

# 微流控阵列光开关中微流体流动特性的研究

曹作恺, 徐 宁

(南京邮电大学, 江苏 南京 210003)

**摘 要:**介绍了微流控光开关的基本结构与工作原理。对微流体的性质作了分析,介绍了压力驱动流体流动的数学模型。对微流控阵列光开关中流体流动特性进行研究。利用 ANSYS 仿真软件,对控制单元中微流道和储液小槽的尺寸变化对微流体流速的影响进行仿真和分析,得出微流道高度及长度、储液小槽高度及半径与微流体流动速度的关系变化情况。根据仿真结果,微流道的宽度、高度和长度,以及储液小槽的高度和半径最佳状态的比例为 1:2:4:4:1,此时微流体的速度与稳定性达到最佳。

**关键词:**微流控;光开关;控制单元;ANSYS 仿真

**中图分类号:**TP39;O35

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2011)09-0194-03

## Microfluidic Optical Switch Array Simulation of the Control Unit

CAO Zuo-kai, XU Ning

(Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The basic structure of microfluidic optical switching and principals are described. Flow characteristics of microfluidic are analyzed, and pressure-driven fluid flow model is described. Flow characteristics of microfluidic optical switching matrix in control unit are studied in this paper. Using ANSYS simulation software, the impacts of size of microchannels and reservoir tanks on rate of microfluid are analyzed, and then relationships between changes of height\length of the microchannels, height\radius of reservoir tanks and the rate of microfluid are proposed. The simulation shows that the optimal proportion for microchannels' width, height, length and reservoir tanks' height, radius is 1:2:4:4:1 with best stability and speed.

**Key words:** microfluidic; optical switch; control unit; ANSYS simulation

## 0 引 言

微流控阵列光开关阵列的基本结构为“盖板+绝缘层+光波导层+底板”的夹心结构。基本原理是利用电荷之间的作用力,即同性电荷的互斥力和异性电荷的相吸力,控制与微流道交叉的细管中的物质,如在电荷相吸力的作用下使液体压入细管,而在电荷排斥力的作用下将细管中的液体抽离。这样,光可以穿过充有液体的细管到达微流道的另一端,实现‘开’动作;而不能通过装有空气的细管,因为光在液体和空气的界面发生全反射,故而实现‘关’动作<sup>[1]</sup>。微流控阵列光开关控制单元的核心就是对储液小槽和微管道中液体的驱动与控制<sup>[2]</sup>。笔者将对微流体的性质,以及影响微流体流动的因素等进行分析研究和仿真,为微流

控光开关的研制提供理论指导。

## 1 微流体流动数值模拟的理论基础

### 1.1 微流体的性质

微系统与宏观系统的相通之处在于均为适用牛顿力学的物理体系<sup>[2]</sup>,而且宏观系统中的部分规律也可以延伸到微系统领域中应用<sup>[3]</sup>。在微观领域,许多物理现象和宏观世界中的现象会产生很大的差别<sup>[4]</sup>。由于微系统的尺寸非常小,因此微系统中物体的规律相对于宏观系统而言是不可预测的<sup>[5]</sup>。主要表现在系统的运动由连续式变为间歇式,由平稳式变为突发式;并且,构成微系统的许多关键组件的制造、控制和检测都变得更加困难<sup>[6]</sup>。

微流体流动的 Reynolds 数( $Re = \frac{\rho \bar{u} l}{\mu} = \frac{\bar{u} l}{\nu}$ , 其中  $\rho$

为密度,  $\bar{u}$  为平均速度,  $\mu$  为动力粘度,  $\nu$  为运动粘度)很小, Reynolds 数小导致流体质点的惯性力比较小,使得流体形态为层流状态;同时,在小 Reynolds 数的情况下,表面张力也成为主要因素<sup>[7]</sup>。

收稿日期:2011-02-21;修回日期:2011-06-01

基金项目:国家自然科学基金(60977069, 60878037);江苏省自然科学基金(BK2009424)

作者简介:曹作恺(1985-),男,硕士研究生,主要从事光纤通信与光波技术的研究;徐 宁,副教授,硕士研究生导师,主要从事光纤通信与光波技术的研究。

微流体流动的 Knudson 数 ( $Kn = \frac{\lambda}{l}$ , 其中  $\lambda$  是分子间距) 较大, Knudson 数定义为流体分子运动平均自由程和流动特征尺度的比值。较大的 Knudson 数表示流体连续性在微观尺度中不再适用。

