

文章编号:1001-9014(2006)01-0046-04

微悬臂梁非致冷红外探测器的研制

刘海涛^{1,2}, 陈永平¹, 梁平治¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要:介绍了一种基于标准硅工艺的微悬臂梁非致冷红外探测器的设计和制作. 由于氮化硅和铝的热膨胀系数相差很大, 用这两种材料的薄膜做成的双材料微悬臂梁在红外辐射下温度升高并发生弯曲, 微悬臂梁和衬底形成一个可变电容, 通过检测电容的变化来反映微悬臂梁的弯曲, 从而可以探测红外辐射的情况. 利用外部测试设备对单元探测器进行测试表明, 该微悬臂梁对红外辐射有很高的响应.

关键词:非致冷红外探测器; 微悬臂梁; 电容; 微电子机械系统

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

DESIGN AND FABRICATION OF MICRO-CANTILEVER UNCOOLED INFRARED DETECTOR

LIU Hai-Tao^{1,2}, CHEN Yong-Ping¹, LIANG Ping-Zhi¹

(1. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. Postgraduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A micro-cantilever uncooled infrared (IR) detector was designed and fabricated based on standard silicon process. Because silicon nitride (S_iN_x) and aluminum (Al) have different thermal expansion coefficients, bi-material micro-cantilever that is composed of the films of S_iN_x and Al will bend when it absorbs IR radiation and its temperature changes. The variable micro-capacitor between the micro-cantilever and the substrate will change as the micro-cantilever bends. Hence, the information of IR radiation can be known when the change of the variable micro-capacitor is detected. The test of a single detector by outer apparatus shows that the micro-cantilever has strong response to IR radiation.

Key words: uncooled IR detector; micro-cantilever; capacitor; MEMS

引言

红外探测器有两种类型: 光电型红外探测器和非致冷红外探测器. 光电型红外探测器的性能较好并且制备技术已经比较成熟, 但是光电型红外探测器必须在低温(一般在液氮温度(77K))环境下工作, 这就需要有一个昂贵而且笨重的制冷系统, 从而限制了光电型红外探测器的广泛应用. 相较于光电型红外探测器, 非致冷红外探测器不需要制冷, 可以在常温环境下工作, 因此有着非常广泛的应用. 据报道 Kruse 等人用 VO_x 制作的 bolometer 阵列并在探测器芯片上集成 CMOS 读出电路, NEDT 可以达到 0.1K, 时间常数可达 18ms, 但是它与于标准的硅工艺不完全兼容, 制作工业也比较复杂. R. Amantea, L. A. Goodman 等人提

出了一种双材料微悬臂梁红外探测器技术, 这种非致冷红外探测器利用微悬臂梁吸收红外辐射后的力学形变进行红外探测, 如图 1 所示. 与其他类型的非致冷红外探测器技术相比较, 微悬臂梁红外探测器可以完全适合于标准的硅工艺, 这样可以很大程度上降低器件的生产成本, 缩短研发周期, 并且探测器可以具有很高的性能, 理论上可以达到 5mK 的 NEDT^[1-5].

1 设计

1.1 原理

金属材料的热膨胀系数很大, 而半导体材料的热膨胀系数比较小, 把两种材料的薄膜粘合在一起形成双材料薄膜, 它会随着温度的变化而发生弯曲. 微悬臂梁非致冷红外探测器正是利用这种原理, 用

收稿日期: 2005-05-23, 修回日期: 2005-11-27

基金项目: 中科院支撑项目(42201030104)

作者简介: 刘海涛(1979-), 男, 安徽寿县人, 中科院上海技术物理所微电子专业研究生, 主要从事非致冷红外探测器研究.

