

文章编号: 0253-2239(2004)11-1547-5

碳纳米管微悬臂梁红外探测器的优化设计*

梁晋涛 刘君华

(西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 对复合层微悬臂梁红外探测器进行了理论分析,并建立了相应的理论模型,实验研究了在硅基底上生长碳纳米管的吸热特性,优化设计了一种生长有碳纳米管的三层硅微悬臂梁谐振式红外探测器。该探测器基于复合层微悬臂梁的谐振频率随着微悬臂梁温度的改变发生漂移的特性,在一定的红外辐射下,微悬臂梁的温度会随着辐射光强的强弱而发生变化,从而根据微悬臂梁谐振频率的漂移而感知温度变化实现对辐射光的探测,利用碳纳米管的红外吸收特性,在二层微悬臂梁上生长碳纳米管薄膜作为吸收层,提高了微悬臂梁探测器的红外吸收性能。研究表明:其功率灵敏度可达 fW 级,比传统的静态测试方法提高了两个数量级。而且这种基于微机电系统技术的传感器与集成电路工艺是兼容的。

关键词: 探测器; 红外; 微悬臂梁; 红外吸收; 碳纳米管

中图分类号: TB96 文献标识码: A

Optimization of a IR detector of Microcantilever with Carbon Nanometer Tube

Liang Jintao Liu Junhua

(School of Electrical Engineering, Xian Jiaotong University, Xian, 710049)

(Received 29 December 2003; revised 18 May 2004)

Abstract: The theoretical model of the composite microcantilever used in the IR radiation is given based on the theoretical analyses, the infrared absorption characteristics of carbon nanometer tube (CNT) is studied by experiment. A tri-layer microcantilever sensors with CNT film is designed to detect the infrared radiation. The detector is based on the characteristics that the resonance frequency of composite microcantilever shift with the temperature. So, the resonance frequency of microcantilever can be used as sensitive parameter to measure the infrared thermal radiation. The theoretical analysis and simulation results show that this new model can attain power sensitivity of fW — two orders of magnitude better than the sensitivity of traditional statical ones. Furthermore, the micro-electro-mechanical system (MEMS) sensor could be compatible with integrated circuit technology.

Key words: detectors; infrared; microcantilever; infrared absorption; carbon nanometer tube

1 引 言

近十年来,硅微机械由于其优越的机械特性和高灵敏度及其与集成电路工艺兼容越来越引起人们的兴趣。利用复合层硅基微悬臂梁进行红外探测,是近年来发展起来的一种新技术。其测量方法原理主要基于硅基材料和镀层材料之间的热膨胀系数不

同,因此存在“双物质效应”,在光辐射下产生内部热应力,这种内部热应力会使硅微悬臂梁产生热挠曲,实现对辐射光的探测^[1~4]。本文主要针对复合层硅基微悬臂梁的动态特性进行分析研究,优化设计了一种新型三层结构的微悬臂梁探测器。

2 微悬臂梁谐振器谐振频率的光热特性

微悬臂梁的谐振频率与温度的关系已有文献报道^[5~9],其机理主要是由于微悬臂梁材料的机械性能会随着温度的改变而发生变化,而微悬臂梁的谐

* 国家自然科学基金(60276037)资助课题。

E-mail: jintail1970@sina.com

收稿日期:2003-12-29;收到修改稿日期:2004-05-18

振频率又与其性能参量有关,从而引起谐振频率的漂移。特别是镀膜结构的微悬臂梁,由于镀膜与基底材料的热胀系数不同,镀层与基底材料产生热失配,加大了频率的漂移,因此,在我们的设计中,选用镀膜结构的微悬臂梁谐振器。考虑到研究问题的方便,我们着重就矩形微悬臂梁的一阶谐振频率的光热特性进行分析,优化得出微悬臂梁的结构参量。

2.1 微悬臂梁的一阶谐振频率

微悬臂梁的一阶谐振频率为^[10]

$$\omega = \frac{(1.8751)^2}{2\pi} \frac{h}{l^2} \left(\frac{E}{12\rho} \right)^{1/2} = \frac{(1.8751)^2}{4\pi\sqrt{3}} \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad (1)$$

