

doi: 10.3788/gzxb20164507.0723002

微流控双稳振荡器光开关

吴雯婷, 梁忠诚, 仇乐, 赵瑞, 孔梅梅

(南京邮电大学 光电工程学院 微流控光学技术研究中心, 南京 210023)

摘 要: 针对光开关集成化、微型化、低能耗的要求, 设计了一种微流控双稳振荡器 1×2 型光开关, 其两个输出端口的插入损耗分别为 1.03 dB 和 0.18 dB. 微流控双稳振荡器由对称级联的两个常闭阀构成, 光开关由三段嵌入在振荡器输出端的光纤波导构成, 通过改变注射泵驱动微器件中液体流动的速率可以控制光开关的开关周期. 利用有限元分析软件对影响开关周期的因素进行了仿真研究. 结果表明, 当液体的注入流速从 0.2 mm/s 增大到 1.0 mm/s 时, 开关周期从 1.25 s 减小到 0.26 s, 周期占空比约为 0.5. 阀的阈值与开关时间常量呈线性关系. 随着常闭阀阀座的增宽, 开关周期变长; 阀的宽长比增大, 开关周期减小; 振荡器的不对称设计可以调节周期的占空比. 通过调节入口流速和阀的阈值特性, 可以设计特定频率的光开关, 这为单入多出、多入多出光开关的后续研究提供了依据.

关键词: 微流控; 光开关; 仿真; 常闭阀; 双稳振荡器; 阈值特性

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0723002-6

Optical Switch Based on Microfluidic Bistable Oscillator

WU Wen-ting, LIANG Zhong-cheng, ZHANG Le, ZHAO Rui, KONG Mei-mei

(Center of Optofluidic Technology, School of Optoelectronic Engineering,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: An optofluidic switch based on microfluidic bistable oscillator was designed, which is conducive to keep up with the trends of integration, miniaturization and low power consumption. The insertion loss of the two optical outputs are 1.03 dB and 0.18dB, respectively. Microfluidic bistable oscillator consists of two symmetrical cascaded normally closed micro-valves, the optical switch is made up of three embedded optical fiber waveguides in the oscillator output part. A micro-syringe pump is used to drive the liquid and finally control the states of the switch. The impact factors of switching cycles were studied by using simulation software. The results show that when the injecting flow rate changes from 0.2 mm/s to 1.0 mm/s, the switching cycle is reduced from 1.25 s to 0.26 s. Simultaneously, the duty cycle is approximately 0.5 owing to the symmetrical design. The threshold of valve is providing the linear relationship with the switching time constants. With the widening of the normally closed valve seat, switching cycle is increased; with the decrease of valve aspect ratio, switching cycle is reduced. Moreover, asymmetrical design of the valves can adjust the duty cycle of the micro-oscillator. By adjusting the threshold characteristic of the valve and changing the inlet flow rate, an optical switch with specific frequency as need can be designed.

Key words: Microfluidic; Optical switch; Simulation; Normally closed valve; Bistable oscillator; Threshold characteristics

OCIS Codes: 230.3990; 130.4815; 220.4000; 350.3950

基金项目: 江苏省光通信工程技术研究中心项目(No. ZSF0402)和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(No. CXZZ13_0465)资助
第一作者: 吴雯婷(1988-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为微流控光学器件和微流控等效电路理论. Email: 2012030229@njupt.edu.cn
导师(通讯作者): 梁忠诚(1958-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为微流控光电子技术. Email: zcliang@njupt.edu.cn
收稿日期: 2015-12-31; 录用日期: 2016-03-11

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

在光纤通信系统中,光开关作为影响光网络性能的核心器件^[1-4],可以在网络出现拥堵时通过自动保护功能提高系统的可靠性^[5-7].近年来,微流控技术已经在微电子、新材料、生物化学等研究领域逐渐发展起来,并因其具有微型化、集成化等优点而成为研究热点^[8-10].微流控光开关^[11-12]和微电子机械系统(Micro-electromechanical Systems, MEMS)光开关^[13-14]相比,无机械磨损、寿命更长、可靠性好、稳定性高、结构简单,有利于光开关集成化和微型化.

