

# 激光冲击波驱动的新型微泵数值模拟

程华旻<sup>1,2</sup> 熊良才<sup>1,2</sup> 姜 洪<sup>1,2</sup> 车志刚<sup>3</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074  
<sup>2</sup>武汉光电国家实验室(筹), 湖北 武汉 430074  
<sup>3</sup>北京航空制造工程研究所, 北京 100024

**摘要** 针对传统微泵结构复杂、制备困难等不足,提出了一种新型的基于激光冲击波力学效应的微泵驱动方法,使用该方法设计的微泵结构简单、易于制造、成本低,有利于微型化及与微机电系统(MEMS)集成。通过研究激光冲击波的力学模型,设计了无阀型微泵,并计算出其耦合模态。验证了该驱动方法的可行性;通过流固耦合仿真研究了激光的频率、占空比、功率密度、光斑直径等参数对微泵流量的影响,并进一步分析了流量的稳定性。研究结果表明,功率密度和光斑直径是影响流量的主要因素,占空比为 0.6 时微泵流量最大,微泵稳定工作后各脉冲流量相差不超过 5%。

**关键词** 光学制造;激光冲击波驱动;微泵;流固耦合;激光参数

**中图分类号** TN249;TH323 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0403002

## Simulation Study of a Novel Micropump Basing on Laser-Induced Shock Waves Actuated

Cheng Huayang<sup>1,2</sup> Xiong Liangcai<sup>1,2</sup> Jiang Hong<sup>1,2</sup> Che Zhigang<sup>3</sup>

<sup>1</sup> School of Mechanical Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China  
<sup>2</sup> Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan, Hubei 430074, China  
<sup>3</sup> Aeronautical Manufacturing Technology Research Institute, Beijing, 100024, China

**Abstract** Aiming at the deficiency which traditional micropump structures are complex, and difficult to fabricate, a novel actuating approach is proposed basing on mechanical effect of laser-induced shock waves, micropump designed by this approach has the characteristics of simple structure, ease to manufacture, low cost and the benefit of miniaturization and integration with micro electro mechanical system (MEMS) system. The modal of surface pressure produced by laser induced shock waves is investigated. The valve-less micropump is designed, and its coupling modal is calculated. The feasibility of this actuated approach is validated. The influence of laser parameters (frequency, duty cycle, intensity, spot diameter) on flow rate is analyzed by the fluid-structure interaction simulation and the stability of flow rate is also investigated. The result reveals that laser intensity and spot diameter are the main influencing factors on the flow rate, flow rate maximizes when duty cycle is 0.6, the difference of flow rate at each single pulse is less than 5% at steady operation.

**Key words** laser fabrication; laser-induced shock waves actuated; micropump; fluid-structure interaction; parameter of laser

**OCIS codes** 220.4000; 120.4140; 120.4610

## 1 引 言

作为微流体系统的驱动源、微流体系统的核心

部件,近 30 年来,人们对微泵开展了大量的研究,并已在微全分析系统、药物传输、微芯片冷却、燃料电

**收稿日期**: 2010-09-15; **收到修改稿日期**: 2010-12-07

**基金项目**: 国家自然科学基金(50975113)资助课题。

**作者简介**: 程华旻(1985—),男,硕士研究生,主要从事微流体设备及激光应用等方面的研究。

E-mail: chy1002002@126.com

**导师简介**: 熊良才(1968—),男,博士,副教授,主要从事微机电系统方面的研究。E-mail: lcx@hust.edu.cn(通信联系人)

池<sup>[1,2]</sup>等领域进行了广泛的应用。在微泵的研究中,关于微泵驱动方式的探讨占据了重要的地位,学者们提出了大量可行的驱动机理,包括适用于往复式微泵的压电、静电、电磁、热气动、形状记忆合金等驱动方式和适用于特殊应用场合和流体介质的电流体动力(EHD)、磁流体动力(MHD)、电渗流、电浸润、光致动等驱动方式<sup>[2]</sup>。

