

文章编号:1001-9014(2010)04-0259-05

# 三层材料微悬臂梁模型及其在 红外焦平面像元设计中的应用

张霞<sup>1,2</sup>, 焦彬彬<sup>1</sup>, 陈大鹏<sup>1</sup>, 叶甜春<sup>1</sup>

(1. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029; 2. 中国传媒大学 光电学系, 北京 100024)

**摘要:** 双材料梁因其良好的热机械特性作为敏感部件被广泛用于热能传感器中. 采用微电子工艺实现的双材料梁通常由金属和非金属作为主要功能材料构成, 若两层材料之间粘附性差, 则需加入一层粘附材料. 根据材料力学热应力和弯拉组合理论, 建立了用于分析具有中间粘附层的复合双材料(即三层材料)微悬臂梁的关于材料物理参数、结构尺寸与梁受热弯曲产生转角关系模型; 利用此模型和工艺中常用材料, 研究了三层材料微悬臂梁的材料选取、各层材料厚度匹配等优化设计问题. 通过对像元仿真和对硅工艺制造的红外焦平面阵列(IRFPA)芯片进行测试, 验证了模型的正确、合理和适用性.

**关键词:** 微电子机械系统; 红外焦平面阵列像元; 三层材料梁; 粘附层; 微悬臂梁模型  
**中图分类号:** TN362; TB333 **文献标识码:** A

## TRI-LAYER MICROCANTILEVER MODEL AND ITS APPLICATION IN IRFPA PIXEL DESIGN

ZHANG Xia<sup>1,2</sup>, JIAO Bin-Bin<sup>1</sup>, CHEN Da-Peng<sup>1</sup>, YE Tian-Chun<sup>1</sup>

(1. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

2. Department of Photo-electronics, Communication University of China, Beijing 100024, China)

**Abstract:** Bi-material cantilever is an important element in a heat energy sensor for its thermal-mechanical character. The cantilever based on silicon process is usually made of metal and non-metal films. To improve the reliability of the cantilever, an adhesion layer is often needed between two films which do not adhere steadily each other. For analyzing bi-material structure with an adhesive layer in between, according to the theories of thermal stress and combined deformation on mechanics of materials, a tri-layer material cantilever model was set up related to the physics properties of materials, the structure dimension of cantilever, and the tilt angle caused by thermal stress. The material selection, the thickness, and the thickness ratio determination of a tri-layer material cantilever were analyzed by this model. Based on silicon process an optic readout infrared focal plane array (IRFPA) was designed, fabricated, and tested. The results show that the model is practical and accurate enough. The model was also verified by a finite element simulation.

**Key words:** micro-electro mechanical systems (MEMS); IRFPA pixel; tri-layer material cantilever; adhesion layer; microcantilever model

### 引言

非制冷红外成像系统以体积、功耗、成本等方面优势迅速发展起来. 近年来, 非制冷光读出红外成像系统因图像传感器阵列芯片结构和信号读取方式相对简单而受到人们关注. 自 1997 年以来, Stanford University<sup>[1]</sup>、UC. Berkeley<sup>[2,3]</sup>、Nikon Corp.<sup>[4]</sup>、Oak Ridge National Laboratory<sup>[5]</sup>以及我国的科研机构<sup>[6]</sup>

都先后开展了这一领域研究. 采用微电子机械系统 (MEMS) 技术制造的 IRFPA 芯片是光读出红外成像系统的核心, 芯片的结构设计与工艺设计是实现其功能的关键内容.

多数基于 MEMS 技术的光读出 IRFPA 像元由反光板和支撑反光板的单双材料梁构成<sup>[2-6]</sup>.

1987 年, Riethmuller 等成功制造了金属与硅或多晶硅的双材料微结构<sup>[7]</sup>. 1996 年, Oak Ridge

收稿日期: 2009-10-15, 修回日期: 2010-01-30

Received date: 2009-10-15, revised date: 2010-01-30

基金项目: 国家自然科学基金 (60576053); 国家高科技研究发展计划资助项目 (2007AA3Z333)

作者简介: 张霞 (1961-), 女, 北京人, 教授, 主要从事红外传感器研究.

