

# 光热膨胀材料的光谱特性分析及微型光热驱动机构研究

刘超, 张冬仙\*, 章海军

浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 光热膨胀材料的光谱特性是影响微型光热驱动机构性能的关键因素, 该文在理论分析的基础上, 采用单积分球测量法对四种聚合物材料的反射光谱及吸收特性进行了实验测量, 据此选择制作光热驱动机构的最佳光热膨胀材料, 发现掺杂染料的高密度聚乙烯(HDPE)材料在600~690 nm的范围内有较强烈的吸收。选取HDPE作为光热膨胀材料, 设计制作了一种长度1500  $\mu\text{m}$ 的微型光热驱动机构, 并采用自行研制的CCD显微监控和视频运动测量系统进行了驱动机构的驱动性能测量实验。研究表明, 在10 mW/650 nm的半导体激光器驱动下, 该微型光热驱动机构可以产生18.7  $\mu\text{m}$ 的光热偏转量, 说明其具有良好的光谱吸收和光热转换特性, 可望在微光机电系统(MOEMS)中获得广泛应用。

**关键词** 光热膨胀; 微驱动机构; 反射光谱; 吸收特性

中图分类号: O433.1 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2009)11-3047-05

## 引言

微光机电系统(micro optical electro mechanical system, MOEMS)作为微纳米技术中一个重要的分支, 已在世界各国得到迅速发展, 并在诸多领域获得广泛应用。微驱动机构是MOEMS系统中的关键部分<sup>[1]</sup>, 按照驱动方式的不同, 驱动机构可以分为静电驱动型<sup>[2]</sup>、光致伸缩型<sup>[3]</sup>、电磁驱动型<sup>[4]</sup>、热膨胀型<sup>[5]</sup>、压电驱动型<sup>[6]</sup>、超声波型<sup>[7]</sup>、记忆合金型<sup>[8]</sup>等。光热驱动机构作为一种新型热驱动机构, 由于具有驱动位移和驱动力大、可无线操控、易于集成化等特点, 近年来得到了研究者的广泛关注, 具有广阔的应用前景。

光热驱动机构通过吸收激光能量并将之转换为热能实现微驱动, 材料的反射光谱及光谱吸收特性对其驱动性能有重要影响。本文开展光热膨胀材料的光谱特性的理论分析和实验研究, 揭示材料的光谱特性与光热驱动机构的驱动特性之间的相互关系, 据此选择具有优良性能的光热膨胀材料。采用这种材料微加工制作了一种微型光热驱动机构样机, 进行了微驱动性能的测试实验, 取得理想的研究结果。

## 1 原理与方法

### 1.1 光热微驱动原理

一束激光照射膨胀臂时, 根据选择吸收原则, 激光主要被分子振动及转动能级的跃迁所吸收, 从而将激光能量转化为内能并形成热源, 膨胀臂温度的升高使体积发生膨胀, 如图1(a)所示。膨胀臂在某个方向上的长度和温度的变换关

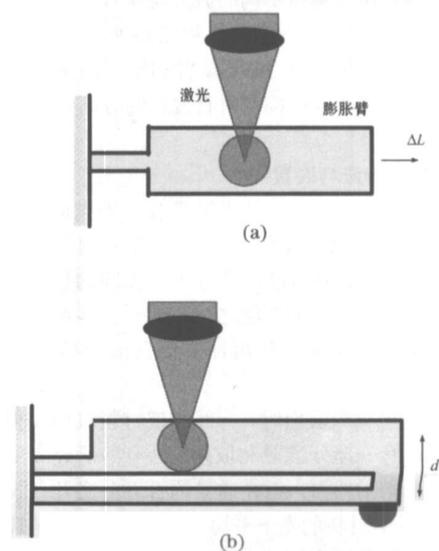


Fig 1 Schematic diagram of the photothermal micro actuation

(a): Photothermal expansion of the expanding arm;  
(b): Deflection of the photothermal micro actuator

