

中国科学技术大学

硕士学位论文



基于 SU-8 光刻胶的微透镜及阵列 的研究

作者姓名： 边锐

学科专业： 同步辐射及应用

导师姓名： 田扬超 研究员 刘刚 研究员

完成时间： 二〇一五年五月五日

University of Science and Technology of China
A dissertation for master's degree



**The Research of Microlens
Arrays based on SU-8
Photoresist**

Author's Name: Rui Bian

Speciality: Applications of Synchrotron Radiation

Supervisor: Prof. Yangchao Tian Prof. Gang Liu

Finished time: May 5nd, 2015

中国科学技术大学学位论文原创性声明

本人声明所呈交的学位论文,是本人在导师指导下进行研究工作所取得的成果。除已特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名: _____

签字日期: _____

中国科学技术大学学位论文授权使用声明

作为申请学位的条件之一,学位论文著作权拥有者授权中国科学技术大学拥有学位论文的部分使用权,即:学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版,允许论文被查阅和借阅,可以将学位论文编入《中国学位论文全文数据库》等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。本人提交的电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。

保密的学位论文在解密后也遵守此规定。

公开 保密(____年)

作者签名: _____

导师签名: _____

签字日期: _____

签字日期: _____

摘要

随着微光机电系统（MOEMS）的迅猛发展，人们对于光学元件的微型化的需求日益增加。而透镜作为光学系统中非常重要的元件，透镜的微型化也成为研究热点。近年来，有很多科研机构 and 高等院校在进行针对微透镜研制的工作，提出了许多种微透镜制作方法。其中，光刻胶热熔法成为很多科研人员的研究重点。本文基于深紫外光刻技术，提出一种新的光刻胶微透镜制作方法，利用负性光刻胶在热熔时产生曲面的方法来制作微透镜。本文主要开展了以下工作：

1.调研了微透镜的制作方法，了解了微透镜制作方法的国内外研究现状和进展。研究 SU-8 胶光刻工艺，基于传统的光刻胶热熔法，提出一种新的利用光刻胶热熔制作微透镜的方法。对微透镜的成型机理进行了分析和讨论，从多个角度分析了各因素对微透镜的影响。对本文的微透镜制作方法进行优缺点的分析，分析了本方法制作的微透镜的一致性和均匀性。基于本文提出的光刻胶微透镜制作方法，研究了各种工艺参数对微透镜形貌的影响。针对不同的光刻胶厚度、微透镜宽度和后烘降温过程，进行了大量的实验。

2.为了获得表面形貌和光学特性，利用三种测量手段来测量微透镜的相关数据，分别是台阶仪测量、光学显微镜和扫描电子显微镜测量和光学测量装置，通过台阶仪和显微镜可以获得微透镜的曲面和形貌，通过光学测量装置可以获得微透镜的光学特性。基于以上相关实验数据，分析各工艺参数对微透镜形貌及其光学性能的影响。针对光刻胶微结构的宽度、光刻胶厚度、后烘降温过程对光刻胶微透镜的影响进行了讨论和分析。通过两种方法计算和测得了微透镜的焦距，对微透镜的光学特性进行了分析和评价。最后分析了本实验制作的微透镜的填充因子。通过以上数据和分析，我们得出本文制作的微透镜有以下优点：1.本文制作的微透镜具有超长的焦距，远远大于传统光刻胶热熔法制作的微透镜的焦距。2.本文的微透镜制作方法可靠性好，工艺宽容性好。3.本文制作的微透镜的填充因子很大，实验中的填充因子最大可达 98.5%。

3.对微透镜的成型机理进行了分析，并用 Surface Evolver 进行了模拟仿真。模拟仿真结果较好地符合了实验结果，证明了微透镜的主要成型机理是利用热熔的光刻胶受表面张力影响而形成所需曲面。通过软件仿真模拟，验证了对于微透镜成型机理的分析和假设。

关键词：微透镜及其阵列 SU-8 光刻胶 光刻 表面张力 Surface Evolver

Abstract

With the development of MOEMS (Micro-Optical-Electro-Mechanical System), the demand for miniaturization of the optical element is increasing. As lens is one of the most crucial element of the optical system, miniaturization of the lens has become the research focus. In recent years, many research institutions and universities have been conducting the research about the microlens and many microlens fabrication methods have been proposed. Among them, the photoresist reflow method has become the focus of many researchers' study. Based on the deep ultraviolet lithography, a new photoresist fabrication method is proposed in this thesis. The microlens arrays were fabricated based on surface tension when heating temperature is over glass transition temperature of SU-8 photoresist. The main contents of this thesis are summarized as follows:

1. The microlens fabrication methods were researched and analyzed and the domestic and foreign research status and progress of microlens fabrication methods were investigated. The SU-8 resist fabrication process has been studied. Based on the conventional photoresist reflow method, a new method for fabricating the microlens has been proposed in this thesis. The theoretical analysis of the formation mechanism of microlens has been conducted. Theoretically, the influence factors to control the morphology of the microlens were discussed. The fabrication process tolerance and consistency were analyzed. Based on the proposed photoresist fabrication method, several experiments have been made to explore and study the effect of various process parameters on the morphology of the microlens.

2. The morphology of the microlens was measured by three measure methods. The measure methods were with the surface profiler, optical microscopy/scanning electron microscopy and the built up optical setup, respectively. According to a large amount of experimental data, the effect of various process parameters on the morphology of the microlens has been analyzed. The effect of the width of photoresist microstructure, the height of coating photoresist, post-baking procedure on the morphology of microlens have been discussed and analyzed. The focal length of microlens were obtained by two methods and the optical performance has been analyzed and evaluated. Finally, the fill factors of the microlens array were analyzed. It is concluded that this fabrication method has the following advantages: 1. The

ultra-long-focal-length microlens arrays can be fabricated by this method. 2. This method has good reliability and large process tolerance. 3. The fill factor is very large and the largest fill factor in experiment can be up to 98.5%.

3.The formation mechanism was also studied by simulation based on finite element method (FEM). The simulation of microlens has been carried out by Surface Evolver. The experimental result agrees well with the result of simulation, which proves that the assumption that surface tension is the most crucial impact element of MLA's formation procedure is correct. It is concluded that the formation mechanism of microlens is that the unexposed photoresist reflowed to form a spherical lens shape which minimized the energy of surface due to surface tension. The formation mechanism was validated by the simulation of software.

Key words: Microlens and microlens array; SU-8 photoresist; Lithography; Surface tension; Surface Evolver

目录

摘要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第一章 绪论.....	1
1.1 微光机电系统 (MOEMS)	1
1.2 微透镜概述.....	3
1.3 微透镜及其阵列制造技术.....	4
1.4 本文的主要工作和内容安排.....	10
第二章 微透镜及其阵列设计与制作工艺.....	13
2.1 微透镜的制作原理与设计.....	13
2.1.1 制作原理	13
2.2 微透镜的制作工艺.....	16
2.2.1 光刻胶的选择	16
2.2.2 基片预处理	17
2.2.3 涂胶	18
2.2.4 前烘	18
2.2.5 曝光	19
2.2.6 后烘	20
2.2.7 微复制工艺	20
2.2.8 实验内容	21
2.3 本章小结.....	21
第三章 实验结果的测量与分析.....	23
3.1 微透镜形貌的测量.....	23
3.2 实验结果分析.....	24
3.2.1 掩膜图案宽度对微透镜的影响	24
3.2.2 光刻胶厚度对微透镜的影响	29
3.2.3 后烘温度降温过程对微透镜的影响.....	30
3.2.4 微透镜光学特性分析	31

3.2.5 填充因子	33
3.3 本章小结.....	34
第四章 微透镜的软件模拟仿真.....	37
4.1 Surface Evolver 软件介绍.....	37
4.2 理论基础与算法设计.....	38
4.3 模拟结果与分析.....	41
4.4 本章小结.....	43
第五章 总结与展望.....	45
参考文献.....	47
附录.....	53
致谢.....	54
在读期间发表的学术论文和取得的研究成果.....	55

第一章 绪论

1.1 微光机电系统 (MOEMS)

传统的加工玻璃透镜方法是对玻璃进行研磨、抛光,通过这种去除多余材料的工艺,得到光滑精确的光学透镜表面。这种机械制造加工工艺制造的透镜的尺度是从毫米到米级,装配精度是 0.1mm。经典机械制造加工工艺和毫米以上的加工制造元件的尺度这两点,是宏观光学的特点^[1]。

随着科学技术的飞速发展,微型化成为光学元件的重要发展方向。如尺寸在 200 μm ~2 mm 的变折射率微透镜和只有几微米的低损耗光纤等元件的出现,体现了光学从“宏观光学”向“微小光学”的发展,它是连接宏观和微观的桥梁。

光学元件的微型化的发展使独立的元件的开发必然向阵列化、集成化的元件的开发发展。微透镜及其阵列的研究和开发可以充分发挥光子作为一种超高速的传输速度的载体所具有的可并行性和强大的互连能力等优点。因此,微小光学元件及其阵列(如微透镜及其阵列、微反射镜及其阵列和微棱镜及其阵列)、三维光子集成微型器件和光机电一体化的微型系统器件的开发和研制就成为微小光学领域的非常重要的研究热点。

微小光学的发展,在很大的程度上取决于光学微加工技术的发展。半导体加工工艺和微透镜阵列的出现,使光学元件的尺寸小到几微米,微小光学元件的出现,催生并推动了微光电子机械系统(Micro-Optical-Electro-Mechanical-System, MOEMS)的产生和发展。

微光机电系统是在微机电系统(MEMS)基础上发展出来的,微机电系统是微米/纳米技术中的一个新兴高科技领域。国际电技术委员会(International Electro technical Commission, IEC)对 MEMS 的定义是:“MEMS 是微米量级内的设计和制造技术。它集成了多种元件,并适于以低成本大规模生产^[2]。”随着微小光学、微光学元件和器件,还有微光机电一体化集成技术的迅速发展,在微机电系统(MEMS)的基础上出现了微光机电系统(MOEMS)。外部世界通过微光机电系统(MOEMS)与电子信息系统联系起来,它不仅可以感受声、光、热、运动、磁等自然信号,还可以将这些自然界信号转换成电子信息系统可以识别的电子信息,并控制这些信号。微光机电系统(MOEMS)的研究涉及化学、物理学、电子、生物、材料、机械及信息科学等多种基础科学和工程技术。微机电系统的研究内容主要包括基础理论、结构设计、加工工艺、信息科学、材料学、操作与控制技术、微型传感和执行器、测试技术、能源供应、系统集成以及应用研究、宏/微接口和通信技术等多种方面。MOEMS 拥有非常广阔的应用前景,在

航空航天、医学、生物学、汽车工业、信息通信、环境监控、国防军事等领域都将发挥重大的作用^[3]。

MOEMS 器件的特点：

1.微型化：MOEMS 器件体积小，质量轻，具有功耗较低、惯性较小和反应时间较短等优点。

2.规模化：MOEMS 器件可以实现大批量生产，可以批量化制造出大量性能一致的微型器件，达到规模效应，大幅降低生产成本。

3.集成化：MOEMS 可以将多种模块，如微传感器、微执行器和数据采集元件集成在一起，大大提高功能密度。

近年来，针对如何通过微加工工艺使光学元件微型化的问题，国内外研究学者进行了大量的研究工作。美国德州仪器公司（Texas Institution, TI）从 80 年代起进行了数码微镜阵列器件（Digital Micromirror Device, DMD）^[4]的研究，在此技术的基础上研制了一批光学数字处理技术的投影设备。AT&T 公司于 1998 年开发出一种 8x8 光交叉互连器件^[5]，其拥有优越的性能指标，使目前电交换技术中存在电子“瓶颈”问题得到了解决，为光交叉互连研究方向做出了巨大贡献。美国霍尼韦尔（Honeywell）技术中心和桑迪亚（Sandia）国家实验室共同研制出了可编程衍射光栅^[6]，如图 1.1 所示，这种可编程衍射光栅能够用于远程检测气体的化学成分。这种基于 MEMS 的衍射光栅不仅可以检测出单一化学气体成分和还可以检测出多种混合气体，能够实现不需要传统光谱仪的配合，快速地得到物质的化学成分。

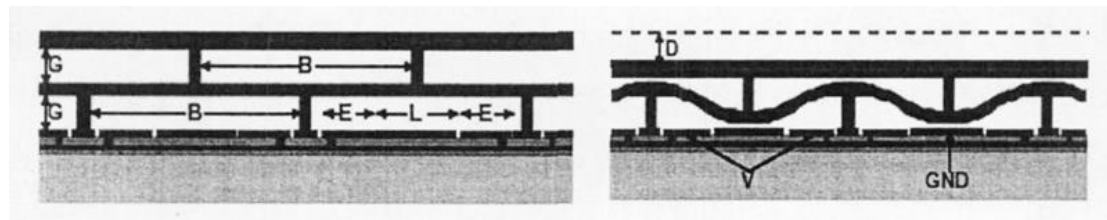


图 1.1 可编程光栅的元素结构

因为 MOEMS 的惊人的发展速度和其尖端热门的科学研究内容，也吸引了国内对 MOEMS 技术的注意和重视。国内在 MOEMS 的研究上取得了一些成绩，现在至少有数十家高校和科研单位在针对 MOEMS 进行深入研究，制作了很多微结构、微器件和微系统。中国科学院上海微系统所研制了直径为微米级别的多晶硅齿轮和气动涡轮以及微静电电机^[7]。清华大学精密仪器系研发制作了很多种类微器件，其制作的热制动微型泵外形尺寸为毫米量级，每分钟输出流量可以达到 $40\mu\text{L}$ ^[8]。中科院长春光机所在微测试技术的研究方向取得了不错的进展。我国的 MOEMS 事业正在蓬勃发展，研究的深度和广度都在拓展，但是我国 MEOMS 事业总体起步晚，在研究规模和技术水平上与发达国家相比还有相当的

差距。

当前微光机电系统研究的主要问题是：

(1) 目前，基于 MOEMS 的封装技术的研究尚处于起步阶段，由于微元器件具有多样性和非密封的特点，对于不同的器件需要开发不同的封装技术，又因为封装的成本较高，抵消了 MOEMS 应用系统的附加价值，所以大大阻碍了微器件的更广泛的应用。因为 MOEMS 包含运动元件，它的封装更为复杂。微系统工作的可靠性也与封装紧密相关，封装成为高性能微系统的瓶颈，需要全力研究新的封装材料、工艺、方法、设备，为开发者提供一系列易于设计的统一的标准化的封装技术。

(2) 因为 MOEMS 在形成相对统一的设计基础和标准制造工艺上有很大难度，同时微加工设备价格昂贵和微加工工艺的多样性，使得许多企业很难拥有独立的生产线，应该迅速建立起价格与反应机制，从而有效地利用微加工资源，以满足工业制造界的需求。MOEMS 器件的设计应该与复杂的工艺流程分离，使各种工艺标准化，来适应不同的设计要求，并提供相应的交互式设计接口，使各单元模块化，这样可以有效地降低设计要求和成本，大幅提高器件的工艺性。

(3) 目前大多数微器件不能从理论上精确的分析其成型机理，缺少准确的解析模型来分析模拟工艺过程，所以必须开发简单高效的模拟仿真工具，准确地分析和预测制作结果，缩短开发周期，更好地适应市场需求。由于 MOEMS 工艺缺少相应的质量评估，导致成品率不高，需要建立基于 MOEMS 技术的质量控制标准，这对于提高 MOEMS 器件的成品率，有重要的作用。

(4) 目前关于 MOEMS 的专业技术人员还比较匮乏，要加大对 MOEMS 专业人员的培养和投入，建立起有效的人才培训和保障机制，使 MOEMS 事业良好快速地向发展。

1.2 微透镜概述

透镜是光学系统的最基本的一种元件，通常包括两个折射面和一种透光的传输介质组成，用来传输入射光线，对光波波前进行调制从而达到特定的光学效果的一类光学元件，是光学仪器和光电系统不可缺少的重要组件^[9]。

透镜作为光电技术、信息科学等领域的重要的基本元件，得到了迅猛的发展。不仅传统的玻璃透镜得到充分的研发，光学塑料透镜也得到了迅速的发展和应用。透镜不仅广泛应用于夜视仪、导引头和武器瞄准等军用领域，也在诸如手机、照明装置、望远镜、条形码扫描仪、摄像头、数码照相机等民用领域。

从材料角度来讲，透镜一般可分为玻璃材质的玻璃透镜和塑料材质的透镜两种；从入射面和出射面面型的角度来讲，可分为双凹/凸透镜、平凹/凸透镜、正/

负弯月透镜以及柱面透镜和球透镜等类型；根据球面的曲面特性，透镜可分为球面透镜和非球面透镜。

随着微光机电系统（MOEMS）的快速发展，并广泛应用于光学传感、光学测试和大规模系统集成成像等领域，光学元件的微型化成为微光机电系统的开发和精密仪器的微型化的迫切需求，因此尺寸小、成本低、功耗小和性能好的微透镜的研究和制作成为众多科研人员关注的焦点课题。

