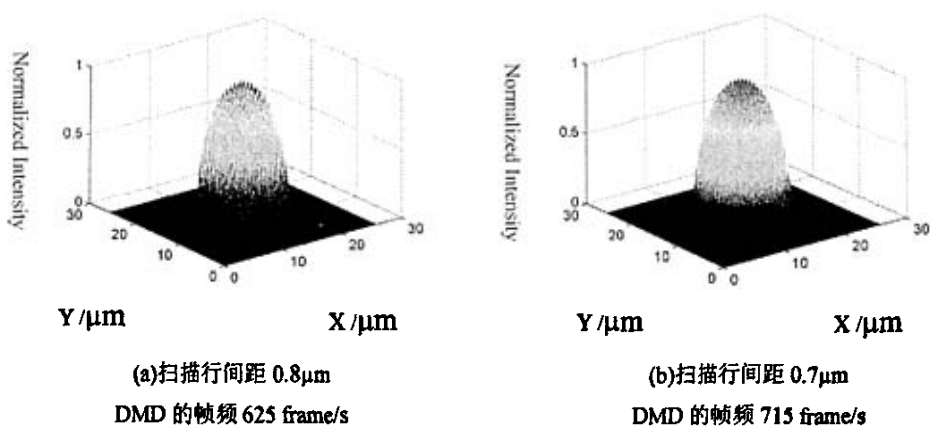
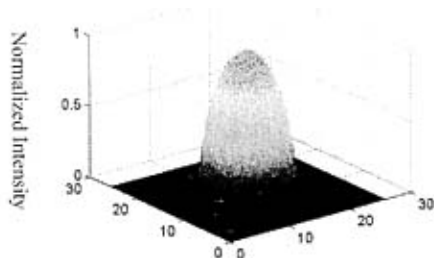
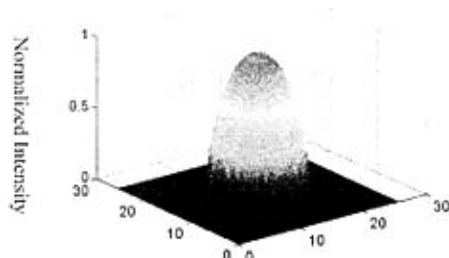