收稿日期: 2008-11-22, 修订日期: 2009-02-26

基金项目: 国家“863”计划项目(2006AA04Z237)和国家自然科学基金项目(50775205)资助

作者简介: 刘超, 1984年生, 浙江大学现代光学仪器国家重点实验室博士生 e-mail: liu\_chao@zju.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: zhangdx@zju.edu.cn

系<sup>[9]</sup>可以表示为

$$\Delta L = \alpha \int_0^L [T(x) - T_e] dx \quad (1)$$

其中  $\Delta L$  为膨胀臂的伸长量,  $T(x)$  为膨胀臂在该方向上的温度分布,  $T_e$  为环境温度,  $\alpha$  为线膨胀系数<sup>[10]</sup>。图 1(b) 所示的微型光热驱动机构可将纵向伸长量  $\Delta L$  转变并放大为偏转量  $d$ 。

膨胀臂受激光照射区域的温度上升, 热量依靠热传导的方式在膨胀臂内部传递, 受热区域扩大。同时, 膨胀臂表面与外界环境进行热量交换, 交换的方式主要有传导和辐射。由于实验中膨胀臂的温度升高有限, 因此辐射能量很低, 远小于对流换热失去的能量。已有的研究表明, 辐射方式失去的能量只占失去能量总量的不足 1%, 因此在实际分析中可

$$\Delta L = \frac{\alpha^2 P_0}{2h(D+W)} \left\{ 1 - \frac{h^2 \text{sh}(bR) \cdot [\text{sh}(bL_1) + \text{sh}(bL_2)] + Kbh \cdot \text{sh}(bR) \cdot [\text{ch}(bL_1) + \text{ch}(bL_2)]}{Rb[h^2 + K^2 b^2] \text{sh}(bL) + 2Kbh \cdot \text{ch}(bL)} \right\} \quad (3)$$

其中  $b^2 = \frac{2h(D+W)}{KDW}$ ,  $L_1, L_2$  分别为激光光斑中心到膨胀臂左右端的距离,  $P_0$  为激光功率。

由 (3) 式可以看出, 膨胀臂的伸长量对材料的吸收率  $\mu_A$  非常敏感, 两者成线性关系。选择具有较大光谱吸收率的材料, 可以显著增加膨胀臂的伸长量, 提高光热驱动性能。

大多数材料的光热膨胀都是比较微小的, 通常在微纳级别, 无法直接满足一些场合中较大驱动量的要求。为此, 利用铰链的放大作用, 我们设计了如图 1(b) 所示的光热驱动机构。驱动机构由两个宽窄不同的微悬臂组成, 当作为加热源的激光束照射在宽臂上时, 光热膨胀将使宽臂在长度方向(纵向)产生  $\Delta L$  的伸长量, 由于宽臂和窄臂的顶端连接在一起, 该伸长量将使驱动机构在垂直臂长的方向(横向)产生放大的偏转量  $d$ 。

## 1.2 光谱测量方法与装置

由上述分析可知, 材料的光谱吸收率等光谱特性, 与膨胀臂和驱动机构性能有着密切的关系, 是影响其性能的重要因素之一。因此, 需要通过理论分析和实验测量, 寻找具有合适光谱吸收特性的材料, 使之与驱动光源匹配, 得到较高的能量利用效率, 从而制作出性能优良的微型光热驱动机构。

光束入射到材料表面时, 一部分被材料表面反射, 一部分被吸收, 还有一部分透射和散射。已有的研究表明, 在可见光波段, 总散射约占入射光通量的百万分之几, 散射的影响可以忽略<sup>[15]</sup>。材料的光子平均自由程非常短, 当其远小于样品的厚度时, 其透明度相当低, 可以认为材料的透射率  $\mu_t \approx 0$ 。因此, 在测量光热材料的反射光谱及吸收特性时, 只需考虑反射和吸收即可。

