

# 基于 MEMS 技术的全光热成像芯片与系统的研制\*

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:** 提出了一种新颖的非致冷光读出热成像芯片的设计, 其核心部分是一个  $m \times n$  的可动微镜阵列, 可动微镜是由双材料弯折梁及其所支撑的微镜面组成。在红外辐射的作用下, 梁发生弯曲带动微镜面发生的位移变化对输出可见光的强度进行调制, 即利用光调制原理完成光信号转换和增强。采用体硅 MEMS 技术, 成功地制作出了  $50 \times 50$  的可动微镜阵列。测试表明: 工艺一致性和残余应力对释放前后可动微镜表面粗糙度与平整度、可动微镜间初始相位以及可动微镜灵敏度的大小产生了重要影响。

**关键词:** 微机电系统 (MEMS); 光读出热成像; 可动微镜阵列; 法布里-泊罗干涉仪

**PACC:** 4280Q; 0760L

**中图分类号:** TN216

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0253-4177(2004)04-0477-04

像系统成为新的研发热点<sup>[4~7]</sup>。

本文提出了一种基于 MEMS 技术的光读出热成像芯片的设计。以该芯片为核心部件的热成像系统可以实现红外信号→位移信号→可见光信号的图像读取过程, 其像增强过程是光子倍增而不是电子的倍增, 因此是一种全光系统、无需复杂的信号读取电路, 同时可在室温条件下工作。

## 2 光读出热成像工作原理与芯片结构设计

光读出热成像系统是基于光的干涉原理。法布里-泊罗 (Fabry-Perot) 干涉仪是一种常见的干涉仪, 它由两个具有不同(或相同)反射率的平行镜面构成, 如图 1 所示。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。假设上反射面玻璃介质一侧的反射率为  $r'$ , 透射率为  $t'$ , 空气介质一侧反射率为  $r$ , 透射率为  $t$ ; 下反射面的反射率为  $R$ , 则由光的干涉原理并利用斯托克斯对易关系

## 1 引言

红外成像技术是现代军事核心技术之一, 是战争中实现全天候作战的重要工具, 在民用方面也有着广泛的应用。红外成像系统可分为热成像系统和量子型成像系统。在 800~3000m 的范围内, 热成像系统是观测效果最好的非可见光成像系统, 其最大的优点是可以在室温下工作, 无需量子型成像系统常用的笨重的制冷系统。热成像系统对隔热性能要求极高, 一般而言, 悬空结构具有良好的绝热性能, 而 MEMS 技术在制作悬空结构上具有独特的优势。随着 MEMS 技术的发展, 热-电阻型<sup>[1]</sup>、热-电容型<sup>[2]</sup>、热电偶型<sup>[3]</sup>等热成像系统均已相继被报道, 其共同特点是用 MEMS 技术制作绝热性能良好的敏感元件, 利用红外热效应先将红外信号转化为电信号, 再通过 CMOS 电路检测电信号从而得到图像信号。但复杂的信号读取电路使得器件的成本居高不下, 这促使人们开发其他替代技术, 因此光读出热成

\* 国家重点基础研究发展基金资助项目(批准号: G1999033101)

冯 飞 男, 1973 年出生, 博士研究生, 主要研究方向是基于 MEMS 的红外热成像技术。

焦继伟 男, 1968 年出生, 研究员, 博士生导师, 主要从事 MEMS 技术和器件的研究。

熊 斌 男, 1962 年出生, 研究员, 博士生导师, 主要从事 MEMS 技术和器件的研究。

2003-04-05 收到, 2003-07-31 定稿

©2004 中国电子学会

$r^2 + tt' = 1$ ,  $r' = -r$  可推导出反射光线的总光强分布<sup>[4]</sup>为:

$$I_R = I_0 \frac{r^2 + R^2 - 2Rr\cos(\delta)}{1 + R^2r^2 - 2Rr\cos(\delta)} \quad (1)$$

式中  $\delta$  表示相邻两光线之间相位差;  $I_0$  表示入射光强.