目前微流控光开关基本是以全内反射原理进行设计的,例如 Agilent 气泡光开关^[15]具有毫秒级交换速度、偏振不敏感性、低串扰、高消光比的特性;2013年, Brammer 等提出的线性驱动微流控光开关^[16]可以将光耦合进4根相互垂直的光纤中,耦合损耗小、隔离度高、可靠性好,但其开关时间长;2014年, Brandhoff 等设计了一款液滴型可调式光开关^[17],可实现 8×1 多路复用器,其交换速度快,结构简单但开关比小.

本文设计了微流控双稳振荡器光开关,整个器件由微振荡器和光开关两部分组成.采用微流控等效电路理论(Equivalent Circuit Theory, ECT)进行理论分析^[18].重点研究了振荡器的振荡周期对光开关周期的影响,并给出了调节开关周期的方案.

1 器件制作方案

微流控双稳振荡器光开关的制作采用软光刻技术完成,器件材料选用具有良好光化学性质的聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS),其折射率 $n_{\text{PDMS}} = 1.45$.薄膜与阀座间采用生物分子表面涂覆技术以减小粘力,其余表面进行等离子体处理,以增强粘附性,提高封装时的键合效果.整个器件包含三层结构:上层(主结构层)-薄膜层-底层(反馈层).流道高度 H 统一为 $60 \mu\text{m}$,薄膜厚度 $h = 40 \mu\text{m}$,阀宽 $W = 1 \text{ mm}$,阀长 $L = 1 \text{ mm}$,阀座宽 $L_2 = 200 \mu\text{m}$.

图1为常闭阀(Normally Closed Valve, NCV)的制作流程:1)制作薄膜层和底层,并将其进行表面等离子体处理;2)键合;3)将键合后的两层结构从载玻片

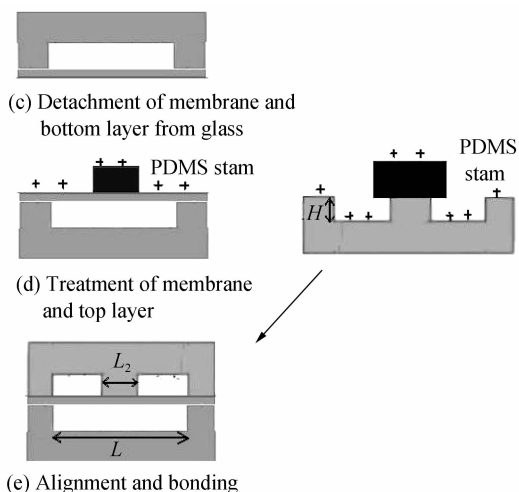


图1 NCV制作流程

Fig. 1 Fabrication process of NCV

上剥离;4)制作上层,并进行表面等离子体处理,PDMS印章下的表面采用生物分子表面涂覆技术以减小粘力;5)三层结构对准后键合.

2 器件工作原理

2.1 常闭阀的结构和工作原理

在微流控 ECT 中,流阻等效于电阻,常闭阀 NCV 等效于场效应晶体管(Junction Field Effect Transistor, JFET)^[19-21]. NCV 的工作性能与 P 型 JFET 的开关性能相似^[18].图2(a)是阀的三维视图,图2(b)是阀的俯视图和截面图.沿电路中的定义,将阀的3端接口分别命名为源极(Source, S);栅极(Gate, G)和漏极(Drain, D). P_s 代表S端压力, P_c 代表D端压力,