实验中, 材料的反射光谱曲线及吸收特性采用单积分球法<sup>[16]</sup>测量, 测量系统示意图如图 2 所示。积分球内壁为白色的硫酸钡漫反射层, 样品放置在积分球内部右侧。标准卤素灯发出的入射光束, 经透镜组、毛玻璃和光圈, 照射在样品上。反射光线经积分球内部的多次反射后被光谱仪的探头接收, 探头位置如图所示, 并用挡屏挡住直接反射光线, 使其不能直接到达探头。反射光线进入光谱仪进行分析处理, 并

以不考虑通过辐射损失的能量<sup>[11]</sup>。根据我们建立的膨胀臂的热力学模型<sup>[12, 13]</sup>, 可以得到非稳态、有内热源的导热微分方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{K}{\rho c} \nabla^2 T - \frac{2h}{\rho c D} \left( 1 + \frac{D}{W} \right) (T - T_e) + \frac{\mu_A q}{Kd} \quad (2)$$

其中  $\rho$  为材料密度,  $c$  为比热容,  $K$  为热导率,  $D$  为膨胀臂厚度,  $W$  为膨胀臂宽度,  $T$  为瞬时温度,  $h$  为表面对流换热系数<sup>[14]</sup>,  $T_e$  为环境温度,  $\mu_A$  为材料在激光波长处的光谱吸收率,  $q$  为激光功率密度分布。

当半径为  $R$  的均匀光斑照射在膨胀臂上, 联立 (1) 式和 (2) 式, 结合膨胀臂的自然对流换热的边界条件, 便可以得到膨胀臂在长度方向的伸长量, 如下式所示

将反射光谱曲线显示在计算机中。本系统采用的光谱仪为美国 Ocean Optics 公司的 HR2000+ 型光纤光谱仪, 引入积分球作为光束收集器, 能够更好的收集反射光, 减小由于光收集效率的不确定性引起测量结果的误差, 提高测量精度。

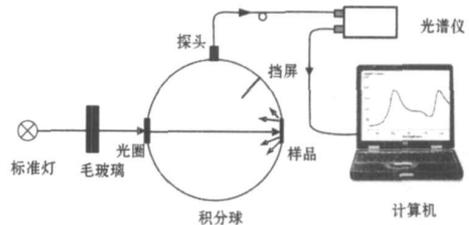


Fig 2 Schematic diagram of the spectral measurement system

## 2 实验与结果

### 2.1 光热膨胀材料的光谱测量与分析

本文对 4 种掺杂染料的聚合物光热膨胀材料进行了反射光谱及吸收特性的测量和分析。为获得理想的测量样本、保证测量精度、减小误差, 测量前将备选光热膨胀材料热塑成型, 并利用压膜机热压成为薄膜, 经过打磨修整, 最终成为预定厚度的均匀薄膜。利用自制的反射光谱与吸收特性测量系统, 得到聚合物材料的反射光谱如图 3 所示。

图 3(a) ~ (d) 分别为聚氯乙烯 (PVC)、高密度聚乙烯 (HDPE)、低密度聚乙烯 (LDPE)、聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 的反射光谱图。PVC 和 HDPE 的反射光谱为双峰结构, 在短波长和长波长光谱段各有一个明显的反射峰。PVC 的反射峰谷为两级台阶结构, 随着波长的增加反射光谱曲线首先平缓减少, 随后快速下降, 在 730 nm 附近形成一个狭窄的反射峰谷, 表明 PVC 仅对 730 nm 附近的色光有较好的吸收。HDPE 的反射峰谷/吸收峰宽阔且平坦, 在可见光波段的总体反射率很低, 对可见光, 特别是 600~690 nm 的光吸收强烈。LDPE 和 PET 的反射光谱为多峰结构, 在短波长和长波长光谱端的突出的反射峰之间, 又有一个或多个反射

峰/峰谷。LDPE 有多个不甚明显的较小的反射峰谷/吸收峰, 总体反射率较高, 没有突出的吸收光谱段。PET 在 600 和 700 nm 附近有两个较小的吸收峰, 总体反射率也较高。