Received date: 2005-05-23, revised date: 2005-11-27

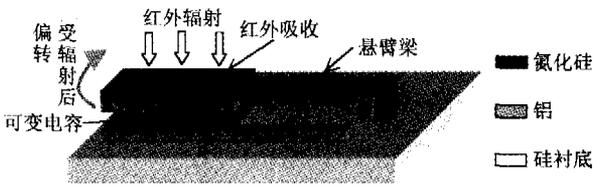


图1 微悬臂梁非致冷探测器结构示意图
Fig.1 Sketch map of cantilever detector's structure

金属铝(Al)和半导体材料氮化硅(Si_3N_4)薄膜组成双材料微悬臂梁(两种薄膜材料的选取将在2.2节介绍), Si_3N_4 在红外辐射下吸收热量并且温度升高,导致微悬臂梁发生弯曲.在硅衬底上淀积一层Al与微悬臂梁上的Al形成一个可变电容器,微悬臂梁的弯曲使电容的大小发生改变,通过电路测试电容的改变,从而得出红外辐射情况,如图1.

1.2 对材料体系的选择

微悬臂梁对两种材料的要求如下:

- ◆ 至少有一种材料对 $8\mu m \sim 14\mu m$ 的红外辐射有较强的吸收.
- ◆ 两种材料的热膨胀系数必须相差很大.
- ◆ 两种材料需要有很小的热容量.
- ◆ 两种材料需要有比较小的热导率.
- ◆ 两种材料的薄膜的内应力比较小.
- ◆ 两种材料有比较小的密度.

由于微悬臂梁非致冷红外探测器是在标准的半导体硅工艺上制作的,所以微悬臂梁的材料还必须是硅工艺上常用的材料,表1列出几种硅工艺上常用的材料及其参数.

根据表1提供的材料并结合微悬臂梁对两种材料的要求,并考虑两种材料生长的兼容性以及它们的应力匹配,这里选择 Si_3N_4 和Al做双材料微悬臂梁的两种材料.

Si_3N_4 作为红外吸收介质,图2给出 Si_3N_4 对红外光的折射率:

微悬臂梁非致冷红外探测器目标探测波段是

表1 硅工艺上一些材料的参数

Table 1 Parameters of some materials on silicon process

	密度 $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	杨氏模量 GN/m^2	热传导 $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$	热膨胀率 $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	热容 J/kgK
Si_3N_4	2.40	146	5.5	2.8	691
SiO_2	2.66	80	1.4	0.4	700
多晶Si	2.32	161	34	2.4	710
Al	2.70	69	236	23	908
Au	19.4	80	318	14.3	129

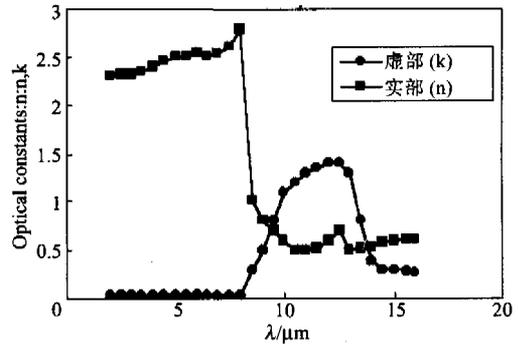


图2 氮化硅薄膜的折射率与波长的关系
Fig.2 Refractive index of silicon nitride's film as a function of wavelength

$8\mu m \sim 12\mu m$,所以只需要关注 Si_3N_4 在这个波段的吸收.在图2中可以看出:在 $8\mu m \sim 12\mu m$ 波段上 $K \approx 1$,这个波段的红外光在 Si_3N_4 中的透射深度 $d_0 = \lambda_{ir}/4\pi k \approx 1\mu m$, Si_3N_4 有比较强的红外吸收能力.另外, Si_3N_4 在这个波段的反射率也比较低(n值比较接近1).

