

# 硅微机械悬臂梁红外辐射热探测技术的研究\*

刘月明<sup>1,2</sup> 田维坚<sup>1</sup> 张少君<sup>2</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068)

(2 西安理工大学, 西安 710048)

**摘要** 研究了利用镀膜硅微机械悬臂梁红外辐射热挠曲实现红外辐射探测的技术,建立了镀膜双层硅微悬臂梁红外辐射热挠曲的理论模型. 并利用镀有二氧化硅膜层的硅微悬臂梁,在硅微悬臂梁根部制作热挠曲检测压敏电阻,用实验方法测试了硅微悬臂梁对红外辐射的响应规律,结果表明该镀膜硅微悬臂梁对顶端辐射激励的1.5 μm 红外光的响应灵敏度可达2.39 μV/mW. 用计算机优化方法得到了硅微机械悬臂梁的最佳镀膜厚度比的规律,为进一步提高硅微悬臂梁红外探测的灵敏度提供了设计依据.

**关键词** 红外辐射;热探测;硅微悬臂梁;镀膜优化

**中图分类号** TN215 **文献标识码** A

## 0 引言

利用微悬臂梁技术实现红外探测是近几年出现的一种新技术,目前该研究主要集中在美、英等少数发达国家<sup>[1,2]</sup>,国内未见报道. 这种技术与传统的红外探测方法相比具有诸多优点:第一,基于半导体工艺的微悬臂梁体积小,其典型尺寸为:长度100~200 μm,宽度10~50 μm,厚度0.4~4 μm,因此这种探测器易于集成为一维和三维的单片器件,尤适用于红外成像系统;第二,这种基于微悬臂梁的红外探测技术具有极高的分辨率,其值可达10 pW<sup>[2]</sup>;第三,通过在微悬臂梁上镀上不同的红外光辐射吸收材料,可实现对不同波段光的辐射探测,故该种探测技术具有灵活的光谱响应范围;第四,由于微悬臂梁通过半导体硅微机械加工工艺制成,故可成批生产,从而降低器件的成本. 目前,该类红外辐射热探测技术已经成为红外探测的又一发展方向.

用微悬臂梁进行光学和红外探测,主要基于微悬臂梁在红外光辐射下会出现热挠曲,实现对辐射光的探测. 为提高探测的灵敏度,通常需要在微悬臂梁表面镀一层红外光辐射吸收膜,目的有两个:一是微悬臂梁进行镀膜后,成为双层结构,由于双层材料存在的“双膜热挠曲效应”,微悬臂梁的热挠曲将大大增加;二是微悬臂梁的镀膜同时可作为红外光辐射吸收层,提高微悬臂梁对红外光辐射的吸收系

数,提高热挠曲度. 本文首先建立了微悬臂梁红外辐射探测的热挠曲理论模型,然后设计了一个新颖的基于压敏电阻敏感红外热挠曲的红外辐射探测方法,用实验方法验证了硅微悬臂梁用于红外辐射热探测的性能,最后用优化方法进一步研究得到了硅微悬臂梁红外探测的最佳镀膜规律.

## 1 微悬臂梁红外光辐射热探测的理论模型

图1(a)为镀膜后双层微悬臂梁的结构简图和挠曲图,硅基材料的厚度为 $t_2$ ,热膨胀系数、热导率和弹性模量分别为 $\alpha_2$ 、 $\lambda_2$ 和 $E_2$ ;而金属镀层的厚度为 $t_1$ ,热膨胀系数、热导率和弹性模量分别为 $\alpha_1$ 、 $\lambda_1$ 和 $E_1$ . 假设在环境温度为 $T_0$ 时悬臂梁未发生热挠曲,则当微悬臂梁在红外光辐射下温度由 $T_0$ 升高到 $(T_0 + \Delta T)$ 时,悬臂梁将发生热挠曲,其自由端的最大挠度为 $\delta$ ,如图1(b)所示.

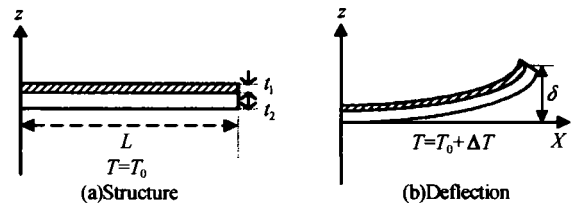


图1 镀膜后双层微悬臂梁的结构简图与挠曲图

Fig. 1 The structure and deflection of the microcantilever

由弹性力学梁弯曲理论,考虑到热应力作用,则悬臂梁的挠曲微分方程可表达为<sup>[3]</sup>

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

式中: $(T - T_0)$ 为红外光辐射下微悬臂梁相对于环境的温度分布, $K$ 为与双层材料有关的常数,其值为: $K = 4 + 6\left(\frac{t_1}{t_2}\right) + 4\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^2 + \frac{E_1}{E_2}\left(\frac{t_1}{t_2}\right)^3 + \frac{E_2}{E_1}\left(\frac{t_2}{t_1}\right)$ .

