

Study on Sensitivities of Microcantilever Chemical Sensors *

WANG Da-jia¹, HU Fang-rong^{1,2}, YAO Jun^{1*}, QIU Chuan-kai¹, WANG Ai-na¹

1. State Key Lab of Microfabrication and Optics Technology, Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Science, Chengdu 610209, China;
2. College of Electronic Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

Abstract : To analyze the resonance frequency shifts of various constructed beams in the dynamic mode, the finite element analysis has been performed by using the software IntelliSuite. It shows that the most sensitive structure is the triangular shaped cantilever beam. Thus, a detailed dynamic analysis on the triangular beam is presented, and the relationship between the frequency shift and structural parameters is given. The deflection of each type of cantilever beams in the static mode keeps constant, which demonstrates that their static sensitivity is independent of the structure shapes. Some suggestions on optimizing the design parameters for micro triangles are presented.

Key words : sensitivities of chemical sensors; triangular microcantilever beam; dynamic mode; static mode
EEACC :7230J;2575

基于微悬臂梁的化学传感器的灵敏度研究 *

王大甲¹, 胡放荣^{1,2}, 姚 军^{1*}, 邱传凯¹, 王爱娜¹

1. 中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209;
2. 桂林电子科技大学电子工程学院, 桂林 541004

摘 要 : 基于探测的原理, 在动态模式下, 首先对不同结构梁的本征频率偏移量进行了有限元分析, 结果表明三角形梁的灵敏度最高。然后重点针对不同结构参数的三角形梁进行了动态计算, 获得了其频率偏移量随结构参数变化的关系曲线。另外, 通过静态模式下的有限元计算, 发现各种梁自由端的偏移量相同, 表明它们的静态灵敏度与形状无关。最后, 对三角形梁在不同测量模式下结构参数的优化设计进行了分析。

关键词 : 化学传感器灵敏度; 三角形微悬臂梁; 动态模式; 静态模式

中图分类号: TP212.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)08-1333-04

近年来, 基于微悬臂梁的化学传感器由于具有尺寸小、低能耗、反应时间快、高灵敏度等优点而得到了广泛的研究和应用, 例如在扫描探针显微镜、气体探测、生物化学分析、质量和加工控制等领域。最近, 报道了一种基于微悬臂梁的纳米尺寸的生化传感器, 可以实现实时而且无需标记的 DNA 检测, 有可能成为新一代的生物芯片^[1]。

微悬臂梁型的传感器最重要的优点是具有极高的灵敏度, 这不仅和梁的几何形状有关, 而且和所覆盖的树脂材料及其厚度有关^[2]。研究人员曾经采用

各种技术来提高这些传感器的灵敏度, 例如减小它们的尺寸, 优化覆盖层的厚度, 或者使它们工作在高阶模式^[3]。美国 Cornell 大学的研究人员则研制出了一种分辨率达到 $1e-18$ 克的微悬臂梁传感器^[4]。

本文将利用有限元方法, 就微悬臂梁形状和结构参数对化学传感器的动态以及静态灵敏度的影响进行研究。

1 化学传感器的工作原理

这里研究的化学传感器是利用微悬臂梁的机械

基金项目: 中科院光电技术研究所“百人计划”科研基金资助

收稿日期: 2008-01-02 修改日期: 2008-03-11

响应特性工作的,当微悬臂梁上覆盖的一层选择性薄膜吸收外界气体后,会造成梁质量的增加和其表面应力的改变,这将导致梁的频率和其自由端发生偏移,根据这些偏移量的大小,就可以实现对未知气体定性或者定量的测量^[5]。测量模式包括动态和静态两种^[6]。