National Lab 的 Thomas Thundat 利用应变电阻微悬臂梁结构开发了一种红外探测器,显示了双材料微悬臂梁用于红外探测器的可行性<sup>[8]</sup>. 目前,红外光读出像元中敏感红外的双材料梁通常是由基础材料层和其上金属层构成. 基础材料层是采用化学汽相淀积(CVD)方法制备高红外吸收率、低热膨胀系数(CTE)和低应力的  $\text{SiN}_x$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{SiO}$  等硅基薄膜材料,金属层是采用物理汽相淀积(PVD)方法制备的 CTE 较大的  $\text{Al}$ 、 $\text{Au}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ti}$  等薄膜材料. 利用两种材料的 CTE 和弹性模量( $E$ )差异,可以设计出多种具有不同热应变特性的微梁结构.

参考文献[9]给出适用于两层材料梁的挠度-温度关系,但是,无法准确分析和指导工艺过程中引入粘附层的三层材料梁的设计. 因此,无论是从像元结构设计,还是从 MEMS 加工技术考虑,研究带有中间粘附层的三层材料结构的热机械特性,对非制冷光读出 FPA 芯片设计是十分必要的. 这一研究能够为芯片像元结构设计和制造工艺流程设计提供更准确的理论依据.

本文从材料力学热应力和弯拉组合理论<sup>[10]</sup>出发,针对 MEMS 工艺需要中间粘附层的梁结构特点,建立了一个既能分析带中间粘附层的三层材料微悬臂梁,也能分析两层材料微悬臂梁的模型,用来描述微悬臂梁的材料物理特性和结构尺寸与其受热弯曲产生转角的关系. 应用此模型研究三层材料微悬臂梁的材料选用、厚度匹配优化设计方法,并以一种光读出 IRFPA 像元和芯片为例,进行仿真和实验验证.

## 1 模型建立

图 1(a)是三层材料微悬臂梁的结构图,材料 1、2、3 的弹性模量分别为  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$ ;热膨胀系数分别为  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ ,  $\alpha_1 < \alpha_2, \alpha_3$ ;厚度分别为  $h_1$ 、 $h_2$ 、 $h_3$ ;梁长度为  $L$ ,宽度为  $b$ . 材料 1 在温度升高而膨胀的同时,受材料 2 的作用而被拉伸;材料 2 在温度升高而膨胀的同时,顶面、底面分别受到材料 1 和 3 的拉力. 材料 3 在温度升高而膨胀时,受到材料 2 的作用力.

根据弯曲平面假设,在材料 1、2、3 的横截面上,正应力沿截面高度线性分布,见图 1(c).

如图 1(b)所示,设材料 1、2、3 的轴力与弯矩分别为  $F_{N1}$  与  $M_1$ 、 $F_{N2}$  与  $M_2$ 、 $F_{N3}$  与  $M_3$ ;设  $F_{N21}$ 、 $F_{N23}$  分别为因梁受热形变,材料 2 与 1、3 的作用力. 由平衡条件可知

$$F_{N1} + F_{N21} = 0 \quad (1)$$

$$F_{N3} + F_{N23} = 0 \quad (2)$$

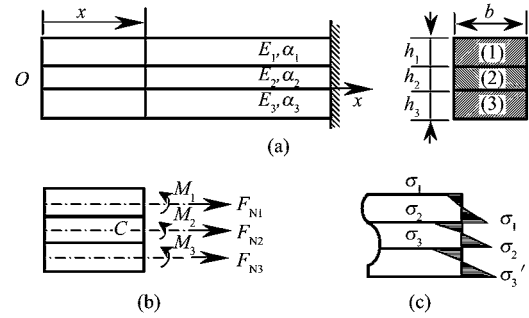


图 1 三层材料梁结构和热应力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a tri-layer cantilever structure and thermal strain distribution

$$F_{N2} = F_{N23} - F_{N21} \quad (3)$$

$$M_1 + M_2 + M_3 - F_{N1} \left( \frac{h_1}{2} + \frac{h_2}{2} \right) + F_{N3} \left( \frac{h_2}{2} + \frac{h_3}{2} \right) = 0 \quad (4)$$

