



浙江工业大学

硕士学位论文

论文题目：基于微流控技术的折射率可调光学器件研究

作者姓名 孙运利

指导教师 乐孜纯教授

学科专业 光学工程

所在学院 理学院

提交日期 2015 年 4 月 10 日

浙江工业大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经加以标注引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果，也不含为获得浙江工业大学或其它教育机构的学位证书而使用过的材料。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人承担本声明的法律责任。

作者签名：孙运利

日期：2015年 6 月 1 日

学位论文版权使用授权书

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

本学位论文属于

1、保密□，在 _____ 年解密后适用本授权书。

2、不保密 ☒

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：孙运利

日期：2015年 6 月 1 日

导师签名：(Signature)

日期：2015年 6 月 1 日

基于微流控技术的可调谐渐变折射率及器件研究

摘 要

微流控光学(Optofluidics)是一种结合了微流体(microfluidic)和集成光学(Integrated Optics)的新型交叉前沿学科,在化学分析、生物检测、集成光学方面有很好的运用前景,其中“芯片实验室”(Lab-on-a-Chip)的成功应用将有效降低化学、生物医学等领域的样品分析检测成本,提高分析准确性。

本文基于层流液体的对流扩散效应,提出了一种新型的具有渐变折射率分布特性并且可以实现折射率动态调节的流体渐变折射率(L-GRIN)微透镜。利用有限元法分析了器件的结构、尺寸以及微腔中芯层与包层流体的扩散系数、浓度、流速、温度、粘滞系数等因素对两相流体扩散过程达到稳定后的浓度及折射率分布的影响。同时,本文还利用光线追迹法模拟了不同折射率分布的微透镜对光束的调控效果,从而将微流体各种微观影响因素与透镜的宏观光学透镜建立起联系,从分子层次上阐释渐变折射率的形成过程及光束传播响应机制。

本文通过调节溶液扩散系数 D 、溶液浓度,芯层和包层的流速等因素实现了器件微腔中的折射率分布调整,设计出三种不同聚焦特性的 L-GRIN 微透镜,并利用光线追迹法,对其聚焦性能分别进行了分析。其中片上系统焦距可调的 L-GRIN 微透镜实现了当溶液质量分数变化从 0.05 增加到 0.4 时,焦距从 $942\mu\text{m}$ 减小到 $11\mu\text{m}$;而当液体流速由 $0.5\times 10^3\text{ pL/s}$ 增加到 $5\times 10^3\text{ pL/s}$ 时,焦距由 $127.1\mu\text{m}$ 减小到 $8\mu\text{m}$;并且如果在保持包层流速不变的前提下大幅提高芯层液体的流速,能够实现 $23.5\mu\text{m}$ 的焦斑尺寸稳定输出,而焦斑的尺寸同样可以通过连续增加芯层流速的方式来提高。本文还设计出分别实现光线一维和二维偏转和聚焦的微透镜。通过调整一侧包层流速,保持其他层流不变实现了输出光线一维方向的偏转,焦距从 $0\mu\text{m}$ 变为 $58\mu\text{m}$ 。采用上下左右包

层和芯层流速的同时调节，则实现了输出光线在二维方向上的调节。

总之，本文通过有限元法来研究 L-GRIN 微透镜的光学性能，并设计了多种实现不同光学特性的实时可调谐微透镜器件。其灵活可调的聚焦性能体现在焦距、焦斑尺寸可调以及聚焦方向可调，对片上检测系统以及新型自适应光波导器件的设计及应用具有重要的意义。

关键词：集成光学，渐变折射率，扩散对流，微流控光学

ANALYSIS OF THE TUNABLE GRADIENT REFRACTIVE INDEX AND DEVICE DESIGN BASED ON OPTOFLUIDICS

ABSTRACT

As a new technology, optofluidics is the subjects accumulation of microfluidics and integrated optics, which has an extensive practicing prospect in chemical analysis, biological detection and integrated optics. The lab-on-a-chip application can both reduce the cost of chemical or biological detection and improve the analysis accuracy.

In this paper, a tunable liquid gradient refractive index (L-GRIN) microlens was proposed based on the laminar liquid convection and diffusion effect. The effect of various liquid/device factors, including the structure and size of device, the flow velocity, concentration, viscous resistance and temperature of liquids, etc., on the diffusion convection process of liquids, as well as the concentration and refractive index distribution of L-GRIN microlens under different conditions was simulated by Finite element method (FEM). Furthermore, the correlation between

the diffusion convection process of fluid dynamics and the optical property of microlens was established by simulating the features of wave-manipulation of L-GRIN microlens using ray tracing method, and the investigations provided more understanding to the tuning mechanism of L-GRIN microlens at molecular level.

Three kinds of tunable L-GRIN microlens were designed to realize different focusing effect by adjusting the diffusion coefficient, solution concentration and flow rates of core and cladding inlet, and the light transmission process and focusing effect of devices was analyzed using ray tracing method. It was found that the focal length of the microlens varied from 942 μm to 11 μm when the mass fraction of ethylene glycol solution varied from 0.05 to 0.4, while the focal length changed from 127.1 μm to 8 μm by varying the flow rate of core liquid from 0.5×10^3 pL/s to 5×10^3 pL/s when there are no slip between core and cladding inlet. As the flow rate of core inlet increasing rapidly with that of cladding inlet being constant, the refractive index will keep unchanged at the centre of the area, thus the focal spot of output light will maintain a steady diameter of 23.5 μm . The adjustment of focal spot size can be implemented in the same manner. In addition, both one-dimensional (1D) and two-dimensional (2D) tunable L-GRIN microlens are designed. 1D light deflection was achieved by adjusting the flow rate of one-sided cladding inlet with that of other cladding inlet and core inlet being constant, and the focal length varied from 0 μm to 58 μm with the flow rate of right cladding inlet ranging from 5×10^3 pL/s to 5×10^3 pL/s. While 2D adjustable L-GRIN microlens performed the function of light deflection and focusing in two dimension by adjusting the flow rate of cladding inlet in four directions.

In conclusion, the optical performance of L-GRIN microlens were studied using FEM, and several devices were designed to realize different functions, such as adjustable focal length, focal spot and focal direction, which will have great value in the chip-on-a-lab detection system and the design and application of novel self-adaptive optical waveguide devices.

KEY WORDS: integrated optics, gradient refractive index, convection diffusion, optofluidic

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
目 录	VI
第 1 章 绪 论	- 1 -
1.1 研究背景和意义	- 1 -
1.1.1 微流控技术	- 1 -
1.1.2 微光学	- 2 -
1.2 微流控光学技术的研究与应用	- 3 -
1.2.1 微流控透镜与光波导	- 3 -
1.2.2 体液芯波导用于不同折射率系数的粒子分离	- 4 -
1.2.3 微流光传感系统	- 6 -
1.3 微流控技术可控微透镜研究进展	- 7 -
1.3.1 曲面折射式微流体透镜	- 7 -
1.3.2 基于可调渐变折射率场的光流体透镜	- 10 -
1.4 论文的主要内容	- 11 -
第 2 章 基于微流控光学可调谐的渐变折射率特性研究	- 13 -
2.1 微流渐变折射率理论分析	- 13 -
2.2 结构与流体性质分析	- 15 -
2.2.1 沿流体流动方向不同横截面处的折射率分布	- 17 -
2.2.2 流速对折射率分布的影响	- 18 -
2.2.3 中心折射率偏移	- 18 -
2.2.4 中心凹陷的渐变折射率分布	- 19 -
2.2.5 粘滞阻力对扩散对流过程的影响	- 20 -
2.3 小 结	- 21 -
第 3 章 片内聚焦动态可调 L-GRIN 微透镜	- 22 -
3.1 L-GRIN 微透镜的模型与理论	- 22 -
3.2 仿真与讨论	- 24 -
3.2.1 L-GRIN 微透镜的渐变折射率分布调节	- 24 -
3.2.2 焦距的调控	- 25 -
3.2.3 流速的变化	- 26 -
3.2.4 L-GRIN 对焦斑的调节	- 27 -
3.3 小 结	- 29 -
第 4 章 基于微流控光学的二维方向可调谐渐变折射率研究	- 30 -
4.1 理论与器件设计	- 30 -

4.2 计算与分析.....	- 31 -
4.2.1 扩散对流在器件中的简单分析.....	- 31 -
4.2.2 芯层液体偏移的实现.....	- 34 -
4.3 光线的偏转与聚焦.....	- 35 -
4.4 小结.....	- 38 -
第 5 章 一维和二维 L-GRIN 微透镜的设计与分析总结.....	- 39 -
5.1 器件设计与仿真分析.....	- 39 -
5.2 一维方向可调 L-GRIN 透镜.....	- 39 -
5.2.1 结构.....	- 39 -
5.2.2 流速对焦距的影响.....	- 40 -
5.2.3 一维方向可调.....	- 42 -
5.3 二维方向可调 L-GRIN 微透镜.....	- 43 -
5.3.1 器件结构与分析.....	- 43 -
5.3.2 出射光线焦斑分布.....	- 44 -
5.3.3 二维方向可调.....	- 45 -
5.4 总结.....	- 47 -
第 6 章 结论与展望.....	- 48 -
6.1 结论.....	- 48 -
6.2 展望.....	- 49 -
参考文献.....	- 50 -
致 谢.....	- 53 -
攻读学位期间发表的学术论文目录.....	- 54 -

第1章 绪 论

1.1 研究背景和意义

微流控光学(Optofluidics)是微机械电子系统(MEMS)的一个重要发展方向,它是微流体与微光学的技术的结合,在化学生物分析、物理光学、信息技术等领域具有广泛应用^[1-4]。微流控器件具备了微流力学和微纳光学特性,具有集成度高、成本低、检测快速等优点。微流控光学的芯片实验室(Lab-on-a-chip system)集成技术将在生物化学检测、光通信等领域具有非常好的应用前景。

微控体光学系统具有很多优势,比如能够有效降低制作及使用成本、缩短检测及反应时间、减少分析物的用量,并提高分析效率和实验的准确性^[5-6]。此外,微流体器件及其芯片系统可以实现传统大型装置无法实现的研究功能^[1]。例如,为了对生理状态进行更加准确的分析,就要使用生理环境相同尺寸的装置,才能获得更加准确的信息,微流体微腔的尺度也在 $1 \sim 100\mu\text{m}$ 之间,与生物体内血管的流动状况基本相似。其次,微流控光学技术为科学研究者实现在线实时检测、分析提供了新的研究方法及技术手段。从Yole Development的市场研究报告中可以看出,2010年到2014年间相比其它的MEMS器件,微流体器件的市场需求上升的趋势尤其明显,预计2016年市场销售将突破40亿美元^[2]。随着对高灵敏度生物微传感器应用需求的不断增长^[1,3],微流体光学分析系统在分子诊断(临床诊断、免疫和DNA诊断)、药物发现、蛋白质和基因工程、环境检测等领域的研究范围将不断拓展^[6,7]。

1.1.1 微流控技术

微流控技术(micro-fluidic/lab on a chip)^[8-9]是基于微器件加工和新材料技术发展起来的新兴技术,是微机电系统(MEMS)技术的重要应用方向之一。借助于MEMS技术,微流控技术在很多领域中都得到了快速的发展与广泛的应用,其最重要的应用方向体现在生物医学、化学检测、材料分析、光学和电磁学等领域。微流控技术将微纳器件和流体力学相结合,实现在微米纳米尺度的精确控制,构造出物理、化学、生物等科研所需的特殊研究环境。利用微流体芯片技术实现样品输送与控制流体状态、反应/合成、分离/混合、检测分析等处理功能集成在一个微芯片上完成,具有很好的反应效果,样品用量小、消耗低,不仅仅是集成反应器,还是一个密封环境下的高精度检测分析系统。20世纪初期,微流体

芯片才刚刚被提出，但是由于技术水平的相对不足，微流控芯片只能通过传统光刻或者化学刻蚀等方法在硅片上实现，这种方法存在工艺复杂、集成度不高、精确度相对较差等很多的不足，严重限制了微流控芯片在科研以及检测系统的应用。随着近年来MEMS技术以及软件技术的快速发展，设计和加工这种芯片变得简单且方便。与传统技术比较，微流控技术具有非常大的优势，它是一个微型的实验室系统，由于微小的芯片降低了材料成本，封闭了有毒的物质，提高了反应的效率，精确控制了检测的过程，实现了高精度的检测。

1.1.2 微光学

微光学(micro-optics)，又称微小光学，近年来发展非常迅速，其器件尺寸主要在微纳米量级，克服了传统光学器件体积大，质量重，一旦成型其特性难以调节等缺点，能够实现包括光束的耦合、准直，弯曲等光学的各种效果，形成简单或者复杂的光学芯片，包括微透镜、微激光器，波导耦合器等实现光学干涉、反射、折变功能的器件。

在微光学的研究领域，微透镜是一种应用十分广泛、极其重要的微光学元器件。随着科学发展及技术应用的要求，传统的设备器材正朝着光、机、电一体集成方向发展，传统的透镜不能满足集成的要求，发展新型体积小、重量轻、易集成的透镜迫在眉睫。微透镜按照其焦距是否可调，分为可调微透镜和不可调微透镜两种。目前阶段，可调微透镜可通过压力、电压以及温度等调控手段实现对焦距的调节，克服传统透镜在变焦过程产生的调控不灵敏、消耗大和不能用于微光学集成系统等缺点。在目前所研究的可调微透镜中，主要有方法有电润湿法、压力驱动、材料热效应、电磁场调节液晶法等^[10-11]。电润湿可调微透镜，是利用电润湿原理，通过电压调控微透镜的曲面形状达到变焦的目的；对于压力驱动法，则通过外在驱动力来调节液体透镜的体积，改变微透镜的曲面曲率来实现调节变焦；基于热效应可调微透镜，主要通过材料的热效应即温度升高增大体积来实现，通过控制材料的温度改变微透镜的曲面曲率达到焦距可调的效果；基于液晶的电光效应的液晶可调微透镜，主要通过电压调控微透镜的折射率来实现微透镜的焦距可调。总结他们的调节方法，主要是靠改变微透镜的表面形状或者其折射率，从而达到调节焦距的效果。但是这些方法形成的基本都是独立的器件单元，很难实现片上系统的集成。并且，其对于技术工艺的要求也是非常苛刻，价格昂贵，很难实现大规模的应用。因此，对新型可调微透镜的进一步研究具有非常重要的意义。

20世纪初，微流控光学^[3]提出后立即受到广泛关注，引发了一轮新的研究热潮，科研成果层出不穷^[12]。微流控光学芯片与传统的光学系统相比，具有微型化、调节性强、集成度高、成本低、批量加工简单等优点。光刻等微纳加工技术和新材料技术的出现和发展为

各种集成的微电子、微流体芯片提供了有力的技术基础。由于流体具有非常大的调节自由度，让光流体在可控性和兼容性方面具有传统光学所不能比拟的优势。下面将针对不同的光流体器件分类进行简单介绍。

1.2 微流控光学技术的研究与应用

1.2.1 微流控透镜与光波导

在传统光学中，光学透镜能够实现改变光束传输方向、光斑大小、能量分布，以及作为激光谐振腔等作用，是应用最广泛的元件。微流控技术是微流控光学中的核心部分，可以改变微流体芯片内部流场的流速分布、浓度分布、层流状态等，基于此技术发展起来的光学器件称为光流体器件^[12]，能实现微纳尺寸下的可调光透镜与光波导等功能。例如，利用液体之间的扩散效果，在芯片内可以实现折射率不同的芯层和包层液体的扩散对流，从而实现折射率的渐变分布，得到折射率实时可调的微透镜^[13]或者流体波导^[14]。由于两种液体间扩散是渐变的，不存在突变，因此不存在光线散射损耗等问题；同时由于不同的液体折射率不同，通过注入不同配比的溶液，其折射率是连续可调的，因此通过改变注入液体的特征参数包括流速、浓度、温度等条件，我们可以在小尺寸范围内实现大的折射率调控，这是传统光学系统所无法实现的。另外，还可以通过改变微腔内互不相容的液-液界面或者气体-液体界面的曲率实现改变微透镜特性的调节，例如通过压强调节或者电润湿法改变封装在芯片内部的液体界面，实现光学特性改变，这个方面的典型应用是折射式可调光流体微透镜^[15-18]。国内研究人员也在光流体技术方面做出了巨大贡献，例如北京大学的黄岩谊教授课题组开发了一种基于聚合物构造的微结构透镜芯片^[19]。该微流体芯片内部构建多层微结构腔体，注入不同的液体，可以实现对微透镜组焦距进行精确的调节，能够清晰成像，对实现片上集成微成像具有重要的意义。

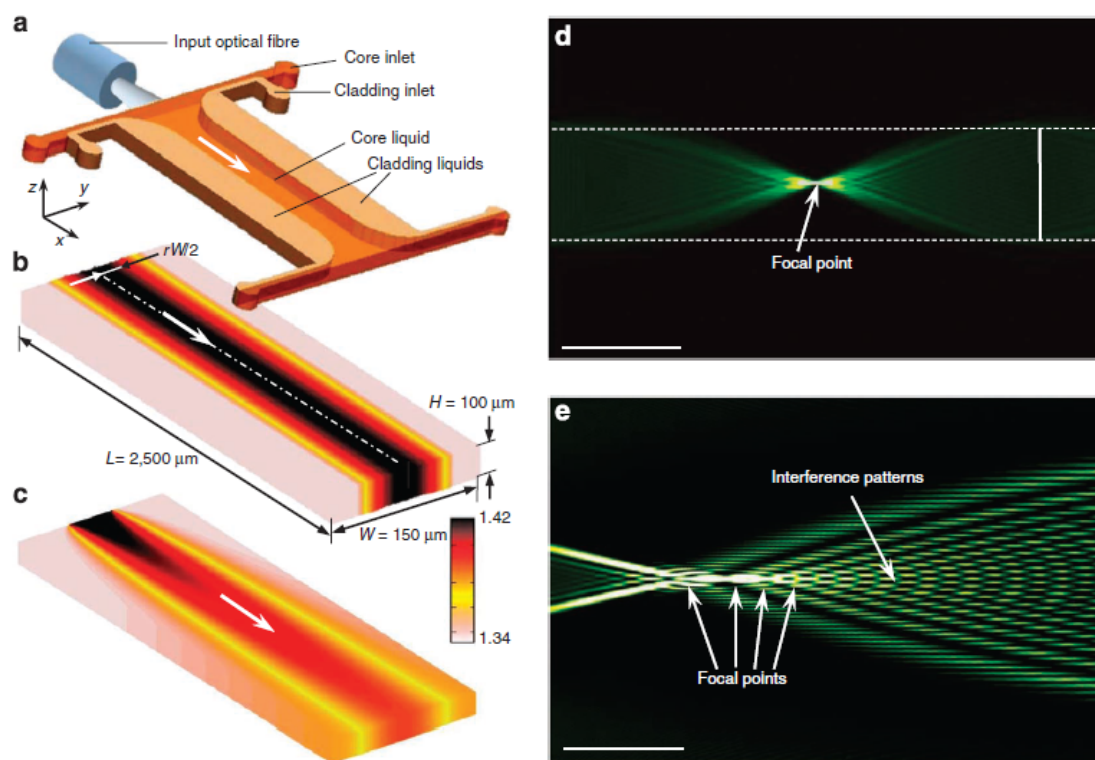


图1-1 渐变折射率流体光波导(Optofluidic Waveguide)^[14]

国际上，新加坡南洋理工大学的刘爱群教授带领的研究小组在光流体技术研究方面处于领先水平。2012年，该小组提出了利用微流腔体内部液体的浓度扩散对流效果构造光学变换媒介，用于实现对光流体芯片内部的光束控制的构想^[14]，并通过理论分析与实验验证，得到了理想的效果，该研究成果发表在当年的Nature communication上。该器件的设计原理如图1-1所示，利用乙二醇溶液与去离子水之间的扩散形成渐变折射率分布，其中折射率较高的乙二醇溶液作为芯层液体（折射率为1.432），折射率较低的去离子水作为包层液体（ $n=1.332$ ）。通过改变流速，能够实现在通道内流体的有效折射率在1.34—1.42之间渐变。图1-1中b与c分别为模拟的在不同流速下流体的折射率分布效果，其相应的光学仿真效果如图d和e所示。如b图所示，微透镜沿着微流体通道的折射率分布与渐变折射率光纤相似，d图仿真结果则类似自聚焦波导原理。而c图中液体媒介在流速与横截面两个方向出现了明显的渐变折射率场，导致不同区域的光线经历不同的相位变化，出现了多焦点、不同相位的光束重叠产生的干涉图样，如图e所示。他们第一次利用光流体的方法成功实现了以往只能在人工超材料中出现的转换光学(transformation optics)现象。

1.2.2 体液芯波导用于不同折射率系数的粒子分离

微流控技术的优势体现在其集成与微纳等特点上，由于液体具有固体无可比拟的优势，比如根据液体的不同特性通过简单的改变液体种类或使液体混合，便可以对折射率实

现灵活的调控；然而当两种液体在入口处混合，如何精确控制溶液中的各粒子的位置和动向，并且将其在出口端有效分离，是一种相对复杂的技术，亟需一种精确的机械或者力场，能够控制悬浮粒子的动向，并且实现液体粒子在输出端的分离，使得一些无效的粒子被过滤掉，实现有效粒子的单一化^[20]。

近几年，很多文章报道了微流控光学在粒子分离上的应用，通过溶液的疏密性、电磁场以及梯度力学等属性，都能够在微流中实现有效的粒子分离技术。微光学在粒子捕获方面也同样有着相当大的优势，光束通过电磁场来控制粒子的动向^[21]，电磁场是由辐射光源产生，包括红外、可见光和紫外线的频率范围^[22,23]。在中性的电介质中，光束可以操控的粒子尺寸范围在数百微米到数纳米之间^[24,25]。基于微流控技术的近场和等离子场可以操控的范围进一步拓展了，使得其可以操纵金属和半导体粒子。

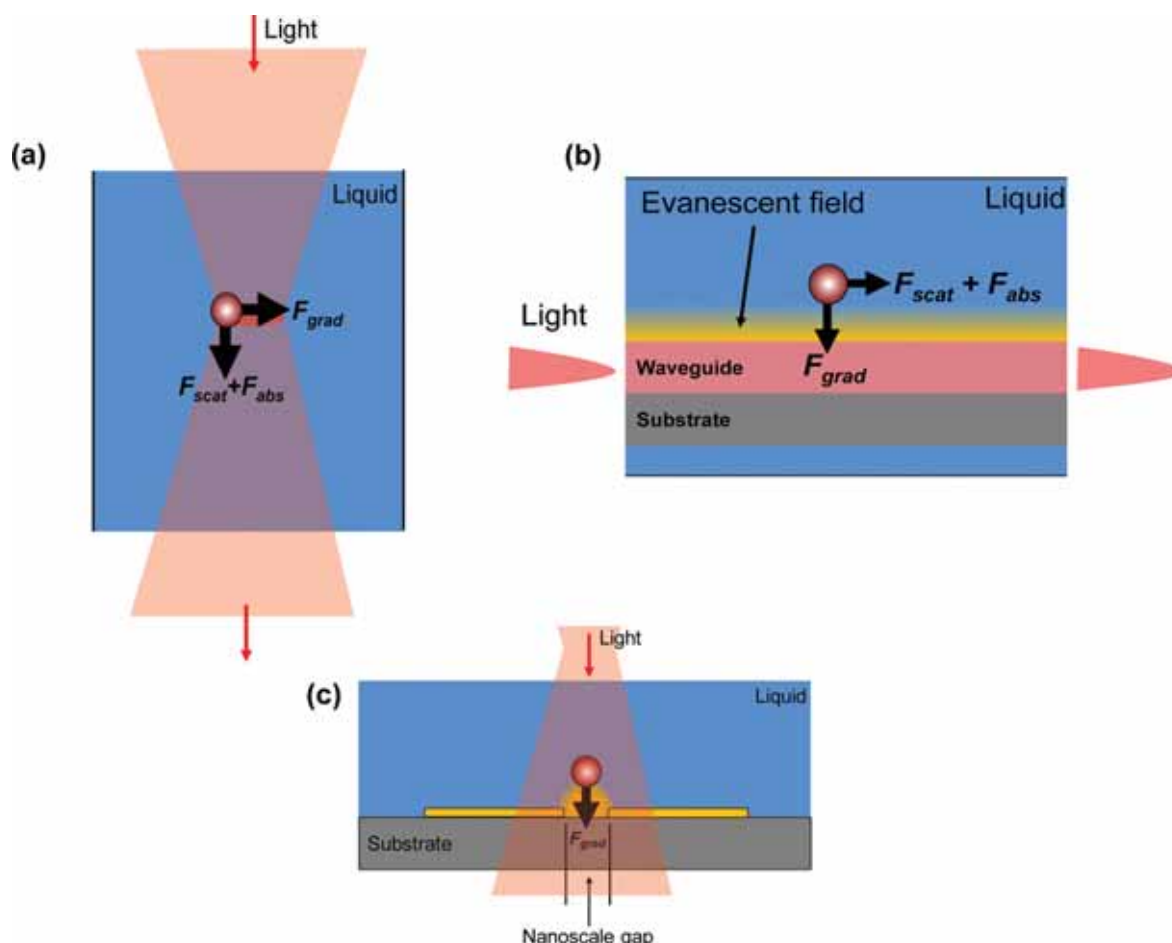


图1-2 光操作悬浮粒子 (a)光镊法 (b)近光操控 (c)通过纳米材料捕获^[26]

