

基于 MEMS 技术的红外成像焦平面阵列 *

李超波¹ 焦斌斌¹ 石莎莉¹ 叶甜春¹ 陈大鹏^{1,†}
张青川² 郭哲颖² 董凤良² 伍小平²

(1 中国科学院微电子研究所 微细加工与纳米技术研究室, 北京 100029)

(2 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, 合肥 230037)

摘要: 选用 Au 和 LPCVD 的低应力 SiN_x 薄膜材料, 采用 MEMS 技术研制了新型间隔镀金热隔离结构的薄膜镂空式非制冷红外成像焦平面阵列, 并应用光学读出的方法成功地在室温 (27.47 °C) 背景下获得了人体的热像. 实验证明间隔镀金热隔离结构的引入有效抑制了热传导对变形梁温升的限制, 从而大大降低了系统的噪声等效温度差 (NETD), NETD 达到约 200mK.

关键词: 微机械; 焦平面阵列; 光力学; 低压化学气相淀积; 氮化硅; 噪声等效温度差

PACC: 4283 EEACC: 2575B; 2575F

中图分类号: TN405 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2006)01-0150-06

1 引言

基于微机械 (MEMS) 技术的应用光力学效应的非制冷红外成像技术是最近发展起来的新型非制冷红外探测技术^[1~4]. 相对于传统的制冷型和热电型非制冷红外成像系统, 它省去了昂贵的制冷器和复杂的读出电路, 使得低成本的广泛应用成为可能. 另外理论上预测的该原理的热检测灵敏度极限可以达到 μK 量级^[5], 这使得其在高性能红外探测领域也有广泛的应用前景.

基于光力学效应的非制冷红外成像系统的基本框架包括红外透镜、焦平面阵列 (FPA) 和光学检测系统三部分, 光学检测部分由读出可见光、透镜组和光学滤波单元三部分组成. 整个系统的核心部分为 FPA, 它由一系列成像单元组成面阵列, 成像单元由微镜面和变形机构组成, 通常采用双材料微悬臂梁的结构. 当红外辐射照射到像素单元时, 被其中的红外吸收材料吸收并转化为变形机构和镜面的温升, 其中的双材料梁部分由于两种材料的热膨胀系数的差异从而产生形变, 使整个像素单元产生一定的转角变化或离面位移, 每个像素的温升也不同, 产生的转角变化或离面位移也不同, 再利用光学检测系统读出这些转角变化或离面位移, 并把这些信号转化

为相应辐射源的热图像.

对于其中核心部件 FPA 的研究, 前人的工作大都采用牺牲层结构^[1~4], 基本思路是在硅 (Si) 衬底上做出距离衬底 $2 \sim 3\mu\text{m}$ 的悬空面阵列结构, 并做固支梁把悬空结构的每一个像素单独固定在硅衬底上. 这种结构的优点是可以将单元相互嵌套, 占空比很高. 缺点是由于悬空结构下面有硅衬底存在, 在吸收红外辐射时, 硅衬底的反射和吸收会使大约 40% 的能量无法到达成像单元, 这就使辐射的吸收率严重下降; 另外由于采用此结构必须使用难度很大的牺牲层释放工艺, 在加工过程中很容易造成器件与衬底的粘连, 使悬空结构失效, 导致器件的盲元率很高^[6]. 在已报道的文献^[1~4] 中, 噪声等效温度差 (NETD) 达到大约 1K.

有鉴于此, 本课题组在 2004 年对 FPA 的结构和制作工艺进行了研究, 提出并制作了一种新型无 Si 衬底的薄膜镂空式结构 FPA, 并得到了对 200 高温物体的温度分辨率约为 7K 的红外热像^[7]. 这种结构的基本思路是面阵列结构区采用无 Si 衬底的自支撑悬空结构, 其主要优点如下: (1) 无衬底对红外辐射的反射, 辐射能量利用率高; (2) 不需要采用牺牲层释放工艺, 加工方法简便, 盲元率低. 但此 FPA 由于没有热隔离结构, 使得变形梁的长度没有达到理想要求, 温度分辨率较低. 在此基础上, 为了

* 国家自然科学基金 (批准号: 60236010) 和国家高技术研究发展计划 (批准号: 2005AA404210) 资助项目

† 通信作者. Email: chendp@sohu.com

2005-07-22 收到, 2005-09-01 定稿

提高热变形的效果和温度分辨率,本文设计并制作了间隔镀金热隔离结构的薄膜镂空式 FPA,并利用前述光学读出方法进行了成像试验,在室温的背景下成功得到了人体的热图像,NETD 约为 200mK.