微透镜或微小透镜是指直径为微米尺度到若干毫米的透镜，微透镜阵列是一系列微透镜按照一定的排列组成的阵列。按照其光学原理分类，微透镜可分为两种类型：折射型微透镜和衍射型微透镜。根据应用分类，微透镜主要分为两类：集光和成像型。

下面具体介绍几个典型的微透镜的应用。成像：微透镜及其阵列被广泛应用于成像领域。这些应用包括复印机成像系统，示波器镜头和其他近程成像系统^[10]。近来，提出了一种叫做微透镜光刻的技术^[11]。这个系统使用 1:1 的微透镜阵列的成像系统将图形复制到光刻胶上，这种方法的优势是拓展了焦深和工作距离。这种技术的优点是可以避免接触式曝光中造成的掩模的磨损。

集成摄影术（Integral photography）：1908 年，Gabriel Lippmann 发明了集成摄影术。在照相机中的成像系统中配备了微透镜阵列。可以在胶片上记录一系列的远距离的图片。这些图片是从每一个镜头中得到的，然后整合在一起。经过改进的胶卷可以用同一种微透镜阵列实现三维摄影，Stevens 和 Davies 详细地论述了这项技术^[12]。

光互连：微透镜阵列可以应用多种光互连应用中，例如利用多阵列的空间光互连^[13]和电子行业的板对板和片对片的互连^[14]。

天文：Shack-hartmann 阵列是一种微透镜阵列，它应用于 Shack-Hartmann wavefront sensors(SHWS)空间波前传感器中^[15]。这些阵列可以增强地面的望远镜观测到的图片。它们可以测量地球大气造成的波前畸变。通过测得的信息可以修正主镜或次镜来消除畸变。这种方法可以拍摄没有畸变的星体衍射图片。对于 SHWS 传感器，具有长焦距的微透镜阵列可以探测到更小的波长偏差，因为长焦距的微透镜可以在传感器上获得更大的位移^[16]。长焦距微透镜对于 SHWS 具有重要的意义，Artzner 优化了这种折射型微透镜阵列^[17]。

1.3 微透镜及其阵列制造技术

由于微透镜在军用和民用领域的应用的广泛性和重要性，国内外都高度重视微透镜及其阵列的研究，大量的科研单位和高等院校在从事微透镜及其阵列的研究和开发工作。目前，制作折射型微透镜的方法主要有传统的金刚石切削法、

模压成型法、喷墨印刷方法及液滴法、光刻离子交换法、光敏热处理法、光刻胶热融法。

金刚石切削法是一种传统的历史悠久的加工透镜的方法，它通过去除材料来得到透镜的形貌。随着加工机床和切削刀具的发展，使得这种传统的加工方式来制作微透镜成为可能。目前，国外的研究人员已经研制出精度较高的加工机床，能够制造出精度较高的非球面微透镜。我国也在精密制造和超精密制造方面取得了相当不错的成绩^[18]。但是金刚石切削法制作透镜的成本比较高，加工周期长，不利于大规模制造和广泛推广。

模压成型法^[19-21]的加工步骤是：第一步加工出模具，然后将液态的光固胶倒入模具内，用紫外固化或加热的方法使光固胶固化，最后脱模，得到微透镜。或者是通过加热使光刻胶处于热熔状态，然后将模具压入光刻胶中，经过冷却固化后脱模。这种方法制造的微透镜的面型和粗糙度完全由模具的形状和质量决定，模具对于微透镜的制造至关重要，对模具的精度要求很高。这种方法的缺点是模具的加工较为困难，成本较高，容易磨损，在多次制造后模具就失效，在脱模时容易使透镜受到损害和还可能会产生残余应力。

喷墨印刷方法及液滴法^[22, 23]将微量的液体通过喷墨打印机技术喷在基底上，液滴因为表面张力形成微透镜曲面，然后用加热或者紫外固化的方法得到微透镜及其阵列，如图 1.2 所示。这种方法的优点是制作的微透镜工艺简单，具有很高的表面光洁度，有利于大批量成规模生产；缺点是对环境因素特别敏感，需要精确控制实验环境的温度和湿度，且需要谨慎的选择液滴材料和基底，工艺重现性不好。

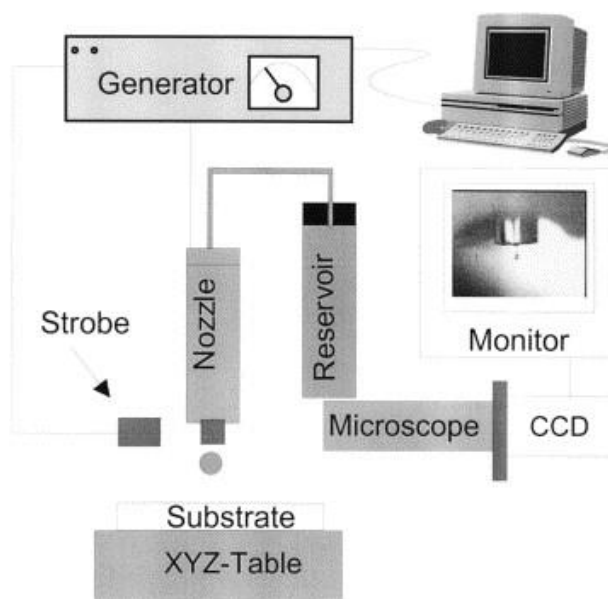


图 1.2 喷墨印刷方法制作微透镜

光刻离子交换法^[24, 25]是平面光刻工艺和离子交换技术相结合的光刻离子交换技术。首先在光刻胶上利用光刻法形成所需的透镜阵列窗口图形，然后在玻璃内部利用离子交换技术制作出一个变折射率区域，这个区域就是梯度折射率微透镜。光刻离子交换法制作的微透镜如图 1.3 所示。这个方法的缺点是需要较高的温度和较长的实验时间（通常持续数十个小时）。

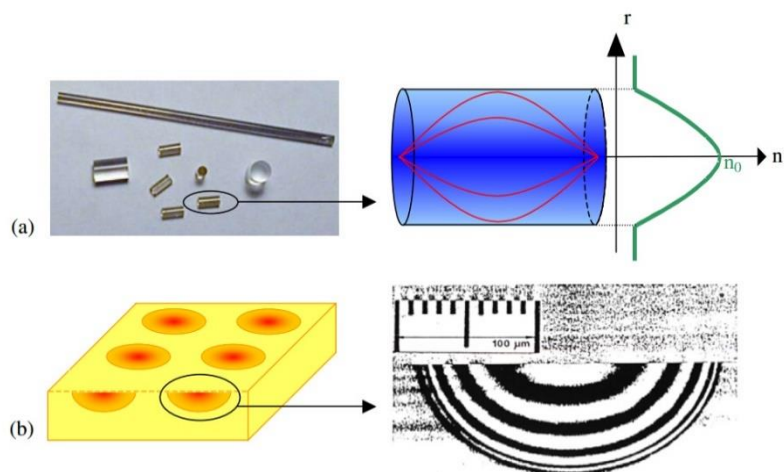


图 1.3 光刻离子交换法制作的变折射率微透镜

光敏热处理法^[26, 27]使用紫外光、电子束或 X 光高能辐射光源对光敏玻璃进行调制处理，其工艺流程图如图 1.4 所示。首先将光敏玻璃加热，使其膨胀。然后利用掩模版对光敏玻璃进行曝光，曝光后在光敏玻璃上施加压力，曝光后光敏玻璃的密度会变大，在挤压时，未曝光的光敏玻璃受到压力会凸起，因为表面张力的影响而形成球面。这种方法的弊端是必须要使用特殊材料的玻璃，而且难以改变透镜的焦距等参数。

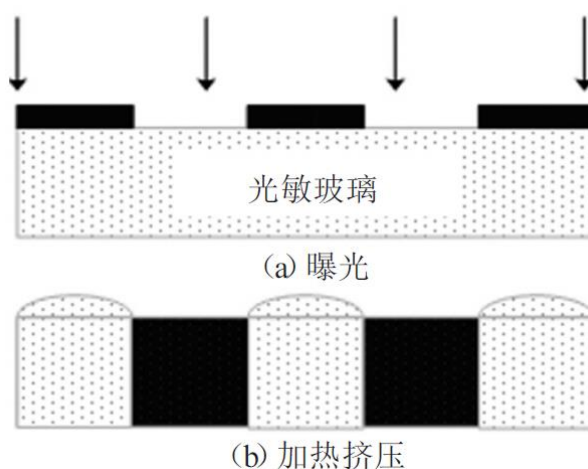


图 1.4 光敏热处理法工艺流程

光刻胶热熔法是 Z.D. Popovic^[28]和 D.Daly^[29]等人在 1998 年提出的,是现阶段应用最广泛,制作最方便的一种微透镜制作方法。光刻胶热熔法的制作工艺图如图 1.5 所示。首先,在基片上旋涂上一层厚度均匀的光刻胶,然后通过经过事先设计制造的掩模版,用紫外光进行曝光,显影后形成微圆柱体。经过加热,当温度大于玻璃化转换温度时,光刻胶处于流动状态,光刻胶处于可流动状态,由于表面张力的作用,光刻胶由柱形逐渐变成曲面,当温度下降冷却后,光刻胶微透镜就制作成型了。这种方法加工的微透镜表面较为平滑光洁,而且工艺简单,成本低。但是这种方法有几个不足和缺点: 1.一般来讲,光刻胶热熔法制作的微透镜的数值孔径很难大于 0.15,也就是说很难做出大焦距的微透镜^[25],对于微米量级的微透镜,很难做出毫米量级的微透镜。Hsin-Ta Hsieh^[30]提出在光刻胶热熔法的基础上利用再覆盖一层材料的方法来加长焦距,利用减小系统的折射系数的方法来扩展焦距。但是这种方法增加了工艺的复杂性,同时这种微透镜的质量由两种材料决定。同时由于两种材料的热膨胀系数不同,会产生热应力,这会大大限制这种微透镜的温度使用范围。2.热熔法制作的微透镜的形貌是由光刻胶的体积和接触角决定的。光刻胶的体积是由涂胶、曝光以及显影工艺共同决定的,这使得体积的精确控制较为困难,因而聚合物微结构的体积也就很难精确控制了。聚合物的种类和衬底材料的表面性质决定了微透镜的接触角,聚合物以及衬底材料的种类可以选择并控制,但衬底的表面性质不仅与其本身材料有关,还与其表面状态相关,工艺实践中受基片处理、显影等影响,很难实现有效控制,这使得微透镜的接触角难以控制。所以,由于难以控制光刻胶的体积和微透镜的接触角,所以热熔法一致性和可靠性差,工艺宽容性不好。3.在通常情况下,微透镜阵列的填充因子不能太大,因为光刻胶在热熔状态时容易粘连,如果发生接触,会使微透镜的表面形貌出现偏差。由于填充因子小,会造成材料的浪费,会使光学性能的下降,因为入射的能量不能充分利用,还会引起背景噪声。4.由于光刻胶是一种聚合物,所以存在一定的黏度,成型并不是完全通过表面张力成型,所以会与理论上的计算具有一定的误差,对于生产出指定参数的微透镜具有一定的难度^[31]。

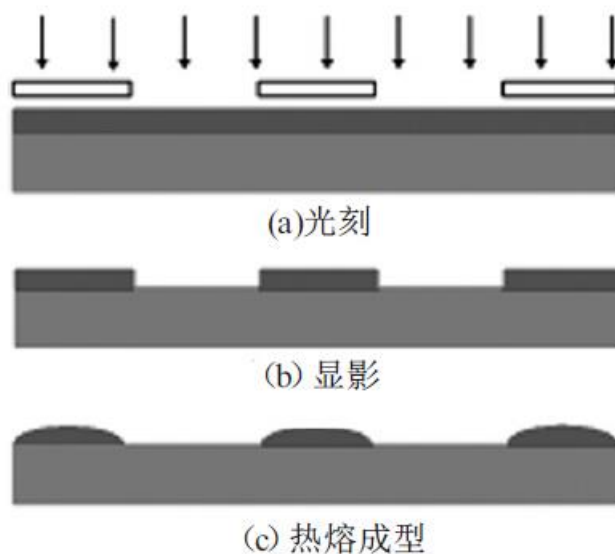


图 1.5 光刻胶热熔法工艺流程

加工衍射型微透镜的主要制作方法有二元和多阶光学技术、束能直写方法和灰度掩模等技术。二元光学^[32]实现了通过台阶结构制作衍射元件，使用二元相位量化编码，将在工艺步骤中形成的相位级数提高到倍数式增加，极大地降低了加工工序的次数，降低了制造高衍射效率的元件的制造成本^[33]。制造二元光学结构的基本方法如图所示，利用光刻法，如电子束写、激光束写和光学刻蚀技术等，使光刻胶形成一定的图形，再利用反应离子刻蚀技术将其转印在基板上，或者低廉地复印在塑料或环氧树脂内^[34]。多阶结构是二元光学技术的延伸和扩展。多阶结构相位轮廓的加工步骤如图 1.6 所示，连续使用光刻和刻蚀技术，形成多阶面浮雕结构。当相位台阶数为 2、4、8、16 时，理论上的衍射效率分别为 41%、81%、95%、99%^[33]。微透镜的衍射效率、制作难度和对准精度的要求随着台阶数的增加而逐渐增加^[35]。不同掩模版之间的相互对准和最小特征尺寸是主要的问题，因为最小特征尺寸限定了最大阶数。

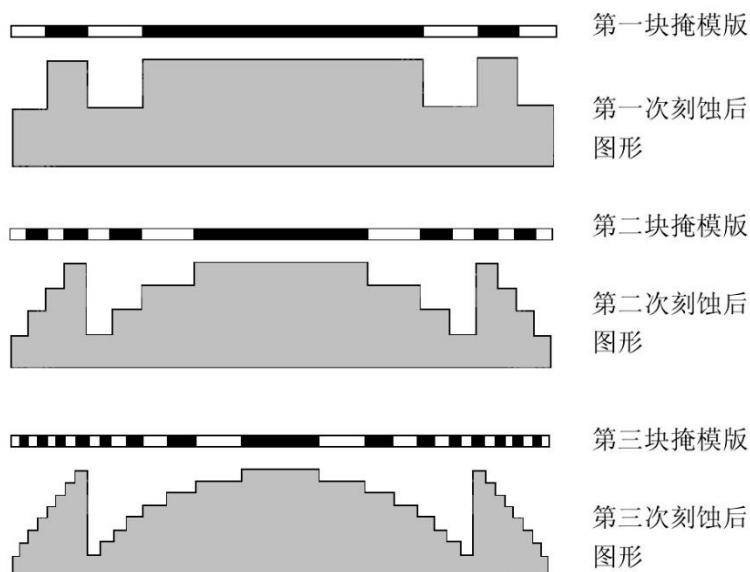


图 1.6 二元光学微透镜制作法

直写法是一种一次成型的加工技术，是一种实用的方法，分为电子束直写，激光束直写。直写法的优点是对制作环境要求不高，可以在普通的环境内加工，不需要真空环境，加工成本较低，是一种有发展潜力的衍射光学元件（diffractive optical elements, DOE）的加工方法。激光直写技术^[36]可以通过控制光束的通断，实现类似二元掩模的作用。还可以通过对激光束的曝光控制，直接产生多阶浅相，免去了多次刻蚀的麻烦，可以生成浮雕 DOE。电子束直写技术的原理和激光束直写技术相同，是以周期扫描方式利用电子束对基片逐点曝光。电子束直写技术^[37]需要在衬底上镀一层导电膜，以保证在曝光时传导电子，所以工艺较为复杂。但是电子束直写技术的分辨率很高，制作亚波长结构微透镜的重要手段是电子束直写技术。

灰度掩模技术^[38-40]可以制造实现多级台阶衍射光学元件或者连续相位变化的浮雕图形，这种技术利用不同灰度的掩模版（Gray Level Mask），只需要一次光刻就可以得到想要的面型。然后再经过刻蚀或薄膜沉积，精确地将图形转移到衬底上。灰度掩模技术可以将复杂的多次光刻和图形复制转移简化为一次工艺，避免了对准中产生的误差，适用于大批量生产，有效地缩短了生产周期和降低了制作成本。彩色编码掩模版和高能电子束敏感玻璃（HEBS）掩模版是目前常用的灰度等级掩模版。彩色编码掩模版的原理是不同的灰度等级用不同颜色来表示，然后用彩色打印机打印在透明胶片上，再通过缩印将彩色胶片转到黑白透明胶片上制成灰度等级掩模版。多相位台阶的浮雕表面分布就可以这种方法一次曝光成型，如图 1.7 所示。但是此种方法的缺点是掩模版的分辨率较低，受限于机彩色等级，相位台阶轮廓的级数不能达到很高。高能电子束敏感玻璃掩模版（HEBS）

