

文章编号: 1001-4888(2005)02-

光学读出室温物体红外成像^{*}

郭哲颖¹, 张青川^{*1}, 陈大鹏², 伍小平¹, 董凤良¹, 缪正宇¹, 熊志铭¹, 李超波²

(1. 中国科学技术大学, 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027; 2. 中科院微电子研究所, 北京 100029)

摘要: 光学读出式红外成像是近年来提出的一种新型红外成像技术, 它是基于探测双材料微悬臂梁吸收红外辐射后的变形。本文采用了谱平面刀口滤波方法, 将双材料 (SiN_x/Au) 微梁阵列接收热像后的转角变形转化为像平面上微梁阵列的像所对应的光强变化, 并设计制作了无基底单层膜结构微梁阵列 (100×100pixels, 微梁尺寸 200×200μm², 厚 2μm)。用该阵列在光学读出系统中, 获得了室温下人体的热图像。该系统在室温时 (300K) 噪声等效温度差 (NETD) 达到 0.2K。

关键词: 微悬臂梁; 非制冷; 红外成像; 光学读出

中图分类号: TN216

文献标识码: A

1 引言

传统的制冷型红外成像器件是基于红外光的光电效应。由于室温下物体辐射的红外光子 (峰值波长 8~14 微米) 的能量和热电子的能量相当, 为了消除噪声, 必须加装制冷设备降低探测器的温度。非制冷 (热型) 红外成像原理是检测探测器热致温升所产生的物理性能的变化。由于不需要附加的制冷装置, 制作较为简单, 其在军用和民用领域都有广泛的应用前景。但是现有的非制冷红外成像器件, 需要在红外焦平面阵列 (FPA, Focal Plane Arrays) 上对每一个感热像素制作高增益和高精度的读出电路, 这对于阵列像素, 将带来很高的制作难度和成本。

随着 MEMS 工艺的发展, 近年来, 采用双材料微悬臂梁阵列作为 FPA, 并利用各种光学读出方式^[1-6,8] 检测出微悬臂梁阵列上所成的红外热像的非制冷红外成像技术开始受到广泛的关注。这一红外成像技术通过光学方法读出悬臂梁阵列吸收入射红外辐射所产生的热变形。由于 FPA 的基本结构为简单的双材料微悬臂梁阵列, 不需要在每一感热像素上集成高灵敏度的复杂读出电路, 大大降低了电读出热型红外成像系统在设计与制作红外焦平面阵列 FPA 及其读出系统上遇到的问题^[7]。1996 年, Oak Ridge National Lab 的 Thomas Thundat 等用压电电阻微悬臂梁发展了一种红外探测器, 显示了双材料的微悬臂梁用作红外探测器的可行性^[1]。1997 年至今, University of California, Berkeley 的 Majumdar 研究小组^[3,4] 发展了基于光学干涉读出方式的双材料微悬臂梁红外焦平面阵列 (FPA), 在 2001 年获得了人体的热图像。Nikon Corp. 在 2001 至 2003 年陆续报道了检测热变形所致悬臂梁转角的光学读出系统^[5,6] 并得到了室温下的人像。国外已经报道的室温红外成像结果, 其温度分辨率 (NETD) 约在 1K 左右。2003 年我们利用光学滤波的方法读出悬臂梁阵列在吸收红外辐射后产生的热致变形, 得到了 200℃ 热物体的红外图像^[8-10], 其温度分辨率约为 7K。根据理论预测的该原理的热检测灵敏度极限 (微 K 级^[11]), 随着 MEMS 加工制作技术的进一步发展, 该技术有望发展为低成本高性能的红外成像器件。

