

DMD 用于数字光刻成像研究

光学专业

研究生 刘驰 指导教师 杜惊雷

信息时代对器件的微型化、轻量化、集成化的迫切需求，极大地推动了微细加工技术的发展，以微光学、微电子、微机械为基础的 MEMS 和 MOEMS 技术已在航空航天、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，将对本世纪的军事、工业生产、以及人们的生活产生深远影响。源于 VLSI 的平面光刻工艺用于制作微光学、MEMS、MOEMS 器件的三维连续面型受到很大的局限。本文研究一种可制作微光学元件的 DMD 数字掩模光刻技术，应用数字化 DMD 显示器件建立数字光刻实验装置。根据 DMD 的周期结构的特点并考虑实际光刻系统的结构，建立一个可描述数字光刻成像过程的特殊的部分相干成像模型，并开展了数字灰度光刻制作微光学元件的实验研究。

论文中，分析研究 DMD 灰阶的产生方式。根据建立的基于 DMD 部分相干成像模型，对 DMD 单个微镜点成像，采用相干成像处理，对 DMD 阵列面成像采用非相干像强度叠加处理，并以数字光刻微透镜为例，进行计算模拟和分析。最后研究用数字光刻和生化酶化学湿法刻蚀卤化银明胶制作连续浮雕微光学元件工艺，实验制作了有较好面型的微透镜阵列。

DMD 数字掩模光刻技术具有不需要常规掩模，方便曝光图形曝光量分布实时校正和不需要昂贵设备以及制作周期短等优点，为批量制作微光学元件提供了一条有效的途径，对促进高性能的微电子、微光机电系统加工技术的发展有重要意义。

关键词：光刻技术；数字掩模；数字微镜装置；灰度；微透镜；酶刻蚀

Study on Imaging of Digital Lithography With a DMDTM

Major: Optics

Graduate: Liu Chi **Supervisor:** Du Jinglei

The great demands for the micro-devices with micromation, lightweight and integration have vastly prompted the development of the micro fabrication technologies in information era. The MEMS and MOEMS techniques of the rapid development based on micro optics, microelectronics and micro mechanics have indicated an expansive future, which are applied in the aviation and space flight, optical communication, optical interconnected network, optical computing and other many high technique fields, and will also have a far-reaching impact on the military science and technologies, industry and the living of the people which we confront in the current century. The conventional photolithographic technology from VLSI technique exists in large limitations for the fabrication of micro optical, MEMS and MOEMS elements with three-dimension (3D) continuous structure. In this thesis, the study on lithography technique with DMD digital mask for the fabrication of 3-D arbitrarily shaped microstructures has been carried out. The system of DMD digital masks lithography is proposed and set up through the sufficient investigation. According to the characteristics of periodic microstructure of DMD, we present a partial coherent imaging model of digital mask lithography. We had studied on DMD grayscale, which is achieved by binary pulsewidth modulation of the incident light. Because each micromirror structure of DMD is the same, it is only need to give the imaging process of a single micromirror. In this analysis, object light source is regarded as combination of many incoherent light source (single mirror), while each mirror is illuminated by a coherent light source, that is, the imaging process is a process of using partial coherent light. At last, the simulations have been made based on the partial coherent imaging model, and the micro-optical elements such as the micro lens have been achieved on SHSG through the applications of DMD digital mask and enzyme etching technique.

When the DMD digital mask is used in the conventional photolithography , which is greatly simplified. 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 processes. Thus it gives a new and effective approach for the fabrication of the continuous shaped microstructure and has very important significance to the development of micro optics and MOEMS.

Keywords: Photolithography; Digital Mask; DMD; Grayscale; Microlens;
Enzyme Etching;

第一章 前 言

§ 1.1 无掩模光刻技术

在科学技术飞速发展的今天,高科技的信息化、数字化、微型化新产品日益普及,正逐渐地改变着人们日常生活的方式、质量和理念。众所周知,光学光刻技术不断进步是推动微电子及其相关产业高速发展的一个重要因素。微电子技术的巨大成功引发了一场微小型化技术革命,以加工微纳米结构和系统为目的的微米、纳米技术在此背景下应运而生^[1-5],人们利用精细加工手段加工出微米、纳米级结构,在小型机械制造领域开始了一场新的革命,导致了微型机器或微机电系统(Micro Electro Mechanical Systems, MEMS)的诞生。将MEMS与微光学元件相结合,又发展起来了一种极具活力的所谓微光机电系统^①(Micro Opto Electro Mechanical Systems, MOEMS)。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^[7-10]。微光机电系统的出现将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。

在MOEMS中应用的各种微光学元件和微机械器件常常具有连续的表面浮雕结构,而MOEMS的制造技术主要是以微电子集成电路工艺为基础发展起来的微细加工技术,其微电子集成电路工艺主要是一种平面加工技术,如果要制作三维连续微结构,往往需要采用套刻的方法,这种方法工艺流程繁琐复杂,在制作过程中常常带来各种误差。而且在微光学元件加工过程中,光掩模的制作加工是一道比较繁琐复杂的工序,对掩模和光刻工艺有较高的要求,加工成本相对昂贵。因此,为了适应高新技术发展的需要和降低微电子加工成本需求,一些颇具特色的无掩模光学光刻技术逐渐新兴起来。目前,倍受关注的无掩模光刻技术可大致分两类:(1)带电粒子无掩模光刻(Charged Particle Maskless Lithography, CPML2),如电子束直写技术,离子束光刻技术和带电微滴喷墨水光刻(Writing with Charged Ink Droplets)等。(2)光学无掩模光刻(Optical Maskless Lithography, OML2),如干涉光刻技术,原子光刻技术,数字光刻(Digital Photolithography)技术等。下面我们将对其中一些无掩模光刻技术进

行简单的介绍。

§ 1.1.1 电子束直写技术^{[11] [12]}

电子束直写光刻是一种利用带电粒子实现的无掩模光刻技术，与传统的光刻（区域曝光）加工不同，它是利用可变曝光剂量的电子束直接对涂在基片表面的抗蚀剂曝光加工。电子束光刻机与 SEM（扫描电子显微镜）的原理基本相同。电子束被电磁场聚焦成微细束照射到电子抗蚀剂（感光胶）上，由于电子束可以方便地由电磁场进行偏转扫描，复杂的图形可以直接写到抗蚀剂上，因而不需要掩模版。

与其它的光刻技术相比，电子束直写光刻技术的优点很明显：（1）电子束光刻分辨率高，可达到 0.1 微米，如直接刻蚀可达到几个纳米；（2）电子束光刻不需要掩模板，操作非常灵活，很适合小批量，特殊微结构器件的生产。

但是电子束直写技术在应用中也存在一些困难：

（1）加工微结构时，难以精确控制浮雕轮廓深度。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。

（2）由于曝光量是靠在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有别于设计轮廓。对于复杂轮廓器件，其曝光量的控制是很困难的。

（3）直写设备复杂、昂贵，并且是串行、单点的写入工作方式，因此曝光时间长，一般为数十小时，元件制作费用高，不易进行批量生产，较适合于高精度单件生产。

§1.1.2 离子束光刻技术

离子束光刻也是一种带电离子无掩模光刻技术，它可分为聚焦离子束（FIB）、掩模离子束光刻（MIB）和离子束溅射（IBP）^{[13] [14]}。离子束光刻是利用离子源进行曝光，从 80 年代开始出现的液态金属离子源。是离子束光刻的真正开端，其原理是通过加热使附在一根金或钨的针尖端的镓或金硅合金熔化，

在外加电场作用下使液态金属表面产生场致离子发射,其发射面积积极小,可以较容易离子光学系统将发射的离子聚焦成离子束,进行高分辨率离子束曝光。

聚焦离子束刻蚀与电子束曝光相比有一些优点:

(1) 邻近效应几乎可以忽略,因离子比电子重得多,电子质量极轻,在抗蚀剂中的散射范围大,影响邻近电路图形的曝光质量;(2) 感光胶对离子束的灵敏度要比电子束高数百倍。

但聚焦离子束刻蚀也有一些弱点:

(1) 分辨率比电子束低,因为离子束中的离子能量分散,使聚焦受到限制。
(2) 离子质量大在光刻胶中的曝光深度较小,20 万伏的硅离子束的曝光深度仅为 0.5 微米,而 2 万伏的电子束可曝光 1 微米以上。

现在,聚焦离子束技术在微电子工业中主要用作光学掩模版和集成电路芯片的修复工具,例如,用离子束可去除掩模版上的多余斑点和透光斑,切割或接通集成电路芯片上的某些连接等。

MIB 和 IBP 光刻都是区域曝光,曝光效率高,但需要特殊孔径和掩模,其制作与 X 射线一样复杂,MIB 有望用于 VLSI 的生产,最近美国和奥地利科学家研制了 ALG1000 型离子束投影曝光机^[16],可满足生产 1GB 存储芯片的需要,该机采用能量分散极小的 20 万伏的氢离子源,加上先进的离子光学系统使曝光机可进行 0.18 微米光刻,曝光深度可达到 105 微米,可满足集成电路曝光需要。也有应用到微电子机械系统 (MEMS) 的加工当中的迹象。

§ 1.1.3 干涉光刻技术^{[16][17]}

干涉光刻一种无掩模光学光刻技术,这种技术的光刻图形是利用激光束的干涉来生成,经过双光束、多光束一次曝光或双光束、多光束多次曝光产生周期图形,如周期性光栅、孔阵、点阵、柱阵图形等,以满足某些特定应用场合的要求。要产生任意形状的周期图形,可以利用若干个正弦图形就可以综合出所需的剖面形状,因为任意剖面形状的图形可以按傅立叶分析法分解为许多不同空频的正弦图形之和。这是干涉光刻利用傅立叶频谱综合法的基本思想。

设在一个周期内,图形的剖面形状由函数 $f(x)$ 描写, $f(x)$ 是周期函数:

$$f(x) = f(x + 2np). \quad (1)$$

n 为整数, $2p$ 为周期。 $f(x)$ 可以展开为傅立叶级数:

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\pi x / p) + b_k \sin(k\pi x / p)] \quad (2)$$

式中各项系数由下式决定:

$$a_0 = (1/2p) \int_{-p}^p f(x) dx \quad (3)$$

$$a_n = (1/p) \int_{-p}^p f(x) \cos(n\pi x / p) dx \quad (5)$$

$$b_n = (1/p) \int_{-p}^p f(x) \sin(n\pi x / p) dx \quad (6)$$

利用一系列不同空频的正弦干涉条纹, 控制好相对光强和相对位相, 就可综合出所需函数。因此这种方法相当灵活, 如双光束曝光产生正弦图形, 用双光束干涉以一定方式多次重迭曝光, 或多光束多次曝光方法可以产生多种结构的二维图形。

图 1 表示出双光束干涉光刻的原理^[10]。设两束平面波分别以 θ_1 和 θ_2 角入射于, 记录介质基片上, 则在记录平面内产生的垂直于 X 轴的光栅的光强分布为:

$$\begin{aligned} I(x) &= 2I_0 [1 + \cos kx(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)] \\ &= 2I_0 [1 + \cos(2\pi x \frac{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}{\lambda})] \\ &= 2I_0 [1 + \cos(2\pi x / d)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $d = \frac{\lambda}{\sin \theta_1 + \sin \theta_2}$, d 为产生的光栅周期; λ 为曝光波长; I_0 为每束平面波的强度。

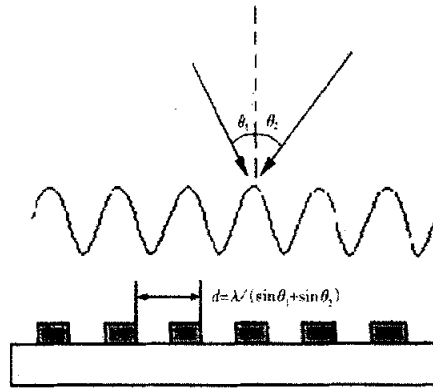


图 1 双光束干涉光刻原理图

当双光束曝光时，在两次曝光之间将记录材料旋转不同的角度可以得到不同形状结构的周期图形，如转动 90 度得到圆孔阵列，转动 45 度得到椭圆形孔阵等。由于干涉光刻不用昂贵的光刻镜头，可用一般光刻光源和抗蚀剂，相对简单的工艺过程，成本低，较易达到高分辨率；容易获得大视场曝光，场景深，图形对比度高，用现有激光光源和光致抗蚀剂就能实现分辨率为 0.1 微米尺寸的图形。

虽然这种技术的优点是能综合出大面积、高空频的微细结构，但缺点是干涉条纹的相对光强和相对位相难以控制，同时由于只能取有限个级数，综合的形状只是近似的，因而制作任意面型的微细结构将是相当困难。若用此方法微光学元件，也将影响到其衍射效率的提高。

§ 1.1.4 原子光刻技术

“原子光刻 (Atom Lithography)”最早是在 1992 年被贝尔实验室的研究人员^[19]提出的。以激光对中性原子的冷却、捕陷和操纵为重要内容的原子光学研究,在过去的二十余年中得到了深入广泛的开展。玻色-爱因斯坦凝聚的实现^[20]和原子激光的诞生^[21]表明,这一领域的研究无论在理论探讨和实验手段上都已进入可行阶段。原子光刻正是将原子光学这一基础性研究成果移用于高技术

发展的一个典型例证。

原子光刻的基本原理是利用共振光的辐射压力(或光抽运作用)使原子束产生空间强度分布,然后使原子束沉积在基板上(或使基板上的特殊膜层“曝光”),在基板上形成纳米级的条纹、点阵或人们所需的特定图案。

实现原子光刻的基本方案有两种。一种是采用金属原子束,如1992年Timp等^[27]首次报道了Na原子光刻实验,此后McClelland小组和Mlynek小组报道了Cr的原子光刻^[22-24],McGowan等^[25]报道了Al的原子光刻,其原理是用共振光压使原子束高度准直化和形成空间强度分布后,直接沉积在基板上。另一种是采用亚稳态惰性气体原子束,用光抽运作用使其形成空间强度分布,再使亚稳原子破坏基板上的特殊膜层,最终用化学腐蚀方法在基板上刻印成形。迄今为止,前一种方案已经实现了纳米级光栅和点阵的刻印,后一种方案才得到初步的实验结果报道^[28]。

