

文章编号:1001-9014(2005)06-0409-06

## 双材料微梁阵列非制冷红外成像系统 ——微梁阵列的设计与制作

董凤良<sup>1</sup>, 张青川<sup>1</sup>, 伍小平<sup>1</sup>, 潘亮<sup>1</sup>, 郭哲颖<sup>1</sup>, 陈大鹏<sup>2</sup>, 王玮冰<sup>2</sup>, 段志辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;

2. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

**摘要:**给出了一种用于非制冷光学读出红外探测器的核心器件——双材料微悬臂梁阵列的设计和制作。微梁阵列是无硅基底的SiNx/Au双材料单层膜结构,其制作工艺简单、可以直接放在空气中成像。实验使用了设计制作的140×98微梁阵列和高信噪比的12-bit CCD,得到120℃以上的物体热像,噪声等效温度差(NETD)为7K左右,实验结果与热机械模型预测结果一致。

**关键词:**非制冷红外成像;光学读出;双材料微悬臂梁阵列

**中图分类号:**TN216 **文献标识码:**A

## BIMATERIAL MICRO-CANTILEVER UNCOOLED INFRARED IMAGING SYSTEM—DESIGN AND FABRICATION OF MICRO-CANTILEVER ARRAY

DONG Feng-Liang<sup>1</sup>, ZHANG Qing-Chuan<sup>1</sup>, WU Xiao-Ping<sup>1</sup>, PAN Liang<sup>1</sup>, GUO Zhe-Ying<sup>1</sup>,  
CHEN Da-Peng<sup>2</sup>, WANG Wei-Bing<sup>2</sup>, DUAN Zhi-Hui<sup>1</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The design and fabrication of one-layer bimaterial micro-cantilever array made of silicon nitride (SiNx) and gold (Au) without Si substrate for uncooled optical readout infrared (IR) imaging system were presented. One-layer structure simplifies the fabrication process. IR thermal images can be obtained when the cantilever array is placed in the atmosphere. The experimental results with the micro-cantilever array of 140×98 elements and 12-bit CCD indicate that the objects at the temperature of higher than 120℃ can be detected and the noise-equivalent temperature difference (NETD) of the device is ~7K. The experimental results are well accordant with the thermomechanical design of micro-cantilever array.

**Key words:** uncooled infrared imaging; optical readout; bimaterial micro-cantilever array

### 引言

近年来,红外探测器<sup>[1]</sup>被广泛地应用于军事、医学、气象、农业等诸多领域,因而它受到越来越多的关注。红外探测器分为量子型和热型两种。量子型红外探测器有响应时间短、噪声等效温度差低(NETD约5~10mK)等优点<sup>[1]</sup>,但它需要工作在低温下(77K液氮),因此成本和能耗高,限制了它的应用。传统的热型探测器(如热电、焦电)不需要制

冷装置,可以使能耗和成本降低<sup>[1]</sup>,NETD可达到约20mK~50mK<sup>[1]</sup>。

基于光学读出的双材料微悬臂梁阵列受热变形红外成像技术是本世纪初出现的一种新的热型非制冷红外成像技术。由于不需要在每一感热像素上集成高灵敏度的读出电路,降低了红外焦平面阵列的制作难度。在已报道的文献中,其NETD可以达到3~5K<sup>[2-5]</sup>。追踪这一前沿技术,在2003年我们利用谱平面上滤波测量微梁阵列转角的光学方法读出双

收稿日期:2004-11-15,修回日期:2005-05-16

Received date: 2004-11-15, revised date: 2005-05-16

基金项目:自然科学基金(10232030)、基金(50076040和10472111)资助项目

作者简介:董凤良(1979-),男,安徽阜阳人,在读博士,主要从事红外焦平面的设计与模拟及光学读出系统的优化等问题研究。

材料梁受红外辐射后产生的热致变形,并得到了200℃热物体的红外图像<sup>[6,7]</sup>.根据理论上预测的该原理的热检测灵敏度极限( $\mu\text{K}$ 级<sup>[8]</sup>)和加工制作技术的进一步发展,有希望使该技术发展成为可实用的非制冷红外成像器件.