图 4-33 扫描速度一定、不同 DMD 帧频及扫描行间距的情况下
微透镜曝光剂量的二维分布

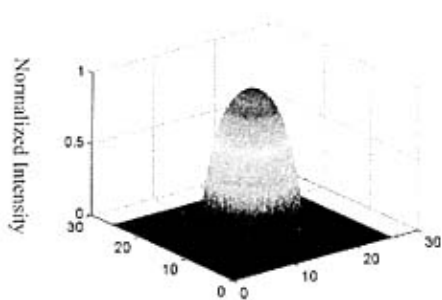


Y/ μm X/ μm (c)扫描行间距 $0.6\mu\text{m}$

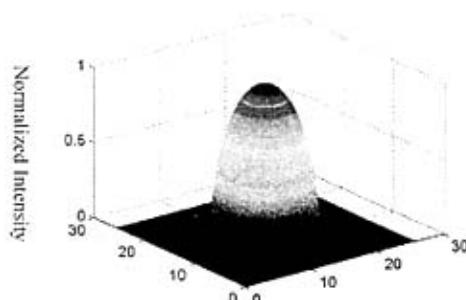
DMD 的帧频 833 frame/s

Y/ μm X/ μm (d)扫描行间距 $0.5\mu\text{m}$

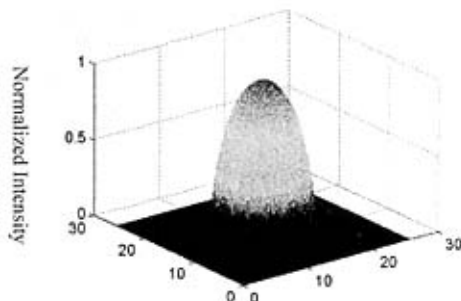
DMD 的帧频 1000 frame/s

Y/ μm X/ μm (e)扫描行间距 $0.4\mu\text{m}$

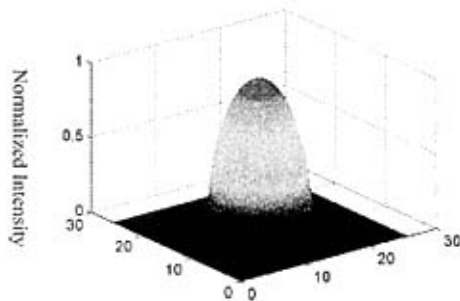
DMD 的帧频 1250 frame/s

Y/ μm X/ μm (f)扫描行间距 $0.3\mu\text{m}$

DMD 的帧频 1667 frame/s

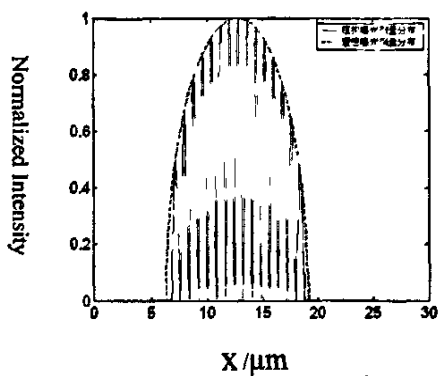
Y/ μm X/ μm (g)扫描行间距 $0.2\mu\text{m}$

DMD 的帧频 2500 frame/s

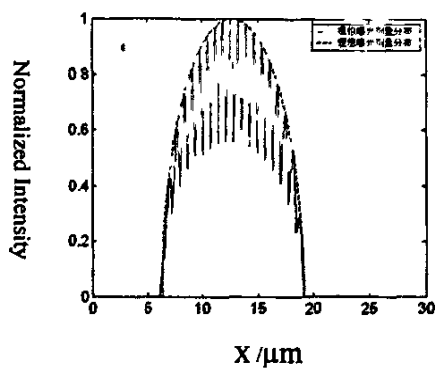
Y/ μm X/ μm (h)扫描行间距 $0.1\mu\text{m}$

DMD 的帧频 5000 frame/s

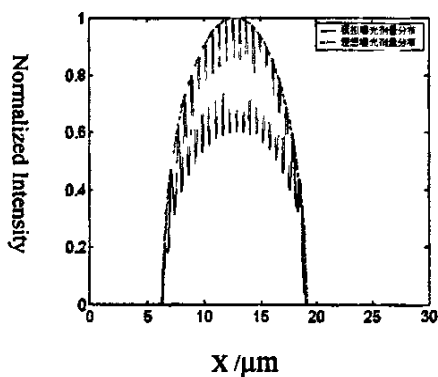
图 4-34 扫描速度一定、不同 DMD 帧频及扫描行间距的情况下
微透镜曝光剂量的三维分布



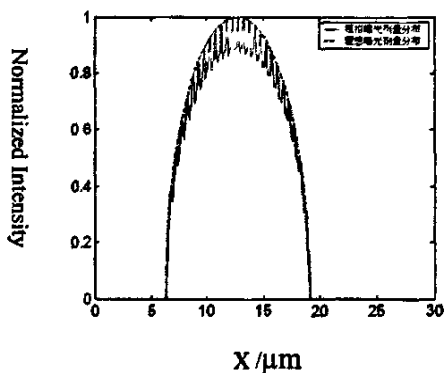
(a)扫描行间距 $0.8\mu\text{m}$
DMD 的帧频 625 frame/s



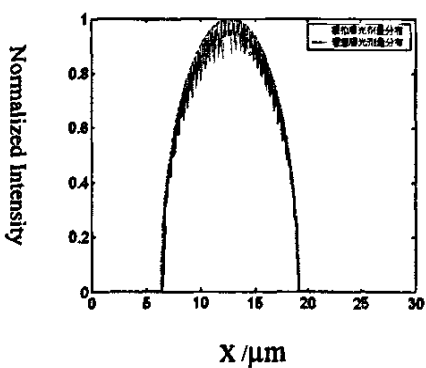
(b)扫描行间距 $0.7\mu\text{m}$
DMD 的帧频 715 frame/s