光束对粒子的操控作用与粒子的尺寸直接相关。粒子尺寸小于入射的光束时，光束对悬浮粒子的电偶极矩将会驱动着相应的粒子往光束移动的方向前进；当入射光线的波长小于悬浮粒子的时候，光子的能量将直接传递给相应的粒子。因此波长直接影响了其所要操作的粒子尺寸，光束对粒子的操作出现了两个极端：(1)远红外和近红外光线对相对较大尺

寸粒子的操作；（2）等离子操控。

1.2.3 微流光传感系统

光学传感检测主要包括荧光检测、光纤传感、光谱检测等。光学传感具有速度快、精度高、低成本且能够适应应用环境等优点，因此广泛用于工业检测与研究领域。在传统的光学传感器件中，测试样品和传感器在开放的空间进行，然而很多特殊的样品需要在特定的密闭的环境中才能够进行精确的分析测量。基于微流控技术的光流控芯片是完全封闭在微芯片中的，这种封闭性为这种样品的检测提供了很好的解决方案。通过把传感器集成到微流体芯片中，不仅能极大地减少检测样品的消耗量，保护样品，同时能够利用微流控技术完成待测样品的准备、输送、反应、分离、回收等步骤，并进行集成，在整个微芯片内部完成了一个以往需要大型系统的工作。光纤传感作为光学传感中的一个重要方向，利用光纤的尺寸小和导光的效果，能够将光线导入到片上系统，通过在光纤内部制备特殊的光学结构，比如光纤光栅、光子晶体光纤、光纤谐振腔，并将这些微型传感器件封装到微流体芯片内部实现光的耦合和传输，对微流体芯片内部的微量样品进行连续的检测和分析。此外，等离子技术(plasmonic) 等新兴研究领域的出现，也成为了传感的一个重要研究方向。短短十年内，等离子技术得到了快速的发展，传感检测是等离子技术中的非常重要的研究领域。把能够激发等离子的微纳结构封装到微流体芯片里面，能够制造出结构紧凑、实用的传感芯片。由于激发出的等离子对周围的环境非常的敏感，这种敏感的性质能够用来为物理、生物、化学等各个学科的检测分析提供便捷、高灵敏度的传感检测手段^[28]。特别是生物传感方面，密封的光流体芯片能够进行微量样品的快速检测分析，避免了传统的检测方法的复杂，且样品用量大等缺点，对于生化医学研究来说具有非常大的实用价值。

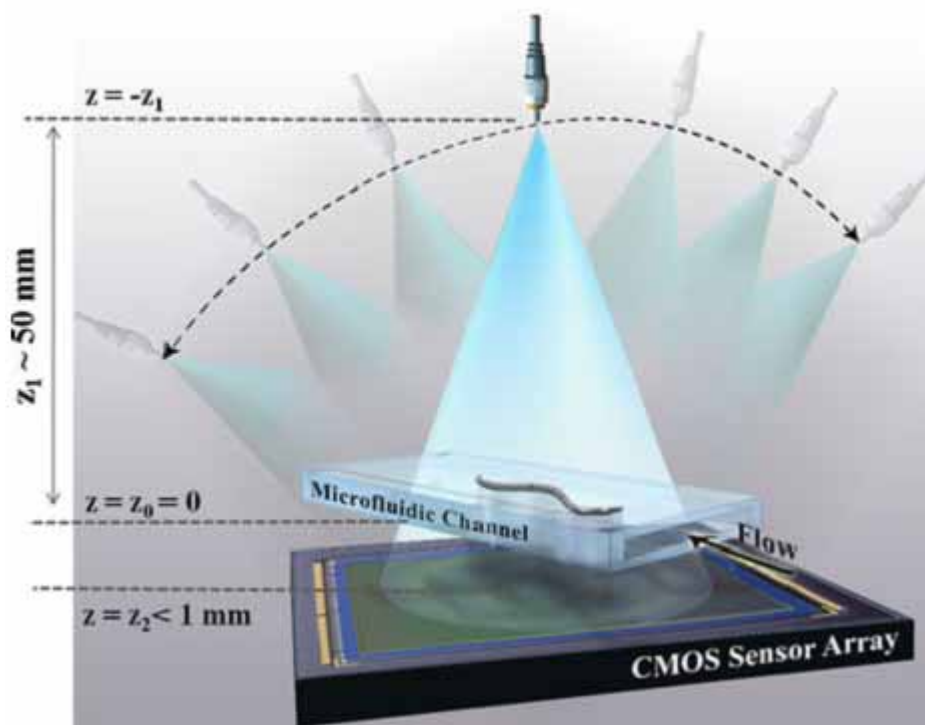
图1-3 光流控生物检测芯片^[28]

图1-3通过在将CMOS传感器件集成到微流控芯片上，微流控通道紧贴传感器，通过外加光束的照射，传感器能够捕获相关的传感信号，经过信号分析，得到所检测样品的信息，并且通过移动检测光束的角度，可以获得检测物的三维全息图像。

1.3 微流控技术可控微透镜研究进展

微机电系统(MEMS)和微流控技术的兴起，使得可调微流控光学微透镜开始崭露头角。在光流体芯片集成中，如何实现对入射光束的精确实时操控成为主要的研究方向。过去的十年内，涌现了很多光流体透镜的设计方法^[24]，用于在微流体芯片里面实现对光束的有效控制，如光束的发散与汇聚，光耦合与分束等。可调节的微流透镜是光流体芯片集成的基础元件，能够在微流体结构里面和其他的检测器件结合，实现对样品的检测、粒子控制和光学成像等。根据其设计原理可以将微透镜分为曲面折射式微透镜与渐变折射率微透镜两大类，本节将对这两种设计的原理、工作性能、研究现状等方面进行介绍。

1.3.1 曲面折射式微流体透镜

透镜对光线的聚焦作用主要是靠光线在透镜表面发生的折射现象。通过改变透镜的折射率或者透镜的表面曲率都能实现对入射光线的偏转效果的调节。其中通过压强控制^[19]、流体力学^[17]、电润湿法^[10-11]等方法可以轻易地改变微透镜表面曲率，进而实现聚焦可调。比较简单的方法是通过改变压力大小来改变容器曲面的曲率，如在聚二甲基硅氧烷(PDMS，折射率约为1.45)胶体形成的微流腔体内控制液体或者气体的压强，可以调节透

镜腔体表面的曲率。另外通过不相溶光滑液体-液体界面或者液-气界面形成的折射率可调节界面，具有光学平滑和易调节的特点，非常适合于可调微透镜的设计。下面对上述三种常见方法分别进行简单介绍。

1 压强控制式光流体透镜

通过压强控制来改变液体折射率界面曲率，可以用于调节液体透镜的焦距，称之为压强控制式微流体透镜。利用液体与空气($n=1$)形成较大的折射率差界面，当折射曲率发生很小的变化时就可以实现明显的焦距变化。宾夕法尼亚州立大学的Tony Huang研究小组提出的一种压强控制式光流体透镜^[16]的设计，原理如图1-4所示。通过光刻技术，器件中紫色虚线框处嵌入了两个独立的微透镜结构：空气($n=1$)液面透镜与PDMS($n=1.45$)透镜。空气密封在微腔中，只要调节注入液体的流速就可以实现空气液体接触面的曲率改变，由于PDMS透镜部分具有固定焦距，整个透镜组合的焦距即可以通过改变微流体通道内部液体流速实现实时调节。如图1-4所示，为了进行芯片内部光线追迹，研究人员设计了一个填充罗丹明B染料溶液的腔体，光束进入该腔体将激发出荧光，图中描绘了汇聚光束在腔体内部传输示意图。通过调节流速，实现了焦距在2mm—13mm的范围内的动态调节。

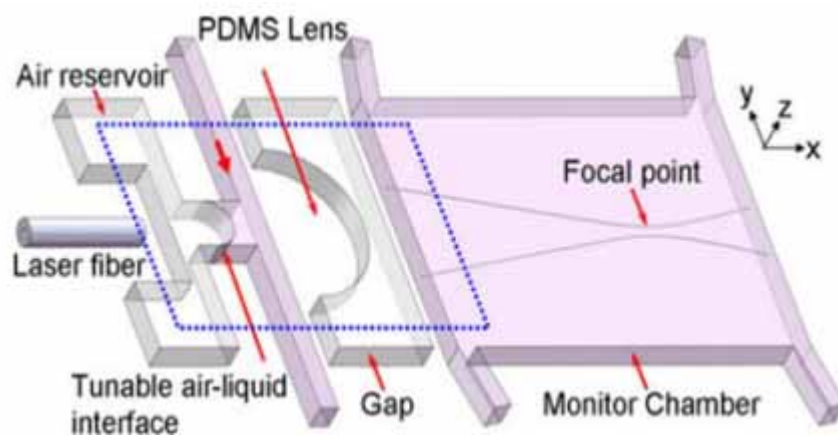


图1-4 流体力学控制式光流体透镜^[19]

2 流体力学控制式光流体透镜

图1-5所示是基于流体力学的层流原理设计的微透镜，控制芯层和两侧包层的流速，实现了双凸透镜，单侧凸透镜，半月形透镜。中心芯层液体采用折射率较高的氯化钙溶液(CaCl_2)，左右两侧的包层采用折射率较低的异丙醇溶液(IPA)。如图所示当 $V_{co} > V_{ctr} = V_{ctl}$ 时，将形成两侧曲率相等的微凸透镜，并且，随着 V_{co} 流速越大，凸透镜的曲率越大，则其焦距越小。(b)图实现了 $V_{ctr} > V_{co} > V_{ctl}$ ，这时的凸透镜的两侧曲率不相同，在特殊情况下，能够出现一面平一面凸的效果。最后当 V_{ctr} 足够大时，弯月形的为液体微透镜将会出现。实验证实，这种刻蚀在MOFS基底上的微流控芯片能够实现灵活多变的调控效果，包括聚焦、扩

束等。

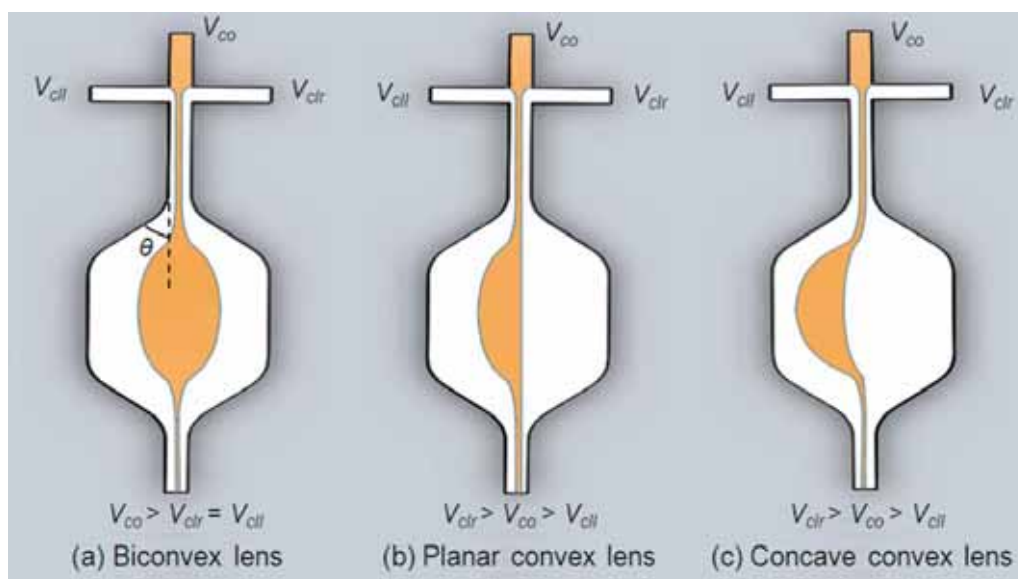


图1-5 流体力学控制的微腔可调微透镜^[30]

3 基于电润湿可控微流体透镜

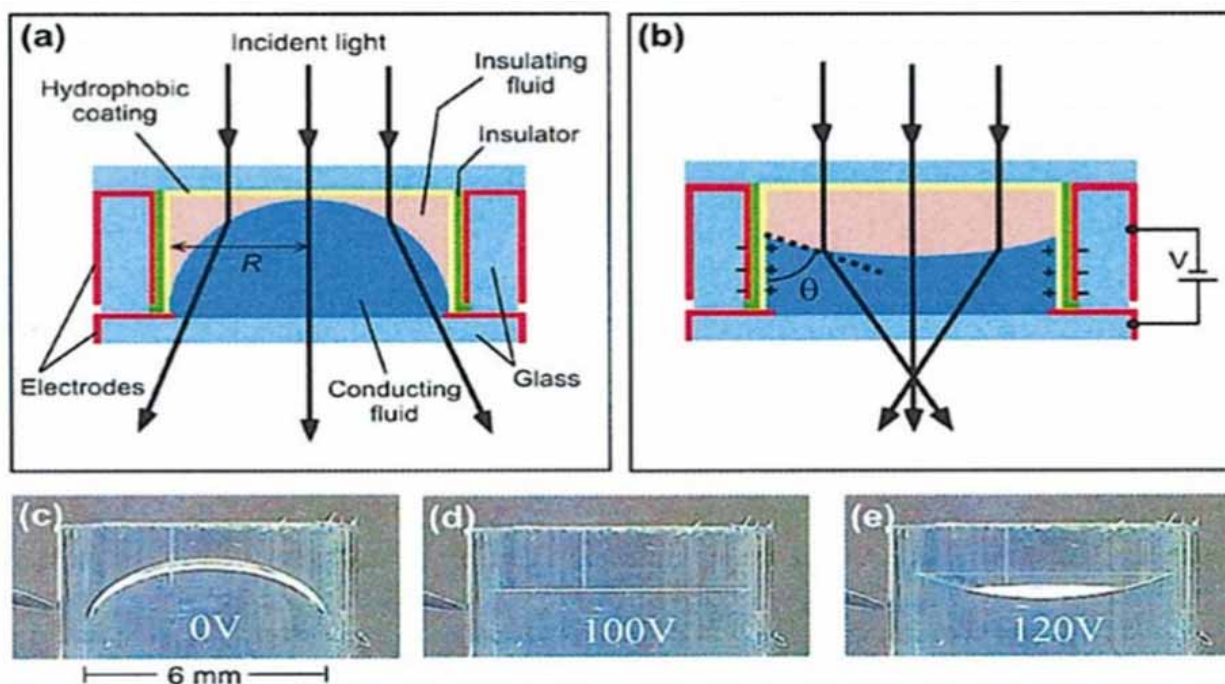


图 1-6 电润湿法可变焦液体微透镜^[14] (a)凹透镜示意图 (b)凸透镜示意图 (c-e)不同电压作用下液体界面变化

电润湿 (Electrowetting, EW) 是指液滴在通有电压的基板上, 由于电场的作用改变了液体的表面张力, 出现了接触角发生变化的效果。使液滴发生形变、位移的现象^[30]。S. Kuiper 用电润湿法实现了可变焦微透镜, 图 1-5 其为剖面示意图。如图(a)所示在柱状腔体内注入相同密度的两种不相溶液体, 其中一种为导电液体 (比如盐水溶液), 另外一种为绝缘材料 (例如非极性液体), 无电压作用下, 由于表面张力的作用, 两者界面为完美球状, 如图

1-5(a) 所示。该状态下液体界面为等效凹透镜。在器件侧面液层处涂上一层绝缘材料，侧面与底部镀上导电 ITO 薄膜。如图 1-5(b)所示，在电场作用下，将在绝缘层处产生电场，降低导电液体与绝缘薄膜的表面张力，从而改变了双液层之间的界面曲率，图 1-5(b)中液层界面曲率符号发生改变，出现等效凸透镜，光束经过折射界面后产生汇聚效果。图 1-5 中(c)、(d)、(d)分别为在 0V、100V、120V 电压下测试液体曲面。

1.3.2 基于可调渐变折射率场的光流体透镜

在渐变折射率(GRIN)光学介质中，光线延折射率渐变的方向缓慢变化，可以实现光束的汇聚和成像。基于介质GRIN良好的聚焦与成像性能的渐变折射率光纤，被广泛用于自聚焦透镜和内窥镜的设计中^[31]。影响折射率变化的因素有很多，比如材料的性质、温度、浓度、环境中的物理场等物理量，因此可以通过调控这些物理量来实现折射率的渐变分布，比如通过控制材料的生成、控制物质扩散等方法实现折射率的径向梯度GRIN分布。在微流体芯片中，液体的折射率分布将变得非常简单，通过将折射率不同的包层、芯层液体注入微腔，在接触界面上出现层流的扩散对流，实现了浓度的渐变分布，由于溶液的浓度直接决定了折射率的大小，这时的折射率分布也是渐变的。因此改变浓度分布是调控液体折射率分布的一个非常有效的方法，通过改变液体的浓度或者替换溶液成分，能够得到超过1的折射率差，这是其他物理调控方法所不能比拟的。宾夕法尼亚州立大学Tony Huang小组将CaCl₂溶液作为芯层，去离子水作为包层通过四个入口注射到微流体芯片里面。其中，在微流体芯片里面两种不同的液体互相扩散形成可调节的GRIN分布，如图1-7所示。图(a)给出了氯化钙溶液与去离子水的流速分别为3.0ul/m、1.8ul/m时，计算流体力学(CFD)仿真液体扩散对流后稳态的浓度分布结果。其中，图(b)中曲线为(a)标出的五条虚线处折射率分布曲线。改变流速，仿真计算出(c)图所示微腔中心位置处的折射率变化及其分布拟合曲线。图(d)给出的结果为在不同流速状态下的光线追迹图样。结果表明，通过控制流速可以实现对扩散对流微腔内折射率分布的调控，从而实现了对入射光线的调控，直接反应在对出射光线焦距的变化上。这种由液体渐变折射率组成的器件称为液体渐变折射率 (L-GRIN)^[9]微透镜。这种器件结构实现了对入射光线的偏转与聚焦效果。

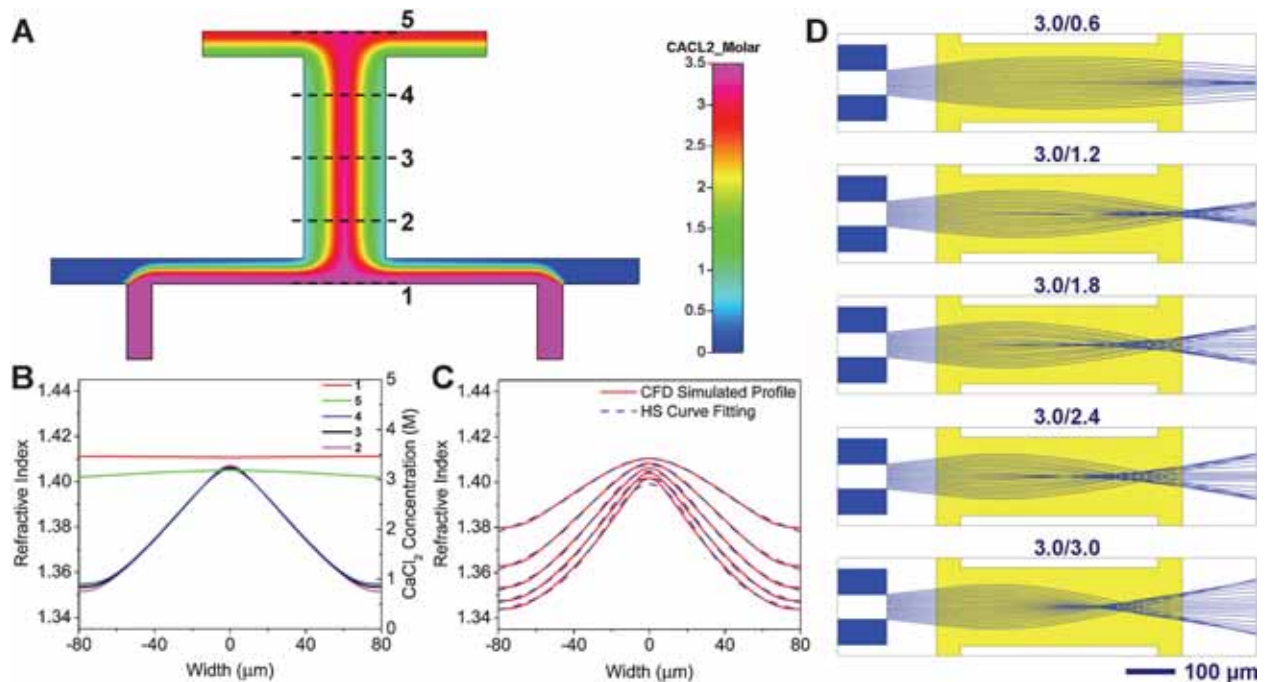


图 1-7：可调渐变折射率微流体透镜^[35](a)CFD 仿真图 (b)不同位置横截面折射率分布 (c)中截线3处在不同条件流速条件下折射率的分布及其拟合曲线 (d)不同流速下入射光线的聚焦效果

1.4 论文的主要内容

第一章 绪论。主要介绍本论文研究项目的背景和国内外研究现状。

第二章 基于流体的对流扩散效应,分析了不同器件/流体因素对流体的折射率分布及光束传输效果的影响。通过有限元方法数值计算,保持 $U_1 = U_2 = U_c$ 且变化从1000pL/s到5000pL/s,微腔中心横截面的折射率分布曲线呈现出由较平滑到尖锐的变化规律。通过控制单侧包层流速 U_1 从500pL/s变化到10000pL/s,同时保持 $U_2 = U_c = 2500$ pL/s,折射率分布中心偏离微腔中轴由-25 μ m变化到28 μ m。当芯层液体采用折射率较低的去离子水,而包层液体选择折射率较高的乙二醇时,得到中心凹陷的折射率分布曲线,这时随着流速的增大折射率分布同样是由平滑到尖锐的变化规律。当包层液体折射率低于芯层液体折射率时,所形成的微流体透镜可以适用于聚焦、光束弯曲等应用中;而当包层液体折射率高于芯层液体折射率时,所形成的微流体透镜可以应用于分光等。本章最后讨论了粘滞阻力对折射率分布的影响。计算表明,考虑粘滞阻力因素,设计的微流体透镜依然能够实现对渐变折射率分布的动态调节功能。利用渐变折射率分布的上述调节功能,可以对透射光束的焦距和出射方向进行动态调节,为后续器件的设计打下理论基础。

第三章 设计了一种动态可调的渐变折射率液体微透镜器件结构,将乙二醇溶液(芯层液体)和去离子水(包层液体)同时注入到透镜腔体中形成渐变折射率分布。本章分析

了影响微透镜折射率分布的最主要因素包括：扩散系数、流体速度、溶液浓度等，比较了各因素对折射率分布及光束输出效果的调控权重。

第四章 设计了一种二维方向可调L-GRIN微透镜,仿真结果显示通过调节上述因素调整透镜的焦距仅仅是其功能之一。当微透镜的液体浓度质量分数在0.05到0.4的时候焦距变化范围是942 μm 到11 μm 。当两层液体无相对滑移同时当流量变化在 $0.5 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 到 $5 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 时,焦距变化为127.1 μm 到8 μm 。这种片上可调系统在集成检测芯片有很大的应用前景。