1.3 微悬臂梁的设计

1.3.1 热效应设计

假设在没有受到红外目标辐射时,微悬臂梁和周围环境处于热平衡状态.当微悬臂梁受到和环境温度差别为 ΔT_s 目标物体的红外辐射,微悬臂梁产生的温度变化 ΔT_c :

$$\Delta T_c = \frac{A_{ab} \epsilon \tau_0 \pi (dp/dT_i)}{4F_{no}^2 (G_{leg} + G_{rad} + G_{air})} \Delta T_s \quad (1)$$

其中: F_{no} 是 $f/1$ 光学镜头($=1$), A_{ab} 是探测元的吸收面积, ϵ 是探测元的红外吸收本领, τ_0 是红外光镜头的透射率($=0.9$), T_i 是目标物体的温度, dp/dT_i 是目标物体在 T_i 温度时的辐射, G_{rad} 是微悬臂梁总的辐射热传导, G_{leg} 是双材料微悬臂梁的热传导, G_{air} 是空气对流热传导,不过现在一般将探测器芯片用真空封装,所以可以将其忽略不计.

$$G_{rad} = 4A_{pixel} (\epsilon_{Al} + \epsilon_{Si_3N_4}) \sigma T^4 \quad (2)$$

$$G_{leg} = (A_{I-Si_3N_4} \kappa_{Si_3N_4} + A_{I-Al} \kappa_{Al}) / L_{leg} \quad (3)$$

其中: A_{pixel} 表示微悬臂梁总的外表面积, ϵ_{Al} 和表示Al和 $\epsilon_{Si_3N_4}$ 的热辐射率, σ 是玻尔兹曼常数, $A_{I-Si_3N_4}$ 和 A_{I-Al} 、 $\kappa_{Si_3N_4}$ 和 κ_{Al} 分别是双材料悬臂 Si_3N_4 和Al的横截面积和热导率, L_{leg} 是双材料微悬臂梁的长度.

由式(1)可以得出,提高 ΔT_c 可以通过增大红外吸收面积(A_{ab})、增加 Si_3N_4 的厚度和减少探测元的热流失.但是由于受探测器面阵大小限制,红外吸收面积的增大是有限的,增加 Si_3N_4 的厚度会导致微悬臂梁的机械灵敏度降低和热响应时间常数(τ)的增大,减少热传导是提高微悬臂梁 ΔT_c 比较好的方

法. 在探测器的热传导中 G_{leg} 比 G_{rad} 大一个量级, 可以主要考虑微悬臂梁的热传导. 由式(3)可知减小双材料微悬臂梁的横截面积和增加其长度都可以减少热传导, 但需要和其机械强度进行折中.

1.3.2 微悬臂梁的机械设计

微悬臂梁是由两种热膨胀系数相差很大的材料组成, 所以在温度发生变化时微悬臂梁会发生弯曲, 其弯曲程度 ρ ^[7]:

$$\rho = \frac{6[1+(t_1/t_2)^2] \Delta S}{l(t_1+t_2)[3(1+t_1/t_2)^2 + (1+t_1E_1/t_2E_2)(t_1^2/t_2^2 + t_2E_2/t_1E_1)]E^*}, \quad (4)$$

其中: ρ 是曲率, t_1 和 t_2 是两种材料的厚度, E_1 和 E_2 是两种材料的杨氏模量, $E^* = E_1E_2/(E_1 + E_2)$, ΔS 是微悬臂梁上下表面应力差, l 是微悬臂梁的长度, 由于微悬臂梁的温度变化不大, ΔS 可以近似的表示为:

$$\Delta S \approx (E_1\alpha_1 - E_2\alpha_2)l\Delta T_m, \quad (5)$$

式中: α_1 和 α_2 分别是两种材料的热膨胀系数, ΔT_m 是微悬臂梁温度的变化.

定义微悬臂梁的机械灵敏度 S_T :

$$S_T = \frac{\rho}{\Delta T_m}. \quad (6)$$

结合式(4)、(5)和(6), 可以通过优化 SiN_x 和 Al 的淀积来得到两种材料较好的应力匹配, 并再在此基础上调整两种材料的厚度比以提高微悬臂梁的机械灵敏度, 厚度的调整需要兼顾红外吸收、微悬臂梁的机械强度等.

1.4 模拟仿真及性能优化

综合考虑微悬臂梁的热响应、机械灵敏度、热响应时间、机械强度(用于抗外界干扰, 如: 重力、震动等)和探测器的集成度, 利用 ansys 软件对微悬臂梁非致冷红外探测器性能进行模拟仿真和优化, 对微悬臂梁的温度场和不同厚度比下机械灵敏度模拟, 其结果如图 3 和图 4. 微悬臂梁优化后的结构参数如表 2.