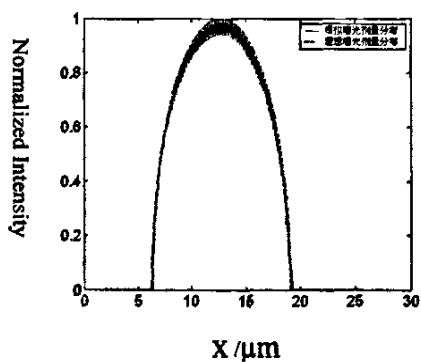
(c)扫描行间距 $0.6\mu\text{m}$
DMD 的帧频 833 frame/s



(d)扫描行间距 $0.5\mu\text{m}$
DMD 的帧频 1000 frame/s



(e)扫描行间距 $0.4\mu\text{m}$
DMD 的帧频 1250 frame/s



(f)扫描行间距 $0.3\mu\text{m}$
DMD 的帧频 1667 frame/s

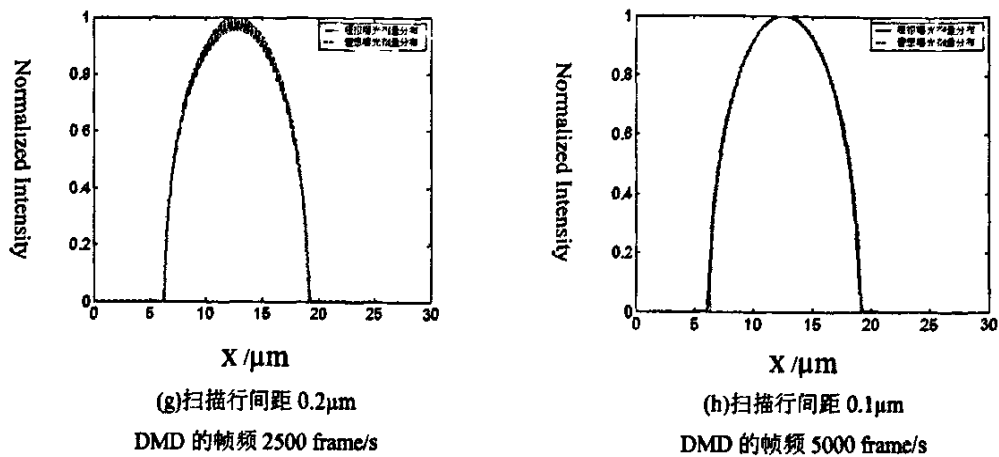


图 4-35 扫描速度一定、不同 DMD 帧频及扫描行间距的情况下
微透镜曝光剂量截面分布曲线

以上模拟的八种情况，扫描速度，扫描行间距以及 DMD 的帧频决定了每个曝光分区相邻子图像之间在 XY 方向上的间距(即扫描步距)依次为 0.8μm，0.7μm，0.6μm，0.5μm，0.4μm，0.3μm，0.2μm 和 0.1μm。

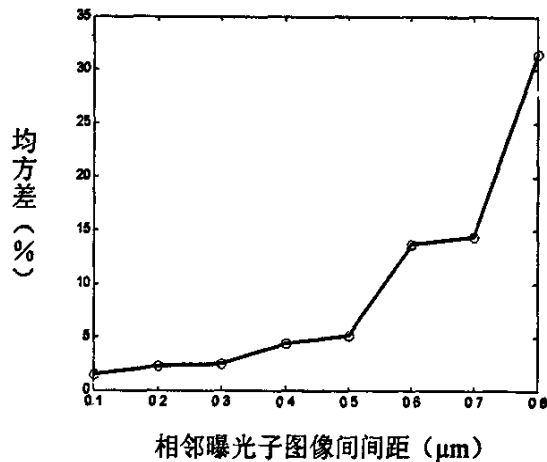


图 4-36 相邻曝光子图像间不同间距情况下微透镜曝光剂量的均方差

图 4-36 给出了相邻曝光子图像间不同间距情况下,微透镜曝光剂量的均方差。随着相邻曝光子图像间间距的增加,均方差不断增大。但当间距小于 $0.5\mu\text{m}$ 时,均方差较小。因此在误差精度允许的范围内,应当选择较大的扫描速度及扫描行间距,以提高系统的运行效率。一般说来,微光学元件可以实现理想分布形式的程度受限于光斑直径 D ($1/e$ 光强点)、扫描步距 a 以及扫描行间距 b ,通过以上分析可知,当 $a \leq D$ 且 $b \leq D$ 时,能够得到满意的结果。