第五章 综合分析方向可调液体渐变折射率微透镜的一维可调和二维可调的条件。通过设计两种实现一维和二维入射光线方向可调的L-GRIN微透镜,来得到对影响器件设计的主要因素的分析。通过有限元法分析了各自结构的影响因素,对扩散对流的影响,进一步得到了器件的折射率分布,通过光线追迹法得到了入射光线在方向可调的L-GRIN微透镜的传输效果。

第六章 总结和展望。总结了整篇论文的工作,并分析了不足之处,对未来的工作进行了展望。

第2章 基于微流控光学可调谐的渐变折射率特性研究

转换光学^[32]是一种通过调整光学介质介电常数和磁导率的不同分布来改变空间电磁场分布的新方法。利用器件中介质的特定渐变折射率分布可以对光束实现分束、聚焦、准直、耦合^[33,34]等操控功能。传统的渐变折射率器件由固体材料构成，如基于渐变折射率光纤的自聚焦透镜，是一种内部折射率分布沿着径向逐渐减小的柱状透镜，常用于光纤通信和传感系统中。通常固态的渐变折射率分布是利用复杂的离子交换或扩散方法来实现^[35]，并且一旦制作完成，其折射率分布和结构形状均保持固定，无法调节其成像、聚焦和准直等性质。而由液体构成的渐变折射率透镜可以通过调节折射率分布或是调节透镜形状来实现动态光束调节功能^[36]。

目前，研究人员已经研发了多种基于微流控光学波导的器件，例如光学隐形斗篷^[37]和光线弯曲波导^[35]等，其原理主要是通过控制液体流动来实现对光线微观尺度的控制。液体渐变折射率透镜的工作原理是：由于液体的折射率与其浓度分布有关，将折射率不同的液体互相混合，在扩散对流过程处于稳定状态时，混合液体会呈现稳定的浓度分布，通过一定的换算关系，可以获得相应的稳定的折射率分布。通常在基底材料上利用刻蚀技术制作微流体通道，配合以恒流液体装置，从而实现基于扩散对流效应的微流体渐变折射率分布透镜^[38]。已有研究报道光传播方向与液体流动方向相一致的流体渐变折射率透镜^[39,14]，此时可以最大程度地利用扩散与对流过程所形成的渐变折射率分布。然而，在液体扩散与对流过程中，通道的入口和出口区域的折射率分布非常复杂，使得对光束的操控存在极大的不确定性。因此，本文提出了一种新型的流体渐变折射率透镜，其光束传播方向垂直于流体流动方向。这种结构不仅简化了器件制作过程，同时减少了通道入口和出口端的复杂折射率分布对入射光束操控性能的影响。经过有限元法数值计算表明，选择合适的液体种类和浓度，通过控制液体流速，可以实现特定的渐变折射率分布。同时，本文首次分析了通道管壁与流体之间的粘滞阻力对折射率分布的影响，计算结果表明粘滞阻力的存在并不影响流速对流体渐变折射率透镜的决定作用。

2.1 微流渐变折射率理论分析

物质的非稳态扩散问题可以通过Fick第二定律求解，即：

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C \quad (2-1)$$

其中 C 为浓度, D 为扩散系数, t 为时间。方程(1)解释了物质扩散浓度随时间和空间分布的变化关系, 却无法分析液体流动对物质传递的影响, 所以本文主要采用扩散对流方程^[40] :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \nabla^2 C - U \nabla C \quad (2-2)$$

其中 U 表示微沟道中的液体流动的速度, C , D , t 分别表示浓度、扩散系数和时间。右边的第二项代表了液体流动对物质扩散的作用。在一个稳定浓度分布的流体中, 空间浓度不随时间发生变化, 即 $\partial C / \partial t = 0$ 。如图1所示, W 和 H 分别代表微流沟道宽度和高度, L 为微流沟道的长度。流体沿着 x 轴正向流动, y 轴为微流腔的宽度方向, z 轴是微流腔的高度方向。

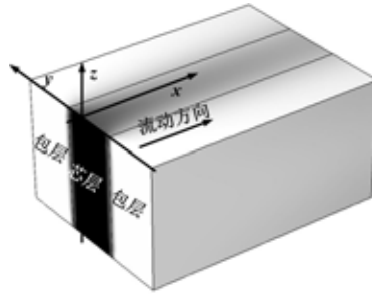


图2-1 直角坐标下的对流扩散模型

当扩散与对流过程保持稳定时, xy 平面上所示结构的偏微分方程可以写成 :

$$D \left(\partial^2 C / \partial x^2 + \partial^2 C / \partial y^2 \right) - U \left(\partial C / \partial x + \partial C / \partial y \right) = 0$$

其级数近似解可以写成^[41] :

$$c'(x', y') = r + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(\pi n r)}{n} \cos(n \pi y') \exp \left[\frac{1}{2} (Pe - \sqrt{Pe^2 + 4n^2 \pi^2}) x' \right] \quad (2-3)$$

其中, $x' = x / L$, $y' = y / W$ 是归一化坐标, $c' = c / C_0$ 是归一化浓度。初始位置边界条件为: $c'|_{x'=0, 0 \leq y' < r} = 1$, $c'|_{x'=0, y'=r} = r$, $c'|_{x'=0, r \leq y' \leq 1} = 0$ 。扩散对流过程达到稳态后的浓度分布可以表示成: $\partial c' / \partial y'|_{x=\infty, 0 \leq y' \leq 1} = 0$, 微腔壁上的溶液浓度的分布为: $\partial c' / \partial y'|_{y'=1} = 0$ 。 Pe 即pecllet number, 用来评价扩散与对流作用程度, 表示为 $Pe = |U| \cdot L / D$, 其中 U 即液体流动速度。在本文所设计的微流控光学微腔中, $U = (U_{core} + U_{clad}) / WH$ 是微腔中的流动速度, 其中 U_{core} 是中心液体的流速, U_{clad} 是包层液体的流速。变量 r 是包层和中心液体的初始归一化边界, 可以由以下方程解出^[42] :

$$\alpha \beta^2 (r-1)^4 + r(r-1)[r^2 + 3r - \alpha(r-1)(r-4)]\beta - r^4 = 0 \quad (2-4)$$

其中, $\alpha = U_{core} / U_{clad}$, $\beta = \mu_{core} / \mu_{clad}$, μ_{core} 和 μ_{clad} 分别表示中心和包层液体的粘滞系数。

由扩散对流方程求解微腔中流体浓度的分布问题, 通常采用有限元法, 通过求解微腔边界条件下的对流扩散过程, 得到芯层液体在微腔中的浓度分布, 进而确定折射率的分布情况。

影响混合液体扩散对流过程的因素很多, 温度、浓度、流速以及微流体种类的选定、器件结构和尺寸都对折射率分布有明显影响。本文参考前人的工作^[14], 选择乙二醇 (ethylene glycol) 作为芯层液体, 去离子水 (de-ionized water) 作为包层液体进行模拟, 它们的折射率分别为1.432和1.332, 芯层液体与包层液体的流体比率决定了充分混合后出口液体的浓度。在有限长的微腔中, 如果流速很高, 混合流体的扩散作用有限, 对流过程占主导地位, 此时混合流体可以近似看成阶跃折射率分布 (垂直于液体流动方向)。流速较低时, 扩散效应在流体混合过程中不足以忽略, 在微腔的横截面方向和流体流动方向都需要考虑扩散效应对浓度梯度分布的影响。芯层液体在包层液体中的扩散过程是实现渐变折射率分布的理论基础, 选择芯层液体和包层液体的流速以及液体种类可以有效控制扩散对流过程, 从而控制液体浓度的空间分布。当微腔的浓度分布确定后, 就可以由以下关系得出折射率的分布^[44]:

$$n(x', y') = c'_{core}(x', y')n_{core} + c'_{clad}(x', y')n_{clad} \quad (2-5)$$

其中 c'_{core} 和 c'_{clad} 分别为单位体积内中心液体的归一化浓度和包层液体的归一化浓度。

n_{core} 和 n_{clad} 分别代表中心液体和包层液体的折射率。由公式(5)可知, 通过混合流体的浓度分布可直接求得其折射率分布。

2.2 结构与流体性质分析

器件结构如图2所示, 扩散对流过程的微腔长度为 $400\mu\text{m}$, 深度为 $100\mu\text{m}$ 。在微腔的左右两端入口处注入包层液体, 其中心入口注入芯层液体, 三入口的宽度皆为 $50\mu\text{m}$ 。流速满足层流状态要求的包层和芯层液体分别注入微腔后, 芯层和包层液体在流经微腔时进行对流扩散作用。

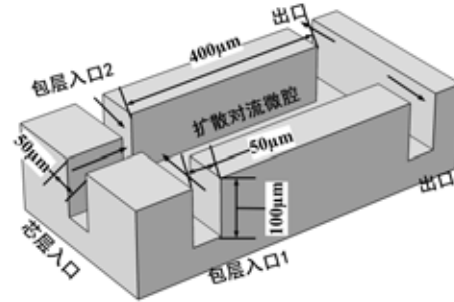


图 2-2 器件结构与尺寸

扩散系数 D 是影响扩散对流过程的重要参数。液体的扩散系数主要取决于液体本身的性质，同时还受温度和浓度影响。不同浓度下的扩散系数通常通过实验测量获得，当乙二醇与去离子水浓度比为0.0250~0.950时，其相应的扩散系数为 $9.28 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s} \sim 1.67 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ [43]。同时，扩散系数受环境温度的影响较大，例如芯层为质量分数为0.8的乙二醇溶液，当温度从 30°C 变化到 50°C 时，扩散系数由 $3.19 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 变化为 $4.63 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ [44]。如前文所述，采用 Pe 数来评价对流扩散的效果，其主要决定因素包括速率流速 U 和扩散系数 D 。

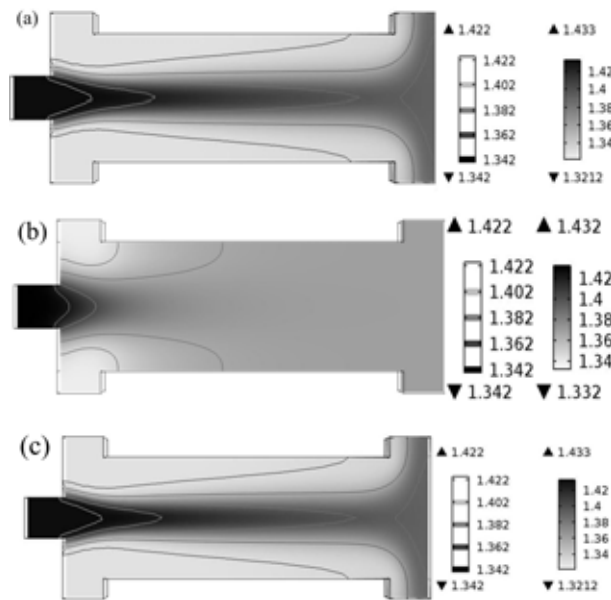


图 2-3 不同扩散系数和流速情况下的折射率分布：(a) $D=1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ， $U_1=U_2=U_c=5000 \text{ pL/s}$ ；(b) $D=1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ， $U_1=U_2=U_c=500 \text{ pL/s}$ ；(c) $D=1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ， $U_1=U_2=U_c=500 \text{ pL/s}$

为了研究 D 和 U 对微腔折射率分布的作用，本文分别计算了不同 D 和 U 条件下微腔内流体的折射率分布。结果如图2-3所示， U_1 ， U_2 和 U_c 分别为图2-3(a)所示的微流腔上包层、下包层和芯层流体的流速。比较图2-3(a)和(b)，当 $D=1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ， $U_1=U_2=U_c$ 分别为

5000 pL/s 和 500 pL/s , 计算结果显示: D 较大时, 如果 U 过小, 会使得微腔中混合流体扩散效应过大, 充分混合后的均匀流体的折射率渐变效果会很小。只有 U 足够大时才会出现明显的渐变折射率分布。同理, 如图 2-3(b) 和 (c), 当 $U_1 = U_2 = U_c = 500$ pL/s , D 分别为 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, U 较小时, 只有 D 足够小时才会出现明显的渐变折射率分布。比较图 2-3(a) 和 (c) , D 分别为 $1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $1 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 时, 调整流速分别为 $U_1 = U_2 = U_c = 5000$ pL/s 和 $U_1 = U_2 = U_c = 500$ pL/s , 这时得到器件中的折射率分布几乎相同。

2.2.1 沿流体流动方向不同横截面处的折射率分布

接下来讨论流体参数确定时, 对流扩散作用对流体折射率分布所起的作用。模拟过程中保持 $U_1 = U_2 = U_c = 2500$ pL/s , 为了避免扩散系数受浓度变化的影响, 采用 20% 乙二醇稀溶液作为芯层液体, 去离子水作为包层液体。此时 D 可以看成常数 $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, 而不影响分析的准确度, 计算结果如图 2-4 所示。

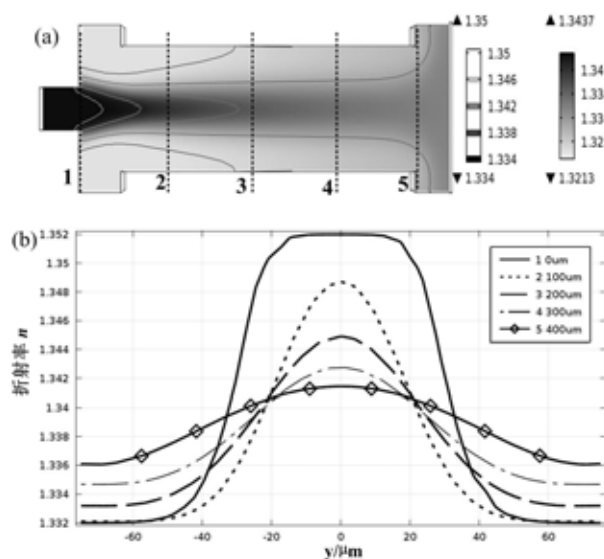


图 2-4 流体条件为 $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$, $U_1 = U_2 = U_c = 2500$ pL/s 时 (a) 器件折射率的纵向截面分布 (b) 距离流体入口不同位置的横截面折射率分布曲线

图 2-4(a) 表示扩散效果在横向与纵向都比较明显情况下的折射率分布, 图 2-4(b) 表示在距离入口不同距离处的横向折射率分布。结果表明在顺着液体的流动方向, 流体的横向折射率渐变分布逐渐趋于平缓。由于在不同位置存在不同的渐变折射率分布, 因此调节光束在微腔的不同位置垂直入射, 可以实现不同的出射效果。

2.2.2 流速对折射率分布的影响

为了研究流速的对折射率分布的影响，要保持其他参量不变。同样选择芯层液体为浓度为20%的乙二醇水溶液，即 $D=1\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ，包层液体为去离子水。如图2-4(a)中曲线3所示，选择微腔的中心位置处横截面的折射率分布作为参考。选择不同的流速，计算结果如图2-5所示。

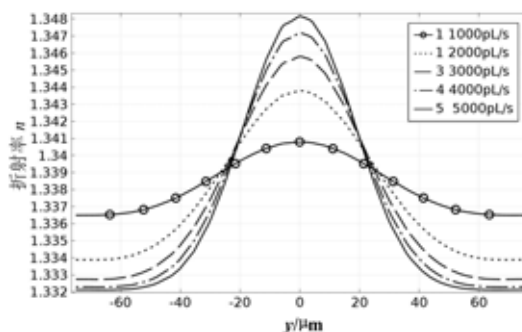
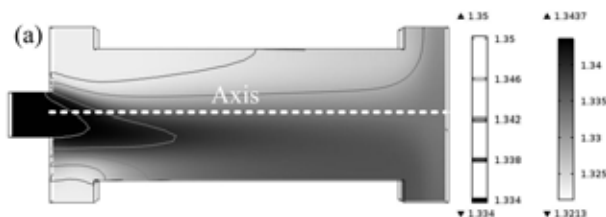


图 2-5 不同流速条件下中心横截面的折射率分布

如图2-5所示，中心截面的渐变折射率在低流速 $U_1 = U_2 = U_c = 1000 \text{ pL/s}$ 时，分布比较平缓。在高流速 $U_1 = U_2 = U = 5000 \text{ pL/s}$ 时，其分布比较尖锐。同时，在流速较高时，折射率曲线的边缘部分并没有芯层液体扩散的效果，这时的渐变折射率分布仅限于器件的中心位置处。由此可知，可以通过调节流速来调控光束轨迹。而且图2-5中的折射率分布与自聚焦透镜的折射率分布相类似，因此，在微观尺度成像方面有很好的应用前景。

2.2.3 中心折射率偏移

上述内容讨论了在两侧包层具有相同流速的情况下，渐变折射率分布关于微腔中心位置对称。接下来讨论保持一侧的包层流速不变，改变另一侧包层流速时，分析微腔内流体的折射率分布的变化。芯层液体同样选择浓度20%的乙二醇溶液，即 $D=1\times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 。光束入射位置选择图2-4(a)中曲线3所示的微腔中心位置，保持 $U_2 = U_c = 2500 \text{ pL/s}$ ，改变 U_1 ，计算结果如图2-6所示。



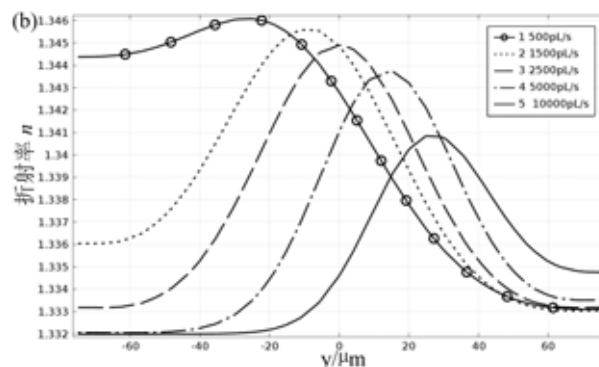


图 2-6 不对称层流作用下的折射率分布 (a) $U_1 = 500 \text{ pL/s}$ 时的截面折射率分布 (b) 单侧包层流速改变对折射率分布的影响

如图2-6(a)所示,在 $U_1 = 500 \text{ pL/s}$, $U_2 = U_c = 2500 \text{ pL/s}$ 时,流体渐变折射率分布的中心位置向下偏移。由图2-6(b)可知,在 U_1 分别为 500 pL/s 、 1500 pL/s 、 2500 pL/s 、 5000 pL/s 和 10000 pL/s 时,渐变折射率分布的中心位置从 $-25 \mu\text{m}$ 变化到 $28 \mu\text{m}$ 。两侧包层流速差别越大,折射率分布的中心位置偏移程度越大。利用折射率分布的这种偏移效果可以实现光束的偏移操控。极端情况下即一侧包层流速为0时,折射率分布会出现单调递减(或递增)的效果,此时可以对光束实现最大程度的偏转。因此可以通过调节单侧包层流速,连续动态地调节光束的偏转效果。

2.2.4 中心凹陷的渐变折射率分布

如上所述,在芯层液体折射率高于包层液体折射率时,微腔中混合流体的渐变折射率分布由芯层向包层逐渐减小。同理,包层液体折射率高于芯层液体折射率时,渐变折射率分布应由芯层向包层逐渐增加。选择包层液体为浓度20%的乙二醇稀溶液,即 $D = 1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$,芯层采用折射率较低的去离子水。同时保持芯层、包层液体流速相等,当同步调整芯层和包层流速大小时,数值分析求得如图7所示的折射率分布。

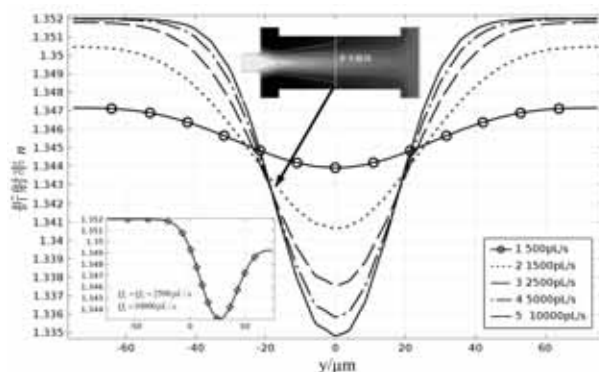


图 2-7 包层折射率高于芯层折射率时的折射率分布随流速的变化

由图2-7可知，在微腔中心横截面上，扩散对流过程达到稳定后，流速越快扩散效果越不明显，折射率曲线越尖锐。流速为1500pL/s时，微腔中流体截面渐变折射率分布如图7中上部嵌入灰度图所示，折射率由微腔中心轴线向两侧包层逐渐增加。这种折射率分布效果，可以应用于分光器件上，同时还能够对分光束实现聚焦。并且可以通过控制流速来调节出射光线的偏转角和焦距。此外，在两侧包层液体流速不同时，流体的渐变折射率中心位置产生偏移。如图2-7左下方嵌入曲线图所示，折射率中心位置向右偏移了 $28\mu\text{m}$ ，此时 $U_1=10000\text{pL/s}$ 、 $U_2=U_c=2500\text{pL/s}$ 。这种偏移效果可以应用于调节光束的分光比。

2.2.5 粘滞阻力对扩散对流过程的影响

为了使得流体流速满足层流条件，流速将受到限制，管壁与流体之间的粘滞阻力是影响器件微腔中流体流速分布的重要因素。因此在分析扩散对流过程所决定的渐变折射率分布时，也需要考虑粘滞阻力的影响因素。计算过程中，为了简化问题，统一采用去离子水的粘滞系数 $\mu=1\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。考虑粘滞阻力因素后，流体的渐变折射率分布如图8所示。

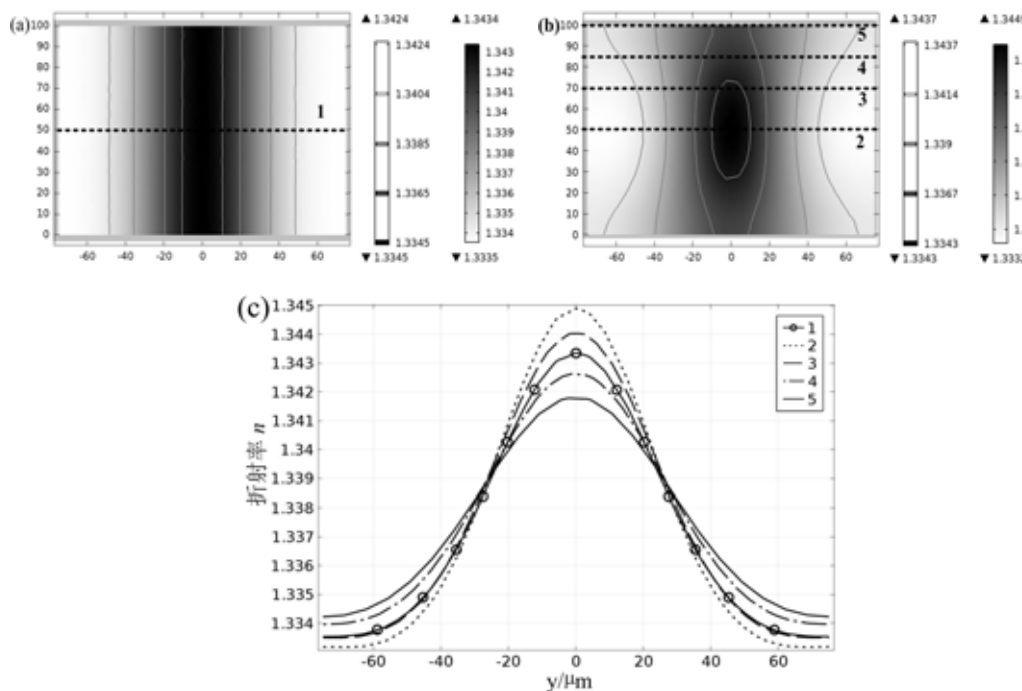


图 2-8 管壁与流体之间的粘滞阻力对折射率分布的影响 (a) 忽略粘滞阻力，微腔中心横截面折射率分布 (b) 考虑粘滞阻力时的微腔中心横截面折射率分布 (c) 距离管壁不同位置处的折射率分布