表明 LDPE 和 PET 均没有突出的吸收波段, 对可见光的吸收较差。

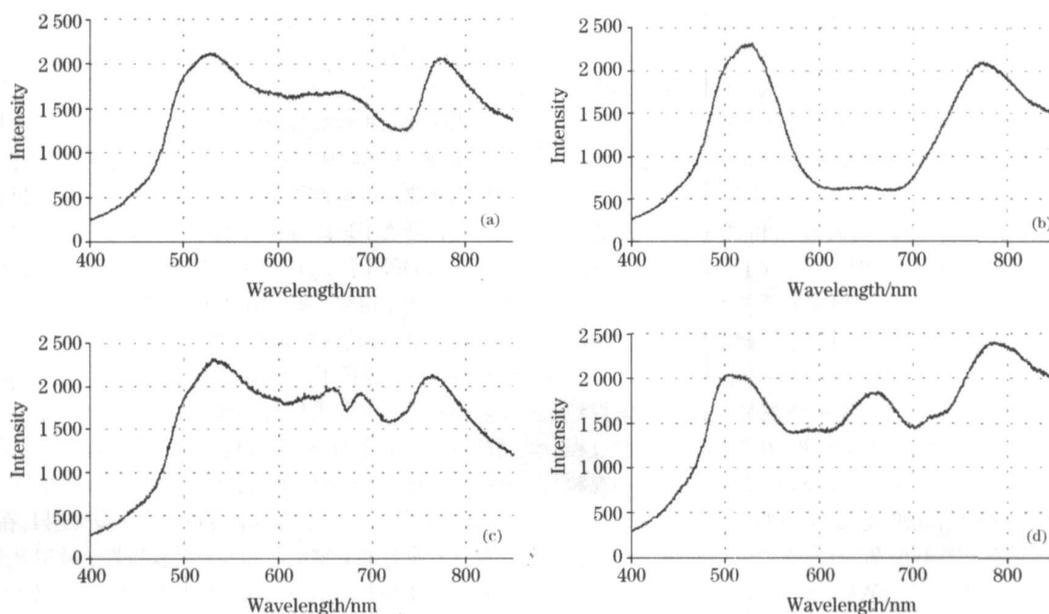
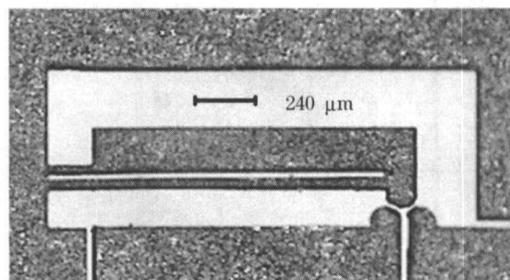
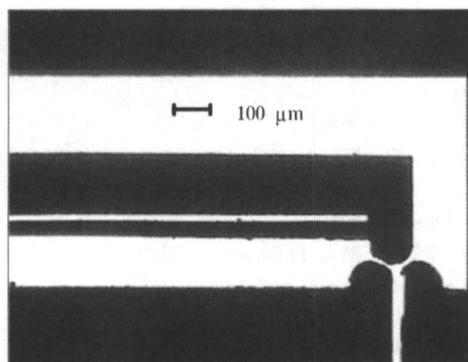


Fig. 3 The reflectance spectra of different polymer materials

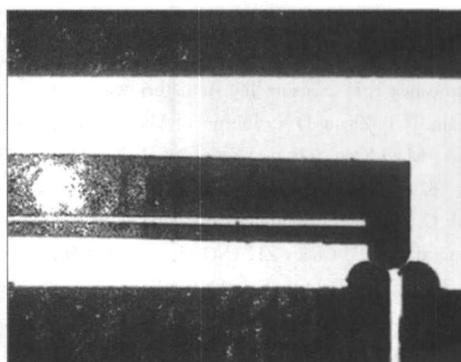
(a); PVC; (b); HDPE; (c); LDPE; (d); PET



(a)



(b)



(c)

Fig. 4 Microscopic images of the photothermal micro-actuator and its drive states

