

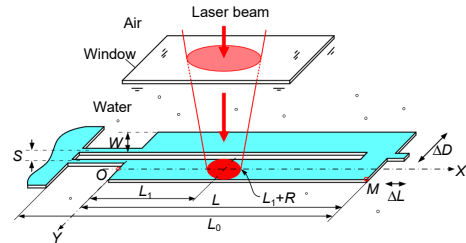


DOI: 10.12086/oe.2021.210199

液体环境中的光热微驱动方法与技术研究

倪凯佳, 章海军*, 尤清扬, 张子尧

浙江大学 现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027



摘要: 提出和发展了适用于液体(水)环境的光热微驱动技术及光热微驱动机构(OTMA)。建立了水环境中 OTMA 膨胀臂在激光照射下的光热膨胀模型, 基于有限元分析推导出膨胀臂的温升分布公式, 并对长度 1080 μm 、宽度 90 μm 的膨胀臂在 4 mW 激光照射下的温升分布进行了仿真, 理论研究表明了液体环境中光热微驱动技术的可行性。设计与微加工制作了一种对称型 OTMA, 在波长 520 nm、功率可调的激光照射下, 首次实现了液体环境中的光热微驱动, 实验结果表明膨胀臂的光热偏转量随激光功率的增大而增加。进一步开展了在波长 520 nm、有效功率 4 mW、频率可调的激光脉冲照射下的光热微驱动实验, 结果表明, 对称型 OTMA 在频率 0.9 Hz~16.4 Hz 的激光脉冲照射下具有良好的动态响应, 驱动量(偏转量)振幅在 2.6 μm ~3.7 μm 之间变化, 随激光脉冲频率的增大而减小。理论研究及实验曲线趋势表明, 适当增大激光功率、提高激光脉冲频率, 在液体环境中实现更大偏转量、更高频率的光热微驱动是完全可行的。本文研究拓展了液体环境中的光热微驱动技术, 为微光机电系统及微纳米技术领域的应用提供了新的方法与途径。

关键词: 光热微驱动技术; 液体环境; 光热膨胀模型; 动态响应; 偏转量

中图分类号: O439; TP211.6

文献标志码: A

倪凯佳, 章海军, 尤清扬, 等. 液体环境中的光热微驱动方法与技术研究[J]. 光电工程, 2021, 48(11): 210199

Ni K J, Zhang H J, You Q Y, et al. Research on optothermal microactuation method and technology in liquid[J]. *Opto-Electron Eng.* 2021, 48(11): 210199

Research on optothermal microactuation method and technology in liquid

Ni Kaijia, Zhang Haijun*, You Qingyang, Zhang Ziyao

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

Abstract: In this paper, the optothermal microactuation technology and optothermal microactuator (OTMA) suitable for water or other liquids are proposed and developed. The model of optothermal expansion and temperature rise distribution is established, and simulation on a 1080 μm long OTMA is conducted, revealing the feasibility of optothermal microactuation technology in water. The optothermal microactuation experiment of a symmetrical OTMA is carried out in water under the irradiation of a laser with a wavelength of 520 nm and adjustable power, revealing that the optothermal deflection increases with the increase of the laser power. Another experiment is carried out under the irradiation of a laser pulse with a wavelength of 520 nm, effective power of 4 mW, and an adjustable frequency,

收稿日期: 2021-06-09; 收到修改稿日期: 2021-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61540019)

作者简介: 倪凯佳(1996-), 女, 硕士研究生, 主要从事光热微驱动技术的研究。E-mail: si_gnal@163.com

通信作者: 章海军(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学工程与纳米技术领域的教学与研究工作。E-mail: zhanghj@zju.edu.cn

版权所有©2021 中国科学院光电技术研究所

demonstrating that the symmetric OTMA has a good dynamic response under the laser irradiation. The amplitude of the actuating (deflection) amount varies between 2.6 μm and 3.7 μm when irradiated by the laser pulse with a frequency of 0.9 Hz~16.4 Hz, and it decreases with the increase of the frequency of the laser pulse. The theoretical research and experimental curve trend reveals that it is completely feasible to obtain greater deflection and higher frequency optothermal microactuation in water by appropriately increasing the laser power and laser pulse frequency. This research provides new methods and approaches for the application of micro-opto-electromechanical systems and micro-nano technology.

Keywords: optothermal microactuation technology; liquid environment; optothermal expansion model; dynamic response; deflection

1 引言

近年来,随着微纳米技术及微机电系统(micro-nano technology and micro-electromechanical systems, MEMS)与微光机电系统(micro-opto-electromechanical systems, MOEMS)的快速发展,微驱动技术及微驱动器或微驱动机构成为研究热点。现有的微驱动技术包括静电驱动^[1-2]、压电驱动^[3-4]、磁致伸缩驱动^[5-6]、形状记忆合金驱动^[7-8]、热驱动^[9-11]与超声波驱动^[12-13]等技术。

