

文章编号: 0253-2239(2004)11-1543-4

光读出热成像焦平面阵列的光学与热学设计*

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: 针对提出的一种光读出热成像系统, 对其焦平面阵列的光学和热学特性进行了详细的分析, 主要涉及法布里-珀罗微腔两个反射面的反射率、可动微镜的温度响应、噪声等效温差以及响应时间四个方面。理论分析表明: 当法布里-珀罗微腔两个反射面的反射率为 0.5 时, 能获得较大的输出反射光强和反衬度, 并保证了输出反射光强尽可能地随微镜位移在 $0 \sim \lambda/4$ 范围内呈线性变化; 可动微镜的温度响应值可达 2.05×10^{-4} , 噪声等效温差为 19.5 mK, 热响应时间为 1.54×10^{-3} s。

关键词: 光电子技术; 光读出热成像; 焦平面阵列; 法布里-珀罗微腔; 噪声等效温差
中图分类号: TN216 文献标识码: A

Optical and Thermal Design for Optically Readable Thermal Imaging Focal Plane 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 11 July 2003; revised 11 February 2004)

Abstract: Optical and thermal properties of a novel optically readable thermal imaging focal plane array (FPA) are analyzed, including reflectivity of two reflective surfaces of Fabry-Perot micro-cavity, temperature response of movable micromirror, noise-equivalent temperature difference (NETD) and thermal response time. Theoretical analysis indicates that when the two reflective surfaces of Fabry-Perot micro-cavity have same reflectivity of 0.5 better reflective light intensity and modulation degree can be achieved and that reflective light intensity varies linearly with the displacement of micro-mirror in the range of $0 \sim \lambda/4$. Temperature response of the movable micromirror, NETD and thermal response time are estimated as 2.05×10^{-4} , 19.5 mK and 1.54×10^{-3} s, respectively.

Key words: photoelectronic technology; optically readable thermal imaging; focal plane arrays; Fabry-Perot micro-cavity; noise-equipment temperature difference

1 引 言

红外成像技术在军事、民用领域有着广泛的应用需求, 但在目前的技术条件下, 红外成像系统的价格一直居高不下, 这无疑限制了红外成像系统的广

泛应用。

为了实现廉价而高性能的红外热成像, 有必要开发新兴的替代技术。光学读出红外成像技术成为目前的一个研究热点。众所周知, 双金属片具有热效应, 采用双材料微悬臂梁来探测化学反应、温度和热辐射的技术已得到多个研究小组的证实。将双金属片的热效应和光学检测技术结合起来也可以实现光学读出红外热成像。基于此, Manalis 等人于 1985 年率先尝试采用 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

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

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

收稿日期: 2003-07-01; 收到修改稿日期: 2004-02-11

光^[1]。此后,加州伯克利分校的 Majumder 等^[2]报道了一种微机械光栅衍射型红外焦平面阵列,已成功实现了红外成像;几乎与此同时,中国科学院上海微系统与信息技术研究所(原中国科学院上海冶金所)张流强博士^[3]也提出了类似的设想。

我们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系统^[4],其焦平面阵列是基于微机械技术的具有双材料梁结构的法布里-珀罗微腔阵列(FPA),其性能的好坏决定了整个系统的性能。本文主要从光学及热学两个方面对该光读出红外热成像系统的法布里-珀罗微腔阵列进行了设计,主要包括法布里-珀罗微腔反射率、温度响应、噪声等效温差以及响应时间等四个方面。

2 法布里-珀罗微腔阵列性能分析

2.1 法布里-珀罗腔两个反射面的反射率

可动微镜的金属表面和固定镜面下表面构成了

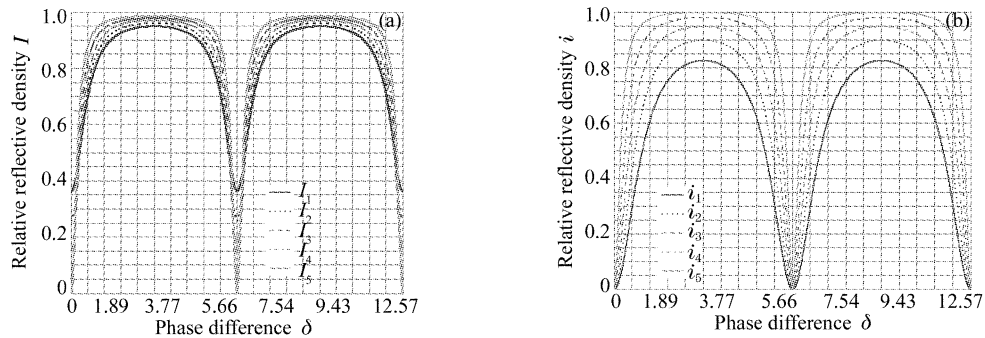


Fig. 1 Relative reflective density vs. phase difference of the Fabry-Perot interferometer: (a) With unequal reflectivity, (b) With equal reflectivity