图2-8表示 $U_1=U_2=U_c=1500\text{pL/s}$ 时微腔中心位置流体的横截面折射率分布。图2-8(a)中忽略管壁与流体之间的粘滞阻力，此时横向渐变折射率呈现一维分布。图82-(b)表示考虑上下管壁(z 轴方向)与流体之间存在粘滞阻力，由于粘滞阻力的影响，管壁附近流体的流

速会减小，越靠近管壁，粘滞阻力对流体减速的效果越明显。流度的降低限制了流体的对流过程，扩散效应得到加强。从图2-8(b)中的折射率等值线可知，靠近上下两侧管壁区域流体的扩散效应明显大于中心区域的流体。图2-8(c)表示对应(a)和(b)几条虚线位置的横向折射率分布。由图2-8(c)可知，在距离管壁 $0\mu\text{m}$ 、 $20\mu\text{m}$ 、 $35\mu\text{m}$ 和 $50\mu\text{m}$ 位置处，y轴中心和边界处的芯层液体的折射率分布受粘滞阻力影响较大，在最小折射率几乎相等的情况下， $0\mu\text{m}$ 处的最大折射率与 $50\mu\text{m}$ 处最大折射率差大约是0.02。由此可知，管壁与流体之间的粘滞阻力确实影响了低流速情况下的渐变折射率分布效果，但粘滞阻力的存在并未改变渐变折射率的整体分布趋势。在考虑粘滞阻力情况时，本文所设计的一维渐变折射率透镜的实际厚度要比理想情况下大。

2.3 小 结

本文基于流体的对流扩散效应，设计了一种可调节的一维渐变折射率透镜。通过有限元方法数值计算，保持 $U_1 = U_2 = U_c$ 且变化从 1000pL/s 到 5000pL/s ，微腔中心横截面的折射率分布曲线呈现出由较平滑到尖锐的变化规律。通过控制单侧包层流速 U_1 从 500pL/s 变化到 10000pL/s ，同时保持 $U_2 = U_c = 2500\text{pL/s}$ ，折射率分布中心偏离微腔中轴由 $-25\mu\text{m}$ 变化到 $28\mu\text{m}$ 。当芯层液体采用折射率较低的去离子水，而包层液体选择折射率较高的乙二醇时，得到中心凹陷的折射率分布曲线，这时随着流速的增大折射率分布同样是由平滑到尖锐的变化规律。当包层液体折射率低于芯层液体折射率时，所形成的微流体透镜可以适用于聚焦、光束弯曲等应用中；而当包层液体折射率高于芯层液体折射率时，所形成的微流体透镜可以应用于分光等。本文最后讨论了粘滞阻力对折射率分布的影响。计算表明，考虑粘滞阻力因素，本文所设计的微流体透镜依然能够实现对渐变折射率分布的动态调节功能。利用渐变折射率分布的上述调节功能，可以对透射光束的焦距和出射方向进行动态调节。综上所述，基于微流控光学的可调型自聚焦透镜为微透镜的制作提供了新的思路，在光束整形以及微流控芯片研究与光束可调性结合的应用中有很好的前景。

第 3 章 片内聚焦动态可调 L-GRIN 微透镜

半月形表面驱动电润湿、半月水凝胶或液压驱动聚二甲硅氧烷(PDMS)膜等几种可调微透镜提供了可调谐的自适应聚焦曲面,但是这些可调微透镜只具有片外聚焦的能力,无法实现片上系统的集成。片内聚焦可调微透镜因其可以与其他片上器件无缝地集成在芯片上,被证明是更具有应用前景的一体化器件。最近,怀特赛兹教授小组开发了一种可动态调节液-液透镜凸形状的微透镜^[45]。微透镜表面由液-液界面控制,通过调整液体的流体力学条件,实现了片内焦距可调。然而,利用液-液透镜界面实现的微透镜需要很高的层流速度来保持该曲面的稳定,这意味着为保证微透镜的稳定持续的工作,必须不间断注入大流量的液体。与基于液-液界面的微透镜相比,L-GRIN 微透镜是通过多个不同折射率的层流的扩散和对流是实现的,而不是依靠一个固定的液-液曲面。因此液体渐变折射率(L-GRIN)微透镜的流速缓慢,经证实其对液体的消耗量比液-液透镜少了 100 多倍。并且 L-GRIN 微透镜是通过动态调整流体条件,而不是通过改变传统的透镜的几何结构来实现折射率渐变的,因此其光学特性实时可调谐、灵活多变。随着微机电系统(MEMS)的发展,L-GRIN 微透镜越来越引起人们的关注。

本节提出了一种能够实现动态调整光束聚焦效果的 L-GRIN 微透镜。通过有限元方法(FEM)模拟将高折射率的乙二醇溶液和较低折射率的去离子水溶液同时注入微腔的浓度分布。液体扩散对流的过程中,形成了腔体中的折射率渐变分布,这种分布决定了透镜的性能。利用光线追迹法,来研究在不同流速条件下,所设计的 L-GRIN 透镜的光学性能。结果表明,改变流体的扩散系数、质量分数和流速可以有效控制调整动态输入光束聚焦包括焦距和焦斑的大小。

3.1 L-GRIN 微透镜的模型与理论

L-GRIN 微透镜的设计如图 1 所示。微透镜的结构如图 3-1(a)所示,由微腔、芯层入口,包层进口和出口组成。芯层液体和包层液体分别注入通过芯层入口和包层入口,分别通过出口流出。 H_{in_core} , W_{in_cor} , H_{in_clad} , W_{in_clad} , H_{out} , W_{out} , 代表芯层入口的高度和宽度以及包层入口和出口的高度和宽度。L-GRIN 透镜的主要部分是一个微型圆柱腔,圆柱腔内的流体的扩散和对流过程将会出现渐变折射率分布。L-GRIN 微透镜的截面设计如图 1(a),入口直径设计为 $50\mu\text{m}$,包层进口的直径设计为 $150\mu\text{m}$ 。乙二醇溶液(芯层液体)与去离子水(DI)(包层液体)同时注入腔体,如图(b)3-1 所示。图 3-1(c)右图的计算结果显示出了 xoy 截

面上轴对称的渐变折射率分布。近轴折射率最大，沿着腔中心轴线方向和垂直轴线方向的折射率分布渐变减小。

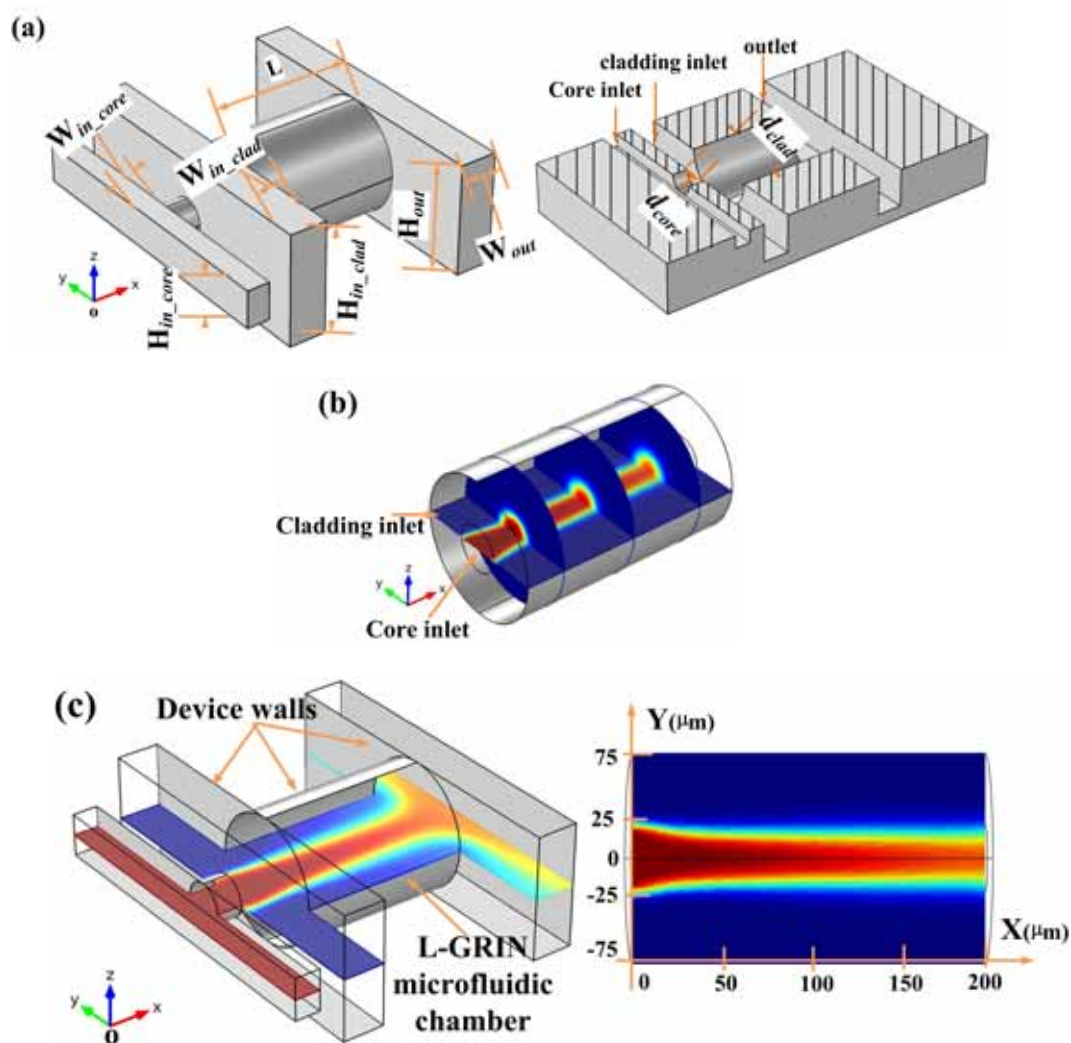


图 3-1 (a) 可调渐变 L-GRIN 微透镜结构图(左图), $H_{in_core}=50\ \mu m$, $W_{in_core}=30\ \mu m$, $H_{in_clad}=150\ \mu m$, $W_{in_clad}=50\ \mu m$, $H_{out}=150\ \mu m$, $W_{out}=50\ \mu m$. xoy 截面剖面图(右图), in which $d_{core}=50\ \mu m$, $d_{clad}=150\ \mu m$; (b) 器件简化模型(c) 器件中的扩散对流效果(左图), 折射率截面分布图 (右图)

采用有限元法(FEM)和光线追迹法来模拟和优化参数。器件的折射率分布可以通过模拟和计算两相流体扩散和对流过程稳定后在微腔中的浓度获得。当流体的折射率主要受扩散的影响时, 这个过程同样可以用方程(2-1)来描述, 由参数 C 是溶液浓度, T 为扩散时间, D 代表了扩散系数确定芯层液体和包层之间的扩散状态。如方程(2-1)所示, 溶液浓度随时间和空间变化。在微腔内, 流体的扩散和对流影响了 L-GRIN 透镜的折射率分布, 对流扩散过程因此进一步变换为方程(2-2)。 $U = (Q_{core} + Q_{clad}) / R^2 \pi$ 代表腔体的流体速度, Q_{core} 和 Q_{clad} 分布代表芯层和包层的流速, R 为包层流体的直径。

因为扩散对流过程的决定性因素包括流体平均速度 U 和扩散系数 D ，而扩散系数又受浓度 C 和温度 T 的影响，因此改变流体平均速度 U 、浓度以及温度，会对 L-GRIN 微透镜的性能有很重要的调节作用。例如，乙二醇溶液中的质量分数由 0.025 变为 0.95 时，去离子水和乙二醇之间的扩散系数从 $3.75 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 变为 $1.17 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[20]。另外，乙二醇质量分数为 0.8 不变，当温度变化从 30°C 到 50°C 时，液体的扩散系数从 $3.15 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 变为 $6.45 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ ^[21]。因此在假定液体的温度不变的前提下，液体的扩散系数 D 、浓度 C 和平均速度 U 将是扩散对流过程的主要影响因素，其直接决定了 L-GRIN 微透镜的聚焦性能。假设将去离子水和乙二醇溶液分别选为包层和芯心液体，并且假定包层芯层液体流速相同无相对滑移进行计算。结果显示，低流速下可以实现有效的焦距调节，高流速可以实现焦斑大小的调节。因此，焦距和输出光束的焦斑可以通过调节流体的速度来实现。

3.2 仿真与讨论

L-GRIN 微透镜的主要影响因素包括 1 液体浓度 C 、2 溶液的质量分数、3 芯层和包层的流速。下面我们分别分析各因素对器件性能的影响。

3.2.1 L-GRIN 微透镜的渐变折射率分布调节

为了形成扩散对流效果，高折射率的乙二醇($n_{\text{core}}=1.432$)和低折射率的去离子水($n_{\text{clad}}=1.332$)将沿着同一个方向注入到所设计的 L-GRIN 微腔中。从芯层和包层液体注入到微腔开始，扩散对流过程便开始发生，这里的 U 和 D 将是确定的值。并且这个初速度可以用公式 $U = (Q_{\text{core}} + Q_{\text{clad}}) / R^2 \pi$ 来计算得到。考虑到包层截面的面积是芯层面积的 8 倍，为了保持芯层和包层液体无相对滑移，模拟的过程同样采用 $Q_{\text{clad}} / Q_{\text{core}} = 8$ 。为了说明扩散系数 D 对折算率分布影响的重要性，这里给出了在不同扩散系数下的 xoy 截面折射率分布图。图 3-2(a)、(b)分别代表着扩散系数分别为 $D=1 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ 和 $D=4 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

如图 3-2 所示，扩散系数较大的模拟结果沿着横向纵向的扩散效果很明显，相反扩散系数较小的折射率分布渐变效果并不明显。这说明，扩散系数是一个非常有效的控制渐变折射率分布的手段，这样也直接影响了 L-GRIN 微透镜的性能。由于环境温度的变化，对液体扩散系数将产生很大的影响，因此扩散系数的调节可以通过改变液体温度来实现。

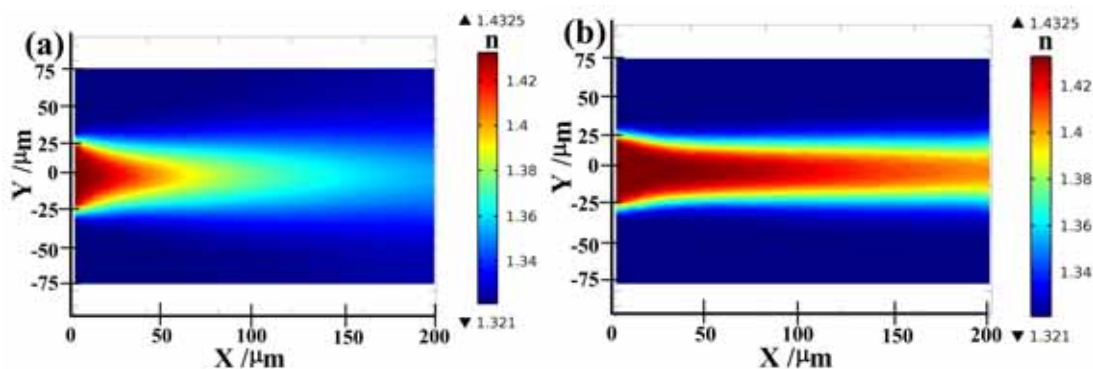


图 3-2 不同扩散系数下的折算率分布截面(溶液的质量分数为 0.3, $Q_{clad}=8Q_{core}=8\times 10^3$ pL/s)

(a) $D=1\times 10^{-9}$ m²/s; (b) $D=4\times 10^{-10}$ m²/s

3.2.2 焦距的调控

由第二章分析可知, 流速较低的芯层和包层液体将产生较强的扩散效应, 而液体的扩散过程的影响因素有扩散系数 D 、流速 U 和浓度 C 。因此, 对 L-GRIN 透镜的焦距调控, 可以通过改变液体的浓度和流量以及乙二醇溶液的质量分数来实现。

(1) 溶液质量分数的影响

由于溶液的浓度将直接影响扩散系数, 而扩散系数的变化会影响到 L-GRIN 微透镜的折射率变化。在微腔中扩散对流过程中, 沿着流动方向扩散的效果越来越明显。然而, 这种扩散导致在不同位置的液体浓度将不同, 这种浓度的变化将直接反应在每个位置的扩散系数上, 因此扩散系数在整个过程中也并不是恒定不变的。这种现象在浓溶液中尤为突出。目前为止, 该现象的变化规律还没有一个确切的表达式能够描述。因此, 为了简化计算的复杂度, 本节采用浓度不是很高的溶液(质量分数为 0.05 到 0.4 的乙二醇溶液), 在扩散对流的过程中采用恒定的扩散系数 D 来进行仿真。不同浓度的液体采用不同的扩散系数来描述扩散系数的规律。同样为了保持芯层和包层液体无相对滑移, 使得 $Q_{core}=1\times 10^3$ pL/s, $Q_{clad}=8\times 10^3$ pL/s 且为恒定数值。模拟的质量分数从 0.05 到 0.4 以 0.05 为步长变化进行多次仿真。图 3-3(a)给出了质量分数为 0.2 的乙二醇溶液在微腔中的折射率分布。图 3-3(b)分别选取五个不同位置处的横截面折射率分布作比较, 其距离入口的位置分别是 50 μm, 100 μm, 150 μm, 200 μm 和 250 μm, 计算结果显示, 折射率中心部分尖锐程度随着芯层液体的质量分数的增加而增加。采用光线追迹法仿真的入射光经过器件的输出效果如图 3-3(c)所示。通过调整的质量分数所调整的焦距的结果变形趋势如图 3-3(d)所示。

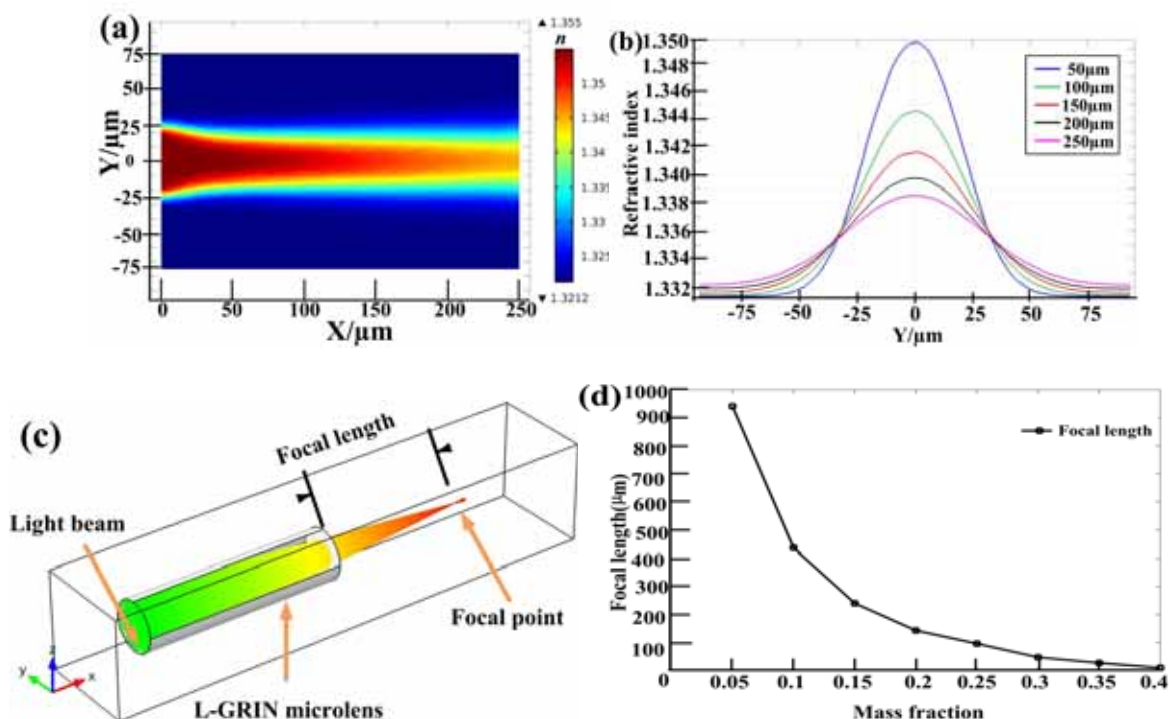


图 3-3 (a)质量分数为 0.2 的溶液 xoy 截面折射率分布 (b)距离入口不同位置处的折射率分布 ($x = 50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ and $250 \mu\text{m}$), $Q_{\text{core}}=1 \times 10^3 \text{ pL/s}$, $Q_{\text{clad}}=8 \times 10^3 \text{ pL/s}$ (c) 光纤传输与聚焦的过程 (d) 焦距随着溶液质量分数变化的规律

仿真结果显示, 质量分数变化从 0.05 增加到 0.4 的过程中, 焦距的变化从 $942 \mu\text{m}$ 减小到 $11 \mu\text{m}$ 。计算结果足以说明质量分数的变化, 是控制焦距的重要因素。

3.2.3 流速的变化

正如上述结果所示溶液的质量分数是调节焦距的有效手段, 接下来讨论流速对焦距的影响。为了便于比较流速对折射率分布的影响, 采用乙二醇作为芯层液体, 去离子水为包层液体, 以两相流体无相对滑动为前提沿着同一方向注入微流腔中。流速从 $0.5 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 变为 $5 \times 10^3 \text{ pL/s}$, 假定扩散系数 $D = 8 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$, 粘滞系数 $\mu = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 并且质量分数为定值 0.3, 仿真不同流速情况下微腔的折射率分布以及对入射光线的聚焦效果。

流速的变化为 $0.5 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 到 $5 \times 10^3 \text{ pL/s}$, 步长间隔为 $0.5 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 。仿真结果显示, 扩散系数不变的情况下, 通过调节流速能够实现对折射率分布的调控。这种调控通过光线追迹法的计算, 体现在对焦距的调控上。图 3-4(a)给出了流速为 $4 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 的纵截面的折射率分布。图 3-4(b)给出了横截面沿着液体流动方向上不同的折射率分布, 其位置分别为 $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ 和 $250 \mu\text{m}$ 。光线追迹的效果和流速对焦距的影响分别如图 3-4(c)、(d)所示。

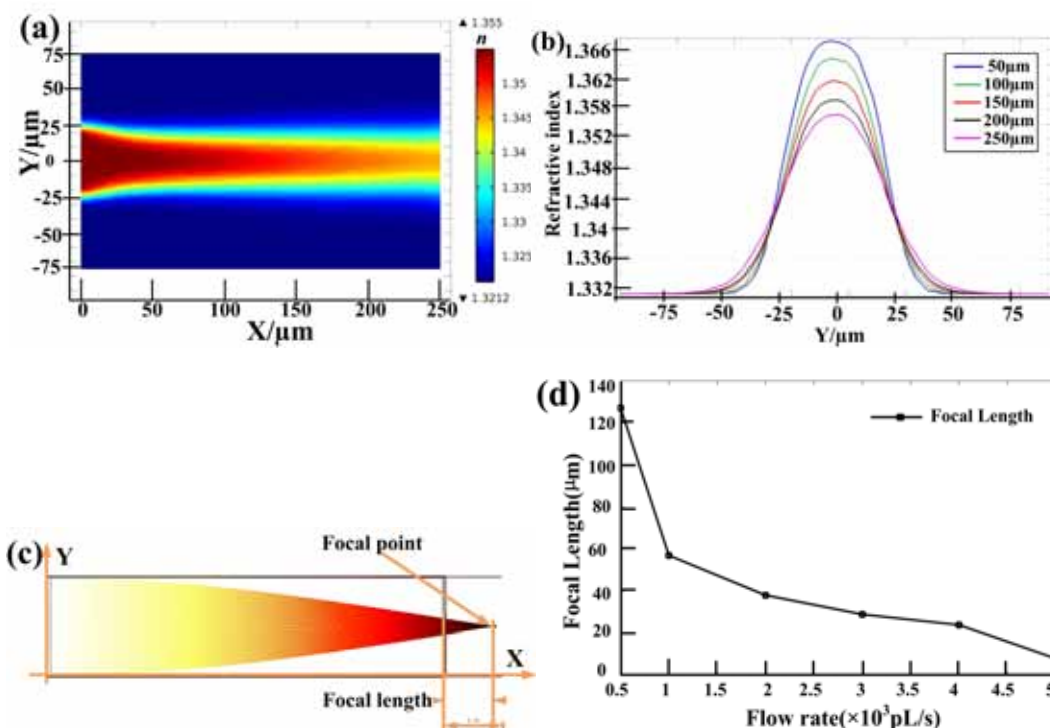


图 3-4 (a)流速为 $4 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 时,纵截面的折射率分布 (b) 不同截面处的折射率分布($x = 50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ and $250 \mu\text{m}$) , $Q_{\text{clad}}=8 \times 10^3 \text{ pL/s}$, $Q_{\text{core}}=1 \times 10^3 \text{ pL/s}$. (c)光线的传输与聚焦过程 (d) 不同流速下的焦点变化