是一种真正灰度等级的技术的掩模版，通过对多种能量电子束的敏感度差异，形成阶梯变化或连续变化的真正灰度等级。这种高能电子束敏感玻璃掩模版所制作的元件具有分辨率高，衍射效率高等优点。

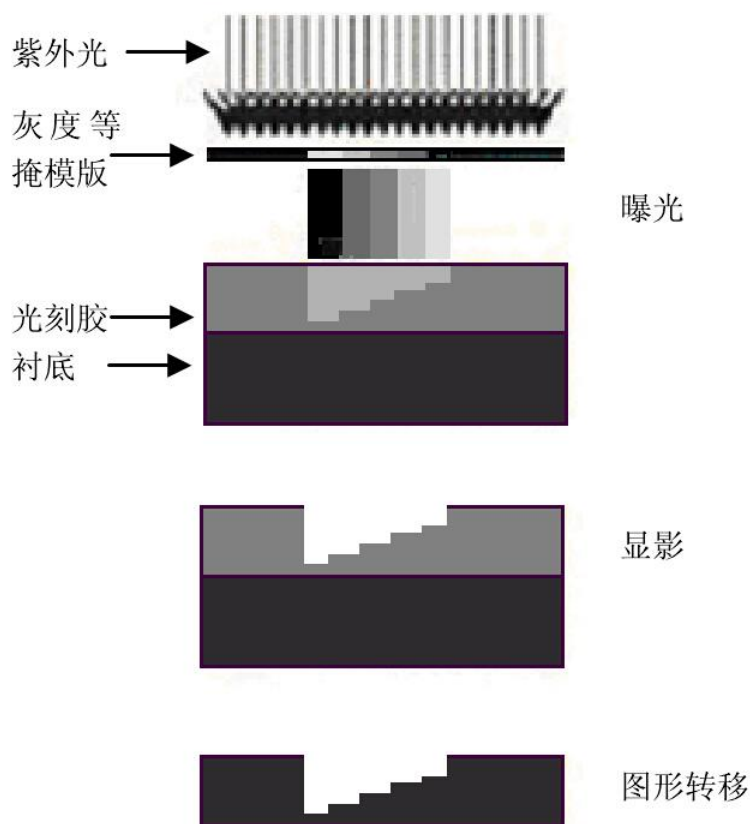


图 1.7 灰度掩模技术

对于透镜的小批量制作，上述微透镜制作方法较为适合。但是上述方法不适用于大批量生产微透镜及其阵列时，因为上述方法存在工艺复杂，成本高和产品质量的均匀性和一致性无法保证等问题。因此复制和转移图形技术成为解决上述问题的关键技术。通常采用成本低廉，容易获得和光学性能很好的聚合物材料作为复制材料。到目前为止，微透镜的微复制工艺主要有溶胶凝胶技术^[40]、电铸^[41, 42]、热压^[43, 44]、紫外模塑^[38, 45, 46]、LIGA^[39]和注射成型^[43]等。

1.4 本文的主要工作和内容安排

虽然光刻胶热熔法具有工艺简单，成本低廉，应用广泛等优点，光刻胶热熔法制作微透镜方法有工艺重复性不好，工艺宽容性差，一致性不好，难以获得大曲率半径等缺点。本论文基于 SU-8 光刻胶，提出一种使用光刻胶制作微透镜的新方法，光刻胶在超过玻璃化温度时，光刻胶处于流动状态，由于表面张力的作用，光刻胶表面会出现曲面。基于这种方法，本文进行了大量实验，利用多种方

法探测了微透镜的表面形貌并获得了光学性能,从多种角度考虑和讨论各种因素对微透镜面型的影响,并且基于成型原因,利用软件进行了模拟仿真,对实验进行了预测和验证。论文共分为五章,内容安排如下:

1.论述了本文的研究背景和意义,简单的介绍了微光机电系统的概念和研究进展,介绍了微透镜的概念及应用和微透镜制作方法的研究现状和研究进展和论文内容安排。

2.介绍了本文制作微透镜方法的原理和设计,从原理上论述本制作方法的优势与特点。详细介绍了本课题的微透镜制作加工方法,对实验工艺步骤进行了深入的论述和探讨。

3.介绍了本文测量微透镜的方法,对测量数据进行整理和分析,总结各个因素对微透镜成型的影响,总结其中的规律,对实验现象进行解释与分析,评价微透镜的质量。

4.针对本文中提出的微透镜制作方法,探讨了微透镜成型的机理,并用软件对微透镜成型的原理进行模拟仿真,从理论上证明这种微透镜制作方法的优势及特点。

5.总结与展望。对全文进行总结,总结本制作方法的优点和不足,通过实验与模拟结果得出的结论,对未来的实验和研究方向提出建议,改进实验方法,以求得到更好的微透镜及其阵列。

第二章 微透镜及其阵列设计与制作工艺

2.1 微透镜的制作原理与设计

2.1.1 制作原理

传统的光刻胶热熔法使用正性光刻胶来制作微透镜，这种方法工艺简单，成本低，应用广泛。这种聚合物微透镜在衬底上的尺寸、微透镜与衬底的夹角等决定了微透镜的形貌，利用热熔法制作微透镜，上述两方面主要受聚合物的尺寸与种类、衬底材料的表面性质等因素影响。聚合物平面微结构的平面尺寸是由光刻产生，可以有效控制；而其厚度是由涂胶、曝光以及显影工艺共同决定的，这使得厚度的精确控制较为困难，因而聚合物微结构的体积也就很难精确控制了。聚合物的种类和衬底材料的表面性质决定了微透镜的接触角，聚合物以及衬底材料的种类可以选择并控制，但衬底的表面性质不仅与其本身材料有关，还与其表面状态相关，工艺实践中受基片处理、显影等影响，很难实现有效控制，这使得微透镜的接触角难以控制。可以看出，热熔法难以实现对微透镜的尺寸、微透镜与衬底的夹角的精确控制，这就使得利用热熔法制作微透镜的工艺重复性差。而且由于正性光刻胶热熔法制作的微透镜受光刻胶厚度的影响，而且其接触角有一定的限度，使得这种方法很难制造出具有大曲率半径（毫米量级）的微透镜，使得这种微透镜的应用有很大的局限性。

本文针对微透镜制作过程中所遇到的工艺重复性差和曲率半径小等问题，提出一种制作微透镜的新方法，通过对负性光刻胶曝光并加热回流来实现对微透镜形貌的有效控制，提高微透镜制作的工艺重复性，获得具有较大曲率半径的微透镜。

本方法的特征是通过负性光刻胶曝光并加热回流来实现对微透镜形貌的有效控制。负性光刻胶通常为低分子量聚合物，曝光部分通过化学反应形成高分子量的交联聚合物。在后续的加热回流过程中，曝光交联的聚合物不会热熔，形状不会发生变化，而未曝光的部分会受热热熔，在回流过程中受表面张力的作用形成曲面，冷却后形成微凹透镜结构，其原理图如图 2.1 所示。

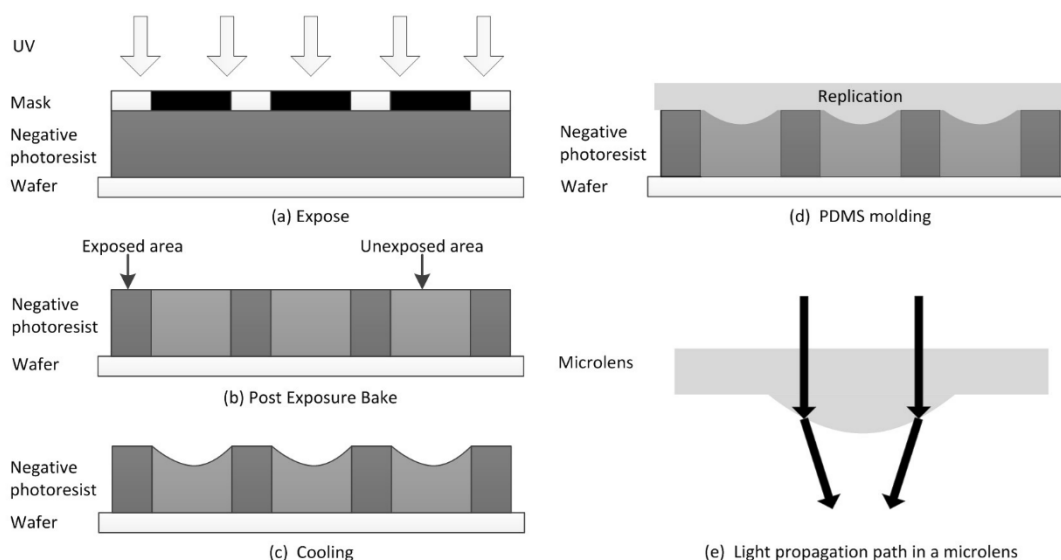


图 2.1 微透镜的原理图

由图 2.1 可以看出，本文的方法中首先通过曝光来形成微结构，然后通过加热使微结构内的聚合物受热回流，在表面张力的作用下形成曲面，冷却后形成微凹透镜结构。本方法制作的微透镜其形貌同样取决于微透镜的平面尺寸、微透镜与微结构的夹角。微透镜是在微结构中形成的，其平面尺寸就是微结构的平面尺寸。微结构的平面尺寸可以通过光刻工艺来精确控制，同时这个尺寸在后续工艺中也不会改变，那么，微透镜的平面尺寸就可以精确控制了。微透镜与微结构的夹角就是微透镜与微结构侧壁的夹角，这个夹角也是由微结构与微透镜的材料以及微结构的表面性能决定的。微透镜的材料是负性光刻胶，微结构的材料是曝光交联的负性光刻胶，光刻胶选定后，相同的工艺条件下曝光交联的负性光刻胶也是确定的；同时，交联与非交联区域之间的界面是在工艺过程中形成的，相同的工艺条件得到的表面性质也是一定的，这样，微透镜与微结构的夹角在同一种光刻胶、相同的工艺条件下是确定的，通过选择光刻胶以及工艺参数可以实现对微透镜夹角的精确控制。综上所述可以看出，本方法制作的微透镜其形貌是可以有效控制的，这可以大大提高微透镜制作的工艺重复性。

曝光的影响

本文通过对负性光刻胶曝光来形成微透镜的平面结构，再通过对未曝光的负性光刻胶受热回流来形成微透镜的曲面，这就要求曝光前后的负性光刻胶在热性能上有较大不同，以确保在加热回流过程中，曝光的负性光刻胶不会发生形变，而未曝光的负性光刻胶可以受热形变形成曲面。所以，工艺中通常选择主要成份为低分子量聚合物的负性光刻胶，这种光刻胶未曝光时玻璃化转变温度较低，受热容易形变，曝光后其玻璃化转变温度会提高很多，受热不易形变，能够满足加热回流的需要。

温度的影响

加热回流工艺中,温度的选择取决于光刻胶的热性能,通常的工艺范围是高于负性光刻胶的玻璃化转变温度,低于曝光交联负性光刻胶的玻璃化转变温度。光刻胶选定后,其玻璃化转变温度是一定的,但曝光后负性光刻胶的玻璃化转变温度是与曝光工艺相关的,可以通过调节曝光工艺参数来调节负性光刻胶的交联程度,从而改变其玻璃化转变温度,提供可调节的加热回流温度区间。

厚度的影响

本文制作的微透镜是由光刻胶形成的,但其形貌与光刻胶厚度无关,所以工艺中只要使光刻胶的厚度大于曲面的高度就可以了,光刻胶的厚度不需要精确的控制,这就解决了常用的热熔法中的光刻胶厚度控制问题,可以提高微透镜制作的工艺重复性。

微透镜的焦距

因为本文的光刻胶热熔法制作的微透镜是凹透镜,为了更容易获得微透镜的光学特性,可以用复制的方法,经光刻胶微透镜转化到复制材料上,将凹透镜转化为凸透镜。从图 2.1 的 (e) 中,可知看到光线会在经过微透镜时,发生汇聚。微透镜的焦距公式是:

$$f = \frac{r}{n-1} \quad (2.1)$$

n 是复制材料的折射系数, r 是微透镜的曲率半径。通过上述公式可以看出,微透镜的焦距与微透镜的曲率半径成正比。大的焦距可以通过大的曲率半径来获得。在热熔状态时,未曝光负性光刻胶受表面张力的影响会形成一个类球面的表面形状,本文的方法可以利用表面张力制作具有很大曲率半径的微透镜。在这种方法中,光刻胶的厚度不再是限制微透镜形貌的因素,所以我们可以突破接触角的限制,实现微透镜曲率半径的最大化。因为微透镜的焦距与微透镜的曲率半径有直接的线性关系,所以利用本方法可以制作出具有很大焦距的微透镜。

本文制作的微透镜适合于直接使用。工艺中选用光学透明的光刻胶,制作的微透镜就可以直接作为凹透镜使用;如果选用光学不透明的光刻胶,制作的微透镜可以通过添加一层反射膜作为凹面反射镜使用。本文制作的微透镜也可以通过其他工艺进行图形转移,获得不同材料的微透镜来满足不同的应用需求。

基于本文制作微透镜不受衬底表面的影响,所以可以采用包含微结构的衬底来制作微透镜,通过对准曝光可以实现微透镜与微结构的准确定位。这样,当基片包含光源、光栅、透镜等光学相关结构时,就可以实现光学集成;同时,微透镜的制作与光刻胶厚度无关,我们可以通过对光刻胶厚度的选择来调节微透镜与微结构的距离,满足光路的要求。

2.2 微透镜的制作工艺

本文的制作工艺为基片预处理、涂胶、前烘，光刻，后烘，如果要得到复制的微凸透镜结构，可以在最后加上一步微复制倒模工艺，工艺流程如图 2.1 所示。最终的微透镜阵列性能与其中的每一步工艺的技术参数和制作流程都密切相关。

2.2.1 光刻胶的选择

光刻胶，也称为光致抗蚀剂，是由感光的高分子材料、增强剂和溶剂三种主要成分组成的^[47]。曝光后，光敏树脂迅速发生光固化反应，使抗蚀剂的物理性能，尤其是溶解性、亲和性等发生较大变化，然后利用显影液处理，去除可溶性部分后就可以得到所需图像^[1]。

根据其化学反应机理和显影原理不同可分为正性光刻胶和负性光刻胶：曝光后变成可溶性物质，被显影液溶去的是正性胶；反之，曝光后形成不可溶物质，不会被显影液溶去的是负性胶。

影响光刻胶性能的主要因素有：分辨率，对比度，敏感度，黏滞性/黏度，黏附度，抗蚀性和表面张力等。分辨率是指在光刻后区别相邻图形特征的能力，分辨率一般用能分开两点的最小尺寸来表示。这个尺寸越小，分辨率越好。对比度是指光刻胶从曝光区到非曝光区过度的垂直度，形成图形的侧壁越垂直，光刻胶的对比度越好，其分辨率也越好。敏感度是指在光刻胶上产生一个良好图形所需一定波长的最小曝光剂量，对于波长更短的深紫外光和极深紫外光，光刻胶的敏感度尤为重要^[48]。黏滞性/黏度可以衡量光刻胶流动性，光刻胶的流动性越好，黏滞性/黏度越低。高的黏滞性会造成旋涂后的光刻胶的厚度较大，黏滞性越小，胶的厚度越均匀；在不同温度时，光刻胶的黏滞性也会改变，温度越高，黏滞性越小，流动性越好。黏附性表征光刻胶黏附衬底的强度，黏附性不足会导致图形变形。抗蚀性是指光刻胶需要良好的耐热稳定性、抗蚀能力和抗离子轰击能力。通常情况下，正性胶的分辨率较好，但灵敏度、耐刻蚀性和黏附性等性能较差。通常光刻胶热熔法制作微透镜选择正性光刻胶，在本文的新方法中，利用的是负性光刻胶在热熔回流时产生的曲面来制作曲面。在实验中，我们选择 SU-8 光刻胶作为微透镜制作材料。

SU-8 光刻胶是一种环氧树脂型的负性光刻胶，SU-8 胶是将有机环氧胶和光催化剂溶于有机液中而形成的。SU-8 结构式如图 2.2 所示，因为其结构中含有 8 个环氧团，因此称为 SU-8 胶。根据黏度的不同，SU-8 光刻胶分为不同的型号，如 SU-8 2025、SU-8 2050、SU-8 2100 等，根据所需的厚度，可以选择相应的 SU-8 胶的型号。SU-8 的物理性能如表 2.1 所示。