微流体流动的 Peclet 数 ( $Pe = \frac{ul}{D}$ ,  $D$  为扩散系数) 较低, 低的 Peclet 数表示微尺度下流体具有很强的扩散能力, 因此传热速度明显加快, 液体的挥发速度也明显加快<sup>[8]</sup>。

微流体流动的 Weber 数 ( $We = \frac{\rho u^2 l}{\sigma}$ , 其中  $\sigma$  为表面张力) 低, 因此微尺度下起主要作用的力是流体的表明作用力<sup>[9]</sup>。

## 1.2 压力驱动流体流动的数学模型

不同的驱动方式会产生不同的速度流型, 压力驱动为抛物线型, 电渗驱动是塞状流型, 表面张力驱动是凹面型。文中微流控阵列光开关是由电压控制的压力驱动<sup>[10]</sup>。

压力驱动液体的主要方式是依靠微流道中不同位置的压差来驱动液体, 主要是通过系统中机械部件的移动来实现压差<sup>[11]</sup>。微流道中流体由于液体黏度的作用产生剪切张力而形成抛物线型的速度流型。其横截面轴方向速度表达式为

$$V = -\frac{\Delta p}{4\mu L}(R^2 - r^2)$$

式中  $\Delta p/L$  表示单位长度管的压降,  $R$  表示圆管界面半径,  $r$  为自变量,  $\mu$  为动力粘度, 液体与固体接触面线速度为 0, 而在圆心处线速度为最大, 达到界面平均速度的 2 倍<sup>[12]</sup>。

## 2 数值模拟结果与分析

文中采用多物理场模拟软件 ANSYS 的 FLOTRAN 单元对微流道与储液小槽取不同尺寸时对微流体速度的影响进行有限元数值模拟, 设计更好的微流控光开关的流体速度模型, 从而设计性能更好的微流控阵列光开关。

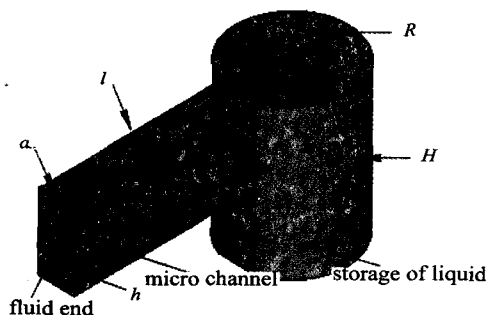


图1 控制单元示意图

图1是控制单元示意图。微流道的横截面形状选择为矩形, 因为微流道是光波导层与微流道中液体介质的分界面, 为了不影响光的传输, 分界面必须设计成平面。储液小槽设计为圆柱形。图1中,  $R$  表示储液小槽的底面半径,  $H$  表示储液小槽的高度,  $a$ 、 $h$  和  $l$  分别表示微流道的宽度、高度和长度。

### 2.1 微流道的高度对微流体流速的影响

利用 ANSYS 仿真软件对流体流动特性进行仿真, 微流道的宽度和高度设定为  $a = 10\text{mm}$ ,  $l = 40\text{mm}$ ,  $R = 10\text{mm}$ ,  $H = 40\text{mm}$ , 入口处驱动压力设定为  $10000\text{Pa}$ , 即约为 1 个大气压, 出口压力设为 0。液体的参数以硅油为标准, 密度设定为  $0.95\text{kg/m}^3$ , 粘度取  $0.01\text{kg/(m}\cdot\text{s)}$ , 微流道的材料选择 PDMS (聚二甲基硅氧烷) 材料, 则液体与微流道之间的表面张力系数可以设定为  $0.02\text{N/m}$ 。在入口压力和边界条件不变的情况下, 对微流道的高度值进行仿真, 得到高度值从  $10\text{mm}$  至  $100\text{mm}$  变化时出口处流体的速度值的变化曲线, 结果如图2所示,  $v$  是出口处微流体的速度值。