考虑到镀层材料影响,(1)式中各参量可进一步等效为

$$\begin{cases} h = h_1 + h_2, \\ E = (E_1 h_1 + E_2 h_2) / (h_1 + h_2), \\ \rho = (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) / (h_1 + h_2), \\ k = \frac{\omega}{4l^3} (E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3), \\ m = 0.24\omega l (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2), \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} k = \frac{\omega}{4l^3} (E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3), \\ m = 0.24\omega l (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2), \end{cases} \quad (3)$$

式中脚标 1 和 2 分别代表镀层和基底材料, l 表示微悬臂梁的长度。 E, h, ρ, ω, k, m 分别代表悬臂梁的杨氏膜量,厚度,密度,宽度,弹性常量,质量。

2.2 微悬臂梁一阶谐振频率的温度系数

微悬臂梁的 E, ρ 和 l 都与温度有关,由(1)式可得一阶谐振频率的温度系数为

$$S_T = \frac{1}{\omega} \frac{d\omega}{dT} = \frac{h_1}{2h_1 + 2h_2 E_2 / E_1} \frac{1}{E_1} \frac{dE_1}{dT} + \frac{h_2}{2h_2 + 2h_1 E_1 / E_2} \frac{1}{E_2} \frac{dE_2}{dT} - \frac{h_1}{2h_1 + 2h_2 \rho_2 / \rho_1} \frac{1}{\rho_1} \frac{d\rho_1}{dT} - \frac{h_2}{2h_2 + 2h_1 \rho_1 / \rho_2} \frac{1}{\rho_2} \frac{d\rho_2}{dT} + \alpha_1 - \alpha_2, \quad (4)$$

式中 α 表示线膨胀系数。这样,如果测得悬臂梁谐振器在温度 T_0 的谐振频率 $\omega(T_0)$,则在温度 T 时的谐振频率 $\omega(T)$ 可线性表示为

$$\omega(T) = \omega(T_0) [1 + S_T (T - T_0)], \quad (5)$$

2.3 微悬臂梁一阶谐振频率的光功率灵敏度

微悬臂梁在一定的红外光均匀辐射下,其温度与辐射光功率的关系可表示为

$$T - T_0 = \frac{\eta P \tau}{cm}, \quad (6)$$

式中 T 为温度, T_0 为初始温度, P 为辐射光功率, τ 为响应时间, c 为比热, m 为质量。 η 为微悬臂梁对红外辐射的吸收比,考虑到镀层材料的影响 c 可等效为

$$c = \frac{h_1 \rho_1 c_1 + h_2 \rho_2 c_2}{h_1 \rho_1 + h_2 \rho_2}, \quad (7)$$

由(6)式可得

$$\frac{dT}{dP} = \frac{\eta \tau}{cm}, \quad (8)$$

将(8)式代入(4)式可得微悬臂梁谐振频率的光功率灵敏度为

$$S_P = \frac{d\omega}{dP} = \omega S_T \frac{\eta \tau}{cm}, \quad (9)$$

2.4 微悬臂梁最小可探测光功率

采用频率调制的方法直接测量频率的变化,微悬臂梁的最小可探测变化频率为^[11]

$$\delta\omega = \frac{1}{A} \left(\frac{\omega k_B T B}{k Q} \right)^{1/2}, \quad (10)$$

式中 k_B 为玻尔兹曼常量, T 为温度, B 为带宽, Q 为谐振的品质因数, ω 为悬臂梁的圆频率, k 为弹性常数, A 为振幅。将(10)式代入(9)式可得,微悬臂梁最小可探测光功率为

$$\delta P = \frac{1}{A} \left(\frac{k_B T B}{\omega k Q} \right)^{1/2} \frac{cm}{S_T \eta \tau}, \quad (11)$$

由以上分析可知微悬臂梁谐振式频率输出型传感器可通过利用高谐振频率、高 Q 值微悬臂来提高其分辨率。

3 微悬臂梁探测器的优化设计

分析了微悬臂梁的谐振频率与辐射光功率的关系后,在此基础上,对微悬臂梁红外探测器进行优化设计,为此,需从三个方面进行优化设计:1) 对微悬臂梁尺寸的优化选择;2) 对镀膜材料与基底材料及其厚度比的优化选择;3) 对光辐射吸收材料的选择。