1.1 动态模式

微悬臂梁的谐振频率可表示为

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{k}{m^*}} \tag{1}$$

其中, k 和 m^* 分别是梁的弹性常数和有效质量。从关系式中可以看出,频率 f 会随着质量的增加而减小。化学传感器动态测量方法正是利用了这一原理,当微悬臂梁表面的覆盖层吸收了气体后造成质量的增加,进而造成频率的偏移,偏移量可以通过激光干涉仪来探测。由式(1)可得到质量的变化量和频率有如下关系^[7]

$$m = \frac{k}{0.72^2} \left(\frac{1}{f_f^2} - \frac{1}{f_i^2} \right) \tag{2}$$

其中: m 是质量的变化量, f_i 和 f_f 分别是质量变化前后的谐振频率。实际测量时,频率偏移量相对于原谐振频率是非常小的,即有 $f_f \approx f_i$,则式(2)可以写成

$$m = \frac{k}{0.36^2} \frac{\Delta f}{f_i^3} \tag{3}$$

其中, Δf 是由于质量的改变而变化的频率量。根据频率的偏移量和质量的变化量,可以定义梁的灵敏度如下

$$S_m = \frac{\Delta f}{m} \tag{4}$$

假如质量的变化量 m 保持不变, Δf 越大,梁的灵敏度就越大。

1.2 静态模式

在静态模式中,由于被测气体和微悬臂梁表面覆盖层发生化学反应,引起悬臂梁表面应力的变化,导致了梁的弯曲。梁的弯曲曲率由下式给出^[8]:

$$\frac{1}{R} = \frac{6(1-\nu)s}{Et^2} \tag{5}$$

其中 R , E , t , s 和 ν 分别是曲率半径、杨氏模量、梁的厚度、表面的应力改变量和泊松常数。梁自由端顶端的偏移和表面应力的变化量之间的关系是

$$z = \frac{3L^2(1-\nu)}{Et^2} s \tag{6}$$

从上式可以看出梁自由端的偏移和由于吸收气体引起的表面应力的变化之间是线性关系。在相同的测量环境下,吸收不同类型或浓度的气体会造成不一

样的应力变化,梁也会出现不同程度的偏移,根据梁偏移量可以识别环境中的气体成分^[9-10],这就是静态测量的原理。

2 灵敏度分析

2.1 微悬臂梁的本征频率

由于矩形梁和三角形梁都是梯形结构悬臂梁的特殊情况,所以这里首先分析梯形梁的频率变化。图1就是一个梯形结构的梁的示意图。

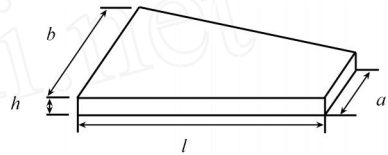


图1 梯形梁的结构示意图

根据挠曲线近似微分方程^[11]可以推导出来的梯形梁的本征频率

$$f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{5E(a+b)}{4b+11a}} \frac{h}{l^2} \tag{7}$$

其中 E 、 ρ 分别是悬臂梁材料的弹性模量和密度。假设悬臂梁受均匀分布载荷 q ,左端固定并且 $b \geq a$ (如图2所示),那么在横截面 x 处所受力为

$$q l \frac{b-a}{l} (l-x) + a q \tag{8}$$

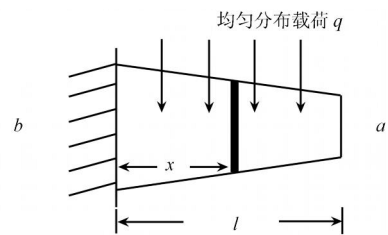


图2 受均匀分布载荷的梁的俯视示意图

如果将梯形梁等效为矩形梁,均匀分布载荷就变成了梯形分布的载荷。等效的矩形梁单位长度上的载荷为

$$q \left[\frac{b-a}{l} (l-x) + a \right] = q \frac{b-a}{l} (l-x) + a q \tag{9}$$

将梯形载荷视为三角形分布和均匀分布载荷的叠加,就可以求出梯形分布载荷条件下的梁的挠曲线方程,进而求出最大的挠度和梁的弹性常数,最后得到梁的频率表达式(7)。从式(7)知梯形的频率不仅和梁的厚度、长度有关,而且和 b/a 有关。由式(7)和有限元分析得到的频率变化曲线分别如图3所示:

从图3(左图是从式(7)得到的频率变化曲线,右图是有限元分析得到的频率变化曲线)可以看出,两种方法得到的曲线变化趋势一致,仅存在常数差别,因此关系式(7)是正确的。