基于以前的工作,本文提出了一种单层膜结构双材料微梁阵列的设计与制作,并对设计参数进行了评估.微梁阵列放置在空气中实验,成功观察到120℃物体的热像,测得的热机械响应为0.013deg/K.实验结果很好的与设计参数( $1.8 \times 10^{-4} \text{rad/K}$ )吻合.

### 1 双材料微梁阵列的探测原理

相对已有的在硅基底上站列的微梁阵列设计<sup>[2-5]</sup>,我们设计的微梁阵列是无硅基底双材料单层膜结构.其微梁单元如图1所示,它是由热胀系数相差较大的SiNx和Au组成的双材料梁.反光板尺寸为 $90\mu\text{m} \times 60\mu\text{m}$ ,有2个作用:2 $\mu\text{m}$ 厚的SiNx层作为红外吸收层;0.3 $\mu\text{m}$ 厚的Au层作为读出可见光的反射板.变形腿总长 $L_{leg}$ (除最后一折)约550 $\mu\text{m}$ ,由于MEMS制作工艺的限制,没有实现设计的热隔离腿,因此有效的热变形腿长只有一折( $L_{eff}$ 约90 $\mu\text{m}$ ).

光学读出红外成像系统及其原理如图2所示,当红外物体的辐射能经过红外透镜传到微梁阵列时,红外辐射的吸收将使微梁阵元产生温升 $\Delta T$ ,由于SiNx和Au两种材料的热胀系数的差异,梁将产生弯曲,使反光板产生倾角 $\theta$ (如图1(a)所示).方框内的光学读出部分把阵元的倾角转化为CCD上的灰度变化:LED光源通过小孔变成点光源,扩束

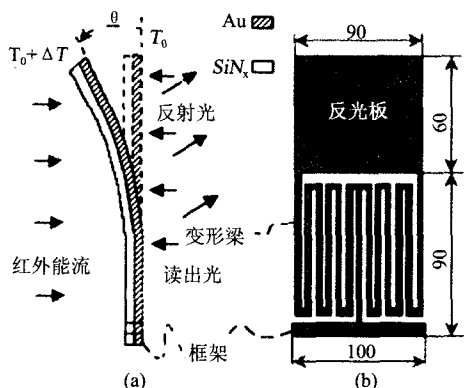


图1 微悬臂梁阵元的示意图 (a) 截面图 (b) 俯视图  
Fig. 1 Schematic sectional view (a) and top view (b) of the micro-cantilever

后经过分光镜,由准直透镜L1变成平行光,照到微梁阵列后反射,通过Fourier变换透镜L1,刀口在L1的后焦面滤波,然后通过成像透镜在CCD靶面上成像.

设计的无基底微梁阵列结构主要有以下特点:

(1) 采用光学读出方式,不产生读出电流的附加热量,不需要复杂布线和金属连接,有良好的热隔离.

(2) 由于工艺限制,热隔离梁、减薄变形梁和优化双材料厚度比未能实现.梁作得尽量长,以降低热导,使片子产生最大温升;同时选取热胀系数差别大的SiNx和Au,使微梁阵列产生最大变形.

(3) 无基底单层膜结构,无需牺牲层工艺,降低了微梁阵列制作难度,避免了MEMS结构中出现的粘连现象.

(4) 没有硅基底,消除了传统制作的微梁与基底间的2 $\mu\text{m}$ 左右的空气间隙<sup>[2]</sup>,避免了由间隙导致的高温梯度的热传导,使空气的热导减少为原来的1/10<sup>4</sup>,微梁阵列可以直接在空气中成像.

### 2 微梁阵列的设计

微梁阵列的设计要求包括:在预定的阵元尺寸范围内,红外辐射能流一定时,阵元要产生最大的温升;相同温升时阵元的热机械响应要达到最大;反光板要长,使检测光的谱窄,提高检测灵敏度.另外为实现实时探测,阵元的热响应时间要和图像的采集帧频协调.为优化微梁阵列性能,需要协调考虑材料的选择、阵元的热学和热机械设计等.