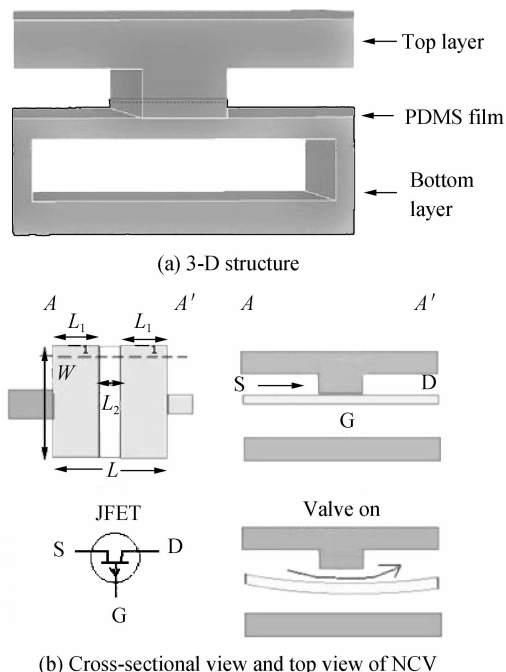


图2 NCV的结构示意

Fig. 2 Sketches of NCV

当 $P_S < P_G$ 时,液体无法从 S 端流向 D 端,阀“关”;当 $P_S > P_G$ 时,薄膜向下变形,液体顺利从 S 端流向 D 端,阀“开”.定义阀的阈值压力 $P_{th} = P_S - P_G$.

2.2 微振荡器的结构和工作原理

在微振荡器模型中,两个相同尺寸的 NCV 通过对称的方式相互连接:阀 1 的 G 端通过连接通道与阀 2 的 D 端相连,阀 2 的 G 端与阀 1 的 D 端相连.这种连接方式使得两个阀门以相反的方式开启和关闭.例如,当阀 1 打开时,阀 2 的 G 端受到阀 1D 端的反馈压力,关闭阀 2,如图 3(a).图 3(b)中的灰色代表压力,此时的压力分布对应阀 1 打开-释放压力,但阀 2 关闭-积聚压力仍未达到阈值的状态.阀 1 和阀 2 分别控制透明水溶液(折射率 $n_w = 1.33$)和疏水性苯丙噻唑(Benzothiazole)液体(折射率 $n_b = 1.64$)的流通,利用全反射原理在输出端对光路进行控制.图 3(c)是微振荡器部分对应的等效电路图,其中,各段流阻等效为电阻,而 NCV 等效为 JFET.

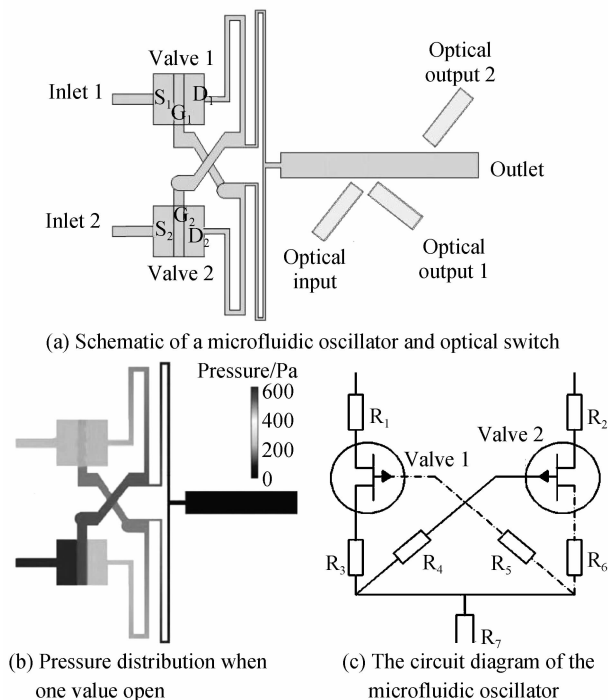


图 3 微振荡器 1×2 光开关示意

Fig. 3 Schematic of 1×2 optical switch based on microfluidic oscillator

为了使振荡器成功启振,可以先利用图 3(c)所示的等效电路图进行电路分析,如果振荡现象不明显,则可以通过调整各段的流阻值来提高振荡效果.根据流体系统的 Hagen-Poiseuille 定律,得出矩形管的流阻计算公式以及正方形薄膜的流阻计算公式^[18],分别为

$$R = \frac{12\mu l}{1 - 0.63(H/w)} \frac{1}{H^3 w} \quad (1)$$

$$C = \frac{6W^6(1-\gamma^2)}{\pi^4 E h^3} \quad (2)$$

式中, w 为流道的宽度, l 为流道长度, μ 为粘度系数, γ

为泊松比, E 为杨氏模量.