传统的热驱动技术以电热驱动^[14]为主,利用电流流经微驱动机构两个非对称的驱动臂,由此产生非对称的热变形而实现微驱动功能。电热驱动机构具有驱动量大、驱动力强等优点^[15]。但是,它们需要用导线与外接电源相连,从而限制了其整体机构的微型化;同时,电热驱动机构工作时需要加热电流流经其内部,因此无法在液体(水)中正常工作,限制了其在液体中的应用。

近年来,我们开展了光热微驱动机构(optothermal microactuator, OTMA)的研究,该类驱动机构采用激光作为驱动源直接实现微驱动,不需要导线与外部电源连接,也无需加热电流流经驱动机构内部。基于这些特点,OTMA不仅可以应用于空气环境,而且可以在水或其他液体中正常工作。目前,有关OTMA及其驱动特性的研究都集中于空气环境^[16],而对OTMA在液体中的驱动及响应特性的研究较为欠缺。

为了开拓新的光热微驱动机构的研究应用领域,发展液体环境中的光热微驱动技术,本文开展了液体(水)环境中的OTMA的光热微驱动理论、方法与实验研究。建立了水环境中OTMA的膨胀臂在激光照射下的热力学模型,并对其温升分布进行了仿真,在此基础上,开展了水环境中OTMA的光热驱动实验,证明了这一新技术的可行性。

2 水环境中对称型 OTMA 的模型及仿真

图1所示为水环境中的光热驱动方法及原理图,实验装置由光热驱动控制系统和显微监控测量系统两大部分组成。前者包括计算机及接口、控制电路、半导体激光器、半透半反棱镜、OTMA和充满水的玻璃器皿;后者由显微物镜、高速CCD(240 f/s)及显微运动测量软件组成(图1(a))。计算机向控制电路输出脉冲信号,通过改变脉冲信号的电压调节激光功率,通过改变控制信号的脉冲周期调节激光脉冲频率。图1(b)所示为对称型OTMA在水环境中的光热驱动原理图,它包括两条长度 L 、宽度 W 、厚度 D 的长薄臂,薄臂左端分别经两条短窄桥与基底相连,薄臂右端直接相连。取其中一条长薄臂为光热膨胀臂,并以其左端中点为坐标原点 O 建立坐标系,设膨胀臂的长度方向为 X 方向,宽度方向为 Y 方向。激光束透过薄玻璃视窗进入水中,照射到膨胀臂上形成一个直径 $2R$ 的光斑,设光斑中心与原点的距离为 L_1 ;膨胀臂吸收部分激光能量而产生温升,进而在 X 方向伸长 ΔL ;基于杠杆放大原理,OTMA在 Y 方向偏转 ΔD ,由此实现OTMA在水中的光热微驱动。

需要指出,图中引入的玻璃视窗,只是为了在实验过程中避免气液界面抖动对激光束造成干扰;在实际应用中,可以将微小型激光器头部浸入液体中,或用光纤导入激光束直接照射OTMA实现微驱动。

由于在水中膨胀臂吸收激光能量与散热的过程比在空气中迅速,也就是能够更快捷地建立热平衡,因此,虽然本文采用激光脉冲(频率最高值约为16 Hz)实现微驱动,在每个激光脉冲的照射时间内,仍可以基于稳态热平衡建立膨胀臂的热力学模型。如图2所示,在膨胀臂任意位置 x 处选取一个长度为 dx 的微元,