#### 2.1 微悬臂梁阵列材料的选择

双材料微梁阵列包括三个部分:红外吸收板、双材料变形梁、热隔离梁.所选材料应满足如下要求:

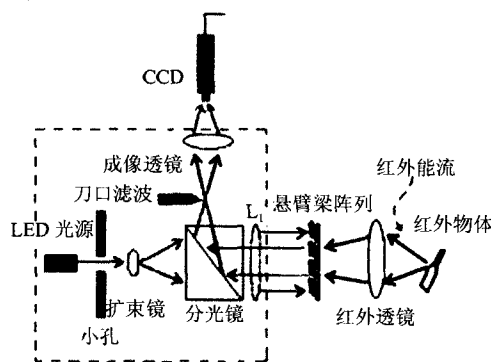


图2 红外成像系统简图  
L1-Fourier变换透镜(同时作为准直透镜)  
Fig. 2 Schematic diagram of the infrared imaging system  
L1-Fourier Transforming lens (as well as Collimator)

表 1 SiNx, Au, Al, Si 的热物理性能  
Table 1 Properties of optional materials for bimaterial cantilever array

	密度 $\rho \times 10^{-3}$ kg/m <sup>3</sup>	杨氏模量 $E$ GN/m <sup>2</sup>	热导系数 $k$ W/(m·K)	热膨胀系数 $\alpha$ [ $\times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ]	热容 $c$ J/(kg·K)
SiNx	2.40	180	5.5 ± 0.5	0.8	691
Au	19.3	73	296	14.2	129
Al	2.7	80	237	23.6	908
Si	2.33	100	135	2.6	700

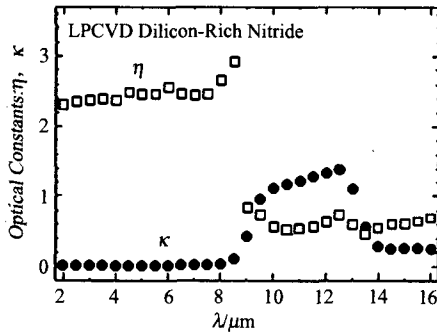


图 3 LPCVD SiNx 折射率的实部( $\eta$ )和虚部( $\kappa$ )  
Fig. 3 Real ( $\eta$ ) and imaginary ( $\kappa$ ) parts of the refractive index of a LPCVD SiNx

- (1) 双材料中要求一种材料吸收 8 ~ 14  $\mu\text{m}$  波段的红外光,另一种材料可反射可见光;
- (2) 双材料的热膨胀系数(CTE)差异大;
- (3) 热隔离梁材料具有低的热传导系数。

另外,双材料要与微加工工艺兼容、有低的残余应力和好的化学稳定性。

本文选用了低压化学气相沉积(LPCVD)的低应力富硅 SiNx 和 Au 作为双材料。从图 3<sup>[2]</sup>可以看出,LPCVD SiNx 薄膜在 8 ~ 14  $\mu\text{m}$  波段有一个吸收峰。表 1<sup>[2]</sup>列出了几种材料的热物理性能。通过比较可以看出,SiNx 和 Au 的 CTE 差异大,同时低应力的 SiNx 膜的热传导系数低,这对于热隔离是很重要的。所以选择 SiNx 和 Au 作为双材料。

## 2.2 阵元的热学设计

考虑微梁阵列的一个阵元,阵元的温升可以用下式<sup>[9]</sup>表示

$$\Delta T = \frac{q A_{\text{pixel}} FF}{G} \quad (1)$$

式中, $q$  是吸收的红外能流密度, $A_{\text{pixel}}$  为阵元面积, $FF$  是填充因子, $G$  表示阵元与环境之间的热导

$$G = G_{\text{leg}} + G_{\text{rad}} + G_{\text{air}} \quad (2)$$

式中, $G_{\text{leg}}$  表示通过梁传递的热导,可以表示成

$$G_{\text{leg}} = \left( \frac{L_{\text{leg}}}{2 \sum k_i A_i} + \frac{L_{\text{last}}}{\sum k_i A_i} \right)^{-1} \quad (3)$$