2 微悬臂梁的制作及性能测试

2.1 微悬臂梁的制作

微悬臂梁探测器的制造是基于 MEMS 技术, 其制作基本上可以在标准的硅工艺线上完成.

图 5 是微悬臂梁制造的简易流程, 首先对硅原片进行清洗处理(a); 用热生长方法在硅片表面生长一层 3000\AA 的 SiO_2 (b); 在 SiO_2 上蒸发一层厚度

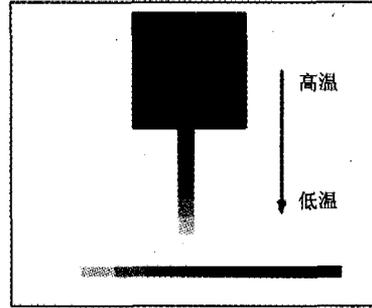


图 3 用 Ansys 模拟在恒定红外辐射下微悬臂梁的温度场的分布

Fig. 3 Simulation of the cantilever's temperature field in invariable IR radiation by Ansys

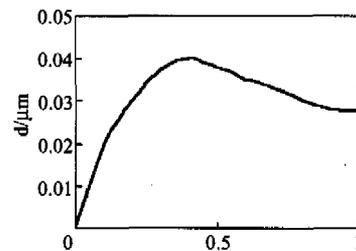


图 4 用 ansys 模拟微悬臂梁的偏转(d)和两种材料厚度比(n)之间的关系

Fig. 4 Simulation of the cantilever's bending (d) as a function of thickness ratio (n) of two material by ansys

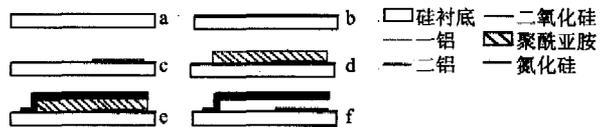


图 5 探测器的制造简易流程

Fig. 5 The process of the detector's fabrication

表 2 微悬臂梁的设计参数

Table 2 Design parameter of the micro-cantilever

红外吸收区面积 (μm^2)	微悬臂梁长度 (μm)	微悬臂梁宽度 (μm)	氮化硅厚度 (μm)	铝厚度 (μm)	探测器热导 (w/T)	探测器可变电容 (常温下) (fF)	响应时间常数 (ms)
100×100	100	6	0.5	0.2	3×10^{-6}	88	50

为 $1\mu\text{m}$ 的 Al, 并刻蚀出图形(c); 旋涂一层厚为 $2\mu\text{m}$ 的聚酰亚胺做牺牲层, 并刻蚀聚酰亚胺(d); 溅射一层厚度 2000\AA 的 Al, 然后在 Al 上用 PECVD 方法生长一层厚度为 5000\AA 的 SiN_x , 并刻蚀 SiN_x 和 Al (e); 去除牺牲层, 释放微悬臂梁(f). 用扫描电镜拍摄微悬臂梁图片如图 6 所示.

