

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2007132

基于微悬臂梁的微量液体浓度定量检测*

章泽铵, 金涛

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要:采用双材料微悬臂梁结构,实现了一种对微量液体浓度的定量检测方法。该方法是基于双材料微悬臂梁的温度敏感性,当微量液体分析物吸收光热光谱特征波长的光时,温度发生变化,悬臂梁相应会发生弯曲,通过光杠杆法测量弯曲量,从而实现微悬臂梁对微量液体浓度的定量检测。为了验证对微量液体浓度测量的适用性,实验中采用了已知在 980 nm 处光热吸收峰的 NaYF_4 样品溶液,分别取多组已知浓度的样品溶液 1 和 0.5 μL 体积进行测量,通过最小二乘法拟合出浓度与测得电压值之间的关系,结果显示,液体浓度与所测得的电压值成呈线性关系,与理论分析符合。且在 1 和 0.5 μL 体积的样品溶液拟合曲线的线性相关系数分别为 $R_1=0.9980$, $R_2=0.9895$,分辨力分别为 1.25, 1.40 mg/mL。最后通过测试 1 μL 体积的多组浓度溶液,其浓度测量结果误差均在 2 mg/mL 以内,表明该方法能有效检测浓度,可用于确定体积微量液体的浓度检测。

关键词:光热光谱;双材料微悬臂梁;微量液体;浓度检测

中图分类号: O482 TH7 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Concentration quantitative detection of micro-quantity liquid based on micro-cantilever

Zhang Ze'an, Jin Tao

(School of Optical Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The dual-material micro-cantilever structure is adopted to realize a quantitative detection method for the micro-quantity liquid. The method is based on the temperature sensitivity of bi-material micro-cantilever. When the micro-quantity liquid analyte absorbs the light of the characteristic wavelength of the photothermal spectrum, its temperature changes, the cantilever will be bent accordingly, and the amount of bending is measured with the optical lever method, so that the quantitative detection of the micro-quantity liquid is realized with the micro cantilever. In order to verify the applicability of measuring the micro-quantity liquid, the NaYF_4 sample solution with a known light-heat absorption peak at 980 nm was used in the experiment, and multiple sets of 1 and 0.5 μL solutions with known concentrations were taken for measurement. The relationship between the concentration and the measured voltage value was fitted by the least square method. The results show that the liquid concentration has a linear relationship with the measured voltage value, which is consistent with the theoretical analysis. And the linear correlation coefficients of the fitted curves of the sample solutions with the volume of 1 and 0.5 μL are $R_1=0.9980$, $R_2=0.9895$, and the resolutions are 1.25, 1.40 mg/mL, respectively. Finally, multiple sets of different concentration solutions with a volume of 1 μL were tested, the errors of the concentration measurement results are all within 2 mg/mL, which indicates that the proposed method can effectively detect the concentration and can be used in the concentration detect of the volume determined micro-quantity liquid.

Keywords: photothermic spectrum; bi-material micro-cantilever; micro-quantity liquid; concentration detection

收稿日期: 2020-11-16 Received Date: 2020-11-16

* 基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB2007501)项目资助

0 引言

浓度检测在生物应用的微流控芯片,化学微通道反应器中作为重要指标^[1-2],这些应用都是微体积下浓度检测。而常见的浓度检测方法有,比重法,折射率法等^[3-4],这些方法有着各自不同的特点和优势。但随着科技的发展,应用场景的要求越苛刻,我们对一些浓度检测技术的要求提高,这些检测方法难以对一些特殊要求的浓度进行检测。例如对微通道内或者微量的珍贵液体浓度进行检测^[5-6]。常用的浓度检测方法难以对其检测,如上面提到的折射率法测浓度,常用阿贝折射仪,测量时需要2~3滴(相当于2 μL)液体进行测量,对更微量液体下测量存在缺陷。国外有一种微通道嵌入微悬臂梁上的方法,但其工艺比较复杂^[4]。国内有提出微悬臂梁检测液体浓度,一般是在微悬臂上镀层工艺^[7],这样的镀层工艺作为受体层的固定和选择性差,对检测对象的检测还存在缺陷^[8]。以上方法对体积较大溶液可使用,但对微量液体下的浓度检测还存在缺陷。微悬臂梁因其具有小型化、超灵敏、快速响应等优点,近些年来广泛用于生物探测,化学检测,医学,原子力显微镜等领域^[9-12]。