(a); Entire view of the actuator; (b); Original state of the actuator;

(c); Snapshot of the actuator being heated by a 10 mW laser beam

从图 3 可以看到, HDPE 材料的吸收峰宽阔平坦且突出, 在 600~690 nm 波段都有强烈的吸收, 对驱动光源具有

较好的适应性和较高的能量利用效率。同时 HDPE 具有较低的热导率, 加热的过程中热量损失小, 且膨胀率较高, 是一

种非常适合制作微型光热驱动机构的光热膨胀材料。为了获得光热驱动机构的最佳驱动特性, 需要选择与光热材料的吸收光谱特性相匹配的激光驱动光源。本文中, 我们选择波长在 650 nm 的半导体激光器作为驱动光源。

## 2.2 光热驱动实验

采用 HDPE 材料利用比利时 OPTEC 公司的 PROMASTER 型准分子激光微加工平台加工制作了一个微型光热驱动机构样机, 其厚度为 30  $\mu\text{m}$ , 长度为 1 500  $\mu\text{m}$ , 宽臂的宽度为 160  $\mu\text{m}$ , 窄臂的宽度为 40  $\mu\text{m}$ , 如图 4(a) 所示。

利用自行研制的 CCD 显微监控和视频运动测量系统<sup>[16, 17]</sup>, 对微型光热驱动机构样品进行了驱动性能测试研究。实验在温度 (23  $\pm$  0.2)  $^{\circ}\text{C}$  的恒温室内进行。驱动光源为波长 650 nm 的半导体激光器, 用功率计测定照射在微驱动机构器上的功率在 0~10 mW 范围内连续可调。

图 4(a) 是在采用反射式照明的体视显微镜下采集得到的微型光热驱动机构样机的显微图像。在光热驱动实验过程中, 为清楚地显示光斑的位置和大小, CCD 显微监控和视频运动测量系统采取透射式照明方式, 以便更清晰地反映微驱动机构的驱动状态。图 4(b) 和 (c) 分别为微型光热驱动机构未受激光照射和受功率 10 mW 的激光照射时产生的光热偏转运动的显微视频截图(由于生物显微镜视场大小的限制, 获得的显微视频截图为光热驱动器自由端局部放大图像)。实验表明, 在 10 mW 激光照射下, 测量得到的微型光热驱动机构的偏转量可达 18.7  $\mu\text{m}$ , 微触点可完全接触, 能够实现

其微开关的功能。这从另一个侧面表明 HDPE 材料具有优良的光谱吸收及光热膨胀特性, 可作为理想的微型光热驱动机构的制作材料。

## 3 结 论

光热驱动机构通过吸收激光能量并将之转换为热能来实现微驱动, 光热膨胀材料的反射光谱及光谱吸收特性是影响微型光热驱动机构性能的关键因素。本文对光热膨胀材料的光谱特性开展了理论分析, 并采用单积分球测量法对 PVC, HDPE, LDPE, PET 四种聚合物材料的反射光谱及吸收特性进行了测量研究。实验结果显示, HDPE 材料在 600~690 nm 的范围内有较强烈的光谱吸收。选取 HDPE 作为光热膨胀材料, 设计制作了一种厚度 30  $\mu\text{m}$ 、长度 1 500  $\mu\text{m}$  的微型光热驱动机构, 并采用自行研制的 CCD 显微监控和视频运动测量系统进行了驱动机构的驱动性能测量实验。在 10 mW/650 nm 的半导体激光器驱动下, 该微型光热驱动机构可以产生 18.7  $\mu\text{m}$  的光热偏转量, 进一步证明其在 650 nm 左右具有良好的光谱吸收和光热转换特性。微型光热驱动机构具有体积小、输出位移大、结构简单、制作方便等优点, 并且无需导线连接, 可实现远程非接触驱动控制, 在 MEMS、微机器人及微纳米技术其他领域具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献