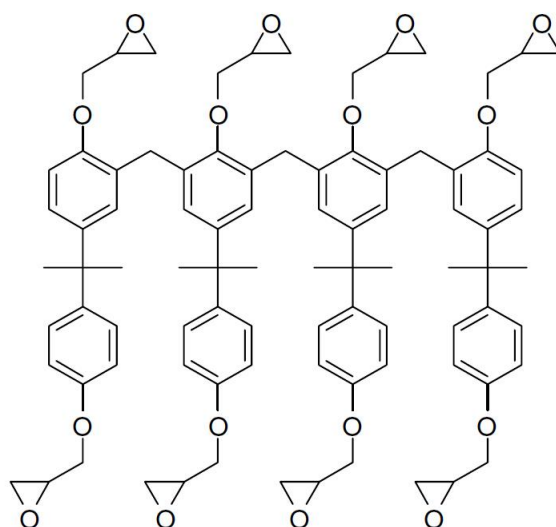


图 2.2 SU-8 化学结构式

表2.1 SU-8光刻胶的物理特性

SU-8 光刻胶	固化物%	黏度 cSt	玻璃化转换温度℃	杨氏模量 GPa	密度 g/ml	热传导系数 W/m℃	热膨胀系数 ppm
SU-8 2025	63.3	4500	55	2.0	1.219	0.3	52
SU-8 2050	71.65	12900	55	2.0	1.233	0.3	52
SU-8 2100	63.3	45000	55	2.0	1.237	0.3	52

SU-8 光刻胶具有很多优点。交联后的 SU-8 可以承受多种溶剂、酸、碱的腐蚀；具有良好的耐热性，对环境的温度变化不敏感；机械性能良好，可作为永久的支撑结构；对比度高，可以形成细致的图形，图形侧壁很陡峭，可以做大高宽比结构；具有自平整性，平面性好，涂胶厚度均匀；光穿透性好，可以制作成光学元件。

2.2.2 基片预处理

在本文中，选择与 SU-8 黏附性较好的硅片作为基片。为了提高 SU-8 胶和基片的粘附力和确保微透镜阵列的均匀性和牢固能力，应设法去除硅片表面的油污和杂质等。实验中，使用丙酮来清理硅片，然后将清洗过的硅片放置在温度为 200℃ 的热台上烘烤 30 分钟来除去硅片表面的溶剂。

2.2.3 涂胶

涂胶是指在清洗好的基片上覆盖一层均匀厚度的光刻胶膜的工艺。采用的方法主要有喷雾法、流动法、浸润法、滚动法和旋转法等^[49]。其中，旋转涂胶法的操作简单，可以很好地保证涂胶的厚度的均匀性和一致性，应用广泛，本文采用旋转涂胶法。涂胶的厚度主要取决于 SU-8 的黏度和匀胶机的转速。SU-8 胶的厚度与旋转速度的关系曲线如图 2.3 所示。

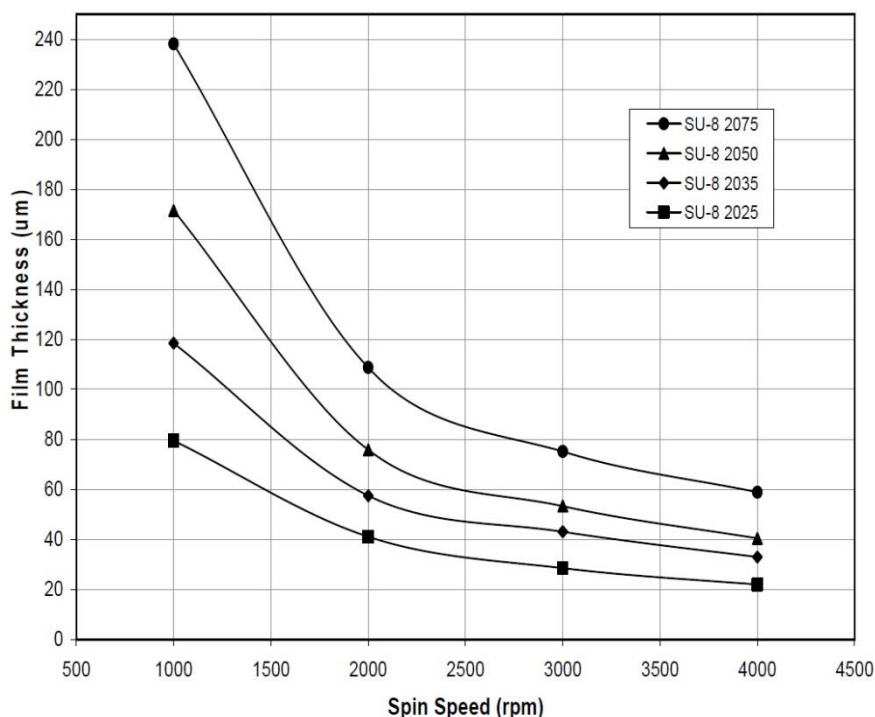


图 2.3 SU-8 光刻胶的厚度与旋胶速度的关系

为防止气泡的产生而影响微透镜的质量，将适量光刻胶直接由瓶中缓慢倾倒在硅片上。如果匀胶后仍然存在气泡，可使用针头将气泡刺破来减少气泡对微透镜结构的影响。匀胶后，用丙酮清理匀胶台，防止光刻胶黏附在匀胶台上影响以后的实验。

2.2.4 前烘

前烘的目的是去除胶中的水分和溶剂而使其固化。本文中采用具有很好的温度控制的热台作为烘烤设备。不同的光刻胶厚度，需要不同的前烘时间，随着光刻胶厚度的增加，前烘时间随着增加。前烘时间与光刻胶厚度的关系如表 2.2 所示。热应力会伴随着温度的升高而产生，会使光刻胶中产生褶皱，影响结构的表面形貌。为避免前烘中产生的热应力，要缓慢增加和降低热台的温度，在本实验中，是先将热台的温度升高到 65℃，保持相应时间，再将温度增加到 95℃，保

持所需时间，前烘完成后，将温度缓慢降到室温。如果前烘后，光刻胶表面出现褶皱现象，可以将基底从热台上取出，然后重复冷却和加热过程，直到褶皱现象消失。

表2.2前烘时间和厚度的关系

厚度（微米）	前烘时间（分钟）	
	（65℃）	（95℃）
25-40	0-3	5-6
45-80	0-3	6-9
85-110	5	10-20
115-150	5	20-30
160-225	7	30-45

2.2.5 曝光

曝光是利用曝光系统将掩模版的图形转移到光刻胶层上。SU-8 对紫外光的吸收符合比尔定律：

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\alpha x \quad (2.2)$$

L_p 是穿透长度， L_p 为吸光系数 α 的倒数，用 L_p 来描述样品对光的特征吸收深度。当匀胶后的光刻胶厚度不大于吸收深度 L_p 时，认为 SU-8 的感光是比较均匀的。在本实验中，采用接触曝光形式，使用的是 I 线紫外光刻机，特征波长是 365 nm，对应的 SU-8 穿透长度是 250 微米。使用 I 线曝光可以保证曝光的均匀性。曝光剂量的选择也很重要。曝光不足和曝光过量对于微透镜结构的形成都会造成影响。曝光剂量的选取要按照 SU-8 光刻胶的厚度选取，其曝光剂量的选取依照表 2.3 所示。

表2.3 曝光剂量和厚度的关系

厚度（微米）	曝光剂量（mJ/cm ² ）
25-40	150-160
45-80	150-215

85-110	215-240
115-150	240-260
160-225	260-350

2.2.6 后烘

在本实验中，后烘的目的有两个：1、使经过曝光的 SU-8 光刻胶充分交联，形成微透镜的侧壁结构；2、使未曝光区域的光刻胶在玻璃化转换温度（TG）下加热至热熔状态，由于表面张力和与侧壁的附着力的作用形成微透镜曲面。与前烘类似，为了防止热应力的产生而破坏结构，后烘采取阶梯加热方式。后烘加热时间与厚度的关系如表 2.4 所示。

表2.4后烘时间和厚度的关系

厚度（微米）	前烘时间（分钟）	
	（65℃）	（95℃）
25-40	1	5-6
45-80	1-2	6-7
85-110	2-5	8-10
115-150	5	10-12
160-225	5	12-15

2.2.7 微复制工艺

我们可以利用微复制工艺将 SU-8 光刻胶微凹透镜转换为凸透镜，好处是可以脱离基底的限制，可以更加灵活的应用于实际。在本实验中，选择 PDMS 作为复制材料。PDMS 硅橡胶是由基本组分与固化剂组成的套件产品，使用时使基本组分与固化剂按 10: 1 体积比混合^[50]。PDMS 的固化温度范围是 25-150℃，固化过程中无放热现象，也不需要二次固化。固化后，PDMS 可立即使用的温度范围为-55℃-200℃。在固化之前，PDMS 是一种黏度较低的液体，可以随意流动，覆盖住整个光刻胶三维结构。固化后，聚合的 PDMS 变为胶体状，具有很好的弹性，所以在脱模过程中可以很好的形成所需结构。PDMS 硅橡胶的基本物

理特性如表 2.5 所示。

表 2.5 PDMS (25℃) 的物理特性

黏度 (cps)	抗拉强度 (psi)	折射率	电阻率 (Ω/cm)	介电常数
3900	900	1.43	2.0×10^{15}	2.7

在混合 PDMS 基本组分和固化剂时, 搅拌要缓慢, 避免空气进入 PDMS 中, 由于很难避免在混合时出现气泡, 可使用真空箱排除气泡, 要保证乘 PDMS 的容器容量至少是液体体积的 4 倍。真空箱要抽真空直至 PDMS 无气泡为止。

在实验中, 将适量的经过真空泵抽真空无气泡的 PDMS 倾倒在光刻胶上, 将光刻胶和 PDMS 放入真空烘箱, 在 50℃ 的温度下烘烤 24 小时使 PDMS 固化。在冷却到室温后, 由于其材料特性, PDMS 可以轻松地从 SU-8 光刻胶上脱去。

2.2.8 实验内容

本文根据上述实验步骤进行了多组实验, 为了获得多种数据, 设计了多种掩模图案, 掩模的图案有长条形, 正方形和圆形。制作的微透镜的尺寸从 30 微米到 390 微米, 间隔是 30 微米。涂胶的厚度从 100 微米到 150 微米。

2.3 本章小结

本章提出了本文制造微透镜方法的原理和设计, 论述了一些参数对微透镜的影响, 对本方法的优势和创新点进行了论述。论述了微透镜及其阵列制造工艺步骤, 包括光刻胶的选取, SU-8 微透镜及其阵列的制作, PDMS 倒模复制等制作过程, 并对制作过程中出现的问题进行了论述与分析, 并提出了解决方法。

第三章 实验结果的测量与分析

3.1 微透镜形貌的测量

为了测量微透镜的表面形貌和光学特性,本文采用以下三种测量方法来获取微透镜的相关数据。首先,通过台阶仪(Surface Profiler)扫描微透镜表面,获得微透镜表面的二维坐标数据,通过对这些数据的处理,我们可以得到包括微透镜的曲率半径和接触角等微透镜的信息。台阶仪的测量原理是:台阶仪使用极小的触针轻缓地划过被测表面,因为表面有微小的峰谷,所以触针会随之发生起伏运动,触针的二维坐标就反映了表面轮廓的情况。传感器会位移信号经过转换传输到电脑上,就得到了具体的微透镜表面轮廓。使用台阶仪测量的优点是测量精度较高、可控的量程和扫描速度、测量结果稳定可靠、重复性好、数据易于存储和处理。缺点是触针会扫描过程中因为与测量物体的接触造成变形和磨损,使测量的精度下降。由于探头不能做到理论上的极小,探头存在一定的大小,当探头头部曲率半径大于被测表面的围观凹面区域的半径时,会造成该处测量数据的偏差。而且为了保证探针不会磨损太多,探头会一定高的硬度,所以不适于测量精密零件和软质表面。

同时,通过光学显微镜(Optical Microscope, OM)和扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)对微透镜的正面和横截面进行拍照观察,获得微透镜的水平和垂直的形貌。使用光学显微镜操作简单,可以直观的观察微透镜的形貌,可以对微透镜的表面进行直观的定性评价。但是其精度较低,不适用定量分析微透镜的形貌,光路如果未与微透镜表面垂直,会造成很大的偏差。扫描电子显微镜可以更加真实精确的观察微透镜的表面形貌,使用扫描电子显微镜测量的优点是 1.具有可以调节的放大倍率和较高的分辨率,可以从几十倍到几十万倍之间不间断调节,最小分辨率可达 1nm。2.SEM 具有较大的景深,较好的视野,拍摄的照片真实立体,可以直接观察被测样片具体的表面的精细结构。但是由于 SU-8 光刻胶导电性不好,直接观测不能得到清晰的图像,所以需要在表面蒸上一层薄薄的金膜,这也增加了测量的复杂性。

为了获得微透镜的光学特性,本文搭建了一种可以观测观察微透镜聚焦图案的光学装置,此光学装置如图 3.1 所示。此装置包括激光发射器(波长是 633nm),一个透镜组,一个 CCD 相机,一个导轨和一台计算机。原理是激光发射器发出的激光,通过透镜组将光线转换成平行光,平行光穿过微透镜阵列会产生汇聚,通过 CCD 可以探测汇聚后的光线图像,通过导轨寻找焦点的位置,可以算出焦距。通过此装置,可以直接获得平行光透过微透镜阵列的图案来测试微透镜阵列的光学性能。这种方法的优点是可以简单的获得微透镜的焦距,避免数据处理中

出现的问题。可以直观的观察微透镜形成的图像，易于获得微透镜的均匀性和一致性信息，直观而快速的评价微透镜质量。

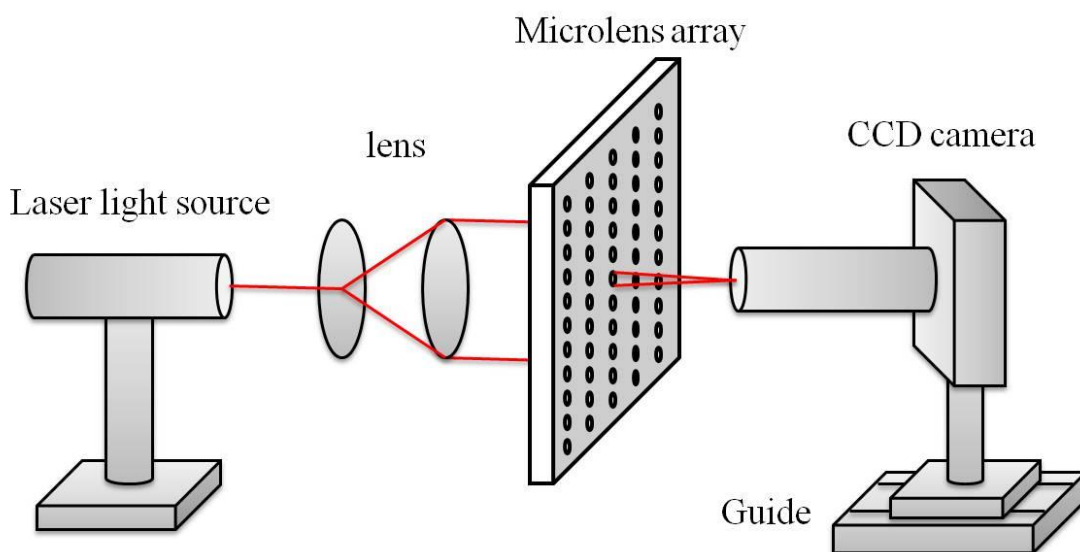


图 3.1 光学测量装置

3.2 实验结果分析

3.2.1 掩膜图案宽度对微透镜的影响

通过第二章的分析可知，微透镜的平面尺寸是受控于掩膜图案的尺寸。在本文中，我们使用三种图案的掩膜版，三种图案分别是正方形，圆形和长条形（长远大于宽）。在本文中，主要分析长条形微透镜的实验结果，因为它反映了微透镜在二维形貌。本文的掩膜图案尺寸从 30 微米到 390 微米，尺寸间隔是 30 微米。通过实验我们发现，在一定的尺寸上，光刻胶通过后烘可以形成一个完整的一个弧面，而大于这个尺寸后，光刻胶表面不能形成一个完整的弧面，而是中间出现凸起或者甚至形成波浪形图形。当微透镜尺寸在 30 和 210 微米之间时，其表面可以形成一个完整的弧形；而当微透镜尺寸在 240 和 390 微米之间时，其表面不能形成一个完整的弧形。210 微米宽度和 240 微米宽度的微透镜表面轮廓如图 3.2 所示。虚线表示的是 210 微米宽度下的微透镜轮廓，点线表示的是 240 微米宽度下的微透镜轮廓。可以看出 210 微米宽度下的微透镜表面是一个完整的弧面，而 240 微米尺度下的微透镜表面中心出现一个凸起，而没有形成完整的弧面。当微透镜不能形成完整的弧面的原因是尺寸过大时，表面张力不足以影响到图形的中心，因为光刻胶是一种聚合物，聚合物在回流热熔时有黏度，而受黏度的影响，表面张力不能将整个表面拉向两边，这样图形的中间就会形成凸起或者出现波浪形图形。