梁受热弯曲时,材料 1、2、3 对应的曲率半径  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ 、 $\rho_3$  分别满足

$$\frac{1}{\rho_1} = \frac{12M_1}{E_1 b h_1^3} \quad (5)$$

$$\frac{1}{\rho_2} = \frac{12M_2}{E_2 b h_2^3} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\rho_3} = \frac{12M_3}{E_3 b h_3^3} \quad (7)$$

且有

$$\rho_1 \approx \rho_2 \approx \rho_3 \approx \rho \quad (8)$$

材料 1 横截面底面的正应力为

$$\sigma_1 = \frac{F_{N1}}{b h_1} + \frac{6M_1}{b h_1^2} \quad (9)$$

材料 2 横截面顶面、底面的正应力分别为

$$\sigma'_2 = \frac{F_{23} + F_{21}}{b h_2} - \frac{6M_2}{b h_2^2} \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \frac{F_{23} + F_{21}}{b h_2} + \frac{6M_2}{b h_2^2} \quad (11)$$

材料 3 横截面顶面的正应力为

$$\sigma_3 = \frac{F_{N3}}{b h_3} - \frac{6M_3}{b h_3^2} \quad (12)$$

根据胡克定律,并考虑温度变化量为  $\Delta T$ ,材料 1 底面纵向应变  $\varepsilon_1$ 、材料 2 顶面纵向应变  $\varepsilon'_2$ 、材料 2 底面纵向应变  $\varepsilon_2$ 、材料 3 顶面纵向应变  $\varepsilon_3$ ,分别为

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} + \alpha_1 \Delta T \quad (13)$$

$$\varepsilon'_2 = \frac{\sigma'_2}{E_2} + \alpha_2 \Delta T \quad (14)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} + \alpha_2 \Delta T \quad (15)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E_3} + \alpha_3 \Delta T \quad (16)$$

且满足

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2' \quad (17)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_3 \quad (18)$$

根据悬臂梁弯曲变形关系,见图 2,悬臂梁自由端的旋转角度(即悬臂梁弯曲对应曲率圆的圆心角)为

$$\Delta\theta = \frac{L}{\rho} \quad (19)$$

联立式(1)~(19),推导出当温度变化单位温

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \frac{6L \left\{ \left[ (h_2 + h_3) + (h_1 + h_2) \left( 1 + \frac{h_2 E_2}{h_3 E_3} \right) \right] (\alpha_2 - \alpha_1) + \left[ (h_2 + h_3) \left( 1 + \frac{h_2 E_2}{h_1 E_1} \right) + (h_1 + h_2) \right] (\alpha_3 - \alpha_2) \right\}}{(E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3 + E_3 h_3^3) \left( \frac{h_1 E_1 + h_2 E_2 + h_3 E_3}{h_1 E_1 h_3 E_3} \right) + 6(h_1 + h_2)(h_2 + h_3) + 3 \left[ (h_1 + h_2)^2 \left( 1 + \frac{h_2 E_2}{h_3 E_3} \right) + (h_2 + h_3)^2 \left( 1 + \frac{h_2 E_2}{h_1 E_1} \right) \right]} \quad (20)$$

若  $h_3 = 0$ ,由式(20)得

$$\frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \frac{6L \frac{h_2}{h_1} \frac{E_2}{E_1} \left( 1 + \frac{h_2}{h_1} \right) (\alpha_2 - \alpha_1)}{1 + 4 \frac{h_2}{h_1} \frac{E_2}{E_1} + 6 \frac{h_2^2}{h_1^2} \frac{E_2}{E_1} + 4 \frac{h_2^3}{h_1^3} \frac{E_2}{E_1} + \frac{h_2^4}{h_1^4} \frac{E_2}{E_1}} \quad (21)$$

适用两层材料悬臂梁的式(21)与 L. B. Freund, S. Sureshizhu 书中采用能量法推导出的公式<sup>[11]</sup>相同.由式(20)、(21)可知,最大单位温度转角  $\Delta\theta/\Delta T$  与材料的  $E$ 、CET 以及材料层厚度有关.当  $E$ 、CET、厚度一定时,  $\Delta\theta/\Delta T$  与悬臂梁长度  $L$  成正比;令  $d(\Delta\theta/\Delta T)/d(h_i/h_{i+1}) = 0$ ,其中  $i = 1$ ,或  $i = 1, 2$ ,可以求出  $\Delta\theta/\Delta T$  取极大值时,材料的厚度比.