- [1] HUANG Xirbo, JIA Jiaruan, WANG Weidong(黄新波, 贾建援, 王卫东). Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering (机械科学与技术), 2003, 7: 21.
- [2] Yu S, Piyabongkam D, Sezen A, et al. Sensors and Actuators A, 2002, 102: 49.
- [3] Poosanaas P, Tonooka K, Uchino K. Mechatronics, 2000, 10(4): 467.
- [4] Bohm S, Burger G J, Korthorst M T, et al. Sensors and Actuators A, 2000, 80(1): 77.
- [5] Wang G Z, Ji L H, Wen S Z. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39: 79.
- [6] Kolesar E S, Ruff M D, Odom W E, et al. Thin Solid Films, 2002, 420-421: 530.
- [7] Kenji U. Smart Materials and Structures, 1998, 7: 273.
- [8] Kohl M, Skrobaneck K D. Sensors and Actuators A, 1998, 70: 104.
- [9] He Y L, Zhang H J, Zhang D X. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2005, 15: 1637.
- [10] HUA Shiqun, LUO Ying, ZHAO Guoqi, et al(花世群, 骆英, 赵国旗, 等). Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2007, 18(7): 820.
- [11] Li L, Deepak U. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2004, 14: 1734.
- [12] ZHANG Dongxian, LIU Chao, ZHANG Haijun(张冬仙, 刘超, 章海军). Acta Physica Sinica(物理学报), 2008, 57(5): 3107.
- [13] Zhang D X, Zhang H J, Liu C, et al. Optics Express, 2008, 16(17): 13476.
- [14] Baglio S, Castorina S, Fortuna L, et al. Sensors and Actuators A, 2002, 101: 185.
- [15] Blaschke H, Kohlhaas J, Kadkhoda P, et al. SPIE, 2003, 4932: 536.
- [16] Zhang D, Zhang H, Liu C, et al. Microscopy Research & Technique, 2008, 71(2): 119.
- [17] LIU Chao, ZHANG Dongxian, ZHANG Haijun(刘超, 张冬仙, 章海军). Journal of Optoelectronics • Laser(光电子 • 激光), 2008, 19(8): 1003.

# Development of Photothermal Microactuator Based on Spectral Analysis of Photothermal Expansion Material

LIU Chao, ZHANG Dong xian\*, ZHANG Hai jun

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

**Abstract** The spectral characteristic of materials is the key factor of the photothermal microactuator's performance. The present article introduces the operating principle, and analyzes the relationship between the material spectral characteristic and its expansion. As the photothermal microactuator is an innovative microactuator based on photothermal expansion that absorbs the laser energy and converts it into internal energy to realize the microdrive, the optimal photothermal expansion material with proper absorption spectrum characteristic matching the spectrum of light driving source needs to be found. The reflection and absorption spectra of four types of polymeric material, including PVC, HDPE, LDPE and PET, were obtained by using the single integrating sphere method. The results indicate that the reflection spectrum of the dyed high density polyethylene (HDPE) is of double peak structure in visible band, and there is strong absorption within the range of 600-690 nm, which means it would match the light driving source quite well in the broad spectral range. Therefore, HDPE was chosen as the photothermal expansion material. In order to check out the feasibility and performance of the photothermal microactuator based on HDPE, a prototyping microactuator 1 500 mm in length and 30 mm in thickness was manufactured by using an excimer laser micromachining system. With a laser diode (10 mW/650 nm) as the external power source to activate the microactuator, performance measurement experiments were carried out by using a self produced video movement measurement system with a CCD coupled microscope. The experiment results demonstrate that the deflection of the microactuator reaches 18.7 mm at 10 mW of laser power, showing that the characteristics of spectral absorption and light heat transition are quite well at 650 nm. This novel photothermal microactuator has simple structure, adjustable displacement output, and more mobility, and can be controlled remotely, so it will be quite useful for applications in the fields of micro-optical electro-mechanical systems (MOEMS).

**Keywords** Photothermal expansion; Microactuator; Reflection spectrum, Absorption characteristic

(Received Nov. 22, 2008; accepted Feb. 26, 2009)

\* Corresponding author