基于上述,为了测量微量液体下浓度,本文设计了静态非接触的浓度检测装置,利用已知待测物质吸收其光热吸收谱特征峰的激光时,不同浓度的液体吸收光能不同,引起待测物质不同的温度变化,再由双材料热膨胀系数不同的微悬臂梁测量其温度变化;微悬臂梁在不同温度下弯曲程度不同,利用光杠杆方法测量其弯曲量,这样可以利用弯曲量和温度的关系,得到不同浓度对应不同的弯曲量关系来检测微量液体待测物质的浓度。微悬臂梁因其尺寸非常小,因此在微量液体的浓度检测方面有着巨大优势和应用前景。本文实验表明该方法可对确定体积的微量液体浓度进行精度较高的检测。

1 实验原理分析

1.1 温度测量原理

1) 双材料悬臂梁与温度关系计算

双材料悬臂梁的结构如图1(a)所示,假设悬臂梁长度为 L ,金属层的厚度为 t_1 ,氮化硅的厚度为 t_2 。由于材料的热膨胀系数不同,假设在室温 T_0 下悬臂梁未发生弯曲,当温度由 T_0 升高到 $T(T_0 + \Delta T)$ 时,悬臂梁由于热应力不同而发生弯曲,其弯曲量为 ΔZ ,如图1(b)所示。有弹性力学的梁弯曲理论^[13],考虑热应力,则自由端的挠度微分方程为:

$$\frac{d^2z}{dx^2} = 6(\alpha_1 - \alpha_2) \left(\frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right) (T - T_0) \quad (1)$$

其中,

$$K = 4 + 6n + 4n^2 + \frac{E_1}{E_2} n^3 + \frac{E_2}{E_1} \frac{1}{n},$$

$$n = \frac{t_1}{t_2} \quad (2)$$

式中: α_1, α_2 为双材料的热膨胀系数; E_1, E_2 为双材料的弹性模量;下标1表示金属层;下标2表示氮化硅层。当温度发生变化时,求解悬臂梁的自由端的挠度微分方程式(1),并结合边界条件:

$$z|_{x=0} = 0$$

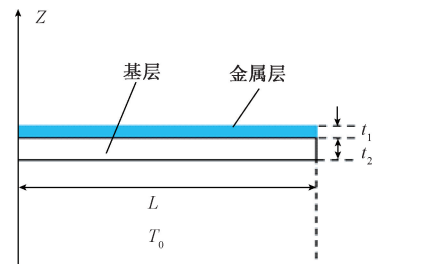
$$\frac{dz}{dx}|_{x=0} = 0$$

则求得的微悬臂梁挠度方程为:

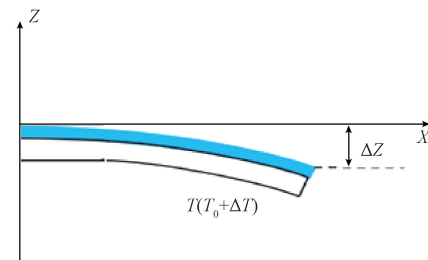
$$Z(x) = 3(\alpha_1 - \alpha_2) \left(\frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right) (T - T_0) x^2 \quad (3)$$

则由式(3)可得悬臂梁的温度灵敏度为:

$$S_T = 3(\alpha_1 - \alpha_2) \left(\frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right) L^2 \quad (4)$$



(a) 微悬臂梁结构
(a) The structure of microcantilever



(b) 微悬臂梁受热挠曲
(b) Thermal deflection of microcantilever

图1 双材料微悬臂梁结构和挠曲

Fig. 1 The structure and deflection of bi-material microcantilever

从式(4)可以知道,当悬臂梁的材料确定的情况下,悬臂梁的温度灵敏度 S_T 与长度成正比例关系。目前常用的微悬臂梁有用氮化硅做基底,镀层材料用金或者铝涂层,由式(2)和(4)可作曲线如图2所示。由图2可以看出在同一厚度比的条件下,铝涂层比金涂层的悬臂梁有更好的温度灵敏度;且都存在最佳厚度比,由图2可得铝涂层的悬臂梁最佳厚度比 $t_1/t_2 = 0.7$,金涂层的悬臂