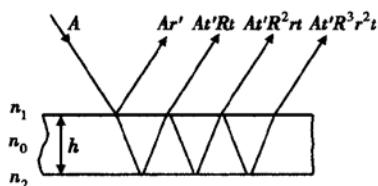


图 1 法布里-泊罗干涉仪示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the Fabry-Perot interferometer

当  $R = 0.9$ ,  $r = 0.6$  时, 相对反射光强  $RRI = I_R/I_0$  随相位差  $\delta$  的变化情况如图 2 所示.

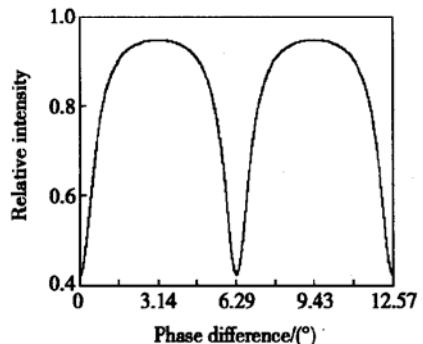


图 2 法布里-泊罗干涉仪相对反射光强随相位差的变化

Fig. 2 Relative reflective density vs phase difference of the Fabry-Perot interferometer

从图 2 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.

本文提出的基于法布里-泊罗干涉原理的热成像系统是由 CCD 相机(或光屏)、半透镜和利用 MEMS 技术制作的光读出热成像芯片组成, 其结构如图 3 所示. 该系统的关键部件——光读出热成像芯片由固定镜面(半透镜)、可动微镜阵列和滤光片构成, 如图 3 虚线框所示. 可动微镜的反射面和固定镜面(半透镜)的反射面构成 Fabry-Perot 腔的两个反射面, 其中  $m \times n$  的微镜阵列构成红外焦平面阵列(FPA), 是该芯片的核心部分, 每个微镜就是一个像素, 单个像素结构如图 4 所示. 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

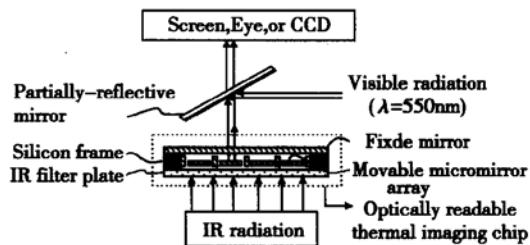


图 3 光读出热成像系统结构图

Fig. 3 Schematic diagram of the optically readable thermal imaging system

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存在一个温度梯度, 双层材料弯折梁将发生弯曲, 并带动镜面上下运动, 改变了可动微镜与固定镜面之间的距离. 当微镜的位移在  $0 \sim \lambda/4$  内变化时, 反射光强随之单调变化, 我们用眼睛、光屏或者 CCD 相机就可以接收到可见光图像, 通过上述过程, 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.

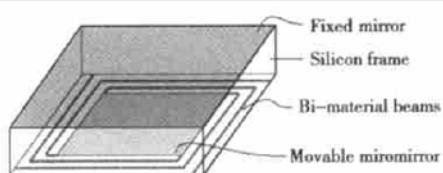


图 4 单元像素图

Fig. 4 Schematic diagram of a single pixel

### 3 芯片制作

在工艺过程中, 采用 Al/SiO<sub>2</sub> 双层材料, 主要是考虑到它们的热膨胀系数差别较大, 氧化硅在  $8 \sim 14 \mu\text{m}$  范围内有吸收峰, 而铝对可见光具有很高的反射率. 基于体硅 MEMS 技术, 我们制作出了  $50 \times 50$  的可动微镜阵列, 主要工艺步骤如图 5 所示.