这里, $k$  是组成梁材料的导热系数, $A$  表示其截面积, $L_{\text{leg}}$  为支撑梁的总长度, $L_{\text{last}}$  ( $= 90 \mu\text{m}$ ) 是最后一折阵元与框架相连的支撑梁的长度,下标  $i = 1, 2$  表示组成梁的两种材料。 $G_{\text{rad}}$  是阵元向环境辐射的热导

$$G_{\text{rad}} = 4 \sigma A_{\text{pixel}} (\varepsilon_{\text{Au}} + \varepsilon_{\text{SiNx}}) T^3 \quad (4)$$

式中, $\sigma$  是 Boltzmann 常数, Au 和 SiNx 的发射率 ( $\varepsilon_{\text{Au}}$ 、 $\varepsilon_{\text{SiNx}}$ ) 分别是 0.01 和 0.8,  $T$  是阵元的温度 ( $\sim 300 \text{K}$ )。空气的热导

$$G_{\text{air}} = \frac{k_{\text{air}} A_{\text{pixel}}}{D} \quad (5)$$

这里, $k_{\text{air}} = 26.3 \times 10^{-3} \text{W/m} \cdot \text{K}$ , 是常压下空气的热传导系数, $D$  是空气热传导的特征尺度(在我们的实验中实际距离约 20mm。值得一提的是,一般在 Si 基底上生长的微梁结构, $D$  为牺牲层厚度 ( $\mu\text{m}$ ),  $G_{\text{air}}$  将达到  $10^{-4} \text{W/K}$ , 是  $G_{\text{leg}}$  的 1 000 倍,故在空气中无法积蓄热能。在表 2 中给出了设计参数,经误差分析,可忽略  $G_{\text{air}}$ , 所以式(2)可以近似为

$$G = G_{\text{leg}} + G_{\text{rad}} \quad (6)$$

由式(1)知,小的热导产生高的温升,同时为了吸收更多能量又必须使吸热板的面积大,因而无法降低  $G_{\text{rad}}$ , 只有降低  $G_{\text{leg}}$ 。这就要求选择低热传导系数材料,还要使梁窄、薄、长。另外,既然  $G_{\text{rad}}$  不能消除,因此它决定着总的热导极限。

考虑由红外目标的温升  $\Delta T_s$  引起探测阵元的温升为  $\Delta T_c$ , 由式(1)推出<sup>[5]</sup>

$$H = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_s} = \frac{A_{\text{ab}} \varepsilon \tau_0 \pi (dP/dT_i)}{4 F_{\text{no}}^2 (G_{\text{leg}} + G_{\text{rad}})} \quad (7)$$

式中, $A_{\text{ab}}$  是吸收板的面积, $\varepsilon$  为阵元的发射率, $\tau_0$  是红外透镜的透过率 ( $= 0.4$ ),  $F_{\text{no}}$  是红外透镜的  $F$  数 ( $= 0.7$ ), 单位温度辐射率  $dP/dT$  表示温度为  $T_i$  (约 300K) 的物体辐射的红外能量中被探测阵元接收的部分,在 8 ~ 14  $\mu\text{m}$  波段<sup>[2]</sup>,  $dP/dT_i = 0.63 \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

## 2.3 热机械设计

在成像系统中,检测的物理量是微梁阵元的转角  $\theta$ , 它可以由双材料悬臂梁的热机械方程<sup>[2]</sup>:

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d^2 z}{dx^2} = 6 (\alpha_{\text{Au}} - \alpha_{\text{SiNx}}) \left( \frac{t_{\text{Au}} + t_{\text{SiNx}}}{t_{\text{SiNx}}^2 K} \right) \Delta T \quad (8)$$