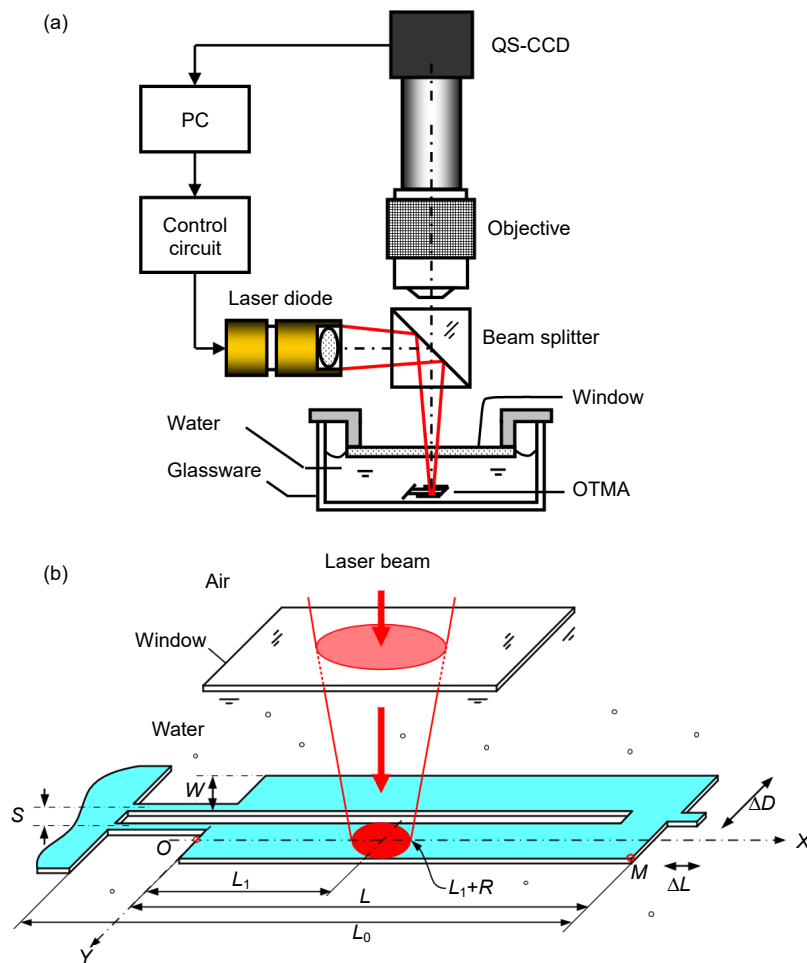


图 1 水环境中光热驱动。(a) 实验装置示意图；(b) 对称型 OTMA 的光热驱动原理图

Fig. 1 Schemes of (a) the experimental device for optothermal microactuation operated in water and (b) the symmetric optothermal microactuator operated in water

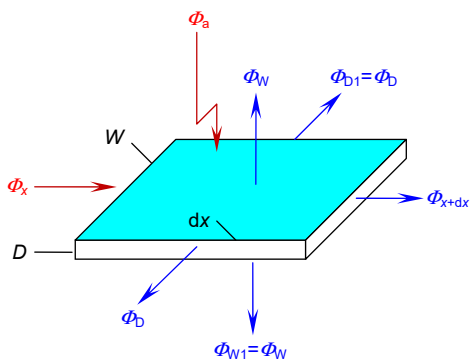


图 2 水环境中膨胀臂的任一微元及其热流分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of any element of the expansion arm and its heat flow distribution in water

并对该微元在水环境中的热平衡及膨胀臂的温升分布与光热膨胀进行分析。

在 dt 时间间隔内, 由于激光照射, 该微元获得热

量 Φ_a (如果该微元处于照射范围外, 获得的热量为 0), 通过传导从相邻的前一微元处获得热量 Φ_x ; 同时, 通过传导向相邻的后一微元流失热量 Φ_{x+dx} ; 此外, 由于微元上下表面及侧面与水环境的对流换热, 损失热量 Φ_w 、 Φ_{w1} 、 Φ_b 和 Φ_{b1} , 表达式如下:

$$\begin{cases} \Phi_a = q(x)Wdxdt \\ \Phi_x = -KDW T'_x(x)dt \\ \Phi_{x+dx} = -KDW T'_x(x+dx)dt \\ \Phi_b = \Phi_{b1} = \Delta T(x)h_D Ddxdt \\ \Phi_w = \Phi_{w1} = \Delta T(x)h_w Wdxdt \end{cases} \quad (1)$$

式中: $q(x)$ 为沿 X 方向的激光功率密度分布, K 为材料的导热率, $T(x)$ 为膨胀臂 x 处的温度分布, T_0 为环境温度(水温), $\Delta T(x) = T(x) - T_0$ 表示温度升高(温升)值, h_w 为膨胀臂上下表面与水的对流换热系数, h_D 为膨胀臂侧面与水的对流换热系数。设膨胀臂对激光能量的吸收系数为 ρ_a , 沿 X 方向的激光功率密度在激光光斑

范围内为常数 q_0 , 则整个膨胀臂区域内激光功率密度分布函数可表示为

$$q(x) = \begin{cases} \rho_a q_0 & L_1 - R \leq x \leq L_1 + R \\ 0 & 0 \leq x \leq L_1 - R \text{ or } L_1 + R < x \leq L \end{cases} \quad (2)$$

由于与膨胀臂的长度相比激光光斑尺寸相对较小, 为简化起见, 可以将激光光斑近似地看作均匀分布, 即 $q_0 = P/(\pi R^2)$ 。

在膨胀臂的左右端点 $x=0$ 和 $x=L$ 处, 单位时间内流向端面的热量值等于端面换热失去的热量值, 边界条件表示为

$$\begin{cases} K \frac{d\Delta T(x)}{dx} \Big|_{x=0} - h_D \cdot \Delta T(0) = 0 \\ K \frac{d\Delta T(x)}{dx} \Big|_{x=L} + h_D \cdot \Delta T(L) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据能量守恒定律, 当微元处于热平衡状态时, 流入微元的热量之和等于流出微元的热量之和, 即:

$$\Phi_a + \Phi_x = 2\Phi_w + 2\Phi_D + \Phi_{x+dx} \quad (4)$$

将式(2)中热量表达式代入式(4), 并加以简化, 可得:

$$\frac{d^2 \Delta T(x)}{dx^2} - \frac{2(h_D D + h_w W)}{KD W} \cdot \Delta T(x) = -\frac{q(x)}{KD} \quad (5)$$