2 焦平面阵列材料的选择

采用双材料微悬臂梁结构的像素单元通常包括三部分:用于红外吸收和反射可见光的微镜面、双材料变形梁和单材料热隔离梁.所选择的两种材料应根据具体的结构和工艺满足不同的要求,间隔镀金薄膜镂空式结构的基本要求如下:(1)其中一种应是红外辐射的良好吸收材料;(2)其中一种材料的薄膜应具有良好的反光特性用于反射读出可见光;(3)两种材料的热膨胀系数要有很大的差异,相同温升下应使双材料变形梁的形变尽可能大;(4)其中一种材料应具有比较低的热传导系数,可以作为单材料的热隔离梁;(5)双材料应具有低的残余应力;(6)材料的选择还要满足工艺加工中耐 KOH 溶液湿法腐蚀的要求.

表 1^[2] 列出了几种通常使用的双材料搭配, SiN_x 和 SiO₂ 一般用作红外的吸收材料,而 Au 和 Al 用来做可见光的反光板.由于 SiO₂ 和 Al 具有不耐湿法腐蚀的特点,我们选择了 LPCVD 的低应力 SiN_x 和 Au 作为双材料微悬臂梁的两种材料.从表中可以看出两种材料的热膨胀系数有很大的差异,两者构成的双材料梁可以作为变形梁,同时 SiN_x 薄膜的热传导系数很小,可以作为单材料的热隔离梁.

表 1 双材料结构常用材料的力学和热学特性

Table 1 Mechanical and thermal properties of several materials used usually

材料	SiN _x	Au	SiO ₂	Al
杨氏模量/ GPa	180	73	46~92	80
热传导系数 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	5.5±0.5	296	1.1	237
热膨胀系数/10 ⁻⁶ K ⁻¹	0.8	14.2	0.05~12.3	23.6
热容量/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	691	129	~	908
密度/(1000kg·m ⁻³)	2.40	19.3	2.2	2.70

图 1^[2] 是 SiN_x 薄膜材料对红外辐射的折射率图,材料折射率的虚部代表该材料对一定波长辐射的吸收特性,可以看到 SiN_x 材料对 8~14μm 的红外辐射(即室温物体对应的红外辐射波段)具有高的吸收率.

3 低应力 SiN_x 薄膜的制备

SiN_x 薄膜是一种在 MEMS 领域中广泛应用的

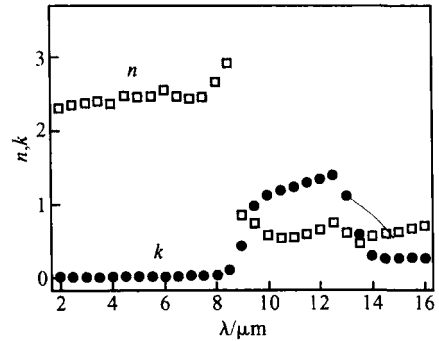


图 1 LPCVD SiN_x 薄膜折射率的实部(n)和虚部(k)

Fig. 1 Real (n) and imaginary (k) parts of refractive index of LPCVD SiN_x

材料,然而它在常规的制备过程中会产生很大的张应力,且张应力会随着厚度的增加而增加.而我们所要实现的镂空自支撑结构要求薄膜具有一定的厚度(0.5~2μm)、面积(20mm×20mm)以及良好的力学和机械性能,所以采用低压化学气相淀积(LPCVD)来制备低应力的自支撑 SiN_x 薄膜.

实验采用双面抛光的 p 型 100 Si 片.首先用常规的半导体清洗工艺对 Si 片进行处理,然后在石英管式炉内进行双面 SiN_x 淀积,反应气体为 SiH₂Cl₂ 和 NH₃,气体流量、炉管内压力和沉积温度皆可控制,适当调节这些参数可得到不同结构的 SiN_x 薄膜.淀积完成后,在 Si 片背面光刻刻蚀出一定面积的 Si 窗口,并腐蚀掉 Si 窗口中露出的 Si 衬底,留下淀积于正面的自支撑 SiN_x 薄膜.