## 2 三层材料梁模型分析与设计

在 MEMS 工艺中,常用于制备敏感红外辐射微梁结构材料的物理参数见表 1.

表 1 MEMS 工艺常用材料物理参数<sup>[6,11]</sup>

Table 1 Parameters of materials commonly used in MEMS structure<sup>[6,11]</sup>

材料	弹性模量 $E$ ( $10^9 \text{Pa}$ )	热膨胀系数 $\alpha$ ( $10^{-6}/^\circ\text{C}$ )	比热 $c$ ( $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ )	红外吸收率 $a$ (%)	密度 $\rho$ ( $10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ )	泊松比 $\nu$
SiO <sub>2</sub>	73	0.5	670	90	2.27	0.16
SiC	700	3.3	840	92	3.2	0.22
SiN <sub>x</sub>	180	0.8	690	92	2.4	0.42
Au	73	14.2	130	2	19.3	0.27
Al	70	25	942	3	2.7	0.35
Ti	106	8.5	577	10	4.5	0.19
Cr	279	8.5	450	15	7.2	0.21

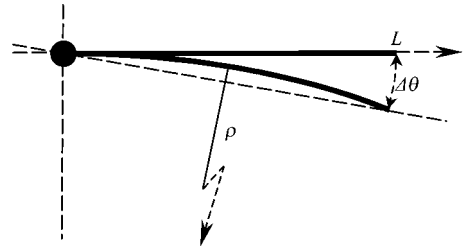


图 2 三层材料悬臂梁热形变旋转角示意图  
Fig. 2 The bending angle of a tri-layer cantilever

度时,长度为  $L$  的三层材料悬臂梁自由端的旋转角度,即最大单位温度转角为

### 2.1 反光层与黏附层金属

在基于硅 MEMS 工艺光读出像元设计中,考虑材料特性和工艺实现的可行性,选用 LPCVD 低应力 SiN<sub>x</sub> 为红外吸收层;考虑材料对可见光反射率及抗氧化能力,选 Au 作为可见光反射面材料.由于 Au 与 SiN<sub>x</sub> 粘附性差,需要增加粘附层.下面分别以 CET 小于 Au 的 Cr、CET 大于 Au 的 Al 为中间黏附层进行分析.三层材料悬臂梁应用式(20)时, SiN<sub>x</sub> 为底层材料 1,厚度为  $2\mu\text{m}$ ; Cr 或 Al 为中间层材料 2; Au 为顶层材料 3.设梁长为  $50\mu\text{m}$ .分别以 Au-Cr、Au-Al 的厚度为平面坐标,悬臂梁的  $\Delta\theta/\Delta T$  为纵坐标,通过式(20)得图 3、4 所示曲面.

比较曲面,可以看出 Au\Al\SiN<sub>x</sub> 比 Au\Cr\SiN<sub>x</sub> 材料构成的悬臂梁有更大的  $\Delta\theta/\Delta T$  极值.进一步分析还可以得到以下结论:

(1) 当 SiN<sub>x</sub> 层厚度一定, CET 较小的金属(图 3 中 Cr、图 4 中 Au) 无论作为中间层还是作为顶层,其厚度越薄,梁的  $\Delta\theta/\Delta T$  极值越大; CET 较大的金

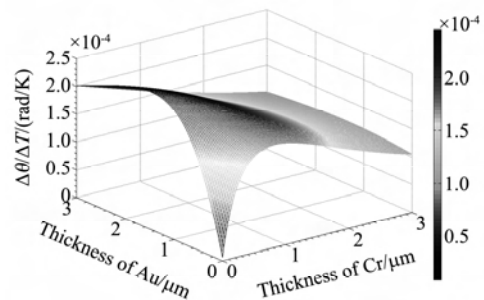


图 3 Au-Cr 厚度与单位温度转角关系  
Fig. 3 Relationship of Au - Cr thickness and  $\Delta\theta/\Delta T$