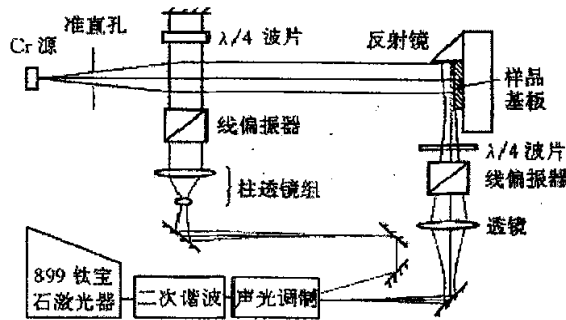


图2 沉积型原子光刻原理图^[28]

现以Cr为例给出了金属原子束型原子光刻的原理性方案,如图2所示,高温Cr源先经喷口和小孔的初步准直,再经驻波光场的粘胶准直进入紧贴刻印基板的激光原子透镜区,在驻波光场的作用下,原子发生沟道化,最终在基板上沉积出间距为半波长的大量平行条纹,即光栅。

原子光刻目前可获得宽度为60—70nm的光栅线条,这个宽度目前远窄于激光光刻所能达到的宽度,这只是初步的实验结果。原子光刻所根据的工作原理和所采用的特殊技术使它在应用领域具有诱人的发展前景。原子束中原子的

De Broglie 波长仅为百分之一纳米左右，这就为大大降低刻印的衍射极限和刻印极细条纹提供了物理基础。由于原子光刻法得到的条纹间距仅决定于激光波长，制出的光栅条纹具有极好的均匀性，现已制出的 Cr 光栅质量优于用电子束法刻印的光栅，事实上这种 Cr 光栅可以作为纳米级的长度基准。金属原子束刻印是“直写”式的，不需掩模，刻印一步完成。以刻印光栅为例，原子法仅需时 10min 左右，而电子束法曝光时间约需 24h。

因此原子光刻技术虽然刚刚问世不久，但它将在未来呈现出勃勃生机。但是目前这种技术仍需探索，在这种技术中，需要更亮的光源，因为光场导航原子的能力，直接与强度有关，这是这项技术的关键，但目前世界上还没有适于原子光刻需要强度和均匀度的光源。即使有更强的光源，但现在的技术还不足以刻蚀出好的芯片，对完全任意的图案，目前也仅仅只有实现的方案。而且原子光刻的沉积速度现在是相当慢的，其的制作费用也是相当昂贵的。

§ 1.2 数字光刻技术

以上介绍的几种无掩模光刻技术都有各自的特点，有的正处于发展之中，还有许多问题需要解决，它们可分别用于制作不同性能要求的元件，目前还没有一种技术能适合制作各种微细结构的元件。从其原理和制造工艺上看，上述的制作技术存在一些不足：制作工艺相对复杂，各工艺参数对最终结果的影响复杂，元件面型的可控性较差，要得到任意的面形和折射率分布较为困难。总的来说，设计灵活性小，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方法的使用受到限制的主要原因。因此研究方便而有效的新技术仍然是目前光刻技术发展的一个重要方向和前沿。

目前，在下一代光刻技术 (Next Generation Lithography, NGL) 来临之前，光学光刻技术还有相当的生命力，还可以充分挖掘现有光刻设备的潜力，发展波前工程，提高光刻技术的灵活性。特别是一种基于数字光处理技术 (Digital Light Processing, DLP) 的数字掩模光刻技术引起了广泛关注^[29-34]。

数字掩模光刻术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，并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 (如 CCD) 反馈回来基

片的光场分布的数字信息，进一步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^[33-36]。数字掩模技术的优点在于掩模图形的生产数字化，通过计算机控制一些特殊的空间光调制器（Space Light Modulator, SLM）对入射光进行调制，以取代现有的光学光刻中的掩模。常见空间光调制器有液晶显示器件 LCD、等离子体显示器件（Plasma Display Panel, PDP）和数字微反射镜器件（Digital Micromirror Device, DMD）等，在下一章，将对这三种特殊的空间光调制器作详细的介绍。目前数字掩模光刻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关键技术数字掩模图形的发生器仍还处于发展完善中，研制高分辨率数字光刻设备尚需对数字光刻成像理论、快速精确的数字图形优化算法、数据传输以及波前工程技术等方面的问题做深入探讨和研究。

本文选择美国德州仪器公司的专利产品 DMD 作为空间光调制器来生成数字化掩模图形，与投影光刻系统相结合，发展一种数字光刻技术^[29-30]。该技术具有的全数字、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特点，与其它光刻技术相比其潜在优势十分明显。对推动微电子、微光学和微系统的深入发展有实际意义。

§ 1.3 本论文的主要内容

论文以发展一种微光学元件的制作新方法为目标，研究数字光刻成像原理和实现方法、建立了基于 DMD 的数字掩模光刻实验装置，开展了计算机模拟和实验工作。全文共分四章，

第一章：前言 重点介绍几种无掩模光刻技术。并说明本课题的研究目的和意义。

第二章：DMD 数字微镜装置 简单介绍了几种常用的空间光调制器工作原理，着重阐述了 DMD 的光学特性、工作原理及 DMD 用于数字掩模光刻的理论基础。

第三章 基于 DMD 的光刻成像模拟与实验 以微透镜为例进行光刻成像过程模拟，并用卤化银明胶进行数字光刻曝光和酶蚀实验。为用数字掩模光刻技

术制作微光学元件提供依据。

第四章 总结 对本文的工作进行了总结，并提出了一些展望。

参考文献

- [1] Samp sell J B. The digital micromirror device and its application to projection displays[A]. *Tech Digest 7th Int. Conf. Solid State Sensors and Actuators(T rausducers'93)*,Yokohama Japan, 1993. p24- 27.
- [2] J. Knutti, Finding markets for microstructures. *Micromachining and Fabrication Process Technology IV Proceedings, SPIE*, Vol. 3511,1998, p17-23.
- [3] P M Hagelin, U Krishnamoorthy, J P Heritage, et al. Scalable optical cross2connect switch using micromachined mirror. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2000, 12(7): p882-884.
- [4] 于殿泓, 魏正英, 郭俊杰等, *微机械及微细加工方法的研究*, 西安理工大学学报, 2001, Vol.17, No.1: p74-77.
- [5] 桥川荣二, 电火花与激光复合精密微细加工系统的开发, *高能束流加工技术*, 2004, No.2: P46-50.
- [6] R. Wechsung, N. Unal. Markets analysis for microsystems: an interim report from the nexus task force. *Micro System Technologies 98 Proceedings*, December 3,1998, p275.
- [7] D.J. Nagel M.E. Zaghloul. MEMS: micro technology, mega impact. *IEEE Circuits & Device*, 2001,17(2): 14-25.
- [8] 张兴, 跨世纪的新技术—微机电系统(MEMS). *电子科学导报*. 1999(4): p2-6.
- [9] 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) : p525-527.
- [10] 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,Vol.26, No.5: p347-351.
- [11] M. T. Gale, M. Rossi, J. Pedersen, Fabrication of continuous-relief micro-optical element by direct laser writing in photoresist, *Opt.Eng.*, Vol 33(11): 3556 (1994)
- [12] T. Fujita, H. Nishihara, J. Kayama, Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography *Opt. Lett.*, Vol 7(12): 578 (1982)
- [13] 王立鼎主编, *微机械专集*, 光机情报增刊. 1992: 62-77
- [14].Wolfgang Kuehnel and Steven Sherman,A Surface micromachined silicon accelero-meter with on-chip detection circuitry, *Sensors and Actuators*. A45(1994)7-16
- [15].李川奇, 尤晖, *现代光学仪器*, 1998, 1-2, 49-54
- [16] E.B.Kley, B.Schnabel, U.D.Zeitner, E-Beam Lithography-an Efficient Tool for the Fabrication of Diffractive and Microoptical Element *Proc. SPIE*. Vol 3008: 22 (1997)
- [17] G. Schmahl, *J.Spectrosc. Soc. Japan*, Vol 1(3): 24 (1975)

- [18] 冯伯儒, 张锦, 制作光纤光栅的相移掩模—双光束干涉曝光方法. 光电工程, Vol.30, No.1 2003.2, p5-7
- [19] Brian H. Cumpston, Sundaravel P. Ananthavel, et al, Two-photon polymerization initiators for three-dimensional optical data storage and microfabrication, *Nature*, Vol 398(6722): 51 (1999)
- [20] M. H. Anderson, J. R. Ensher, M. R. Matthews, C. E. Wieman, E. A. Cornell, *Science*, Vol 269: 198 (1995)
- [21] M. R. Andrews, C. G. Townsend, H.-J. Miesner, D. S. Durfee, D. M. Kurn, and W. Ketterle., Observation of Interference Between Two Bose Condensates, *Science*, Vol 275: 637 (1997)
- [22] J. J. McClelland, R. E. Scholten, C. Palm, et al., Laser Focused atomic deposition, *Science*, Vol 262: 877 (1993)
- [23] R. E. Schelten, J. J. McClell, E. C. Palm, et al., *J. Vac. Sci. Technol.*, Vol B12: 1847 (1994)
- [24] U. Drodofsky, J. Stukler, B. Brezger, et al., *Microelectron. Eng.*, Vol 35: 285 (1997)
- [25] R. W. McGowan, D.M. Giltner, S. A. Lee, Light force cooling, focusing, and nanometer-scale deposition of aluminum atoms, *Opt. Lett.*, Vol 20(24): 2535 (1995)
- [26] K. S. Johnson, J. H. Thywissen, N. H. Dekker, et al., Localization of Metastable Atom Beams with Optical Standing Waves: Nanolithography at the Heisenberg Limit, *Science*, Vol 280: 1583 (1998)
- [27] Mukesh P. Joshi, Haridas E. Pudavar, J. Swiatkiewicz, P. N. Prasad, Three dimensional optical circuitry using two-photon-assisted polymerization, *Applied, Physics Letters*, Vol(74)2: 170 (1999)
- [28] Jackman RJ, Brittain ST, Adams A, et al., Three-dimensional metallic microstructures fabricated by softlithography and microelectrodeposition *Langmuir*, Vol 15(3): 826 (1999)
- [29] V. Markandey and R. Gove, "Digital Display Systems Based on the Digital Micromirror Device," *SMPTE 136th Technical Conference and World Media Expo* (October 1994).
- [30] 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*, Vol. 24, pp. 1012-1015 (May 1993)
- [31] J.B. Sampsell, "The Digital Micromirror Device," *7th ICSS&A*, Yokohama, Japan (1993).
- [32] G. Sextro, T. Ballew, J. Iwal, "High-Definition Projection System Using DMD Display Technology," *SID 95 Digest*, pp. 70-73 (1995).
- [33] G. Feather, "Digital Light Processing: Projection Display Advantages of the Digital Micromirror Device," *19th Montreux Television Symposium* (June 1995)
- [34] Kin Foong Chan Zhiqiang Feng Ren Yang Akihito Ishikawa Wenhui Mei. High-resolution maskless lithography Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. 2(4) 331-339 (October 2003)
- [35] Lars Yoder, Walter Duncan, Elisabeth Marley Koontz, John So. DLP™ Technology: Applications in Optical Networking. Proceedings of SPIE Vol. 4457 (2001)

[36] Kin Foong Chan. "High-resolution maskless lithography". 2003 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. JM3 2(4) 331-339 (October 2003).

第二章 DMD 数字微镜装置

§ 2.1 引言

空间光调制器^[1] (Spatial light Modulator, SLM) 是一类光学元器件的名称, 有时也被叫做光学调制器、光阀、光学动态滤波器等, 20 世纪九十年代以来, 国际上已开始逐渐统一称为空间光调制器。空间光调制器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。

本章将先对应用于数字掩模光刻技术中的空间光调制器 LCD 和 PDP 作简单介绍, 然后阐述了数字掩模光刻技术的理论基础, 着重介绍了 DMD 的光学特性和工作原理, 为基于 DMD 的数字掩模光刻成像系统的建立提供理论依据。

§ 2.2 空间光调制器 (SLM)^[1]

一般来说, 空间光调制器指的是这样的器件, 在信源信号的控制下, 它能对光波的某个参量进行调制, 例如通过吸收调制振幅, 通过折射率调制相位, 通过偏振面的旋转调制偏振态等等, 从而将信源信号所荷载的信息写进光波之中。空间光调制器是一个二维器件, 也可以看成一个透过率受到写入信号控制的滤光片, 表征为

$$T(x, y) = T[x(t), y(t)], \quad (1)$$

$T[x(t), y(t)]$ 表示在时刻 t 时空间光调制器在 (x, y) 处的复透过率。写入信号把信息传递到 SLM 上相应位置, 以改变 SLM 的透过率分布的过程, 称为“寻址”(Addressing)。信源信号既可能是光学信号, 也可能是电学信号, 因此空间光调制器可分为光寻址和电寻址两大类。常用的电寻址的方式是通过 SLM 上两组正

交的栅状电极,用逐行扫描的方法,把信号加到对应的单元上去。电寻址又称为矩阵寻址,记为 EA-SLM。一对相邻的行电极和一对相邻的列电极之间的区域构成 SLM 的最小单元,又称像素(Pixel),它给出 SLM 的分辨率极限。电寻址空间光调制器是用得最多的空间光调制器,它将光学信息处理与近代电子技术特别是计算机—多媒体技术结合起来,构成光—电混合处理系统,应用非常广泛。由于空间光调制器是光信息显示的关键器件,因此近年来国际上开发出多种空间光调制器用于光信息显示,常用的电寻址空间光调制器有薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)、等离子体显示器(PDP)、数字微反射镜器件(DMD)等。

§ 2.2.1 薄膜晶体管液晶显示器(TFT-LCD)^[12]