* 收稿日期: 2005-06-02

基金项目: 国家自然科学基金重点基金 (10232030) 和面上基金 (50076040 和 10472111) 资助项目

通讯作者: 张青川 (1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事光测实验力学方向研究。

本文设计并成功的制作了一种新结构的红外焦平面阵列,该阵列的悬臂梁单元设计为多重回折的变形腿以及在回折腿上设计间隔镀金结构,这样增加了变形腿和绝热腿的长度,从而提高了微悬臂梁单元的绝热效果和变形效率,即在吸收同样强度的入射红外辐射的条件下提高了单元的温升,在同样温升下悬臂梁有更大的变形量。采用了这些改进设计,并实现了间隔镀金工艺后,悬臂梁的热机械响应灵敏度相对于之前的阵列结构^[8-10]有了很大的提高。实验中使用这一微悬臂梁阵列和改进后的光学读出系统,得到了室温下人体的红外成像结果,根据实验结果计算,该系统的 NETD 达到 0.2K。

2 光学读出系统

实验所采用的光路如图 1a 所示。由 LED 发出的可见光经小孔 PH 后形成点光源,PH 放置在扩束镜 E 的前焦点上,出射光经 E 扩束。扩束后的光束通过分光镜 BS 后由透镜 L_1 准直成为平行光照到悬臂梁阵列表面。悬臂梁由 SiN_x -Au 双材料组成,Au 面作为可见光的反射面反射入射可见光。反射光经由 L_1 进行 Fourier 变换,光线经 BS 反射后汇聚在 L_1 后焦平面 FP 上形成衍射谱。在 FP 上放置刀口滤波单元 K,用以选择衍射谱的通光量。通过 K 的光线经第二个透镜 L_2 在 CCD 靶平面上形成微悬臂梁阵列的可见光像。