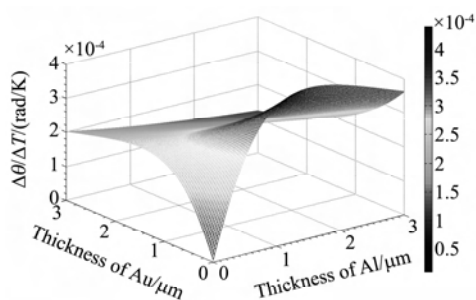


图4 Au-Al厚度与单位温度转角关系  
Fig.4 Relationship of Au - Al thickness and  $\Delta\theta/\Delta T$

属(图3中Au、图4中Al)无论作为顶层还是作为中间层,合理地选择其厚度可以获得最大 $\Delta\theta/\Delta T$ 极值.

(2) 当 $\text{SiN}_x$ 层厚度一定, $\text{SiN}_x$ 层上的两种金属厚度同时趋于零, $\Delta\theta/\Delta T$ 也趋于零.这样的材料结构是光读出像元中反光板的理想结构.但是,金属薄到一定程度会对可见光透明<sup>[12]</sup>,因此,作为反光层的金属必须有一定厚度以保证其反射率,通常厚度应大于30nm.

## 2.2 红外吸收层

若选 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}_x$ 、 $\text{SiC}$ 等红外吸收率高的薄膜材料作为结构基础层,厚度 $h_1$ 为 $2\mu\text{m}$ ;Cr或Ti为粘附层,Au为顶层材料,构成 $\text{Au}\backslash\text{Cr}\backslash\text{SiO}_2$ 、 $\text{Au}\backslash\text{Ti}\backslash\text{SiO}_2$ 、 $\text{Au}\backslash\text{Cr}\backslash\text{SiN}_x$ 、 $\text{Au}\backslash\text{Ti}\backslash\text{SiN}_x$ 、 $\text{Au}\backslash\text{Cr}\backslash\text{SiC}$ 、 $\text{Au}\backslash\text{Ti}\backslash\text{SiC}$ 悬臂梁,梁长为 $50\mu\text{m}$ .根据2.1(1),三层材料中CET较小的金属层越薄越好,故Cr、Ti厚度 $h_2$ 选为5nm.利用式(20),得到图5所示的Au与 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}_x$ 、 $\text{SiC}$ 厚度比和悬臂梁 $\Delta\theta/\Delta T$ 关系曲线.结合表1的材料参数,分析曲线,得到以下结论:

(1)  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}_x$ 、 $\text{SiC}$ 的CET依次增大,与Au的CET差值依次减小,构成微悬臂梁的 $\Delta\theta/\Delta T$ 极值依次降低.

(2)  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}_x$ 、 $\text{SiC}$ 的弹性模量 $E$ 依次增大,构成微悬臂梁 $\Delta\theta/\Delta T$ 的极大值对应的材料厚度比例依次增加,即弹性模量较大的材料刚度较大,需要更厚的金属层才能获得热应变的极大值,且 $\Delta\theta/\Delta T$ 极值较小.

## 2.3 材料厚度匹配

以 $\text{Au}\backslash\text{Cr}\backslash\text{SiN}_x$ 微梁为例, $\text{SiN}_x$ 厚度 $h_1$ 分别为 $0.3\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ 、 $2\mu\text{m}$ ,Cr层厚度 $h_2$ 为5nm,通过三层模型式(20)可以得到如图6所示的Au层厚度与悬臂梁 $\Delta\theta/\Delta T$ 的关系曲线.曲线表明:

(1) 不同厚度的 $\text{SiN}_x$ 与Au匹配,有不同的 $\Delta\theta/\Delta T$

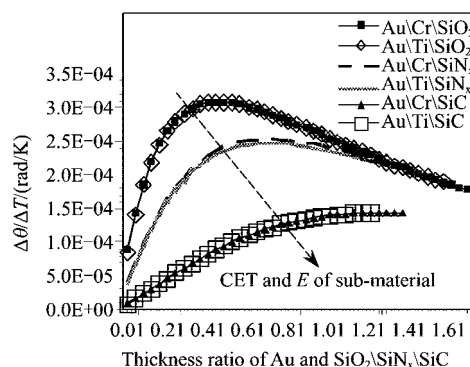


图5 Au与红外吸收层厚度比和单位温度转角关系  
Fig.5 Relationship of the ratio of Au and  $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}_x$ 、 $\text{SiC}$  and  $\Delta\theta/\Delta T$