表 2 无基底单层膜结构微梁的设计参数

Table 2 One-layer cantilever array without Si substrate design parameters

阵元尺寸 ( $\mu\text{m}^2$ )	$L_{\text{leg}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$L_{\text{eff}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$G_{\text{leg}}$ (W/K)	$G_{\text{rad}}$ (W/K)	$H$	$S_T$ (rad/K)	$G_{\text{air}}$ (W/K)	热响应时间 $\tau$ (ms)
150 × 100	550	90	$8.2 \times 10^{-7}$	$7.4 \times 10^{-8}$	$2.0 \times 10^{-3}$	$1.8 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-8}$	29

$$z=0, \theta = \frac{dz}{dx} = 0 \quad \text{at } x=0$$

积分得到. 式中,  $\alpha$  是热胀系数,  $t$  是梁厚度,  $z$  表示挠度,  $\Delta T$  为阵元的温升,  $K$  表示双材料的结构参数, 可由下式表示

$$K = 4 + 6n + 4n^2 + \Phi n^3 + \frac{1}{\Phi n} \quad (9)$$

$$n = \frac{t_{\text{Au}}}{t_{\text{SiNx}}}, \quad \Phi = \frac{E_{\text{Au}}}{E_{\text{SiNx}}}$$

式中,  $E$  表示材料的弹性模量. 考虑到红外吸收板的截面积远远大于微梁的截面积, 提出这样的假设: 红外吸收板上的温度分布是均匀的, 而变形梁上是线性分布的, 即

$$\Delta T(x) = \frac{x}{L_{\text{leg}}} \Delta T_c \quad (10)$$

解式(8)即可得到悬臂梁的热机械响应

$$S_T = \frac{\Delta \theta_{\text{max}}}{\Delta T_c} = 6(\alpha_{\text{Au}} - \alpha_{\text{SiNx}}) \left( \frac{n+1}{K} \right) \left( \frac{L_{\text{leg}} L_{\text{eff}} - 0.5 L_{\text{eff}}^2}{L_{\text{leg}} t_{\text{SiNx}}} \right) \quad (11)$$

式中  $\theta_{\text{max}}$  是梁在  $x = L_{\text{eff}}$  位置的倾斜角. 从式(11)可以看出, 为使  $S_T$  最优化, 双材料的 CTE 差要大, 变形腿要长和薄. 材料选定后,  $S_T \propto (n+1)/K$ . 从图4可以看出最佳厚度比  $n_{\text{op}} = 0.75$ , 由于制作工艺的限制,  $n$  不能达到最优化 ( $n = 0.25$ ), 因而  $S_T$  不理想. 相比国外结果 ( $4.5 \times 10^{-3} \text{ rad/K}$ )<sup>[2]</sup>, 还有很大的提高余地(见表2).

光学读出系统把悬臂梁倾斜角的变化转化为 CCD 上的灰度变化. 在之前的工作中, 我们标定了灰度变化  $\Delta I_N$  与角度变化  $\Delta \theta$  的线性关系<sup>[10]</sup>, 即:

$$\frac{\Delta \theta}{\Delta I_N} \approx \frac{1}{2.4N} \text{ deg} = \frac{\pi}{423N} \text{ rad} \quad (12)$$

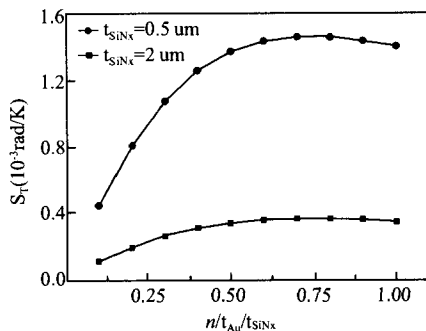


图4 双材料厚度比  $n$  对热机械响应的影响  
Fig.4 The influence of bimaterial thickness ratio ( $n$ ) on thermomechanical sensitivity  $S$

式中,  $N$  是 CCD 的量化级数(我们使用 12-bit CCD,  $N = 4096$ ). 由式(7)、式(11)和式(12)可以得到灰度变化与红外物体的温升之间的关系

$$\frac{\Delta I_N}{\Delta T_s} = \frac{\Delta I_N}{\Delta \theta} \cdot S_T \cdot H \quad (13)$$