2.3 1×2 光开关的工作原理

本文设计的是单入双出式光开关,如图 4. θ_c 为全反射临界角,当微振荡器输出端输出水,光输入端以 $\theta = 66.53^\circ$ ($\geq \theta_c = \arcsin(n_w/n_{PDMS})$) 入射角入射时,发生全反射,光从输出端口 1 出射,如图 4(a);当振荡器输出苯丙噻唑液体时,光发生折射从输出端口 2 出射,偏移距离 $d = 705.75 \mu\text{m}$,如图 4(b).

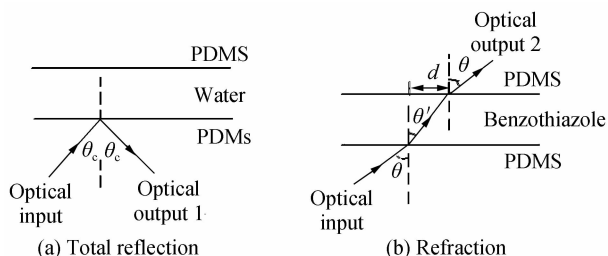


图 4 光开关的工作原理

Fig. 4 The working principle of optical switch

如果把水替换成另一种折射率高于 PDMS 的材料,则介质分布不满足全反射条件,振荡器输出的两种液体的光路图应该都和图 4(b)一致,此时两个光路在同侧以不同的透射点输出.此外,若另一种液体的折射率和苯丙噻唑溶液折射率非常接近,那么所提出的折反式 1×2 光开关将无法很好地工作.要解决这个问题,可以将折反式光开关变成透射式光开关,即向其中一种溶剂中添加黑墨水,而另一种保持较高的透明度,那么两种液体交替输出时,就可以实现光路的通断.但是这样的透射式光开关只能控制一路光信号,降低了开关性能.

根据菲涅尔公式对 TE 和 TM 偏振光反射系数的描述^[22],计算得到,全反射时,光输出端口 1 的反射率为 0.79;透射时,光输出端口 2 的透射率为 0.96.

插入损耗定义为

$$IL = -10 \log \frac{P_{out}}{P_{in}} \text{ (dB)} \quad (3)$$

式中, P_{out} 为输出端口的光功率, P_{in} 为输入端口的光功率.计算得到输出端口 1 的插入损耗为 1.03 dB,输出端口 2 的插入损耗为 0.18 dB.

消光比定义为

$$EXT = 10 \log \frac{P_{1'}}{P_{0'}} \text{ (dB)} \quad (4)$$

式中, $P_{1'}$ 为入射光透射时的透过率, $P_{0'}$ 为入射光全反射时的透过率.由式(4)计算得出光输出端口 2 的消光比约为 6.6dB.

3 结果与分析

3.1 开关周期的形成

图 5 是阀 1 和阀 2 的 S 端压力振荡曲线,展示了两个阀的交替开/关状态.当阀 1 达到阈值打开后, P_{S1} 开

始释放减小,液体顺利从入口流向出口;相反地,此时阀2的G端将阀关闭,而入口的液体仍在注入, P_S 开始积聚增大.当阀2中S端的压力增大至阈值时阀2打开,此后开始重复之前阀1的过程,而阀1则是重复之前阀2的步骤.如此的交替变换就形成了振荡,这一振荡周期即是开关的响应周期.当阀1和阀2尺寸相同且对称级联时,所得的开关周期占空比约为0.5,如图5.