2.2 微悬臂梁探测器的性能测试

微悬臂梁非致冷红外探测器可以通过外部仪器对其性能进行简单测试. 将探测器封装在标准的管

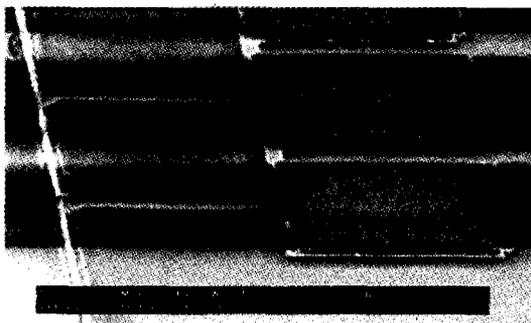


图6 微悬臂梁阵列
Fig.6 A array of the detectors

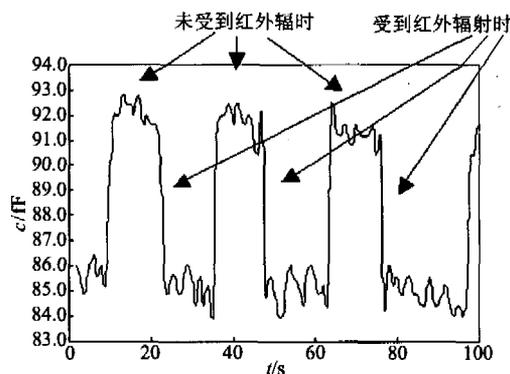


图7 可变电容在红外辐射下的响应
Fig.7 The response of the variable capacitor to IR radiation

座上,在 900K 的标准黑体辐射下,单元探测器受到的红外辐射功率约为 $1.6\mu\text{W}$,用测微小电容的 Keithley Model 590 CV Analyzer 测试,采用补偿寄生电容方法,用 C-t sweep 方式进行电容响应测试,其红外电容响应如图 7 所示:

3 讨论和展望

由图 7 可以看出微悬臂梁非致冷红外探测器有着比较好的红外响应(在约 $1\mu\text{m}$ 的红外辐射下,微悬臂梁电容的变化可以达到 7%)。但测试探测器的性能参数(如响应时间常数和微悬臂梁机械灵敏度等)和设计有些出入,这是由探测器制作时的工艺误差和测试误差造成的。其中测试误差是主要因素,

其源于直接使用外部测试设备测量探测器微小的电容变化,由于外部测试设备的寄生电容比较大,因此不可避免产生比较大的误差。

由于微悬臂梁非致冷红外探测器的制造是基于标准的硅工艺,它可以和标准的 CMOS 读出电路进行单片集成。在探测器芯片上集成一个固定电容,和微悬臂梁可变电容串联,利用电容分压原理,将探测器的电容信号响应转化为电压响应,通过前置放大器将电压信号放大输出。这不仅有效地减小寄生电容对探测器的影响,而且还有利于制作微悬臂梁非致冷红外焦平面。另外在前置放大电路中加入带通滤波器,能够滤除微悬臂梁自身震动引起的部分噪声(如图 7 中的小波动),有效地提高探测器的信噪比。

REFERENCES

- [1] Amantea R, Knoedler C M, Pantuso F P. *et al.* An uncooled IR imaging with 5mk NEDT[J]. *SPIE*, 1997, **3061**: 210—222.
- [2] Zhao yang, Mingyao mao, Roberto Horowitz. *et al.* Optomechanical uncooled infrared imaging system: desing, micro-fabrication, and performance [J]. *IEEE*, 2002, **11**: 136—146.
- [3] Amantea R, Goodman L A, Pantuso F. *et al.* Progress towards an Uncooled IR Imager With 5 mk NEDT[J]. *SPIE*, 1998, **3436**: 647—659.
- [4] WANG Hong-Chen, YI Xin-Jian, CHEN Si-Hai, *et al.* Fabrication of vanadium oxides polycrystalline thin film for uncooled IR detectors[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (王宏臣,易新建,陈四海,等.非致冷红外探测器用氧化钒多晶薄膜的制备. *红外与毫米波学报*), 2004, **23**(1): 64—66.
- [5] HUANG Yong, LING Xin-Gang, XIA Xin-Lin. Thermal emission characteristics of an anisotropic scattering medium layer with gradient index[J]. *J. Infrared Millim. Wave* (黄勇,梁新刚,夏新林.各向异性散射梯度折射率介质层的热发射特性. *红外与毫米波学报*), 2005, **24**(1): 49—52.
- [6] Gregory T, Kovacs A. *Micromachined Transducers Sourcebook*. [M]. Beijing: Science Press, 2003: 57.
- [7] G. Datskos P, Rsjic S. Fabrication of quantum well microcantilever photon detectors [J]. *Ultramicroscopy*, 2001, **86**: 191—206.