阵元的热响应时间  $\tau$  是由阵元的总热容和热导确定的

$$\tau = \frac{C_{\text{th}}}{G} \quad (14)$$

式中,  $C_{\text{th}} = \sum (\rho A_{\text{ab}} t c)_i$ ,  $\rho$  和  $c$  是第  $i$  层材料的密度和热容,  $i = 1, 2$  表示两种材料.  $\tau$  必须与成像系统的采集帧频要协调.(见表2)

### 3 微梁的制作工艺

设计的微梁阵列有  $140 \times 98$  个阵元, 是基于表面微加工工艺制作的. 其主要包括4个工作步骤: 生长 SiNx 膜、刻蚀 SiNx 图形、溅射 Au 层和去除部分硅基底, 如图5所示.

图6给出了制作的微梁阵列的电镜照片. 反光板的尺寸为  $90 \mu\text{m} \times 60 \mu\text{m}$ , 曲折的部分是微梁阵列的变形腿(宽  $3 \mu\text{m}$ ), 阵元从宽  $10 \mu\text{m}$  的框架3伸出. 框架1的宽为  $100 \mu\text{m}$ , 框架2的宽为  $50 \mu\text{m}$ . 由框架1和框架2围成的小区域由  $10 \times 7$  个阵元组成. 整个微梁阵列由  $140 \times 98$  个阵元组成.

### 4 实验结果

使用图2所示的光学读出系统进行微梁阵列的热成像实验. 注意到, 实验并没有像以前<sup>[2,3,5]</sup>那样图7给出了使用 F/0.7 的红外透镜和 12-bit CCD 获得的 T 字型铜片(约  $250^\circ\text{C}$ )的热像. 微梁阵列的热把微梁阵列放置在真空室里, 而是直接放在空气中成像. 机械响应为  $0.013 \text{ deg/K}$ . 为验证在上面提出

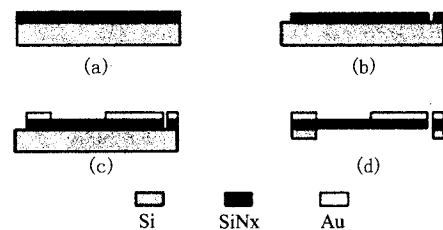


图5 微悬臂梁阵列的工艺流程图 (a) 生长 SiNx 膜 (b) 刻蚀 SiNx 图形 (c) 溅射金属 Au 层 (d) 去除部分硅基底结构

Fig.5 Microfabrication process of bi-material cantilever array (a) deposit SiNx film (b) photoresist and etch (c) deposit Au layer (d) release the structure

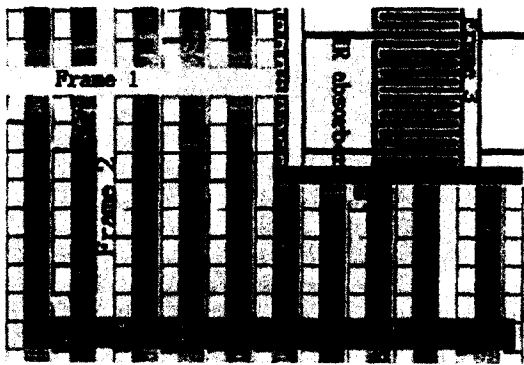


图6 微悬臂梁阵列的扫描电镜照片  
Fig. 6 SEM picture of micro-cantilever array

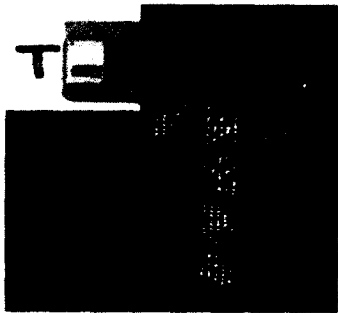


图7 T字型铜片和它(加热到250℃左右)的热像  
Fig. 7 T-shaped copper plate and its thermal image of 250℃