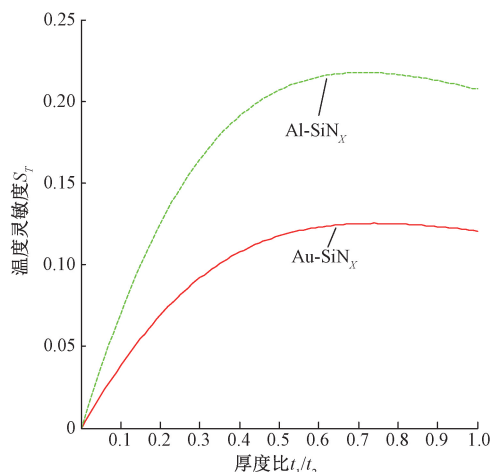


图2 Al和Au镀层双材料微悬臂梁厚度比 t_1/t_2 对温度灵敏度 S_T 的影响,虚线为Al-SiN_x的理论灵敏度曲线,实线为Au-SiN_x的理论灵敏度曲线

Fig. 2 The influence of the thickness ratio t_1/t_2 of the bi-material microcantilever with Al and Au coatings on the temperature sensitivity S_T , the dashed line is the theoretical sensitivity curve of Al-SiN_x, the solid line is the theoretical sensitivity curve of Au-SiN_x

梁最佳厚度比 $t_1/t_2 = 0.72$ 。由于实验条件限制,不能自行设计制作悬臂梁,所以在实验时采用了商业悬臂梁进行实验,其镀层为金涂层,长度为 $225\ \mu\text{m}$,宽度为 $32\ \mu\text{m}$,厚度为 $2\ \mu\text{m}$,其中金涂层厚度为 $30\ \text{nm}$ 。

2) 光杠杆测量悬臂梁弯曲量原理

光杠杆测量原理如图3所示,探测激光器经过透镜聚焦后照射在悬臂梁金属涂层上,产生反射光,反射光进入到四象限位置探测器(position sensitive detector, PSD)中。当悬臂梁产生偏转时,PSD上的探测到的光斑位置也会发生相应变化,探测器的输出电压信号也会随之改变,所以就可以通过测量PSD的输出电压来描述悬臂梁的弯曲幅度。当梁弯曲幅度为 Δz ,弯曲角度为 A 时,由几何关系分析可知反射光束会偏转 $2A$ 的角度,反射光点在探测器上位置会产生位移 ΔM ,定义此时的位置为 M' 。这样就可以通过PSD输出的电压来描述悬臂梁的弯曲量。悬臂梁长 L ,探测器与悬臂梁之间的距离为 S ,则由几何关系可得^[14],

$$M \approx 2A \cdot S = 2 \frac{\Delta z}{L} \cdot S = \frac{2S}{L} \Delta z \quad (5)$$

四象限光电探测器输出信号为电流,电流需通过I-V转换器电路网络转化为电压信号,其中探测器输出的电流与弯曲幅度关系为^[15],

$$\Delta i = 6\eta\chi P \frac{S}{La} \Delta z \quad (6)$$

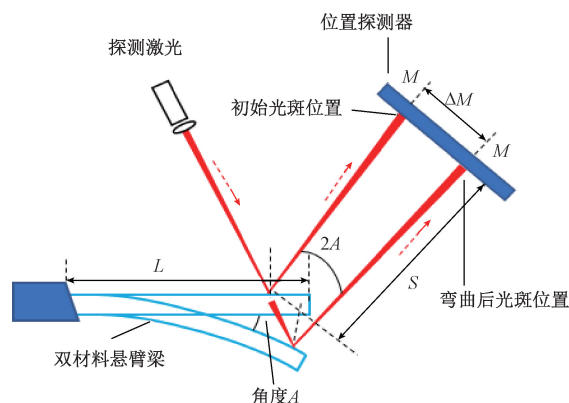


图3 光杠杆测量悬臂梁弯曲结构
Fig. 3 Optical lever measuring cantilever bending structure

其中, η 是光电二极管光电转换效率; χ 是确定的误差系数; P 是反射到探测器上的激光功率; a 是激光在探测器上形成光斑的直径。利用I-V电路可以把电流转换成电压,如下:

$$\Delta V = \Delta i \cdot R_{IV} \cdot A_{\text{diff}} \quad (7)$$

其中, R_{IV} 是转换器的互阻抗; A_{diff} 为放大器的增益。由式(6),(7)可以看出光斑在探测器上移动的距离与探测器的输出电压成正比例关系。

1.2 材料吸收光后导致溶液温度上升原理

光热光谱(photothermic spectrum)是指光热效应生成的热能量按照辐射光波长的分布。而材料吸收光后将一部分能量转变为热能引起光热效应^[16]。从微观分析就是由于液体的成分中分子与照射的红外辐射进行分子共振,这导致分子在特定的波数上吸收红外,这种特定波数吸收由于分子键配置^[5]。

材料对光的吸收后,导致材料的温度会升高;这种热量的演变可以用傅里叶定律方程表示如下^[17]:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - k \Delta T = \frac{Q(t)}{V} \quad (8)$$

其中, k 是导热系数; V 是体积; C_p 是比热容; ρ 是样品密度; t 是激光照射时间; $Q(t)$ 是吸收的热量(在这里为吸收光的功率 P_{abs})。对于单个粒子其厚度远小于材料厚度,则吸收的功率 P_{abs} 可以表示如下^[18]:

$$P_{\text{abs}} = \sigma_{\text{inc}} I_{\text{heat}} \quad (9)$$

其中, σ_{inc} 是吸收截面积; I_{heat} 是加热激光照射下所吸收的功率。这里简化计算,假设红外吸收的热量吸收光的功率全转化为热量,且粒子体积较小没有温度梯度,则由式(8)和(9)可得单个粒子吸收光功率后温度变化如下^[17]:

$$\Delta T = \frac{P_{\text{abs}}}{V\rho C_p} t = \frac{\sigma_{\text{inc}} I_{\text{heat}}}{V\rho C_p} t \quad (10)$$

对于给定的材料,单个粒子体积 V , 密度 ρ , 比热容 C_p 已知确定。从式(10)可以看出,在确定照射的激光功率情况下,确定材料的单个粒子温度变化为定值(由于粒子比较小,照射时间很短就能升高到最大温度)。而浓度 C 表示了在一定体积液体下,材料粒子的多少;在激发激光功率不变,照射区域大小相同情况下,物质浓度越大,照射区域粒子越多,吸收光的功率就越多,即温度升高越多。其中考虑由于测试样品溶液的体积很小,因此液体的厚度很小,所以红外消光问题并不严重^[8]。从而材料溶液的温度变化就与物质浓度 C 近似成线性关系,表明典型的光谱线性行为^[5]。用 ΔT_s 表示确定体积的液体温度变化,即确定液体体积下温度变化 $\Delta T_s \propto C$ 。

综上,结合被测物质溶液在激发激光照射下,被测物质溶液温度变化与其浓度成线性关系,以及双材料微悬臂梁弯曲量与温度近似成线性关系,则测量的电压值与浓度成线性关系,即 $\Delta V \propto C$ 。

2 实验过程与结果分析

2.1 实验环境

如图 4 所示为实验装置,探测激光使用的是 650 nm 的激光,探测器采用的是四象限位置探测器(型号是 THORLABS 的 PDQ80 A),悬臂梁是以氮化硅为基底的金涂层双材料微悬臂梁,数据采集卡(NI CompactRIO)的采集数据最小分辨宽度为 0.2 mV,样品光热激发激光采用可调功率的 980 nm 波长的激光器。将 980 nm 激光间断照射已知样品 NaYF_4 溶液,通过双材料悬臂梁与溶液近距离(几微米距离)探测,通过探测激光探测温度引起的悬臂梁弯曲量,探测激光反射到四象限位置探测器上位置变化,以电压的形式被数据采集卡采集,最后由计算机对数据进行处理。