目前应用较多的往复式微泵的驱动方式为压电<sup>[3]</sup>、电磁<sup>[4]</sup>、静电<sup>[5]</sup> 3种。压电驱动微泵驱动力大,响应快,出口压强高,但其制造工艺复杂,工作时驱动电压高;电磁驱动微泵泵膜变形量大,频率调节范围广,响应快,但其能耗高,热损大,而且相对于其他类型微泵,电磁驱动微泵体积大,不利于微型化;静电驱动方式能耗低,响应快,但其泵膜变形量小,结构复杂。由此可见,传统微泵存在尺寸不易微型化、结构复杂、制备困难等不足,难以满足一些特殊场合的需要,尤其是微机电系统(MEMS),因而迫切需要研究新的微泵驱动方式。

自从激光器发明以来,激光的应用就层出不穷,除传统的利用激光与物质相互作用的热效应来进行激光加工外,如何利用激光对物质的力学效应来驱动物质运动成为了一大新的研究热点,发展出了包括激光推进微小卫星发射及仪态调整<sup>[6,7]</sup>、激光驱动飞片成形、安全起爆<sup>[8]</sup>、激光冲击强化<sup>[9,10]</sup>等领域。本文正是利用激光冲击波传播的驱动效应,提出了一种利用激光冲击波的力学效应来驱动微泵的新方法,利用激光驱动不仅具有能量利用效率高,可无线和远程控制,没有电磁干扰等优点;而且,相对于传统方法驱动的微泵,使用该方法驱动的微泵具有结构简单、使用方便、可替换性强、制造工艺少、成本低、体积小、有利于微型化及与 MEMS 集成等优点。利用数值模拟方法研究了激光的不同参数对微泵性能的影响,验证了激光冲击波驱动微泵的可行性,为进一步的制造和后续实验的参数优化设计提供了理论依据。

## 2 激光驱动原理

在微泵泵膜上溅射一层金属膜或者涂覆一层黑色涂层,称之为牺牲层。当激光辐照于该表面时,牺牲层在极短时间内吸收了激光的高密度能量,会瞬间气化,并迅速膨胀,产生一层等离子体爆炸气团,该气团一方面吸收激光能量,保护泵膜不受激光的直接作用;另一方面在膨胀和冷却的过程中对泵膜施加一个冲击波的作用,使其产生弹性变形,通过泵

膜的压缩与回弹,在泵腔内形成挤出与吸入流体的过程,从而泵送流体,如图 1 所示。

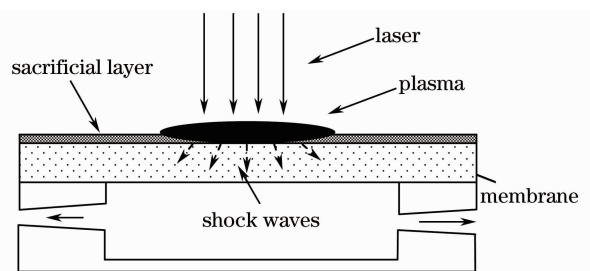


图 1 激光驱动原理示意图

Fig. 1 Schematic of laser actuated principle

## 3 微泵的有限元分析

采取平面无阀式微泵设计,无阀式微泵是基于流体在扩张/收缩管不同方向上流阻不同的原理进行工作的,其结构简单,易于制造。微泵结构示意图如图 2 所示。图中  $R_1$  为入口的半径, $R_2$  为泵腔的半径, $R_3$  为扩张管入口处的圆角半径, $L$  为扩张管的长度, $H$  为扩张管入口宽度, $\theta$  为扩张管扩张半角。图中入口与出口圆孔半径相同。

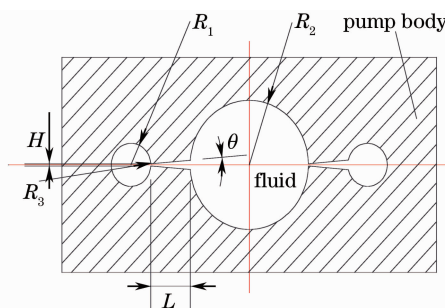


图 2 无阀式微泵结构示意图

Fig. 2 Structure schematic of valveless micropump

### 3.1 微泵的有限元模型

取  $R_1 = 2 \text{ mm}$ ,  $R_2 = 6 \text{ mm}$ ,  $R_3 = 0.02 \text{ mm}$ ,  $L = 2 \text{ mm}$ ,  $H = 0.1 \text{ mm}$ ,  $\theta = 5^\circ$ , 泵腔高度为  $0.1 \text{ mm}$ , 泵膜半径与泵腔相同,厚度为  $0.1 \text{ mm}$ 。泵膜四周固支在泵体上,建立的有限元模型如图 3 所示。