的热机械模型,选择温度可调的红外源进行不同温度下的热成像实验.在微梁阵列上选取五个阵元进行观察,得到如图8所示的实验曲线.从图8可以看出,一个灰度值约对应2.5K的温度,而系统的噪声量级在3个灰度值左右,NETD约7K.由于微梁阵

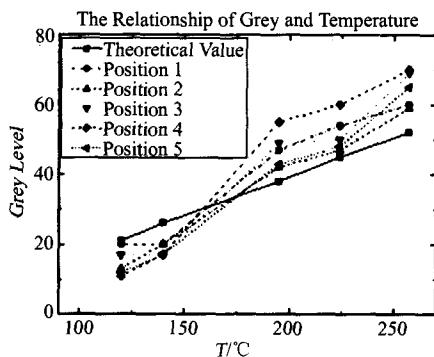


图8 热像的理论灰度值和实验值的比较实验测量微梁阵列上5个阵元在不同温度下的灰度值  
Fig. 8 The comparison of grey levels measured with theoretical values. In the experiment, the grey levels of 5 array-elements at the different temperatures are measured

列的热机械响应  $S_T$  没有达到最优化,并且系统信噪比(S/N)不是很理想,温度降低时,实验测得的灰度值偏低.实验结果与物理模型比较一致.从图8还可以看出,由于微梁阵列的不均匀性,不同阵元的灰度值在同一温度下也不相同.

## 5 结语

本文提出了一种新的基于光学读出非制冷红外探测系统的核心器件-微梁阵列的设计.微梁阵列是由 Au/SiN<sub>x</sub> 组成的双材料梁,阵元的转角是与阵元温升成正比,这种无硅基底的双材料单层膜结构具有制作工艺简单、可以直接在空气中成像等优点.搭建了相应的实验系统,得到了120℃以上的物体的热像,其NETD约7K.实验结果与提出的热机械模型相吻合.

## REFERENCES

- [1] Antoni Rogalski. Infrared detectors: status and trends [J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2003, **27**: 59—210.
- [2] Zhao Y. Optomechanical uncooled infrared imaging system [D]. Dissertation of UC, Berkeley, 2002.
- [3] Mao, M, Perazzo, T, Kwon, O, *et al.* Direct-view uncooled micro-optomechanical infrared camera [C]. In MEMS '99. Twelfth IEEE International Conference USA: orlando, Florida, 1999, 100—105.
- [4] Senesaca L R, Corbeila J L, Rajicab B S, *et al.* IR imaging using uncooled microcantilever detectors [J]. *Ultramicroscopy*, 2003, **97**: 451—458.
- [5] Zhao Y, Mao M, Horowitz R, *et al.* Optomechanical uncooled infrared imaging system: Design, microfabrication, and performance [J]. *J. of MEMS.*, 2002, **11**(2): 136—146.
- [6] DUAN Zhi-Hui, ZHANG Qing-Chuan, Wu Xiao-Ping, *et al.* Uncooled optically readable bimaterial micro-cantilever infrared imaging device [J]. *Chinese Physics Letters*, 2003, **20**(12): 2130—2132.
- [7] PAN Liang, ZHANG Qing-Chuan, WU Xiao-Pin, *et al.* MEMS based optomechanical infrared imaging [J]. *Experimental Mechanics* (潘亮,张青川,伍小平,等.基于MEMS的光学红外成像.实验力学), 2004, **19**(4): 403—407.
- [8] Lai J, Perazzo T, Shi Z, *et al.* Optimization and Performance of High-resolution Micro-optomechanical Thermal Sensors [J]. *Sensors and Actuators A*, 1997, **58**: 113—119.
- [9] Biao Li. Design and simulation of an uncooled double-cantilever microbolometer with the potential for ~ mK NETD [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004, **112**: 351—359.
- [10] DUAN Zhi-Hui. Step shape reconstruction and infrared imaging application with noncoherent light technique [D]. Ms. D. Dissertation of USTC (段志辉.非相干光技术在阶跃物体形状重建和微梁阵列红外成像中的应用.中国科学技术大学硕士论文), 2003.