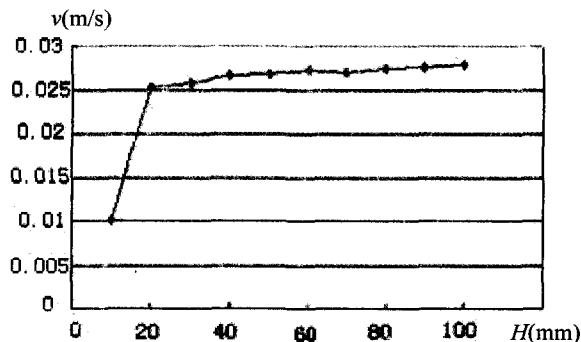


图2 微流道高度同微流体流速的关系曲线

从图2中可以看出, 高度取值为  $10\text{mm}$  到  $20\text{mm}$  之间时, 微流体流速迅速增大; 高度取值为  $20\text{mm}$  到  $100\text{mm}$  之间时, 微流体流速趋于稳定, 稳定在  $0.027\sim 0.028\text{m/s}$  之间。因此, 为了能获得稳定的速度, 微流道并不适宜采用过小的管径。

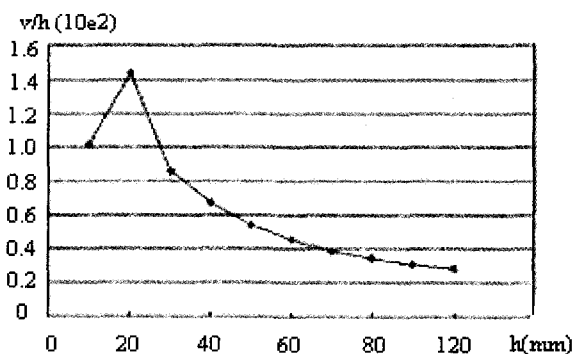


图3 微流体流速与微流道高度的比值同微流道高度的关系曲线

图3中, 用微流体速度值与微流道高度值的比值

$v/h$  来表示速度流型的尖锐程度。从图 3 中可以看出, 从  $h = 10\text{mm}$  开始, 速度流型的尖锐程度快速上升, 在  $h = 20\text{mm}$  左右处达到最大值, 然后开始下降。 $v/h$  的最大值表示流体速度逐步稳定的一个临界点, 当超过这个临界值后, 微流体的速度将会达到稳定的状态, 因此, 综合考虑微流道的高度与微流体流动的稳定性的, 建议微流道的高度  $h$  选择  $20\text{mm}$ 。

## 2.2 微流道长度对微流体流速的影响

取  $a = 10\text{mm}$ ,  $h = 20\text{mm}$ ,  $R = 10\text{mm}$ ,  $H = 40\text{mm}$ ,  $l$  从  $40\text{mm}$  以  $10\text{mm}$  为一个间隔增加到  $120\text{mm}$ , 其它条件保持不变。得到图 4, 即微流道长度同微流体流速的关系曲线。

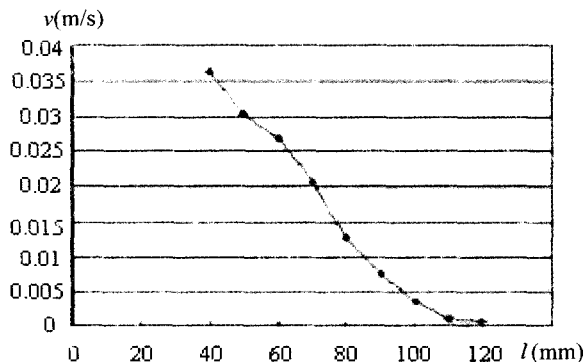


图 4 微流道长度同微流体流速的关系曲线

从图 4 可以看出, 随着微流道长度的增大, 出口处微流体的速度明显地下降。但是, 在实际制作微流控阵列光开关时, 并不是微流道制作的越短越好, 因此, 要根据对微流体速度的需要或其它因素具体分析。

## 2.3 储液小槽的高度对微流体流速的影响

取  $a = 10\text{mm}$ ,  $h = 20\text{mm}$ ,  $l = 40\text{mm}$ ,  $R = 10\text{mm}$ , 另储液小槽的高度  $H$  从  $25\text{mm}$  开始以  $5\text{mm}$  的间隔增加至  $70\text{mm}$ 。其它条件保持不变, 得到储液小槽的高度同微流体流速的关系曲线, 如图 5 所示。当储液小槽高度  $H$  为  $40\text{mm}$  时, 出口处微流体流速达到最大值。

