

文章编号: 0253-2239(2004)10-1375-6

基于法布里-珀罗微腔阵列的光读出红外热成像 器件设计与制作*

冯 飞 焦继伟 熊 斌 王跃林

(中国科学院上海微系统与信息技术研究所传感技术国家重点实验室, 上海 200050)

摘要: 提出了一种新颖的基于硅基法布里-珀罗微腔阵列的光读出红外热成像器件, 该器件利用光学读出技术将红外图像直接转化为可见光图像, 其焦平面阵列(FPA)是一个基于微机电系统(MEMS)制作的法布里-珀罗微腔阵列。阐明了器件的工作原理; 完成了可动微镜结构、热-机械、可见光读出部分设计。理论分析表明, 对 Al/SiO₂ 双材料体系而言, SiO₂ 厚度应大于 0.3 μm, 其最佳厚度比为 0.598, 相应的最大热-机械灵敏度可达 10⁻⁸ m/K。采用体硅微机电系统技术, 实验制作出了 50×50 焦平面阵列。

关键词: 光读出热成像; 法布里-珀罗微腔; 微机电系统; 热-机械灵敏度

中图分类号: TN216 文献标识码: A

Design and Fabrication of Optically Readable Infrared Thermal Imaging Device Based on Fabry-Perotw Micro-Cavity Array

Feng Fei Jiao Jiwei Xiong Bin Wang Yuelin

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Shanghai Institute of Microsystem
and Information Technology, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050)

(Received 29 April 2003; revised 17 October 2003)

Abstract: This paper presents the design and fabrication of a novel optically readable thermal imaging device based on Fabry-Perot micro-cavity array made on silicon substrate, which directly translates thermal imaging into visible imaging by using optically readable technology. The focal plane array (FPA) of this device is a Fabry-Perot micro-cavity array based on microelectromechanical system (MEMS) technology. The structure and thermo-mechanical designs of movable micromirror, and the design of the visible readable setup are completed. Theoretical analysis indicates: the thickness of SiO₂ should be thicker than 0.3 μm, optimal thickness ratio of Al/SiO₂ is 0.598 and corresponding thermo-mechanical sensitivity can reach 10⁻⁸ m/K for the bi-material beams made of Al and SiO₂. The FPA containing 50×50 Fabry-Perot micro-cavity array has been successfully fabricated by using bulk MEMS technology and demonstrated.

Key words: optically readable thermal imaging; Fabry-Perot micro-cavity; microelectromechanical system; thermo-mechanical sensitivity

1 引 言

非致冷红外成像焦平面阵列技术是当前红外成

像技术的研究热点之一。非致冷红外成像系统主要是利用红外的热效应来成像, 其最大的优点是在室温下工作, 无需量子型成像系统常用的笨重的制冷系统。传统的热成像系统包括测辐射热型^[1]、热电导型、热释电型^[2]和热电偶型^[3]等, 其共同特点是: 利用红外的热效应所引起的材料电学性能的变化, 先将红外信号转化为电信号, 再通过 CMOS 电

* 国家 973 计划集成微光机电系统研究(G1999033101)资助课题。

E-mail: fengfei507@mail.sim.ac.cn

收稿日期: 2003-04-29; 收到修改稿日期: 2003-10-17

路检测电信号从而得到图像信号;但信号读取电路复杂是其不可克服的缺点。

红外热效应除了能引起材料的电学参量的变化外,还会引起其它物理特性的变化,如温度的变化,基于此,一种新颖的热成像系统——光读出热成像系统成为新的研发热点:

Manalis 等^[4]率先尝试采用 Si/Al 双材料悬臂梁制作红外焦平面阵列,并将其用来探测工作波长为 $0.78\ \mu\text{m}$ 的红外激光;此后,加州伯克利分校的 Majumder 等^[5]报道了一种被称为 MIRROR 的机械红外焦平面阵列,并获得了人手的粗略的红外成像;几乎与此同时,中国科学院上海微系统与信息技术研究所张流强博士也提出了类似的设想^[6];2002 年 Nikon 公司的 Tohiro Ishiauya 等^[7]报道了他们研制的光读出双材料红外探测器以及初步的红外成像结果。上述光读出红外成像器件的共同特点是:两种热膨胀系数相差很大的材料所形成的复合膜构成成像系统的敏感部分,当系统接受红外辐射时,复合膜的曲率将发生变化,然后通过某种特定的方式(基于光的反射、干涉、衍射等规律)将曲率变化转化为输出可见光光强的变化。其图像获取过程不是传统的红外图像→电图像→可见光图像,而是红外信号→曲率→可见光信号,其像转换过程中不涉及电信号,其像增强过程中是光子倍增而不是电子的倍增,是一种全光系统,其最大的优势在于无需复杂的信号读取电路,同时可在室温条件下工作。

本文独立提出了一种新颖的光读出热成像器件——基于法布里-珀罗微腔阵列的红外热成像器件,与文献[4~7]中光读出热成像器件的显著区别在于该器件的法布里-珀罗微腔阵列是一个采用机电系统技术制作的法布里-珀罗微腔阵列,具有更高的探测灵敏度。法布里-珀罗微腔的一个反射面是一个由双材料弯折梁支撑的可动微镜,在红外辐射的作用下,可动微镜发生位移,改变微腔两反射面之间的距离,对输出可见光光强进行调制,从而将红外辐射转化为了可见光图像。

2 器件工作原理

法布里-珀罗腔是一种由两个具有不同(或相同)反射率的平行镜面构成的干涉仪,它是一种多光束干涉仪,具有陡峭的透射或反射峰,因而其灵敏度极高。法布里-珀罗腔的诸反射光线的总光强分布^[4]为

$$I_R = I_0 \frac{r_i + R_l - 2\sqrt{R_l r_i} \cos \delta}{1 + R_l r_i - 2\sqrt{R_l r_i} \cos \delta}, \quad (1)$$

(1) 式中 δ 表示相邻两光线之间相位差, I_0 表示入射光强, r_i 、 R_l 表示法布里-珀罗腔上下两个反射面的光强反射率。当 $R_l = 0.8$, $r_i = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 时,相对反射光强 $I_{RR} = I_R/I_0$ 随相位差 δ 的变化情况如图 1 所示。

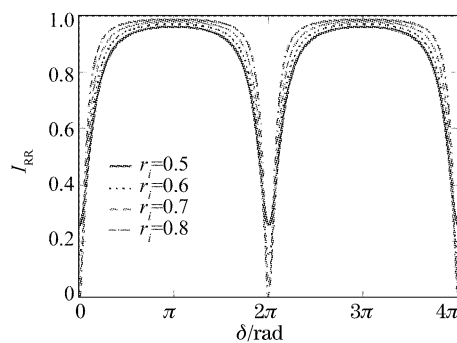


Fig. 1 Relative reflective density vs. phase difference of the Fabry-Perot interferometer

从图 1 中可以看出,当光程差在 $0 \sim \lambda/2$ 内变化时,即两镜面之间的相对位移在 $0 \sim \lambda/4$ 内变化时,反射光强是相位差(两镜面相对位移)的单调函数。利用机电系统技术制作出一个法布里-珀罗微腔阵列,每一个法布里-珀罗微腔就是一个像素。当接收红外辐射时,法布里-珀罗微腔两镜面相对位移在 $0 \sim \lambda/4$ 内发生变化,对输出可见光的强度进行调制,从而将红外光图像转化为可见光图像。

3 器件设计

3.1 器件结构设计

器件结构如图 2 所示,整个器件主要有三部分构成:红外辐射输入;法布里-珀罗微腔阵列(FPA);可见光读出部分。当有红外辐射输入时,法布里-珀罗微腔阵列将红外信号转化为位移信号,同时由可