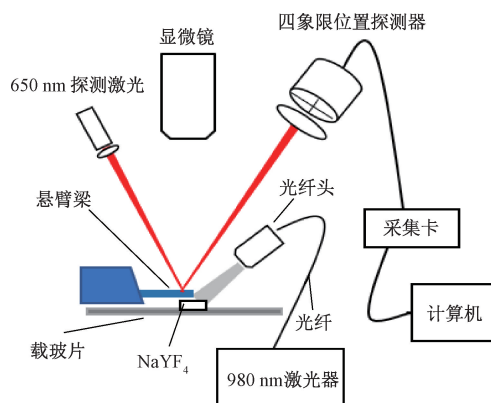


图 4 浓度检测实验装置结构

Fig. 4 Structure of the concentration detection experiment device

实验中配置了 20, 40, 50, 55, 65, 80, 100 mg/mL 多种标准浓度的 NaYF_4 溶液。配不同浓度溶液时,首先用电子分析天平称取 100 mg 的 NaYF_4 粉末样品,用移液枪(德国艾本德公司)移液 1 000 μL 到 100 mg 的样品配置成浓度为 100 mg/mL 的样品溶液,再用移液枪分别将体积 1 000 μL 的浓度为 100 mg/mL 的样品溶液分成 10 等份。通过计算分别用移液枪移液不同量液体稀释 100 mg/mL 的样品溶液配置成 20、40、50、55、65、80、100 mg/mL 的标准浓度溶液,为了保证移液枪准确性和精度,每次使用都保证在移液枪的量程 20% 以上的移液量。

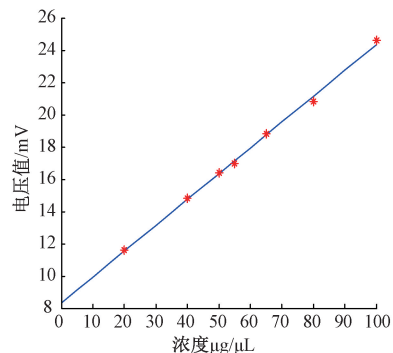
2.2 实验方法

已知掺有 Yb^{2+} , Er^{2+} 的 NaYF_4 溶液,其光热吸收光谱显示在 980 nm 附近有较强的吸收特征峰值^[19],随着激发功率的增大发光强度与发热量将会增加。

为了验证微量液体的浓度测量,实验中先后多次用移液枪移液已配置好的 20、40、50、55、65、80、100 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 7 种标准浓度溶液 1 μL 体积到载玻片上进行多次测量,调整载玻片在悬臂梁正下方位置。移液枪移液 1 μL 液体到载玻片上,经过测量,每次形成的面积大概是 1.92 mm^2 ,这样减少了液滴形状对激发激光吸收的影响。打开激发激光,实验中使用的激发激光的功率密度始终为 21.2 mW/mm^2 。为了减少悬臂梁直接对 980 nm 的激光吸收的影响,实验中用 980 nm 激光对 NaYF_4 溶液采用了间断照射。同样方式用移液枪移液 20、40、50、80、100 $\mu\text{g}/\mu\text{L}$ 5 种标准浓度溶液 0.5 μL 到载玻片上,经过测量,每次形成的面积大概是 0.96 mm^2 。

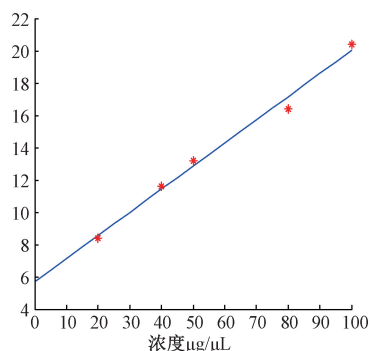
2.3 实验结果及讨论

经过测量得到了 0.5 和 1 μL 的多种不同浓度的测量值,为了减少单次测量偶然因素误差,实验中对每个浓度的数据进行了多次测量取平均值。根据实验数据用最小二乘法进行数据拟合,拟合的数据曲线如图 5(a)、(b) 所示。



