

光读出热成像芯片的优化设计 与 ANSYS 模拟^{*}

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: 利用一种近似理论——悬臂梁理论对光读出热成像芯片进行了优化设计, 所采用的 Al/SiO₂ 双材料体系, 其关键性能指标——热-机械灵敏度可达 $6.60 \times 10^{-8} \text{ m/K}$, 与之相对应的最优厚度比为 0.6。同时 ANSYS 模拟表明, 可动微镜热-机械灵敏度为 $2.80 \times 10^{-8} \text{ m/K}$ 。芯片实测热-机械灵敏度为 $2.02 \times 10^{-8} \text{ m/K}$, 测试结果进一步证实了理论分析与 ANSYS 模拟的结果。理论计算表明, 可动微镜热响应时间常数为 $4.45 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。

关键词: 微机电系统 (MEMS); 光读出热成像; 可动微镜阵列; 热-机械灵敏度; 热响应时间常数

PACC: 4280Q; 0760L

中图分类号: TN216

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2004)05-0552-05

1 引言

MEMS 技术的发展为红外成像技术的发展注入了新的活力, 微测辐射热计(Microbolometer)是其中的典型代表^[1]。而近几年来, 基于 MEMS 技术的光读出红外热成像技术成为了红外成像研究领域内的一个新兴的研究热点^[2~5], 与传统的红外成像技术相比它具有一系列潜在的优点: 采用光学读出, 利用光调制原理实现像增强与像转换, 整个系统是个全光系统, 不需要复杂的读出电路, 可以用眼睛而不用其他任何接收装置观察到红外图像, 这是传统的红外成像方式做不到的; 可以在室温下工作, 无需笨重的致冷设备; 探测灵敏度高, 重量轻, 能量消耗少, 其潜在的价格优势明显。

光读出热成像芯片是光读出热成像系统的关键部件, 其特性直接决定了系统的整体性能。本文针对一种基于 MEMS 技术的光读出热成像芯片, 利用一种近似理论——悬臂梁理论对光读出热成像芯片的热-机械灵敏度进行了优化设计; 并利用 ANSYS

的热-机械耦合场进行了模拟分析, 得到了可动微镜在红外辐射作用下的温度场及位移场, 其结果与理论分析相近; 测试结果也进一步证实了理论分析与 ANSYS 模拟的结果。另外还通过理论计算得到了可动微镜的热响应时间常数。

2 光读出热成像芯片^[6]

光读出热成像系统是基于法布里-泊罗干涉原理的热成像系统, 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。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。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, 每个微镜构成一个像素, 单个像素结构如图 1 所示, 镜面由四根固定在基片上的双层材料弯折梁支撑。镜面有两方面的作用: 一是反射光线, 二是吸收红外辐射。透过滤波片的红外辐射被镜面吸收。在镜面区域与弯折梁的固定端之间形成一个温度梯度, 由于双金属片效应双层材料

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(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。

弯折梁将发生弯曲, 带动镜面上下运动, 改变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。

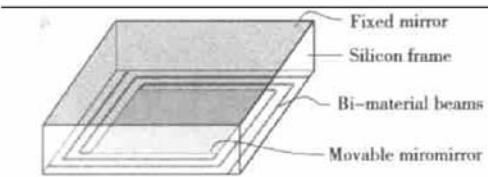


图 1 单元像素图

Fig. 1 Schematic diagram of a single pixel

3 可动微镜设计

3.1 热-机械灵敏度优化设计与 ANSYS 模拟

可动微镜阵列是整个光读出热成像芯片的核心, 在芯片设计过程中, 最重要的是对可动微镜在红外辐射作用下产生的位移即可动微镜的热-机械灵敏度进行优化设计。

可动微镜可以近似等效为以下简化模型: 镜面所吸收的红外辐射能被四根弯折梁均分, 热流从镜面一端流入, 沿着梁流向另一端, 相当于在悬臂梁的自由端加了一个点热源, 在悬臂梁的自由端和固定端存在一个温度梯度, 悬臂梁的自由端挠度最大, 如图 2 所示。下面我们用一种近似理论——双层材料的悬臂梁理论对器件进行优化设计。

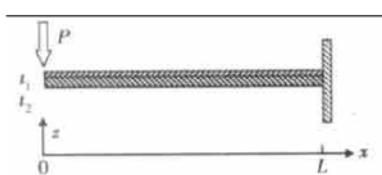


图 2 可动微镜热-机械等效模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the thermo-mechanical equivalent model of the movable micromirror

按照双层材料悬臂梁理论, 在点热源作用下, 悬臂梁的最大挠度 d 与最大温度差 ΔT 可表示为^[7,8]:

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

$$\Delta T = \frac{LP}{W(\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2)} \quad (2)$$

由(1),(2)两式可得悬臂梁的热-机械灵敏度 S 为:

$$S = \frac{d}{\Delta T} = (\alpha_2 - \alpha_1) \left(\frac{n+1}{K} \right) \left(\frac{L^2}{t_2} \right) \quad (3)$$

式中 下角标 1 表示金属薄膜的各个参量; 下角标 2 表示非金属薄膜的各个参量; α 表示材料的热膨胀系数; K 为导热率; P 表示入射功率; t 表示薄膜厚度; W 表示悬臂梁的宽度; 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(3)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, 悬臂梁的热-机械灵敏度越大。当材料和梁长确定后, 双层材料的厚度比将影响悬臂梁的热-机械灵敏度。以 Al/SiO₂, Al/SiN_x, Au/SiO₂, Au/SiN_x 为例, 取 $L = 102\mu\text{m}$, $t_2 = 1\mu\text{m}$, 双层材料悬臂梁的热-机械灵敏度与厚度比的关系如图 3 所示。

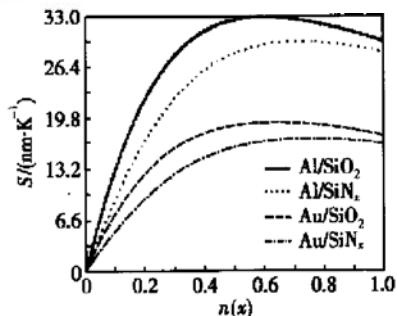


图 3 双层材料悬臂梁热-机械灵敏度与厚度比的关系

Fig. 3 Thermo-mechanical sensitivity vs thickness ratio of the bimaterial cantilever beam

从图 3 中可以看出, 每一组双金属材料都存在一个最佳厚度比使其热-机械灵敏度最大, 最佳厚度比与最大热-机械灵敏度如表 1 所示。

表 1 双层材料悬臂梁最佳厚度比与最大热-机械灵敏度

Table 1 Optimal thickness ratio and maximal thermo-mechanical sensitivity of the bimaterial cantilever beam

	$n = x/t_2$	$S = \delta/\Delta T (\text{m} \cdot \text{K}^{-1})$
Al/SiO ₂	0.598	3.305×10^{-8}
Al/SiN _x	0.713	2.982×10^{-8}
Au/SiO ₂	0.622	1.930×10^{-8}
Au/SiN _x	0.742	1.617×10^{-8}

表 1 中的数据将是芯片结构设计的基础。

理论计算与随后的 ANSYS 模拟过程中所涉及的材料的相关参数如表 2 所示。

表 2 理论计算与 ANSYS 模拟中采用的材料性能参数^[4]Table 2 Properties of material used in theoretical calculation and ANSYS simulation^[4]

Material	Density $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	Elastic modulus $E / (10^{11} \text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	Poisson's ratio	Thermal conductivity $\lambda / (\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	Thermal expansion coefficient $\alpha / 10^{-6} \text{K}^{-1}$	Heat capacity $C / (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$
Silicon nitride	2400	1.80	0.25	5.5	0.8	691
Silicon oxide	2360	1.20	0.25	12	0.4	800
Gold	19300	0.73	0.3	296	14.2	129
Aluminum	2702	0.80	0.3	237	23.6	908

以 Al/SiO₂ 为例, 结合 MEMS 工艺条件, 取氧化硅的厚度为 500nm, 为了得到最大的热-机械灵敏度, Al 层的厚度应该为 300nm. 以此为基础, 应用有

限元分析软件——ANSYS 对 Al/SiO₂ 为结构材料的可动微镜进行了热-机械模拟, 得到其温度场分布和位移场分布, 如图 4 所示.