结合边界条件式(3), 利用特征函数求解偏微分方

程式(5), 可以求解得到水环境中 OTMA 的膨胀臂在激光照射下的温升分布:

$$\begin{aligned} &x \in [0, L_1 - R]: \\ &\Delta T(x) = \frac{\rho_A P \sinh(bR) C_4}{KDWRb^2 C_3}; \\ &x \in [L_1 - R, L_1 + R]: \\ &\Delta T(x) = \frac{\rho_A P \sinh(bR) C_4}{KDWRb^2 C_3} \\ &\quad + \frac{\rho_A P}{2KDWRb^2} \cdot [1 - \cosh(b(x + R - L_1))]; \\ &x \in [L_1 + R, L]: \\ &\Delta T(x) = \frac{\rho_A P \sinh(bR) C_4}{KDWRb^2 C_3} \\ &\quad - \frac{\rho_A P}{2KDWRb^2} \cdot [2 \sinh(bR) \sinh(b(x - L_1))] \end{aligned}$$

根据上面分段等式, 进一步对水环境中对称型 OTMA 膨胀臂在 4 mW 激光照射下的温升分布进行了 MATLAB [MATLAB 9.7.0.1434023(R2019b), Math Works Inc] 仿真。表 1 给出了由黑色高密度聚丙烯 (HDPE) 薄片制成的对称型 OTMA 的尺寸和热学参数。

仿真得到的膨胀臂的温升分布如图 3 所示, 结果表明, 在光斑中心处, 膨胀臂的温升最高, 其数值为

表 1 对称型 OTMA 的尺寸和热学参数

Table 1 Size and thermal parameters of the symmetrical OTMA

符号	描述	具体数值
$L/\mu\text{m}$	OTMA 膨胀臂的长度	1080
$W/\mu\text{m}$	OTMA 膨胀臂的宽度	86
$D/\mu\text{m}$	OTMA 膨胀臂的厚度	20
$L_0/\mu\text{m}$	OTMA 总长度	1260
$S/\mu\text{m}$	与 OTMA 臂相连的两个窄桥的间距	45
$R/\mu\text{m}$	激光光斑在膨胀臂上的半径	42
$K/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	材料的热导率	0.24
$h_D/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	膨胀臂侧面与外界的对流换热系数	25000
$h_w/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	膨胀臂水平面与外界的对流换热系数	2500
$h_1/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	膨胀臂与左侧固定端热交换的换热系数	25000
$h_2/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$	膨胀臂与右侧水对流换热系数	25000
$P/(mW)$	激光功率	4
λ/nm	激光波长	520
f/Hz	激光频率	1~16
$\alpha/(K^{-1})$	膨胀臂的膨胀系数	3.2×10^{-5}
$T_0/(^{\circ}C)$	环境温度(水温)	20
$\rho/(g/cm^3)$	膨胀臂的密度	0.9
C	膨胀臂的热容	1.883



图3 仿真得到的对称型 OTMA 膨胀臂的温升分布

Fig. 3 The temperature rise distribution of the symmetrical OTMA expansion arm obtained by simulation

53.7 °C；随着与光斑中心的距离增大，膨胀臂的温升随之减小。由于 HDPE 材料的熔点在 118 °C 以上^[17]，因此，当水环境的起始温度为 20 °C 时，膨胀臂的温升值在安全范围内，不会因激光照射而熔化，从而为水环境中的光热驱动提供了理论基础。

根据热力学原理，膨胀臂的每一微元将因温升 $\Delta T(x)$ 而引起光热膨胀，从而引起整个膨胀臂伸长，伸长量 ΔL 可表示为

$$\Delta L = \alpha \int_0^L \Delta T(x) \cdot dx = \frac{\alpha \rho_A P}{KDWb^2} \times \left\{ 1 - \frac{\sinh(bR)}{RbC_3} \cdot [h_1 h_2 (\sinh(bL_1) + \sinh(bL_2)) + Kb(h_2 \cosh(bL_1) + h_1 \cosh(bL_2))] \right\} \quad (6)$$

由图 1 可知，当膨胀臂在激光照射下沿 X 方向(纵向)伸长时，OTMA 将产生横向偏转，基于杠杆原理，该光热偏转量的理论公式为

$$\Delta D = \frac{kL_0}{S} \cdot \Delta L \quad (7)$$

其中： k 为待定的比例系数，不仅与 OTMA 的物理及机械特性有关，由于 OTMA 非严格刚性结构，该比例系数与 OTMA 运动相关。由表 1 可知， L_0 远大于 S ，因此偏转量 ΔD 比伸长量 ΔL 放大了数十倍，可以通过

光热驱动实验进行测量。

3 实验及结果

为了实现水环境中光热驱动，并对 OTMA 的光热驱动特性开展实验研究，本文利用准分子激光微加工系统(Optec Promaster)加工制作了 2 个以 HDPE 为基材、总长 1260 μm 的对称型 OTMA(膨胀臂长度 1080 μm 、宽度 90 μm 、厚度 20 μm)，一个用于扫描电子显微镜(SEM)成像表征，另一个用于在水环境中开展光热驱动实验。之所以加工 2 个相同的 OTMA，主要是为了避免 SEM 扫描成像前溅射镀膜对 OTMA 表面的激光吸收特性造成改变；而在水中进行过光热驱动实验的 OTMA，又不适合于再进行 SEM 观测。图 4 所示为第一个对称型 OTMA 的 SEM 图像。