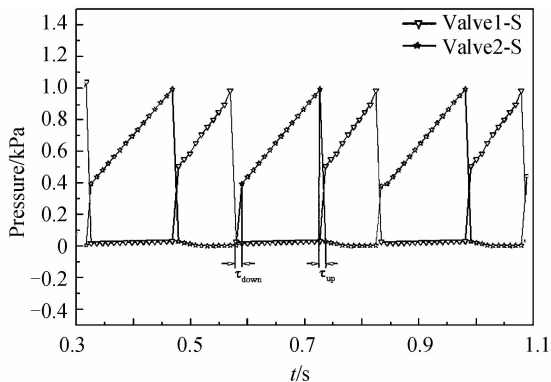


图5 S端的压力振荡曲线

Fig. 5 Pressure oscillation curve of sources

定义时间常量 τ 为开关上升时间 τ_{up} 与下降时间 τ_{down} 之和. 当入口液体流速为 1.0 mm/s 时, τ_{up} 与 τ_{down} 均为 10ms, 如图 5. 开关时间常量 τ 与阀的阈值呈线性关系, 阈值越大, τ 越大.

显然开关的响应周期与振荡器入口处液体的注入速度、阀的阈值(即阀的材料和几何参量)以及流道的几何参量有关. 在固定流道几何参量的情况下, 研究入口流量和阀的阈值对开关周期的影响, 本文采用有限元分析软件(COMSOL 多物理场耦合分析软件)来模拟分析入口流量对器件开关周期的影响. 对 NCV 独立建模, 分析薄膜变形对薄膜与阀底间接触压力的影响, 研究阀的几何参量与阈值的关系.

3.2 入口流量对开关周期的影响

从图 3(b)可以看出整个器件设计时采用对称结构, 为了尽量简化外部装置, 两个入口采用同一个注射泵以相同的速度注入液体. 当入口流量过大或过小时, 振荡结果出现严重畸变, 器件失效. 图 6 是入口速度从

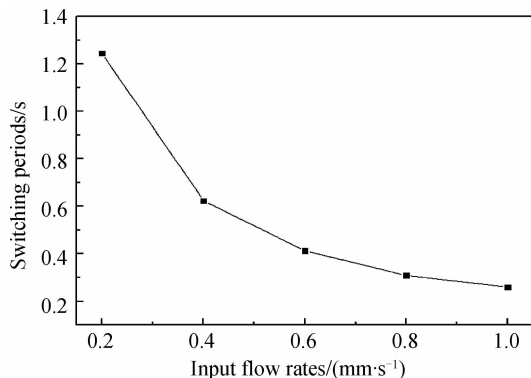


图6 入口流速与开关周期的关系

Fig. 6 Relationship between inlet velocity and switching period

0.2 mm/s 增加到 1.0 mm/s 时的开关周期曲线, 开关周期从 1.25 s 减小到 0.26 s. 从图中可以看出, 入口速度按照线性变化时开关周期以非线性关系下降, 因此可以按照周期需求选用相应的入口流速.

3.3 阀的阈值对开关周期的影响

建模时, 将阀的 S, G 和 D 端的压力分别设置为 10、5 和 0 kPa. 图 7 展示了 NCV 简易模型的三维图和侧视图, 可以看出由于 $P_S > P_G$, S 端区域的薄膜向下变形, 这一变形促使了阀的开启.

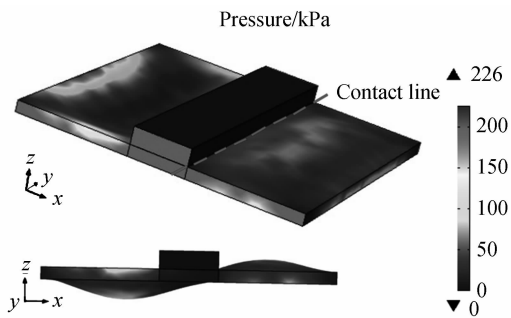


图7 弹性膜的变形仿真图

Fig. 7 Membrane deformations obtained by simulation

图 8 是阈值压力与开关周期的关系曲线, 可以看出阈值压力与开关周期呈线性变化关系, 阈值越小, 开关周期越短. 而 NCV 中的几个几何参量(见图 2(b))与器件的阈值压力密切相关, 因此将对 W 和 L_2 这两个参量分别进行研究.