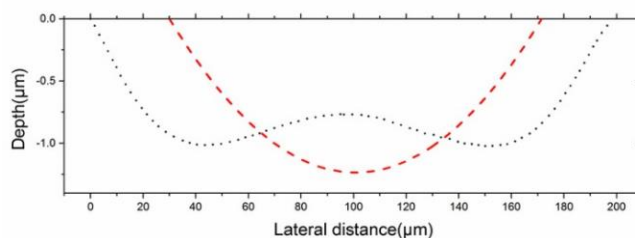


图 3.2 通过台阶仪测量的微透镜轮廓

微透镜的面型是由微透镜的平面尺寸和接触角决定的，根据第二章的模型，我们将微透镜的表面认为是一个理想的圆弧，根据图形宽度和接触角的关系，我们可以得出曲率半径的公式：

$$r = \frac{w}{2\sin\theta} \quad (3.1)$$

r 是微透镜的曲率半径， w 是微透镜的水平宽度， θ 是微透镜的接触角，见图 3.3。

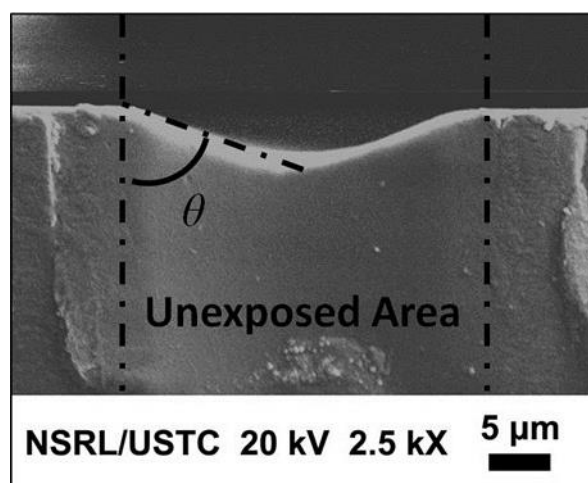


图 3.3SU-8 光刻胶微透镜横截面的 SEM 图

在理想情况下，微透镜的接触角和三相界面（气态、液态和固态）和温度和压力有关，而不受微透镜宽度的影响。通过公式（3.1）可知，当接触角保持一定数值的前提下，微透镜的曲率半径和微透镜的水平宽度成正比。

通过台阶仪和扫描电子显微镜的测量，获得了微透镜的表面轮廓。通过非线性拟合等方法的数据处理，我们得到了微透镜的曲率半径伴随微透镜宽度的变化曲线，如图 3.4 所示。

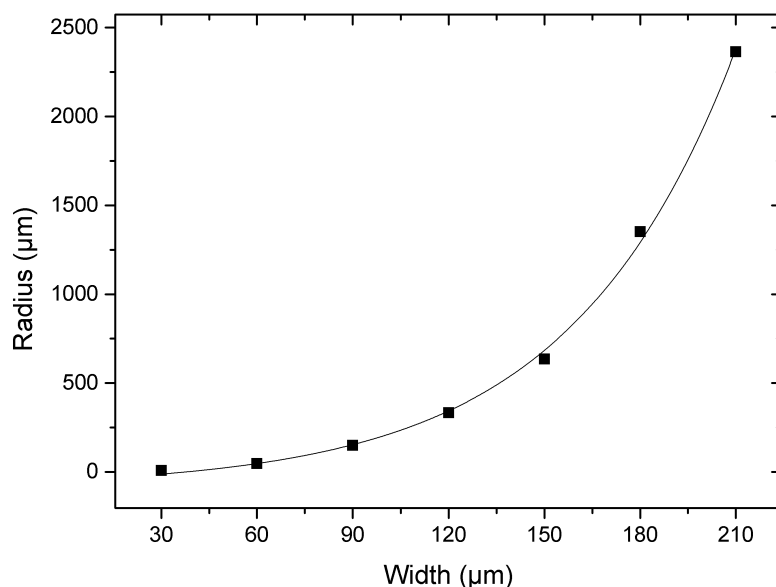


图 3.4 微透镜的曲率半径和拟合曲线

通过图 3.4，发现微透镜的曲率半径和微透镜的宽度并不成正比关系，而是一种指数关系。方块点是我们测得的微透镜的曲率半径的平均值，采集的样本是每组三十个数据。我们对这些数据进行了拟合，图 3.5 中的曲线就是拟合的结果。微透镜的曲率半径和微透镜的宽度的关系如公式 3.2 所示。

$$r=41.99 \times e^{\frac{w}{51.55}} - 87.36 \quad (3.2)$$

拟合优度 (Coefficient of determination, COD) 是衡量拟合质量的系数，其数值越接近 1，证明拟合的结果越好。在本次拟合中，拟合优度^[51]是 0.99，证明本次拟合效果很好，这个变化曲线可以用来计算以后的微透镜焦距。通过公式 (1.2) 和公式 (3.2) 的对比，可以推断，微透镜的曲率半径不与微透镜的宽度成正比，表明接触角在确定的光刻胶材料和环境下会伴随微透镜的宽度变化而变化。

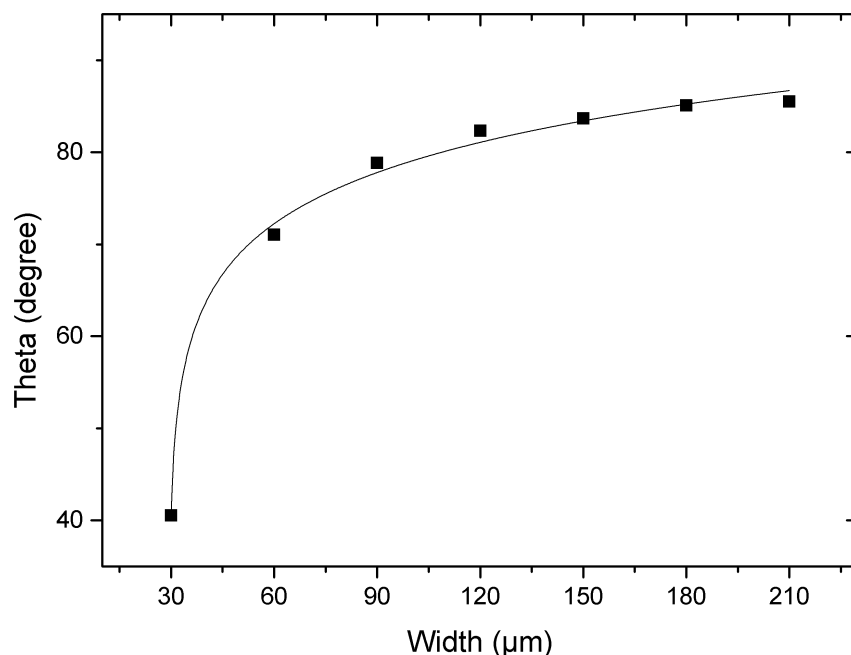


图 3.5 微透镜的接触角和拟合曲线

通过台阶仪测量得到的数据，我们得到了微透镜的接触角数据。微透镜的接触角和微透镜宽度的关系曲线，如图 3.5 所示。根据图 3.5，表明微透镜的接触角随着微结构的宽度的变化而变化，呈一种对数关系，继而我们用对数函数拟合这些数据，其关系如公式 (3.3)。

$$\theta = 44.34 + 8.15 \times \ln(w - 29.37) \quad (3.3)$$

从图中可以看出，当微透镜的宽度小于 90 微米时，接触角从 40 度显著地增大到 80 度，这造成了在宽度小于 90 微米时，微透镜的曲率半径增长缓慢，只是从几十微米增加到一百多微米。当微透镜的宽度大于 90 微米时，接触角增长缓慢，从 80 度缓慢增长，最后趋近于 90 度，这使得微透镜的曲率随宽度增长大幅增长，从一百多微米迅速增长到两千多微米，从而呈现出一种指数增长的趋势。带来这种趋势的原因可能如下：光刻胶是一种聚合物，在热熔回流过程中，流动的聚合物仍然是有一定黏度的，这种黏度对微透镜的成型有影响，它会使热熔的光刻胶流动更加迟缓，这使得微透镜的接触角不再是一个固定的值，而是随着微透镜的宽度而变化，这就造成了微透镜的曲率半径的非线性增长。由于微透镜的接触角是随微结构宽度的变化而变化的，所以需要通过实验来获得实际的接触角变化，然后总结出其中规律，利用此规律来指导后面的实验。

为了探索本次实验制作的微透镜的一致性，在甩胶厚度为 100 微米的每个尺寸的微透镜，分别测量了三十个，并计算了曲率半径的平均值，曲率半径的标准

偏差和相对标准偏差，其结果如表 3.1 所示。相对标准偏差是标准偏差除以平均值。在大部分的尺寸上，其相对标准偏差小于 5%，这说明制作的微透镜的一致性是比较好的，这是本文制作微透镜方法的优点之一。相对于其他尺寸，在最小尺寸（30 微米）和最大尺寸（210 微米）的相对标准偏差较大，这说明继续增加或者减小微透镜尺寸在向工艺极限靠近，所以其一致性在降低。但是，即使如此，相对于传统的热熔法，其相对标准偏差一般在 11%左右^[30]，最大的相对标准偏差仍然不超过 10%，证明这种方法制作的微透镜具有非常好的一致性。

表 3.1 微透镜的曲率半径的统计结果

宽度(μm)	曲率半径的平均值(μm)	标准差 (μm)	相对标准偏差(%)
30	8.44	0.70	8.29
60	46.07	1.52	3.29
90	148.89	8.90	5.97
120	333.11	16.40	4.92
150	635.55	31.16	4.90
180	1352.57	42.01	3.10
210	2364.78	232.71	9.84

在前面的拟合获得曲率半径的过程，本文是假设微透镜的表面是标准的圆弧，但是实际上，制作的微透镜表面不可能是完美的圆弧，所以在讨论一下不同宽度下的微透镜的轮廓接近圆弧的程度。在拟合每个表面轮廓数据时，会产生累积误差，这是一种表示原数据与拟合函数差异的量，累积误差是相对于微透镜的宽度而言的，为了统一公正的评价各个尺寸的微透镜的轮廓接近圆弧的程度，本文将累积误差除以平均曲率半径，得到的数值称之为相对累积误差。各个尺寸微透镜拟合圆度的累积误差和相对误差如图 3.6 所示。

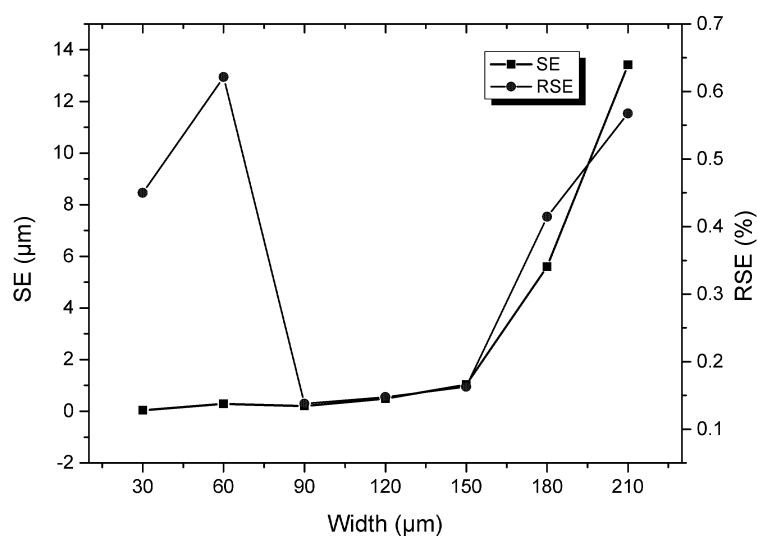


图 3.6 不同宽度下微透镜表面轮廓接近标准圆弧的程度

方块的连线表示的是不同宽度的微透镜的拟合圆弧的累积误差，圆点的连线表示的是不同宽度的微透镜的拟合圆弧的相对累积误差。可以看出随着宽度增加，累积误差也随之增加，但是相对累积误差呈现一种 U 型曲线，在宽度较小（小于 60 微米）和较大（大于 180 微米）时，相对误差较大，在中等宽度（90 微米和 150 微米之间）区域，相对标准误差保持在极低的程度，这说明在这些尺寸的微透镜的表面轮廓非常接近标准的圆弧，而较小和较大宽度的微透镜的表面轮廓和标准的圆弧相差较大。将表 3.1 和图 3.6 对比，也可以证明增大和减小的宽度在向工艺极限的方向发展，由于黏度和表面张力的影响，使得微透镜表面形成的弧面不是标准的圆弧。但是即使是最大相对累积误差小于 0.7%，所以说明本文制作的微透镜的表面还是非常接近圆形的，从而也证明本方法制作的微透镜的质量是很好的，具有非常好的形貌特征。

3.2.2 光刻胶厚度对微透镜的影响

传统的光刻胶的热熔法对厚度极其敏感，如果厚度控制稍有不当地，就带来微透镜形貌的重大差别。当光刻胶微柱的直径是一定时，如果旋涂的光刻胶厚度不足时，在光刻胶热熔回流时，会在光刻胶中间出现一个平台或者凹陷的状态，这是因为厚度太薄和接触角的限制，造成表面张力不足以将表面拉成一个完整的曲面，而且即使增加烘胶时间，也不会将曲面改变成一个完整的弧面。所以传统的光刻胶热熔法对光刻胶的厚度的要求很高，工艺宽容性差，一致性不好。

由公式 (3.1) 可以看出，本文制作的微透镜的形貌与光刻胶的厚度无关，为了了解厚度对本文方法制作的微透镜的影响，我们做了两种厚度（100 微米、

150 微米) 的两组实验, 依旧使用上文的宽度。两种厚度的微透镜的曲率半径和两组数据的差值如图 3.7 所示。

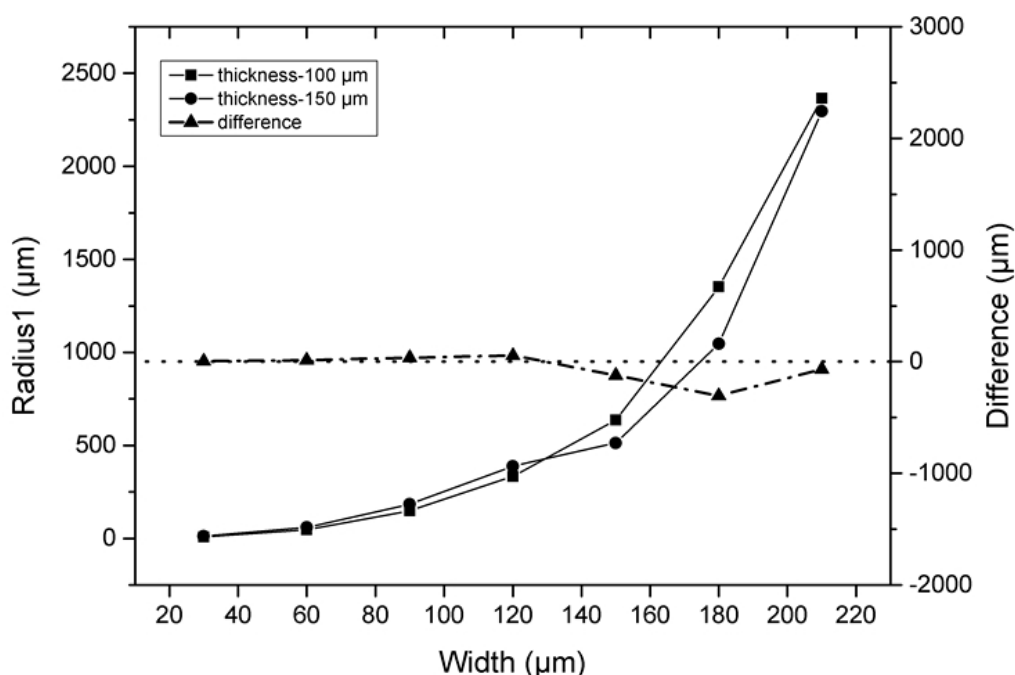


图 3.7 微透镜曲率半径和厚度的关系

图 3.7 中, 方块的连线表示的是涂胶厚度是 100 微米的微透镜的曲率半径, 圆点的连线表示的是涂胶厚度是 150 微米的微透镜的曲率半径, 三角形的连线表示的是上述两组数据的差值, 中间的虚线表示的是差值为零的值, 从上图可以看出, 两种厚度的微透镜的曲率半径不管是趋势, 还是数值上都几乎一致, 表示差值的曲线也更为直观的看出, 这两种不同厚度的微透镜的差值非常接近零, 厚度对微透镜的形貌几乎没有影响, 这也很好的证明了第二章的推断, 旋涂的光刻胶的厚度不是影响微透镜形貌的因素。

3.2.3 后烘温度降温过程对微透镜的影响

在本文中, 在旋涂的光刻胶的厚度是 100 微米时, 后烘的温度是从室温增加到 65 度, 在 65 度保持 5 分钟, 然后升温至 95 度, 保持 10 分钟, 然后使温度迅速降低到室温。为了探索后烘温度的升降温控制对微透镜形貌的影响, 因为在后烘温度大于玻璃化转换温度时, 未曝光的光刻胶处于流动状态, 这时的光刻胶会因为流动性和表面张力的作用, 形成一个曲面, 如果温度迅速的降低, 因为光刻胶具有一定的黏度, 从而影响微透镜的成型。所以我们进行了一个改变后烘温度降温方式的实验, 实验中, 后烘温度先从室温升高到 65 度, 保持 5 分钟, 然后