液晶是某些有机高分子物质在一定的条件下呈现的一种特殊的物质状态,其结构介于液体、固体之间,称为中间态或中间相。它们的分子排列介于完全规则的晶体和各向同性的液体之间:每个液晶分子的中心在液晶空间中的分布是随机的,但分子的取向具有有序性,亦即长棒状分子的长轴方向或盘状、碗状分子的法线方向在一定的温度范围内倾向于彼此平行,该方向称为液晶分子的指向矢量方向。因此,液晶具有双重性质,在一定程度上,既具有液体的流动性,又具有晶体所特有的各向异性。此外,由于液晶分子之间的相互作用力远低于固体分子之间的相互作用力,所以液晶的各向异性在外场下会发生显著变化,这种变化远比各向异性晶体强烈。这一特性,使我们可以把液晶作为调制介质,构成低能耗、低电压的空间光调制器——光寻址的液晶光阀(LCLV)和电寻址的薄膜晶体管驱动液晶显示器(TFT-LCD)。

如果把向列相液晶放在一个经特殊处理的盒中,可以构成具有特殊的扭曲效应的液晶盒——TN 液晶盒,其结构见图 3。液晶注入一对导电玻璃之间,这两片导电玻璃的表面经过特殊处理,例如定向摩擦或倾斜蒸镀 SiO_2 导电薄膜,使它的表面具有定向的结构,而且上下导电玻璃的定向结构方向正交。向列相液晶分子为长棒状,在上面的导电玻璃表面定向结构的作用下,接近该表面的液晶分子的指向矢趋向于表面结构的方向排列。而在液晶盒中,分子的排列逐渐旋转,直至下表面,正好旋转了 90° ,使下表面层分子的指向矢趋向于下导电玻璃的定向结构的方向。如果我们把整个液晶层沿着与表面正交的 Z 轴分成

均匀的 N 个薄层，则每一薄层中液晶分子的长轴取向大致相同，每个这样的薄

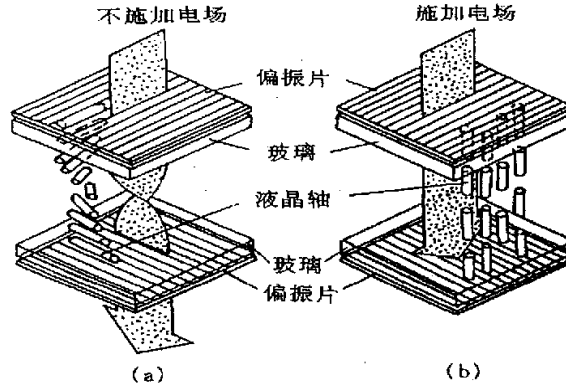


图 3、TN 盒的结构和工作原理示意图 (a, 未加电压 b, 加电压) ^[12]

层可以看成是一个单轴晶片，分子长轴(即指向矢)的择优方向决定了光轴的方向。在整个液晶层中，随着 z 的变化，分子长轴发生旋转，光轴也就随之旋转，形成扭曲型各向异性介质。在线性扭曲向列型液晶中，光轴的方位 ψ 是 z 的线性函数：

$$\psi = az \quad (8)$$

TN 盒中总的旋转角

$$\psi_d = ad, \quad (9)$$

且有 $\psi_d = 90^\circ$ 。关系式

$$a \ll 2\pi(n_e - n_o) / \lambda \quad (10)$$

称为弱扭曲条件，其中 n_e 和 n_o 分别是液晶的非常光和寻常光的折射率。

TN 盒外层有一对偏振片 P、A，P 的光轴方向沿 X 轴(上表面液晶取向矢方向)，从液晶层射出的光波振动方向则沿 Y 轴。如果检偏器 A 与 X 轴平行，则 TN 器件的透过率为零；若检偏器光轴沿 Y 方向，则 TN 器件的透过率为最大，这两种状态分别称为 TN 液晶盒的关态(暗态)和开态(亮态)。扭曲效应本来就是近似的，通常 ψ_d 并不严格等于 90° ，光波在液晶中传播时，液晶中的不均匀还会引起散射。由于上述种种原因，出射光波一般是长椭圆偏振光或部分偏振光，

这些因素引起 TN 盒在暗态下的漏光，造成对比度下降。当我们在 TN 盒上通过透明电极加上纵向电压时，情况将复杂得多。液晶的长形分子作为电偶极子，将趋向于电场方向重新排列。边界附近的分子由于边界的定向作用，受电场的影响较小；中间层的分子受电场的影响最大。这样一来，就在一定程度上抵消了扭曲效应，使器件产生一定的透过率。电压越高，趋向于电场方向排列的分子越多，扭曲效应就越弱，透过率就越高。控制电压的大小，就可以控制各像素的明暗，可控制像素的灰阶。一般 TN 盒在 5V 的外加电压下就达到最大的透过率—开态(亮态)。这样一来，外加的电信号就转换成 TN 盒的透过率变化，这正是电寻址液晶空间光调制器的基本原理。

在数字掩模光刻技术中，LCD 作为掩模图形显示部件有其优点：首先，LCD 空间光调制器具有驱动电压低($<5V$)、功耗小(每平方厘米微瓦级)的特点；其次，由于场效应管隔离，有效地消除了相邻像素之间的干扰。

但是，在数字掩模光刻中，由于 LCD 本身结构的特点，其也存在一些不足之处：首先，由于 LCD 是透射型空间光调制器，LCD 本身的结构影响显示图像的对比度，最好不超过 700:1，所以很难形成很深的黑色背景；其次，LCD 像素边长尺寸约为 99 微米(以 ACER 液晶面板为例)，在有较小特征尺寸的掩模图像的显示中，掩模图形边缘细微部分不足以填充一个 LCD 像素，就会出现图形边缘细微特征丢失，图形边缘产生畸变，从而影响掩模图形的显示质量；再者，LCD 像素的开口率不高，约为 56%，图形显示有较明显的像素栅格现象。LCD 的像素栅格也是必定存在的，是因为驱动液晶像素的电极和一些必需的引线都是不透明的，从而造成了每个像素都存在死区。LCD 像素结构如图 4 所示。当一个个像素规则排列组成 LCD 面板时，这些像素的死区就形成了规则的网格状结构。

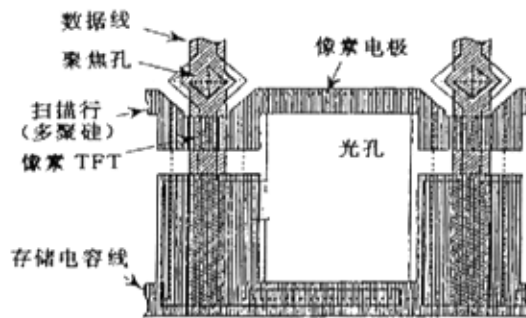


图 4. LCD 的像素结构

§ 2.2.2 等离子体显示器件 (PDP)^[13,14]

等离子体显示器件 (Plasma display panel, PDP) 的原型可追溯到 1956 年开发的冷阴极放电显示器 (Nixie 管, 数码管); 而作为平面显示器的实质性开发, 是以 1966 年 Illinois 大学存储型 AC 驱动 PDP 的发表, 以及 1969 年 Burroughs 公司自扫描型 DC 驱动 PDP 的发表为标志, 1975 年前后, 由 AC 驱动和 DC 驱动, 用于数字、文字及图形显示的 PDP 开始普及。1985 年, NHK 试制了脉冲存储型 DC 驱动彩色 PDP TV。1993 年, 富士通公司将其实现了商品化。

所谓等离子体 (Plasma), 是指正负电荷共存, 处于电中性的放电气体的状态。等离子显示器件 PDP 是利用气体放电发光进行显示的平面显示器, 如图 5 所示。在 PDP 中有数百万个真空单元小室, 一般称为放电泡, 真空放电泡中封入的放电气体, 一般采用 Ne (氖) 和 Xe (氙), 或 He (氦) 和 Xe 组成的混合气体。给放电泡上的电极施加电压, 发生气体放电, 产生等离子体, 由等离子体产生的紫外线照射预先涂覆在放电泡内侧的荧光涂料, 使其根据于不同的荧光体发射出发红 (Red), 绿 (Green), 蓝 (Blue) 三原色光。这三种颜色布置成条状或马赛克状。三原色的巧妙混合, 可以产生丰富多彩的颜色。

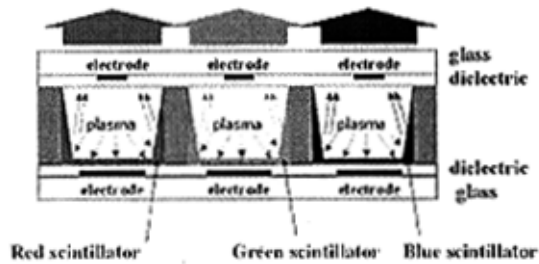


图 5、PDP 的工作原理

PDP 作为一种数字图形显示器件有它的优点: 大画面积显示, 分辨率高, 自发光型, 彩色丰富, 响应快, 具有存储特性, 全数字化工作, 受磁场影响小、无需磁屏蔽等。但是在数字掩模光刻中, PDP 有还存在一些不足: 首先, PDP 驱动电压高达 250V (LCD 的驱动电压小于 5V), 因此功耗大且发光效率低, 不利于光刻成像系统的建立; 其次, PDP 像素的几何尺寸比较大, 约为 300~500 微米, 不适合具有较小特征尺寸的掩模图形显示。因此, 目前, PDP 主要应用于数字投影显示 (Digital Projector Display) 和高清晰度电视 (HDTV) 的平面显示, 在光刻成像技术中的应用还不多见。

§ 2.3 数字微反射镜装置 (DMD)

近年来,一种利用微细加工和大规模集成电路技术、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, 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^[15-17],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。目前它主要用于数字投影显示 (Digital Projection Display) 及高清晰度电视(HDTV)中显示中^[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,即 Digital Light Processing,中文翻译为数字光学处理。除了投影显示这最主要的用途之外, 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 用于投影仪中,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。

在本论文中,我们将利用 DMD 作为反射式空间光调制器,在数字光刻过程中作为掩模图形。由于 DMD 的特殊结构,相比较 LCD, PDP 等空间光调制器来说,它图形的显示应用中更具有优势:首先, DMD 是一种反射式空间光调制器,镜片的填充因子高,光能在 DMD 上传递,损失相对 LCD(透射型)小,光学效率高;其次, DMD 像素尺寸小,能够比较精确显示掩模图形;再者, DMD 器件尺寸小,在光刻成像系统中可以灵活应用。

为了了解 DMD 在数字掩模光刻技术的作用,我们就要进一步了解 DMD 的基本结构,工作原理及光学特性。下面将对其进行逐一研究说明。

§2.3.1 DMD 的基本结构^[23,24]

就像中央处理器 (CPU) 是计算机的核心部分一样, DMD 芯片也是一个 DLP 投影系统的基础核心部分。DMD 可以有 640×480 (VGA), 800×600 (SVGA), 1024×768 (XGA) 及 1280×1024 (SXGA) 等多种解析度规格。图 6 为一 1024×768 (XGA) 的 DMD 芯片装置, 装置中间的反射部分由 1024×768 块可偏转的微镜组成, 外面由玻璃窗口封装以保护里面的微镜阵列。

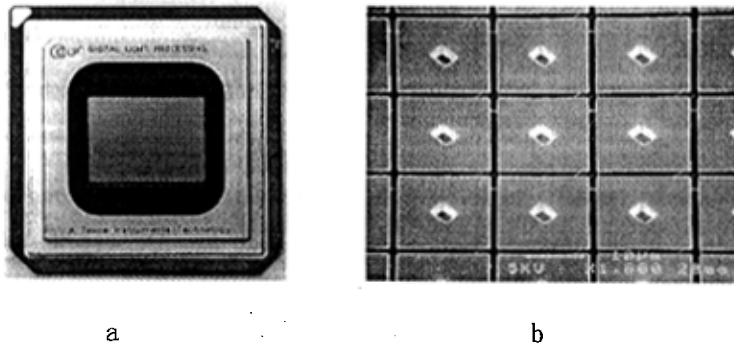


图 6、 1024×768 DMD, 中间的反射部分由 1024×768 块可偏转的微镜组成, 外面由玻璃窗口封装以保护里面的微镜阵列。

a、封装的 DMD 芯片 b、DMD 部分微镜阵列

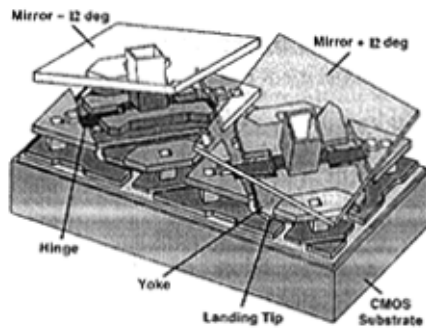


图 7、一对偏转 $+12^\circ$ 和 -12° 的 DMD 微镜单元

DMD 单元结构如图 7 所示^[25]。在图 2 中为一对分别偏转 $+12^\circ$ 和 -12° 微镜

(微镜以半透明的形式显示, 以便于微镜下面结构的观察)。

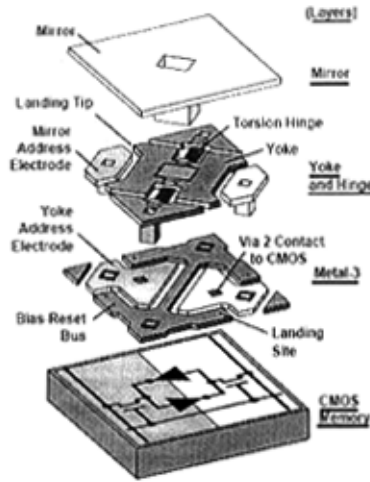


图 8、DMD 单元部件分解图

为了更全面地了解 DMD 单元结构和它的功能, DMD 单元的部件分解图分为 4 层(微镜, 扭臂梁—铰链, 3 金属块和 CMOS Memory)如图 8^[26]: 第一层为 DMD 单元顶层的微镜, 镜片呈正方形, 边长 16 微米, 它与第二层的扭臂梁相连接。微镜寻址电极和两个三角支柱与下面两层(3 金属块层和 CMOS Memory 层)相连接。在第二层中, 扭臂梁通过两根细薄的铰链悬置在两个支柱上。对于每一个微镜单元, 一对寻址电极需要连接倒其下方 SRAM 单元 CMOS 电路的电压互补端, 所以每一个微镜单元都有两个导电通道。系统依靠 SRAM 单元对每一个微镜进行寻址, 并使用 CMOS 电路提供的静电力驱动微镜绕固定轴转动。首先, 根据 Memory 单元状态(1 或 0), 产生一个弱的、非均匀的静电场来控制微镜的偏转方向。然后, 一个大一点的偏置电压加在 DMD 的上半部(微镜、扭臂梁)和下半部(3 金属块, CMOS Memory, 微镜寻址电极, 支柱)从而产生一个强的、均匀的静电场。使得微镜在静电力的作用下, 被吸附到下面的扭臂梁寻址电极和微镜寻址电极上。然而, 由于 DMD 单元上半部分(微镜, 扭臂梁)平行与下面两层且很不稳定, 当一旦加上偏置电压, 微镜和扭臂梁就回以非常快的速度偏离平衡位置。