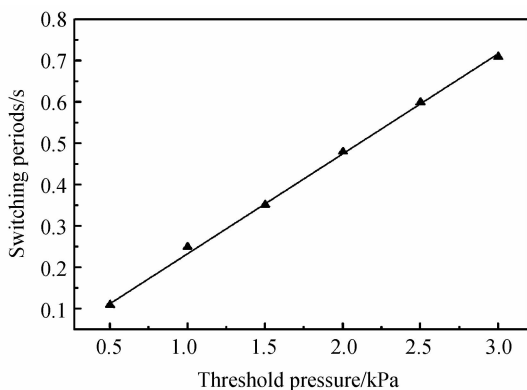
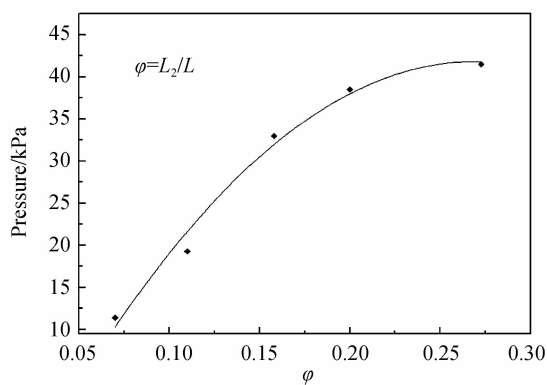


图8 阈值压力与开关周期的关系

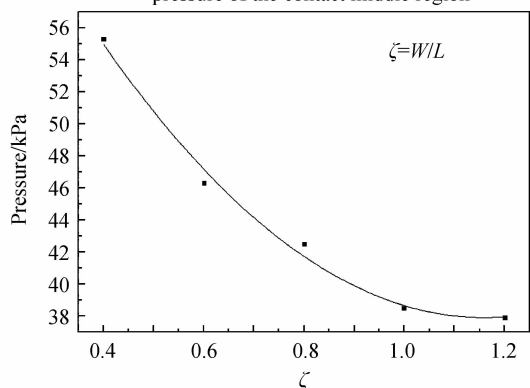
Fig. 8 Relationship between threshold pressure and switching period

在固定阀宽 W 和阀长 L_1 的情况下, 分析了阀座宽 L_2 对阈值的影响; 以及 L 固定时 W 对阈值的影响. 此处定义两个无量纲长度参量 $\varphi = L_2/L$ 和 $\zeta = W/L$ 来表示长度参量与阈值的关系, 如图 9.

图 9(a) 和图 9(b) 分别是不同 L_2 长度和不同 W 宽度下, 无量纲长度参量与接触线中间区域的平均压力的关系曲线. 由图可以看出随着 φ 的增大, 阀的开启阈值压力增大; 随着 ζ 的增大, 开启阈值压力减小. 综合分析可知: 通过增加器件的入口流量, 减小 φ , 增大 ζ , 可以减小开关周期, 反之可以增加开关周期.



(a) Relationship between φ and the average pressure of the contact middle region



(b) Relationship between ζ and the average pressure of the contact middle region

图9 无量纲长度参量(φ, ζ)与接触线中间区域的平均压力关系曲线

Fig. 9 Relationship between the dimensionless length parameters (φ, ζ) and the average pressure of the contact middle region

图10是在阀宽 W 和阀长 L_1 不变时,阀座 L_2 的变化对接触压力的影响。接触线是薄膜上的一条直线(见图7)。由图10可以看出,随着 L_2 的减小,接触压力变小,NCV越容易开启,器件的开关周期变短。另外,接触线中间区域的接触压力小于两边压力,因此NCV中最先打开的部分是阀座下薄膜的中间部分。