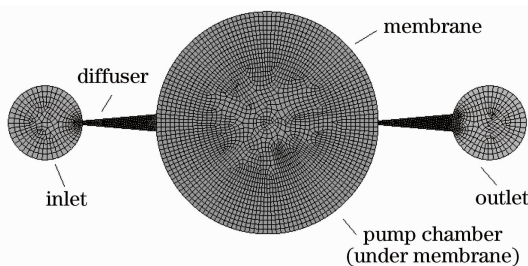


图 3 微泵的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of micropump

### 3.2 微泵的耦合模态

微泵泵膜材料为硅,弹性模量为 168 GPa,密度为 2350 kg/m<sup>3</sup>,泊松比为 0.3。

微泵输送流体时,流体附加质量和流体阻尼的存在会改变微泵的模式<sup>[11,12]</sup>。利用有限元方法计算输送流体分别为无介质、空气和水等情况下的耦合模态。其前 6 阶振型如图 4 所示,振型与传输介质无关;其前 6 阶固有频率如表 1 所示。

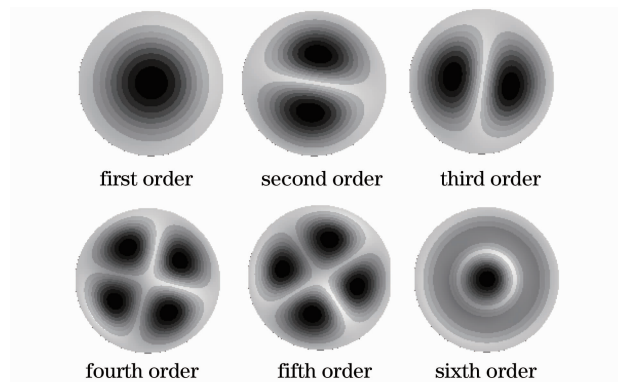


图 4 泵膜的前六阶振型

Fig. 4 First six vibration mode of pump membrane

表 1 微泵的固有频率

Table 1 Natural frequency of micropump

|              | No fluid<br>(vacuum) /Hz | Coupling with<br>water /Hz | Coupling with<br>air /Hz |
|--------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| First order  | 44689                    | 5736                       | 39173                    |
| Second order | 92640                    | 18889                      | 51568                    |
| Third order  | 92814                    | 18926                      | 68625                    |
| Fourth order | 151510                   | 34200                      | 93140                    |
| Fifth order  | 151840                   | 39701                      | 93320                    |
| Sixth order  | 172850                   | 41098                      | 97679                    |

无阀微泵属于容积式泵,在泵膜的各阶振型中,只有一阶振型适合无阀微泵工作。

由表 1 可知,当流体介质为水时,其一阶耦合固有频率 5736 Hz,仅为结构固有频率 46290 Hz 的 12.4%,与文献[9,10]中提及的耦合固有频率下降为结构固有频率的 1/10 较为符合;当流体介质为空气时,其一阶固有频率为结构固有频率的 85%,下降不大,这是因为空气的附加质量和空气阻尼均小于水。

使用激光驱动微泵时,需要根据流体介质的不同,选择不同的激光脉冲频率以获得最大的流量。

### 3.3 边界条件

由于微泵的流速较小,雷诺数小于 1000,故假定微泵内的流体是不可压缩的,其流动属于层流。

将泵膜与流体的接触面设置为流固耦合面,在

此面上流体和固体交换位移和压力。出、入口设置为开放界面,相对压力设置为 0,认为流体和大气直接接触。其余流体和固体接触的面都设置为墙界面,使用无滑移边界条件,认为流体和固体之间无相对速度。