(a) 1 μL 液体浓度与电压值拟合曲线

(a) Fitting curve of concentration of 1 μL liquid vs. voltage value



(b) 0.5 μL 液体浓度与电压值拟合曲线
(b) Fitting curves of concentration of 0.5 μL liquid vs. voltage value

图5 微量液体浓度与电压值拟合曲线

Fig. 5 Fitting curves of micro-quantity liquid concentration vs. voltage value

从图5可以看出 NaYF_4 浓度与测量的电压值成线性关系,在测量同一体积下,测量电压值随着浓度增加而增大,与上面的理论分析符合。当测量的液体体积小,测量的同等浓度的电压值也减小,原因是同等浓度下,体积小的液体含 NaYF_4 的物质越少,吸收激光越少。所以通过测量光热光谱特征波段激发的样品温度对应的电压值可以反应被测物质的浓度值,这对于研究微量液体物质的浓度有着十分重要的意义。在 1 μL 液体情况下,采用最小二乘法对数据进行拟合,得到线性回归方程为 $y = 0.1601x + 8.3368$,其相关系数为 $R1 = 0.9980$ 。在 0.5 μL 的情况下,得到的线性回归方程为: $y = 0.1431x + 5.6980$,其相关系数为 $R2 = 0.9895$ 。从拟合曲线可以得到 1 μL 时,浓度灵敏度为 $0.1601 \text{ mV} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \mu\text{L}$,由数据采集卡采集的数据最小分辨宽度为 0.2 mV,所以浓度检测的分辨力为 1.25 mg/mL; 0.5 μL 时,浓度灵敏度为 $0.1431 \text{ mV} \cdot \mu\text{g}^{-1} \cdot \mu\text{L}$,所以浓度检测分辨力为 1.40 mg/mL。结果验证了此方法能用于微量液体的浓度测量。

为了验证实验可靠性,分别再配置了 32、50、71、80、100 mg/mL 的已知的标准浓度溶液。用移液枪分别移取 1 μL 到载玻片上依次测量一次。将测的数据与此浓度在上面测试的拟合直线计算数据进行比较,结果如表1所示。

上述结果表明,测试数据的回收率(实际值/测量值)在 99.29%~105.33%,在测量范围内,浓度测量结果误差均在 2 mg/mL 以内,测量误差不超过 6%,表明实验拟合出的预测模型检测可靠性较高,能有效检测待测溶液浓度。

3 实际应用内容展望

通过上述实验验证微悬臂梁可对微量体积液体的

表1 准确度测试数据

Table 1 Accuracy test data

标准溶液实际浓度值 /($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$)	测量电压值 /mV	电压值换算成拟合模型浓度值 /($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$)	实际值/测量值 /%
32	13.2	30.38	105.33
50	16.4	50.36	99.29
71	19.6	70.35	100.92
80	21.2	80.34	99.58
100	24.4	100.33	99.67

浓度进行测量,下一步考虑将微悬臂梁集成到微通道上,如集成到微流控芯片的内部。微流控芯片具有分析速度快,样品消耗小等优点,近些年得到广泛关注应用。2003年,用各种四烷基铵盐的水凝胶来修饰的微悬臂梁与微流控芯片结合对铬酸根浓度进行检测^[20];2018年,利用干法功能化的压阻聚合物微悬臂梁检测了心脏型脂肪酸结合蛋白^[21]。这些在微流控芯片中的应用都是在微悬臂梁功能化后,再置于微流控芯片的液体里进行检测的。前面提到镀层工艺作为受体层的固定存在选择性差,对检测对象的检测还存在缺陷。利用光热光谱特征波段照射,微悬臂梁集成到微流控芯片,工艺相对简单,可用于化学金属离子浓度的检测,可以应用到环境保护检测等;还可用于生物,如细菌的浓度检测^[22]。且可利用微悬臂梁的温度敏感性,用来测量微流控芯片中细胞在药物作用后的温度变化,以此评判药效。并且在此系统下用不同波段激光照射物质,来检测物质的光热光谱。光热光谱技术可用来解决对物质的识别问题,光谱学技术是基于中红外光谱中独特的分子振动跃迁,或“分子指纹”区域,在该区域许多分子显示特征峰没有泛音,使它们具有高度选择性^[5]。