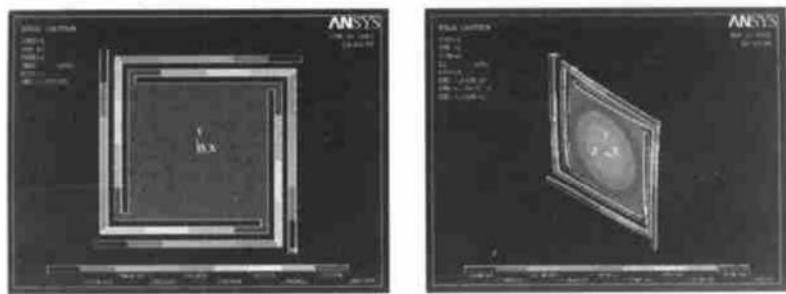


图 4 可动微镜温度场(a)及位移场(b)分布

Fig. 4 Thermal field(a) and displacement field(b) of the movable micromirror

上述模拟中所采用的参数为: 双材料弯折梁长 102μm, 正方形镜面边长为 40μm, 红外辐射功率为 10W/m². 由图 4(a) 可知, 镜面区域温度基本均匀一致且最高, 温度梯度出现在弯折梁上, 弯折梁的锚端处温度最低; 由图 4(b) 可知, 位移从可动微镜的四个锚端沿弯折梁向内逐渐增大, 最大位移发生在可动微镜的镜面与弯折梁的交界处. 另外, 在可动微镜的镜面部分也存在位移场分布, 即整个微镜面发生了微弱的凹陷形变, 这主要是由于微镜面与弯折梁是由双材料一次成型所引起的, 与弯折梁上位移差相比, 微镜面上中央区域的位移差是很小的, 对器件性能几乎没有影响. 如果要使微镜面不发生凹陷形变, 则需要对微镜面的变形进行补偿, 如在微镜面表面镀上一层透明的氧化硅薄膜.

由图 4 所示的温度及位移分布可得可动微镜的热-机械灵敏度为: $2.80 \times 10^{-8} \text{m/K}$.

3.2 可动微镜热响应时间常数

对于一个图像采集系统而言, 视频信号的典型值为 30 帧/s, 这就要求可动微镜的热响应时间小于

1/30s.

热响应时间常数可表示为:

$$t = \frac{\rho V C}{G_{\text{Total}}} \quad (4)$$

式中 $\rho, V, C, G_{\text{Total}}$ 分别表示构成可动微镜的密度、体积、热容以及总的热导. 在真密封装条件下, 可动微镜总的热导可近似表示为:

$$G_{\text{Total}} = 4 \frac{(t_{\text{SiO}_2} \lambda_{\text{SiO}_2} + t_{\text{Al}} \lambda_{\text{Al}}) W}{L} \quad (5)$$

由(4)、(5)两式可知, 热响应时间常数与弯折梁长度 L 成正比, 而由(3)式可知, 可动微镜的热-机械灵敏度与 L^2 成正比, 故在设计可动微镜的热-机械灵敏度时, 还应考虑梁长对热响应时间常数的影响.

对 Al/SiO₂ 体系, 像素尺寸为 40μm × 40μm, 厚度分别为 0.5μm, 0.3μm, 梁长为 102μm, 热响应时间为 4.45×10^{-4} s, 即我们设计的像素结构的热响应时间完全能满足图像帧频的要求.

4 实验测量

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.用 WYKO 对我们制作的可动微镜的热-机械灵敏进行了测量.

实验装置如图 5 所示,作为红外辐射源的陶瓷加热板置于 WYKO 的测量平台上,其温度由温控仪控制,芯片放在陶瓷加热板的上方.相干光束是来自于 WYKO 内部的参考平面及芯片的可动微镜的反射光线.首先聚焦到某一个可动微镜,如图 6 所示,可观察到明显的干涉条纹;当陶瓷板被加热或冷却时,可动微镜上下移动,相干光束(相干光为白光,平均波长取为 500nm)的光程差被改变,条纹发生移动,由条纹的移动数就可以得出可动微镜的位移.测量结果及拟合曲线如图 7 所示.

图 7 中,横坐标表示温度(单位: °C),纵坐标表示可动微镜的位移(单位: nm).拟合曲线的斜率就是可动微镜的热-机械灵敏度,即 $S = 2.02 \times 10^{-8} \text{ m/K}$.

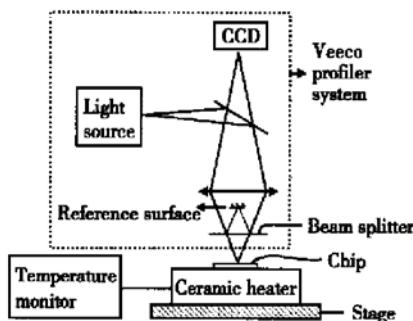


图 5 热-机械灵敏度测试实验装置图

Fig. 5 Experiment setup for thermo-mechanical sensitivity



图 6 可动微镜干涉图样

Fig. 6 Interference pattern of a movable micromirror

理论计算、ANSYS 模拟以及实验测试结果(以 Al/SiO₂ 体系为例)如表 3 所示.