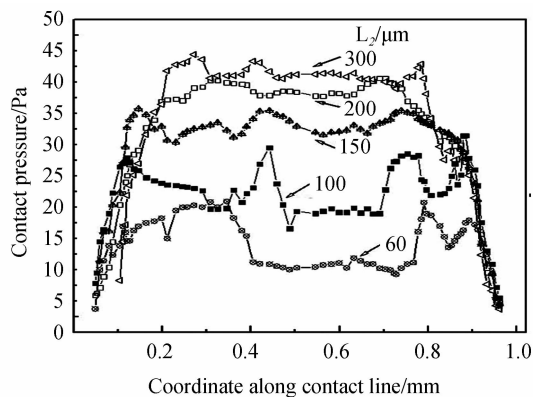


图10 接触压力的仿真曲线图

Fig. 10 Contact pressure profiles obtained by simulations

3.4 性能与误差分析

提出的微流控双稳振荡器光开关是在理论和仿真

的基础上研究的,所得的数据偏于理想化。但是由于仪器、实验条件、环境等因素的限制,测量不可能无限精确,物理量的测量值与理论值之间总会存在一定的差异,这些测量误差是不可能绝对避免的。在工程实验中对流阻和流容的计算会因为各个参量的测量误差而对整个器件的性能有所影响,比如:器件制作过程中掩膜板的制作存在一定的误差(以2540 dpi的光绘机为例,误差为 $\pm 5 \mu\text{m}$);粘滞系数 μ 受温度以及流体杂质的影响较大(一般认为实验在常温下进行,并忽略流体杂质对 μ 的影响); H, h, w 等尺寸参量受测量方法的影响较大(若采用扫描电子显微镜,测量准确度在纳米级,可忽略其误差的影响)。这些误差都会影响最后光开关的周期控制。更详细的误差分析需要结合工程实验进行。

对于所设计的光开关,开关时间较长是其主要的缺点,在所研究的范围内开关时间大于200 ms,因此只适用于速率要求较低的情况。通过降低阈值,增大入口液体流速,可以适当缩短开关时间。由于器件本身没有可移动的部件,因此开关的可靠性和稳定性较好。

4 结论

本文提出了一种基于微流控双稳振荡器的光开关,具有较好的可靠性和稳定性,损耗较低,制作简单。研究发现,利用微流控ECT可以对微流体器件进行电路分析,并得到光开关的转换周期。影响开关周期的主要因素有入口流速和NCV的阈值特性,通过增加入口流量,减小 φ ,增大 ζ ,可以缩短开关周期,反之可以延长开关周期。设计的振荡器阈值特性较好,结构简单,且采用对称结构设计,所得的开关周期占空比约为0.5。此外,若采用两个结构或尺寸不一样的NCV,可以使占空比得到调节,后续将对此做进一步的研究。

参考文献

- [1] YANG A H, ERICKSON D. Optofluidic ring resonator switch for optical particle transport [J]. *Lab on a Chip*, 2010, **10** (6): 769-774.
- [2] LI H, WONG T N, NGUYEN N T. Microfluidic switch based on combined effect of hydrodynamics and electroosmosis [J]. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2011, **10**(5): 965-976.
- [3] TSAI C H, TSAI J C. MEMS optical switches and interconnects [J]. *Displays*, 2015, **37**: 33-40.
- [4] ZHANG Zhong-yi, WU Bao-jian, WEN Feng, et al. Research on polarization dependent loss of micro ring resonator based optical switches [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44** (7): 0713002.
张中一, 武宝剑, 文峰, 等. 微环光开关的偏振相关损耗研究 [J]. *光子学报*, 2015, **44**(7): 0713002.
- [5] LI Hong-zhe, SHENG Chuan-xiang, LI Shen-bo, et al. Phase transition properties of vanadium oxide thin films irradiated by nanosecond laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**(05): 27059001.
李宏哲, 盛传祥, 厉申博, 等. 纳秒激光作用下二氧化钒薄膜相变特性 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, **27**(05): 27059001.