4 结论

本文用微悬臂梁测微量液体浓度,此方法测量液体量少,样品消耗小,操作简单,线性拟合较好。利用双层微悬臂梁对温度的灵敏性,结合物质的光热光谱在特征峰激发发热性质,测量物质浓度。双层材料悬臂梁由于材质的不同,热膨胀系数不同,在温度变化时而发生弯曲;物质在特征波段激发下,由于不同浓度的溶液温度变化不同,从而实现微悬臂梁对物质浓度的检测。通过计算知道微悬臂梁有最佳厚度比可以到达更高的灵敏度,但由于实验条件限制,所以,采用了商业微悬臂梁,测量计算出样品的在 1 和 0.5 μL 体积的浓度分辨力分别为 1.25 和 1.4 mg/mL。微悬臂梁非常小,所以可以用于测

微量液体浓度,本文测量了1和0.5 μL 的液体浓度,在1 μL 处做了实验拟合出的预测模型的验证,得到验证测量的实验浓度偏差在2 mg/mL以内;同时验证了微悬臂梁测量0.000 5 mL的微量液体的浓度的技术可行性。接下来,通过激光功率和悬臂梁的优化可以提高分辨力;在生物或者化学应用中,由于微通道体积固定,下一步可用于微通道内物质的浓度测量。

参考文献

- [1] TANG Q Q, LI X Y, LAI CH, et al. Fabrication of a hydroxyapatite-PDMS microfluidic chip for bone-related cell culture and drug screening[J]. *Bioactive Materials*, 2020,6(1):169-178.
- [2] 叶飞飞,张宝丹,勒海波,等. 微通道反应器合成纳米 BaSO_4 颗粒及其在干片多功能层上的应用[J]. *化工学报*,2019,70(3):1179-1187.
- YE F F, ZHANG B D, LE H B, et al. Preparation of BaSO_4 nanoparticles in microchannel reactor and its application in multifunctional layers of medical slices[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)*, 2019,70(3):1179-1187.
- [3] 李达,何巍,娄小平,等. FBG级联MZI的温度和酒精溶液浓度传感特性研究[J]. *仪器仪表学报*,2017,38(12):3020-3027.
- LI D, HE W, LOU X P, et al. Simultaneous measurement of temperature and alcohol solution concentration based on the cascade of FBG and MZI[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017,38(12):3020-3027.
- [4] 魏中晗,盛小夏,刘炳红,等. 基于金属膜空芯光纤的有色溶液浓度传感系统[J]. *光学学报*,2013,33(7):8-13.
- WEI ZH H, SHENG X X, LIU B H, et al. Spectroscopic sensing system for colored solution concentration based on metallic hollow fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013,33(7):8-13.
- [5] MIRIYALA N, KHAN M F, THUNDAT T. Thermomechanical behavior of a bimaterial microchannel cantilever subjected to periodic IR radiation[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016,235:273-279.
- [6] 李强,孙丽存,韩广辉,等. 毛细管成像法精确测量微量液体的折射率[J]. *光学精密工程*,2012,20(7):1440-1446.
- LI Q, SUN L C, HAN G H, et al. Measurement of refractive index of micro-quantity liquid by glass capillary imaging[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012,20(7):1440-1446.
- [7] 李桂银,周治德,梁晋涛,等. 一种用碳纳米管微悬臂梁生物传感器检测血小板衍生生长因子浓度为0.5~10微克/毫升的方法:CN104089842A [P]. 2016-05-11.
- LI G Y, ZHOU ZH D, LIANG J T, et al. A method for detecting the concentration of platelet-derived growth factor of 0.5-10 $\mu\text{g}/\text{mL}$ by using carbon nanotube microcantilever biosensor: CN104089842A [P]. 2016-05-11.
- [8] ALODHAYB A, KHAN F, ETAYASH H, et al. Review—nanomechanical calorimetric infrared spectroscopy using bi-material microfluidic cantilevers [J]. *Journal of The Electrochemical Society*, 2020,167(3):037504.
- [9] BASU A K, BASU A, BHATTACHARYA S. Micro/Nano fabricated cantilever based biosensor platform: A review and recent progress [J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2020,139:109558.
- [10] KRAUSE A R, NESTE C V, SENESAC L, et al. Trace explosive detection using photothermal deflection spectroscopy [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008,103(9):2499.
- [11] WIG A, ARAKAWA E T, PASSIAN A, et al. Photothermal spectroscopy of *Bacillus anthracis* and *Bacillus cereus* with microcantilevers [J]. *Sensors & Actuators B Chemical*, 2006,114(1):206-211.
- [12] 周宁,钟舜聪,张秋坤,等. 微梁模态分析的声激励光学相干振动层析系统[J]. *仪器仪表学报*,2018,39(12):47-54.
- ZHOU N, ZHONG SH C, ZHANG Q K, et al. Acoustic-excitation based on optical coherence vibration tomography for modal analysis of microbeams [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018,39(12):47-54.
- [13] BARNES J R, STEPHENSON R J, WOODBURN C N, et al. A femtojoule calorimeter using micromechanical sensors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994,65(12):3793-3798.
- [14] 蒋洪川,张文旭,张万里. 薄膜磁致伸缩系数计算机辅助测试系统的设计[J]. *电子测量与仪器学报*,2005,19(3):72-74,78.
- JIANG H CH, ZHANG W X, ZHANG W L. Design of thin film magnetostrictive coefficient computer assistant measuring system [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2005,19(3):72-74,78.
- [15] FUKUMA T, JARVIS S P. Development of liquid-environment frequency modulation atomic force microscope with low noise deflection sensor for cantilevers of various dimensions [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006,77(4):043701.