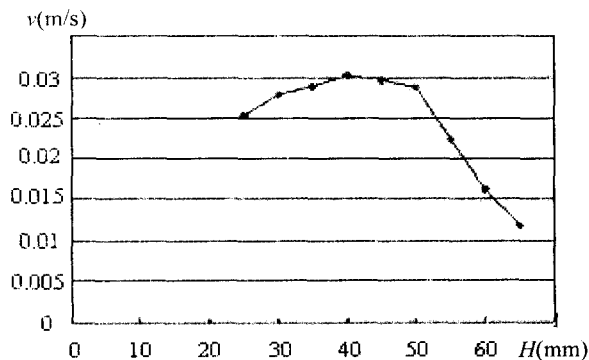


图 5 储液小槽的高度同微流体流速的关系曲线

## 2.4 储液小槽的半径对微流体流速的影响

取  $a = 10\text{mm}$ ,  $h = 20\text{mm}$ ,  $l = 100\text{mm}$ ,  $H = 40\text{mm}$ , 另储液小槽的半径  $R$  从  $10\text{mm}$  开始, 以  $5\text{mm}$  为间隔, 逐

步增大到  $30\text{mm}$ , 得到  $R$  值不同时微流体运动的速度分布图(见图 6)。当  $R = 10\text{mm}$  和  $R = 15\text{mm}$  时, 出口处微流体速度的量级是  $10^{-2}\text{m/s}$ , 速度的分布也相对均匀, 如图 6 所示。当  $R$  继续增大时, 速度的分布不再均匀, 出口处的流型也不规则。

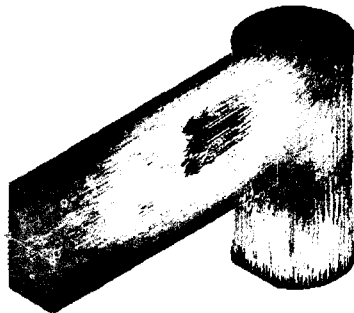


图 6  $R$  设为  $10\text{mm}$  时微流体流动的速度分布图

## 3 结束语

利用 ANSYS 仿真软件中的 FLOTRAN 单元, 研究微流控阵列光开关的控制单元。对控制单元中储液小槽和微管道的尺寸对微流体流速的影响进行仿真和分析, 得出微流道高度及长度、储液小槽高度及半径与微流体流动速度的关系变化情况。微流道长度  $l$  越短, 出口处流体速度越快, 实际制作时要根据对微流体速度的需要及其它因素决定微流道的长度。

综合考虑微流体的速度与稳定性, 微流道的宽度、高度和长度, 以及储液小槽的高度和半径最佳状态的比例为  $1:2:4:4:1$ , 此时微流体的速度与稳定性达到最佳。

## 参考文献:

- [1] 徐 宁, 李若梅, 涂兴华, 等. 基于微流控技术新型光开关器件设计[J]. 南京邮电大学学报, 2009, 29(2): 22-25.
- [2] 陈 陶, 梁忠诚, 黄勇林, 等. 一种基于微流控技术的光开关阵列设计与研制[J]. 光电子激光, 2010, 21(11): 1605-1608.
- [3] Wu C, Lin P, Huang R, et al. Design optimization for micromachined low power Mach-Zehnder therm-optic switch[J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 121-122.
- [4] Ono H, Ito M. All-optical switching in a dye-doped liquid crystal Fabry-Perot device[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40: 206-208.
- [5] Patankar N A, Hu H H. Numerical simulation of electroosmotic flow[J]. Analytical Chemistry, 1998, 70(9): 1870-1881.
- [6] Bianchi F, Ferrigno R, Girault H H. Finite element simulation of an electroosmotic-driven flow division at a T-Junction of microscale dimensions[J]. Analytical Chemistry, 2000, 72

(下转第 200 页)

搜索技术相关产品如表 4 所示。

表 4 搜索技术相关产品分类

| 类别   | 代表厂商                   |
|------|------------------------|
| 平台软件 | TRS, IBM, Autonomy, 天宇 |
| 工具软件 | 万方数据, 海量科技, 同方, 维普     |
| 应用软件 | Microsoft, Google      |

### 3.5 Web2.0 支撑技术

Web2.0<sup>[10]</sup>是抽象的,是一种运营的模式和理念,体现了互联网特定的发展阶段。Web2.0 支撑技术是指支撑 Web2.0 模式的一类技术的合集,它是一套采用开放式开发架构,可极大地丰富互联网应用及信息共享程度的技术体系,最终将允许用户进行端到端的信息创生、发布与共享。面向企业级的服务模式主要包括:Blog、RSS、SNS、Wiki 和 Tags 等。Web2.0 支撑技术产品与服务如表 5 所示。