升高到 95 度，保持 10 分钟，然后让光刻胶在热台上缓慢的降温，然后在降温到 65 度时，保持 10 分钟，再使温度降低到室温。本文选择了 40 微米、80 微米和 200 微米宽度的微透镜作为实验对象。实验结果如表 3.2 所示。

表3.2不同后烘温度控制对微透镜的影响

宽度（微米）	第一组微透镜的曲率半径（微米）	第二组微透镜的曲率半径（微米）	两组微透镜的曲率半径的差值（微米）
40	9.93	10.02	0.09
100	128.26	141.02	12.76
200	730.38	681.46	48.92

从上表可以看出，在降温时在 65℃ 停留一段时间，对微透镜的形貌几乎没有影响，因为 SU-8 光刻胶是一种聚合物，聚合物有黏度，黏度和温度有关，在温度较低时，光刻胶的黏度较大，但是当温度升高到较高温度时，光刻胶的黏度将会保持稳定，并且黏度很小，这是黏度对光刻胶微透镜的成型的影响就非常小，所以只要保持较高温度，就可以保证微透镜的形貌的一致性。这就说明了降温过程的不同，对微透镜几乎没有影响。

3.2.4 微透镜光学特性分析

通过光学显微镜和光学测量系统的测量可以得到微透镜及其阵列的光学特性。在光学显微镜下的微透镜图片如图 3.8 所示。

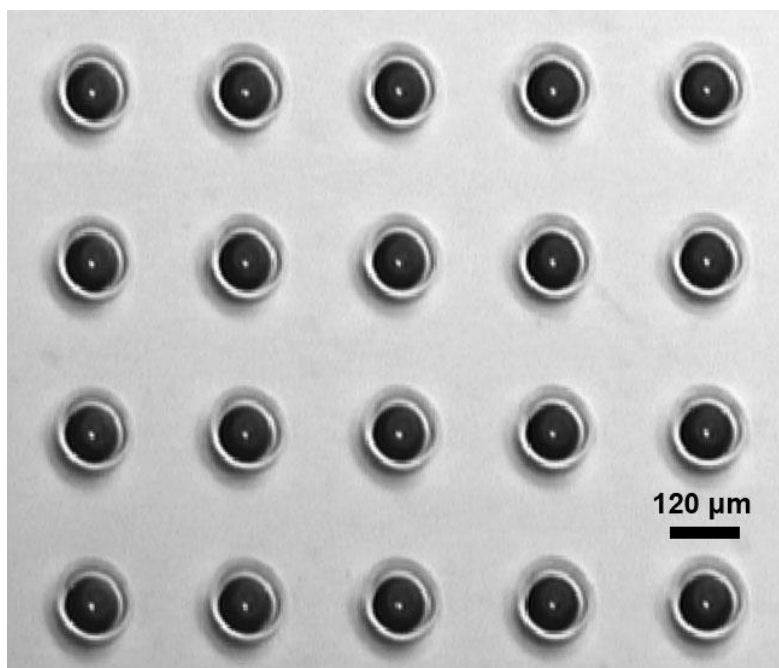


图 3.8 微透镜的光学显微镜照片

图中的是宽度是 120 微米的微透镜阵列，可以看出微透镜阵列排列整齐，微透镜与微透镜之间的差距很小，均匀性很好。而且每个微透镜非常对称，证明这种微透镜制作方法可靠性很好。

通过光学平台来用平行光路测量微透镜，可以了解微透镜的光学性能，例如微透镜的焦距和聚焦的图案。长条形的微透镜和圆形的微透镜聚焦图案如图 3.9 所示。

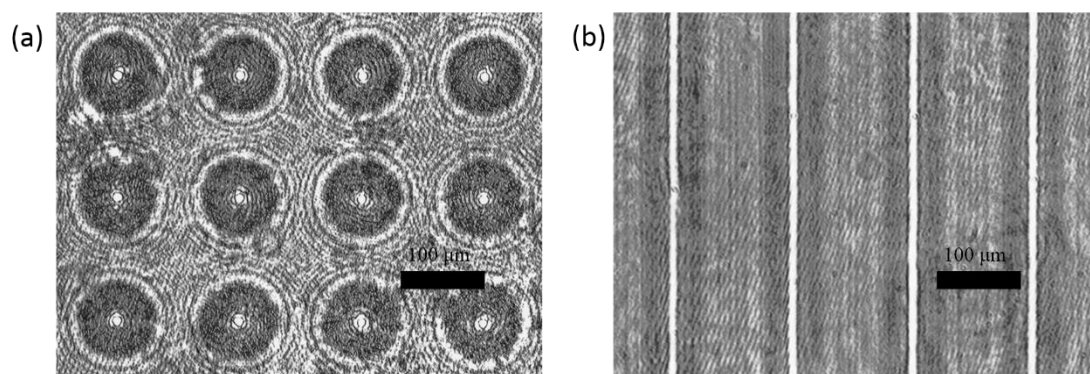


图 3.9 微透镜的聚焦图案

从图 3.10 可以看出，圆形的微透镜的聚焦图案是一个圆点，长条形的微透镜的聚焦图案是一条直线，由于微透镜的表面不是完美的弧形，所以聚焦的圆点的直径和直线的宽度不可能是无限小，所以具有一定大小。可以从图中可以看出，这种方法生产的微透镜的一致性很好，聚焦图案的大小和位置都很一致，而且聚焦图案的尺寸相对于微透镜的尺寸较小，所以证明聚焦的效果较好，本文制

作的微透镜具有很好的光学特性。

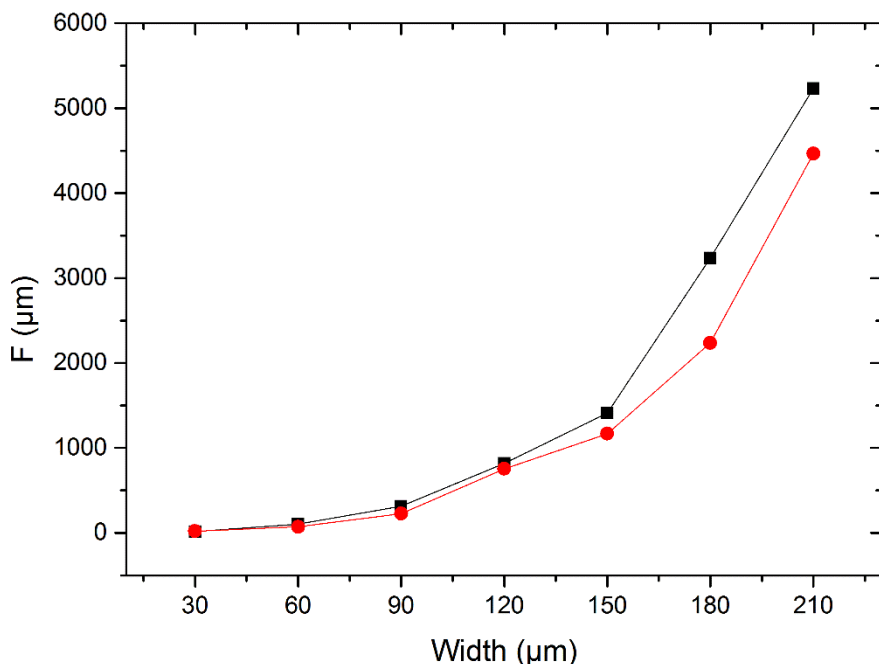


图 3.11 通过曲率半径计算和光学装置测量的微透镜焦距

在本文中，获得微透镜的焦距有两种方式。第一种方式，微透镜的焦距可以通过曲率半径计算出，即利用公式（2.1）计算，在本次实验中，复制材料选择为 PDMS，PDMS 的折射系数是 1.41，通过之前测量到的曲率半径的数据，我们计算出了微透镜的焦距。第二种方式，利用搭建的光学测量装置，通过移动 CCD 相机，可以寻找焦点的位置，从而直接得到微透镜的焦距。两种方式得到的 100 微米厚度的微透镜的焦距，如图 3.11 所示。方块的连线表示的是根据曲率半径得到的焦距，圆点的连线表示的是通过光学测量装置得到的焦距。可以看出，两者的差距是非常小的，两者之间的差别有可能是测量误差、拟合误差和球差带来的。根据图 3.11 可以得到，本文制作的微透镜最大焦距达到了 4465 微米，传统的光刻胶热熔法制作的微透镜在同等尺度上的焦距最大可达 650 微米^[30]，可以看出，本文制作的微透镜的焦距远远大于热熔法的微透镜的焦距，通过多层材料的微透镜热熔法制作的微透镜的最大焦距也只有 2.1 毫米^[30]，小于本文的单层材料的微透镜的焦距，如果本文应用折射系数更小或者再增加一层材料，可以获得更大的焦距。所以，通过本方法可以制作出具有超长焦距的微透镜，这是本文提出的微透镜制作方法的一大优点。

3.2.5 填充因子

因为本文采用负性光刻胶热熔成型的方法来制作微透镜阵列,透镜的支撑结构可以制作得很小,所以本方法制作的微透镜阵列的填充因子可以很大。本文中采用正方形和六边形作为掩模图案来制作透镜阵列,图案的边长从 50 增加到 300 微米,图形的间隔有两种,分别是 4 微米和 10 微米。正方形图案的填充因子最大可以达到 97.4%,六边形图案的填充因子最大可以达到 98.5%,如图 3.12 所示。通过上述数据可以看出,本方法制作的微透镜阵列的填充因子可以做到非常大,非常接近于 1,很好地克服了传统的光刻胶热熔法中微透镜阵列的填充因子不能过大的缺点,有利于提高对光源的利用率。

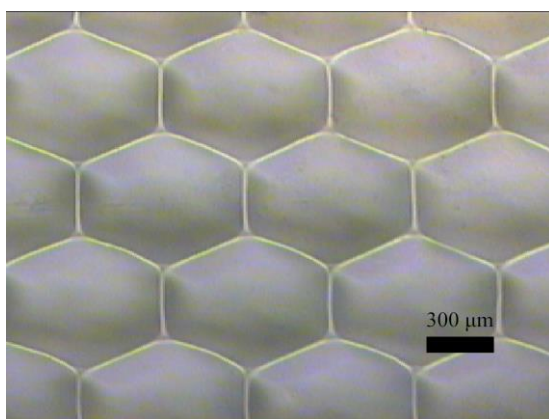


图 3.12 六边形微透镜 (填充因子: 98.5%)

3.3 本章小结

本章对本文的实验内容进行了总结和分析。首先,介绍了三种测量微透镜的方法,并对每种测量方法进行了深入的分析。然后,通过实验得到的数据,并针对每个因素对微透镜的影响,逐个展开深入分析。分析了微结构的宽度对微透镜的影响,包括曲率半径和宽度的关系还有接触角与宽度的关系,微透镜轮廓接近圆弧的程度随宽度的变化,并通过多次实验得到的数据分析了实验方法的一致性。研究了光刻胶厚度对微透镜的影响,发现了微透镜对光刻胶的厚度不敏感。研究了不同后烘的降温过程对微透镜的影响,研究结果表明后烘温度降温方式的不同对微透镜的轮廓没有影响。通过上述分析,可知本文的微透镜的制作方法一致性好,工艺宽容性好,可靠性高。通过显微镜和光学测量的观测,测得了微透镜的焦距对微透镜的光学特性进行分析和评价,可以看出本方法制作的微透镜具有很大的焦距,远远大于传统热熔法制作的微透镜的焦距。最后分析了本方法的掩模的填充因子,本方法制作的掩模的填充因子可以做到非常大,非常接近于 1,克服了传统的热熔法制作的微透镜的填充因子不能很大的缺点。基于本章对实验数据的测量与分析,可以总结出本文制作的微透镜具有以下优点: 1.本文的微透镜制作方法可靠性好,工艺宽容性好。2.本文制作的微透镜具有超长的焦距,远远

大于传统光刻胶热熔法制作的微透镜的焦距。3.本文制作的微透镜的填充因子很大，实验中的填充因子最大可达 98.5%。

第四章 微透镜的软件模拟仿真

根据第二章的论述，我们假设光刻胶微透镜的成型机理是：在温度超过玻璃化转换温度时，未曝光的光刻胶会处于流动状态，由于表面张力，光刻胶的表面会流动成一个曲面以实现的表面能的最小化。在软件模拟中，我们假设表面张力是微透镜的成型的最主要的影响因素。Surface Evolver 软件可以计算和模拟因为表面张力的液体形状变化过程。

4.1 Surface Evolver 软件介绍

Surface Evolver 软件是由美国明尼苏达大学的 K.Brakke 教授开发研究的^[52]。Surface Evolve 的编写是明尼苏达大学能源系和明尼苏达科技集团的项目-几何超级计算项目的最小表面组 (the Minimal Surface Group of the Geometry Supercomputing Project) 的一部分。目前这个程序可以在网上免费下载使用。

Surface Evolver 是一个交互式的电脑程序，它能够根据约束条件来最小化表面能。Surface Evolver 可以确定表面形状，确定系统的稳定性，并计算相关的力和表面势能。表面以一种简单形状拼成的复合体的形式表示，更确切的说，是一种多个三角形的集合。用户可以在一个数据文件中定义一个初始化的表面。能量的最小化是通过能量梯度下降迭代法实现的。其能量可以是表面张力、重力、均方曲率、用户定义的表面积分、节点能量和其他形式。约束可以是顶点位置的集合约束，也可以是在基于整体的约束，即物体的体积。Surface 可以处理任意拓扑结构（例如现实中的肥皂泡）、体积约束、边界约束、方程约束、边界接触角、限定的平均曲率半径、晶体积分、重力和可以表示成表面积分的约束。表面可以是任意维数的环境空间，可以由一个黎曼度量，其环境空间可以一系列行为的熵空间。Surface Evolver 软件能够利用有限元分析方法(FEM)得到在表面势能、重力势能等多种势能作用下的系统能量最小时的静态平衡状态，并可以计算出表面形态和系统的各种数据^[53]。为了修改其特性或者保持程序运行良好，用户可以交互式的修改其表面。Surface Evolver 是为二维和三维的表面而编写的，但是它也可以基于一些约束条件来处理更高维数的运算。通过电脑屏幕上的图像我们可以得到图像化的输出，并实时在线的观测曲面的变化，可以有效地跟踪和控制迭代过程，同时可以保存为多种文件格式，包括 PostScript。

目前为止，基于的 Surface Evolver 的应用包括：在低重力环境下的火箭燃料箱里的燃油形状的建模^[54]，计算不透明方块的面积问题^[55, 56]，计算立方体中和

有毒容器中的毛细表面^[57, 58], 晶体生长的模拟研究^[59, 60], 研究晶体边界问题, 研究更加有效的开尔文十四面体的空间区域分割方法^[61, 62], 研究泡沫的流变特性^[63, 64], 计算在微电路上焊液的形状^[65], 研究聚合物链封, 研究生物膜的建模^[66], 计算节点能量^[67], 研究球体的翻转^[68], 对绩效曲面的奇点进行分类。

Surface Evolver 程序的优势是在于所处理问题的广度和灵活性, 而不是针对一些具体的特殊课题的最佳计算方法, 提供了灵活多样的函数定义方法和描述能量及约束条件的方法。用户可以根据自己的特定问题, 通过基本的几何元素节点、边、面和体建立不同的数学模型。用户可以在数据文件中建模, 定义和描述研究对象, 给定研究对象的初始液体表面和其它相关初始条件。它一直处于不断开发的过程中, 而且鼓励用户提出各种建议, 开发出各种新的功能。

Surface Evolver 的可移植性很强, Surface Evolver 由可移植的 C 语言编写, 并可以在多种操作系统下运行, 如 Microsoft Windows, Linux, Unix 和 Macintosh。这意味着它可以移植到任何有 C 语言程序的操作系统。它可以在 32 位和 64 位系统编译。

4.2 理论基础与算法设计

本文的制作微透镜方法涉及气态、液态和固态三种状态, 而微透镜的曲面就是由液态光刻胶和空气与固态光刻胶综合作用而形成的。趋向于收缩是液体表面的最基本的特性之一, 这是由于表面上的分子受力不均匀, 表面张力是把表面收缩到最小的趋势和使表面势能最小的力。由于表面张力的作用, 在弯曲表面下的液体或者气体会受到附加的压力使它们趋于收缩^[69]。描述弯曲表面上附加压力的基本公式是杨-拉普拉斯 (Young-Laplace) 公式。杨-拉普拉斯公式如公式 4.1 所示。