\*陕西省教委专项科研计划(02JK155)、中国博士后基金(2002032225)、王宽诚博士后基金和中国科学院“百人计划”基金资助项目

Tel: 029-8472090 Email: lyming@263.net

收稿日期: 2003-04-24

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

求微分方程(1)并注意到边界条件:  $\frac{dz}{dx}|_{x=0} = 0$

则求得悬臂梁的挠曲方程为

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

由式(2)可知:悬臂梁的最大挠度在  $x = L$  处,为

$$\delta = z|_{\max} = 3(\alpha_1 - \alpha_2) \left( \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right) (T - T_0) L^2 \quad (3)$$

由式(3)可以看出,红外光辐射下的温度探测可由微悬臂梁的挠度进行检测。

下面分析微悬臂梁用于红外光辐射的光强度探测,首先考虑红外光辐射均匀照射到微悬臂梁镀膜上的情况,由一维热传导理论,可推导出悬臂梁中的温度分布为

$$(T - T_0)(x) = \frac{P\eta}{2LW(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} x^2 \quad (4)$$

式中  $P$  为红外辐射的功率,  $\eta$  为悬臂梁对辐射光的吸收系数,  $W$  为微悬臂梁的宽度。

将式(4)代入式(1),解该微分方程可得此时悬臂梁自由端的最大挠度为

$$\delta_p = \frac{5}{4} (\alpha_1 - \alpha_2) \left( \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right) \frac{L^3}{W(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} P\eta \quad (5)$$

其次考虑辐射光聚焦在微悬臂梁自由端情况,此时温度分布由一维热传导理论得

$$(T - T_0)(x) = \frac{P\eta}{W(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} x \quad (6)$$

将式(6)代入式(1),解该微分方程可得此时悬臂梁自由端的最大挠度为

$$\delta'_p = 2(\alpha_1 - \alpha_2) \left( \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right) \frac{L^3}{W(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} P\eta \quad (7)$$

由式(5)和式(7)可得辐射光强激励的挠曲度理论模型。

## 2 微悬臂梁红外辐射热探测的实验研究

### 2.1 实验装置

为测试微悬臂梁红外辐射热探测的性能,设计了实验装置如图2。硅微悬臂梁器件采用硅微机械加工工艺制成,长度 2000  $\mu\text{m}$ ,宽度 300  $\mu\text{m}$ ,厚度为 9  $\mu\text{m}$ ,电热激励电阻 51  $\Omega$ ,压敏全桥桥臂电阻 597  $\Omega$ 。硅微悬臂梁的热挠曲镀膜为  $\text{SiO}_2$ ,厚度为 1  $\mu\text{m}$ 。为检测硅微悬臂梁红外热挠曲,事先利用半导体的扩棚工艺,在微悬臂梁的根部应力敏感区制作了四个压敏电阻组成差动全桥,这样,一旦硅微悬臂梁在热辐射作用下出现挠曲,则微悬臂梁根部的压敏电阻感受应力

导致阻值变化,压敏全桥有相应的信号输出。

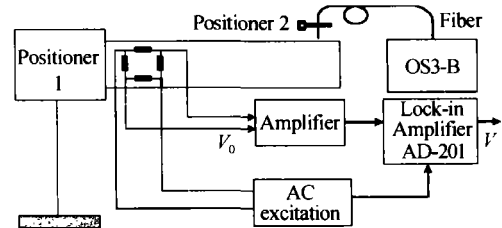


图2 硅微悬臂梁红外辐射的实验测试装置

Fig.2 Setup of photothermal excitation and electrical sensing

### 2.2 压敏电阻的布置

压敏电阻位置选择的原则是:将四个压敏电阻分别设计在阻值相对应力变化最大的区域。对于微悬臂梁而言,其热挠曲应力最敏感区在根部,故应将四个电阻安排在微梁的根部,其纵横向的位置如图3