实验发现腐蚀后留下的正面自支撑薄膜应具有一定的张应力,合适的应力范围应在 10⁷~10⁸ Pa 之间(如图 2 中的二维应力分布图所示).张应力过大, SiN_x 薄膜被腐蚀的时候会破裂;而具有压应力的膜在腐蚀成膜后呈褶皱状.在对成膜质量完好的薄膜进行透射电镜(TEM)分析时,均能观察到类似图 2 中 TEM 照片的镶嵌硅结构,而腐蚀破裂或腐蚀后呈褶皱状的薄膜 TEM 照片都未能观察到类似图 2 的结构.此 SiN_x 薄膜已在本组前面的工作^[8]中证明是含有大量分布均匀、尺度适中(10nm)并部分晶化的纳米相 Si 颗粒的镶嵌型低应力复合膜.

4 全镂空结构的 FPA

我们设计的全镂空结构 FPA 为 100×100 像素的面阵列,整个阵列由支撑框架和像素单元组成.其中单个像素面积为 200μm×200μm,整个自支撑区域达到 20mm×20mm.每个像素都由红外吸收板和两组变形机构组成,两组变形机构对称分布于红外吸收板的两侧并固定在支撑框架上.红外吸收板部

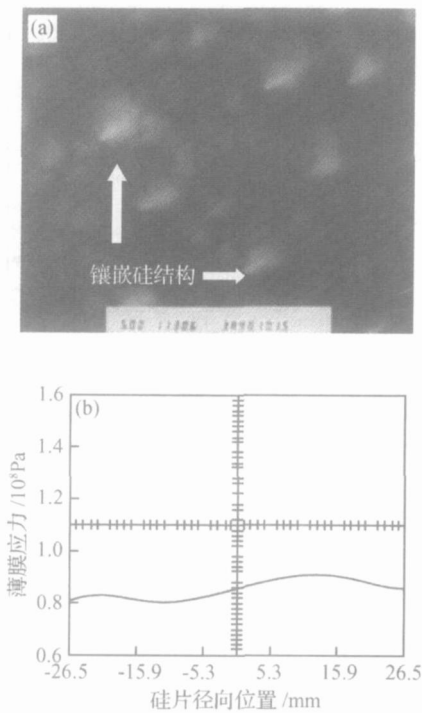


图 2 成膜质量完好的 SiN_x 薄膜的 TEM 照片(a)及二维应力分布图(b)

Fig. 2 TEM micrograph (a) and planar stress distribution graph (b) of substrate-free SiN_x film

分采用 SiN_x/Au 双材料层结构, SiN_x 主要用来吸收红外辐射, 而镀 Au 的一面用来反射读出可见光; 变形机构由两次回折、交替分布的变形梁和热隔离梁组成, 变形梁为 SiN_x/Au 双材料层结构, 热隔离梁为 SiN_x 的单材料结构. 用这种交替回折的结构取代全部镀 Au 的结构有效地增加了热变形梁的长度, 起到多级放大的效果^[6]. 主要制作工艺步骤如图 3 所示, 图 4 是本课题组制作完成的 FPA 的局部 SEM 照片, 右上角为一个像素的清晰图.

5 成像实验结果及讨论

5.1 光路检测系统设计

目前我们采用的是非相干光测量方法, 系统工作原理如图 5 所示. 将平行光束照在 FPA 上, 反射出来的光被透镜做光学傅里叶变换, 在谱平面上对微镜反射面的零级谱进行滤波检测, 像元的转角信号通过光学傅里叶变换和滤波转变为光强变化, 再由 CCD 接收, 使 FPA 上的热变形图像转变为 CCD 灰度变化的数字光学图像.