- [16] KATZENMEYER A M, HOLLAND G, CHAE J, et al. Mid-infrared spectroscopy beyond the diffraction limit via direct measurement of the photothermal effect [J]. *Nanoscale*, 2015,7(42):17637-17641.
- [17] DAZZI A, PRATER C B, HU D C, et al. AFM-IR: Combining atomic force microscopy and infrared spectroscopy for nanoscale chemical characterization [J]. *Applied Spectroscopy*, 2012,66:1635-1384.
- [18] VERMEULEN P, COGNET L, LOUNIS B. Photothermal microscopy: Optical detection of small absorbers in scattering environments [J]. *Journal of Microscopy*, 2014, 254(3): 115-121.
- [19] DARWISH A M, WILSON S, BALCKWELL A, et al. Ammonia sensor based on polymer-inorganic nanocomposite thin film up conversion light emitter prepared by double-beam pulsed laser deposition [J]. *American Journal of Materials Science*, 2015,5(3A):8-15.
- [20] ZHANG Y F, JI H F, BROWN G M, et al. Detection of CrO_4^{2-} using a hydrogel swelling microcantilever sensor [J]. *Analytical Chemistry*, 2003, 75 (18): 4773-4777.
- [21] AGARWAL D K, PRASAD A, VINCHURKAR M, et al. Detection of heart type fatty acid binding protein(H-FABP) using piezoresistive polymer microcantilevers functionalized by a dry method [J]. *Applied Nanoscience*, 2018,8(5):1031-1042.
- [22] ETAYASH H, KHAN M F, KAUR K, et al. Microfluidic cantilever detects bacteria and measures their susceptibility to antibiotics in small confined volumes[J]. *Nature Communications*, 2016, 7 (1): 12947.

作者简介



章泽铨,2017年于安徽建筑大学获得学士学位,现为上海理工大学硕士研究生,主要研究方向为精密测量。

E-mail:1332962437@qq.com

Zhang Ze'an received his B.Sc. degree from Anhui Jianzhu University in 2017. Now, he is a master student in University of Shanghai for Science and Technology. His main research interest includes precision measurement.



金涛(通信作者),2013年于日本群馬大学获得博士学位,现为上海理工大学光电信息与计算机工程学院副教授,主要研究方向为精密测量。

E-mail:jintao@usst.edu.cn

Jin Tao (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Gunma University, Japan in 2013. Now, he is an associate professor in School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology. His main research interest includes precision measurement.