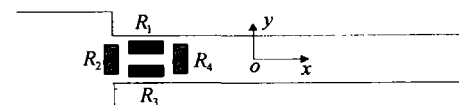


图3 硅微悬臂梁热挠曲检测压敏电阻全桥分布

Fig.3 Setup of the stress sensitive resistance

所示。由于图中硅微谐振器基于单晶硅(100)晶面制作,则沿  $\langle 110 \rangle$  和  $\langle 1\bar{1}0 \rangle$  晶向压阻系数最大,此时纵向压阻系数和横向压阻系数分别为<sup>[4]</sup>

$$\pi_{11} = \frac{1}{2} \pi_{44} \quad (8)$$

$$\pi_{12} = \frac{1}{2} \pi_{44} \quad (9)$$

式中,  $\pi_{11}$ 、 $\pi_{12}$  分别为纵向和横向压阻系数,  $\pi_{44}$  为剪切压阻系数。

微悬臂梁在光热激励下,其根部附近的热应力最大,并且由于梁的长、宽比很大,故热应力主要沿梁的纵向,即  $x$  向,沿  $y$  向的形变和应变可以忽略,这样,仅有压敏电阻  $R_1$ 、 $R_2$  受压阻效应的影响,其电阻变化为

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{\Delta R_3}{R_3} = \frac{1}{2} \pi_{44} \sigma_x \quad (10)$$

$$\Delta R_2 = \Delta R_4 = 0 \quad (11)$$

综合式(8)~(11),并由图3的差动全桥电路可推得

$$V_0 = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - R_1 R_3}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4)} \bar{E} = \frac{\pi_{44} \sigma_x \bar{E}}{4 + \pi_{44} \sigma_x} \quad (12)$$

式中  $\bar{E}$  为全桥交流驱动的电电压信号。

### 2.3 实验结果

图2中被测红外辐射源由可调红外光源提供,波长为 1.55  $\mu\text{m}$ ,输出光功率从 0 mW 到 4 mW 可调,照射位置为硅微悬臂梁的自由端,为提高微悬臂梁对光的吸收率,在辐射激励点处涂有碳黑涂层。

差动全桥采用交流电压驱动,电压频率为 800 Hz,如图 4 为实验测试结果,可见激励光辐射功率与压敏全桥的输出信号有着非常好的线性规律,这与式(7)所揭示的规律是相吻合的,进一步由图中数据可估算出硅微悬臂梁对红外辐射探测的灵敏度达  $2.39 \mu\text{V}/\mu\text{W}$ .

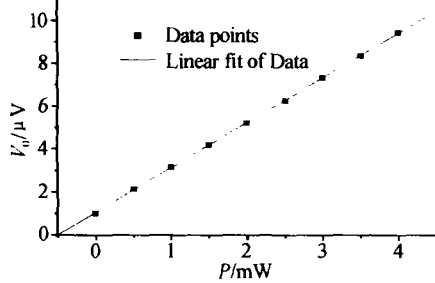


图 4 硅微悬臂梁红外辐射与压敏全桥的输出关系  
Fig. 4 Output  $V_0$  vs the infrared radiation power

### 3 红外辐射探测硅微悬臂梁镀膜的优化选择

上述实验中硅微悬臂梁热挠曲镀膜材料为

$\text{SiO}_2$ , 考虑到“双膜热挠曲效应”,  $\text{SiO}_2$  并非最佳镀膜, 为使硅微悬臂梁有最佳的探测灵敏度, 有必要优化设计硅微悬臂梁的镀膜. 由于金属材料与硅微材料热膨胀系数差异较大, 工艺上在硅微表面镀金属材料又容易实现, 故最佳的镀膜应选为金属镀膜. 下面分别采用金属铝(Al)、金(Au)、和铬(Cr)三种金属, 优化最佳镀膜. 由式(7)可得自由端辐射激励时的热挠曲灵敏度为

$$S_p = \frac{\delta_p'}{P} = 2(\alpha_1 - \alpha_2) \left( \frac{t_1 + t_2}{t_2^2 K} \right) \cdot \frac{L^3}{W(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2) \eta} \quad (13)$$

取梁长  $L = 1000 \mu\text{m}$ ,  $t_2 = 9 \mu\text{m}$ ,  $W = 30 \mu\text{m}$ ,  $\eta = 0.1$ , 采用表 1 中的有关材料数据, 仿真出微悬臂梁在三种镀膜情况下的红外辐射灵敏度与厚度比的关系如图 5 所示, 由图 5 可以看出, 对于硅基微悬臂梁红外探测器而言, 对应最佳灵敏度的镀膜金属为铝, 且当镀膜比为  $n = 0.32$  时, 灵敏度最大可达近  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\mu\text{W}$ .