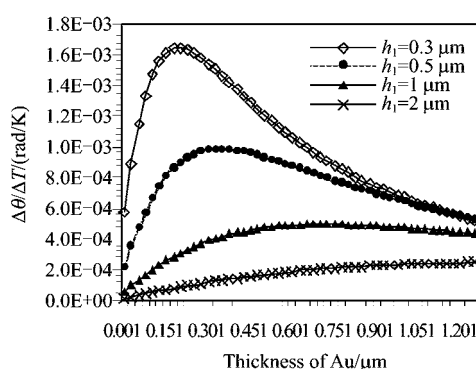


图6 Au厚度与单位温度转角关系  
Fig.6 Relationship between  $\Delta\theta/\Delta T$  and Au thickness

$\Delta T$ 极值,也分别对应不同的Au厚度;

(2)  $\text{SiN}_x$ 层厚度越薄, $\Delta\theta/\Delta T$ 极值越大.

作为像元基础结构的红外吸收层厚度设计决定着芯片的工艺流程设计和工艺实现难度.过薄的吸收层结构强度差,给大阵列FPA的工艺实现带来困难.因此,一味地降低材料厚度获取更大 $\Delta\theta/\Delta T$ 的方法并不可取.

## 2.4 模型计算结果分析

对于 $\text{Au}\backslash\text{Cr}\backslash\text{SiN}_x$ 微梁,若梁长度为 $50\mu\text{m}$ , $\text{SiN}_x$ 厚度为 $0.3\mu\text{m}$ ,Cr厚度为5nm,由图6中曲线得知,Au厚度为 $0.22\mu\text{m}$ 对应的 $\Delta\theta/\Delta T$ 最大值为 $1.65 \times 10^{-3} \text{ rad/K}$ .

若应用ANSYS软件多层壳有限元仿真上述尺寸三层悬臂梁,且梁宽度设为 $2\mu\text{m}$ ,得到梁温度变化1K,最大 $\Delta\theta/\Delta T$ 为 $1.697 \times 10^{-3} \text{ rad/K}$ ,如图7所示.模型计算值与仿真结果相比,相对误差为2.8%.

可见,三层材料梁模型虽然没有描述宽度的量,但是,能够正确描述梁结构的热应变趋势.由于三层材料梁模型是简单的解析解,可方便地对材料选取、

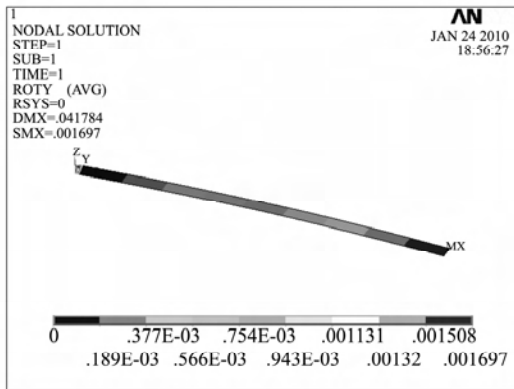


图7 三层梁仿真结果

Fig.7 Simulation result of a tri-layer beam

厚度匹配等设计问题进行计算分析,因此,对梁结构设计有很好的指导作用.

### 3 模型分析、仿真和实验验证

本文研制的一种无 Si 衬底、镂空非制冷光学读出 IRFPA 像元见图 8. 由于单层材料梁对反光板旋转没有贡献,因此,应用模型式(20)时,只需考虑两段由 Au\Cr\SiN<sub>x</sub> 构成的三层材料梁,等效长度  $L$  约为  $106\mu\text{m}$ . SiN<sub>x</sub> 厚度为  $0.3\mu\text{m}$ , Cr 厚度为  $5\text{nm}$ , 经计算得到 Au 厚度为  $0.22\mu\text{m}$ , 最大  $\Delta\theta/\Delta T$  为  $3.429 \times 10^{-3}\text{rad/K}$ .