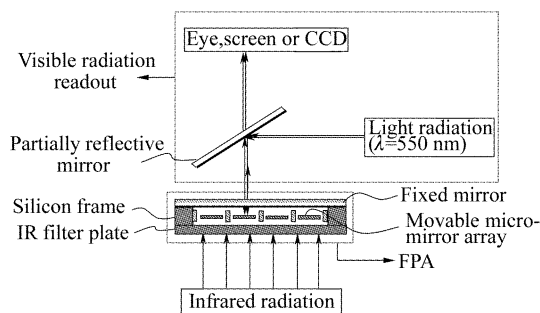


Fig. 2 Schematic diagram of the optically readable thermal imaging device

见光读出部分直接将位移信号转化为可见光图像,该图像可直接用眼睛观察或者由光屏、CCD 相机接收。法布里-珀罗微腔阵列是器件的关键部件,由四部分构成:固定镜面、硅框架、可动微镜阵列和滤波片,固定镜面和可动微镜阵列构成了法布里-珀罗微腔阵列。

3.2 可动微镜结构及热-机械设计

该器件的法布里-珀罗微腔阵列是一个 $m \times n$ 的法布里-珀罗微腔阵列,可动微镜的反射面和固定镜面(半透镜)的反射面构成法布里-珀罗微腔的两个反射面,每一个法布里-珀罗微腔就是一个像素,单元像素结构如图 3 所示。可动微镜镜面由四根固定在基片上的双层材料弯折梁支撑着,镜面有两方面的作用:一是反射光线,二是吸收红外辐射。红外辐射通过滤波片被镜面吸收,导致镜面区域与弯折梁的固定端的存在一个温度梯度,双层材料弯折梁将发生弯曲,带动镜面上下运动,改变了可动微镜与固定镜面之间的距离,当可动微镜的位移在 $0 \sim \lambda/4$ 内变化时,反射光强随之单调变化,用眼睛、光屏或者 CCD 相机就可以接受到可见光图像,通过上述过程,就实现了从红外图像向增强的可见光图像的转变,其图像的获取过程可简单地表示为:红外信号→位移→可见光信号,而不是传统的红外图像→电图像→可见光图像。

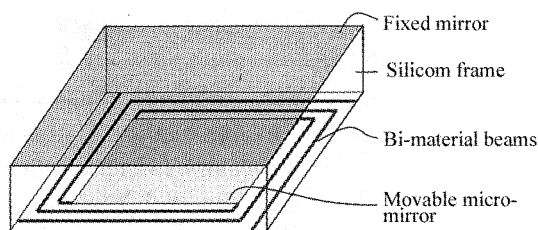


Fig. 3 Schematic diagram of a single pixel

在红外辐射作用下可动微镜能发生多少位移——即可动微镜热-机械灵敏度,是器件的关键性能。采用一个近似的理论——双层材料悬臂梁理论来计算可动微镜的热-机械灵敏度,当点热源作用在悬臂梁的末端时,热-机械灵敏度 S 可表示为^[8,9]

$$S = (\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{n+1}{K} \right) \left(\frac{L^2}{t_2} \right), \quad (2)$$

式中角标 1 表示金属薄膜的各个参量,角标 2 表示非金属薄膜的各个参量, α 表示材料的热膨胀系数, t 表示薄膜厚度, L 表示悬臂梁长度,厚度比 $n = t_1/t_2$, $K = 4 + 6n + 4n^2 + \phi n^3 + 1/\phi n$,其中 ϕ 为两种材料的杨氏模量之比: $\phi = E_1/E_2$ 。从(2)式可以看出,悬臂梁的热-机械灵敏度由两个方面决定:材料

热膨胀系数和器件几何尺寸。两种材料的热膨胀系数相差越悬殊,梁越长,非金属厚度 t_2 越小时,悬臂梁的热-机械灵敏度越大。当材料选定, L 确定后,双层材料的厚度比将影响悬臂梁的热-机械灵敏度。