表 1 有关材料的性能参量

Material	Density $\rho$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	Elastic modulus $E$ ( $10^{11} \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ )	Thermal conductivity $\lambda$ ( $\text{w} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ )	Thermal expansion coefficient $\alpha$ ( $10^{-6} \cdot \text{k}^{-1}$ )	Heat capacity $c$ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ )
Silicon	2328	1.00	150	2.6	700
Gold	19300	0.73	296	14.2	129
Chromium	7100	0.25	96.5	8.5	438
Aluminum	2702	0.8	237	23.6	908

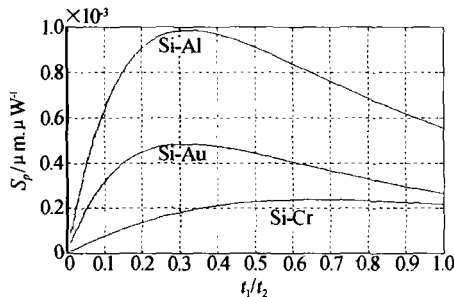


图 5 不同镀膜时的灵敏度仿真曲线  
Fig. 5 The sensitivities vs.  $t_1/t_2$

### 4 结论

本文对硅微机械悬臂梁式红外探测器技术进行了研究,建立了相应的理论模型,并用实验方法初步测试了镀有  $\text{SiO}_2$  膜的硅微悬臂梁的红外辐射探测性能,得到悬臂梁对红外辐射探测的灵敏度达  $2.39 \mu\text{V}/\mu\text{W}$ . 并对该类探测器件的最佳镀膜进行了优化仿真研究,当优化镀膜为金属铝时,微悬臂梁对红外辐射的热挠曲灵敏度可达  $1 \times 10^{-3} \mu\text{m}/\mu\text{W}$ .

对这种硅微机械微悬臂梁红外探测技术的进一步开发,可望形成一类独具特色的非致冷红外探测器件,广泛的应用于军用和民用领域.

#### 参考文献

- 1 Datskos P G, Oden P I, Thundat T, et al. Remote infrared radiation detection using microcantilevers. *Appl Phys Lett*, 1996, **69**(20): 2986 ~ 2988
- 2 Yang Z, Mao M, Roberto H, et al. Optomechanical uncooled infrared imaging system design microfabrication and performance. *J of Microelectromechanical System*, 2002, **11**(2): 136 ~ 145
- 3 Barnes J R, Stephenson R J, Woodburn C N, et al. A femtojoule calorimeter using micromechanical sensors. *Rev Sci Instrum*, 1994, **65**(12): 3793 ~ 3798
- 4 Raymond J R, Yong W C. *Formulas for Stress and Strain*. McGraw-Hill, Inc., New York, 1975
- 5 张维新. 半导体传感器. 天津: 天津大学出版社, 1990  
Zhang W X. *Semiconductor sensors*. Tianjing: Tianjing University press, 1990

## Study on Infrared Detection Techniques Using the Micromechanical Silicon Cantilever

Liu Yueming<sup>1,2</sup>, Tian Weijian<sup>1</sup>, Zhang Shaojun<sup>2</sup>

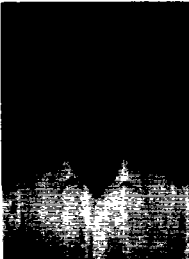
<sup>1</sup> Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS, Xi'an 710068, P R China

<sup>2</sup> Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, P R China

Received date: 2003-04-24

**Abstract** The infrared detection techniques using the micromechanical silicon cantilever are studied. The theoretical model of bi-layered micro-cantilever under the infrared radiation is set up, and the corresponding experiment is taken to verify the characteristics of infrared detection using such a bi-layered silicon micro-cantilever with coating SiO<sub>2</sub>. The infrared detection sensitivity reached 2.39  $\mu\text{V}/\text{mW}$  for the 1.5  $\mu\text{m}$  infrared point radiation in the experiment. By using the computer, the optimization work is done for selecting the best material and thickness of the coating film to get the maximal infrared detection sensitivity.

**Keywords** Infrared radiation; Thermal detection; Micromechanical silicon cantilever; Coating optimization



**Liu Yueming** was born on August 3, 1965, in Hebei Province. He received his M. S. degree in China Institute of Metrology in 1993 and received his Ph. D from Xi'an Jiaotong University in 2001. Now he is an assistant professor in Xi'an University of Technology and a postdoctoral researcher in Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics of CAS. His main research interests include the micro-opto-electro-mechanical system (MOEMS), optical fiber sensors, instruments and metrology.