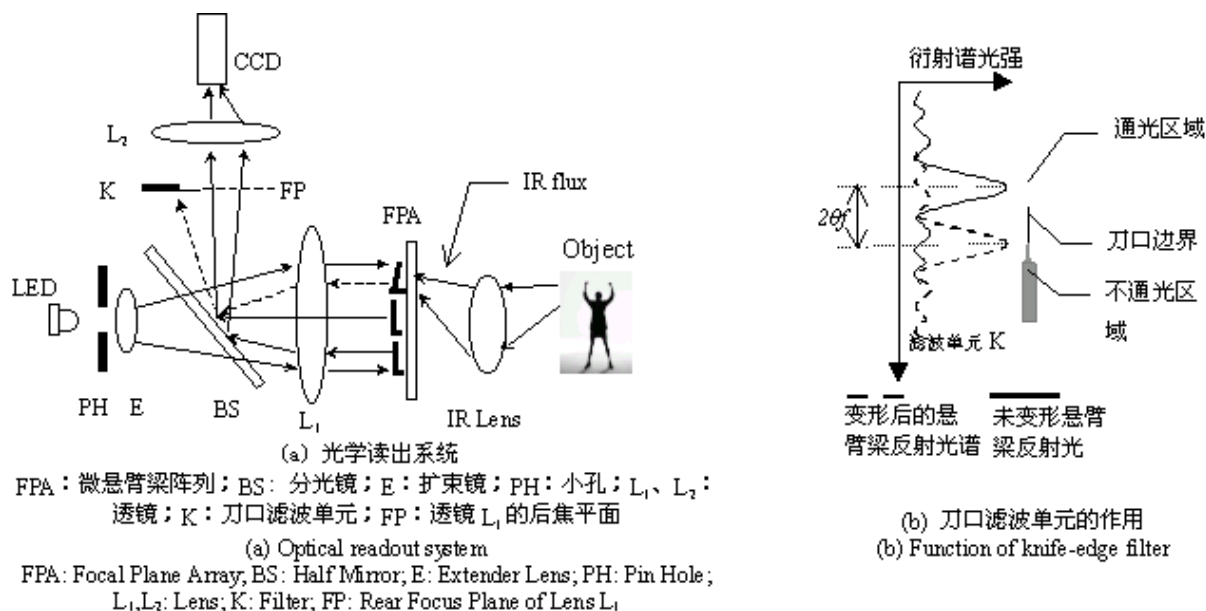


图 1 空间滤波技术原理

Fig.1 Principle of spatial filter technology

在未受热变形时,每个悬臂梁单元在谱平面形成的衍射谱位置相同。当红外透镜(IR Lens)对物体成像时,物体上发射的红外辐射(波长 8~14 微米)被汇聚并在微悬臂梁阵列上形成红外光图像,成像区的悬臂梁单元吸收红外辐射而温度升高。由于组成双材料悬臂梁的两种材料(SiN_x -Au)热膨胀系数的差异,悬臂梁端产生转角 θ ,根据光杠杆原理,该单元衍射谱在透镜 L_1 的后焦平面 FP 上产生移动量 $2\theta f$ (f 为透镜 L_1 焦距)。在 FP 平面上放置的刀口滤波单元定义了通光区域和不通光区域(图 1b 所示)。当悬臂梁变形后,反射光角度发生偏转,悬臂梁单元的衍射谱从一个区域移到另外一个区域,使得 CCD 上接收到的光强发生变化。CCD 接受信号后由计算机进行相减处理(采集的图像与未放置目标时的背景图相减)。这样即将 FPA 上的热图像转换为可见光图像。

3 光学读出系统的探测灵敏度

该光学系统的灵敏度由最小可探测偏转角 $\theta_{\min}$ 表示。假设沿偏转方向衍射谱的零级半峰宽为 $\lambda f / L_y$ (其中 λ 是可见光的波长, f 是透镜 L_1 的焦距, L_y 是悬臂梁反光板在偏转方向上的长度); CCD 的量化级

数为 N , 并将一半的零级衍射峰量化为 N 份; 偏转角 θ 引起的衍射谱的移动量为 $2\theta f$; 则角 $\theta_{\min}$ 可表示为^[8,9]:

$$\theta_{\min} = \frac{\lambda}{2NL_y} \quad (1)$$

考虑所采用的悬臂梁尺寸: $\lambda=0.5\mu\text{m}$, $L_y=180\mu\text{m}$, N 取 4096 (即采用 12-bit CCD)。此时系统最小可探测偏转角为:

$$\theta_{\min} = 3.40 \times 10^{-7} \text{ rad} \approx 2.0 \times 10^{-5} \text{ deg}$$

实际操作中, 最小可测偏转角还取决于以下几个因素: 1) 入射光强是否达到 CCD 满量程。2) 反光板的平整程度, 由于工艺的限制无法完全消除悬臂梁内的残余应力, 使得反光板弯曲导致其衍射谱扩大。3) CCD 的噪声大小。