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (4.1)$$

R_1 和 R_2 是液面上两个方向主要的曲率半径。对于本文的长条形掩模制作的微透镜即圆柱面微透镜, 因为在一个方向是水平的, 所以 $R_1 = \infty$, $R_2 = \frac{d}{2\cos\theta}$, 其中 d 是微透镜的水平宽度, θ 是平衡状态的接触角。将 R_1 和 R_2 带入公式 (4.1), 就得到公式 (4.2):

$$\Delta P = \frac{2\gamma\cos\theta}{d} \quad (4.2)$$

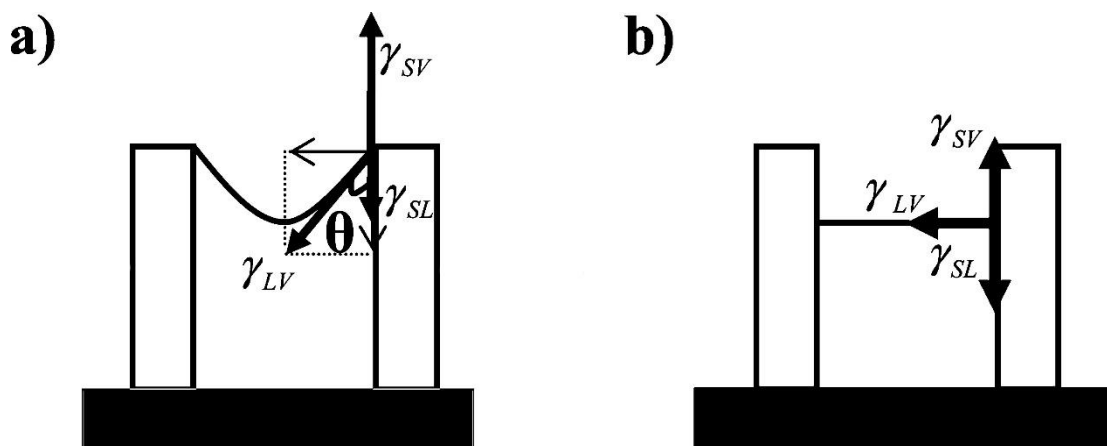


图 4.1 在三相界面的表面张力

在三相界面的表面张力如图所示。在图 4.1 中， γ_{SV} 是气体和固体之间的表面张力， γ_{LV} 是液体和气体之间的表面张力， γ_{SL} 是液体和固体之间的表面张力。在图 4.1 (a) 中，展示的一般情况下的三相界面，可以看出在界面上形成了一个曲面。图 4.1 (b) 中是一种特殊情况，即接触角是 90 度的时候，这是液体表面是一个平面，也就是曲率半径是无穷大，这是一种极限情况。基于杨氏公式，在三相界面上的表面张力可以表示为：

$$\gamma_{SL} - \gamma_{SV} = \gamma_{LV} \cos\theta \quad (4.3)$$

在本文的 Surface Evolver 模拟实验中，确切的表面公式或者说是熵函数是未知的，所以求导是不可能的，所以在这种情况下，平衡状态下的曲面是通过总能量的最小化获得的，通过一点点微小地改变系统的状态，然后检查系统的能量是否在减小（通过迭代法）。Surface Evolver 中嵌入的迭代最小化算法有梯度法，共轭梯度法和 Runge Cutta 算法。相对其他两种算法，共轭梯度法的计算速度更快，所以在本文中采取共轭梯度法作为模拟的迭代算法。

在理想情况下，最小化的迭代过程的停止条件或者是当曲面面积达到了约束要求，或者是当对于面的能量的偏导数为零的时候。但是，满足这些条件，可能需要无限的时间。这样，检查两次迭代的能量差可以作为结束算法的条件（当两次能量的差小于 10^{-12} ，则最小化程序停止）。但是最小差值原则并不是寻找最小能量的必要条件。在两种情况下，当能量差异足够小到满足条件，但是那并不是最小能量。第一种情况，能量的最小化不再继续，在几何上和能量值上都不能观察到变化。在这种情况下，需要检查迭代步长，如果发现零迭代步长，表示需要将结构分割成更小的单元来解决问题。第二种情况，需要确定这个能量点是不是一个在鞍点（能量变化为零），需要检查它的海塞矩阵（Hessian matrix）。半正定的海塞矩阵表示这个状态不是一个鞍点。在本文中，需要检查海塞矩阵和步长来确保模拟结果得到的是最小能量。

在不考虑重力的情况下，本文中的微透镜模型的能量公式为：

$$E = \gamma_{LV}A_{LV} + \gamma_{SV}A_{SV} + \gamma_{SL}A_{SL} \quad (4.4)$$

在平衡状态下，公式（4.4）的偏导是零，同时可知 $\Delta A_{SV} = \Delta A_{SL}$ ，结合杨-拉普拉斯公式，公式（4.4）可以改写为

$$\frac{\Delta E}{\gamma_{LV}} = \Delta A_{LV} + \left(\frac{\gamma_{SL} - \gamma_{SV}}{\gamma_{LV}} \right) \Delta A_{SL} \quad (4.5)$$

已知液体表面积的变化等于气体表面积的变化，并利用公式（4.3），作为整个系统的变量的微小能量差是

$$\Delta E = \gamma_{LV} (\Delta A_{LV} - \cos\theta \times \Delta A_{SL}) \quad (4.6)$$

根据公式(4.6)，Surface Evolver 的输入是结构的初始几何参数和接触角 θ 。 γ_{LV} 的影响体现在接触角 θ 上。对于一种特定的液体， ΔE 的最小化相当于公式(4.6)括号内公式的最小化，在这种平衡状态下， ΔE 和括号内公式都为零。

下面介绍基于 Surface Evolver 的软件建模。在本文中，将此模型构造成类似与一个长方体的图形，液体有四个面包围，如图 4.2 所示。长方体的长对应柱面微透镜的长度，长方形的宽对应微透镜的水平宽度，长方形的高对应光刻胶的初始高度。对于本文的实验对象，此模型的长远大于宽，所以液体表面再长度方向基本是一条直线，我们只考察液面在水平宽度的变化。

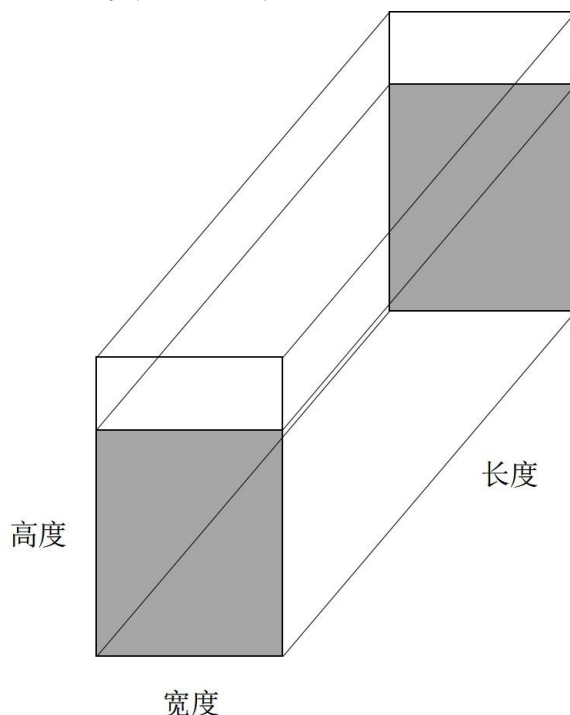


图 4.2 柱面微透镜在 Surface Evolver 中的模型

应用于 Surface Evolver 软件的算法的步骤是：

- 1.在数据文件中输入结构的几何参数（长宽高）和接触角 θ 。
- 2.将结构精细分割
- 3.进行迭代运算，直到满足给定条件，停止迭代
- 4.检查海塞矩阵和步长，如果满足条件，模拟结束，输出结果；如果不符合条件，则返回步骤 2，继续细分迭代。

4.3 模拟结果与分析

在本文中，液体的高度就是旋涂的光刻胶的厚度，液体的长度就是光刻掩模图案的长度，液体的宽度就是光刻掩模的宽度。在本文中，定义液体的高度为 100 微米，液体的宽度从 30 微米到 210 微米，液体的长度是宽度的 100 倍，保证液体的长度远大于宽度。经过一系列的模拟仿真，得到了大量数据，根据模拟数据，我们得到了模拟的液体的表面轮廓，并计算出了曲率半径，并通过曲率半径得到了焦距。模拟结果和模拟结果与实际实验结果的对比如图 4.3 所示。

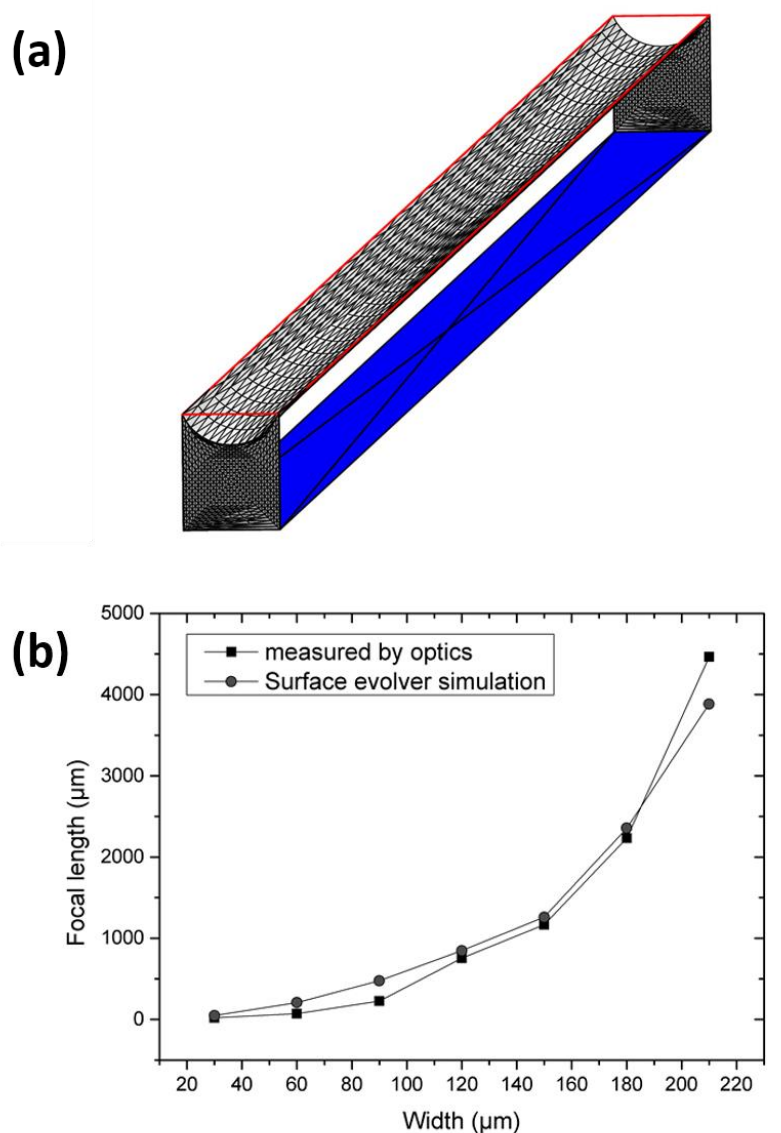


图 4.3 (a): Surface Evolver 软件模拟结果。(b) 实际测量的微透镜曲率半径和 Surface Evolver 模拟的曲率半径。

图 4.3(b)中, 方块的连线表示的是通过光学测量装置测量的微透镜的焦距, 圆点的连线表示的是通过 Surface Evolver 模拟的曲率半径计算获得的焦距。从图 4.3 可以看出, 模拟数据可以很好的符合实验数据, 说明假设表面张力是影响微透镜成型最主要原因的假设是正确的。通过模拟结果, 可以总结出微透镜成型的机理, 即由于表面张力的作用, 未曝光的热熔状态的光刻胶会流动形变成一个类似球形或者圆柱形的曲面来达到表面能的最小化。但是, 从图中也可以看出, 在宽度较大的情况下, 模拟结果和实验测量结果的差异比宽度较小的情况下的结果的差异较大。带来这种较大的差异的原因可能是因为光刻胶是一种聚合物, 而不是理想的牛顿液体, 聚合物在热熔时有黏度, 从而造成光刻胶不能达到表面的最小。同时, 其他因素如光刻胶的热收缩也会影响微透镜的成型。

4.4 本章小结

在本章中,介绍了本文对于微透镜成型机理的假设,并根据需要选择 Surface Evolver 作为模拟软件。在第一节,简要的介绍了 Surface Evolver 的研发背景,使用范围,软件原理和特点以及基于 Surface Evolver 的研究热点。在第二节,简单论述了表面张力,表面自由能和接触角等基础物理概念,并根据本文的微透镜制作方法,对模拟实验的模型进行了分析与建模,并给出了具体的算法思想,指出了在具体模拟实验中需要注意的问题。第三节,将软件模拟得到的数据和实验得到的数据进行对比,发现模拟结果较好地符合了实验结果,说明之前的假设是正确的,验证了我们之前提出的微透镜成型机理。对模拟结果与实验数据的差异进行了说明,并解释了带来差异的原因。

第五章 总结与展望

随着微光机电系统（MOEMS）的快速发展，对光学元件的微型化的需求越来越大，对光学元件的加工精度要求也越来越高。微透镜的光刻胶制作方法的研究已经经历了很多年，很多研究人员对光刻胶热熔法进行了深入研究。光刻胶热熔法具有工艺简单和成本低等优点。但由于传统的光刻胶热熔法对光刻胶厚度非常敏感，难以控制接触角，宽容性差，一致性差和工艺重复性不好等缺点，本文提出一种新的微透镜制作方法。本文使用负性光刻胶-SU-8，利用深紫外光刻制作出微米尺度的微透镜及其阵列，然后通过后烘加热，使其未曝光的光刻胶在表面张力的影响下形成曲面，成为微透镜。微透镜的平面尺寸由光刻掩模和光刻工艺所决定，微透镜的接触角和光刻胶的材料特性有关，所以此制作方法的一致性很好，工艺宽容性好，制作的微透镜形貌可控，并且可以制作出曲率半径很大的微透镜，并且可以通过 PDMS 倒模成微凸透镜，在实际实验中，获得的最大的微透镜焦距是 4.4 毫米，相比于其他微米级的微透镜的焦距，本实验制作的微透镜的焦距是其他的数倍到数十倍。本论文主要基于国家同步辐射实验室微细加工实验室，进行如下的研究与工作：

1. 调研了微透镜的制作方法，了解微透镜制作方法的研究现状和国内外进展，研究光刻胶热熔法制作微透镜的优缺点，提出一种新的利用光刻胶制作微透镜的新方法。

2. 介绍了本微透镜制作方法的原理和设计，从原理上分析了微透镜的成型机理分析此制作方法的稳定性和工艺宽容性，分析了本制作方法的优点，本文制作的微透镜的平面尺寸是受掩膜和光刻工艺控制的，可以实现精确的控制，接触角由光刻胶材料的特性决定，光刻胶的厚度对微透镜成型没有影响，所以本方法具有很好的工艺宽容和一致性。对具体的制作工艺进行了深入详细的探讨，包括光刻胶的选择，基片的处理，涂胶，前烘，曝光，后烘和微复制工艺。

3. 介绍了本文测量微透镜的三种方法，分别是通过台阶仪测量微透镜表面，通过光学显微镜和扫描电子显微镜观测和通过实验室搭建的光学测量装置来测量微透镜的光学特性，并分析了每种方法的优缺点。然后，对实验中获得的数据进行了整理与分析，分析了微结构的宽度对微透镜的影响，包括曲率半径和宽度的关系还有接触角与宽度的关系，微透镜轮廓接近圆弧的程度随宽度的变化，并通过多次实验得到的数据分析了实验方法的一致性。研究了光刻胶厚度对微透镜的影响，发现微透镜对光刻胶的厚度不敏感。研究了不同后烘的降温过程对微透镜的影响，研究结果表明后烘温度降温方式的不同对微透镜的轮廓没有影响。研究了方法掩模的填充因子，发现本方法的掩模的填充可以做到非常大，接近于 1。

最后,通过显微镜和光学测量的观测,对微透镜的光学特性进行分析和评价,并给出了微透镜的焦距。

4.针对本文提出的微透镜制造方法,分析了微透镜的成型机理,假设表面张力是微透镜成型的最主要原因,并选择 Surface Evolver 作为模拟软件。简要的介绍了 Surface Evolver 的研发背景,使用范围,软件原理和特点,然后简单论述了表面张力,表面自由能和接触角等基础物理概念,并根据本文的微透镜制作方法,对模拟实验的模型进行了分析与建模,并给出了具体的算法思想,指出了在具体模拟实验中需要注意的问题。对比了软件模拟得到的数据和实验得到的数据,模拟结果较好地符合了实验结果,验证了我们之前提出的微透镜成型机理。最后对模拟结果与实验数据的差异进行了说明,并解释了带来差异的原因。