微泵泵膜上牺牲层的厚度一般小于 1 μm,而激光的光斑直径在数百微米到 1 mm 的范围内,远大于牺牲层的厚度,因此可将冲击波对泵膜的压力视为一维平面压力。

Phipps 等<sup>[13]</sup>研究发现,在激光功率密度从 3 MW/cm<sup>2</sup> 到 70 TW/cm<sup>2</sup>,脉宽从 500 ps 到 13.5 ms,波长从 248 nm 到 10.6 μm,脉冲能量从 100 mJ 到 10 kJ 的范围里,激光辐照在金属表面产生的冲击波压强存在

$$P = bI(I\lambda\sqrt{\tau})^n, \quad (1)$$

式中  $P$  为固相界面处等离子体的压强; $\tau$  为激光脉冲宽度; $I$  为激光功率密度。系数  $b$  与牺牲层材料有关,对于铝合金有  $n = -0.3 \pm 0.03$ ,  $b = 5.6$ 。因此有

$$P = 5.6 \times I^{0.7} \lambda^{-0.3} \tau^{-0.15}. \quad (2)$$

由(2)式可知,激光功率密度  $I$ ,波长  $\lambda$ ,脉宽  $\tau$  决定了激光辐照靶材产生的冲击波峰值压强。激光功率密度越高,波长越短,脉宽越小,产生的冲击波峰值压强就越大。激光的功率密度是冲击波能量来源,波长显著地影响着材料对激光能量的吸收特性;脉宽决定了脉冲前沿的上升速度。实验表明,等离子体的膨胀和冷却对激光能量的响应很快,导致冲击波持续时间与激光脉宽大致相等<sup>[14]</sup>。

根据上述理论,可以计算出不同条件下微泵表面上的峰值压强。冲击波压力的持续时间等于激光的脉宽,其分布近似符合高斯分布。因此可以得出冲击波压力的时间历程,将其作为力的边界条件加载于微泵表面。

图 5 是激光功率密度为 4.45 MW/cm<sup>2</sup>,波长 10.6 μm,脉宽 100 μs 时,冲击波的压强时程示意图。

### 3.4 激光功率密度适用范围

图 6 为不同波长、不同脉宽下的激光功率密度与峰值压强之间的关系。选取 3 种典型的激光器:波长 625 nm 的半导体激光器,波长 1.06 μm 的 YAG 激光器以及波长 10.6 μm 的 CO<sub>2</sub> 激光器。

可以看出,随着功率密度的增加,冲击波压强一直在增加。当压强增加到一定程度时,硅泵膜就会断裂、破损。根据 Wu 等<sup>[15]</sup>对硅片的强度极限的测