表 5 Web2.0 支撑技术产品与服务

| 分 类           | 应用领域                  | 发展趋势                                       |
|---------------|-----------------------|--------------------------------------------|
| 面向公众的产品及服务    | 提供基于支撑技术的细分互联网服务      | 软件互联网化; Mash-up                            |
| 面向互联网厂商的产品及服务 | 提供 Web2.0 公司服务的后台解决方案 | 集成所有应用及服务,使得 Web2.0 技术及服务易于部署;朝个人用户客户端方向演化 |
| 企业级产品及服务      | 提供 Web2.0 技术的基础平台     | 以人际互动为核心对信息资源进行整合,重构企业管理模式;与 SOA 的融合       |

Web2.0 的理念在信息资源整合中的作用体现在 5 个方面:

- (1)极大地增强了信息资源整合的技术手段;
- (2)拓展了信息资源整合的范围;
- (3)使信息传播结构去中心化;
- (4)降低了信息发布的成本,刺激了信息内容的创生;
- (5)使企业信息与公众信息的资源整合成为可

能<sup>[11,12]</sup>。

## 4 结束语

随着 IT 业的迅猛发展,IT 服务正成为 IT 业的基础行业,在未来 5 到 10 年,我国的 IT 服务业将以 2 位数的速度发展,IT 服务业将进入一个黄金期<sup>[1]</sup>。IT 服务业的发展对 IT 服务信息资源的共享提出了要求,通过信息资源整合技术消除信息孤岛,更好地满足 IT 服务业信息资源共享的需求,同时也对信息资源整合的技术提出了更高的要求。

### 参考文献:

- [1] 中国政府采购网. 业内称未来 10 年 IT 服务业将以两位数速度发展[EB/OL]. 2010-11-19. [http://www.ccgp.gov.cn/gysh/itch/schq/201011/t20101119\\_1420055.shtml](http://www.ccgp.gov.cn/gysh/itch/schq/201011/t20101119_1420055.shtml).
- [2] 黄晓斌,夏明春. 数据资源整合研究的现状及发展方向[J]. 图书情报工作,2005(1):75-77.
- [3] 郑胜利. 网络信息资源整合的战略分析[J]. 中国图书馆学报,2006(2):69-72.
- [4] 柳纯录. 信息系统监理师教程[M]. 北京:清华大学出版社,2005.
- [5] 张文德,戴晓翔. 信息资源整合系统与技术研究[J]. 现代图书情报技术,2003(6):71-73.
- [6] 张云勇. 中间件技术原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [7] 顾君忠. 计算机支持的协同工作导论[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [8] 柳纯录. 系统集成项目管理工程师教程[M]. 北京:清华大学出版社,2009.
- [9] 李晓明,闫宏飞,王继民. 搜索引擎-原理、技术与系统[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [10] 宋丽华,刘方爱. 基于 Web Service 的网格服务功能的研究[J]. 计算机技术与发展,2009,19(7):59-61.
- [11] WebService[EB/OL]. 2005-04-13. <http://www.w3.org/2002/ws/>.
- [12] 谭永明,苏 斌. 面向服务架构体系的研究[J]. 计算机技术与发展,2007,17(3):132-134.

(上接第 196 页)

- (9): 1987-1993.
- [7] Zankovych S, Hoffmann T, Seekamp J, et al. Nanoimprint Lithography: Challenges and Prospects[J]. Nanotechnology, 2001, 12(2): 91-95.
- [8] 朗 道. 流体力学[M]. 北京:中国友谊出版公司,2006.
- [9] 章维一,侯丽雅. 微系统领域的关键技术[J]. 中国机械工程,2000(11): 1305-1312.
- [10] Liu J Q, Tai Y C, Pong K C. Micro-machined channel/pressure sensor systems for micro flow studies[C]//Technical Di-

gestion of Transducer 93 Conference. [s. l.]: [s. n.], 1993: 995-997.

- [11] 李站华,崔海航. 微尺度流动特性[J]. 机械强度,2001,23(4): 476-480.
- [12] Fouquet J E. Compact optical cross-connect switch based on total internal reflection in a fluid droplets for microfluidic application[J]. Applied Physics Letters, 2000, 77(11): 1725-1726.