图 1(a)、图 1(b)反映出:反射率越大,输出反射光强越大;总的反射率越小,其反射光强在(0, 3.14)区间内的线性越好;所以反射率的选择应该折衷考虑。同时我们还要考虑到反衬度的要求,根据其定义,反射率越接近,反衬度越大,当两个反射面的反射率相等时,反衬度最大。

基于上述分析,我们选择 $R=r=0.5$ [如 $i_2(\delta)$ 所示],此时,输出最大反射光强占总光强的 90%,反衬度为 1,在(0, 3.14)区间内,输出反射光强有良好的线性。

2.2 可动微镜的温度响应^[5]

可动微镜热设计的根本目的在于,使可动微镜的温度响应值应最大化,即红外辐射源单位温度的变化能引起法布里-珀罗微腔阵列上红外敏感区域(可动微镜区域)最大的温度变化。可动微镜接收红外辐射的同时还向周围环境散发热量,两者共同决

一个法布里-珀罗微腔的两个反射面,这两个反射面的反射率直接影响我们能否观察到显著的干涉图像。反射率的确定要考虑到以下三个方面的因素:1) 反射光强应尽可能的大;2) 当微镜位移在 $0 \sim \lambda/4$ 内变化时,输出反射光强尽可能呈线性变化;3) 反射光强的反衬度应尽可能的大。

法布里-珀罗腔的反射光强为

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

其中 r, R, I_0, δ 分别表示法布里-珀罗腔上、下两个表面功率反射率、入射光强以及相位差。为了选择合适的反射率,我们分 r, R 相等和不等两种情况来讨论。

图 1(a) 中 I_1, I_2, I_3, I_4, I_5 分别表示 $R = 0.8, r = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 时,相对反射光强 $I = I_R/I_0$ 随相位差 δ 的变化情况;图 1(b) 中 i_1, i_2, i_3, i_4, i_5 分别表示 $R = r = 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ 时,相对反射光强 $i = I_R/I_0$ 随相位差 δ 的变化情况。

定了可动微镜的温度响应值。

2.2.1 可动微镜吸收的红外功率

设可动微镜面积为 A_m ,总的发射率为 ϵ ,红外光学系统的透过率为 $\tau \approx 0.9$,红外光学系统的 F 数为 F_{no} ,则被可动微镜吸收的红外功率为

$$q_s = A_m \tau \epsilon \pi L / (4F_{no}^2), \quad (2)$$

上式中 L 是辐亮度,由普朗克定理决定:

$$L = 2hc^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{d\lambda}{\lambda^5 [\exp(hc/KT_s\lambda) - 1]}. \quad (3)$$

2.2.2 可动微镜与环境间的热交换

可动微镜向周围环境散发的热量由可动微镜和环境之间的热交换机制决定。为了简化分析,假设可动微镜上的温度均匀一致,弯折梁的锚端与环境温度一致,在可动微镜与弯折梁的锚端之间存在一个温度梯度。可动微镜和环境之间的热交换机制可

概括为

1) 可动微镜和硅衬底之间通过双材料弯折梁的热传导 G_{leg} ;

2) 可动微镜和环境之间的热辐射 G_{rad} ;

3) 可动微镜和滤波片以及固定镜面之间通过空气的热传导 $G_{air,cond}$;

4) 可动微镜和滤波片及固定镜面之间通过空气的热对流 $G_{air,conv}$ 。

可动微镜的总热导由上面所提及的热交换机制决定:

$$G_{total} = G_{leg} + G_{rad} + G_{air,conv} + G_{air,cond}, \quad (4)$$

可动微镜和硅衬底之间通过双材料弯折梁的热导:

$$G_{leg} = 4(t_{SiN_x} K_{SiN_x} + t_{Au} K_{Au}) \omega / L_{leg} = 11.2 \times 10^{-6} \text{ W/K}, \quad (5)$$

其中梁长 $L_{leg} = 162 \mu\text{m}$, 梁宽 $\omega = 2 \mu\text{m}$, 梁厚 $t_{SiN_x} = 1 \mu\text{m}$, $t_{Au} = 0.75 \mu\text{m}$, 热导率 $K_{SiN_x} = 5 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, $K_{Au} = 296 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

由基尔霍夫定律知,好的吸收体也是好的辐射体,也就是说在可动微镜和环境之间的辐射热交换是不可避免的,即 G_{rad} 是可动微镜固有的热导。当可动微镜和周围环境之间的温度差很小时,辐射热导可表示为

$$G_{rad} = 4A_m (\epsilon_{SiN_x} + \epsilon_{Au}) \sigma T_a^3 = 2.43 \times 10^{-8} \text{ W/K}, \quad (6)$$