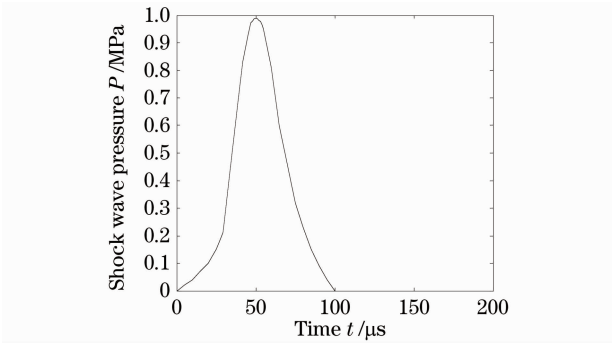


图 5 冲击波压力时程图

Fig. 5 Time history of shock wave pressure

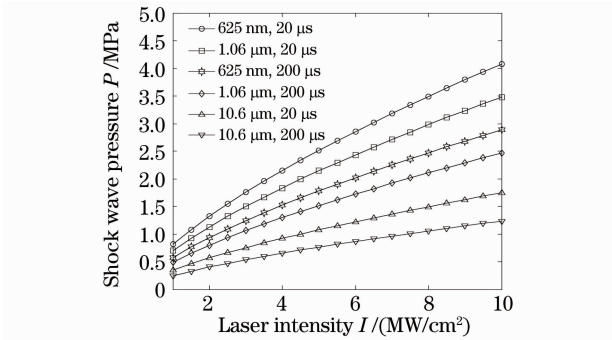


图 6 激光功率密度和峰值压强的关系

Fig. 6 Relation of laser intensity and shock wave pressure

试结果,厚 100 μm,直径 6 mm 硅片的应力极限是 270.77 MPa。

为保证微泵在工作时泵膜应力小于应力极限值,经计算,当光斑直径为 1 mm 时,激光冲击波峰值压强应小于 3 MPa。

因此,激光光斑直径为 1 mm 时,为了使微泵安全工作,在选择激光器参数时,需使功率密度、波长、脉宽等变量满足

$$I^{0.7} \lambda^{-0.3} \tau^{-0.15} \leq 5.4 \times 10^5. \quad (3)$$

## 4 仿真结果与讨论

仿真采用 ANSYS+CFX 流固耦合平台,流体介质为水,分别对激励频率、脉宽占空比、功率密度、光斑直径等参数对流量影响和流量的稳定性进行了研究。

### 4.1 激光脉冲频率对出口流量的影响

取激光脉冲频率分别为 0.5, 5, 8, 10 和 20 kHz,计算其出口流量,如图 7 所示。可以看出,在不同的脉冲频率下,出口流量的差别很大,脉冲频率为 5 kHz 时,出口流量达到最大值。这是因为在共振频率附近,泵膜的振幅最大,相应其流量也最大。

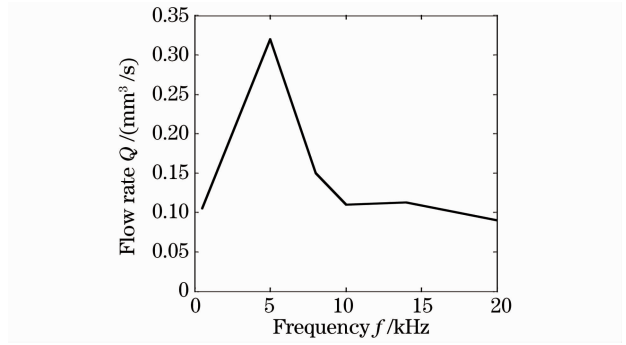


图 7 不同激光脉冲频率下微泵的出口流量

Fig. 7 Flow rate at different laser pulse frequencies

### 4.2 脉冲占空比对出口流量的影响

图 8 为光斑直径为 1 mm 的 CO<sub>2</sub> 激光,其功率密度分别为 1.325 MW/cm<sup>2</sup> 和 2.748 MW/cm<sup>2</sup> 时,微泵的出口流量和激光的脉冲占空比之间的关系。

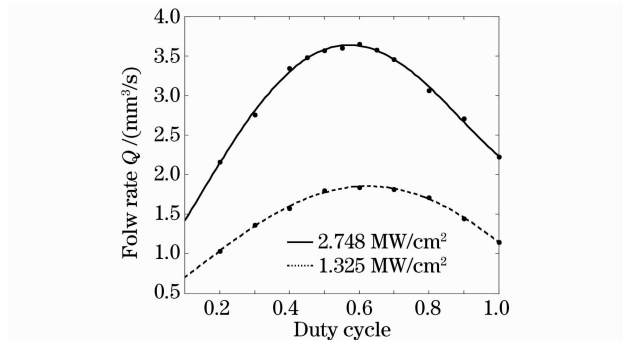


图 8 不同占空比下的出口流量

Fig. 8 Flow rate at different duty cycles

占空比越小,脉宽越短,其冲击波峰值压强越大,微泵泵膜的振幅越大;但其振动的往复时间就越少。由图可知,微泵的流量在占空比为 0.6 左右时取得最大值。

### 4.3 激光功率密度对出口流量的影响

图 9 为激励源为脉宽 100 μs 的 CO<sub>2</sub> 激光器,光斑直径分别为 0.5, 0.9 和 1.0 mm 时激光功率密度与微泵流量之间的关系。分析图中 3 组数据点并拟