- [6] FU Bo, ZHANG Da-yong, LUO Fei, *et al.* Design of a low voltage driving electro-optical switch[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **24**(02): 312-314.
付博, 张大勇, 罗飞, 等. 一种低驱动电压的电光开关设计[J]. *强激光与粒子束*, 2011, **24**(02): 312-314.
- [7] HU Yun, ZHAO Xue-qing, XUE Quan-xi, *et al.* High contrast ratio ultraviolet electro-optical switch [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, **25**(03): 561-564.
胡云, 赵学庆, 薛全喜, 等. 高对比度紫外电光削波开关[J]. *强激光与粒子束*, 2013, **25**(03): 561-564.
- [8] WU Wen-ting, LIANG Zhong-cheng, ZHANG Le. Optofluidic varifocal microlens [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(6): 718-723.
吴雯婷, 梁忠诚, 仇乐. 可调微流控光学变焦透镜[J]. *发光学报*, 2015, **36**(6): 718-723.
- [9] ZHAO Rui, HUA Xiao-gang, TIAN Zhi-qing, *et al.* Electrowetting-based variable-focus double-liquid lens [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, **22**(10): 2592-2597.
赵瑞, 华晓刚, 田志强, 等. 电润湿双液体变焦透镜[J]. *光学精密工程*, 2014, **22**(10): 2592-2597.
- [10] LIANG Zhong-cheng, XU Ning, TU Xing-hua, *et al.* Novel integrated device of optofluidic variable-focus microlens array [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(9): 32-35.
梁忠诚, 徐宁, 涂兴华, 等. 新颖的微流控光学变焦透镜阵列集成器件[J]. *光电工程*, 2008, **35**(9): 32-35.
- [11] CHEN Tao, LIANG Zhong-cheng, XU Ning, *et al.* Novel space optical switch device of optofluidic[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(5): 797-801.
陈陶, 梁忠诚, 徐宁等. 新颖的微流控电调谐空间光开关[J]. *光子学报*, 2010, **39**(5): 797-801.
- [12] LIANG Zhong-cheng, ZHAO Rui. Optofluidics and its potential applications[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(6): 16-23.
梁忠诚, 赵瑞. 微流控光学及其应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(6): 16-23.
- [13] ZHAO Ji-de, LI Ying-liang. MEMS switch of AON[J]. *Laser Journal*, 2005, **26**(3): 10-12.
赵继德, 李应良. 全光网络中的 MEMS 光开关[J]. *激光杂志*, 2005, **26**(3): 10-12.
- [14] ZHAO Bo. Research on design and analysis technology of the OXC oriented MEMS optical switch[D]. Nanjing: Southeast University, 2004.
赵波. 面向 OXC 的 MEMS 光开关设计与分析技术[D]. 南京: 东南大学, 2004.
- [15] FOUQENT J E. Compact optical cross-connect switch based on total internal reflection in a fluid-containing planar light wave circuit [C]. Technical Digest of OFC. Germany: Munich, 2000, 204-206.
- [16] BRAMMER M, MEGNIN C, VOIGT A, *et al.* Modular optoelectronic microfluidic backplane for fluid analysis systems[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2013, **22**(2): 462-470.
- [17] BRANDHOFF L, AKHTAR M, BÜLTERS M, *et al.* Running droplet optical multiplexer [J]. *Optofluidics, Microfluidics and Nanofluidics*, 2014, **1**(1): 62-68.
- [18] BRUUS H. Theoretical microfluidics[M]. Denmark: Oxford University Press, 2008.
- [19] LESLIE D C, EASLEY C J, SEKER E, *et al.* Frequency-specific flow control in microfluidic circuits with passive elastomeric features[J]. *Nature Physics*, 2009, **5**(3): 231-235.
- [20] MOSADEGH B, KUO C H, TUNG Y C, *et al.* Integrated elastomeric components for autonomous regulation of sequential and oscillatory flow switching in microfluidic devices[J]. *Nature Physics*, 2010, **6**(6): 433-437.
- [21] DEVARAJU N S G K, UNGER M A. Pressure driven digital logic in PDMS based microfluidic devices fabricated by multilayer soft lithography[J]. *Lab on a Chip*, 2012, **12**(22): 4809-4815.
- [22] LAPSLEY M I, LIN S S, MAO X, *et al.* An in-plane, variable optical attenuator using a fluid-based tunable reflective interface[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(8): 083507.