(a) 在(100)单晶硅上, 采用 KOH 溶液在硅表面腐蚀出一个凹坑(严格地说, 凹坑呈 V 形, 斜面与底面成  $54.74^\circ$ , 为了简便起见, 这里我们将凹坑画成了矩形), 作为 Fabry-Perot 腔的腔体;

(b) 将腐蚀好凹坑的硅片二次氧化, 光刻, 然后用氢氟酸去除多余的氧化硅而保留凹坑底部的氧化硅. 氧化硅既是双材料梁的一部分, 又是  $8 \sim 14 \mu\text{m}$

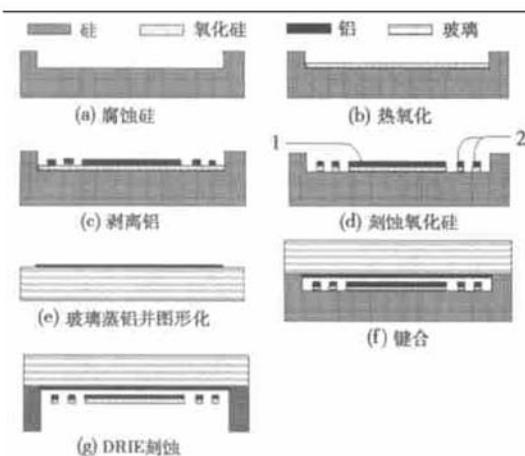


图 5 芯片工艺制作过程

Fig. 5 Microfabrication process flow of a chip

波长范围内的红外吸收材料;

(c) 采用剥离工艺(lift-off)在 $\text{SiO}_2$ 表面形成Al薄膜。Al的作用体现在以下两个方面:一是双材料梁的一个组成部分,另一个作用在于反射可见光;

(d) 以Al作为掩模,反应离子刻蚀(RIE)  $\text{SiO}_2$ ,至此由Al/ $\text{SiO}_2$ 组成的微镜及其周围的弯折梁已完全形成;

(e) 玻璃蒸铝并图形化,形成玻璃半透镜;

(f) 将上述硅片和已图形化的玻璃片进行阳极键合,凹坑底部的Al和玻璃片上的半透膜构成了Fabry-Perot腔的两个反射面;

(g) 将键合好的硅片进行背面套刻,并采用深反应离子刻蚀(DRIE)技术去除可动微镜背面的硅(DRIE刻蚀的硅侧壁与底面近乎垂直),释放可动微镜。

图6是完成上述工艺后制成的芯片的扫描电镜照片,由图可见可动微镜已获安全释放。

## 4 性能测量分析

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将直接影响芯片能否对红外辐射进行有效探测。可动微镜的上述特性可利用WYKO表面轮廓仪来测量。WYKO表面轮廓仪是一种非接触式光学轮廓仪,利用光的干涉原理测量表面轮廓,其测量原理参见文献[8]。

采用WYKO表面轮廓仪,我们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

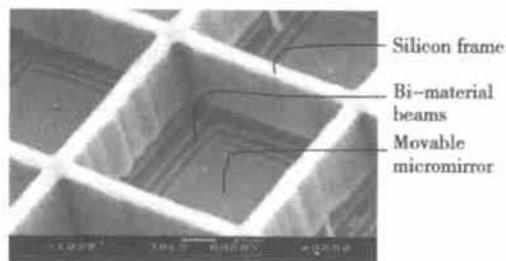


图 6 可动微镜的扫描电镜图

Fig. 6 Scanning electron microscope (SEM) picture of a movable micromirror

于残余应力释放引起的。另外,由于 $\text{SiO}_2$ 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。

图7是在室温时通过WYKO表面轮廓仪观测的可动微镜阵列的干涉图案。

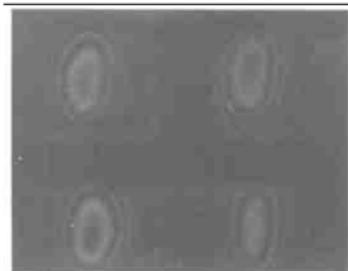


图 7 可动微镜干涉图案

Fig. 7 Interference pattern of moveable micromirrors

由图7可知,四个可动微镜上亮条纹的级数相同,但其条纹的分布却不完全相同:右下角的可动微镜的中心是亮条纹,而其余三个是暗条纹。由干涉原理可知,该微镜与其他微镜在高度上至少相差 $\lambda/4$ ( $\lambda$ 是白光的平均波长)。上述分析说明,可动微镜释放后并不处于同一高度,主要原因是工艺的非一致性及残余应力的影响。