利用 ANSYS 软件多层壳有限元仿真图 8 所示像元,得到  $\Delta\theta/\Delta T$  为  $3.469 \times 10^{-3}\text{rad/K}$ .

依据上面参数设计、加工的  $160 \times 160$  像元 FPA 芯片,  $\Delta\theta/\Delta T$  测试结果为  $10^{-3}\text{rad/K}$  数量级. 从 MEMS 技术角度评价,设计与工艺达到了较好的符合.

### 4 结论

根据 MEMS 工艺特点,建立了三层材料微悬臂梁的热应变模型. 应用此模型分析、研究了作为红外敏感部分、反射可见光部分三层材料结构的材料选用,厚度匹配与最大单位温度转角关系等一系列问题. 提出了一套三层材料结构设计方法. 通过比较模型分析结果与仿真计算和测试结果,验证了模型具有较好的精度,表明了模型的合理、有效和实用性.

致谢 本研究所用 ANSYS 软件得到北京大学微米/

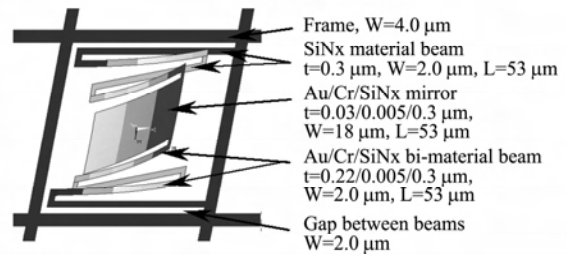


图8 一种光读出 FPA 像元结构

Fig.8 A pixel in an optic readout FPA

纳米加工技术国家级重点实验室的支持.

### REFERENCES

- [1] Manalis S R, Minne S C, Quate C F, *et al.* Two-dimensional micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation[J]. *J. Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70** (24): 3311—3313.
- [2] Perazzo T, Mao M, Kwon O, *et al.* Infrared vision uncooled micro-optomechanical camera[J]. *J. Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74** (23): 3567—3569.
- [3] Yang Z, Mao M Y, Horowitz R, *et al.* Optomechanical uncooled infrared imaging system; design, microfabrication, and performance[J]. *J. MEMS*, 2002, **11** (2): 136—146.
- [4] Ishizuya T, Suzuki J, Akagawa K, *et al.* Optically readable bi-material infrared detector[J]. *J. Journal of Institute of Image Information & Television Engineers*, 2001, **55** (2): 304—309.
- [5] Datskosa P G. Performance of uncooled microcantilever thermal detectors[J]. *Rev. Sci. Instrum.* 2004, **75** (4): 1134—1148.
- [6] Li C B, Jiao B B, Chen D P, *et al.* A MEMS based focus plane Array for infrared imaging[J]. *J. Chinese Journal of Semiconductors*, 2006, **27** (1): 157—162.
- [7] Riethmuller W, Benecke W, Schnakenberg, *et al.* Micro-mechanical silicon actuators based on thermal expansion effects[C]. In Transducer'87, 4<sup>th</sup> International Conference on Solid-State Sensor and Actuators, June 1987, 834—837.
- [8] Oden P I, Datskos P G, Thundat T, *et al.* Uncooled thermal imaging using piezoresistive microcantilever[J]. *J. Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69** (21): 3277—3279.
- [9] Yang Zhao. Optomechanical uncooled infrared imaging system[D]. Dissertation of UC, Berkeley, 2002, 67.
- [10] Shan Z H. *Material Mechanics*[M]. Beijing: Higher Education Publish House, 2006, 153—154.
- [11] Freund L B, Sureshizhu S. *Think film materials: stress, defect formation, and surface evolution*[M]. Cambridge University Press, 2003, 81—82.
- [12] Chen Jun. *Electromagnetic theory of optics*[M]. Beijing: Science Press (陈军, 光学电磁理论, 北京: 科学出版社), 2005, 102—103.