3.2.4 L-GRIN 对焦斑的调节

在平均流速和芯层流速足够高的情况下, L-GRIN 微腔中心流速两相流体并没有足够的时间扩散。这时腔内的折射率分布将会有一种特殊的现象,即中心区域的折射率保持最高并且为恒定值。这种情况下,中心区域的折射率不会对入射光线有有效的聚焦作用。这时的入射光线通过 L-GRIN 微透镜的折射率不变的中心区域时,伴随着边缘的渐变折射率的聚焦作用,将产生一个较大的出射光线焦斑。本节主要分析这种复杂的折射率分布对光线焦斑的影响,包括流速足够高且两相流体无相对滑移和流速相对较低且两相流体有相对滑移两种情况。为了控制可变因素,保持包层流速不变为 $40 \times 10^3 \text{ pL/s}$,芯层的流速变化从 $2 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 到 $50 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 步长为 $5 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 。图 3-5(a)显示了芯层流速为 $25 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 时, L-GRIN 微透镜 xoy 纵截面的折射率分布。图 3-5(b)展示了沿着液体流动方向的不同横截面的折射率分布情况,位置分别为 $x = 50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$ 和 $250 \mu\text{m}$ 。仿真结果显示,沿着液体流动方向折射率几乎不发生变化,这验证了前面的假设。在芯层流速保持 $Q_{\text{core}}=25 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 不变时,图 3-5(b)给出了中心折射率不变的区域宽度为 $24 \mu\text{m}$ 。这个折射率不变的区域半径直接决定了出射光线的焦斑半径。渐变折射率分布曲线的半高宽和中心区域的宽度与芯层流速有直接关系。边界的扩散区域与芯层折射率不变的区域共同决定

了折射率分布，从而调控焦距与焦斑的状态。同时发现，当芯层流速大于 $10 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 时，流速对焦斑和焦距的调节也变得缓慢。因此，在此范围内可以有效控制焦斑的大小。

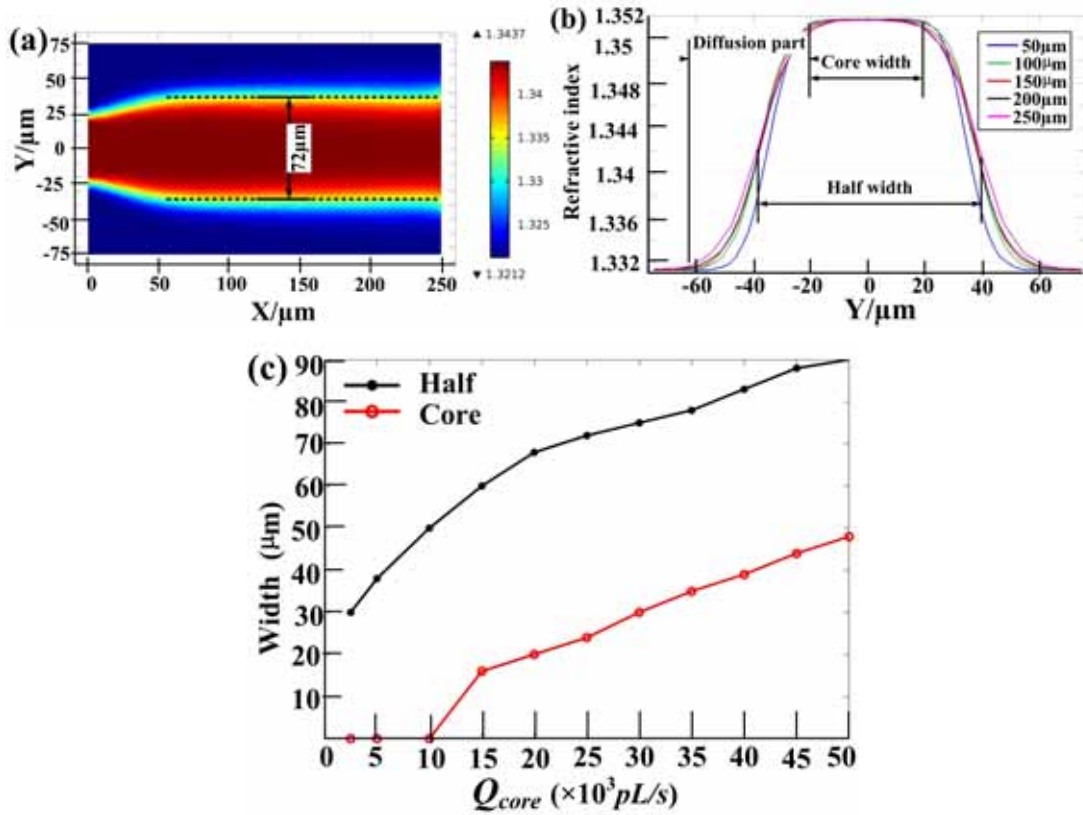


图 3-5 (a)xoy 截面的折射率分布, $Q_{\text{core}}=25 \times 10^3 \text{ pL/s}$ (b)不同截面处的折射率分布($x = 50 \mu\text{m}, 100 \mu\text{m}, 150 \mu\text{m}, 200 \mu\text{m}$ and $250 \mu\text{m}$) $Q_{\text{core}}=25 \times 10^3 \text{ pL/s}$ (c)不同 Q_{core} ，半高宽与中心的宽度

为了准确分析图 3-5(b)所展示的 yoz 折射率分布，采用六级多项式作为拟合曲线。由图 3-5(b)可以看出，入射和出口的折射率分布并没有明显的变化。这个折射率分布可以表达为：

$$n = 1.1 \times 10^{-12} s^6 - 2.2 \times 10^{-13} s^5 - 6.45 \times 10^{-9} s^4 - 2.73 \times 10^{-10} s^3 + 3.62 \times 10^{-6} s^2 + 1.99 \times 10^{-6} s + 1.3533$$

这里 $s = \sqrt{y^2 + z^2}$ ，图 3-6(a)给出了模拟的数据和拟合的曲线。通过光线追迹法，模拟了入射光线经过器件的过程和聚焦效果。结果显示焦斑大小为 $23.5 \mu\text{m}$ ，焦距为 $235.3 \mu\text{m}$ 。这种可以调整焦斑大小的能力在片上聚焦以及检测系统有着十分重要的应用。

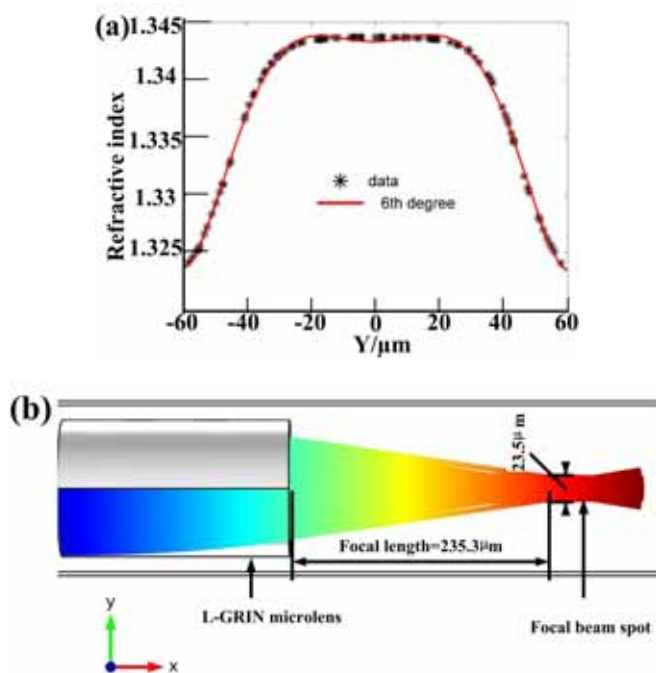


图 3-6 (a) $x=125\mu\text{m}$ 处, $Q_{\text{core}}=2.5\times 10^4\text{ pL/s}$, $Q_{\text{core}}=4\times 10^4\text{ pL/s}$.拟合曲线和 6 阶拟合曲线 (b) 光线传输与聚焦过程

3.3 小结

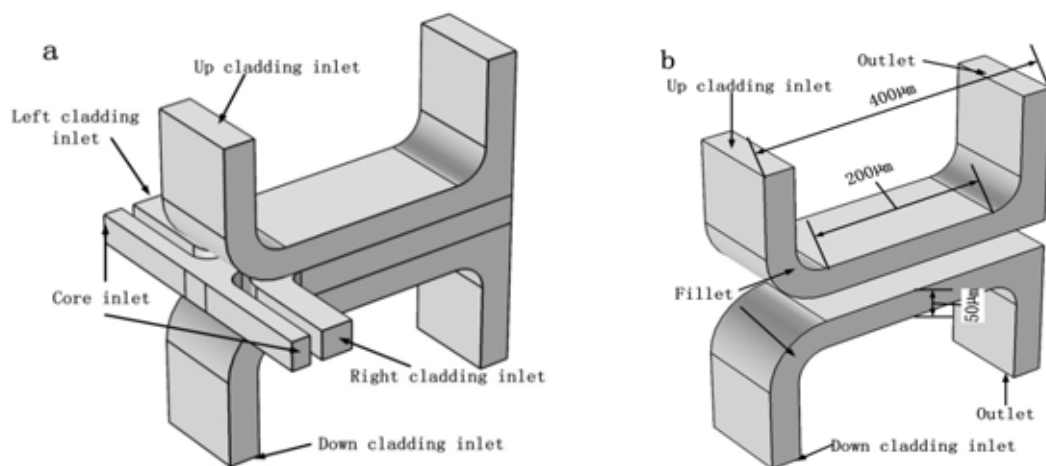
本章设计了一种 L-GRIN 微透镜, 可以实现片内二维光束动态聚焦。通过模拟两相流体的扩散系数 D 、质量分数和流速 U 对透镜折射率分布的影响, 以及通过光线追迹法模拟 L-GRIN 透镜的聚焦过程, 研究了各种因素对 L-GRIN 微透镜的光学特性的影响。结果显示调控乙二醇的质量分数和两种液体的流速是改变输出光束的焦距的有效方法: 当质量分数从 0.05 提升到 0.4 的过程中, 焦距从 $942\mu\text{m}$ 减小到 $11\mu\text{m}$; 当保持流速不变时, 通过将芯层流速从 $0.5\times 10^3\text{ pL/s}$ 增加至 $5\times 10^3\text{ pL/s}$, 微透镜焦距变化从 $127.1\mu\text{m}$ 降至 $8\mu\text{m}$ 。并且, 当保持包层流速较大时, 通过增加芯层的流速可以有效调整出射焦斑的大小。这种灵活可调的性能, 在片上检测以及光学系统中有非常重要的运用。

第4章 基于微流控光学的二维方向可调谐渐变折射率研究

本章所提出的基于液体渐变折射率(L-GRIN)微透镜的折射率分布能够实现片上系统(lab-on-a-chip)的二维光线聚焦与偏转。首先通过有限元法(FEM)可以准确模拟芯层和包层在L-GRIN微透镜中的扩散对流过程。通过调整左侧包层入口流量(Q_{left})和右侧包层入口的流量(Q_{right}) Q_{right}/Q_{left} 的比率,以及上下两侧的流速比率 Q_{up}/Q_{down} ,可以实现光线在焦点方向连续可调。传统微透镜的工作原理是,入射光线经过有曲率的透镜表面发生折射,从而实现了光线的弯曲与聚焦过程,这种透镜无法实现光束聚焦的自由偏转,并且一旦透镜制作完成便无法实现对焦距或焦斑的实时调控,而L-GRIN微透镜不仅可以通过对流体操控实现输出光束的实时可调,并且其调控效果在片上系统有着很好的优势。本章通过对微流体两相流体上下左右各个方向的调控,把这种优势扩展到不仅体现在对焦距焦斑的控制,更重要的是体现在二维输出面上任意方向的聚焦。

4.1 理论与器件设计

为了使器件实现在二维平面上聚焦的偏转,器件中心折射率的方向也需要实现二维方向的偏转。为了实现调控的最大化,本章设计了具有上下左右四个方向入口的器件结构作为分析二维光束可调的L-GRIN微透镜折射率分布的研究对象。如图4-1所示器件的结构及尺寸大小,包层液体分为上下左右四个入口,这四个入口相互独立,能够控制各自的流速。芯层液体有两个方向在入口汇聚,然后进入扩散对流微腔。上下包层的流速可以表示为 Q_{up} 、 Q_{down} ,能够实现中心折射率的上下偏移。左右包层的流速分别表示为 Q_{left} 、 Q_{right} ,能够实现中心折射率的上下偏移。这四个方向的协调控制能够实现中心折射率在围墙内任意偏转,这是保证中心折射率灵活可调的基础。



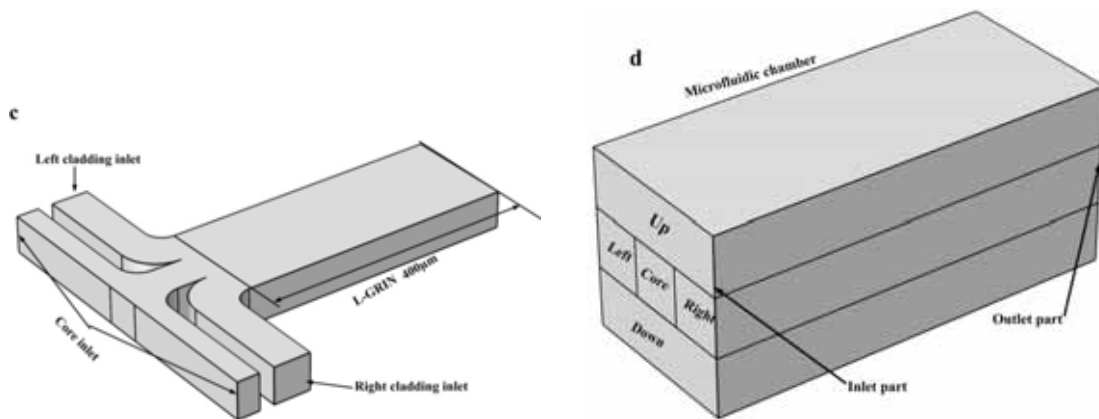


图 4-1 器件的结构 (a)器件的外观设计 (b)上、下包层入口及微腔 (c)左右包层及芯层入口(d)包层与芯层液体扩散对流的微腔

同样以 Fick 第二定律作为理论基础如公式(2-1)所示，结合流速分析扩散对流方程，通过有限元法(FEM)能够有效模拟边界条件下的偏微分方程问题。通过结合边界条件，分析其扩散对流效果在微腔空间中的分布。通过公式(2-4)，得到浓度与折射率分布的关系，微腔中的折射率分布如图 4-2 所示，然后通过光线追迹法研究入射光线经过透镜后的效果，得知其输出光线的焦距与焦斑。

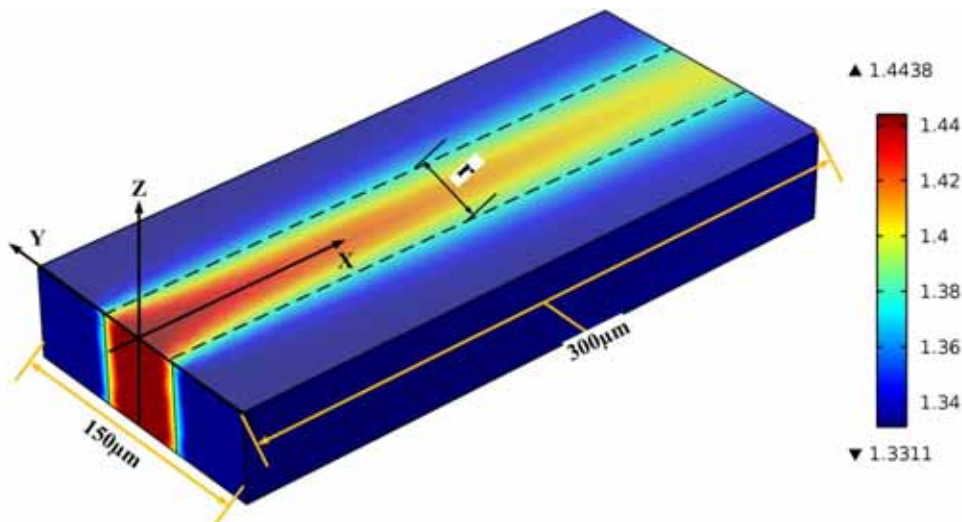


图 4-2 模型的直角坐标系以及微腔的尺寸与简单的扩散效果

4.2 计算与分析

4.2.1 扩散对流在器件中的简单分析

本章同样选择去离子水(deionized water)和乙二醇(ethylene glycol)分别作为包层液体和芯层液体,这两种液体已经被实验证实能够很好实现在微腔中的扩散对流过程并且取得较好的实验效果^[19]。扩散对流的影响因素主要有扩散系数 D ，微腔中的流速 U ，以及溶液的质量分数。乙二醇溶液在去离子水中的扩散系数受到浓度变化的影响，浓度越大扩散系数

越大,在扩散对流过程中的各部分浓度不相同,因此各部分的扩散系数也是不同的。这种现象使得准确计算其浓度分布变得十分困难。但是,当质量分数较低时,其扩散系数变化并不大,因此采用稀溶液分析其扩散对流过程,可以将扩散系数看作是常数。此外,环境温度对扩散系数的影响也是不能忽略的,因此,模拟的时候采用理想的情况,将稀溶液的扩散系数设为常数 $8 \times 10^{-10} m^2/s$ 。如图 4-1 所示, Q_{up} 、 Q_{down} 、 Q_{right} 和 Q_{left} 分别代表上下左右包层液体的流速, Q_{core} 表示芯层流速。

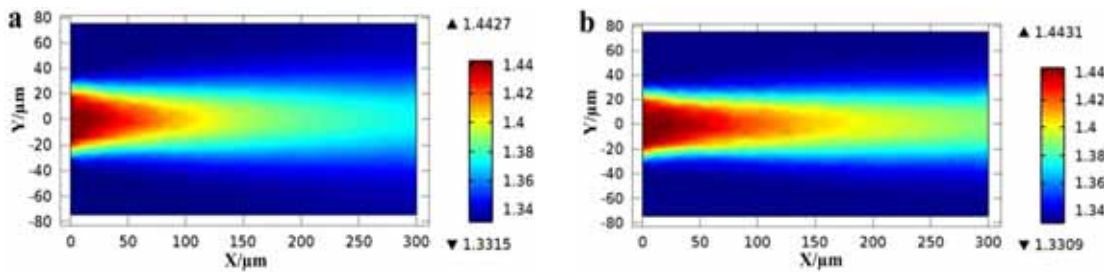


图 4-3.流速相同扩散系数不同折射率分布截面图

图 4-3 显示了质量分数同为 0.8 的乙二醇溶液扩散系数分别为 $60^\circ C$ 时的 $8 \times 10^{-10} m^2/s$ 和 $30^\circ C$ 时的 $3 \times 10^{-10} m^2/s$, 温度为 $60^\circ C$ 和 $30^\circ C$ 时,微透镜截面折射率分布。可以看出(a)图扩散效果非常明显,(b)图的对流效果比较明显。这说明扩散系数对折射率分布有很大的影响,并且温度对折射率分布的影响是不容忽略的。为了便于讨论,后面的模拟采用扩散系数恒定为 $D = 4 \times 10^{-10} m^2/s$ 。

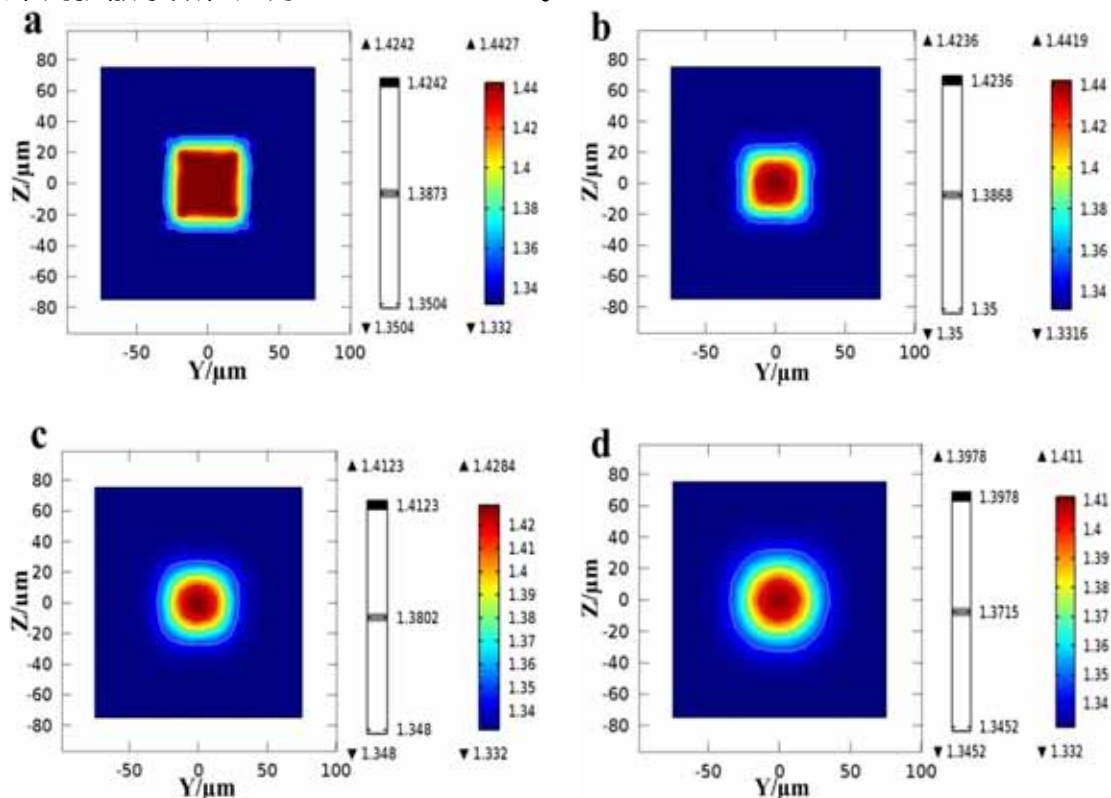
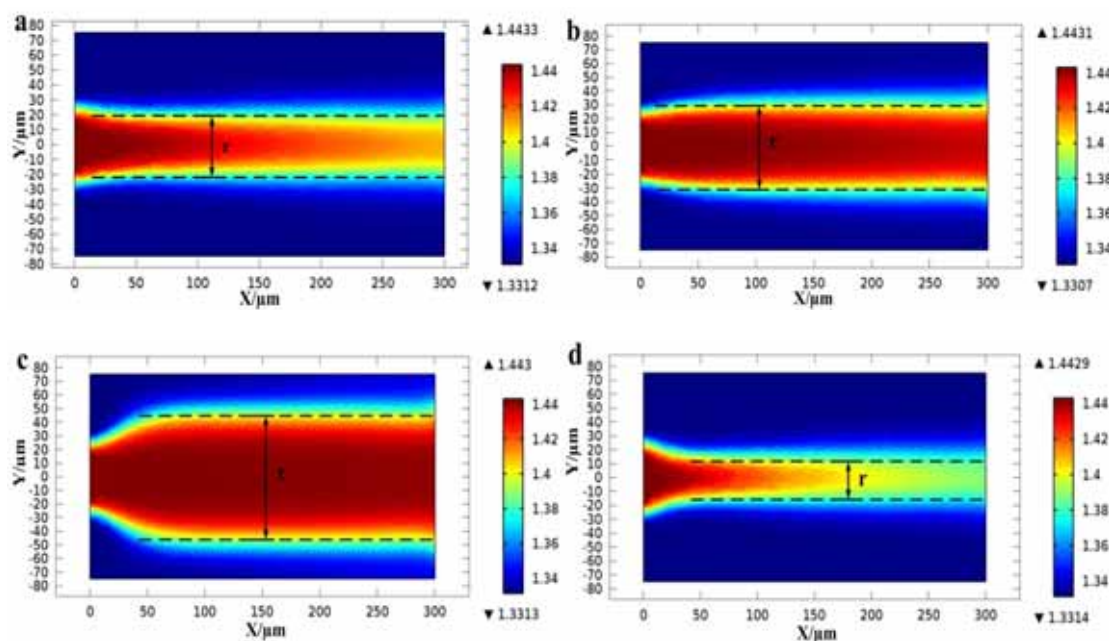