以 Al/SiO₂ 为例,取 $L = 102 \mu\text{m}$, $t_2 = 0.5 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$,当厚度比为 0.598 时,Al/SiO₂ 双层材料悬臂梁热-机械灵敏度达到最大;当 SiO₂ 厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 时,最大热-机械灵敏度为 $6.611 \times 10^{-8} \text{ m/K}$;而当厚度为 $1.0 \mu\text{m}$ 时,最大热-机械灵敏度为 $3.305 \times 10^{-8} \text{ m/K}$ 。理论计算中所涉及的材料的相关参量见文献[10]。

上述理论计算表明,SiO₂ 厚度越小热-机械灵敏度越大。但由于非金属层(如 SiO₂)还是红外吸收层,其厚度除了影响可动微镜的热-机械灵敏度外,还将直接影响其对红外的吸收。在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 范围内,二氧化硅折射率的实部(n)与虚部(k)^[11]如图 4 所示,相应的光学透射深度 $l = \lambda_{\text{IR}}/(4\pi k)$ 如图 5 所示。由图 5 可知: $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 红外光对二氧化硅的透射深度在 $0.25 \sim 1.72 \mu\text{m}$ 范围内变化, $10 \mu\text{m}$ 的红外光所对应的光学透射深度为 $0.30 \mu\text{m}$ 。如果二氧化硅的厚度小于 $0.25 \mu\text{m}$ 时,二氧化硅薄膜对红外的吸收将会很低。

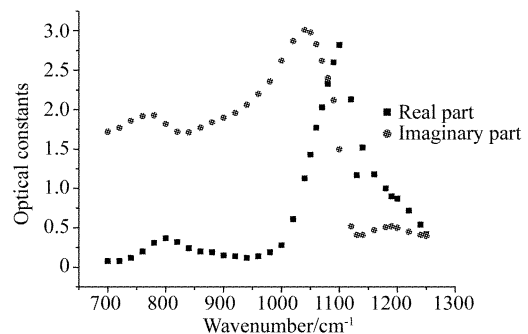


Fig. 4 Real (n) and imaginary (k) parts of the refractive index of SiO₂ vs. wavenumber

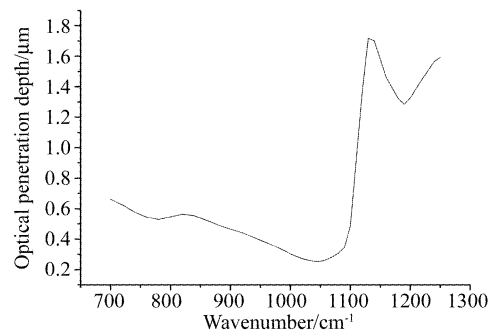


Fig. 5 Optical penetration depth vs. wavenumber

综上所述,为了获得最大的热-机械灵敏度,制作可动微镜的双层材料应该满足:其中一层应该对

可见光具有较高的反射率,另外一层在 $8\sim 14\ \mu\text{m}$ 的波长范围内应该有强的吸收峰;两层材料的热膨胀系数相差越大越好。另外可动微镜结构应该满足:双层材料的厚度选择必须满足最佳厚度比;梁应该尽量长,非金属层厚度应该尽量小,但同时应该考虑到红外光的透射深度。以 Al/SiO_2 为例,Al 对可见光具有很高的反射率, SiO_2 在 $10\ \mu\text{m}$ 附近有强的吸收峰,同时 Al/SiO_2 的热膨胀系数也相差很大;为了获得最大的热-机械灵敏度,应选择 Al/SiO_2 的厚度比为 0.598;选择绕微镜的弯折梁主要是为了增加梁的长度;考虑到 SiO_2 在 $10\ \mu\text{m}$ 附近有强烈的吸收,所以氧化硅的厚度至少应该大于 $0.30\ \mu\text{m}$ 。结合实验室工艺条件,选择 $L=102\ \mu\text{m}$, $t_1=0.3\ \mu\text{m}$, $t_2=0.5\ \mu\text{m}$, 梁宽 $W=2\ \mu\text{m}$ 。

3.3 可见光读出部分设计^[6]