其中可动微镜的面积 $A_m = 70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$, 发射率 $\epsilon_{SiN_x} = 0.8$, $\epsilon_{Au} = 0.01$, 斯特藩-玻尔兹曼 (Stefan-Boltzmann) 常量 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$, 环境温度 $T_a = 300 \text{ K}$ 。

器件采用真空封装,在真空环境中, $G_{air,cond}$ 、 $G_{air,conv}$ 很小可忽略掉。

综上所述,当法布里-珀罗微腔阵列工作在真空状态时, $G_{total} = G_{leg} + G_{rad}$ 。

2.2.3 可动微镜的温度响应

假设环境温度为 T_a , 被可动微镜吸收的红外功率为 q_s , 可动微镜的温度为 T_m , 则有

$$\rho V C \frac{dT_m}{dt} = -G_{total} (T_m - T_a) + q_s, \quad (7)$$

其中 ρ 是材料密度, V 是可动微镜薄膜体积, C 是热容, G_{total} 是可动微镜与周围环境之间总的热导。热平衡时,由(7)式可得悬臂梁的温度改变:

$$T_m - T_a = \frac{q_s}{G_{total}}, \text{ 即 } \delta T_m = \frac{\delta q_s}{G_{total}}, \quad (8)$$

由(2)式、(8)式可得可动微镜的温度响应(可动微镜

温度 T_m 与红外辐射源 T_s 温度变化之比)为

$$\frac{\delta T_m}{\delta T_s} = \frac{\delta T_m}{\delta q_s} \cdot \frac{\delta q_s}{\delta T_s} = \frac{1}{G_{total}} \cdot \frac{A_m \tau \epsilon \pi}{4F_{no}^2} \frac{dL}{dT_s}, \quad (9)$$

即

$$\frac{\delta T_m}{\delta T_s} = \frac{1}{G_{rad} + G_{leg}} \cdot \frac{A_m \tau \epsilon \pi}{4F_{no}^2} \cdot \frac{dL}{dT_s}. \quad (10)$$

在 $8 \sim 14 \mu\text{m}$ 的范围内,黑体在 300 K 时, $dL/dT_s = 0.83 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 当 $F_{no} = 1$ 时,可动微镜的温度响应值 $dT_m/dT_s = 2.05 \times 10^{-4}$ 。

在(10)式中,总的热导对可动微镜的温度响应影响最大,因此,我们应选择合适的材料并进行合理的结构设计,尽量降低可动微镜通过双材料弯折梁的热传导,使得辐射热导在总热导中居主导地位,则可获得极限温度响应。

2.3 法布里-珀罗微腔阵列噪声等效温差

噪声等效温差 (Noise-equivalent temperature difference, NETD) 是当信噪比等于 1 时红外辐射源的等效温度变化,决定了一个红外图像系统所能分辨的最小温度差。法布里-珀罗微腔阵列的噪声主要来源于两个方面:1) 包括热振动和机械振动在内的双材料弯折梁振动噪声;2) 像素的热动态涨落噪声。

2.3.1 振动噪声^[6]

振动噪声包括两个方面:双材料弯折梁内部的热振动以及外界所带来的机械振动。由外界所带来的机械振动问题可通过振动隔离系统得到有效的抑制,如将器件置于光学平台上。双材料弯折梁内部的热振动来源于 $k_B T$ 热能:

$$\delta_{th,vib} = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{g \omega_0 Q}} = 7.29 \times 10^{-14} \text{ m}, \quad (11)$$

其中 Δf 是测量带宽,对 CCD 探测器而言典型值为 30 Hz ; Q 是品质因子,在 1 Pa 的气压下,通过复杂的计算可得 $Q = 28064$; g 是悬臂梁的弹性系数, ω_0 是系统的共振频率,通过悬臂梁理论计算得 $g = 9.92 \times 10^{-2} \text{ N/m}$, $\omega_0 = 33602 \text{ Hz}$, $T = 300 \text{ K}$, 玻耳兹曼常量 $k_B = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。利用(12)式可将其转化为等效温度涨落

$$\Delta T_{th,vib} = \frac{\delta_{th,vib}}{S} = 1.68 \times 10^{-6} \text{ K}, \quad (12)$$

其中 S 是可动微镜的热-机械灵敏度为 $S = 4.33 \times 10^{-8} \text{ m/K}$ 。从(11)式可以看出,降低热振动噪声的关键在于可动微镜结构要有合适的弹性系数、共振频率及品质因子。

2.3.2 温度涨落噪声^[7]