§2.3.2 DMD 的工作原理^[27,28]

在比较全面了解 DMD 的空间结构后, 现在我们将讨论 DMD 单元的工作原理, 进一步了解 DMD 在数字掩模光刻成像系统中掩模图形显示的基本原理。

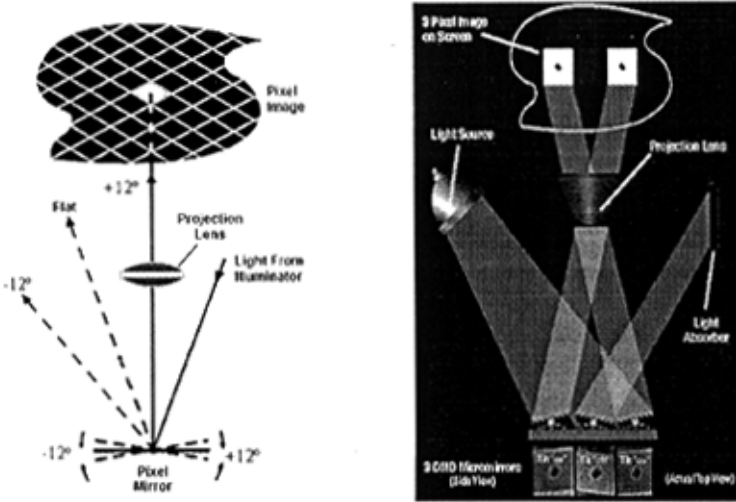


图 9、DMD 工作原理图^[28]

DMD 芯片上的反射镜是一个二维微镜阵列, 它与图形像面的二维解析点一一对应。当驱动电压信号施加于微镜与对应的电极之间时, 微镜上各极板的电压随之变化, 微镜根据偏置电压的不同, 可向不同的方向偏转。于是, 当入射光被微反镜反射入光学透镜, 即如微镜偏离平衡位置 $+12^\circ$, 再投射到像面上就形成一个亮的象素, 如图 9 所示。当微反镜偏离平衡位置 -12° , 入射光就被反射到光学透镜意外, 使像面上显示出一个暗的象素。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°), 也就是像面上象素点的“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。

§2.3.3 DMD 的特点

在数字光刻图形生成器的研究中，DMD 较 LCD 和 PDP 等空间光调制器更具有实用性。从前面的介绍中，我们知道 DMD 空间光调制器的原理很简单，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、光学效率、对比度、灰阶及响应时间等主要指标上都达到了目前显示技术的创记录的水平。因此 DMD 在数字掩模图形的成像显示的应用中倍受关注。

DMD 具有以下特点：

(1) 高分辨率^[29]

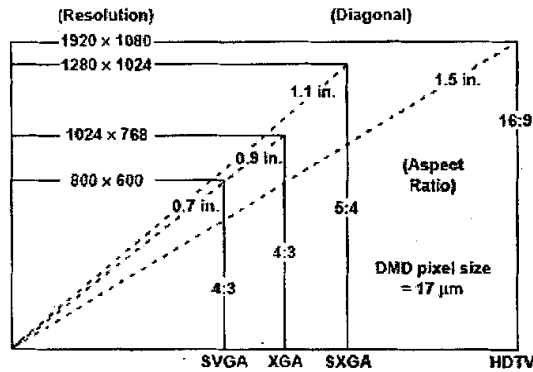


图 10、DMD 分辨率 VS 芯片对角线尺寸

DMD 具有高分辨率，这是由 DMD 的像素尺寸及制造工艺决定的。DMD 微镜单元的几何尺寸是不变的，但是 DMD 阵列可以加宽，如图 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 37×22 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。DMD 具有如此高的分辨率，而且还能 DMD 的光学效率和对对比度。具有微小的微镜单元尺寸和高分辨率的 DMD 在数字掩模的显示中，可以精确地显示掩模图形的细微的特征，从而在一定程度上减少了图像成像过程中畸变。

(2) 高光学效率^[30]

DMD 具有高光学效率。DLP 投影系统的光学效率取决于 DLP 系统各部件(包括光源灯泡/反射镜、色轮/投影透镜及 DMD 微镜单元)的光学效率,如图 11 所示。

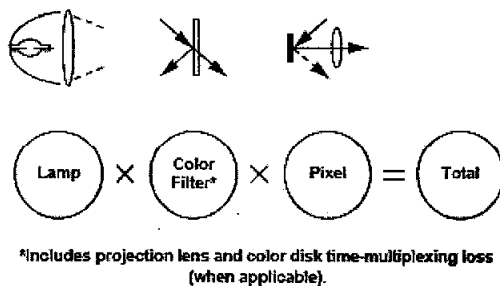


图 11、DLP 光学系统的光学效率

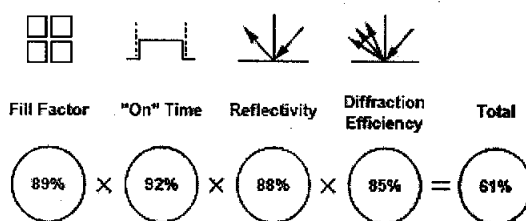


图 12、DMD 象素单元的光学效率

DMD 微镜单元光学效率由下面几个部分影响: DMD 阵列填充因子, 微镜“开”的时间, 微镜的反射率以及 DMD 阵列的衍射率, 如图 12 所示。DMD 在常见的空间光调制器中具有比较高的填充因子, 约为 89% (LCD 约为 56%); DMD 具有非常快的响应时间, 由于扭臂梁非常薄(约 0.05—0.1 μm), 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 μs 。因此, DMD 微镜在一个帧时中, 开的时间(即稳定状态时间)比为可达到 92%; 再考虑到光在扭臂梁、支撑柱及反射镜边缘的散射、衍射, DMD 微镜单元的光学效率约为 61%。如此高的光学效率, 使得 DMD 在数字掩模光刻成像系统中应用更能增加系统的整体效率和性能。

(3) 高对比度^[31]

DMD 的对比度定义为 DMD 微镜阵列全开与全关时光通量的比率, 从图 9 可知, 在 DMD 的关态(OFF)下, 从反射镜上反射的光束与光轴的夹角为 $4\theta_L$, 接近 50° , 此时的光束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 (LCD 最高不超过 700:1), 目前改良的技术已达到 2000:1 以上。

虽然 DMD 已经具有很高的对比度, 但 DMD 对比度的进一步的提高在很大程度上受限于本身结构, 如微镜之间的间隙的衍射, 以及微镜单元的底层和微镜中心支柱的连接点等都会影响 DMD 的对比度。

DMD 具有很高的对比度, 也就是说, DMD 具有非常高的灰度级。DMD 作为一个数字化的反射空间光调制器, 它的灰阶由开态(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)。在具有连续的表面的微光学元件的制作加工中, 数字掩模光刻成像中的掩模图像显示为灰度图形, 不同的灰度级对应微光学元件表面高度, DMD 丰富的灰度级, 可以在抗蚀剂上精确记录微光学元件连续表面的几何特征。

§2.3.4 DMD 的光学特性^[32]

DMD 具有高光学效率和高对比度，这跟 DMD 的微镜阵列结构及其光学特性密切相关。

DMD 微镜阵列是一个微反射镜孔径的二维周期阵列，每一个微镜形成一个复孔径函数，它包括一个振幅项(对应微镜的反射范围的变化)乘以一个相位项(对应微镜的旋转角度)。由于输入光的横向范围远大于多个微镜的几何尺寸，所以 DMD 阵列就形成了一个二元衍射光栅。光栅周期为 $d=17$ 微米，缝宽 $b=16$ 微米。在一维情况下，对相干光的调制如图 13。

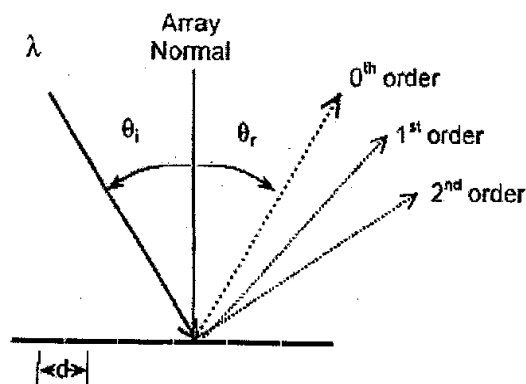


图 13、入射光入射到周期为 d 的 DMD 阵列上。DMD 微镜处于平衡状态，光束经过镜反射并沿不同衍射级次出射。

法向入射 DMD 的光束遵循下面的光栅方程重新分布：

$$d(\sin \theta_r - \sin \theta_i) = n\lambda \quad (11)$$

在上面方程中， n 为衍射级次， θ_i 为入射角， θ_r 为光能出射最大的反射角（衍射角），当在 $\theta_r = -\theta_i$ 的理想情况下，方程 (11) 简化为布拉格方程：

$$2d(\sin \theta) = n\lambda \quad (12)$$

当在 DMD 微镜发生偏转的情况下，如夫朗和费衍射角等于某一衍射级次，衍射光的 88% 以上的光能量将沿此级次闪耀出射。如图 14。衍射光沿第二级次闪耀出射。

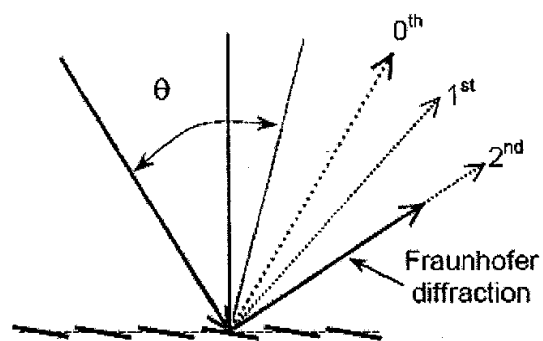


图 14、入射光入射到处于闪耀光栅情况下的 DMD 阵列上，DMD 处于偏转状态，衍射光在闪耀角方向集中出射。

§ 2.4 基于 DMD 的数字灰度光刻制作微结构

MEMS 技术的诞生是未来新技术革命发展一种必然趋势, 其在军事、航天、信息、医学、工业和农业等领域都有着广阔的应用前景。在 MEMS 中应用的各种微光学元件和微机械器件常常具有连续的表面浮雕结构, 而 MEMS 的制造主要依赖于微细加工技术, 现有的采用套刻制作三维连续微结构的方法, 已难以满足高性能的 MEMS 加工的需要。因此, 发展制作连续微结构的一些新技术来解决连续微结构的光学元件的制作问题十分必要。

本文研究一种数字灰度掩模光刻技术来制作具有连续微结构的微光学元件。把 DMD 显示的图形直接视作掩模进行微光学元件的制作, 我们称 DMD 显示的图形为数字掩模。连续微光学元件的表面结构是三维的, 但是 DMD 显示的是二维图形, 所以需要将三维结构转化为在抗蚀剂上形成所需的曝光量二维分布。为此我们提出的数字灰度掩模思想: 将三维微结构的高度进行量化, 根据不同的高度求出其相应的数字掩模灰度级, 用一个具有对应高度灰度的二维 DMD 图形显示, 进而完成成像、曝光、刻蚀等工序, 并最终制作出具有三维连续的结构光学元件。

§ 2.4.1 DMD 的灰度量化的^[33,34,35]

DMD 的灰阶是由 DMD 微镜对入射光的二元脉冲宽度调制获得的。DMD 微镜作为一个光阀可以使入射光迅速开关。当微镜偏转, 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以致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)。

为简化起见, 我们用一个 4 位二进制视频数据进行脉冲宽度调制 (PWM) 控制的脉冲序列范例, 如图 15 所示。信号的每一位代表一个时间段对应入射光的开或关 (0 或 1) 这些时独立的间段对应一定的值: 2^0 、 2^1 、 2^2 、 2^3 , 或 1、2、4、8。最短的时间段称为最低有效位 (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，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。

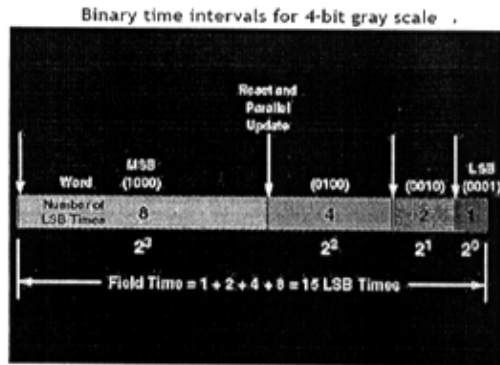


图 15、4 位二元脉冲宽度调制 (PWM) 序列图样

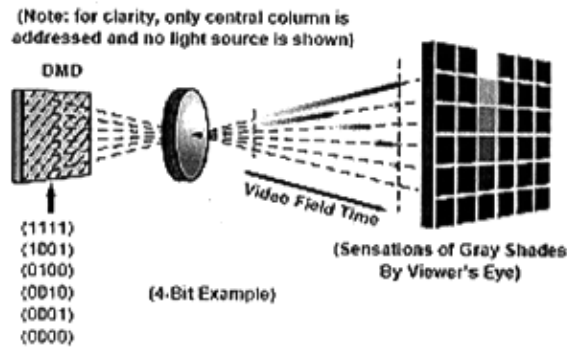


图 16、DMD 的二元脉冲宽度调制 (以 4 位为例)

二元脉冲宽度调制 (PWM) 的详细描述如图 16 所示。PWM 控制信号过程中，二进制的“1”将驱动 DMD 微镜偏转到“开”的位置，而“0”将使 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; 数字 8 用 4 位二进制表示为 1000, 它只要由 LSB+3 时间段来表示。通过这 4 个时间段开关的组合, 就可以产生 2^4 或 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。这些观察到的灰度正比于 DMD 显微镜“开”状态的时间在一个帧时中的所占的比值。