图 4-4 扩散对流微腔很截面的折射率分布图 x 方向分别为 (a) $0 \mu m$, (b) $50 \mu m$, (c) $150 \mu m$, (d) $250 \mu m$

芯层液体有较高的折射率,在扩散对流腔中的折射率分布随着扩散的进行,沿着流体的方向截面折射率分布有明显的扩散效果。图 4-4(a)显示了 $x=50\mu\text{m}$ 入口处的折射率分布,扩散效果不明显,这时的芯层液体呈现完全没有扩散效果的阶跃型分布,和入口的形状一样是矩形截面。图 4-4b 显示了 $x=150\mu\text{m}$ 处的折射率分布。这时的扩散效果已经明显,但是中心的折射率分布还是有明显的矩形截面分布。图 4-4(c)、(d)随着扩散的进一步进行,初始的芯层液体的矩形截面已经不明显。图 4-4(d)已经可以明显看出,在器件的末端,其折射率分布呈现圆形的截面。这充分说明通过矩形的微沟槽即可以达到圆形沟槽的效果,这种效果能够有效减小芯片的制作难度,并且不管对于矩形截面入射光还是圆形截面入射光来说都能够在出射端得到聚焦的效果。为了得到包层和芯层流程的相对无滑移效果,根据截面的计算,设置 $Q_{\text{core}} = Q_{\text{right}} = Q_{\text{left}} = 5 \times 10^3 \text{ pL/s}$, $Q_{\text{up}} = Q_{\text{down}} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ 。通过不断调整溶液的流速,能够实现对入射光线的有效聚焦或者偏移效果。

在芯层和包层存在相对滑移的情况下,即芯层流体和包层流体在微腔中所占的比例相比于初始入口所占的比例是不相同的。这种不同能够有效调节芯层液体的宽度,对适应入射光线有着非常重要的效果。



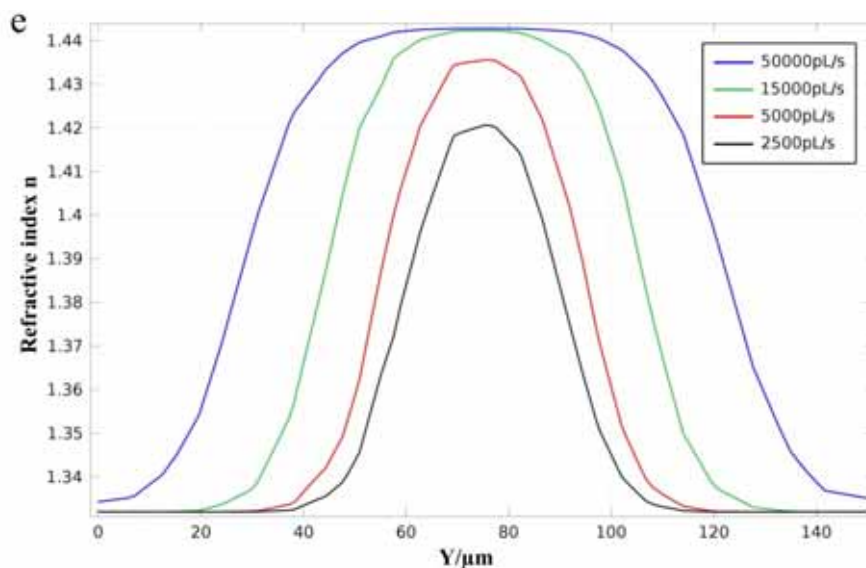


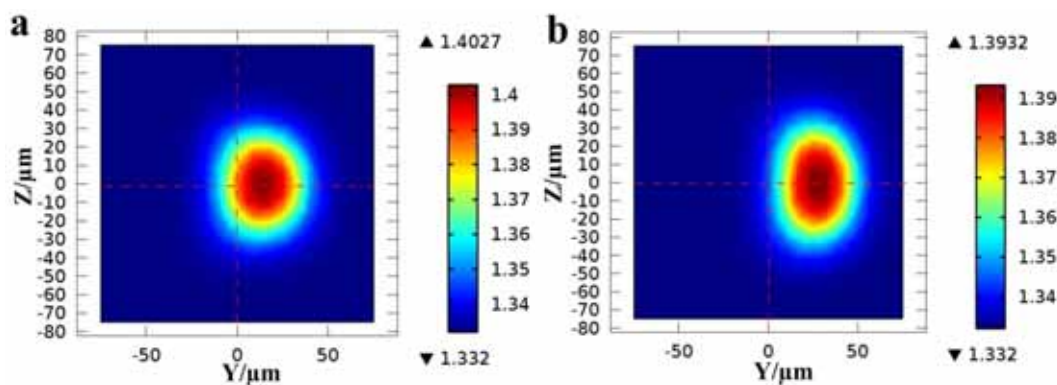
图 4-5 L-GRIN 微腔的纵截面折射率分布其中 $Q_{right} = Q_{left} = 5 \times 10^3 \text{ pL/s}$, $Q_{up} = Q_{down} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ (a)

$Q_{core} = 5 \times 10^3 \text{ pL/s}$ (b) $Q_{core} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ (c) $Q_{core} = 5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ (d) $Q = 2.5 \times 10^3 \text{ pL/s}$ (e) $x = 100 \mu\text{m}$ 处不通过流速下，截面的折射率分布

由方程(2-4) 中所示，系数 γ 表示了芯层液体与包层液体在初始入口处的归一化宽度比。图 4-5 中的 r 表示为宽度的归一化比例，包层流速不变的情况下，增加芯层的流速，所展现的芯层比例效果。图 4-5(e)所显示的折射率分布的中心宽度随着流体的变化分别为 $90 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ and $15 \mu\text{m}$ 并且这种变化是连续可调的。这种芯层宽度可调的效果能够随着入射管线的尺寸变化而进行调节。这也增加了所设计的 L-GRIN 调节的维度，这种调节对片上检测系统有重要的意义。

4.2.2 芯层液体偏移的实现

本章所设计的研究的微透镜折算率分布重点突出中心折射率偏移的效果上，这也是实现光线在二维输出面上实现偏移并聚焦的理论基础。



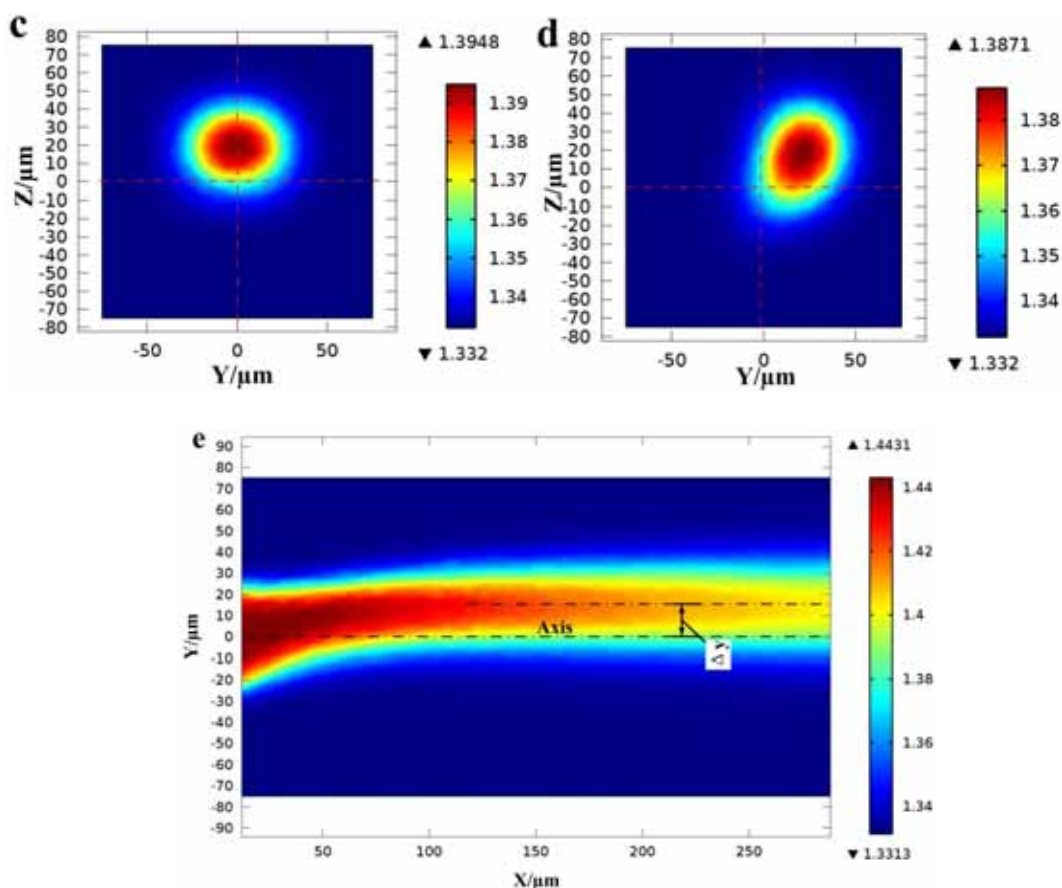


图 4-6 L-GRIN 微透镜中微腔的折射率截面分布 (a) $Q_{left} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ (b) $Q_{left} = 3 \times 10^4 \text{ pL/s}$

(c) $Q_{down} = 4.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ (d) $Q_{left} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ $Q_{down} = 3 \times 10^4 \text{ pL/s}$ (e) 实现折算率中心偏转的纵截面

方向可调微透镜的折射率分布如图 4-6(e)所示,折射率中心与微腔中芯有明显的偏移效果,这种效果便是光线偏移的基础。光线会向折射率较高的地方偏移,在偏移的同时由于折射率分布,还可以实现光线的聚焦效果。芯层液体不变的情况下,随着包层流速的变化,折射率较高的芯层区域的偏移现象非常明显,并且这种偏移随着一侧包层流速的增大而增大。通过计算可知,这种偏移是完全可预知的。图 4-6(a)、(b)显示了保持其他流速不变,单纯通过增加左侧流速为 $Q_{left} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$, $Q_{left} = 3 \times 10^4 \text{ pL/s}$, 芯层液体中心出现了明显的偏移,图 4-6(c)显示了增加下侧包层液体 $Q_{down} = 4.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ 时,折射率高的芯层会往上偏移。同时增加左侧和下侧流速,中心折射率会向右上角偏移。这种偏移随着各个包层流速的调整可以实现中心折算率在整个 L-GRIN 微腔的偏移,从而实现沿着输出平面任何方向的自由输出光线偏转。

4.3 光线的偏转与聚焦

通过以上两节的讨论,分析了各种因素对 L-GRIN 微透镜的折射率分布的影响,在已

获得折射率分布的前提下,通过光线追迹法,可以直接观察到光线的传播、弯曲与聚焦过程。这里举例来说光线聚焦与偏转的效果与折射率分布直接的关联。

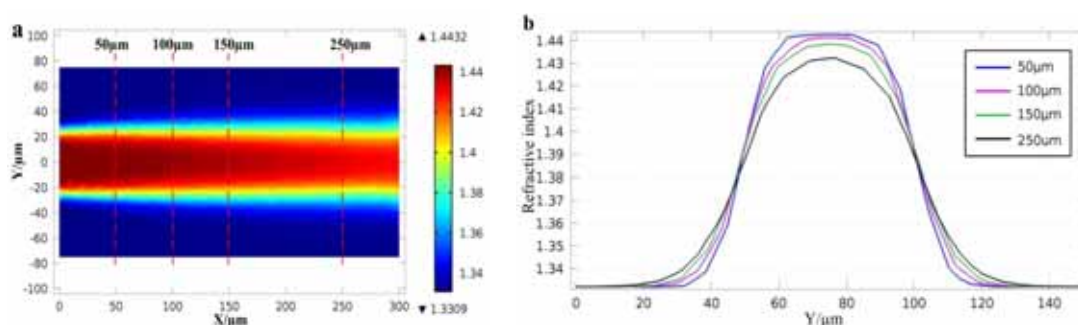
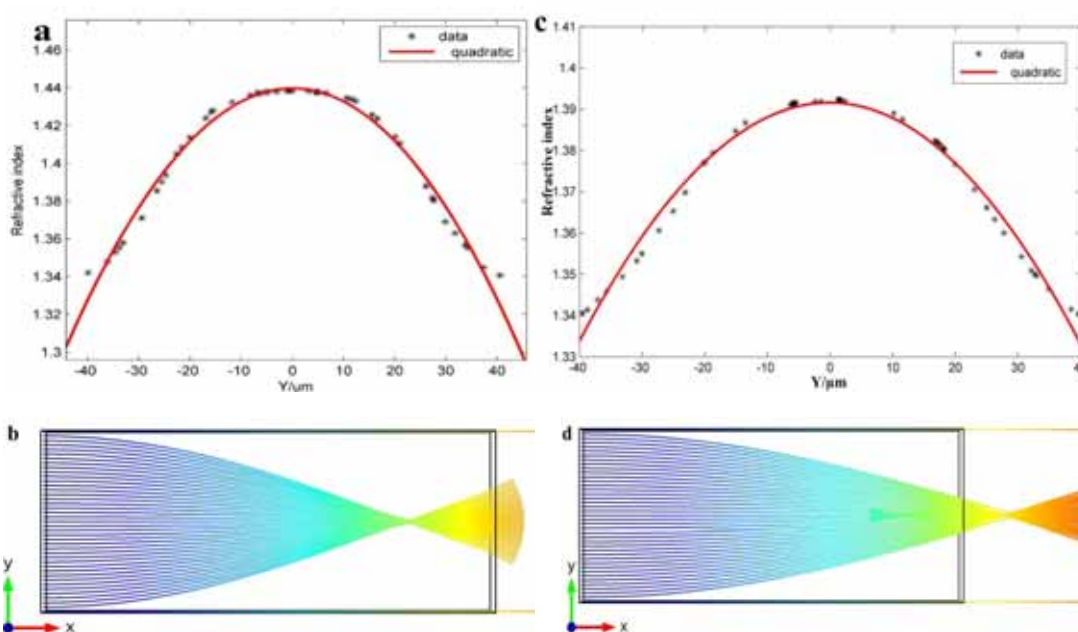


图 4-7 (a)流速为 $Q_{left} = Q_{right} = 5 \times 10^3 \text{ pL/s}$ 、 $Q_{up} = Q_{down} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ 的横截面折射率分布效果(b)沿着流速方向 $50\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$ and $250\mu\text{m}$

图 4-7 给出了一个经典的芯层和包层流体在 L-GRIN 微腔中扩散对流的例子。图 4-7(b) 给出了沿着流动方向折射率的分布曲线。经过多次的仿真验证,我们选择长度为 $200\mu\text{m}$ 的主扩散腔作为光线追迹的对象,研究光线在 L-GRIN 微透镜的传播与聚焦过程。



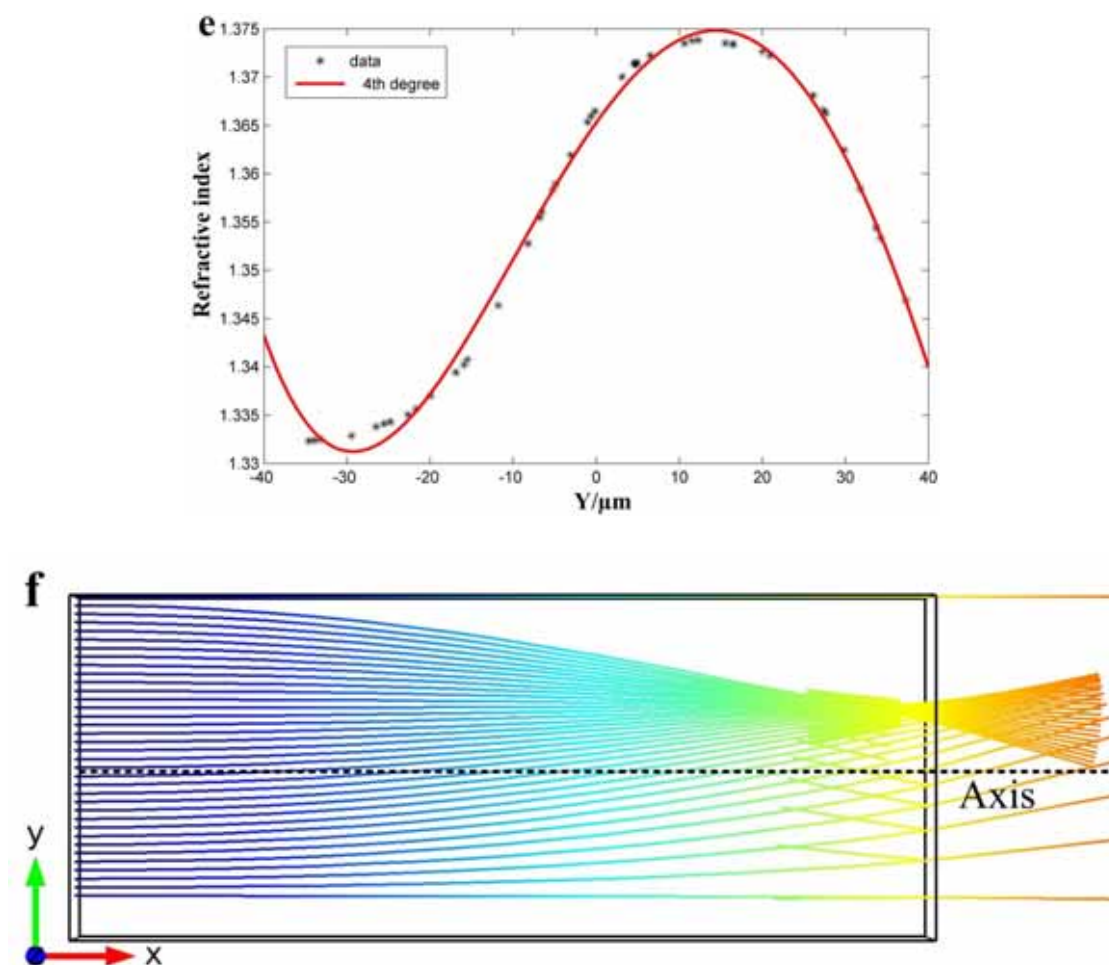


图 4-8 流速下的折算率分布机器拟合曲线 $Q_{core}=1\times 10^4\text{ pL/s}$, $Q_{left}=Q_{right}=5\times 10^3\text{ pL/s}$

and $Q_{up}=Q_{down}=1.5\times 10^4\text{ pL/s}$, (a) 质量分数为 1 的溶液(c) 质量分数为 0.6 的溶液(e) 质量分数为 0.4 的溶液 $Q_{core}=1\times 10^4\text{ pL/s}$, $Q_{up}=Q_{down}=1.5\times 10^4\text{ pL/s}$, $Q_{right}=1.5\times 10^4\text{ pL/s}$, $Q_{left}=5\times 10^3\text{ pL/s}$. (b)、(d) 和 (f) 不同流速状态下的光线追迹效果

图 4-8(a)、(b)和(e)分别给出了不同流速条件下在中心位置处的折射率分布曲线以及其多项式拟合曲线。(a)和(c)的拟合曲线分别为 $n=1.432-0.1(y/40)^2$ 和 $n=1.39-0.05(y/40)^2$, 通过光线追迹法得到的光线聚焦效果如图 4-8(b)、(d)所示。由上图可以看出,随着流速的调整,焦距发生了明显的变化,并且这种变化是连续可调的。最重要的一点,中心折射率的偏移效果曲线如图 4-8(e)所示,其中心折射率的取值范围沿着 y 轴方向从 $-30\mu\text{m}$ 变为 $40\mu\text{m}$ 。表达式为: $n=0.023(y/40)^4-0.047(y/40)^3-0.45(y/40)+1.365$ 。图 4-8(f)显示了入射光线的偏转和聚焦效果。可以看出,中心折射率所在的区域正是光线的聚焦焦点所在。这里我们可以推测,光线在出口处的偏转与聚焦与高折射率的芯层液体有直接的关系,所以焦点也是在二维的平面可调。

4.4 小结

本节分析了聚焦方向可调的 L-GRIN 微透镜的折射率分布,这种透镜通过改变四个包层的流速能够实现扩散对流微腔中的折射率分布的可调谐。光线在器件中的传播过程可以通过光线追迹法计算得到,通过单独增大一侧或者两侧的包层液体的流速实现了中心折射率在输出端面的二维可调偏移。这种灵活可调的性质在 lab-on-a-chip 系统中有非常重要的应用。

第 5 章 一维和二维 L-GRIN 微透镜的设计与分析总结

上述章节对基于微流控光学的微透镜有关原理及调控方法做了细致的分析和讨论,由扩散对流方程出发,探讨了芯层和包层液体在 L-GRIN 微透镜微流腔中的扩散对流过程,并对影响条件包括扩散系数 D 、浓度 C 、环境温度和流速分别进行了分析。并且根据具体的器件结构得到了随着各种调控因素的变化得到的焦距、焦斑或者方向变化的效果。然而对这些具体器件的分析并不能够有通用的分析效果。本章将对这些因素综合考虑,探讨适用于微流控光学通用性的研究模型,计算器件中折射率的影响因素,对其光学特性包括光束一维方向可调、二维方向可调等的影响,并且优化器件结构,使其特性更容易实现。针对这些器件结构对其性能做进一步的研究,得到其性能参数。本节的理论与第二章中的理论基本相同,在这里不做过多介绍,重点分析器件的性能结构。

方程(2-2)和流体动力学方程是一个经典微分方程然后对流扩散过程可以用有限法的方法方解决的折射率的分布来解决。在本章中,有限元法同样将用于分析由扩散对流所决定的溶液在微腔中的分布,通过公式(2-4)得到折射率分布。

5.1 器件设计与仿真分析

选择去离子水和乙二醇作为包层液体及芯层液体,这些液体已被证明可用于实验^[19]。当包层和芯层溶液确定后,根据等式(4-2)中,当参数 D 固定,芯层和包层的流动速度 U 便是主要的可调因素。但是,参数 D 不是一个固定值,它随温度和浓度的变化而变化。一般来说,液体的温度较高,浓度较低时,扩散系数 D 将会更大。例如,在乙二醇的浓度为 0.025,质量分数为 0.95 时,去离子水和乙二醇系统的质量扩散率从 $11.7 \times 10^{-10} m^2/s$ 变为 $3.75 \times 10^{-10} m^2/s$,并且温度为扩散系数的变化的另一个重要因素。考虑浓度和扩散系数的关系不能准确地给定,选择质量分数为 0.2 的乙二醇稀溶液进行讨论,以将温度和浓度的影响降到最低。