5.2 成像实验结果

将所研制的新型 FPA 置于上述光学读出系统

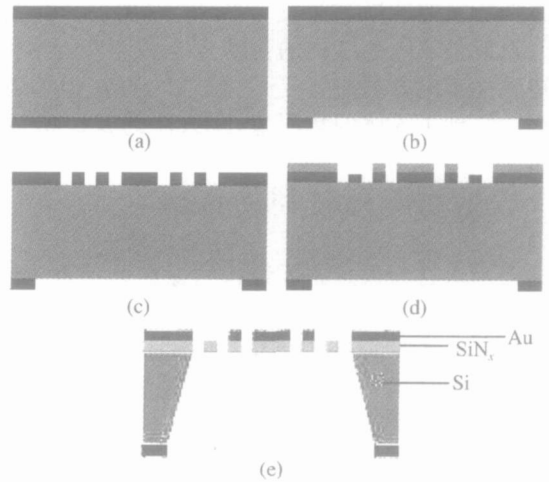


图 3 主要的制作工艺步骤

Fig. 3 Main steps of fabrication process of FPA

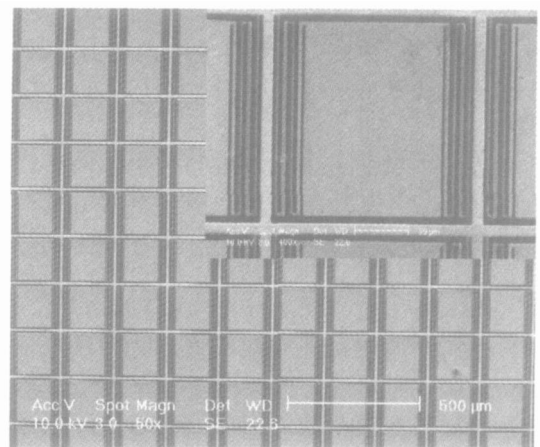


图 4 FPA 的局部扫描电镜照片 右上角为一个像素的清晰照片.

Fig. 4 SEM micrograph of a part of the FPA Top-right inserted photo shows structure of one pixel clearly.

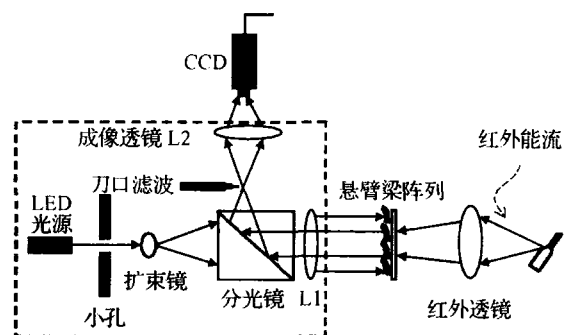


图 5 光学读出系统的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of optical readout system

中进行成像试验, 使用 $f/0.7$ 的红外透镜, 另外为减小空气对流和扰动对 FPA 的影响, 将 FPA 置于

真空腔 (~ 1Pa) 内.

图 6 所示为对人手和人体的红外成像结果. 实验中人手位于红外透镜外 1m 的距离, 而对人体的成像为离透镜 5m 的位置. 从人手的红外热像可以

看出, 手掌和五个手指的整体形状可以看得比较清楚, 但在相邻手指的连接处只能看到大致轮廓, 说明相距较近的像素之间的热串扰造成了灰度级的趋同. 人体的热像可以比较清楚地看到身体的轮廓.

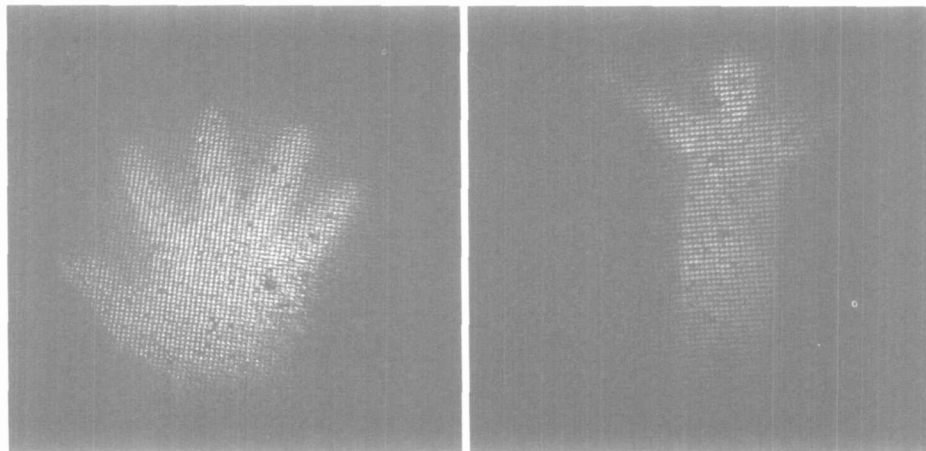


图 6 人手和人体的红外热像

Fig. 6 IR images of a person and his hand

5.3 系统探测灵敏度与噪声涨落统计分析

NETD 是衡量一个红外成像系统的重要指标. 它是指目标物体上温差为 T_s 的区域所对应成像系统的输出信号差 (灰度值 N) 正好等于系统的噪声信号 (灰度值 N_{noise}) 时的温差, 即:

$$NETD = T_s \times \frac{N_{noise}}{N} = \frac{N_{noise}}{N/T_s} \quad (1)$$

N/T_s 定义为系统的热响应灵敏度, 即目标物体单位温升所对应的灰度响应. 系统的噪声信号 N_{noise} 和热响应灵敏度的测量过程如下:

(1) 测量系统噪声灰度值 N_{noise} : 连续采集 32 幅无热图像的背景图序列, 求出噪声涨落的灰度分布直方图, 如图 7 所示. 由于噪声主要分布在最大概率

的灰度值附近, 可以将其作为系统的噪声值 N_{noise} . 计算得到噪声浮动值为 5 个灰度级;

(2) 测量系统的温度响应率: 确定红外物体 (人的手掌) 与背景的温差所对应的灰度响应, 得到系统的热响应灵敏度. 背景温度由三种不同温度计测量值 (见表 2) 的平均值给出, 为 27.47; 用商品化的红外热像仪测得图 5 中手手的平均温度约为 35; 人手与背景的平均温差 T_s 约为 7.53. 再在图 5 中所成的人手热像中的不同区域取 6 个 3×3 像素阵列的区域, 在其中选择 6 个高灰度值像素, 分别测量它们的灰度响应统计值 N (见表 3), 灰度响应统计平均值为 194.

表 2 测量时的背景温度统计平均

Table 2 Temperature of background measured by three thermometers

温度计类型	数字温度计	酒精温度计	水银温度计
背景温度/	27.9	27.5	27

表 3 FPA 单个像素灰度响应测试结果

Table 3 Gray level of the pixels for testing

像素单元	1	2	3	4	5	6
灰度响应值	213	211	167	152	183	238

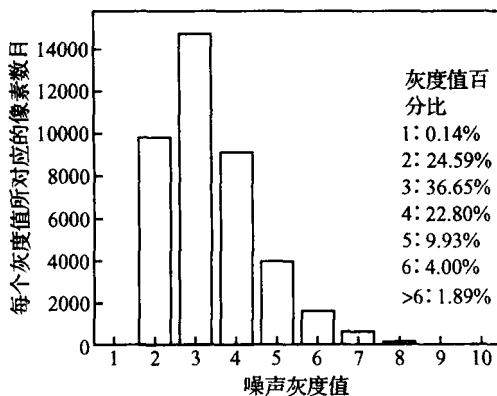


图 7 系统的噪声分布

Fig. 7 Noise distribution of system

根据公式 (1), N 和 T_s 分别取平均值时, NETD 为 0.194 K; N 取最小值 152 时, NETD 为 0.247 K; N 取最大值 238 时, NETD 为 0.158 K.

从以上分析可以看出, 系统的平均 NETD 大约为 200mK, 单个像素最好的 NETD 可以达到

158mK,最差的为 247mK,这个差异主要是由于阵列器件中像素单元加工的不一致性造成的. 如果对加工工艺做进一步的优化,包括所用薄膜材料应力的均匀性控制、光刻刻蚀工艺的优化等,相信可以得到更理想的器件性能.

5.4 器件性能局限与改进

从图 6 中可以看到,除了温度有明显差异的部位(如眼镜和脸),人体其他各部分的温度分布并不明显,且人体的细节并不十分清晰. 这主要是由于器件的探测灵敏度和分辨率不够高的原因. 为提高器件的探测性能,需要综合考虑 FPA 的材料选择、器件结构和工艺实现等几方面的问题.

我们选择低应力 SiN_x 和 Au 作为双材料微悬臂梁的两种材料,满足了双材料梁的热膨胀系数相差大且杨氏模量小的要求,但并不是最优值. 同样从表 1 中可以看到, SiO_2 的杨氏模量比 SiN_x 小,而 SiO_2/Al , SiO_2/Au , SiN_x/Al 三种双材料组合的热膨胀系数差比 SiN_x/Au 大. 按照材料力学的原理^[6],采用相同的器件结构时,此三种双材料组合的变形效果比 SiN_x/Au 更好,但由于 SiO_2 和 Al 在目前必需的湿法腐蚀工艺中会被腐蚀掉,所以无法采用. 在以后研发新工艺的基础上,此三种双材料组合的使用应当可以得到更高的探测灵敏度.

从器件结构上看,提高分辨率必须缩小像素面积,同时又必须保持高的探测灵敏度. 根据材料力学的理论,变形平衡后的变形满足以下公式^[6]:

$$P = 6(\alpha_2 - \alpha_1) T(n + 1/P) L^2 / h_1 \quad (2)$$

其中 P 为梁的自由端位移; α 为材料热膨胀系数; L 为悬臂梁长度; h 为悬臂梁厚度; T 为温度变化量; n 为两种材料的厚度比.

$$P = \frac{(n^2 \phi - 1)^2 + 4n(n^2 + 2n + 1)\phi}{n\phi} \quad (3)$$

其中 $\phi = E_2 / E_1$, E 为弹性模量.