§ 2.5 小结

本章介绍了空间光调制器的原理和三种常用的电寻址空间光调制器 LCD、PDP 和 DMD, 比较了三种的优缺点。并介绍了 DMD 的基本结构、工作原理、特点, (包括高分辨率, 高光学效率, 高对比度)。DMD 作为图像显示的核心元件, 其灰阶由显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显微镜在一帧中“开”状态所占的时间比。DMD 虚拟掩模技术在光刻成像过程中有着很好的应用前景, 这种技术具有费用低廉, 设计灵活性大、制作周期特别短等特点极有应用前途。

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.*, Vol 10: 635 (1985)
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.*, Vol 11: 748 (1986)
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.*, Vol 26: 1370 (1987)
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.*, Vol 14: 217 (1975)

7. Kallman Robert R, Goldstein Dennis H, Phase-encoding input images for optical pattern recognition, *Opt. Eng.*, Vol 33(6): 1806 (1994)
8. Horner Joseph L, Gianono Peter D, Phase only matched filtering, *Appl. Opt.*, Vol 23(6): 812 (1984)
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.*, Vol 32(5): 715 (1999)
10. Dou R and Giles M, Closed- loop adaptive optics system with a liquid crystal television as a phase retarder, *Opt Lett*, Vol 20(1): 583 (1995)
11. Love G, et al, Binary adaptive optics- atmospheric wave-front correction using a half-wave phase shifter, *Appl Opt*, Vol 34: 6058 (1995)
12. 范志新, 液晶器件工艺基础, 北京邮电大学出版社, (2000)
13. McCandless, Timothy P, PDP mechanisms for intelligent display control, *Simulation Series* Vol 17(1): 87 (1986)
14. B.M.Tian,, *Electronic Display*, Publishing House of Tsinghua Univ. (2001)
15. Hornbeck, Larry J., 128 * 128 Deformable mirror device, *Conference Record of 1982 International Display Research Conference*, 76-79 (1982)
16. Hornbeck, Larry J, 128 multiplied by 128 Deformable mirror device, *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol 30(5): 539 (1983)
17. Hornbeck, Larry J, 128 multiplied by 128 Deformable mirror device,, *Oil and Gas Journal* Vol 24(2): 199 (1982)
18. R.J. Gove, V. Markandey, S. Marshall, D. Doherty, G. Sextro, and M. DuVal, "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*, pp. 70-73 (1995).
20. W.E. Nelson and R.L. Bhuva, "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"
22. Kevin., J.Kearneyt and Zoran Ninkov. "Characterization of a digital micromirror device for use as an opticalmask in imaging and spectroscopy". SPIE Vol. 3292.p81-92.
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*, Vol. 24, pp. 1012-1015 (May 1993).
24. Henry Chu, "DMDTM Superstructure Charaterization".1998,9, TI Technical Journals.
25. Lars Yoder, Walter Duncan, Elisabeth Marley Koontz, John So, Terry Bartlett. DLPTM Technology: Applications in Optical Networking. Proceedings of SPIE Vol. 4457 (2001) .p54-61.
26. Larry J .Hornbeck, "DMD Architecture," 1994.TI TECHNICAL PAPERS.
27. L.J. Hornbeck, "Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future (Invited Plenary Paper)," *Proc. SPIE*, Vol.2639,
28. L.J. Hornbeck, "Current Status of the Digital Micromirror Device (DMD) for Projection Television Applications (Invited Paper)," *International Electron Devices Technical Digest*, pp. 381-384 (1993).
29. R.J. Gove, V. Markandey, S. Marshall, D. Doherty, G. Sextro, and M. DuVal, "High Definition Display System Based on Digital Micromirror Device," International Workshopon HDTV (HDTV'94), International Institute for Communications, Turin, Italy (October 1994).
30. J. Florence and L. Yoder, "Display System Architectures for Digital Micromirror Device (DMD) Based Projectors," *Proc. SPIE*, Vol. 2650, Projection Displays II, pp. 193-208 (1996).
31. M.S. Brennesholtz, "Light Collection Efficiency for Light Valve Projection Systems," *Proc. SPIE*, Vol. 2650, Projection Displays II, pp. 71-79 (1996).
32. Lars Yoder, Walter Duncan, Elisabeth Marley. "DLPTM Technology: Applications in Optical Networking", SPIE .VOL.4457 p54-61.
33. Larry J. Hornbeck. "Digital Light ProcessingTM for High-Brightness, High-Resolution

Applications”

34. L.J. Hornbeck, “Digital Light Processing and MEMS: Timely Convergence for a Bright Future (Invited Plenary Paper),” *Proc. SPIE*, Vol. 2639, Micromachining and Microfabrication Process Technology,
35. L.J. Hornbeck. “Digital Light Processing™: A New MEMS-Based Display Technology”. *SPIE.VOL.3013* p27-38

第三章 DMD 光刻成像模拟和实验

§ 3.1 引言

随着光刻技术的发展,其加工线条的最小特征尺寸愈来愈小,对掩模加工精度提出的要求也愈来愈高。由于掩模制作复杂且费用昂贵,光掩模的制作加工成为制约光刻技术发展的一大瓶颈^[1]。近年来陆续出现的新型无掩模光刻技术,成功地避免了掩模的制作加工困难问题,大大地简化传统光刻的一些繁琐的工艺流程。无掩模光刻在制作连续微结构的光学元件方面也受到人们的关注^[2-3]。

本文试图研究数字灰度掩模光刻技术来制作具有连续微结构的微光学元件。由于 DMD 显示的数字灰度掩模图形可以实时修改和显示任意的形状,因此这种技术可以用于制作各种表面形状的三维微结构光学元件,可以方便地进行一次曝光显影成型,而且具有费用低廉,制作周期特短等优点,有良好的应用前景。本章将建立一种基于 DMD 的部分相干光刻成像系统模型,并进行模拟分析。最后开展了用卤化银明胶进行酶蚀制作微透镜阵列的实验研究。

§ 3.2 数字光刻成像系统

在新型无掩模光刻技术中,一些基于 MEMS 技术的 SLM 陆续被应用于生成数字掩模图形。依这些数字空间光调制器图形灰度形成的方式,可将其大致分为三类:

(1) 利用微镜偏离平衡位置的一系列角度进行光调制。如荷兰 ASML 公司的倾斜微镜 (Tilting Micromirror)^[4-5],结构与原理如图 17 所示。用倾斜微镜偏转的角度来获得各个灰度等级。

(2) 利用微镜上下移动偏离平衡位置进行光调制。如 Silicon Light Machines 的光栅光阀 (Grating Light ValveTM, GLV)^[6-7],其结构与原理如图 18、19 所示。GLV 具有良好的灰度渐变精度,像素具有很小的几何尺寸,且单元间间隙小,镜片填充因子高。

(3) 利用微镜偏转与平衡位置成一固定角度,通过开合率来进行光调制。

如上一章介绍的TI公司生产的DMD。

这些基于MEMS技术的SLM可直接用于无掩模投影光刻成像或与微透镜阵列、波带片阵列（Zone Plate Array, ZPA）相结合应用于无掩模光刻成像。^[8]

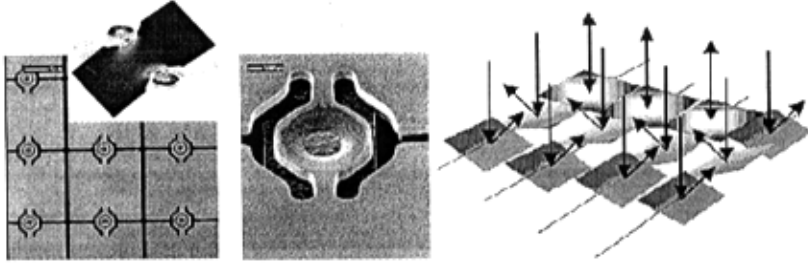


图 17、Tiling Micromirror（ASML）的结构和工作原理^[4]

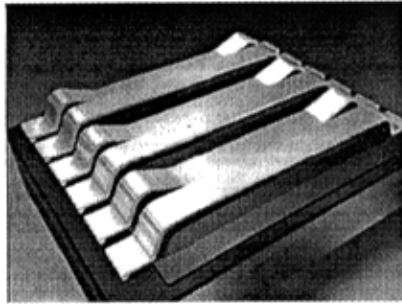


图 18、GLV 光栅光阀^[6]

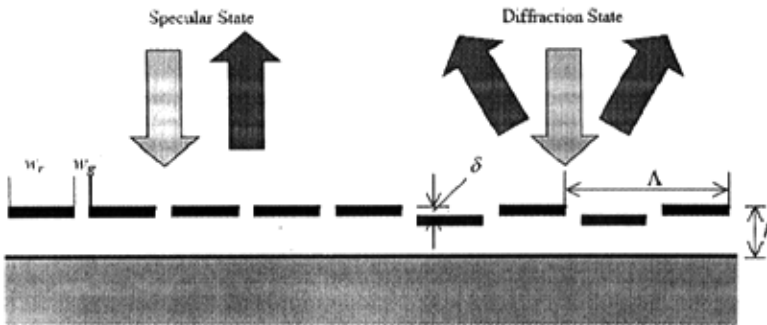


图 19、GLV 光栅光阀的工作原理^[6]

下面介绍常见的两种数字光刻成像系统装置：

(1) 基于SLM的缩小投影成像装置：如图20所示，由于DMD阵列大小有限，在曝光中需要加移动平台，进行步进曝光以获得较大面积的光刻图形。其中像面光强分布需要用部分相干成像理论计算。

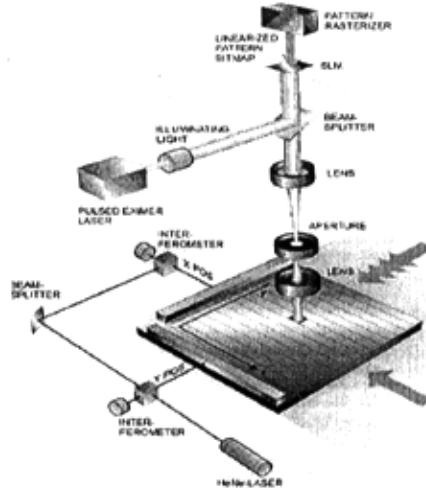


图20、基于SLM的缩小投影成像装置(ASML)^[4]

(2) 基于DMD的投影成像和MEMS技术相结合的系统装置。图21-a所示为Ball Semiconductor设计的基于DMD投影光刻装置^[9]。图21-b所示为美国MIT研究的波带片阵列(ZPA)光刻装置^[8]。在此类光刻系统中，DMD每个的像素经特殊设计的微光学元件(如21-a图中的Integrated MLSFA空间滤波器，图21-b中的波带片ZPA)先聚焦滤波然后再投影成像到基片上，通过移动平台扫描曝光或的光刻图形。光刻过程的某一瞬时，基片上的光斑不再有原来的微镜像素的几何特征，为一高斯分布小光点。且这种情况下，每个DMD像素点形成的光点是分开的，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的结果。

可见对于不同的数字光刻成像系统结构，应采用与之相适应的成像模型来描述，以便为光刻成像实验研究提供适合的理论依据。

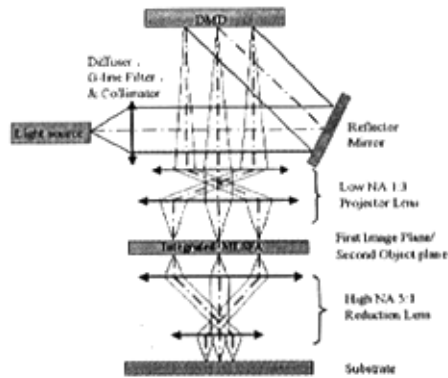


图 21-a、Ball Semiconductor 设计的 DMD 投影光刻系统^[10]

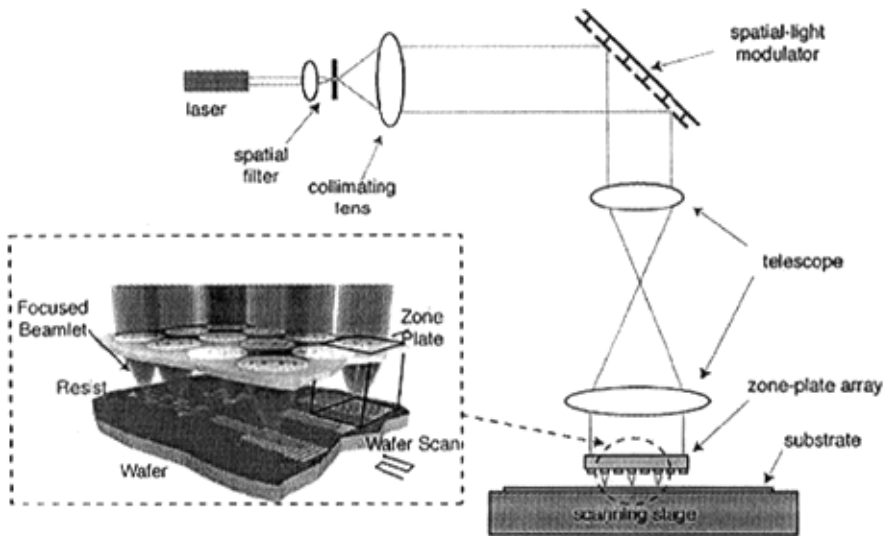


图 21-b、MIT 的 ZPA 投影光刻装置^[8]

§ 3.3 DMD 部分相干成像系统模型

DMD 的工作特点、照明光源和成像系统的结构决定了数字光刻成像系统的成像机理。为合理快速地分析数字光刻成像过程以指导曝光实验的开展。根据曝光系统的特点，建立简单实用的数字光刻成像模型十分必要。