上文所述的显微监控测量系统具有实时监控和捕获光热驱动过程的功能，采用像素匹配和亚像素拟合算法，测量在 OTMA 右端面处选定的特征点的光热运动及偏转量(参见图 1(b))。考虑到水对可见光的吸收率在 380 nm~520 nm 波段^[18]较小，实验中选用波长 520 nm 的激光作为光源。图 5(a)和图 5(b)所示分别为水环境下对称型 OTMA 的原始状态和受激光照射时产生光热偏转的显微视频截图，可以看到较明显的横向偏转，证明了水环境中光热驱动方法及技术的可行性。

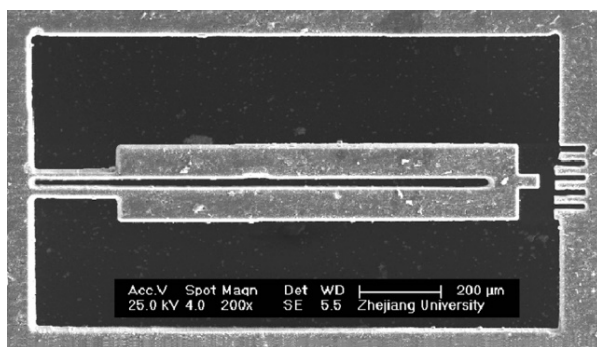


图4 对称型 OTMA 的 SEM 图像

Fig. 4 SEM image of the symmetrical OTMA

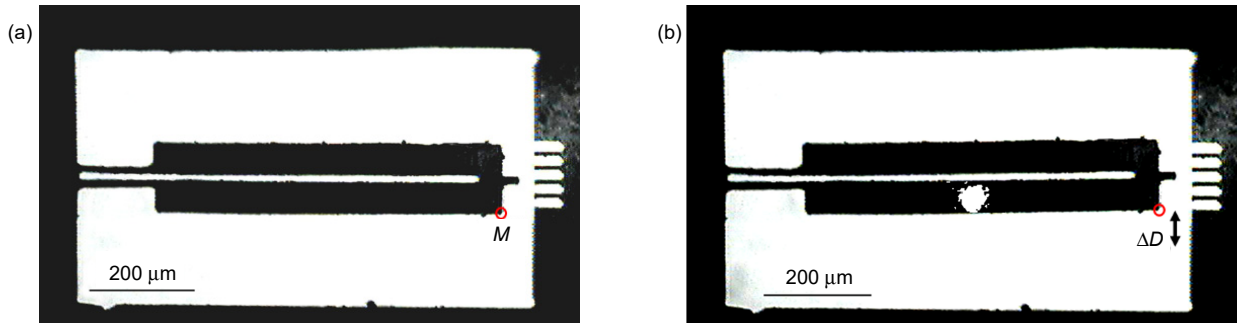


图5 水环境下对称型 OTMA 的(a)原始状态和(b)受激光照射时产生光热偏转的显微视频截图
 Fig. 5 Microscopic images of the symmetric OTMA's (a) original and (b) laser-irradiated states in water

首先在不同激光功率下(OTMA 所处位置处的激光功率)开展了水环境中 OTMA 的光热驱动实验。图 6 给出了水环境中 OTMA 光热偏转量随激光功率变化的关系曲线,可以看出 OTMA 膨胀臂偏转量的平均振幅随激光功率增大而增大,当激光功率大于 3 mW 时,约成线性关系,这与伸长量式(6)、偏转量式(7)的结论一致;而当激光功率小于 3 mW 时,考虑是水中的粘滞阻尼的关系。

基于 OTMA 光热偏转与激光功率的关系,将激光功率调节为 4 mW 时(预先在 OTMA 所处位置测得的数值),在不同激光脉冲频率下开展了水环境中 OTMA 的光热驱动实验。在实测激光脉冲频率为 0.9 Hz、2.9

Hz、4.5 Hz、7.7 Hz、16.4 Hz 时测得的 OTMA 偏转运动曲线如图 7(a)~7(e)所示,图 7(f)给出了 OTMA 偏转量的平均振幅随激光脉冲频率变化的曲线。

实验结果表明,当激光脉冲频率为 0.9 Hz、2.9 Hz、4.5 Hz、7.7 Hz、16.4 Hz 时,水环境中 OTMA 偏转量的平均振幅分别为 3.7 μm、3.4 μm、3.2 μm、3.1 μm、2.6 μm。虽然实验曲线显示出 OTMA 振幅随激光脉冲频率增大而缓慢减小的趋势,但是在频率 16.4 Hz 时 OTMA 仍有 2.8 μm 的振幅,说明 OTMA 的响应频率至少在 16.4 Hz 以上。实验曲线同时表明,适当增大激光脉冲的频率和激光功率,可以在水环境中实现更高频率和更大偏转量振幅的光热驱动。