为了能观察到显著的干涉图像,应该将入射光高效率地耦合到干涉系统去。

按照一般的半透半反镜的耦合方式(如图 2 所示),只能利用总入射光能量的 $1/4$,能量利用率太低。如果采用平行光束倾斜入射,则可提高入射光能的利用率,但又会遭遇下述问题:若光束的倾斜角太大,则对微腔阵列来说,参与干涉的光束数量将减少,反射峰将扩展,灵敏度将下降;而如果光束的倾斜角太小,则干涉光束和入射光束的分离必须在一个较大的距离上才能够实现,这就使得光学系统的小型化难于实现。新的可见光读出部分设计,如图 6 所示。

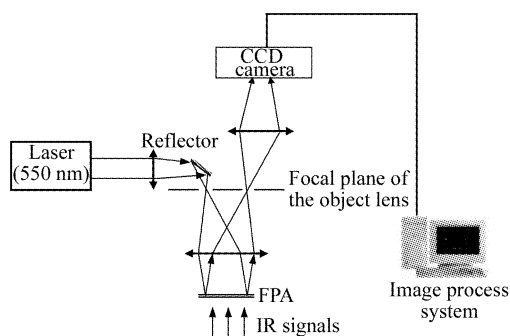


Fig. 6 Design of visible light readout

从激光器发出的单色光经聚焦系统和一个倾角可调小反射镜的反射后,会聚于焦平面上的小孔光阑并通过小孔投射到物镜上,物镜将会聚光转变为平行光束,以一定的倾角投射到法布里-珀罗微腔阵列上,反射回来的光线经物镜聚焦后通过物镜焦平面上的另一个小孔到达目镜,并最终经过目镜得到干涉图像。这样,入射光和出射光通过物镜的小孔光阑在一

个很小的距离上得到完全分离,而且通过改变反射镜的倾角,就可以改变投射到法布里-珀罗标准具的光束的入射角,从而实现最佳的光学耦合。

考虑到工艺的一致性问题的影响,在没有红外辐射时,每一个微腔两个反射面之间的距离可能会不一样,即可动微镜可能会存在一个初始位移。可动微镜的初始位移将直接影响最后的成像结果,为了消除这一影响,可以采用下述办法:将 CCD 相机和带有图像采集卡的计算机相连,在红外辐射作用前后分别采集两幅图像,将这两幅图像相减就可以得到所需的图像。具体地,设在没有红外辐射时法布里-珀罗微腔阵列上某一点微腔两个反射面之间的距离为 d_i ,由(1)式可得该点所对应的输出可见光的强度为

$$I_R = I_0 \frac{r_i + R_i - 2\sqrt{R_i r_i} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} d_i\right)}{1 + R_i r_i - 2\sqrt{R_i r_i} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} d_i\right)}, \quad (3)$$

当法布里-珀罗微腔阵列接受红外辐射时,该点法布里-珀罗微腔两个反射面之间的距离为 $d_i + \Delta_i$,此时所对应的输出可见光的强度为

$$I'_R = I_0 \frac{r_i + R_i - 2\sqrt{R_i r_i} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (d_i + \Delta_i)\right]}{1 + R_i r_i - 2\sqrt{R_i r_i} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (d_i + \Delta_i)\right]}, \quad (4)$$

通过计算机图像处理,将在红外辐射作用前后所采集的两幅图实时相减,即得我们所需的图像:

$$I = I_0 \left\{ \frac{r_i + R_i - 2\sqrt{R_i r_i} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (d_i + \Delta_i)\right]}{1 + R_i r_i - 2\sqrt{R_i r_i} \cos\left[\frac{4\pi}{\lambda} (d_i + \Delta_i)\right]} - \frac{r_i + R_i - 2\sqrt{R_i r_i} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} d_i\right)}{1 + R_i r_i - 2\sqrt{R_i r_i} \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} d_i\right)} \right\}. \quad (5)$$