当用德州仪器公司生产的 DMD 实现灰度曝光时，由于相邻像素往往并不是同时处于相同的开合状态。因此，相互之间的干涉效应不很明显，特别是如照明光是非相干光源时，对于较低缩小倍率的数字投影光刻成像问题，可用一个特殊的部分相干成像模型来描述，以方便计算模拟。即对单个微镜用相干成像理论处理求出其像面光强分布，而整个 DMD 阵列图形的像面光强视为单个微镜光强分布的加权叠加。这一模型略作改动也可适于 DMD 与微透镜阵列聚焦结合的光刻成像快速计算。

§ 3.3.1 相干与非相干成像理论

微光学元件的制作质量，主要取决于曝光系统的图形传递能力，而对曝光系统图形传递性能可用光学成像系统的光学传递函数来描述。而我们建立的 DMD 部分相干成像系统中既具有相干成像特点，又具有非相干成像特点。为了研究光束在缩小投影光学成像系统中的传递特性，我们有必要先分析物体的相干和非相干照明情况下系统像传递过程。

一、相干照明^[10]

在相干照明情况下，像面的复振幅分布 $U_2(x, y)$ 是物面复振幅分布 $U_1(x, y)$

与脉冲相应 $O(x, y)$ 的卷积：

$$U_2(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} O(x-x', y-y')U_1(x', y')dx'dy' \quad (13)$$

对 (5) 两边作傅立叶变换得：

$$G_2(f_x, f_y) = H(f_x, f_y)G_1(f_x, f_y) \quad (14)$$

其中 $G_2(f_x, f_y)$ ， $H(f_x, f_y)$ ， $G_1(f_x, f_y)$ 是 $U_2(x, y)$ ， $O(x, y)$ ， $U_1(x, y)$ 的傅立

叶变换。

式(6)中的 $H(f_x, f_y)$ 称为相干成像系统的光学传递函数,它是脉冲响应函数的傅立叶变换。式(14)表明,只要知道了输入函数的频谱分布 G_1 和光学系统的相干传递函数 H ,两者相乘就得到像面的频谱分布 G_2 ,再作一次逆傅立叶变化就得到像面的复振幅分布。

若 $H(f_x, f_y) \equiv 1$,则成像是理想的。然而任何成像光学系统都是衍射受限的,最大分辨率受到光瞳大小的限制。分析表明,在相干照明情况下,相干传递函数等于系统的光瞳函数:

$$H(f_x, f_y) = A(\lambda d f_x, \lambda d f_y) \quad (15)$$

$$A(\lambda d f_x, \lambda d f_y) = \begin{cases} 1 & \text{在出瞳内} \\ 0 & \text{在出瞳外} \end{cases} \quad (16)$$

由此可求出光学系统的截止频率:

$$f_{cx} = x / \lambda d, \quad f_{cy} = y / \lambda d \quad (17)$$

d 为像距。在截止频率以下的频率分量,系统允许无畸变地通过,而高于截止频率的分量则完全不能通过,相干照明相当于一个低通滤波器。滤波的结果使得图形高频损失,陡直的壁变平滑了。

二、非相干照明^[10]

非相干照明较之相干照明情况要复杂一些。主要是用光强代替了复振幅:

$$I_2(x, y) = \iint_{-\infty}^{\infty} I_1(x', y') |O(x - x', y - y')|^2 dx' dy' \quad (18)$$

$I_2(x, y)$ 为像面的光强分布, $I_1(x, y)$ 为物面光强分布, $O(x, y)$ 为脉冲相应函数。

对(21)式两边取傅立叶变换得:

$$G_2(f_x, f_y) = H(f_x, f_y) G_1(f_x, f_y) \quad (19)$$

G_1, G_2 分别为像面和物面光强的傅立叶变换。(18)式与(14)式形式相同。

$H(f_x, f_y)$ 称为非相干成像系统的光学传递函数,它是脉冲响应函数模平方的傅

立叶变换:

$$H(f_x, f_y) = F\{|O(x, y)|^2\} \quad (20)$$

由傅立叶变换的自相关定理, (20) 式可写成:

$$H(f_x, f_y) = F[O(x, y)] \otimes F[O(x, y)] = A(\lambda d f_x) \otimes A(\lambda d f_y) \quad (21)$$

式中用到了脉冲响应函数的傅立叶变换在数值上等于出瞳函数这一事实, 知道了出瞳函数, 根据 (21) 式就可以算出光学传递函数。不同的出瞳函数得到不同形状的光学传递函数。非相干照明成像系统的光学传递函数 $H(f_x, f_y)$ 存在的截止频率

$$f_{ox} = 2x / \lambda d, \quad f_{oy} = 2y / \lambda d \quad (22)$$

§ 3.3.2 DMD 单个微镜成像

在我们建立的基于 DMD 的数字光刻成像模型中, 整个 DMD 阵列成像的像场分布由所有的 DMD 微镜点成像的非相干叠加组合形成。对单个微镜的成像, 用相干光来处理, 而对不同微镜之间的反射光当作非相干光来处理。这适于 DMD 光刻成像系统的部分相干成像模型具有快速模拟成像过程的优点, 当然也有其应用局限性。在高倍率投影成像系统中, 应采用严格的部分相干成像理论来处理。

下面将对单个的微镜成像进行分析。

DMD 单个微镜的结构如图 22, DMD 单元的微镜, 镜片呈正方形, 边长为 $16\mu\text{m}$, 微镜之间的间隙为 $1\mu\text{m}$, 所以 DMD 阵列的周期为 $17\mu\text{m}$, 微镜与第二层扭臂梁的连接处为光反射的非工作, 为简化起见, 可以把它看作一个边长约为 $2\mu\text{m}$ 的正方形^[11]。图 23 为一 DMD 微镜正处于“开”偏转状态, 偏转角为 $\theta_L = 12^\circ$ 。微镜偏离平衡位置的最大值为 h 。

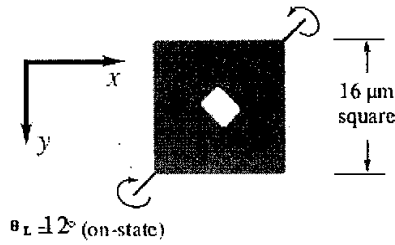


图 22、DMD 单个微镜的平面结构

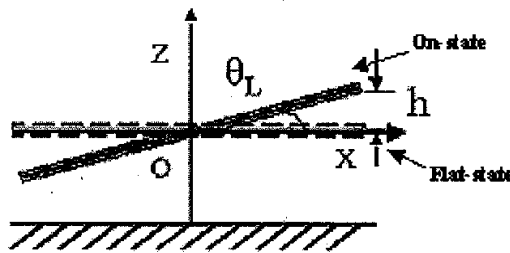


图 23、处于“开”状态的 DMD 微镜的截面

单个 DMD 微镜成像系统：

如图 24，准直光束入射到单个 DMD 微镜面上，经投影透镜组和滤波装置在像面上成像。在像素在像面成像之前，也可以加一些其它光学元件（如微透镜阵列，波带片阵列 ZPA）对 DMD 象素聚焦后再成像。^[8.10]

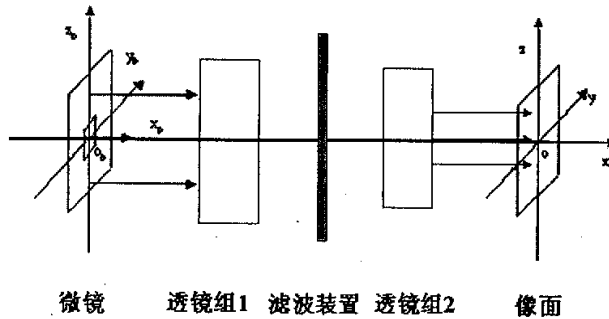


图 24、单个微镜成像装置示意图

单个微镜的反射函数 $r(x_0, y_0)$ 表达式为:

$$r(x_0, y_0) = [\text{rect}(\frac{x_0}{b}, \frac{y_0}{b}) - \text{rect}(\frac{x_0}{c}, \frac{y_0}{c})] \cdot \exp[\frac{j2\pi h}{b\lambda}(x_0 + y_0)] \quad (23)$$

其中 b 为微镜边长, c 为微镜中心连接处边长, h 为微镜偏离平衡位置的最大值。

为计算简单起见, 可忽略位相项 $\exp[\frac{j2\pi h}{b\lambda}(x_0 + y_0)]$, 则反射函数 $r(x_0, y_0)$ 的傅立叶变换可表示为:

$$R(\xi, \eta) = F\{r(x_0, y_0)\} \\ = b^2 \text{sinc}(\xi) \text{sinc}(\xi) - c^2 \text{sinc}(\eta) \text{sinc}(\eta) \quad (24)$$

其中 ξ 、 η 为对应 x_0 、 y_0 方向的空间频率。

滤波后通过傅立叶逆变换可以获得单个微镜的点扩展函数:

$$h(x, y) = \int \int_{-\infty}^{\infty} R(\xi, \eta) \cdot p(\xi, \eta) e^{i2\pi(\xi x + \eta y)} d\xi d\eta \quad (25)$$

其中 $p(\xi, \eta)$ 为滤波器光瞳函数。

如果采用微光学元件聚焦后成像, 则此时的点扩展函数应为:

$$h(x, y) = R(x, y) \cdot p(x, y) \quad (26)$$

§ 3.3.3 DMD 单个微镜成像模拟^[14,15]

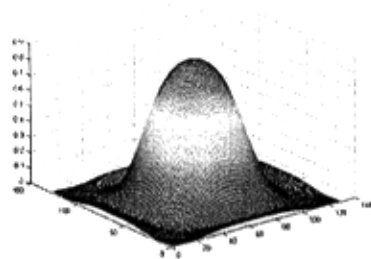
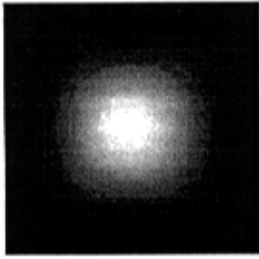
根据图 24 所示的 DMD 单元微镜成像系统模型, 下面以单个微镜处于开状态 (即微镜的二元控制信号为 1 的情况) 进行成像模拟分析。设入射光线为 $\lambda = 435.8\text{nm}$, 透镜组的缩放比为 5。下面是在不同的数值孔径下, 单个 DMD 在像面的光强分布。

(1) $\text{NA}=0.3$, 如图 25, 在低数值孔径情况下, 物频的高频成分严重损失,

像强分布轮廓不再是带孔的方形，而是一个像强中间高，边缘低的弥散斑。

(2) $NA=0.5$ ，如图 26，在此数值孔径下，像强平面分布轮廓已出现 DMD 微镜的大致带孔方形，但是，边缘轮廓还很圆滑，出现了四个强度峰，对称地分布在像的四个角上，且像强度集中分布在这四个峰上。

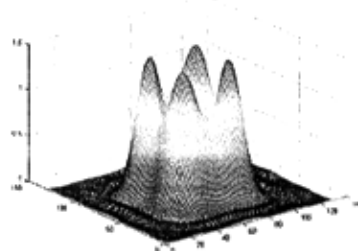
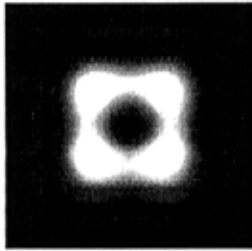
(3) $NA=0.7$ ，如图 27，在此种情况下，像强平面分布轮廓已接近微镜的形状，像强度峰增加到 8 个，如图所示。



a、DMD 像面光强二维分布

b、DMD 像面光强三维分布

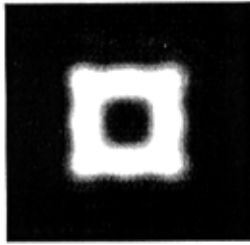
图 25、 $NA=0.3$



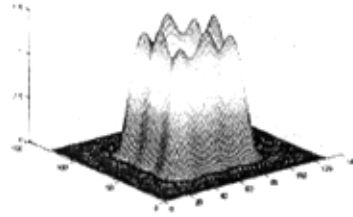
a、DMD 像面光强二维分布

b、DMD 像面光强三维分布

图 26、 $NA=0.5$



a、DMD 像面光强二维分布

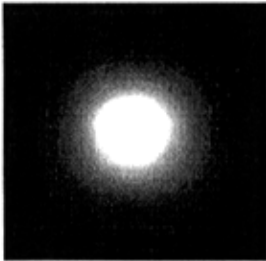


b、DMD 像面光强三维分布

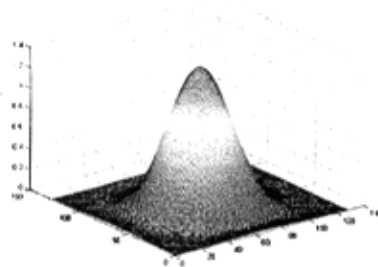
图 27、NA=0.7

综上所述，随着数值孔径的增大，像面强度分布轮廓逐渐趋向微镜形状接近，由低数值孔径的单一强度峰，向高数值孔径多强度峰变化，而且，强度分布更趋向均匀。

在有微透镜阵列或波带片阵列的数字光刻系统中，DMD 单个像素像被聚焦成一个个小亮点（艾里斑），如图 28。基片上的像为一点阵图形，需要有移动基片的平台扫描才能形成连续的曝光量分布图形。



a、像面光强二维分布



b、像面光强三维分布

图 28、DMD 像素聚焦成像

§ 3.3.4 DMD 阵列的成像^[12,13]

在我们讨论的这类成像情况下，整个 DMD 阵列成像的光强分布为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，即像面上所有 DMD 单元上的光强非相干叠加强度为：

$$I_i(x, y) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^M I_0(n, m) \cdot [\delta(x - nd, y - md) * r(x, y)] \cdot \text{rect}\left(\frac{x}{W}, \frac{y}{W}\right) \cdot |h(x - nd, y - md)|^2 \quad (27)$$

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

其中 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。在公式 (27) 中，可以看出，DMD 像面的光强分布由一个体现 DMD 阵列周期结构的二维的 δ 函数与单个微镜像面光强进行卷积而得到的。

先前几种微镜成像模拟的情况，DMD 的微镜处于开状态。而 DMD 对数字掩模图形显示的是灰度图像，DMD 灰度的获取是通过 DMD 微镜对入射光的二元脉冲宽度来完成的。DMD 微镜显示的灰度正比于微镜片“开”状态的时间在一个帧时中的所占的比值。如图 29，在 $NA=0.5$ 的情况下，DMD 显示 7bit 的一系列灰阶像，图 29-a 为灰阶 0~0.5，图 29-b 为灰阶 0.6~1.0。^[16]