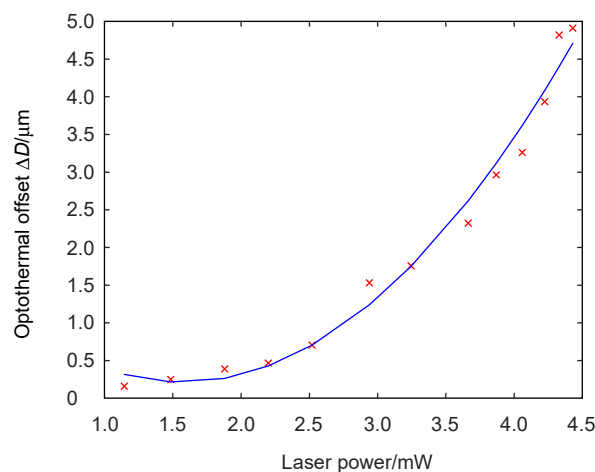


图6 水环境中 OTMA 光热偏转量的平均振幅随激光功率变化的曲线
 Fig. 6 The curve of the average amplitude of OTMA photothermal deflection in water with the change of laser power

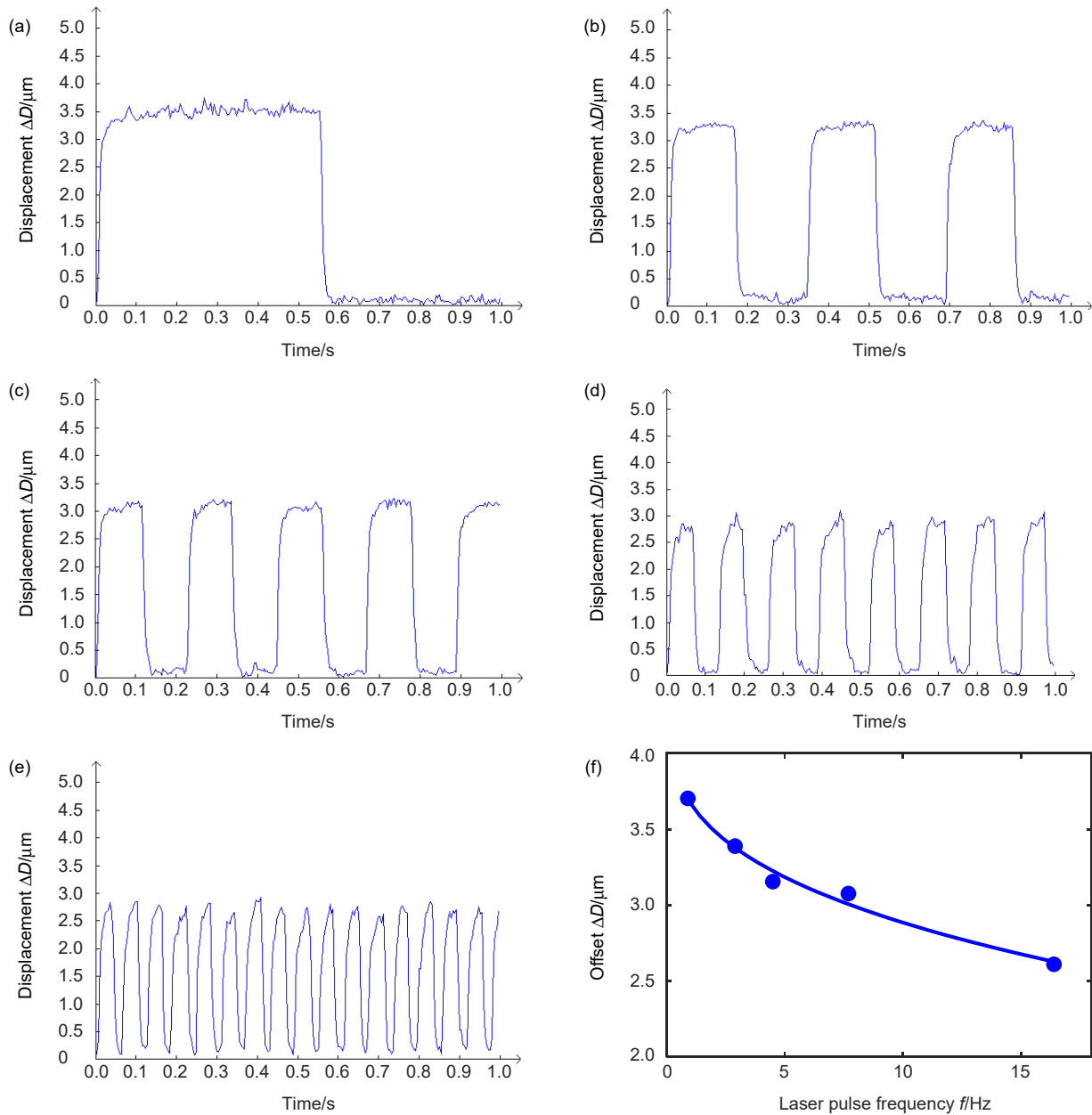


图7 水环境中对称型 OTMA 在不同激光脉冲频率下的光热驱动实验结果。

(a)~(e) 实测激光脉冲频率为 0.9 Hz、2.9 Hz、4.5 Hz、7.7 Hz、16.4 Hz 时测得的 OTMA 偏转运动曲线;

(f) 偏转量的平均振幅随激光脉冲频率变化的曲线

Fig. 7 Optothermal microactuation experiment results of the symmetrical OTMA under different laser pulse frequencies in water.