综合本文的上述分析,可以得出本文提出的微透镜制作方法具有以下优点:1.本文制作的微透镜具有超长的焦距,远远大于传统光刻胶热熔法制作的微透镜的焦距。2.本文的微透镜制作方法一致性好,工艺宽容性好,可靠性高。3.本文制作的微透镜的填充因子很大,实验中的填充因子最大可达 98.5%,克服了传统的光刻胶热熔法制作的微透镜的填充因子不能很大的缺点。

尽管本方法制作的微透镜具有很长的焦距、良好的工艺宽容性和可重复性等优点,但是其更加精细化的控制还有待与进一步的改进。对于其他影响微透镜成型的因素,还有待于更加深入而全面的研究,具体如下:

1.本文制作了 30 微米到 390 微米宽度的微透镜,其中 30 微米到 210 微米宽度的微透镜可以形成完整弧形,应该继续做一批宽度更为精细的微透镜,以寻找本制作方法的工艺范围。同时可以通过加入表面活性剂等方法对光刻胶的表面进行改性,以扩大大方法的工艺范围。

2.由于光刻胶是一种聚合物,聚合物在热熔状态下具有一定的黏度,黏度使光刻胶的流动发生迟缓,会影响接触角的大小。应该在以后实验中,探索研究黏度的变化对微透镜形貌的影响,并提出一些方法来控制黏度的对微透镜形貌的影响。

参考文献

1. 刘德森, 微小光学与微透镜阵列, 科学出版社: 北京, 2013.
2. 张文栋 熊继军, 微光机电系统: MOEMS, 机械工业出版社: 北京, 2006.
3. 王跃林, 苏以撒, 王文, 微电子机械系统. *电子学报* **1995**, (10), 37-42.
4. David Armitage, Micromirror spatial light modulator. Google Patents: 1987.
5. Sid Chaudhuri; Hjalmtysson Gisli; Yates Jennifer, Control of optical connections in an optical network. Google Patents: 2006.
6. MB Sinclair; Butler MA; Kravitz SH; Zubrzycki WJ; Ricco AJ, Synthetic infrared spectra. *Optics letters* **1997**, 22 (13), 1036-1038.
7. 李振波; 张琛, 直径 1mm 电磁型实用超级马达的设计. *仪器仪表学报* **2000**, 21 (2), 163-166.
8. 崔天宏; 周兆英; 王晓浩; 叶雄鹰; 杨岳, 硅微热致动泵设计及其加工工艺的研究. *仪表技术与传感器* **1998**, 8, 10-13.
9. 詹珍贤. 非球面液滴微透镜及其阵列的制作和应用研究. 中国科学技术大学, 2010.
10. RH Anderson, Close-up imaging of documents and displays with lens arrays. *Applied optics* **1979**, 18 (4), 477-484.
11. Reinhard Vo; Herzig Hans Peter; Nussbaum Philippe; Hugel William B, Microlens array imaging system for photolithography. *Opt. Eng.* **1996**, 35 (11), 3323-3330.
12. RF Stevens; Davies N, Lens arrays and photography. *Journal of Photographic Science* **1991**, 39 (5), 199-207.
13. MC Hutley; Savander P; Schrader M, The use of microlenses for making spatially variant optical interconnections. *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A* **1992**, 1 (6), 337.
14. Nicholas C Craft; Feldblum Avi Y, Optical interconnects based on arrays of surfaceemitting lasers and lenslets. *Applied optics* **1992**, 31 (11), 1735-1739.
15. Norbert Lindlein; Pfund Johannes; Schwider Johannes, Algorithm for expanding the dynamic range of a Shack-Hartmann sensor by using a spatial light modulator array. *Opt. Eng.* **2001**, 40 (5), 837-840.
16. G. Y. Yoon; Jitsuno T.; Nakatsuka M.; Nakai S., Shack Hartmann wave-front measurement with a large F-number plastic microlens array. *Applied optics* **1996**, 35 (1), 188-192.
17. G. Artzner, Microlens arrays for shack-hartmann wave-front sensors. *Opt. Eng.* **1992**, 31 (6),

- 1311-1322.
18. 王青. 微结构表面的金刚石铣削加工研究. 哈尔滨工业大学, 2008.
 19. X-J Shen; Pan Li-Wei; Lin Liwei, Microplastic embossing process: experimental and theoretical characterizations. *Sensors and Actuators A: Physical* **2002**, 97, 428-433.
 20. NS Ong; Koh YH; Fu Yu Q, Microlens array produced using hot embossing process. *Microelectronic Engineering* **2002**, 60 (3), 365-379.
 21. Chih-Yuan Chang; Yang Sen-Yeu; Chu Ming-Hui, Rapid fabrication of ultraviolet-cured polymer microlens arrays by soft roller stamping process. *Microelectronic engineering* **2007**, 84 (2), 355-361.
 22. DL MacFarlane; Narayan V; Tatum JA; Cox WR; Chen T; Hayes DJ, Microjet fabrication of microlens arrays. *IEEE photonics technology letters* **1994**, 6, 1112-1114.
 23. Rolf Danzebrink; Aegerter Michel A, Deposition of micropatterned coating using an ink-jet technique. *Thin Solid Films* **1999**, 351 (1), 115-118.
 24. 张玉; 刘德森, 六角形孔径平面微透镜阵列的制作及基本特性研究. *光子学报* **2008**, 37 (8), 1639-1642.
 25. H. Ottevaere; Cox R.; Herzig H. P.; Miyashita T.; Naessens K.; Taghizadeh M.; Volkel R.; Woo H. J.; Thienpont H., Comparing glass and plastic refractive microlenses fabricated with different technologies. *J. Opt. A-Pure Appl. Opt.* **2006**, 8 (7), S407-S429.
 26. 罗风光; 曹明翠; 李洪谱; 艾军; 徐军; 李再光, 微透镜列阵的光敏热成形新方法. *光电工程* **1994**, 4.
 27. Nicholas F Borrelli; Morse David L; Bellman Robert H; Morgan Walter L, Photolytic technique for producing microlenses in photosensitive glass. *Applied optics* **1985**, 24 (16), 2520-2525.
 28. Zoran D Popovic; Sprague Robert A; Connell GA, Technique for monolithic fabrication of microlens arrays. *Applied optics* **1988**, 27 (7), 1281-1284.
 29. D Daly; Stevens RF; Hutley MC; Davies N, The manufacture of microlenses by melting photoresist. *Measurement Science and Technology* **1990**, 1 (8), 759.
 30. Hsin-Ta Hsieh; Lin Vinna; Hsieh Jo-Lan; Su Guo-Dung John, Design and fabrication of long focal length microlens arrays. *Optics Communications* **2011**, 284 (21), 5225-5230.
 31. F. T. O'Neill; Sheridan J. T., Photoresist reflow method of microlens production Part I: Background and experiments. *Optik* **2002**, 113 (9), 391-404.
 32. Frank Wyrowski, Design theory of diffractive elements in the paraxial domain. *JOSA A* **1993**, 10 (7), 1553-1561.
 33. 柯才军. 微透镜阵列的设计, 制作及与 CCD 的集成技术 [D]. 华中科技大学, 2005.

34. M Edward Motamedi, Micro-opto-electro-mechanical systems. *Opt. Eng.* **1994**, 33 (11), 3505-3517.
35. 周宏. 用于半导体激光器阵列准直的微透镜设计与工艺研究. 华中科技大学, 2005.
36. Michael T Gale; Knop Karl In *The fabrication of fine lens arrays by laser beam writing*, 1983 International Technical Conference/Europe, International Society for Optics and Photonics: 1983; pp 347-353.
37. Yuzo Ishii; Koike Shinji; Arai Yoshimitsu; Ando Yasuhiro In *Hybrid integration of polymer microlens with VCSEL using drop-on-demand technique*, Symposium on Integrated Optoelectronics, International Society for Optics and Photonics: 2000; pp 364-374.
38. Seok-min Kim; Kang Shinill, Replication qualities and optical properties of UV-moulded microlens arrays. *Journal of Physics D: Applied Physics* **2003**, 36 (20), 2451.
39. Sung-Keun Lee; Lee Kwang-Cheol; Lee Seung S, A simple method for microlens fabrication by the modified LIGA process. *Journal of Micromechanics and Microengineering* **2002**, 12 (3), 334.
40. Jens Schulze; Ehrfeld Wolfgang; Muller Holger; Picard Antoni In *Compact self-aligning assemblies with refractive microlens arrays made by contactless embossing*, Proc. SPIE, 1998; pp 22-32.
41. 许乔; 叶钧; 周光亚; 侯西云; 杨国光; 包正康; 余中如, 折射型微透镜列阵的光刻热熔法研究. *光学学报* **1996**, 16 (9), 1326-1331.
42. 陈祥献, 光刻热熔微透镜阵列的电铸成形复制技术研究. *仪器仪表学报* **1998**, 19 (1), 56-60.
43. 赫尔齐希; 海宪, 微光学元件, 系统和应用, 国防工业出版社: 2002.
44. 汤一新; 王辉; 蔡铁权; 金国藩, 二元微光学元件复制技术的研究. *仪器仪表学报* **1995**, 1.
45. Peter Dannberg; Mann Gunnar; Wagner Lars; Braeuer Andreas H In *Polymer UV-molding for micro-optical systems and O/E-integration*, Micromachining and Microfabrication, International Society for Optics and Photonics: 2000; pp 137-145.
46. Madanagopal V Kunnnavakkam; Houlihan FM; Schlax M; Liddle JA; Kolodner P; Nalamasu O; Rogers JA, Low-cost, low-loss microlens arrays fabricated by soft-lithography replication process. *Applied Physics Letters* **2003**, 82 (8), 1152-1154.
47. 陈观生, 微型直接甲醇燃料电池用关键材料的制备研究. **2013**.
48. 郑金红, 光刻胶的发展及应用. *精细与专用化学品* **2006**, 14 (16), 24-30.
49. 任智斌; 朱丽思; 曾皓; 姜会林, 微透镜阵列的光刻胶热熔制作技术. *长春理工大学学报* **2007**, 29 (4), 12-15.

50. James Friend; Yeo Leslie, Fabrication of microfluidic devices using polydimethylsiloxane. *Biomicrofluidics* **2010**, 4 (2), 026502.
51. Nico JD Nagelkerke, A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika* **1991**, 78 (3), 691-692.
52. Kenneth A Brakke, Surface evolver manual. *Mathematics Department, Susquehanna University, Selinsgrove, PA* **1994**, 17870 (2.24).
53. K. A. Brakke, The surface evolver and the stability of liquid surfaces. *Philos. Trans. R. Soc. A-Math. Phys. Eng. Sci.* **1996**, 354 (1715), 2143-2157.
54. James Tegart In *Three-dimensional fluid interfaces in cylindrical containers*, AIAA, SAE, ASME, and ASEE, 27th Joint Propulsion Conference, 1991.
55. Kenneth A Brakke, The opaque cube problem. *American Mathematical Monthly* **1992**, 866-871.
56. KA Brakke, The opaque cube problem video. *American Mathematical Society, Providence RI* **1991**.
57. Hans D Mittelmann, Symmetric capillary surface in a cube. *Mathematics and computers in simulation* **1993**, 35 (2), 139-152.
58. M Callahan; Concus P; Finn R, Energy minimizing capillary surfaces for exotic containers. *Computing Optimal Geometries* **1991**, 13-15.
59. O Hunderi; Ryum N; Westengen H, Computer simulation of grain growth. *Acta Metallurgica* **1979**, 27 (2), 161-165.
60. D Weaire; McMurry S, Some fundamentals of grain growth. *Solid state physics* **1996**, 50, 1-36.
61. Denis Weaire; Phelan Robert, A counter-example to Kelvin's conjecture on minimal surfaces. *Philosophical Magazine Letters* **1994**, 69 (2), 107-110.
62. Rob Kusner; Sullivan John M, Comparing the Weaire-Phelan equal-volume foam to Kelvin's foam. *Forma* **1996**, 11 (3), 233-242.
63. ANDREW M KRAYNIK; REINELT DOUGLAS A; REINELT DOUGLAS A, The linear elastic behavior of a bidisperse Weaire-Phelan soap foam. *Chemical Engineering Communications* **1996**, 148 (1), 409-420.
64. Douglas A Reinelt; Kraynik Andrew M, Simple shearing flow of a dry Kelvin soap foam. *Journal of Fluid Mechanics* **1996**, 311, 327-343.
65. LM Racz; Szekely J; Brakke KA, A general statement of the problem and description of a proposed method of calculation for some meniscus problems in materials processing. *ISIJ international* **1993**, 33 (2), 328-335.

66. Xavier Michalet; Bensimon David, Observation of stable shapes and conformal diffusion in genus 2 vesicles. *Science* **1995**, 269 (5224), 666-668.
67. Robert B Kusner; Sullivan John M, Möbius energies for knots and links, surfaces and submanifolds. *preprint* **1994**, 4, 94.
68. George Francis; Sullivan John M; Kusner Rob B; Brakke Ken A; Hartman Chris; Chappell Glenn, The minimax sphere eversion. In *Visualization and Mathematics*, Springer: 1997; pp 3-20.
69. 傅献彩; 物理化学, 大学化学, 高等教育出版社: 1999.

附录

仪器设备:

中科院光电技术研究所, UREL-2000A 型号深紫外光刻机;

中科院微电子研究所, KW-4A 型号台式匀胶机;

Nikon orthot 100 型号光学显微镜, 附带 TK-C1381 型号 CCD;

宁波科仪厂, KS-80D 型号超声机;

Mirak 公司, Thermolyne 热台;

美国 Tencor 公司, Alpha-step 500 Surface profiler;

美国 Ambios Technology 公司, XP-1 stylus profiler;

药品:

美国 Micro Chem 公司 SU-8 光刻胶;

丙酮 (分析纯)

PDMS

致谢

本研究课题及学术论文都是在我的导师田扬超教授和刘刚教授的亲切关怀和精心指导下完成的。田老师和刘老师以其严肃认真的科学态度，严谨求实的治学精神，渊博的学识，独到的见解，一丝不苟，孜孜以求的工作作风和热情谦虚的为人，对我的学习和生活产生了深刻的重要影响。他们渊博的知识、敏锐的思维和开阔的视野给了我很多启迪。他们不仅给我传授了丰富的知识，更传授给我们如何获取知识，进行科学研究的方法和技巧，使我能够掌握进行科学研究的基本技巧。田老师和刘老师认真负责的工作态度，精益求精的工作态度以及热情谦和的为人，深深的影响着我并激励我进步，将使我受益终生。

从课题的选择到毕业论文的完成，田老师和刘老师都始终给予我耐心的教导和细心的关怀，倾注了大量的时间和心血，在此向田老师和刘老师表示我最崇高的敬意和衷心的感谢。

衷心感谢感谢实验室熊瑛老师耐心教授我实验的方法与技巧，并帮我解决在实验中遇到的问题和困难。感谢张晓波老师帮助我搭建光学测量平台，并给予我光学方面的指导和帮助。感谢关勇老师在我文章写作和投稿过程给予的帮助。感谢方志群老师在电镜方面给予的支持和帮助。感谢付绍军老师及实验室老师在实验中给予的帮助和指导。

感谢实验室熊鹏辉、陈翔宇、梁知挺师兄和化学系的褚健师兄，陈珊、侯双月师姐对我在平时生活和科研上的支持和帮助。感谢李法虎、郭鹏飞、陈楠、柏杨、刘建宏等同学和师弟师妹们，与你们共同学习工作和讨论使我受益匪浅。

感谢国家同步辐射实验室的各位领导老师们热心帮助和支持。

最后，感谢我的父母和我的亲人们，特别感谢的我未婚妻马梦瑶，在我的成长过程中给予的无私的帮助和无限的关怀，让我能够信心满满的应对所有困难和挑战。没有你们的支持和帮助，我不能完成我的学业和目标，你们永远是我的坚强后盾，是我的动力源泉。

边锐

2015年5月于中国科大

在读期间发表的学术论文和取得的研究成果

攻读硕士期间发表的论文:

第一作者论文:

[1] **Rui Bian**, Ying Xiong, Xiangyu Chen, Penghui Xiong, Shuangyue Hou, Shan Chen, Xiaobo Zhang, Gang Liu, Yangchao Tian. Ultralong focal length microlens array fabricated based on SU-8 photoresist [J]. *Applied Optics*. Vol.54 Issue 16, pp.5088-5093 (2015).

其他论文:

[2] Liang Zhiting, Guan Yong, Liu Gang, **Bian Rui**, Zhang Xiao Bo, Xiong Ying, Tian Yangchao. Reconstruction of limited-angle and few-view nano-CT image via total variation iterative reconstruction. SPIE Optical Engineering Applications: International Society for Optics and Photonics; 2013. p. 885113-885113-885117.

攻读硕士学位期间参与申请的专利:

[1]刘刚, 熊瑛, **边锐**, 张晓波, 田扬超 一种微透镜的制作方法 201510083079.3 2015