对(2)和(3)式分析可知,对于限定厚度,在同样的温升下,两层材料厚度比值为材料杨氏模量的反比平方根值时变形达到最大,且变形量和梁的总厚度成反比.

在减少梁的总厚度的同时,减少悬臂梁的长度可以缩小像素的面积,这样就可以提高分辨率并保持高的探测灵敏度. 由于加工工艺的局限,目前所采

用的结构是由 $2\mu\text{m}$ 厚的 SiN_x 和 $0.2\mu\text{m}$ 厚的 Au 组成,远没有达到理论设计的最优值. 在对薄膜沉积、腐蚀损伤等工艺进行改进的基础上,就可以实现小像素的阵列器件以提高成像的分辨率.

6 结论

成功研制了基于 MEMS 技术的新型热隔离结构的薄膜镂空式非制冷红外成像焦平面阵列,将其应用到光学读出系统中并成功得到了人体的热像. 系统的 NETD 平均值约为 200mK. 如果对材料选择、器件结构和加工工艺做进一步的优化,可以得到更理想的实验结果.

参考文献

- [1] Mao M, Perazzo T, Kwon O, et al. Direct-view uncooled micro-optomechanical infrared camera. Twelfth IEEE International Conference on MEMS, 1999: 100
- [2] Zhao Y. Optomechanical uncooled infrared imaging system. Dissertation of UC, Berkeley, 2002
- [3] Ishizuya T, Suzuki J, Akagawa K, et al. 160 × 120 pixels optically readable biomaterial infrared detector. Proc IEEE MEMS, 2002: 578
- [4] Duan Zhihui, Zhang Qingchuan, Wu Xiaoping, et al. Uncooled optical readable biomaterial micro-cantilever infrared imaging device. Chinese Physics Letters, 2003, 20(12): 2130
- [5] Lai J, Perazzo T, Shi Z, et al. Optimization and performance of high-resolution micro-optomechanical thermal sensors. Sensors and Actuators A, 1997, 58: 113
- [6] Pan Liang. Focus plane array and readout system based on MEMS and visible light. Dissertation of USTC, 2004 (in Chinese) [潘亮. 基于 MEMS 和可见光读出的微梁阵列传感器和探测系统. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2004]
- [7] Pan Liang, Zhang Qingchuan, Wu Xiaoping, et al. MEMS based optomechanical infrared imaging. Experimental Mechanics, 2004, 19(4): 403 (in Chinese) [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]
- [8] Chen Dapeng, Ye Tianchun, Xie Changqing, et al. Stress in SiN_x film embedded with silicon nanocrystals preparing by LPCVD. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(12): 1529 (in Chinese) [陈大鹏, 叶甜春, 谢常青, 等. LPCVD 制备纳米硅镶嵌结构氮化硅膜及其内应力. 半导体学报, 2001, 22(12): 1529]

A MEMS Based Focus Plane Array for Infrared Imaging^{*}

Li Chaobo¹, Jiao Binbin¹, Shi Shali¹, Ye Tianchun¹, Chen Dapeng^{1,†}, Zhang Qingchuan²,
Guo Zheyang², Dong Fengliang², and Wu Xiaoping²

(1 *Micro Processing and Nano Technology Department, Institute of Microelectronics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*)

(2 *Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science
and Technology of China, Hefei 230027, China*)

Abstract : Based on the opto-mechanical effect and MEMS technology, a novel substrate-free FPA with a thermally isolated structure for uncooled infrared imaging is developed. Alternately evaporating Au on a SiN_x cantilever is used for thermal isolation. A human's thermal image is obtained successfully using the infrared imaging system composed of the FPA and optical detection system. Experimental results show that the realization of thermal isolation in the substrate-free FPA increases the temperature of the deflecting leg effectively, while the NETD is about 200mK.

Key words : MEMS; FPA; opto-mechanical; LPCVD; SiN_x; NETD

PACC : 4283 **EEACC :** 2575B; 2575F

Article ID : 0253-4177(2006)01-0150-06

^{*}Project supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 60236010) and the National High Technology Research and Development Program of China(No. 2005AA404210)

[†]Corresponding author. Email: chendp@sohu.com

Received 22 July 2005, revised manuscript received 1 September 2005

© 2006 Chinese Institute of Electronics