(a)~(e) OTMA deflection motion curves measured when the measured laser pulse frequencies are 0.9 Hz, 2.9 Hz, 4.5 Hz, 7.7 Hz, 16.4 Hz;

(f) The curve of the average amplitude of the deflection with the laser pulse frequency

4 结论

本文提出了一种液体(水)环境中的光热微驱动方

法,发展了相应的光热微驱动技术及光热微驱动机构。针对对称型 OTMA, 研究建立了其在水环境中的光热膨胀模型, 推导出膨胀臂在激光照射下的温升分布与

光热膨胀(伸长)量公式,并对温升分布进行了 MATLAB 仿真,证明了水环境中 OTMA 的光热膨胀(伸长)及光热驱动技术的可行性。

利用准分子激光微加工系统加工制作了总长 1260 μm , 膨胀臂长度 1080 μm 、宽度 90 μm 、厚度 20 μm 的对称型 OTMA。在波长 520 nm、功率可调的激光照射下,首次实现了水环境中的光热驱动,实验结果表明随着激光功率的增大,膨胀臂的光热偏转量也随之增大,在 3 mW 以上的激光照射下两者成线性关系。进一步开展了在波长 520 nm、有效功率 4 mW、频率可调的激光脉冲照射下的水环境中光热驱动实验。实验结果表明,OTMA 在水环境中受频率为 0.9 Hz、2.9 Hz、4.5 Hz、7.7 Hz、16.4 Hz 的激光脉冲照射时,可分别获得平均振幅为 3.7 μm 、3.4 μm 、3.2 μm 、3.1 μm 、2.6 μm 的光热偏转量,实现了水环境中的动态光热驱动。适当增大激光脉冲的频率和激光功率,可以在水环境中实现更高频率和更大偏转量振幅的光热驱动。同时,改变 OTMA 的结构(如非对称型 OTMA)及采用其他类型的液体,也完全可以实现液体环境中的光热驱动。本文的研究工作可为研究开发在水或其他液体中运行的特种 MEMS/MOEMS 设备,如液体中的光热微电机、光热微泵、光热微机器人和其他光热驱动机构提供技术基础。