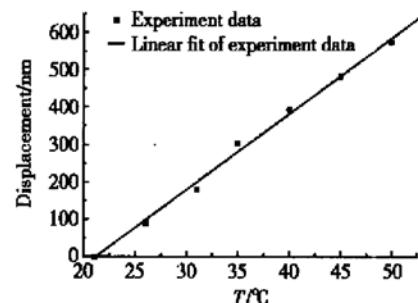


图 7 可动微镜位移随温度变化的关系

Fig. 7 Displacement vs temperature of a movable micromirror

表 3 理论计算结果、ANSYS 模拟结果及实验结果对比

Table 3 Comparison of theoretical analysis, ANSYS simulation and experiment results

	Theoretical /(10 ⁻⁸ m · K ⁻¹)	ANSYS /(10 ⁻⁸ m · K ⁻¹)	experiment /(10 ⁻⁸ m · K ⁻¹)
<i>S</i>	6.60	2.80	2.02

从表 3 中可以看出,理论计算、ANSYS 模拟与实验测试结果是相吻合的.其中 ANSYS 模拟、实验测试结果比理论计算结果要小,主要原因是为了简化分析,采用了近似理论—悬臂梁理论的缘故,弯折梁末端并不自由,要受到微镜的约束.同时由于工艺制作方面的原因,比如双层材料厚度比并不处于最优等,实验测试结果比模拟结果小是不难理解的.

5 结论

本文完成了一种新颖的光读出热成像芯片的关键性能指标——热-机械灵敏度的优化设计,包括理论分析、有限元模拟及实验测试三部分.为简化理论计算,首先利用近似理论——悬臂梁理论找出双层材料悬臂梁的最佳热-机械灵敏度与最佳厚度比,随后的 ANSYS 模拟和实验测试证明了这种简化分析是可行的;用 ANSYS 对可动微镜进行了模拟分析,得到了可动微镜的热-机械灵敏度;最后对我们制作的可动微镜热-机械灵敏度进行了实验测定.结果证明理论计算、ANSYS 模拟以及实验结果三者相吻合,为设计高性能的 FPA(焦平面阵列)提供了理论、实验依据.另外,理论计算表明:可动微镜的热-机械灵敏度与热响应时间常数之间应有个折衷;在我们的设计中,可动微镜的热响应时间可达 $4.45 \times 10^{-4} \text{ s}$.

参考文献

- [1] Wood R A. Uncooled infrared imaging arrays and systems: Monolithic silicon microbolometer arrays. *Semiconductors and Semimetals*, 1997, 47: 46
- [2] 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]
- [3] 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
- [4] Perazzo T, Mao M, Kwon O, et al. Infrared vision using uncooled micro-optomechanical camera. *Appl Phys Lett*, 1999,

74(23): 3567

- [5] 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 Systems, 2000: 578
- [6] Feng Fei, Jiao Jiwei, Xiong Bin, et al. Study of all-light thermal imaging chip and system based on MEMS technology. *Chinese Journal of Semiconductors*, 2004, 25(4): 477 [冯飞, 焦继伟, 熊斌, 等. 基于 MEMS 技术的全光热成像芯片与系统的研制. 半导体学报, 2004, 25(4): 477]
- [7] Lai J, Perazzo T, Shi Z, et al. Optimization and performance of high-resolution micro-optomechanical thermal sensors. *Sensors and Actuators*. 1997, A58: 113
- [8] Barnes J R, Stephenson R J, Woodburn C N, et al. A femtojoule calorimeter using micromechanical sensors. *Rev Sci Instrum*, 1994, 65(12): 379

Optimal Design and ANSYS Simulation for Optic-Readable Thermal Imaging Chip^{*}

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: A novel MEMS based optic-readable thermal imaging chip is the key part of optic-readable thermal imaging system. The chip's characteristics determine the performance of this system. This paper presents optimal design of optic-readable thermal imaging chip on the basis of cantilever-model theory. For Al/SiO₂ bi-material system, the theoretical analysis indicates the optimal thermo-mechanical sensitivity and corresponding optimal thickness ratio are 6.60×10^{-8} m/K and 0.6, respectively. ANSYS simulation gives a thermo-mechanical sensitivity of 2.80×10^{-8} m/K for this optimized design. The measured data are around 2.02×10^{-8} m/K, which is in accordance with the results of theoretical analysis and ANSYS simulation. Theoretical calculation indicates that the time constant of thermal response is 4.45×10^{-4} s.

Key words: microelectromechanical system (MEMS); optic-readable thermal imaging; movable micromirror array; thermo-mechanical sensitivity; thermal responsive time constant

PACC: 4280Q; 0760L

Article ID: 0253-4177(2004)05-0552-05

* Project supported by 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.