§ 4.3.9 系统运行效率评价

我们提出的使用电寻址空间光调制器 DMD,采用激光并行直写和实时掩模技术形成的数字光刻成像系统,是逐个图形曝光的直写系统,能有效提高图像光刻时的运行效率。对于分辨率为 1024×768 的 DMD,30 倍精缩,只需几分钟即可对约 6mm^2 大小的灰度掩模一次成形,且分辨率能达到亚微米级,大大提高了微光学元件的掩模制作速度。对于表面浮雕结构复杂的微光学器件,可通过计算机控制实时更换掩模,由多张掩模实现复杂结构的掩模加工,解决了二元光学套刻对准的难题,增加了掩模板制作的灵活性。另外,实时更换掩模技术还可用于高台阶数灰度掩模加工,提高了器件的衍射效率。

而逐点曝光式的激光直写系统,由于其曝光方式为顺序式,因此其产出率无法与 DMD 数字光刻成像系统相比(DMD 数字光刻成像系统是并行式,即掩模板上的所有图形一次成像到样品上),当焦斑大小为 $1.5\mu\text{m}$ ($1/e$ 光强点)、扫描线间距为 $1\mu\text{m}$ 和写入速度为 10mm/s 时,完成 10mm 圆片的曝光需要 $2 \sim 3\text{h}$,可见其写入速度非常慢。如果光刻更大面积,时间消耗将更大,系统的运行效率很低。

§ 4.4 曝光显影的非线性影响

在以上的模拟结果当中,我们都是假定曝光量与刻蚀深度之间存在线性关系,然而三维微结构的曝光量与刻蚀深度的关系是非线性的。在实时掩模技术中,由于增加了时间这个自由度,不仅可以形成所需的曝光量分布,还可以方便的通过掩模预校正曝光显影的非线性。其优化设计的原理是,由于光敏层某点的刻蚀的深度决定于其曝光量,而曝光量的多少在实时掩模技术中可以由时

间来调节。下面我们使用显影阈值法^[8]来优化设计曝光量。显影阈值法的原理^[8]如下：在任何条件下，正性光致抗蚀剂的显影速率必然随着曝光量 Q 的减小而逐步减小。当曝光剂量小于某一定值 Q_0 时，抗蚀剂的显影深度为 0，同时抗蚀剂的显影速率也为 0，定义 Q_0 为光刻材料的显影阈值。曝光光强在胶层中的传播规律可近似表示为：

$$I(x, h) = I(x, 0) \exp(-\alpha h) \quad (4-7)$$

其中， I 为胶层中的光强， I_0 为胶面上光强， α 为材料的吸收系数， h 为胶层的厚度。光致抗蚀剂内部的曝光量可表述为：

$$\begin{aligned} Q(x, y_0) &= I(x, y_0)t = I(x, 0)t \exp(-\alpha y_0) \\ &= Q(x, 0) \exp(-\alpha y_0) \end{aligned} \quad (4-8)$$

式中， $Q(x, 0)$ 为抗蚀剂表面的曝光量分布。根据光刻材料的显影阈值特性，当 $Q(x, y_0) = Q_0$ 时，对应光致抗蚀剂内部 (x, y_0) 处的显影速率 v 近似为 0。如果调节抗蚀剂表面的曝光量分布，可以使抗蚀剂内部某一曲面处的曝光量等效于显影阈值 Q_0 。则显影过程中，微浮雕面形必趋于这一稳定曲面。

设要刻蚀的目标浮雕面形为 $y(x)$ ，所用抗蚀剂显影阈值为 Q_0 ，则抗蚀剂表面所需的曝光剂量分布为

$$Q(x, 0) = Q_0 \exp[\alpha y(x)] \quad (4-9)$$

由公式(4-9)可知，已知抗蚀剂的吸收系数及显影阈值，对于不同的显影深度可以求出其表面所需的曝光剂量。对抗蚀剂 AZ4620，吸收系数 α 为 0.03，显影阈值 Q_0 为 $20\text{mJ}/\text{cm}^2$ 。下面我们以矢高 $5\mu\text{m}$ 的微透镜为目标浮雕面形，采用 AZ4620 作为光致抗蚀剂材料，对曝光剂量分布进行优化设计。图 4-37 及 4-38 给出了微透镜曝光剂量分布的优化设计结果。