综上所述,采用如图 6 所示的可见光读出部分设计,既可以将入射可见光高效率的耦合到干涉系统中去,还可以改善由于工艺一致性及环境温度变化对成像结果的影响。

4 法布里-珀罗微腔阵列芯片制作

在本论文中,采用 Al/SiO_2 双层材料,基于体硅微机械技术,制作出了 50×50 的法布里-珀罗微腔阵列。其主要工艺过程如图 7 所示。

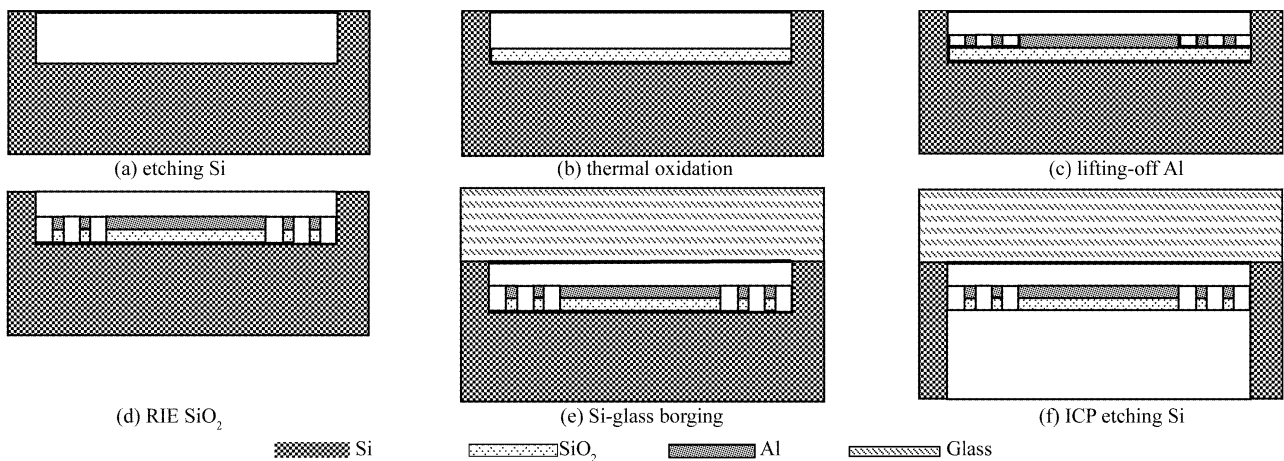


Fig. 7 Microfabrication process flow of a FPA chip

首先腐蚀出法布里-珀罗腔的腔体,可动微镜图案将制作在腔体的底部;接着热氧化并图形化;采用剥离的方法(lift-off)在氧化硅上面形成铝层的微镜图案;以铝层作为反应离子刻蚀氧化硅的掩膜形成微镜图案;硅玻璃(玻璃上的反射层已经图形化,反射面朝下)键合形成完整的法布里-珀罗腔;背面感应耦合等离子体刻蚀硅释放可动微镜结构。图 8 是可动微镜阵列照片,图 9 是释放后的可动微镜的扫描电镜图。从图 9 中可知,可动微镜已经被安全地释放。

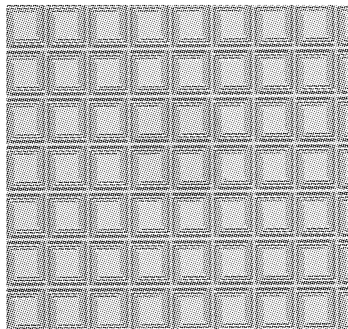


Fig. 8 Optical picture of the movable micromirror array

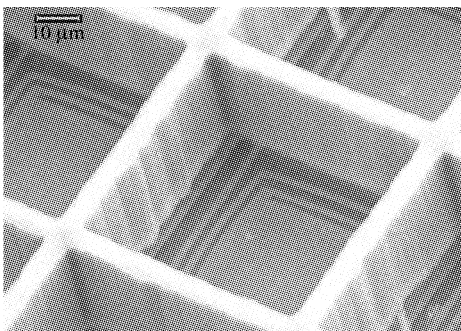


Fig. 9 Scanning electron microscope (SEM) picture of a movable micromirror

法布里-珀罗微腔阵列的均匀性和一致性直接

影响红外成像质量。可以用可动微镜的表面粗糙度、平整度以及可动微镜初始相位差的一致性来表征法布里-珀罗微腔阵列的均匀性和一致性。可动微镜初始相位差的一致性及其解决办法已在 3.3 中讨论过,这里不再赘述。