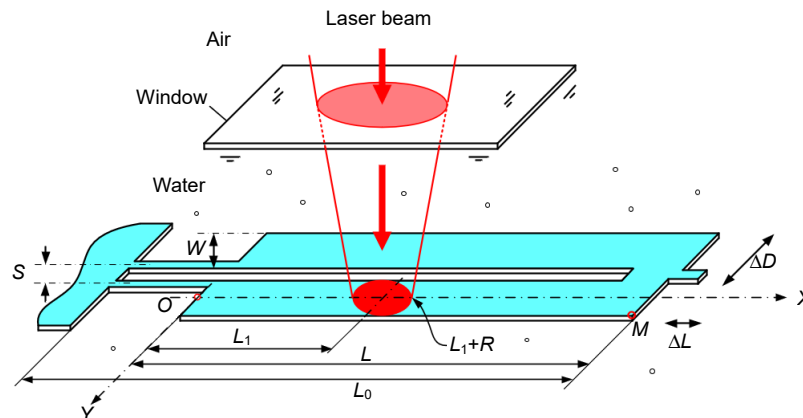
参考文献

- [1] Conrad H, Schenk H, Kaiser B, et al. A small-gap electrostatic micro-actuator for large deflections[J]. *Nat Commun*, 2015, 6(1): 10078.
- [2] Li H J, Barnes P, Harding E, et al. Large-displacement vertical electrostatic microactuator dynamics using duty-cycled softening/stiffening parametric resonance[J]. *J Microelectromech Syst*, 2019, 28(3): 351–361.
- [3] Liu J K, Liu Y X, Zhao L L, et al. Design and experiments of a single-foot linear piezoelectric actuator operated in a stepping mode[J]. *IEEE Trans Industr Electron*, 2018, 65(10): 8063–8071.
- [4] Shokrgozar A, Safarpour H, Habibi M. Influence of system parameters on buckling and frequency analysis of a spinning cantilever cylindrical 3D shell coupled with piezoelectric actuator[J]. *Proc Instit Mech Eng Part C: J Mech Eng Sci*, 2020, 234(2): 512–529.
- [5] Duvernoy B, Farkhatdinov I, Topp S, et al. Electromagnetic actuator for tactile communication[M]//Prattichizzo D, Shinoda H, Tan H Z, et al. *Haptics: Science, Technology, and Applications*. Cham: Springer, 2018.
- [6] Salerno M, Firouzeh A, Paik J, et al. A low profile electromagnetic actuator design and model for an origami parallel platform[J]. *J Mech Robot*, 2017, 9(4): 041005.
- [7] Yu Y W, Zhang C, Zhou M L. NARMAX model-based hysteresis modeling of magnetic shape memory alloy actuators[J]. *IEEE Trans Nanotechnol*, 2019, 19: 1–4.
- [8] Zhang C, Yu Y W, Wang Y F, et al. Takagi–sugeno fuzzy neural network hysteresis modeling for magnetic shape memory alloy actuator based on modified bacteria foraging algorithm[J]. *Int J Fuzzy Syst*, 2020, 22(4): 1314–1329.
- [9] Evstafyev S, Samoylikov V. Research and analysis of heat exchange processes of a micromechanical mirror based on a thermal microactuator[J]. *Proc SPIE*, 2019, 11022: 110220U.
- [10] Lin X T, Han Q, Huang J Z. Effect of defects on the motion of carbon nanotube thermal actuator[J]. *Nanotechnol Rev*, 2019, 8(1): 79–89.
- [11] Kim T H, Choi J G, Byun J Y, et al. Biomimetic thermal-sensitive multi-transform actuator[J]. *Sci. Rep.*, 2019, 9(1): 7905.
- [12] Kim S, Zhang X, Daugherty R, et al. Ultrasonic electrostatic actuators on a flexible substrate[J]. *Proceedings of the IEEE 25th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*, Paris, France, 2015: 1193–1196.
- [13] Geetha G K, Mahapatra D R. Modeling and simulation of vibro-thermography including nonlinear contact dynamics of ultrasonic actuator[J]. *Ultrasonics*, 2019, 93: 81–92.
- [14] Cao Y, Dong J Y. High-performance low-voltage soft electrothermal actuator with directly printed micro-heater[J]. *Sens Actuat A: Phys*, 2019, 297: 111546.
- [15] Cao Y, Dong J Y. Fabrication and self-sensing control of soft electrothermal actuator[J]. *Proced Manuf*, 2020, 48: 43–48.
- [16] Liu C, Zhang D X, Zhang H J. Experimental study of the characteristics of novel microactuator based on optothermal expansion[J]. *High Technol Lett*, 2009, 15(2): 131–134.
- [17] Mark J E. Polymer data handbook, 2nd ed[J]. *J Am Chem Soc*, 2009, 131(44): 16330–16330.
- [18] Pope R M, Fry E S. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements[J]. *Appl Opt*, 1997, 36(33): 8710–8723.

Research on optothermal microactuation method and technology in liquid

Ni Kaijia, Zhang Haijun*, You Qingyang, Zhang Ziyao

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China



The symmetric optothermal microactuator operated in water

Overview: With the rapid development of micro-nano technology and micro-electromechanical systems (MEMS) and micro-opto-electromechanical systems (MOEMS), microactuation technology and microactuators or microactuation mechanisms have become research hotspots. Traditional thermal microactuators are mainly based on electrothermal excitation, which obtains thermal deformation by generating ohmic heat of electric current flowing through the asymmetric expansion arms. Such microactuators are capable of gaining larger displacement and generating bigger actuating forces. Contrary to the advantages, the electrothermal microactuators (ETMAs) always require a built-in power source or connecting circuit, resulting in difficulty of miniaturization of the whole device and operating in liquid. In spite of ETMAs, both symmetric and asymmetric OTMAs are available for obtaining microactuation and being applied in water or other liquids without electric circuits and loops. This paper proposes and develops the optothermal microactuation technology and optothermal microactuator (OTMA) suitable for water or other liquids. An optothermal expansion model of the OTMA's expansion arm in water under laser irradiation is established. The temperature rise distribution formula of the expansion arm is derived by the finite element analysis, and simulation on the expansion arm with a length of 1080 μm and a width of 90 μm under 4 mW laser irradiation is conducted, revealing the feasibility of optothermal microactuation technology in water. The optothermal microactuation experiment of a symmetrical OTMA is carried out in water for the first time under the irradiation of a laser pulse with a wavelength of 520 nm and adjustable power. The results reveal that the amount of optothermal deflection of the expansion arm increases with the increase of the laser power. Another experiment is carried out under the irradiation of a laser pulse with a wavelength of 520 nm, effective power of 4 mW, and an adjustable frequency. The results demonstrate that the symmetric OTMA has a good dynamic response under the laser irradiation. The amplitude of the actuating (deflection) amount varies between 2.6 μm and 3.7 μm when irradiated by the laser pulse with a frequency of 0.9 Hz~16.4 Hz, and it decreases with the increase of the frequency of the laser pulse. The theoretical research and experimental curve trend reveals that it is completely feasible to obtain greater deflection and higher frequency optothermal microactuation in water by appropriately increasing the laser power and laser pulse frequency. This research provides new methods and approaches for the application of micro-opto-electromechanical systems and micro-nano technology.

Ni K J, Zhang H J, You Q Y, *et al.* Research on optothermal microactuation method and technology in liquid[J]. *Opto-Electron Eng*, 2021, 48(11): 210199; DOI: 10.12086/oe.2021.210199

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (61540019)

* E-mail: zhanghj@zju.edu.cn