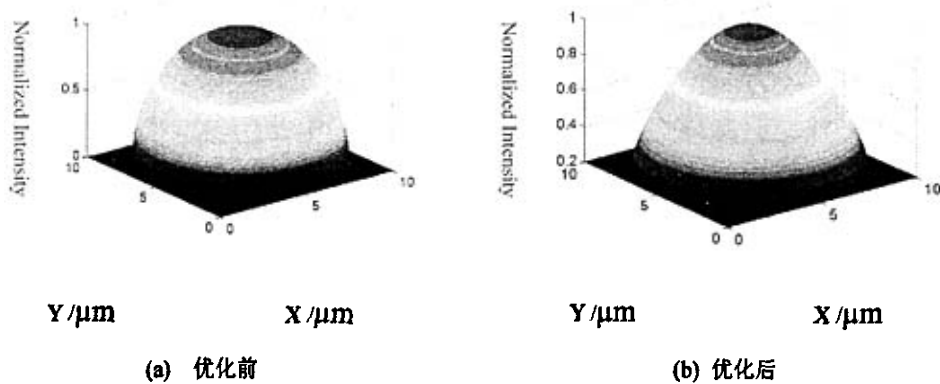


图 4-37 微透镜优化前后曝光剂量分布图

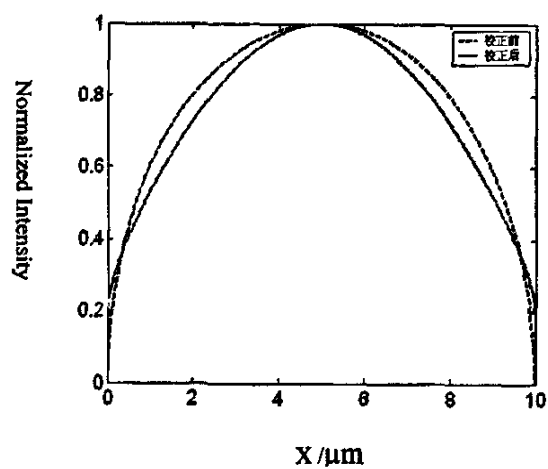


图 4-38 微透镜优化前后截面曝光剂量分布

采用 Mack 显影模型^[9]模拟微透镜曝光剂量优化前后显影轮廓分布。图 4-39 给出了曝光剂量优化前后抗蚀剂的显影轮廓分布曲线。

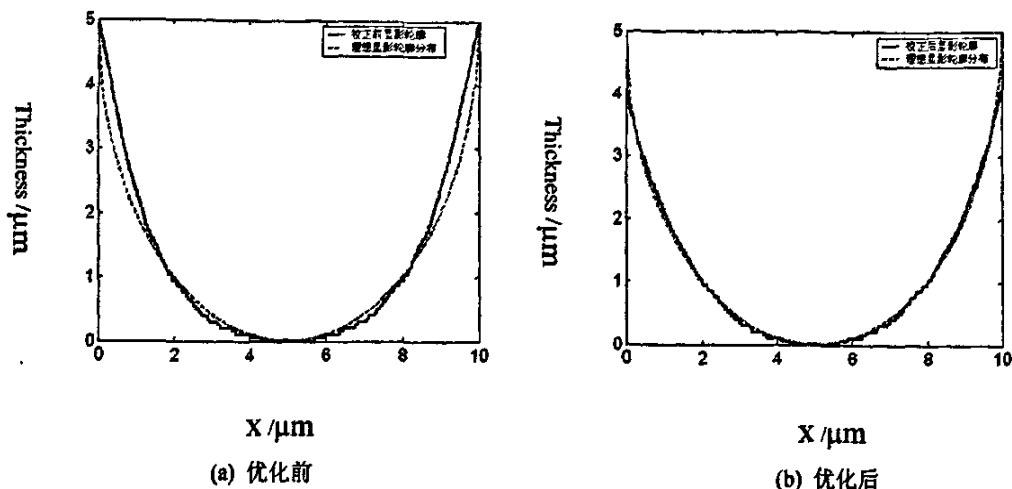


图 4-39 微透镜显影轮廓分布曲线

微透镜矢高 $5\mu\text{m}$ ，优化前均方差 rms 为 $\pm 0.661\mu\text{m}$ ，优化后均方差为 $\pm 0.195\mu\text{m}$ ，可见优化后的结果有较大改善。