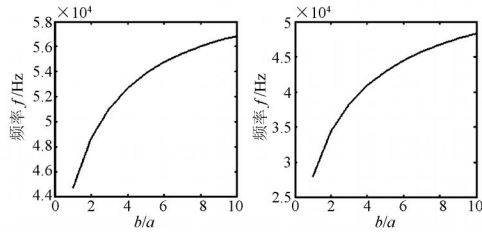


图 3 b/a 变化时得到的频率变化

2.2 动态分析

实际应用中,化学传感器的悬臂梁是两层材料的结构,覆盖层(例如金属薄膜)是用来吸收待测气体,使梁的质量和表面应力发生改变,动态分析以及静态分析时也考虑到了这一点,有限元分析时采用的双层材料如表 1 所示。

表 1 梁的材料参数

参数项目	硅 (Si)	金 (Au)
密度/ $g \cdot cm^{-3}$	2.3	19.28
杨氏模量/ GPa	170	74.48
泊松常数	0.26	0.42
介电常数	7.5	4.2

2.2.1 各种梁的动态分析

有限元计算时,保持各种悬臂梁的 Si 层厚度为 $h_{Si} = 0.8 \mu m$ 以及 Au 层厚度为 $h_{Au} = 30 nm$ 。假设 Au 层质量变化量为 $(3.6e - 11) g$ 。不同形状的梁动态分析结果如表 2 所示:

表 2 各种梁及其结构参数

形状及结构参数 / μm	频率偏移 (Δf)/Hz
U 型梁 	61
梯形梁 B 	50
矩形梁 	46.6
梯形梁 A 	76.1
三角形梁 	191

从表 2 可以看出,在同样条件下三角形梁频率偏移比其它的悬臂梁较大,说明其灵敏度也较高。另外,在模拟的过程中我们还发现各种悬臂梁频率的变化几乎与其质量增加成线性关系,这与式(3)是非常吻合的。

2.2.2 三角形梁的动态分析

由于三角形悬臂梁具有很高的灵敏度,下面就其结构参数变化时对灵敏度的影响进行分析。在边宽为 $20 \mu m$, Si 和 Au 层厚度分别为 $0.8 \mu m$ 、 $30 nm$ 的条件下,三角形梁长度变化时的频率偏移变化如图 4 所示。

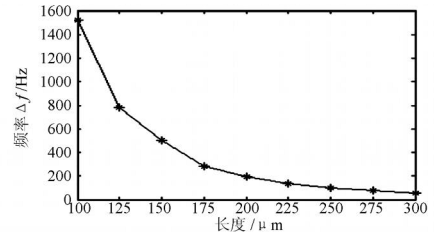


图 4 长度变化时的频率偏移

从图 4 中可以看出,在其它条件不变时,悬臂梁的频率偏移量随着长度的增加而减小,其灵敏度也会降低。

悬臂梁的长度不变,其厚度变化,也会影响梁的灵敏度。当 Au 层的厚度保持不变,而逐渐改变 Si 层的厚度,得到的频率偏移 Δf 变化趋势如图 5 所示。

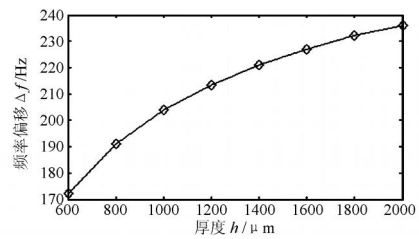


图 5 厚度变化时的频率偏移

从上图可以看出,频率偏移随着厚度的增加而提高,但是厚度逐渐变大时,频率偏移量的增加变得缓慢起来。

2.3 静态分析

基于悬臂梁的化学传感器吸收外界气体后,其覆盖层材料的应力会发生变化,从而导致梁的弯曲,这里仍然采用动态分析时的双层材料结构, Au 作为 Si 的覆盖层。各个梁的结构和参数如表 2 所示,这里只改变 Au 层的应力。静态分析结果如图 6 所示。

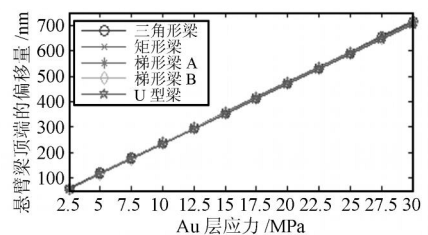


图 6 应力变化时梁的顶端偏移

从图中可以看出这几种悬臂梁顶端的偏移和应力成线性关系,而且不同梁的静态曲线几乎重合,说明式(6)不仅适用于矩形悬臂梁,而且适用于其它的梁,例如梯形梁、U 型梁以及三角形梁等。从式(6)可以看出三角形梁自由端的偏移随着长度增加而增大,随着厚度的增加而减小,这和动态分析结果是相反的。因此,只做动态测量时,为了获得更高的灵敏