4 实验结果

实验使用 100×100 的悬臂梁阵列, F 数 0.8 的红外透镜, 12-bit CCD (S/N: 70dB), 采集速率 30 帧/秒。

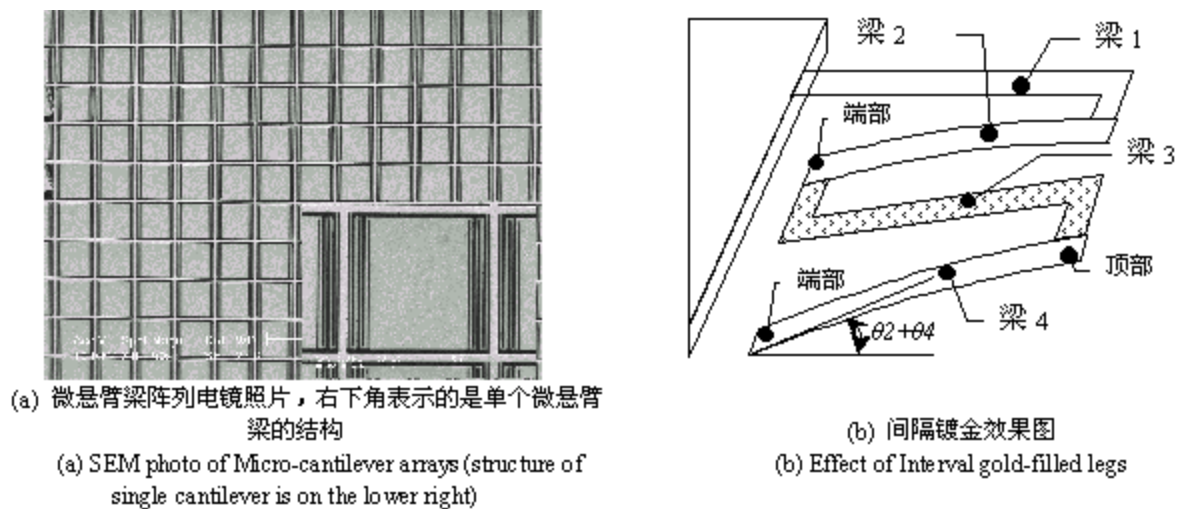


图2 微悬臂梁阵列结构图

Fig.2 Structure of Micro-cantilever arrays

4.1 悬臂梁阵列

实验中所用的悬臂梁阵列如图2所示。单元尺寸约为 $200\mu\text{m} \times 200 \times 2\mu\text{m}$ 。单个微悬臂梁单元由反光板, 回折腿 (变形腿和绝热腿), 支撑框架三部分组成。其中绝热腿为单材料 SiN_x 膜, 其余部分为 SiN_x -Au 双材料膜 (Au 和 SiN_x 的厚度比为 1:10)。反光板用于反射可见光和吸收入射红外辐射, 反光板的面积决定了所吸收的入射红外辐射大小, 本设计采用了较大面积的反光板 ($180\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$)。多重回折腿增加了绝热腿和变形腿的长度, 使绝热效果也即是悬臂梁的温升得到提高, 并提高了微悬臂梁单元的热变形效率。回折腿上间隔镀金结构实现了绝热腿和变形腿的交替连接。变形放大原理如图2b所示, 其中绝热腿 (梁1, 3) 为单材料梁, 温度变化不产生热致转角。变形腿 (梁2, 4) 为双材料梁。在微悬臂梁吸收红外辐射产生热致变形时, 梁2发生变形, 端部相对于梁1的转角为 θ_2 ; 由于梁3没有热致转角, 梁3端部对于梁1的转角也为 θ_2 。而梁4相对于梁3的热致转角为 θ_4 , 这样梁4相对于梁1的转角为 $\theta_2 + \theta_4$ 。可以看出, 这一结构对比于未制作间隔镀金结构的梁, 显著提高了单元的变形角度。