3.1 微悬臂梁尺寸的优化选择

微悬臂梁尺寸的选择由以上分析可知,应保持高谐振频率、高品质因数,以便提高可探测频率变化,同时减少周围振动和声波干扰的影响。因此,悬臂应当是薄的、轻而短的。根据文献[11],微悬臂梁的品质因数 Q 与其长度有关,当 $l > 30 \mu\text{m}$ 时,采用文献[11]介绍的加工工艺,可使其品质因数高达 10^4 ,且 Q 值随梁长的改变很小;当 $l < 30 \mu\text{m}$ 时, Q 值随梁长的减小急剧下降,考虑实际情况,取 $l = 50 \mu\text{m}$,对于梁的宽度和厚度,凭经验取为 $w = 10 \mu\text{m}, h = 1.5 \mu\text{m}$ 。

3.2 微悬臂梁材料的优化选择

微悬臂梁材料采用半导体材料,最常选用的材料有:硅(Si)、氮化硅(Si_3N_4)和二氧化硅(SiO_2)。镀膜

材料常选用的有金(Au)、铝(Al)和铬(Cr)。由(4)式, 热相差尽可能大^[12], 据此, 由表 1 可得: 基底材料应
(11)式可得: 应使其镀膜与基底材料的热胀系数, 比 选用二氧化硅(SiO₂), 镀膜材料应选用铝(Al)。

Table 1 Characteristic parameter of materials

Material	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Elastic modulus $E / (10^{11} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1})$	Expansion coefficient $\alpha / (10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$	Heat capacity $c / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1})$
Si ₃ N ₄	2400	1.80	32	0.8	691
SiO ₂	2200	0.70	1.3	0.4	840
Si	2328	1.00	150	2.6	700
Au	19300	0.73	296	14.2	129
Cr	7100	0.25	96.5	8.5	438
Al	2702	0.8	237	23.6	908

为提高微悬臂梁探测器的探测能力, 镀膜及厚度的选择至关重要, 将(2)式代入(1)式可得

$$\omega = \frac{(1.8751)^2}{4\pi\sqrt{3}} \frac{h_2}{l^2} (n+1) \left(\frac{nE_1 + E_2}{n\rho_1 + \rho_2} \right)^{1/2}, \quad (12)$$

式中 n 为镀膜与微悬臂梁基底材料的厚度比, $n = h_1/h_2$ 。

将(3)式, (7)式, (12)式代入(11)式可得

$$\delta P = 2.487 \frac{1}{A} \left(\frac{k_B T B}{Q} \right)^{1/2} \frac{2l^{7/2} \omega^{1/2}}{h_2} \left[\frac{(n\rho_1 + \rho_2)^{1/2}}{(n+1)(nE_1 + E_2)^{1/2} (n^3 E_1 + E_2)} \right]^{1/2} \frac{1}{S_T} \frac{\rho_1 c_1 n + \rho_2 c_2}{\eta \tau}, \quad (13)$$

为提高微悬臂梁探测器的探测能力, 金属镀膜厚度选择至关重要^[13], 取微悬臂梁经验参量为: $A=10 \mu\text{m}$, $B=5 \text{ mHz}$, $\tau=50 \text{ ms}$, $\eta=0.1$, $S_T=10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $Q=10^4$, $T=300 \text{ K}$, 由(13)式可得出最小可探测光功率与镀膜厚度比的关系, 如图 1 所示, 同时考虑镀膜厚度比对谐振振幅的影响^[3], 取 n 为 0.04, 由(13)式可得此时的最小可探测光功率为 $3.26 \times 10^{-3} \text{ W}$ 。

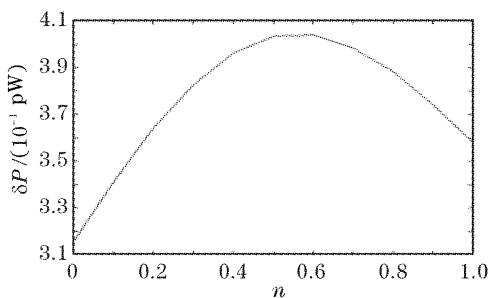


Fig. 1 The minimum detectable radiant intensity vs n

3.3 光辐射吸收层材料的优化设计

考虑到微悬臂梁对光的吸收系数 η , 在微悬臂梁上生长碳纳米管作为光辐射吸收层, 如图 2 所示, 它为三层结构, 由这层碳纳米管加强对红外辐射的吸收, 提高探测灵敏度。一般光热探测器的吸收层材料有: 金黑、银黑和铂黑等材料。在可见光和近红外区域, 其光辐射吸收比可达 99%, 但金黑、银黑和铂黑均由其纳米尺度的颗粒淀积而成, 比表面积(单位质量的表面积)分别为 $4 \text{ m}^2/\text{g}$, $12.5 \text{ m}^2/\text{g}$ 和