任何热动态系统都有温度的随机涨落,称之为温度涨落噪声。由于器件与环境的热交换是不可避

免的,对任何非致冷红外系统热动态涨落噪声都是固有噪声。

对于一个可动微镜像素,在低频范围内平均温度涨落为

$$\Delta T_{\text{th,fluc}} = \sqrt{\frac{4k_{\text{B}}T^2B}{G_{\text{total}}}} = 3.64 \times 10^{-6} \text{ K}, \quad (13)$$

其中 $G_{\text{total}} = 1120.43 \times 10^{-8} \text{ W/K}$ 是从可动微镜到环境的总热导, $B = 30 \text{ Hz}$ 是探测带宽, $T = 300 \text{ K}$ 是可动微镜温度。

2.3.1 和 2.3.2 分析表明,可动微镜结构的品质因子、弹性系数、共振频率、热导直接决定了法布里-珀罗微腔阵列的噪声水平。从降低噪声、减小热响应时间角度出发, G_{total} 越大越好,但这必将导致可动微镜温度响应降低,在设计时必须折衷考虑。

2.3.3 总的噪声等效温差

温度涨落的总的噪声是上述所有噪声的统计平均。假设这些噪声统计不相关,总的噪声可表示为

$$\Delta T_{\text{total}} = \sqrt{\sum \Delta T_i^2}, \quad (14)$$

总的噪声 $\Delta T_{\text{total}} = 4.01 \times 10^{-6} \text{ K}$, 则噪声等效温差可达

$$\frac{\Delta T_{\text{total}}}{dT_{\text{m}}/dT_{\text{s}}} = 19.5 \text{ mK}. \quad (15)$$

对可动微镜结构作进一步改进,使得可动微镜总的热导降低一到两个数量级是完全可能的,即可动微镜的温度响应 $dT_{\text{m}}/dT_{\text{s}}$ 可增大一到两个数量级,最终系统的噪声等效温差可达 mK 量级甚至 mK 量级以下。

2.4 可动微镜的热响应时间常数

可动微镜的时间常数是决定图像帧频的重要因素。可动微镜的响应时间包括机械响应时间和热响应时间两部分。其中机械响应时间由可动微镜的谐振频率来确定,根据有限元(ANSYS6.1)模拟的结果,可动微镜的一阶谐振频率为 21.6 kHz,所以机械响应时间完全可以忽略掉,器件的响应时间主要由可动微镜的热响应时间来确定。热时间常数可表示为

$$t = \rho Vc/G_{\text{total}}, \quad (16)$$

由(16)式可知,热时间常数与总的热导成反比,故在设计时可动微镜的温度响应和热时间常数之间应有个折衷。对 Au/SiN_x 体系,像素尺寸为 $70 \mu\text{m} \times 70 \mu\text{m}$,厚度分别为 $1 \mu\text{m}$, $0.75 \mu\text{m}$,热响应时间为 $1.54 \times 10^{-3} \text{ s}$ 。

结论 本文主要针对我们提出的一种新颖的光读出热成像系统,对其焦平面阵列进行了详细的分析。理论分析表明:为同时获得较大的输出反射光强、反衬度并保证输出反射光强具有良好的线性,法布里-珀罗微腔两个反射面的反射率应相等并取为 0.5;分析了热导对温度响应的影响,降低热传导可获得极限温度响应;噪声分析表明微机电系统技术可制作出性能优良的光读出热成像芯片;在目前的设计中,可动微镜的温度响应值可达 2.05×10^{-4} ,噪声等效温差为 19.5 mK,响应时间为 $1.54 \times 10^{-3} \text{ s}$ 。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Perazzo T, Mao M, Kwon O *et al.*. Infrared vision using uncooled micro-optomechanical camera. *Appl. Phys. Lett.*, 1999, **74**(23): 3567~3569
- 3 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. D Dissertation]. Shanghai: Shanghai Institute of Metallurgy, The Chinese Academy of Sciences, 2000 (in Chinese)
- 4 Feng Fei, Jiao Jiwei, Xiong Bin *et al.*. Design and fabrication of optically readable infrared thermal imaging device based on Fabry-Perot Micro-Cavity array. *Acta Opica Sinica* (光学学报), 2004, **24**(10): 1375~1380 (in Chinese)
- 5 Wood R A. Uncooled infrared imaging arrays and systems: Monolithic silicon microbolometer arrays. *Semiconductors and Semimetals*, 1997, **47**: 47~50
- 6 Gabrielson T B. Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1993, **40**: 903~909
- 7 Kruse P R. Uncooled infrared imaging arrays and systems: Principles of uncooled infrared focal plane arrays. *Semiconductors and Semimetals*, 1997, **47**: 31~33