采用 WYKO 表面轮廓仪,观测了可动微镜释放前后表面粗糙度和平整度的变化。观测表明:释放前,可动微镜表面粗糙度小且表面平整;释放后,可动微镜表面粗糙度增大了约十倍,这主要是由于残余应力释放引起的。另外,由于 SiO_2 薄膜具有较高的压应力,释放后薄膜呈皱纹状。为了获得表面光滑且平整的可动微镜,一方面应降低工艺过程所带来的残余应力;另一方面应选择具有张应力的薄膜材料。

结论 本文阐明了光读出热成像器件的工作原理,提出了一种新颖的基于法布里-珀罗微腔阵列的光读出热成像器件,由于法布里-珀罗腔是一种多光束干涉仪,与其他光学读出方法相比具有更高的探测灵敏度;完成了可动微镜结构及其热-机械灵敏度、可见光读出部分设计,对 Al/SiO_2 双材料体系而言,其最佳厚度比为 0.598, SiO_2 厚度应大于 $0.3 \mu\text{m}$,新的可见光读出设计提高了入射光能的利用率,同时也改善了工艺的非一致性和环境温度变化对成像结果的影响;最后采用体硅微机电系统工艺,制作出了 50×50 的法布里-珀罗微腔阵列,同时指出必须严格控制薄膜沉积过程中所带来的残余应力以获得平整的可动微镜镜面。

参 考 文 献

- 1 Maluf N. *An Introduction to Microelectromechanical System Engineering*. London: Artech House Boston

- London, 1999. 134~135
- 2 Hanson C M. Hybrid Pyroelectric-ferroelectric bolometer arrays. *Semiconductors and Semimetals*, 1997, **47**: 123~174
- 3 Chang D T, Chen D M, Lin F H *et al.*. CMOS integrated infrared sensor. *Proceedings of the 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '97)*, Chicago, USA, 1997, **2**: 1259~1262
- 4 Manalis S R, Minne S C, Quate C F. Two-dimensional micromechanical bimorph arrays for detection of thermal radiation. *Appl. Phys. Lett.*, 1997, **70**(24): 3311~3313
- 5 Perazzo T, Mao M, Kwon O *et al.*. Infrared vision using uncooled micro-optomechanical camera. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(23): 3567~3569
- 6 Zhang Liuqiang. *Studies on Micromachined Light Modulating Thermal Image Device* (基于微机械的光调制热成像器件研究) [PH. Dissertation]. Shanghai: Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, 2000 (in Chinese)
- 7 Ishiauya T, Suzuki J, Akagawa K *et al.*. 160×120 pixels optically readable bimaterial infrared detector. *IEEE MEMS*, 2002: 578~581
- 8 Lai J, Perazzo T, Shi Z *et al.*. Optimization and performance of high-resolution micro-optomechanical thermal sensors. *Sensors and Actuators*, 1997, **A58**(2): 113~119
- 9 Barnes J R, Stephenson R J, Woodburn C N *et al.*. A femtojoule calorimeter using micromechanical sensors. *Rev. Sci. Instrum.*, 1994, **65**(12): 3793~3798
- 10 Zhang Liuqiang, Yang Genqing. Design and simulation: All-light-processing thermal image system. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(11): 1557~1563 (in Chinese)
- 11 Popova S I, Tolstych T S, Vorob'ev V T. Optical characteristics of amorphous SiO₂ in the region 1400~200 cm⁻¹. *Optika Spektrosc.*, 1972, **33**: 801~803