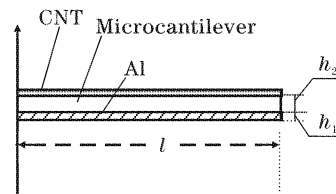


Fig. 2 Structure of silicon microresonator

$0.6 \text{ m}^2/\text{g}$, 其对原有双层结构机械性能的影响不能忽略, 以上述尺寸的微悬臂为例, 由(3)式可得原有双层结构等效质量为

$$m_0 = 0.24\omega l (\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) = 4.78 \text{ ng}$$

铝层等效质量为

$$m_1 = 0.24\omega l \rho_1 h_1 = 0.23 \text{ ng}$$

选取比表面积最大的光吸收材料银黑, 其单位面积质量为 $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$, 则等效质量为

$$m_2 = 1.15 \text{ ng}$$

由(1)式, (3)式, (11)式以及我们在 3.2 中微悬臂梁的取值可得出在微悬臂梁上镀一层比表面积为 $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的银黑其最小可探测光功率为

$$\delta P = \frac{1}{A} \left(\frac{k_B T B}{Q} \right)^{1/2} \left(\frac{4\pi\sqrt{3}}{1.8751^2} \sqrt{\frac{m}{k^3}} \right)^{1/2} \frac{c_m}{S_T \eta \tau} = 1.75 \times 10^{-1} \text{ pW}$$

以上计算可知, 在双层微悬臂梁上镀一层比表面积为 $80 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的银黑, 虽可使微悬臂梁对光的吸收率高达 99%, 但银黑的有效质量比铝层的质量还要高得多, 这又降低了灵敏度, 其最小可探测光强

提高不到一倍,体现不出三层结构的优越性。碳纳米管的出现为我们寻找这样一种材料成为可能,碳纳米管的以下性质使它特别适合作为微悬臂梁结构光热探测器的吸热层。

3.3.1 定向碳纳米管薄膜吸收特性的实验研究

定向碳纳米管薄膜中的碳纳米管垂直于基底排列,碳纳米管之间形成狭长的空隙,当入射光到达薄膜表面时,这些微小空隙如同无数个陷阱,使光线在其中多次反射后直到薄膜内部,而无法溢出。因此可以设想,定向碳纳米管薄膜对光有较强的吸收

Table 2 The relationship between operation voltage of radiation source and temperature of samples

U/V	0.0	5.0	7.5	10.0	12.5	15.0	17.5	20.0
$T_{\#1}/^{\circ}\text{C}$	16.5	17.1	17.9	20.3	21.7	24.0	29.4	35.6
$T_{\#2}/^{\circ}\text{C}$	16.5	18.9	19.9	24.9	27.4	33.1	42.7	51.9
$T_{\#3}/^{\circ}\text{C}$	16.5	18.8	20.1	24.8	27.6	33.0	42.8	51.8

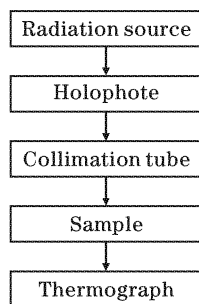


Fig. 3 Experimental set-up of carbon nanometer tube absorption

实验表明:定向碳纳米管薄膜与碳黑在相同强度的辐射下,其温度升高相同,从而可得出二者有相同的吸热性能,在探测器上生长定向碳纳米管薄膜可极大提高吸热能力。

3.3.2 碳纳米管的表面特征与孔结构

碳纳米管由于其径向尺度很小,因而具有较大的比表面积,极限比表面积可达 $2630 \text{ m}^2/\text{g}$,在上述尺寸的微悬臂梁结构中,碳纳米管的有效质量仅为 $5.48 \times 10^{-10} \text{ g}$ 。与银黑相比,相差四个数量级,其对原有双层结构探测能力的影响完全可以忽略。其最小可探测光功率为

$$\delta P = \frac{1}{A} \left(\frac{k_B T B}{Q} \right)^{1/2} \left(\frac{4\pi\sqrt{3}}{1.8751^2} \sqrt{\frac{m}{k^3}} \right)^{1/2} \frac{c_m}{S_T \eta \tau} = 3.29 \times 10^{-12} \text{ pW}$$