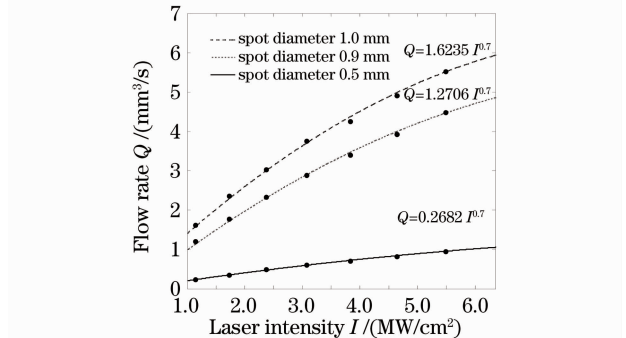


图 9 不同激光功率密度对出口流量的影响

Fig. 9 Flow rate at different laser intensities



合曲线,结果显示,微泵流量  $Q$  和激光功率密度  $I$  满足

$$Q = k_I I^{0.7}, \quad (4)$$

式中  $k_I$  是与脉宽、波长、光斑直径有关的参数。图中 3 条曲线的  $k_I$  值分别为 1.6235, 1.2706, 0.2682。

随着功率密度的增加,微泵的流量逐渐增加,但增加的程度逐渐减少。在实际使用中,可以通过调节激光的功率密度来调节微泵的出口流量。

#### 4.4 激光光斑直径对出口流量的影响

图 10 为脉宽 100  $\mu\text{s}$  的  $\text{CO}_2$  激光器,功率密度分别为 2.369  $\text{MW}/\text{cm}^2$  和 4.636  $\text{MW}/\text{cm}^2$  时微泵的出口流量和激光的光斑直径之间的关系。由图可知,微泵的出口流量和激光光斑直径成 2 次幂关系,也就是和激光光斑面积成线性关系。

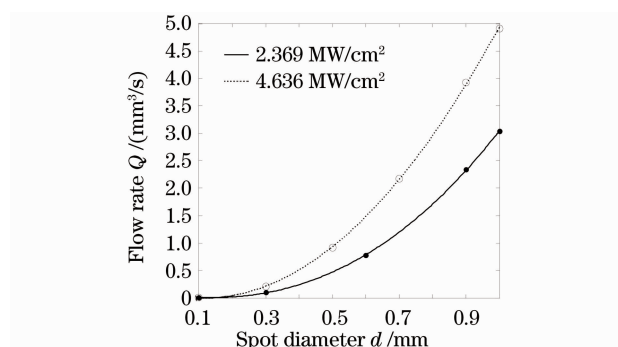


图 10 不同光斑直径下的出口流量

Fig. 10 Flow rate at different spot diameters

在实际使用中,可以通过调节光路系统中掩膜的直径来改变辐照在泵膜上的激光光斑直径,从而控制微泵的出口流量。

#### 4.5 出口流量的稳定性

图 11 为出口的流量-时间特性,图 12 是频率为 5 kHz 时不同条件下前 10 个周期出口流量的变化情况,其中实线为光斑直径 0.9 mm,虚线为 0.5 mm。

在前 6 个周期,流量还不稳定,误差较大。从第

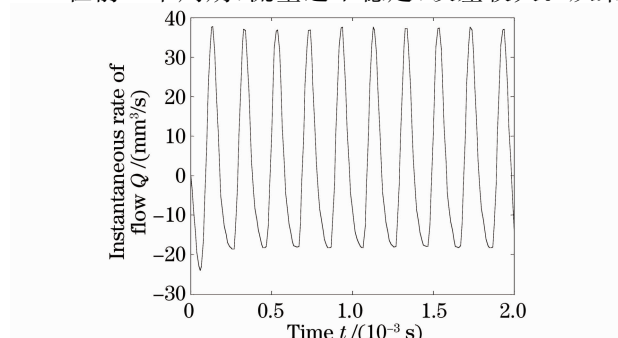


图 11 出口流量-时间特性

Fig. 11 Characteristic of time-flow rate

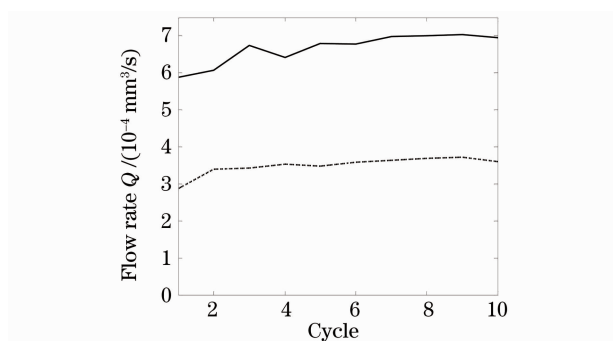


图 12 各周期流量差异

Fig. 12 Flow rate difference of cycles

7 个周期开始,每个周期流量开始稳定,且每个周期出口流量差别小于 5%。因此在使用时可以通过控制脉冲数来精确控制流量。

## 5 结 论

提出了一种利用激光冲击波力学效应驱动微泵的方法。综合以上分析可知,该方法是可行的。这种方式分离了微泵的能量源和工作部件,微泵结构简单,制造方便,成本低,可替换性强,体积小,有利于微型化及与 MEMS 集成。采用激光驱动能量利用率高,可实现无线和远程控制,不存在电磁干扰,采用阵列方式可获得较大流量。经数值模拟后得出如下结论:

- 1) 激光脉冲频率越接近微泵一阶耦合固有频率,输出流量越大;
- 2) 在激光脉冲占空比为 0.6 左右时,微泵的流量最大;
- 3) 激光的功率密度和光斑面积对流量分别为 0.7 次幂和线性关系。可以通过调节激光的功率密度和光斑面积来调节微泵的单周期的输出流量;
- 4) 微泵的每个脉冲泵出的液体量是基本恒定的,可以通过控制脉冲个数来控制流量。

## 参 考 文 献

- 1 F. Amirouche, Y. Zhou, T. Johnson. Current micropump technologies and their biomedical applications [J]. *Microsyst. Technol.*, 2009, **15**(5): 647~666
- 2 D. J. Laser, J. G. Santiago. A review of micropumps [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2004, **14**(6): R35~64
- 3 Q. Cui, C. Liu, X. F. Zha. Study on a piezoelectric micropump for the controlled drug delivery system [J]. *Microfluidics Nanofluidics*, 2007, **3**(4): 377~390
- 4 T. Pan, E. Kai, M. Stay *et al.*. A magnetically driven PDMS micropump with ball check-valves [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2005, **15**(5): 1021~1026
- 5 Q. Lin, B. Yang, J. Xie *et al.*. Dynamic simulation of a peristaltic micropump considering coupled fluid flow and structural motion [J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2007, **17**(2):

220~228

- 6 Shi Lei, Zhao Shanghong, Chu Xingchun *et al.*. Experimental and numerical study of air-breathing mode propulsion by solid Nd:glass nanosecond pulse laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 100~104  
石磊, 赵尚弘, 楚兴春等. 大气呼吸模式纳秒脉冲玻璃激光推进实验与数值模拟[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 100~104
- 7 L. Urech, T. Lippert, C. R. Phipps *et al.*. Polymers as fuel for laser-based microthrusters: An investigation of thrust, material, plasma and shockwave properties[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2007, **253**(19): 7646~7650
- 8 Wang Xiao, Yang Kun, Liu Huixia *et al.*. Loading mechanism of metal foil forming under laser driven flyer[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(6): 1569~1574  
王霄, 杨昆, 刘会霞等. 激光驱动飞片加载金属箔板成形的加载机制[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1569~1574
- 9 Che Zhigang, Xiong Liangcai, Shi Tielin *et al.*. Experimental analysis of microscale laser shock processing on metallic material using excimer laser[J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2009, **25**(6): 829~834
- 10 Li Wei, He Weifeng, Li Yinghong *et al.*. Effects of laser shock processing on vibration fatigue properties of K417 material[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8): 2197~2201  
李伟, 何卫锋, 李应红等. 激光冲击强化对 K417 材料振动疲劳性能的影响[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8): 2197~2201
- 11 B. Fan, G. Song, F. Hussain. Simulation of a piezoelectrically actuated valveless micropump[J]. *Smart Mater. Struct.*, 2005, **14**(2): 400~405
- 12 Li Jun, Ying Ji, Shen Xueming *et al.*. Modal analysis of liquid-solid coupling system of flat-walled valveless micropumps[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2009, **28**(12): 1604~1607  
李俊, 应济, 沈雪明等. 平面型无阀微泵流固耦合模态分析[J]. *机械科学与技术*, 2009, **28**(12): 1604~1607
- 13 Phipps C. R., Jr., Turner T. P., Harrison R. F. *et al.*. Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, Hf, and CO<sub>2</sub> single-pulse lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, **64**(3): 1083~1096
- 14 Liu Li, Wang Shengbo, Wu Hongxing *et al.*. Experimental study of high-power laser induced shock waves[J]. *Laser Technology*, 2007, **31**(2): 134~136  
刘丽, 王声波, 吴鸿兴等. 强激光诱导冲击波的实验研究[J]. *激光技术*, 2007, **31**(2): 134~136
- 15 J. D. Wu, C. Y. Huang, C. C. Liao. Fracture strength characterization and failure analysis of silicon dies [J]. *Microelectron. Reliab.*, 2003, **43**(2): 269~277