4.2 室温下人体成像实验

实验中同时使用了本文建立的红外成像系统对人体成像,结果如图 3 所示。

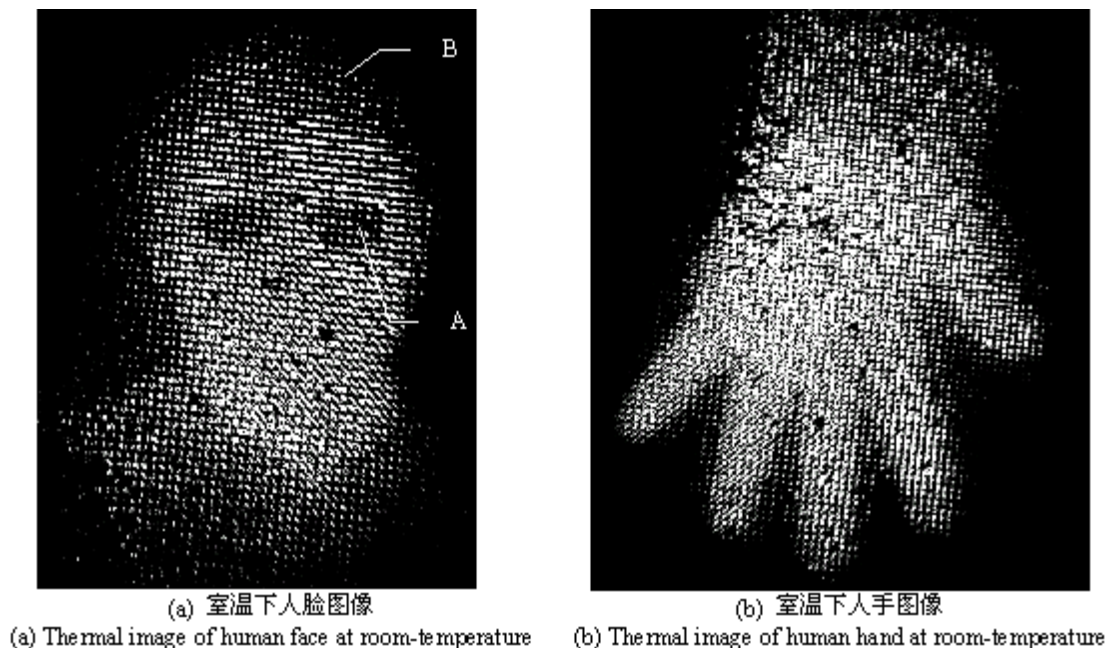


图 3 室温下人体的热图像

Fig. 3 Thermal image of human body at room-temperature

系统的温度灵敏度可以由噪声等效温度差(NETD)来代表,NETD 越小,系统的灵敏度越高,NETD 按下式定义:

$$NETD = \frac{I_{\text{noise}}[\text{grey}]}{I_T[\text{grey/K}]} \quad (2)$$

其中 I_{noise} 是悬臂梁阵列成像时的噪声灰度级; I_T 为系统的热响应灵敏度,定义为目标物体单位温升所对应的 CCD 的灰度级改变:

$$I_T = \frac{\Delta I_N}{\Delta T} \quad (3)$$

在图 3a 中,在 A, B 两个位置分别选取灰度分布均匀的区域,每个区域包含 3×3 个悬臂梁单元的像。取区域内像所占的 CCD 像素灰度值平均值 I_A 和 I_B 相减,计算出 ΔI 为 38 个灰度值。由商品化的制冷型红外相机测得两个区域的辐射温度差为 $\Delta T = 2.6 \text{ K}$ 。可以计算出系统的 I_T 为 14.6 grey/K 。

实验中取 128 幅背景图序列,对序列图中成像区域的每个像素点求噪声值均方差,得出噪声分布图 4。可以看出 3 个灰度级的噪声所占比例最大,为 36.65%,故认为系统的噪声值为 3 个灰度值。由以上结果,计算得到 NETD 值约为 0.2 K 。

4.4 光强对灵敏度的影响

图 5 中显示了所测量的悬臂梁在不同角度偏转时 CCD 接收到的光强变化,测量时刀口初始位置放置在当零级峰完全通过刀口,即光强最大处。由于所使用的 LED 的输出光功率限制,当把 LED 的光强调到最大时,也没有达到 CCD 的满量程(4096 灰度级),仅为满量程的 $1/5$,约为 750 灰度级。如果能提高读出光的强度,使得当零级峰完全通过刀口时 CCD 达到满量程,则光学探测系统的灵敏度有望提高 5 倍,即在得到相同的灰度值时,可以探测到更低的温度差($1/5$)。即系统的 NETD 值可以提高到 0.04 K 。