§ 4.5 小结

本章针对 DMD 在微光学元件制作中存在的相邻像素间间隙影响，提出采用基片工作台扫描曝光匀化能量，并详细讨论了系统的结构及工作原理，给出了微光学元件的优化设计结果。通过分析扫描行间距、扫描速度及 DMD 帧频对曝光质量的影响结果，提出合理调控微动工作台的扫描速度、扫描行间距及数字图形幅数、灰度结构和图形排列间距，不但能有效消除相邻像素间间隙，匀化曝光能量，还可以提高整个系统的运行效率，为数字光刻技术的深入发展提供理论和实验依据。最后采用显影阈值法对曝光显影的非线性进行预校正，结果证明此方法能较好补偿非线性因素带来的制作偏差。

参考文献：

11. Qinjun Peng, Shijie Liu, Yongkang Guo, et al. Real-time Photolithographic Technique for

- Fabrication of Arbitrarily Shaped Micro structure. *Optics Engineering*, 2003, 42(2): 477-481.
12. W. B. Veldkamp. Overview of Microoptics Past, Present, and Future. *SPIE*, 1991, 1544: 287.
13. W. Goltsov and M. Holz. Agile beam steering using binary optics microlens arrays. *Opt. Eng.*, 1990, 29: 1392.
14. N. Davies, M. McCormick. Three Dimensional Optical Transmission And Micro Optical Elements. *SPIE*, 1993, 1992: 247.
15. 李江国等. 小型精密 X-Y 工作台误差的理论分析及补偿. *光学精密工程*, 1995, 3(4): 87-92.
16. 韩良等. 精密可控误差补偿微位移器试验研究. *压电与声光*, 1993, 15(6): 40-44.
17. 崔铮. 微纳米加工技术及其应用. 高等教育出版社, 2005, 83-93.
18. 董小春, 杜春雷. 精确控制大数值孔径微透镜列阵面形的显影阈值方法. *光学学报*, 2004, 24(7): 869-872.
19. Mack C A. Development of positive photoresists. *Journal of the Electrochemical Society*, 1987, 134(1): 148-152.

第五章 总 结

近年来,微光学在设计理论和制作方法等方面取得了长足的发展,并在航天、光通信、光计算、光信息处理、激光加工等领域获得了广泛应用。为了进一步扩大微光学的应用领域,对其制作方法也就提出了许多新的要求,研究实时、快速、方便、有效的微光学元件制作方法是目前微光机电系统制作技术发展的一个重要趋势。

本论文以研究微结构的制作新技术为目标,基于 DMD 和 MEMS 技术相结合的数字投影成像装置,提出可快速、并行、灵活地制作微光学元件的 DMD 实时灰度光刻新方法。深入研究 DLP 产生的系列灰度图形在光刻过程中的成像机理,确定实时掩模和扫描曝光系统的技术要求,同时研究了曝光显影的非线性影响,优化设计了微光学元件。本论文的主要工作:

1. 根据 DMD 实时掩模技术的特点,提出可快速、并行、灵活地制作微光学元件的 DMD 实时灰度光刻新方法。这对促进微光学和微结构制作技术的发展具有重要的理论意义。
2. 讨论了数字光刻成像的原理和方法,基于 DMD 和 MEMS 技术相结合的数字投影成像装置,建立了全新、实用的部分相干理论模型描述数字光刻的成像过程。
3. 基于优化设计基片曝光剂量分布的波前工程思想,提出合理调控扫描速度、扫描行间距、数字图形幅数、灰度结构和图形排列间距的系列数字图形设计方法。在兼顾成像质量与运行效率的基础上,提出当扫描步距及扫描行间距约等于光斑直径 ($1/e$ 光强点) 时,能获得较为满意曝光质量,这对下一步实验工作的展开具有指导意义。