度,要选择较短悬臂梁的长度,较大的厚度;如果仅是做静态测量,为了获得更大的偏移,应该选择较大的长度,较小的厚度。

3 结论

本文首先给出了梯形悬臂梁的频率公式,在对各种形状的梁作比较时,发现质量变化相同的条件下,三角形梁的频率偏移最大,其灵敏度也最高。动态分析中,给出了不同结构参数对三角形梁频率偏移量的影响;在对各种梁的静态分析时,发现适用于矩形梁自由端顶端偏移的公式依然适用于三角形梁。由于三角形梁结构参数的不同对动态测量和静态测量的影响是相反的,实际中要根据需要进行参数的选择和设计,以取得最好的测量结果。

参考文献:

- [1] Lewis R A. Biophotonics International[C]// Jan/ Feb (2002) 40-41.
- [2] Uttara Sampath, Stephen M. Heinrich, Fabien Josse. Study of Viscoelastic Effect on the Frequency Shift of Microcantilever Chemical Sensors[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, November 2006, 53(11): 2166-6174.
- [3] Fred eric Lochon, Isabelle Dufour, Dominique Rebiere. An Alternative Solution to Improve Sensitivity of Resonant Microcantilever Chemical Sensors: Comparison Between Using High-Order Modes and Reducing Dimensions[J]. Sensors and Actuators B, 2005, 108: 979-985.
- [4] Ilic B, Craighead H G, Krylov S, Senaratne W, Ober C, Neuzil P. 2004 Attogram Detection Using Nanoelectromechanical Oscillators[J]. Journal of Applied Physics 95-3694.
- [5] Battiston F M, Ramseyer J P, Lang H P, Baller M K, Gerber Ch, Gimzewski J K, Meyer E, Guntherodt H J. A Chemical Sensor Based on amicrofabricated Cantilever Array with Simultaneous Resonance Frequency and Bending Readout[J]. Sensors and Actuators B 77(2001) 122-131.
- [6] Hu Fangrong, Wang Dajia, Qiu Chuankai, et al. Character of Microcantilever Chemical Sensors Based on SOI Material[C]// APOC 2007. SPIE Proceeding 6836-28. In press.
- [7] T Thundat, E A Wachter, S L Sharp, R J Warmack. Detection of Mercury Vapour Using Resonating Microcantilever[J]. Appl. Phys. Lett. 66 (1995) 1695-1697.
- [8] Zhou Wei, Khaliq Abdul, Tang Yanjun, Ji Haifeng, Rastko R. Selmic. Simulation and Desigh of Piezoelectric Microcantilever Chemical Sensors[J]. Sensors and Actuators A, 2005, 125: 69-75.
- [9] Ekinici K L, Huang X M H, Roukes M L. Ultrasensitive Nanoelectromechanical Mass Detection[J]. Appl. Phys. Lett. 84 (22) (2004) 4469-4471.
- [10] Baldini F, Falai A, Gaudio A R D, Landi D, Lueger A, Mencaglia A, Scherr D, Trettnak W, Continuous Monitoring of Gastric Carbon Dioxide with Optical Fibres[J]. Sensors and Actuators B, 2003, 90: 132-138.
- [11] 北京科技大学, 东北大学. 工程力学[M], 高等教育出版社, 1997.



王大甲(1984-),男,安徽省阜阳人,硕士研究生,主要研究方向为光 MEMS 器件和系统,wdj7766@163.com



姚 军(1973-),男,贵州省安顺人,研究员,2001年从四川大学物理系获得博士学位,09/2001 - 05/2007 先后在英国 Strathclyde University, Durham University 和 University College London 从事微机电系统、微光学以及自适应光学等领域的研究。目前,作为成都光电所 MEMS 研究方向的主要负责人,开展了光 MEMS、RF MEMS 器件及系统等多方面的研究,已发表论文 40 余篇。