5.2 一维方向可调 L-GRIN 透镜

5.2.1 结构

控制入射光线的基础是通过控制包层和芯层流速的状态,包括流速,浓度,器件结

构等条件。本章采用简单的结构来分析影响因素,这样对其他结构的设计有很好的参考作用。

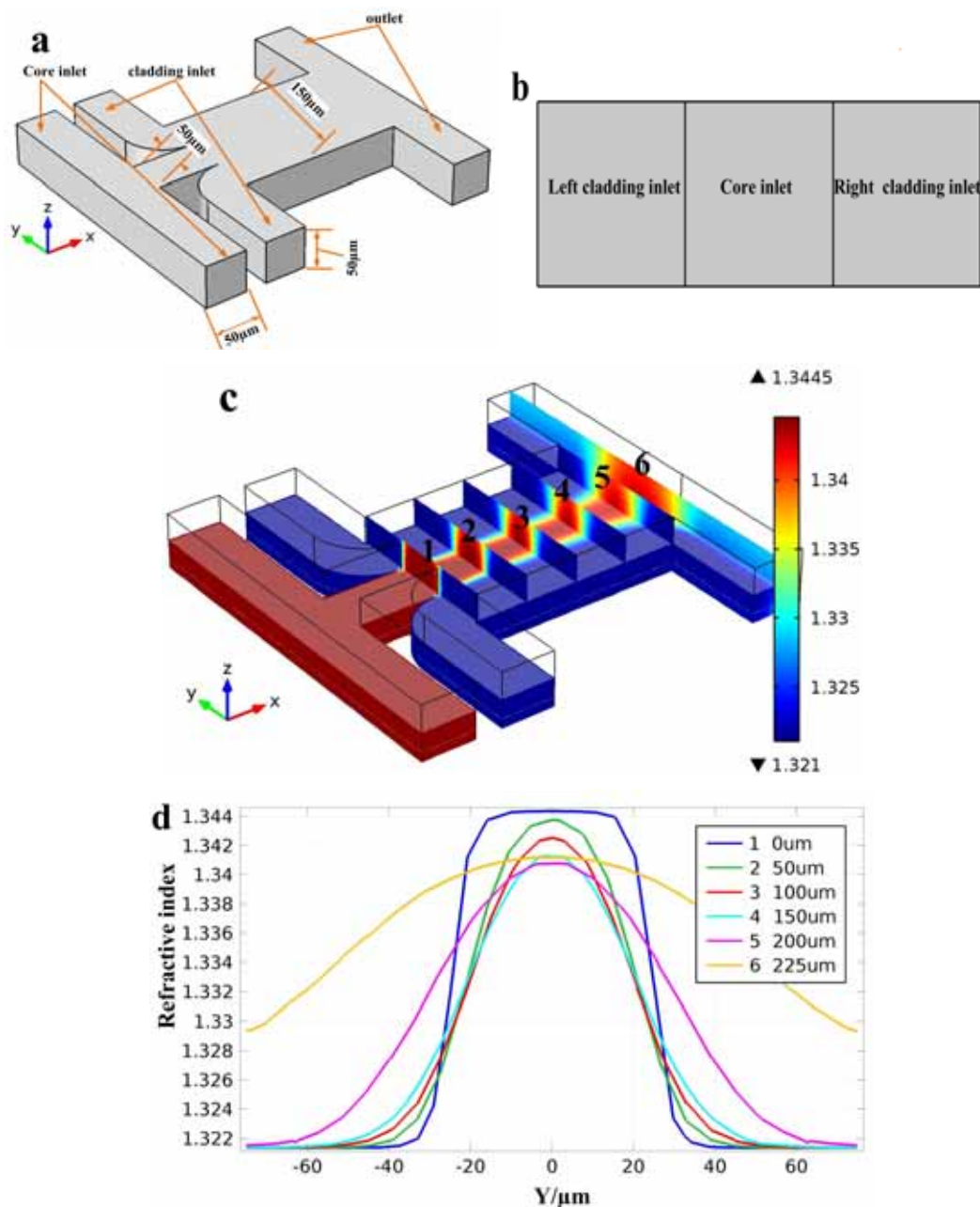


图 5-1.一维可调 L-GRIN 微透镜结构设计 (a) 结构与尺寸(b)初始的左右包层和芯层入口截面 (c) 稳态扩散状态(d)沿着流速方向不同截面的折射率分布

图 5-1(a)包层入口的圆角能够确保液体在入口处能够和包层液体平行进入微流腔,这保证了其扩散对流效果的平滑进行。由扩散对流效果产生的渐变折射率对光线的偏转有明显的效果,而折射率不变的区域不会有这种效果,分析入射光在微透镜的传播过程,及聚焦过程是我们主要的研究方向。

5.2.2 流速对焦距的影响

不同的芯层/包层流速比将会形成不同的微透镜折射率分布,而这种折射率分布的

L-GRIN 微透镜直接决定了对光束的调控效果。

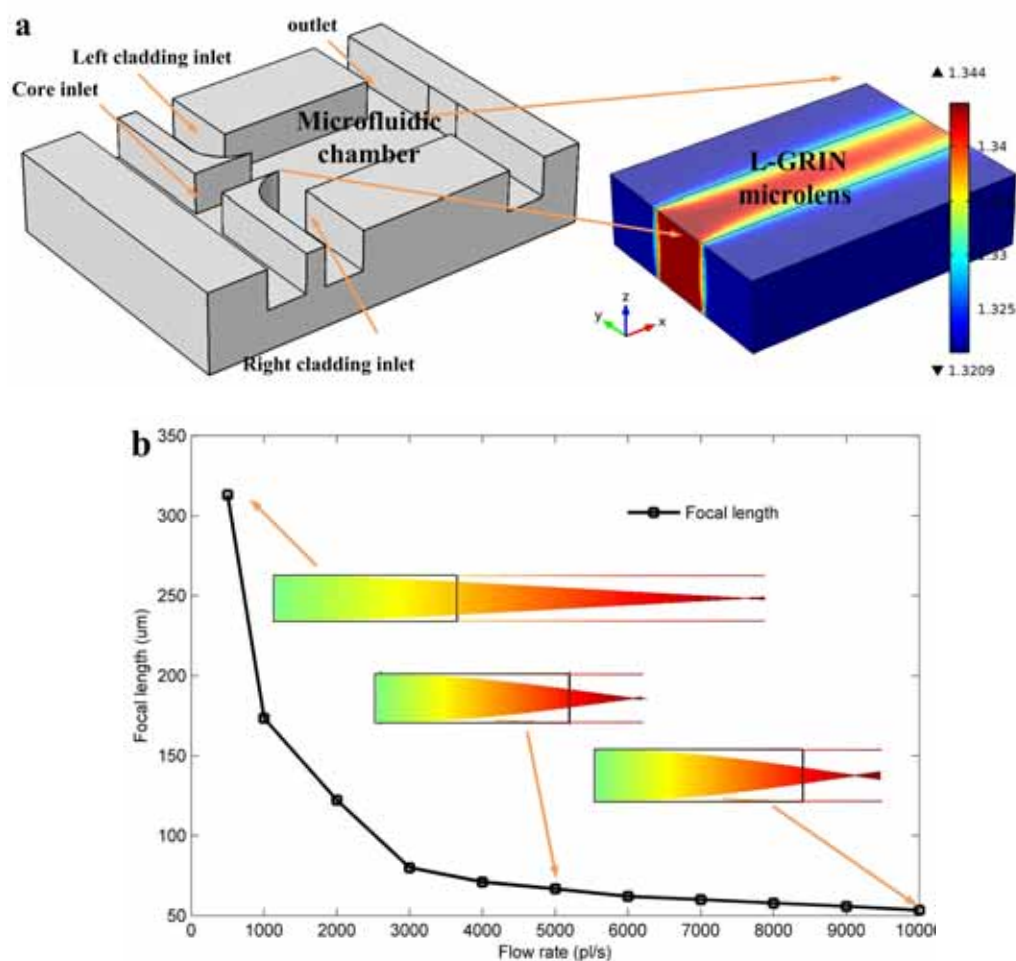


图 5-2 (a)器件结构与简化模型 (b)焦距随流速的变化曲线

图 5-2(a)所示的结构能够通过 PDMS 光刻方法得到。首先，微流腔中的芯层和包层的扩散对流效果能够通过有限元(FEM)方法获得，然后，通过光线追迹法，可以得到入射光线在器件中传播后的效果，获得包括焦距的尺寸、焦斑的大小及光束偏转的方向等。若只为了调整焦距，则保持高折射率的芯层液体沿着中心轴线不偏移同时两相流体没有相对滑移，即保持芯层和两次包层流速相同($Q_{core} = Q_{right} = Q_{left}$)，同时调整两种流体的流速从 500 pL/s 变化到 10000 pL/s 。观察焦距的变化，如图 5-2(b)所示，其焦距从 $313 \mu\text{m}$ 变为 $53.3 \mu\text{m}$ 。从上述的变化趋势可以看出，流速在 500 pL/s 到 3000 pL/s 区间内变化时，对焦距的影响比较明显。当流速超过 5000 pL/s 时，对焦距的影响较小。因此，在设计焦距变化的器件时，流体流速在 3000 pL/s 以内调整最合适。

5.2.3 一维方向可调

前文分析得知,光线经过渐变折射率器件时,总是向着折射率较高的区域偏转,因此中心区域的折射率决定了光线的偏转方向,因此通过调整中心折射率的偏转便可以得到很好的输出光线偏转效果。本章中为了简化数字描述,采用 fr 表示流速 5000pl/s ,同时保持芯层和左侧包层流速不变,只通过调整右侧包层的流速来实现对高折射率的芯层区域的偏转。

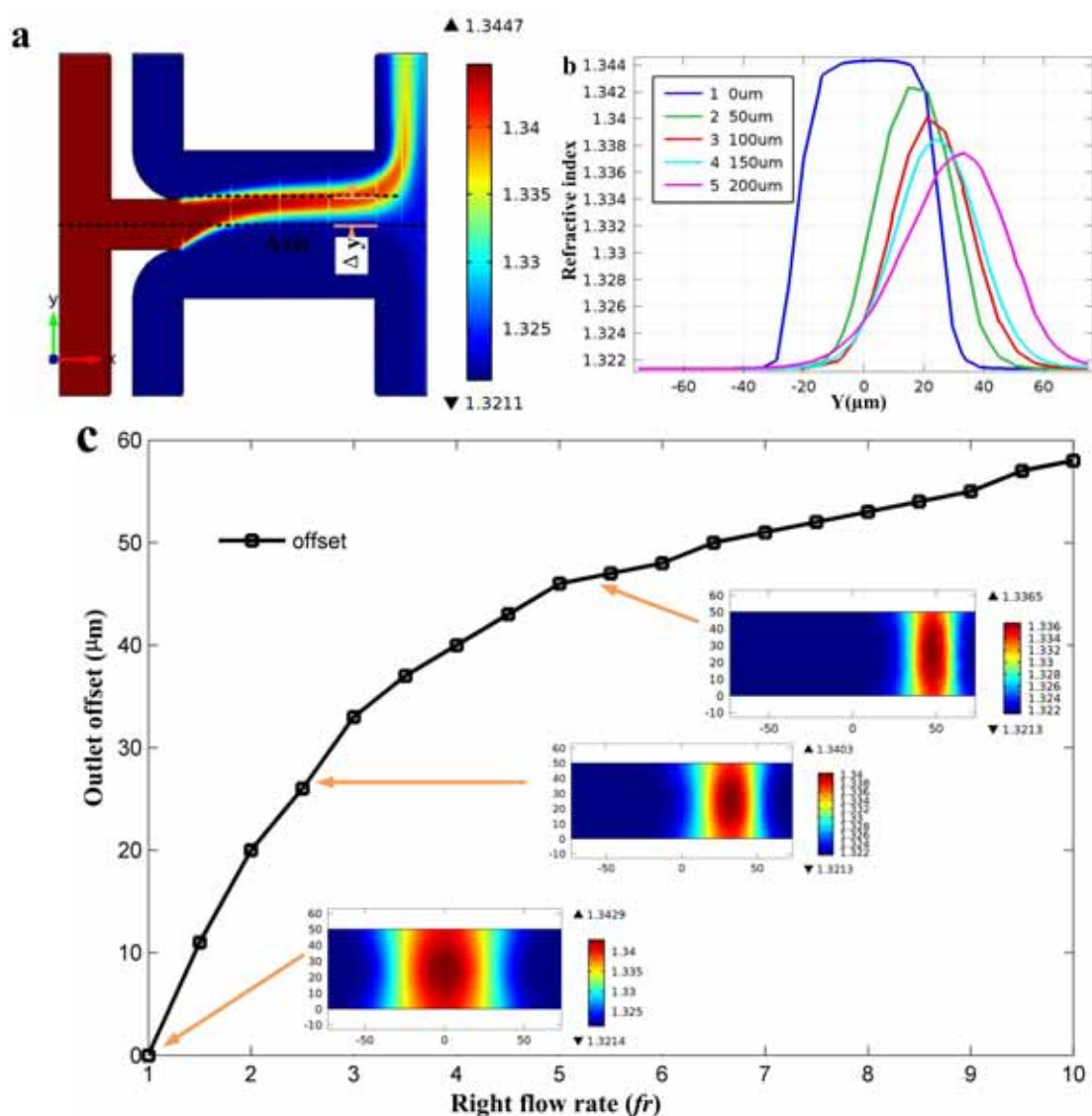


图 5-3 一维入射光线方向可调示意图 (a)扩散对流稳态后的折射率分布截面($Q_{right} = 3fr$) (b) 沿着流速方向的不同位置处的折射率曲线 (c)随着右侧流速的增加,横截面的效果图

如图 5-3 所示,非对称的包层流速为中心折射率提供了很好的偏移方法。通过增加一侧包层的流速来实现中心高折射率的偏转,如图 5-3(c)所示,折射率分布在出口的横截面图。当右侧的流速从 $1fr$ 增加到 $10fr$,高折射率的中心变化从 $0\mu\text{m}$ 增加到 $58\mu\text{m}$ 。

5.3 二维方向可调 L-GRIN 微透镜

一维方向可调的微透镜能够在片上系统实现光线的偏转与聚焦，这在检测与光耦合应用方向上有很大的应用潜力。但是，这种片上系统在输出端只能够完成一维的聚焦，对于有高度方向的入射光线，在出射端形成的是聚焦的一维光线。这种焦线对于聚焦耦合有很大的能量损失。现入射光线在末端的焦点能够很好解决这个问题，因此，提出下面这种结构。这种 L-GRIN 微透镜结构简化了上一章的模型，使得器件容易制造和实验实现。

5.3.1 器件结构与分析

与上章结构相似，同样采用上下左右的包层结构设计。不同的是，这里采用直角的微腔，一方面简化制作的工艺，另一方面能够减少入射光线能量的损失。

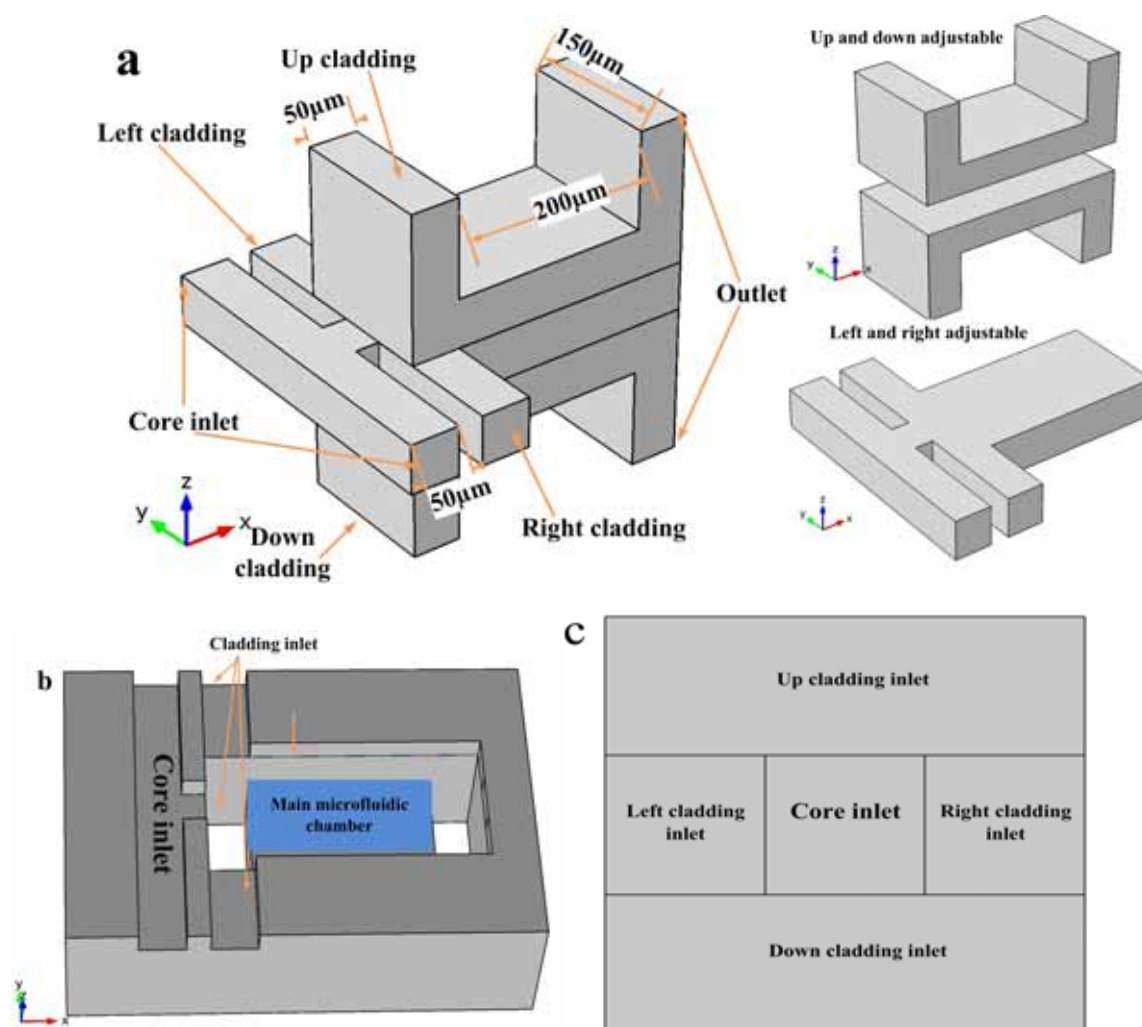


图 5-4 (a)二维方向可调 L-GRIN 微透镜的结构和解析图 (b)器件的剖面结构图 (c)初始入口结构

图 5-4(a)给出了器件的结构及尺寸示意图，上述结构有上下左右四个方向的入口和芯层入口组成。图 5-4(c)给出了初设入口的包层芯层入口的横截面，通过调节左右上下的包层的流速状态，来调节折射率较高的芯层液体的截面折射率分布。

5.3.2 出射光线焦斑分布

第四章讨论过光线的出射光线焦斑分布的流体条件,这里我们将对这种流速情况下的折射率分布进行分析,并采用光线追迹法来模拟光线经过微透镜的过程。

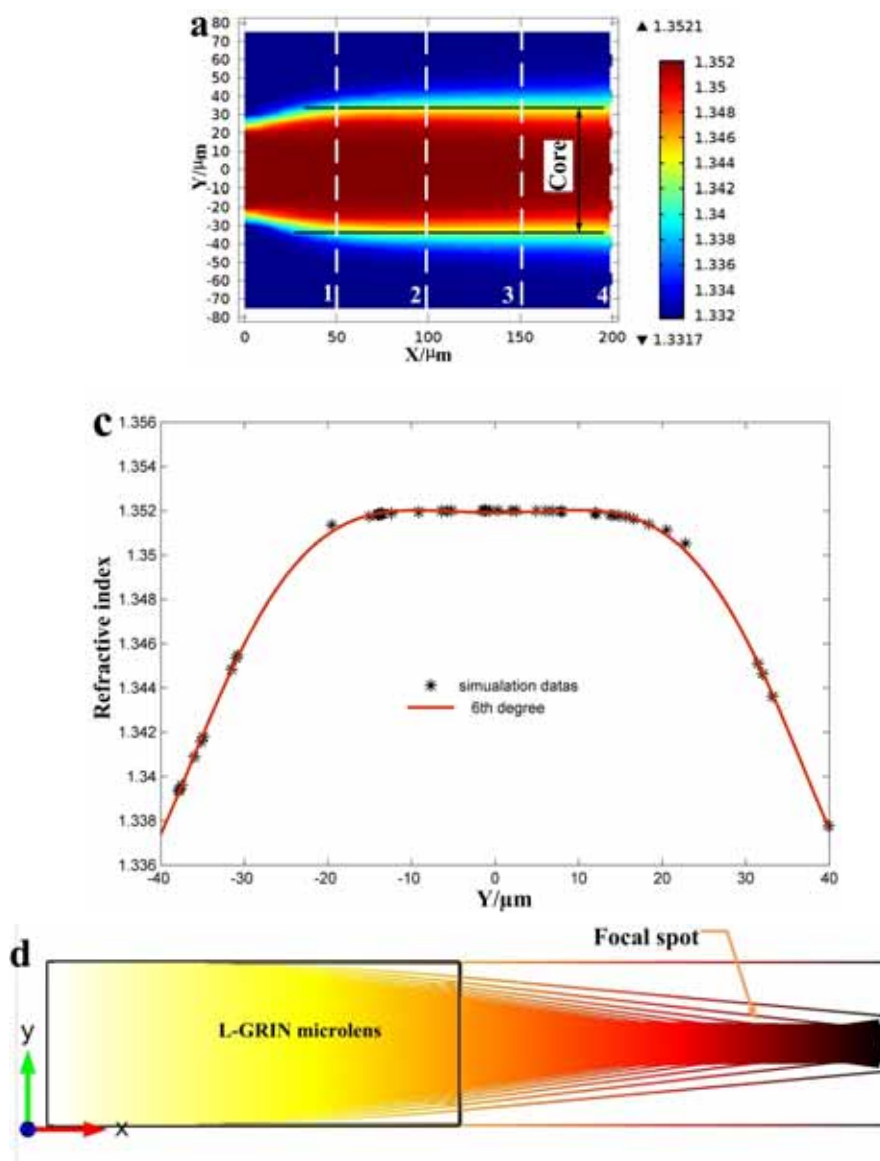


图 5-5 $Q_{right} = Q_{left} = 5 \times 10^3 \text{ pL/s}$, $Q_{core} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$, $Q_{up} = Q_{down} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ (a)纵截面的折射率分布 (b)沿着液体流动方向的折算率分布曲线 (c)计算数据与拟合曲线 (d)光线传输与聚焦效果

保持包层液体流速不变,提高芯层的流速,出现了芯层液体占有的微腔空间远大于包层液体的浓度分布状态。这种流速条件下,芯层液体的大部分并没有明显的扩散效果,这样便出现了,折射率较高的芯层液体在微腔中大部分不变,这对光线没有明显偏转效果。而芯层液体与包层液体接触的边出现了扩散现象,有明显的渐变折射率分布。图 5-4(a)给出了流速为 $Q_{right} = Q_{left} = 5 \times 10^3 \text{ pL/s}$, $Q_{core} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$, $Q_{up} = Q_{down} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ 时,纵向截面的折射率分布。图(b)中的折射率分布曲线很好说明了这个效果,中心区域光线

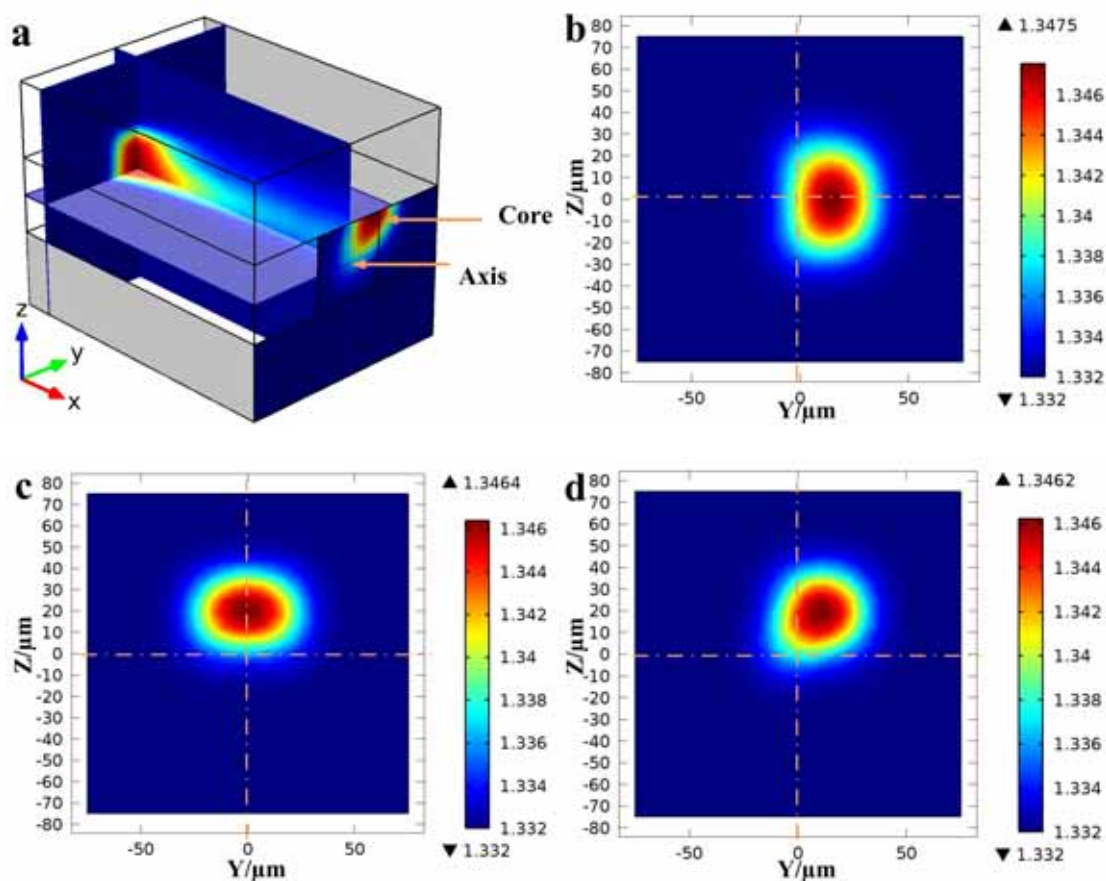
不会发生偏转，而边缘的渐变折射率对入射光线的有明显的偏转与聚焦效果。图(c)给出了模拟折射率分布点，及其拟合曲线，这个拟合公式可以用多项式表示为：

$$n = 9.7 \times 10^{-12} y^6 + 9.9 \times 10^{-12} y^5 - 2.5 \times 10^{-8} y^4 - 1.8 \times 10^{-8} y^3 + 3.5 \times 10^{-6} y^2 + 3.1 \times 10^{-6} y + 1.3435$$