微结构的制作技术的研究和发展是一项长期的和跨学科研究工作,其目标是向特征尺寸更小、性能更高,面形更好的方向而奋斗。本论文作为一项应用型基础研究,所做的一些工作还有很多不完善之处。比如,针对数字光刻高数据传输率的要求,在兼顾成像质量的基础上,一体化系列数字图形优化设计的新方法还需要完善,以及搭建数字光刻实验装置开展实验研究等。作者期望,本文能起到一种抛砖引玉的作用,为光刻技术的进一步发展做出一定的贡献。

最后，由于作者水平有限，不妥和谬误之处在所难免，恳请批评指正，谢谢！

附录一：攻硕期间发表的文章

1. 段蓓, 姚欣, 陈铭勇, 马延琴. “用改进曝光模型模拟厚胶显影轮廓”. 光电工程, 2006, 33 (4): 50-54.
2. 刘世杰, 杜惊雷, 段蓓, 罗铂靛, 唐雄贵. “厚层抗蚀剂曝光模型及其参数测量”. 半导体学报, 2005, 26 (5): 1065—1071.
3. LIU Shijie, DU Jinglei, DUAN XI, et al. “Enhanced dill exposure model for thick photoresist lithography”. Microelectronic Engineering, 2005, 78-79(1-4): 490-495.
4. 刘建莉, 高峰, 杜惊雷, 罗铂靛, 段蓓. “用于分数傅立叶域滤波位相元件设计新算法”. 光电工程, 2005, 32 (3): 54—57.
5. LIU Chi, Guo Xiaowei, Gao Fuhua, Luo Boliang, Duan Xi, Du Jinglei. “Imaging simulation of maskless lithography using a DMD [trademark]”. Proceedings of SPIE, 2005, 5645:307-314.

附录二：参加的科研项目和获得的奖励

参加的科研项目：

1. 国家自然科学基金“数字光刻技术研究”
2. 国家自然科学基金“厚层光致抗蚀剂光刻术研究”
3. 国家重点实验室基金“厚胶光刻成像特性研究”
4. 国家重点实验室基金“厚层抗蚀剂曝光显影参数测量”
5. 国家自然科学基金“部分相干分数域滤波及提高光刻分辨力新方法研究”

获得的奖励：

荣获 2004-2005 学年优秀硕士一等奖学金

致 谢

本文是在我的导师杜惊雷教授的悉心指导下完成的,论文的选题、理论、实验指导以及修改、定稿,每一项工作都凝聚了杜老师的心血和汗水。杜老师渊博的学识、严谨的治学态度、正直宽容的为人和高度的工作责任感等都给予我深刻的感受,并潜移默化地影响着我对生活、工作和学习的态度,让我终生受益!

在我读研期间,四川大学物理学院郭永康教授,给予了很多至关重要的关怀和帮助,特别是在学习、科研及毕业论文指导方面,他倾注了大量的心血。先生诲人不倦的治学态度,谦虚宽厚的为人典范以及一丝不苟的工作作风给我留下了深刻的印象,让我受益无穷,在此表示真挚的感谢。

在我攻读硕士的三年里,本实验室的朱建华老师、张怡霄老师,高福华老师也给予了许多帮助。感谢师兄高峰博士、唐雄贵博士、郭小伟博士、李剑锋博士真挚和无私的帮助,感谢刘世杰、刘驰、刘建莉、刘倩、刘波、罗铂靓、温圣林、陈力、姚欣、马延琴、陈铭勇、徐敏、陈立功硕士。能在这样团结互助的集体中学习和工作,我感到非常荣幸和自豪。难忘与他们一起工作的日子,在此表示衷心的感谢。

感谢父母多年来对我的关心和支持。

感谢同窗三年许多好友的关心和帮助。

感谢国家自然科学基金(基金项目号 60276018)对本工作的资助!

最后,谨向在工作、学习、生活上给予我关心、帮助和支持的各位前辈、同事、亲友和朋友们致以最衷心的感谢!

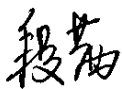
段 嵩

2006 年 5 月于川大第二理科楼

声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得四川大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

本学位论文成果是本人在四川大学读书期间在导师指导下取得的，论文成果归四川大学所有，特此声明。

研究生 段茜 
2006年5月

导师: 张信勇

2006.5.