3.3.3 碳纳米管的力学和热学性能

碳纳米管具有极高的强度、韧性和弹性模量。同时还是目前世界上最好的导热材料。碳纳米管依靠超声波传递热能,其传递速度可达 1000 m/s 。研究还发现,即使将碳纳米管捆在一起,热量也不会从

作用。

考虑到探测器的实际情况,我们取三种样品来对照研究其吸热特性,样品 #1 为没有吸热层的硅基底,样品 #2 在硅基底上生长碳纳米管,样品 #3 在硅基底上高温淀积辐射吸收比达 99% 的碳黑。实验装置如图 3 所示,通过改变辐射源的工作电压来增加辐射强度,测试在不同辐射强度下三种样品的温度变化来判断其吸热特性,温度高则吸热好。通过测试样品温度得出如表 2 所示的工作电压与三种样品温度的对应关系。

一个碳纳米管传导到另一个碳纳米管,这说明碳纳米管只能沿一维方向传递热能。碳纳米管的这种优异的导热性能,使其可能成为新的导热材料。

因此,在原有双层结构上定向生长一层碳纳米管薄膜既可提高对光的吸收率,又不影响原有双层结构机械性能,从而极大的提高探测能力。

综上所述最后给出最佳微悬臂梁的结构为:二氧化硅、铝和碳纳米管三层结构,镀铝厚度与二氧化硅厚度的比值为 0.04。其最小可探测光功率为 $3.29 \times 10^{-2} \text{ pW}$ 。

结论 采用生长有碳纳米管的三层微悬臂梁谐振器进行红外探测与利用静热挠曲进行探测相比,探测灵敏度提高了两个数量级,其具有的频率输出特性和高灵敏度为开发新型的红外热探测器提供了新的方向。

参 考 文 献

- 1 Barnes J R, Stephenson R J, Welland M E *et al.*. Photothermal spectroscopy with femtojoule sensitivity using a micromechanical device. *Nature*, 1994, **372**(6501): 79~81
- 2 Nakabeppu O, Chandrachud M, Wu Y *et al.*. Scanning thermal imaging microscopy using composite cantilever probes. *Appl. Phys. Lett.*, 1995, **66**(6): 694~696
- 3 Liu Yueming, Liu Junhua, Zhang Shaojun. Model and optimization of a novel detector for light radiation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(6): 744~748 (in Chinese)
- 4 Chen Zhanguo, Jia Gang, Yi Maobin *et al.*. Sub-micron external electro-optic testing technique. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(5): 607~611 (in Chinese)
- 5 Yu Hao, Ding Chun, Wang YueLin *et al.*. The relationship between silicon micromechanical resonators

- and excited point. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(10): 1445~1448 (in Chinese)
- 6 Liu Yueming, Liu Junhua, Zhang Shaojun. A laboratory study of photothermal optimization of excited silicon microresonators with coated film a novel detector for light radiation. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(5): 529~533 (in Chinese)
- 7 Shen F, Lu P, O'Shea S J *et al.*. Thermal effects on coated resonant microcantilevers. *Sensors and Actuators (A)*, 2001, **95**(1): 17~23
- 8 Mertens J, Finot, E, Thundat T *et al.*. Effects of temperature and pressure on microcantilever resonance response. *Ultramicroscopy*, 2003, **97**(1~4): 119~126
- 9 Gao Jinshan, Wang Jiazhen, Tong Shibai. The research of optically excited and interrogated silicon resonators. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(3): 253~256 (in Chinese)
- 10 Bai Chunli, Tian Fang, Luo Ke. *Scanning Force Microscopy* (扫描力显微术). Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese)
- 11 Yang Jinling, Ono T, Esashi M. Mechanical behavior of ultrathin microcantilever. *Sensors and Actuators*, 2000, **82**(1~3): 102~107
- 12 Fang W, Tsai H, Lo C. Determining thermal expansion coefficients of thin films using micromachined cantilevers. *Sensors and Actuators*. 1999, **77**(1): 21~27