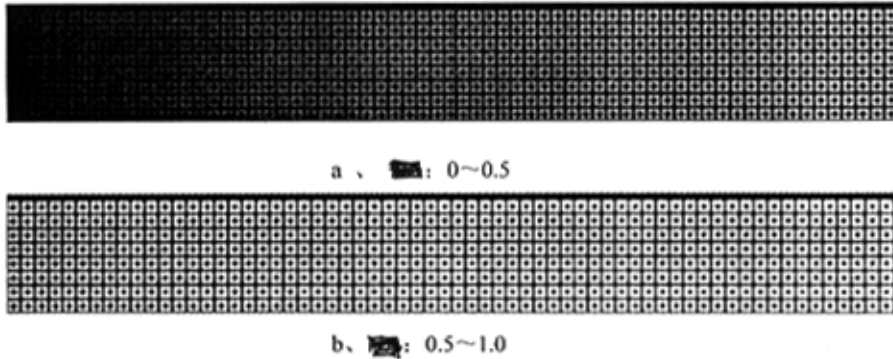


图 29、7bit 的灰阶显示像

§ 3.4 微透镜的 DMD 光刻成像模拟^[17]

§ 3.4.1 DMD 光刻制作 MOE 的成像原理

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, DMD 灰阶掩模继承了传统的灰阶掩模技术优点。对连续微结构具有三维面型, 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, 其曝光量可表达为:

$$\phi_{gray}(x, y) = \int_0^T I_i(x, y, t) dt \quad (28)$$

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

§ 3.4.2 计算机模拟与分析^[18]

根据以上原理和部分相干成像理论, 我们进行了用 DMD 灰度光刻制作微透镜的过程的计算机模拟。

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^[19], 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^[20], 与 CCD 集成提高探测器阵列的填充因子^[21]等。因此我们开展了用实时灰度光刻制作微透镜列阵的实验, 设微透镜的最大口径半径为 R , 高为 h , 如图 30 所示。

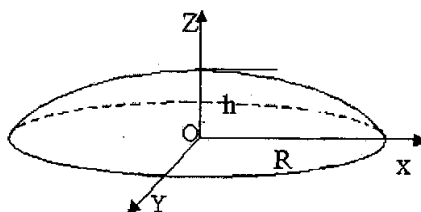


图 30、微透镜的三维坐标系表示

微透镜的三维面型函数为一椭球面可表示为：

$$\frac{x^2 + y^2}{R^2} + \frac{z^2}{h^2} = 1 \quad (0 \leq z \leq h, x^2 + y^2 \leq R^2) \quad (29)$$

微透镜跟大多数微光学元件一样均为连续的 3D 面型，在掩模图形设计中，需要将三维面型结构转化为不同高度对应一定的灰阶的 2D 灰阶掩模图形。图 31 为 DMD 显示的微透镜 2D 灰阶掩模图形，图中右边图为左边微透镜灰阶掩模图的一部分，在其中可以清楚看到 DMD 单元平面结构轮廓。

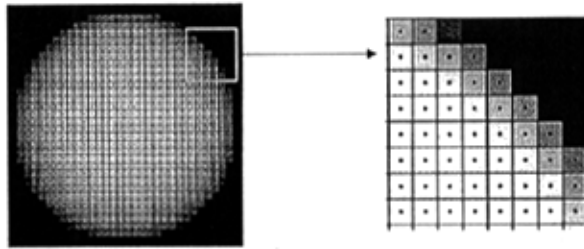


图 31、DMD 显示的微透镜掩模图形，右边部分为左边掩模图的一部分。

由公式 (27)、(28) 和 (29)，求出微透镜掩模图形通过成像后在抗蚀剂上的光强分布，再乘以曝光时间得到其曝光量分布，取数值孔径为 0.5，波长 $\lambda = 435.8\text{nm}$ ，图 32 所示的是微透镜曝光量分布的球冠状图（曝光量采用归一化坐标）。

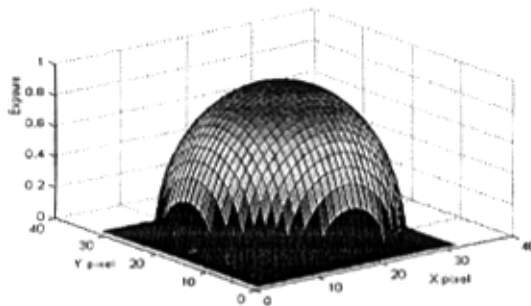


图 32、微透镜曝光量分布

当在低缩小倍率投影，没有移动平台和和 ZPA 聚焦成像情况下，当数值孔径 NA 为 0.3 的微透镜的模拟结果如图 33，在图中比较了微透镜截面上模拟光强分布，拟合光强分布两种曲线。图 34，在 $NA=0.5$ 的情况下，模拟的 3D 微透镜浮雕。

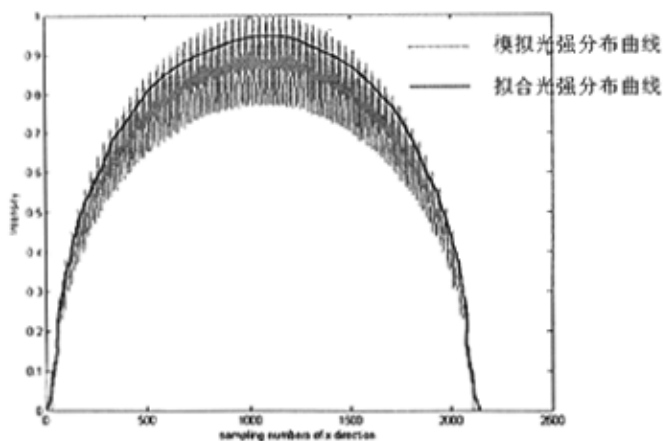


图 33, $NA=0.3$ 微透镜截面光强分布曲线

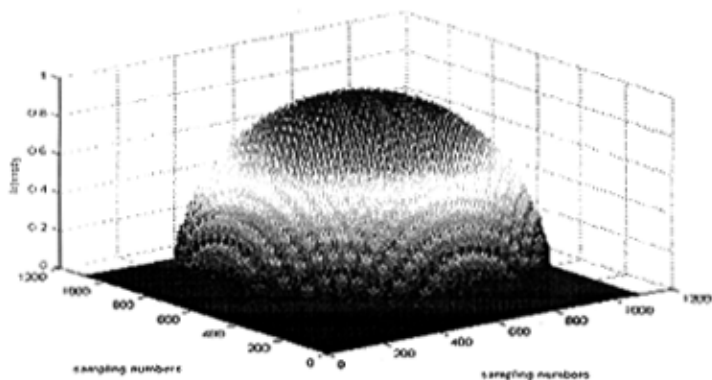


图 34、 $NA=0.5$ 模拟的 3D 微透镜浮雕

从上面的模拟结果看，可以初步得出这种基于 DMD 的光刻成像的模型的一些特征：

1、模拟的光强曲线为一系列波峰组成，这是 DMD 单元像光强非相干叠加所致，因为在单个 DMD 微镜成像中，单个像就存在多个强度峰。在低数值孔径的情况下，一个像素对应一个强度峰（如 $NA=0.3$ ），而且强度曲线起伏比较大，随着数值孔径的增大，曲线的峰数增多，强度峰之间的起伏逐渐减小，像面光强度进一步趋于均匀化。

2、曲线较大波谷是 DMD 单元之间的间隙像，像在很大程度上还体现出 DMD 阵列的像素栅格特征，对于低随小倍率投影成像，在一定程度上，这种像素栅格的影响不易消除，除非使用扫描曝光方式。

3、微透镜边缘高度不连续，陡直下降，这是由于边缘像素丢失的缘故。虽然 DMD 的像素几何尺寸已经很小，达到边长 16 微米，但是当设计精细的掩模图形边缘部分的细微特征小于 DMD 单元这个尺寸时，就不足以填充一个像素时，就会出现边缘部分丢失，这样的图形经 DMD 显示后将发生边缘畸变。为了使其更加接近理想的图形，则需要对它的边沿进行优化处理，其优化的方法是：根据图形在边缘像素所占的面积的大小用不同的灰度等级来处理，面积越大，则灰度等级越高。这种情况需要通过边缘优化来解决，降低灰度填充。

从上面的模拟结果来看，模拟的微透镜表面还不够平滑。为了进一步提高微光学元件制作的质量，我们提出了一些措施来解决这个问题。在微光学元件中，很多具有中心对称的 3D 微结构，如微透镜、轴锥镜等，因此对于这类微光学元件的制作可以通过旋转基片平台曝光，使得在不同的等高面上的曝光量均匀化，可一定程度上改善微结构面型。

图 35 为经基片旋转曝光后模拟的微透镜截面强度分布曲线。在 NA 为 0.3、情况下的模拟结果。图 36 为在 $NA=0.5$ 的情况下模拟的微透镜 3D 浮雕。

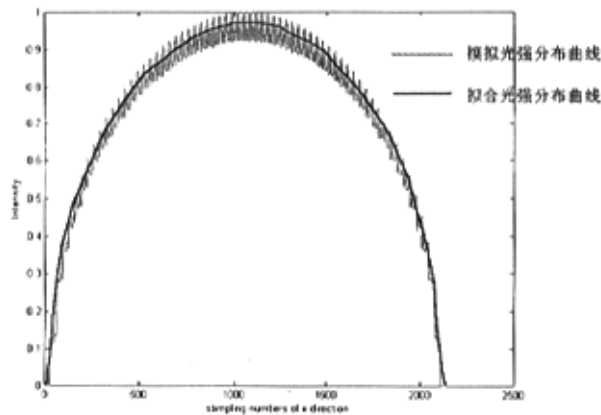


图 35、NA=0.3 微透镜截面光强分布曲线（旋转基片平台曝光）

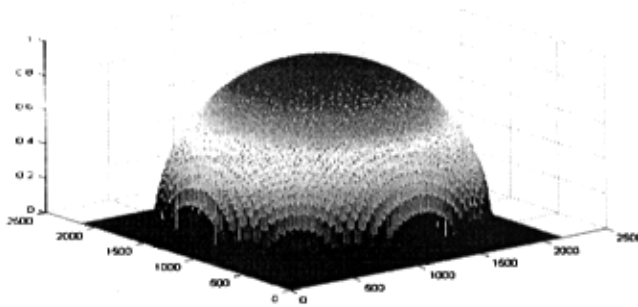


图 36、NA=0.5 模拟的 3D 微透镜浮雕（旋转基片平台曝光）

从上面的模拟结果看，旋转基片平台曝光只能使等高面上的曝光量均匀化，而在轴方向的曝光量均匀化影响不大。从模拟的微透镜截面光强分布曲线看，在轴向的光强还存起伏，但这些特征已经很细微。通过光学元件的显影刻蚀过程中的后处理工艺，可进一步使其表面趋向于设计的平滑曲面。

对更多的没有对称的几何面型的微结构元件的制作，可采用把基片放在二维移动平台上扫描曝光的方法来提高微结构元件面型质量。此时设计的掩模图形不完全与需要制作的微结构的对应灰度图形相同，优化设计使移动基片扫描曝光后的图样与设计的元件相符。

图 37 是经直接投影曝光的 4bit 灰度等级模拟曝光量分布，图 38 是有经平移扫描的投影曝光的 4bit 灰度等级模拟曝光量分布。从图 38 可知，微结构元件的面型良好。这表明通过移动基片平台扫描曝光可以降低微结构制作在投影成像过程中的图形畸变程度，从获得比较好的曝光图形质量。

此外，微光学元件也可以用基于 DMD 的高倍率缩小的数字投影装置制作。也可以获得较好的曝光图像质量。在下一节，我们利用这种装置开展了制作微透镜阵列的实验研究。

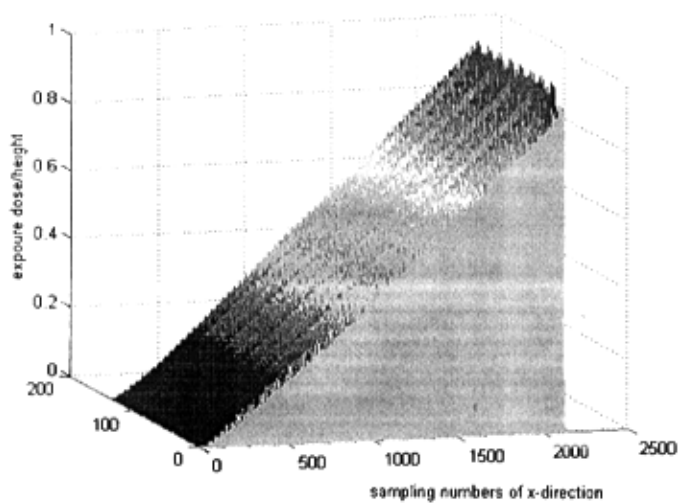


图 37, 模拟的 4bit 灰度等级曝光量分布 (无移动平台)

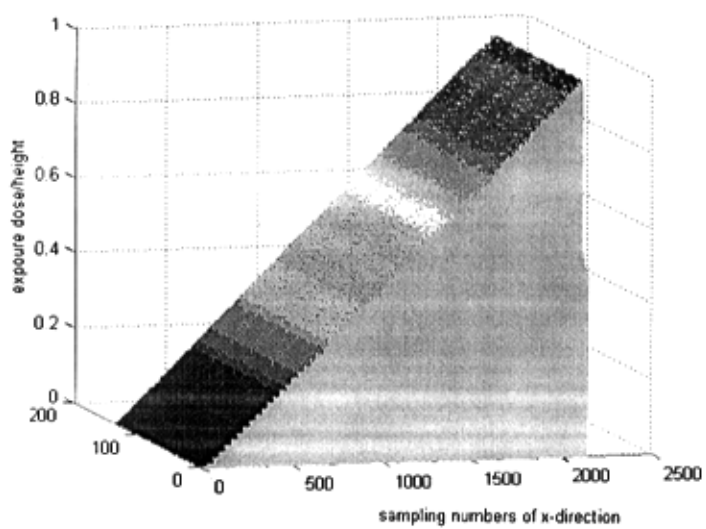


图 38, 模拟的 4bit 灰度等级曝光量分布 (有移动平台)