焦斑大小主要有芯层折射率不变部分的液体所决定。图 5-5(d)给出了光线经过 L-GRIN 微透镜后的光线传播效果图。如图可知，出射光线的偏转和聚焦在器件末端出现了明显的焦斑。

5.3.3 二维方向可调

为了控制变量，单纯研究包层流速对折射率分布的影响，这里单纯操控上下左右包层的一个或两个流速来调节折射率的分布。



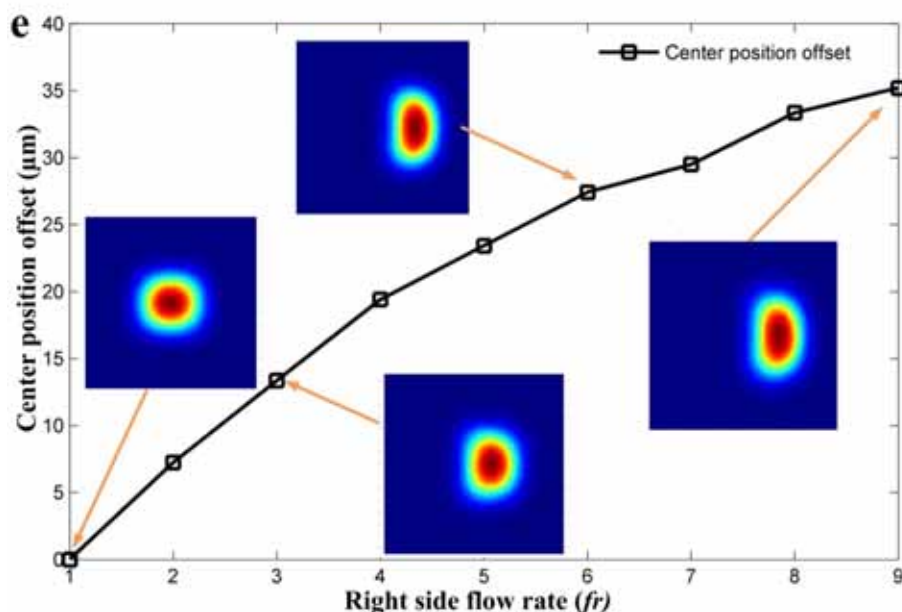
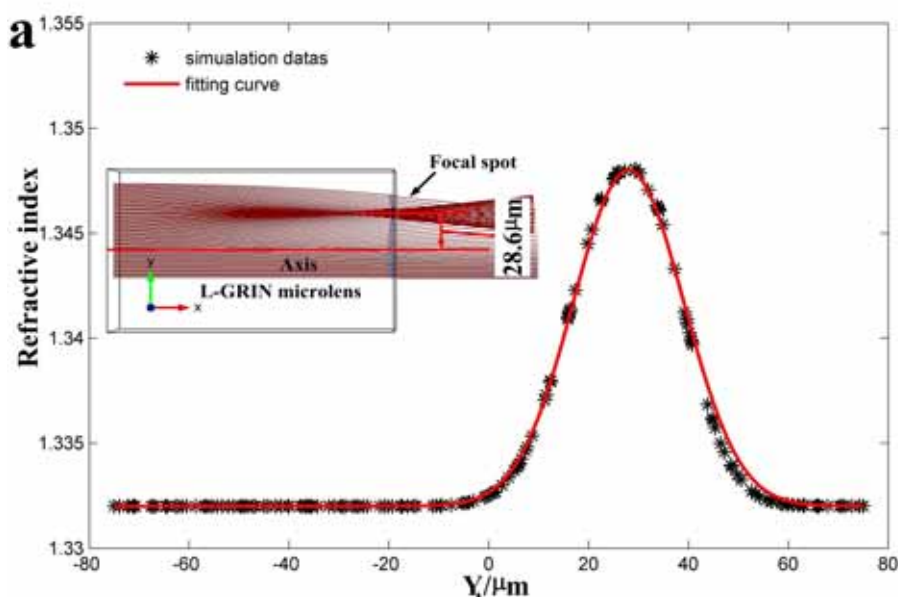


图 5-6 L-GRIN 微透镜的折射率分布 (a) 微腔折射率分布 (b) 中心折射率偏移 $Q_{right} = 3fr$ (c)

$Q_{down} = 9fr$ (d) $Q_{right} = 3fr, Q_{down} = 9fr$ (e) 折射率中心随着一侧包层增大的变化

图 5-6 所示的扩散对流微腔中的折射率分布,随着包层流速的变化的各种折射率分布情况。图 5-6(b)、(c)分别给出了折射率增加左侧液体和下侧液体实现的中心折射率往右和上方偏移的折射率分布图。图 5-6(c)显示同时增大左侧和下侧的流速,折射率中心往右上方偏移的情况。上一章曾探讨过折射率和聚焦光线的关系,即光线的传播方向随着折射率较高的方向偏移。图 5-6(e)给出了, Q_{left} 从 fr 增加到 $9fr$ 过程中,中心折射率的偏移量从 $0\mu m$ 增加到 $35.2\mu m$ 。



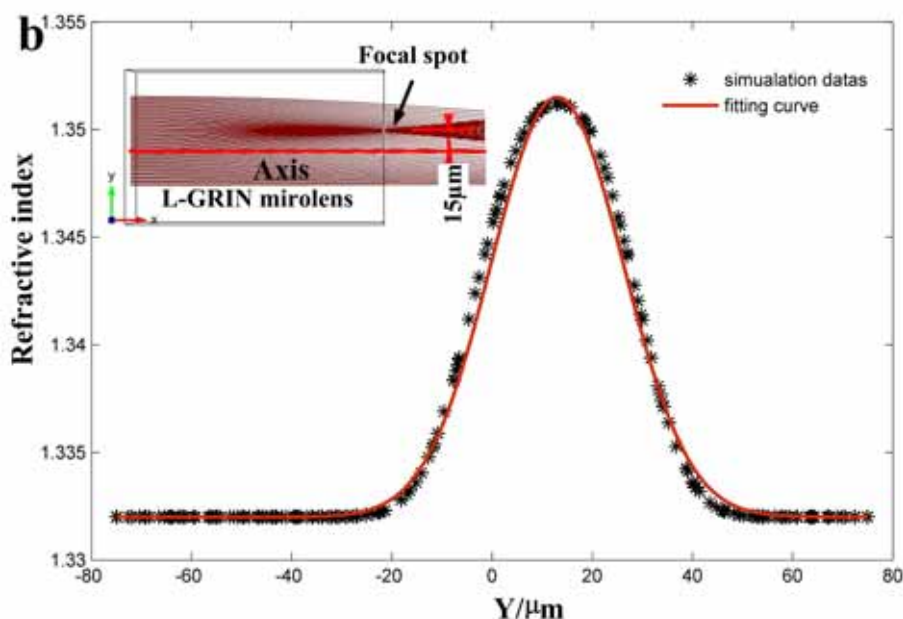


图 5-7 不同包层流速下折射率的偏移 (a) $Q_{right} = 3fr$ (b) $Q_{right} = 2fr$

通过调节包层流速来研究中心折射率在微腔中的影响,通过光线追迹法得到光线的传输效果,如图 5-7 所示,(a)、(b)所示的包层流速分别为 $Q_{left} = 1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$ 和 $Q_{left} = 1 \times 10^4 \text{ pL/s}$ 其折射率分布点及其拟合曲线分别为 $n = 1.332 + 0.0195e^{-(y-13)^2/345}$ 和 $n = 1.332 + 0.02e^{-(y-28)^2/245}$ 。通过上图的光线追迹法得到的入射光线经微透镜后的效果可以看出,通过控制一侧的流速可以得到很好的光线偏转效果。这种灵活可调的效果能够在生物医学检测,以及导波光学耦合上有重要的应用。

5.4 总结

本章我们全面分析了基于 L-GRIN 可调微透镜的实现原理,建立了 L-GRIN 微透镜的扩散对流分析模型,将微流体的扩散对流过程与微透镜的宏观光学特性建立关联进行分析。并对前面的器件结构做了改进,分析了通过调节芯层与包层流速来实现的控制焦距和入射光线的偏转与聚焦。通过保持包层和芯层的相对无滑移流速变化从 500 pL/s 到 10000 pL/s ,实现了焦距从 $313 \mu\text{m}$ 到 $53.3 \mu\text{m}$ 的变化。通过增加芯层液体的流速 $1.5 \times 10^4 \text{ pL/s}$,保持包层液体不变,当入射光线经过微透镜得到了,出射光线的直径为 $18.8 \mu\text{m}$ 的焦斑。最重要的是,通过调节包层折射率的连续变化,可以实现光线在输出面上的聚焦。这种能够实现光线的焦距和焦斑变化,以及方向偏转的性质有非常好的应用前景。

第 6 章 结论与展望

6.1 结论

本文基于流体的对流扩散效应,设计了几种可调节渐变折射率透镜,分析了器件/流体变量,包括器件结构、尺寸、溶液浓度、温度、流速等对微流体扩散对流的影响。通过有限元方法数值计算,得到芯层和包层液体在微腔中的扩散对流效果,并得到几种结构的折算率分布。在一种简单的结构模型中,分析了当流速同时增大时,微腔中心横截面的折射率分布曲线呈现出由较平滑到尖锐的变化规律。增大单侧包层的流速,保持其他流速不变,本文实现了折射率分布中心偏离微腔中轴由 $-25\mu\text{m}$ 变化到 $28\mu\text{m}$,并讨论了粘滞阻力对折射率分布的影响。计算表明,考虑粘滞阻力因素,本文所设计的微流体透镜依然能够实现渐变折射率分布的动态调节功能。利用渐变折射率分布的上述调节功能,可以对透射光束的焦距和出射方向进行动态调节。其次设计了一种新型的 L-GRIN 微透镜,可以实现动态光束聚焦。模拟扩散系数 D 、质量分数和流速 U 对折射率分布的影响,以及通过光线追迹法对 L-GRIN 透镜的聚焦过程进行了研究。结果显示调控乙二醇的质量分数和流量是有效的方法来改变输出光束的焦距。质量分数变化焦距变化从 0.05 提升到过程中,焦距的变化从 $942\mu\text{m}$ 减小到 $11\mu\text{m}$ 。此外,保持包层流速不变时,通过增加芯层流速从 $0.5\times 10^3\text{ pL/s}$ 增加至 $5\times 10^3\text{ pL/s}$,微透镜的焦距从 $127.1\mu\text{m}$ 降至 $8\mu\text{m}$ 。保持包层流速较大,增加芯层的流速可以有效调整出射焦斑的大小。同时,我们提出一种基于微流控光学的新颖 L-GRIN 微透镜,这种透镜能够实现输出端二维的光线偏移与聚焦效果。通过四个包层的可变流速来分析并计算在焦距以及光线偏转的效果。通过单独增大一侧或者两侧的包层液体的流速实现了,中心折射率在输出端面的二维可调偏移。通过光线追迹法,我们得到了光线经过器件后的偏转与聚焦效果。从模拟结果可以明显看出,器件的设计实现了光线的偏转与聚焦效果。最后全面分析了基于 L-GRIN 可调微透镜的实现原理,并对前面的器件结构做了改进,并分析了如何通过调节芯层与包层流速来实现精确控制焦距及入射光线的偏转与聚焦。结果表明:通过保持包层和芯层的相对无滑移流速变化从 500 pl/s 到 10000 pl/s ,实现了焦距从 $313\mu\text{m}$ 到 $53.3\mu\text{m}$ 的变化。通过增加芯层液体的流速 $1.5\times 10^4\text{ pl/s}$,保持包层液体不变,当入射光线经过微透镜得到了,出射光线的直径为 $18.8\mu\text{m}$ 的焦斑。最重要的是,通过调节包层折射率的连续变化,可以实现光线在输出面

上的聚焦。这种能够实现光线的焦距和焦斑变化,以及方向偏转的性质有非常好的应用前景。

综上所述,基于微流控光学的可调型自聚焦透镜为微透镜的制作提供了新的思路,在光束整形以及微流控芯片研究与光束可调性结合的应用中有很好的前景。

6.2 展望

对于未来的工作,可以通过将不同功能的微流控器件集成到芯片上,结合 MEMS 在芯片上实现复杂的检测和通信功能。进一步,通过加工所设计的器件,用实验来验证所设计器件的功能,并做进一步的改进。最后实现在实际产品中的应用。

参考文献

- [1] Monat, C., P. Domachuk, and B. J. Eggleton. Integrated optofluidics: A new river of light[J]. Nature photonics, (2007), 1(2): 106-114.
- [2] Fan, Xudong, and Ian M. White. Optofluidic microsystems for chemical and biological analysis[J]. Nature photonics , 2011, 5(10): 591-597.
- [3] Psaltis, Demetri, Stephen R. Quake, and Changhuei Yang. Developing optofluidic technology through the fusion of microfluidics and optics[J]. Nature, 2006,442(7101):381-386.
- [4] Chen, Yih-Fan, et al. Optofluidic opportunities in global health, food, water and Energy[J]. Nanoscale , 2012, 4(16):4839-4857.
- [5] Pohanka M, Skladal P. Electrochemical biosensors-principles and applications[J]. J .Appl . Biomed, 2008, 6:57—64 .
- [6] Kuswandi B, Nuriman, Huskens J, et al.. Optical sensing systems for microfluidic devices : A review[J]. Analytica chimica acta, 2007, 601:141-155 .
- [7] WHITESIDES G M , The origins and the future of microfluidics[J] . Nature, 2006, 442:368—373 .
- [8] Anderson, Janelle R., et al. Fabrication of microfluidic systems in poly (dimethylsiloxane)[J]. Electrophoresis, 2000, 21: 27-40.
- [9] Thorsen, Todd, Sebastian J. Maerkl, and Stephen R. Quake. Microfluidic large-scale integration[J]. Science, 2002, 298(5593): 580-584.
- [10] 童伟, 唐雄贵, 廖进昆, 等. 热调控变焦聚合物微透镜的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(04): 042202(1-5)
- [11] 唐雄贵, 童伟, 廖进昆等. 可调液晶微透镜研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(14): 040002(1-6)
- [12] Zhao, Yanhui, et al. Optofluidic imaging: now and beyond[J]. Lab on a Chip, 2013, 13(1):17-24.
- [13] Mao, Xiaole, et al. Tunable Liquid Gradient Refractive Index (L-GRIN) lens with two degrees of freedom[J]. Lab on a Chip, 2009, 9(14): 2050-2058.
- [14] Yang, Y., et al. Optofluidic waveguide as a transformation optics device for lightwave bending and manipulation[J]. Nature communications, 2012, 3: 651.
- [15] Hendriks, B. H. W., et al. Electrowetting-based variable-focus lens for miniature systems[J]. Optical

Review,2005, 12(3): 255-259.

[16] Kuiper, Stein, and B. H. W. Hendriks. Variable-focus liquid lens for miniature cameras[J]. Applied physics letters, 2004, 85(7):1128-1130.

[17] Shi, Jinjie, et al. Tunable optofluidic microlens through active pressure control of an air-liquid interface[J]. Microfluidics and Nanofluidics, 2010, 9(2-3):313-318.

[18] Tang, Sindy KY, Claudiu A. Stan, and George M. Whitesides. Dynamically reconfigurable liquid-core liquid-cladding lens in a microfluidic channel[J]. Lab on a Chip, 2008, 8(3): 395-401.

[19] Fei, Peng, et al. Discretely tunable optofluidic compound microlenses[J]. Lab on a Chip, 2011, 11(17): 2835-2841.

[20] A. A. Kayani, A. F. Chrimes, K. Khoshmanesh, V. Sivan, E. Zeller, K. Kalantar-zadeh, and A. Mitchell, Interaction of guided light in rib polymer waveguides with dielectrophoretically controlled nanoparticles[J]. Microfluid.Nanofluid. 2011,11 .

[21]A. Ashkin, Proc. Natl. Optical trapping and manipulation of neutral particles using lasers Acad[J]. Sci. U. S. A.1997, 94: 10.

[22]G. Grier. Review article A revolution in optical manipulation[J]. Nature .2003,424: 6950

[23] A. Ashkin. History of optical trapping and manipulation of small-neutral particle, atoms, and molecules[J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.2000, 6: 6 .

[24] A. van der Horst, A. I. Campbell, L. K. van Vugt, D. A. M. Vanmaekelbergh, M. Dogterom, and A. van Blaaderen. Manipulating metal-oxide nanowires using counter-propagating optical line tweezers[J]. Opt. Express 2007, 15(19).

[25] A. S. Zelenina, R. Quidant, and M. Nieto-Vesperinas. Enhanced optical forces between coupled resonant metal nanoparticles[J]. Opt. Lett.2007, 32(9):

[26] D. Erickson, X. Serey, Y. F. Chen, and S. Mandal[J], Lab Chip,2011, 11(6):

[27] Escobedo, Carlos, et al. Optofluidic concentration: plasmonic nanostructure as concentrator and sensor[J]. Nano letters, 2012,12(3): 1592-1596.

[28] Lensfree Optofluidic Microscopy and Tomography Annals of Biomedical Engineering[J], 2012 40(2): 251-262

[29] Y. C. Seow, A. Q. Liu, L. K. Chin, X. C. Li, H. J. Huang et al. Different curvatures of tunable liquid microlens via the control of laminar flow rate [J].Appl. Phys. Lett.2008, 93,(084101)

[30] Prins, M. W. J., W. J. J. Welters, and J. W. Weekamp. Fluid control in multichannel structures by electrocapillary pressure[J]. Science, 2001, 291(5502): 277-280.

[31] Koike, Yasuhiro, Yoshitaka Takezawa, and Yasuji Ohtsuka. New interfacial-gel copolymerization

- technique for steric GRIN polymer optical waveguides and lens arrays. *Applied optics*,1988, 27(3): 486-491.
- [32] Ward, A. J. & Pendry, J. B. Refraction and geometry in Maxwell's equations[J]. *J. Mod. Opt.* 1996,44:773-793
- [33] 延凤平 刘鹏 谭中伟 陶沛琳 李琦 彭万敬 冯亭 谭思宇. 双包层稀土掺杂光纤抽运吸收特性的分析[J] *物理学报*, 2012 (61): 4202
- [34] Zickar M, Noell W, Marxer C, Rooij N de. MEMS compatible micro-GRIN lenses for fiber to chip coupling of light[J]. *Opt. Express* 2006 **14** (4237)
- [35] Valentine, J., Li, J., Zentgraf, T., Bartal, G. & Zhang, X. An optical cloak made of dielectrics[J]. *Nat. Mater.* 2009,8: 568-571 .
- [36] 陈陶, 梁忠诚, 钱晨, 徐宁. 基于电润湿微棱镜技术的可调光衰减器特性分析[J] *物理学报*,2010, 59 (164202): 7906-7910
- [37] Cai W, Chettiar U K, Kildishev A V, Shalaev V M . Optical cloaking with metamaterials [J]. *Nat. Photon.* 2007,1: 224
- [38] Mao X, Lin S-C S, Lapsley M I, Shi J, Juluri B K. Tunable Liquid Gradient Refractive Index (L-GRIN) lens with two degrees of freedom[J] ,*Lab Chip*, 2009, 9: 2050
- [39] Yang Y, Chin J M, Tsai D P, Zhenludev N I, Liu A Q. Transformation optofluidics for large-angle light bending and tuning[J]. *Lab Chip* ,2012, 12: 3785-3790
- [40] Perumal M, Ranga Raju K G. APPROXIMATE CONVECTION-DIFFUSION EQUATIONS[J] , *J. Hydrol. Eng.* 1999,4:160-164
- [41] Wu Z, Nguyen N T. Hydrodynamic focusing in microchannels under consideration of diffusive dispersion: theories and experiments[J] .*Sens. Actuators B* 2005 ,107: 965
- [42] Kapur J N, Shukla J B. FLOW OF INCOMPRESSIBLE IMMISCIBLE FLUIDS BETWEEN TWO PLATES[J] . *Appl. Sci. Res.*1964, A(13):55
- [43] Ternstrom G, Sjostrand A; Aly G, Jernqvist A. Mutual diffusion coefficients of water plus ethylene glycol and water plus glycerol mixtures[J]. *J. Chem. Eng. Data* 1996 (41): 876-879
- [44] 王明宏.乙二醇(EG, DEG, TEG, T4EG, PG, DPG)水溶液之雙成份擴散係數量測研究[D] 2009 硕士学位论文 (桃园县:中原大学)
- [45] Tang,Sindy K. Y.,Stan,Claudiu A; Whiteside,Geoge M., Dynamically reconfigurable liquid-core liquid-cladding lens in a microfluidic channel[J]. *Lab Chip*, 2008 8:395-401

致 谢

难忘三年，难忘美丽的工大校园，难忘青葱岁月里和蔼而严谨的老师们的热情风趣的同窗益友。一声感谢，埋藏心底已久，在毕业之际，献给所有关心过我、帮助过我的老师和朋友。

最要感谢的是我的导师乐孜纯教授。从三年前刚进工大，到今天能够完成硕士学习，没有乐老师的悉心指导，就没有我的成长与今天。导师不仅为我指点研究思路方向，还不断在科研道路上鼓励我、帮助我，耐心细致地指导我修改每一篇论文、每一个报告。导师的开阔视野，敏捷思路，和豁达心胸，让我受益终身。

感谢王昌辉老师在学习上的帮助和生活上的关心。感谢杜颖老师对论文提出的意见和修改。感谢实验室的同学们：李旭、蒋俊洋、邵尉、黄吉等。一同成长，幸运而难忘。

特别感谢辛勤养育我的父母，我的姐姐和妹妹，离家很远，是你们默默的支持和鼓励支撑我取得今天的成绩，你们永远是我坚强的后盾。感谢所有关心、爱护我的亲朋好友。

最后感谢参加论文评审和答辩的各位专家！

攻读学位期间发表的学术论文目录

录用和发表的论文

- [1] 孙运利,王昌辉,乐孜纯.基于微流控光学可调谐的渐变折射率特性研究,物理学报, 2014, 63(15:154701)

专利

- [1] 乐孜纯,孙运利,王昌辉,付明磊.基于流体光波导的可调谐光波分束器[P]. 中国专利: CN103869477A.2014-06-18
- [2] 乐孜纯,孙运利,王昌辉,付明磊.基于微流控光学技术的光束整形装置[P]. 中国专利: CN103792665A.2014-05-14
- [3] 乐孜纯,孙运利,王昌辉,付明磊.基于微流控光学技术的光束整形方法[P]. 中国专利: CN103792664A.2014-05-14