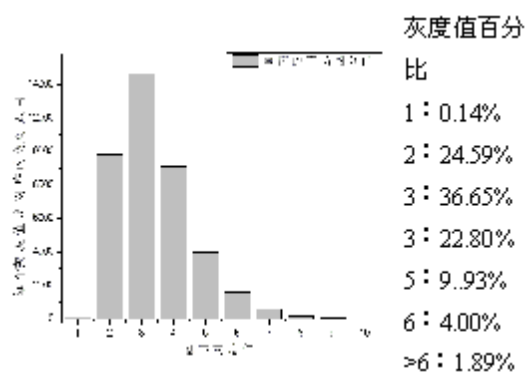


图4 系统的噪声分布

Fig. 4 Noise distribution of system

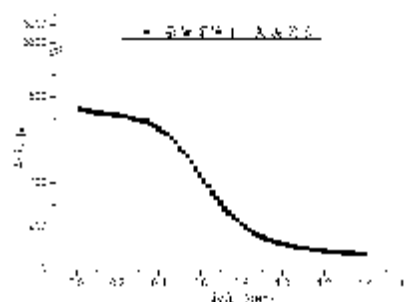


图5 悬臂梁的转角—灰度关系

Fig. 5 Relation of inclination angle vs. gray level

5 结论

本文提出了可以读出应用于红外成像的双材料微悬臂梁阵列变形的光学方法,并设计制作了多回折腿双材料微悬臂梁阵列 FPA,实现了回折腿的间隔镀金工艺制作。建立了相应的光学读出红外成像系统,用这一系统得到了室温下人体的热图像。分析表明,这一方法的微悬臂梁转角检测灵敏度达到 2.0×10^{-5} deg。实验结果显示系统的 NETD 值为 0.2K。并且随着 MEMS 工艺的发展,具有更高热响应灵敏度和更高空间分辨率的微悬臂梁阵列的使用,将使得这种新概念红外成像器件的性能得到提高。

参考文献:

- [1] Oden P I, Datskos P G, Thundat T, *et al.* Uncooled thermal imaging using a piezoresistive microcantilever [J]. Appl. Phys. Lett., 1996, 69(21):3277~3279
- [2] Manalis S R, Minne S C, Quate C F, *et al.* Two-dimensional micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation [J]. Appl. Phys. Lett., 1997, 70(24): 3311~3313
- [3] 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
- [4] Zhao Y. Optomechanical uncooled infrared imaging system [M]. Dissertation of UC, Berkeley, 2002
- [5] Ishizuya T, Suzuki J, Akagawa K, *et al.* Optically readable bi-material infrared detector [J]. J. of Institute of Image Information & Television Engineers, 2001, 55(2):304~309
- [6] Ishizuya T, Suzuki J, Akagawa K, *et al.* 160 multiplied by 120 pixels optically readable bi-material infrared detector [J]. Proc. Of IEEE MEMS, 2002, 578~581
- [7] Antoni Rogalski, Infrared detectors: Status and trends [J]. Progress in quantum Electronics, 2003, 27:59~210
- [8] Duan Z H, Zhang Q C, Wu X P, *et al.* Uncooled Optically Readable Bimaterial Micro-Cantilever Infrared Imaging Device [J]. CHIN. PHYS. LETT., 2003, 20(12):2130
- [9] 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 [D]. 中国科学技术大学硕士毕业论文, 2003 (Duan Z H, The application of incoherent light technique in stair-shape profilometry and Infrared imaging with micro cantilever array. MS. D. Dessertation of USTC, 2003 (in Chinese))
- [10] 潘亮,张青川,伍小平等. 基于 MEMS 的光学红外成像 [J]. 实验力学, 2004, 19(4) (Pan L, Zhang Q C, Wu X P, *et al.* MEMS Based Optomechanical Infrared Imaging. J. of Experimental Mechanics, 2004, 19(4))
- [11] 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

Optical-Readout Room-temperature Infrared Imaging

GUO Zhe-Ying¹, ZHANG Qing-Chuan^{1*}, CHEN Da-Peng², WU Xiao-Ping¹,
DONG Feng-Liang¹, MIAO Zhen-Yu¹, Xiong Zhi-Ming¹, Li Chao-Bo²

(1. CAS Key laboratory of mechanical behavior and design of material, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China;

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

Abstract Optical readout uncooled infrared imaging is a novel technique presented recently. In this paper, optical filter technique is applied to detect the thermal deformation of the micro bimaterial(SiNx/Au) cantilever array caused by absorbing the IR radiation. By knife edge filtering operation on the spectrum plane, the incline angle of micro cantilever arrays is converted to the image intensity changing of micro cantilever array in image plane. A micro cantilever array of 100×100 pixels, arranged in a single film of $2\mu\text{m}$ thickness without substrate, is designed and fabricated. By the presented optical readout system and the fabricated arrays, we obtain a thermal image of human body at room temperature. Analysis of experimental data indicates that the noise equivalent temperature deference (NETD) of the system at room temperature (300K) is about 0.2K.

Key words: Micro cantilever; uncooled; infrared Imaging; optical readout