§ 3.5 实验^[18]

我们开展了制作微光学元件的实验研究，采用高倍率投影成像曝光光刻系统，并用 Kodak131 全色银盐干板作为记录材料进行了实验。实验置如图 39：

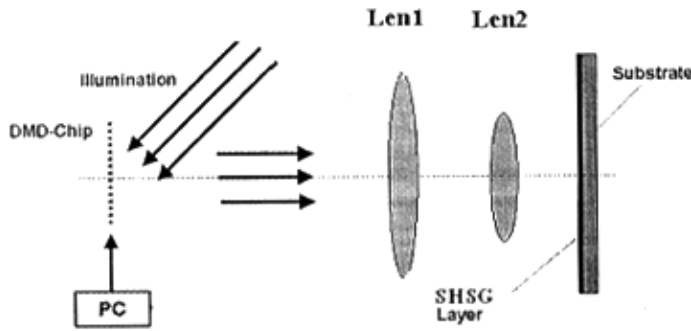


图 39、基于 DMD 的投影成像实验装置示意图

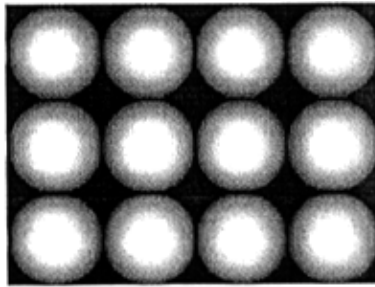


图 40、微透镜阵列的灰度掩模图

计算机输出如图 40 的微透镜阵列的灰度掩模图数据，通过显示卡在 DMD 上显示（DMD 分辨率 XGA 1024×768），显示的图形通过缩拍透镜 lens 精缩 20 倍后成像在基片的感光材料上，单个微透镜像的设计半径为 108.8 μm ，精缩倍数的最大值必须根据光刻系统的分辨本领来确定，即 DMD 像素经过缩拍后的大小必须大于成像系统可分辨的最小尺寸，这样才能在光敏材料上获得高质量的成像。

我们选择的 Kodak-131 全色银盐干板的感光波长范围是 400—680nm

[23,24]。通过对已有的卤化银明胶处理工艺进行改进,将灰度银像转化成明胶硬度潜像,最后采用酶蚀显影工艺把潜像显现为连续沟形的浮雕结构,改进部分除了采用酶蚀显影加深浮雕深度外主要还有采用了 Kodak D-19 显影液和调节了 R-10 的 A 液和 B 液的比例,因为当空频在 600 线/毫米以下时用 D-19 比用 PAAP 得到的衍射效率更高以及可获得最佳的灰度分布,将 R10 的 A 液、去离子水、B 液的比例由 1:10:30 调到 1:10:0.5,即降低了 B 液的浓度,这样有利于制作低频深浮雕的微结构,改进后的处理步骤如下表:

steps	conditions	time
用 F5(1:5) 对干板预处理	20 °C	4min
曝光		60s
显影 D19	20 °C	3min
停影	20 °C	20s
去离子水冲洗	20 °C	1min
漂白 (改进 R-10)	20 °C	3min
去离子水冲洗	20 °C	1min
定影 (F-5)	20 °C	5min
动水冲洗	20 °C	3min
酶蚀*(酶的浓度为 0.1%)	30°C	5—15min
去离子水冲洗	20 °C	5min
烘干去水分	80°C	60min

*所用的胰酶活性为 60IU/mg

实验结果和分析

实验成功地制作了半径为 $102.2\mu\text{m}$, 高为 $1.442\mu\text{m}$ 的微透镜列阵, 图 41 是它的表面轮廓测量结果 (Alpha-step 500 型表面轮廓仪测量)。设计的半径为 $108.8\mu\text{m}$, 高为 $1.520\mu\text{m}$, 因此半径偏差为 6.1%, 高度偏差为 5.1%。这些偏差是由于投影成像和显影刻蚀过程中非线性、湿法刻蚀的横向钻蚀、酶刻蚀时间控制不准确以及测量误差等原因造成的。实验结果表明, 大倍率缩小可以消除

象素栅格效应，制作的微透镜阵列具有较好的面型轮廓。

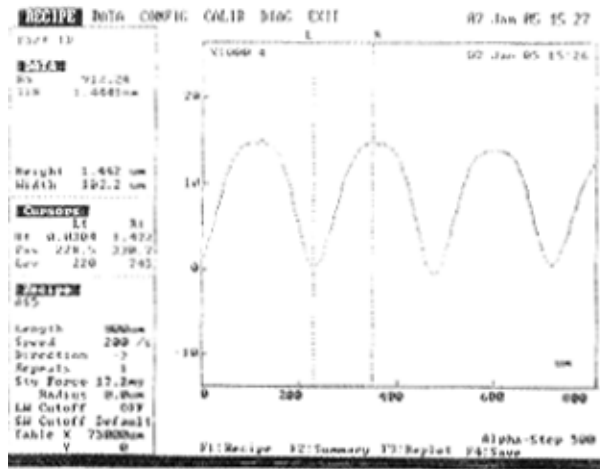


图 41、微透镜阵列的表面轮廓图 (alpha step 500)

§ 3.6 小结:

本章介绍了基于 DMD 的部分相干成像系统，根据 DMD 的周期性结构，我们对 DMD 单元点成像进行相干成像处理，而对 DMD 阵列成像按点成像的非相干叠加组合处理，从而建立一个特殊的 DMD 部分相干成像模型。我们对 DMD 微镜点成像进行了模拟，并以微透镜为例，对用 DMD 数字掩模技术制作微光学元件进行计算机模拟分析。最后用酶蚀卤化银明胶的方法进行数字光刻实验，成功地制作了有良好面型的微透镜阵列。

参考文献:

1. H. G. Craighead, Nanoelectromechanical systems, *Science*, Vol 290: 1532 (2000)
2. M. T. Gale, M. Rossi, J. Pedersen, Fabrication of continuous-relief micro-optical element by direct laser writing in photoresist, *Opt.Eng.*, Vol 33(11): 3556 (1994)
3. Larry J. Hornbeck, "Digital Light Processing™ for High-Brightness, High-Resolution

- Applications”
4. Kevin Cummings, Kevin Cummings , Arno Bleeker, Jorge Freyer, “Optical Maskless Lithography -OML”, Optical Cummings ASML.
 5. R. Fabian Pease, “Maskless lithography”, *Microelectronic Engineering* 78–79 (2005) 381–392.
 6. Jahja I. Trisnadi, Clinton B. Carlisle and Robert Monteverde, “Overview and applications of Grating Light Valve™ based optical write engines for high-speed digital imaging”, *Photonics West 2004 - Micromachining and Microfabrication Symposium January 26, 2004*
 7. D.M. Bloom, Silicon Light Machines, “The Grating Light Valve: revolutionizing display technology”.
 8. Rajesh Mwnon, Amil Patel. “Zone-Plate-Array Lithography (ZPAL)_ Optical Maskless Lithography for Cost-Effective Patterning ” .
 9. Kin Foong Chan, Zhiqiang Feng. “High Resolution Maskless Lithography By The Integration of Microoptics and Point Array Technique”, *SPIE .VOL 4985 (2003)* p37-43.
 10. Kin Foong Chan, Zhiqiang Feng. “High-resolution maskless lithography”, *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers* 2003 p: 331-339.
 - 11.
 12. 罗先刚, 陈旭南, 姚汉民. 微细加工中部分相干系统成像研究. *光学学报*, Vol.18(12): 1703-1710 (1998)
 13. J.B. Sampell, "An Overview of the Digital Micromirror Device (DMD) and its Application to Projection Displays," 1993 Sid international Symposium Digest of Technical Papers, Vol.24. p. 1012 (1993).
 14. Kevin J. Kearney and Zoran Ninkov “Characterization of a digital micromirror device for use as an optical mask in imaging and spectroscopy”, *SPIE. Vol.3292* p81-92.
 15. J.D. Gaskill, *Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics*, John Wiley and Sons, New York, 1978.
 16. H.H.Hopkins. On the diffraction theory of optical images. *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. A.*, Vol 217: 408 (1953)

17. 王之江, 伍树东. 成像光学. 北京: 科学出版社, 1991.
18. PETER F. VAN KESSEL, LARRY J. HORNBECK, "A MEMS-Based Projection Display", *PROCEEDINGS OF THE IEEE*, VOL. 86, NO. 8, AUGUST 1998.
19. Qinjun Peng, Shijie Liu, Yongkang Guo, et al, "Real-time Photolithographic Technique for Fabrication of Arbitrarily Shaped Micro structure", *Opt Eng.*, Vol 42(2) 477 (2003).
20. Liu Chi, Guo Xiaowei, Gao Fuhua, "Imaging Simulation of Maskless Lithography Using a DMDTM", *SPIE Vol.4645*.(2005)
21. W.B.Veldkamp. Overview of Microoptics Past, Present, and Future. *Proc.SPIE*, Vol.1544: 287 (1991)
22. W.Goltsos and M.Holz. Agile beam steering using binary optics microlens arrays. *Opt. Eng.*, Vol.29: 1392 (1990)
23. N.Davies, M.McCormick. Three Dimensional Optical Transmission And Miceo Optical Elements. *Proc.SPIE*, Vol.1992: 247 (1993)
24. A.Fimia, A. Belendez, I.Pascual, Optimized spatial frequency response in silver halide sensitized gelatin, *Appl. Opt*, Vol 31: 4625 (1992)
25. Jun Yao, Fuhua Gao, Feng Gao, Yixiao Zhang, Jingqin Su, Yongkang Guo. Refractive Microlens Array Made of Dichromate Gelatin Etched by Enzyme with Coding Gray-tone Mask Method. *Microelectron. Eng.* Vol 23: (2001)

第四章 总 结

随着数字光刻理论和技术的深入发展,其作为多功能微细加工的一个重要手段,对推动微电子、微光学和微系统的深入发展有实际意义。本文研究一种制作微光学元件的DMD数字虚拟掩模光刻技术。结合投影光刻系统和数字化DMD显示器件建立了基于DMD数字掩模光刻成像实验装置,进行了成像过程的计算机模拟分析,并开展了酶蚀卤化银明胶制作微光学元件的实验研究。

本论文的主要工作:

- 1、 分析研究了 DMD 的周期性结构的特点,光学特性,以及 DMD 灰阶的产生方式。
- 2、 针对一些应用背景和特定数字光刻系统结构,建立部分相干成像模型,对 DMD 单个微镜点,采用相干光理论处理,对 DMD 阵列面成像采用各微镜的像强度叠加,并以数字光刻微透镜为例,进行计算模拟和分析。
- 3、 研究了用数字光刻和生化酶化学湿法刻蚀卤化银明胶制作连续浮雕微光学元件工艺,实验制作了有较好面型的微透镜阵列。

DMD 数字掩模光刻技术为制作连续结构的微光学元件提供了一条有效的新途径,具有重要意义。本论文作为一项应用型基础初步研究,目前的工作尚待完善。下一步工作将深入开展数字光刻全过程研究,编制相应模拟计算软件,并发展数字灰度厚胶光刻技术。作者期望本文能够起到抛砖引玉之功能,为数字光刻术的进一步发展做出微薄贡献。

附录 1: 攻硕期间发表的论文.

1. **Chi Liu, Jinglei Du ,Guo Xiaowei, et al.** Imaging Simulation of Maskless Lithography Using a DMDTM. Advanced Microlithography Technologies SPIE, Vol. 5645, 1/2005.
2. **Chi Liu, Jinglei Du, Shijie Liu, et al.** Extraction of Exposure Modeling Parameters of Thick Resist. MEMS/MOEMS Technologies and Applications SPIE, Vol. 5641, 1/2005.
3. **Jianhua Zhu, Chuanqin Xia , Chi Liu.** "Adjustment and Control of playback wavelength of Lippmann holograms recorded in methyl lene-blue sensitized dichromated gelatin. Proc.SPIE Vol 4924, 9/2002
4. 刘世杰, 杜惊雷, 肖啸, 刘驰等, "厚层抗蚀剂显影轮廓分析", 光学与光电子技术, Vol. 1 (4) 2003
5. 刘世杰, 杜惊雷, 刘驰等, "光刻中驻波效应的影响分析", 微纳电子技术 (2-3) 2004
6. 刘世杰, 高福华, 杜惊雷, 刘驰等, "集成衍射光学元件用于 ICF 激光驱动系统中的可行性研究", 四川大学学报 (1) 2004

附录 2: 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 "厚层抗蚀剂成像特性研究"
3. 国家重点实验室基金 "厚层抗蚀剂曝光显影参数测量"
4. 国家自然科学基金 "连续微结构液晶实时光刻技术的研究"
5. 国家 863 高科技项目 "大口径衍射光学元件的研究"

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！

同时，四川大学物理学院郭永康教授，在学习期间也给予了我多方面至关重要的帮助，在我的学习以及论文的指导方面，郭老师也倾注了大量的心血。他诲人不倦的治学，谦虚宽厚的为人以及一丝不苟的工作态度都给了我深刻的印象，同样也会让我受益无穷，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，高福华博士也给予了许多帮助。感谢师兄刘世杰博士真挚和无私的帮助。还有唐雄贵、高峰、郭小伟博士，谢世伟、彭钦军、肖啸、杨静、刘建莉、刘倩、万磊、董光兴、温圣林、罗铂靓、段茜、刘波、陈明勇、马延琴等硕士，都给予了我许多的帮助，能在这样团结互助的集体中学习和工作，感到非常荣幸。

感谢同窗三年许多好友的关心和帮助。

感谢家人多年来对我的关心和支持！

刘世

2004年5月于川大物理馆

独创性声明

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。

学位论文作者签名：ZM SH

签字日期：2005年5月20日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解四川大学有关保留、使用学位论文的规定，有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人授权四川大学可以将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、汇编学位论文。

学位论文作者签名：ZM SH
签字日期：2005年5月20日

导师签名：杜学雷
签字日期：2005年5月20日

学位论文作者毕业后去向：

工作单位：

电话：

通讯地址：

邮编：