按照设计要求,室温下没有红外辐射时(1)式中的 $\delta=0$ ,但由于可动微镜释放后偏离了原来的位置,即每个可动微镜有了一个初始相位差。这样的芯片用来接收红外辐射是不可能得到正确红外图像的。对于工艺的非一致性及残余应力的影响我们只能尽量减少而不能彻底消除,最终的解决方案是:用CCD图像采集系统,先记录下没有红外辐射时的图像,随后采集的红外图像与之实时相减,即可消除初

始相位差带来的不利影响。

我们测量了可动微镜的热-机械灵敏度(红外辐射引起的机械位移与可动微镜温度变化的比值),发现不同的可动微镜热-机械灵敏度并不严格相等,而是在 $1.91 \times 10^{-8} \text{m/K} \sim 2.46 \times 10^{-8} \text{m/K}$ 范围内变化,除了实验误差的原因外,工艺的非一致性及残余应力的影响也是重要原因。

## 5 结论

本文提出了一种新颖的基于 MEMS 技术的光读出热成像芯片设计,阐明了芯片及由这种芯片构成的热成像系统的工作原理,指出了其非致冷、全光等特点,与传统的红外成像器件相比具有重量轻、价格低的潜在优势。流通了工艺,制作出了 $50 \times 50$  的可动微镜阵列。测试表明: 工艺一致性和残余应力对释放前后可动微镜表面粗糙度与平整度、可动微镜间初始相位以及可动微镜灵敏度的大小产生了重要影响。

## 参考文献

[ 1 ] Maluf N. An Introduction to microelectromechanical system

- engineering. London: Artech house Boston London, 1999: 134
- [ 2 ] Sauer D J, Martinelli R U, Amantea A, et al. Infrared imager using room temperature capacitance sensor. United States Patent, Patent No: US 6498347
- [ 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), 1997, 2: 1259
- [ 4 ] Zhang Liuqiang. Studies on micromachined light modulating thermal image device. PhD Dissertation of Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, 2000[ 张流强. 基于微机械的光调制热成像器件研究. 中国科学院上海冶金所博士学位论文, 2000]
- [ 5 ] 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
- [ 6 ] Perazzo T, Mao M, Kwon O, et al. Infrared vision using uncooled micro-optomechanical camera. *Appl Phys Lett*, 1999, 74(23) : 3567
- [ 7 ] Ishiauya T, Suzuki J, Akagawa K, et al. 160×120 pixels optically readable bimaterial infrared detector. The 15th IEEE International Conference on Micro-Electro-Mechanical System, 2002: 578
- [ 8 ] Surface profilers technical reference manual. WYKO Corporation 2560E. Elvira Road Tucson, AZ 85706, 1996

## Study of All-Light Thermal Imaging Chip and System Based on MEMS Technology\*

Feng Fei, Jiao Jiwei, Xiong Bin and Wang Yuelin

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

**Abstract:** Presents a novel uncooled optic-readable thermal imaging chip with the key part of  $m \times n$  movable micromirror array containing micro-mirrors supported by bi-material beams. As infrared radiation applied, the bi-material beams bend and the resulting micro-mirror displacement modulates the intensity of visible light, namely, the conversion and enhancement of the light signal is completed. The chip consisting of  $50 \times 50$  moveable micromirror array is successfully fabricated by using bulk MEMS technology. The influence of process consistency and residual stress on the surface roughness, flatness, initial phase and thermo-mechanical sensitivity of movable micromirror are discussed.

**Key words:** microelectromechanical system (MEMS); optic-readable thermal imaging; moveable micromirror array; Fabry-Perot interferometer

**PACC:** 4280Q; 0760L

**Article ID:** 0253-4177(2004)04-0477-04

\* Project supported by the Major State Basic Research Development Program of China(No. G1999033101)

Feng Fei male, was born in 1973, PhD candidate. He is engaged in the research on MEMS based infrared thermal imaging technology.

Jiao Jiwei male, was born in 1968, professor, adviser of PhD candidate. He is engaged in the research on MEMS technology and device.

Xiong Bin male, was born in 1962, professor, adviser of PhD candidate. He is engaged in the research on MEMS technology and device.

Received 16 April 2003, revised manuscript received 31 July 2003

© 2004 The Chinese Institute of Electronics