

焦平面阵列反光板的优化设计与制作

毛 亮¹ 史海涛² 程 腾¹ 欧 毅³ 陈大鹏³ 张青川¹

(¹ 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230027)
(² 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094; ³ 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要 光学读出红外热成像系统中,焦平面阵列(FPA)反光板的初始弯曲降低了系统的光学检测灵敏度。针对 FPA 的设计制作,提出了两种降低其反光板初始弯曲的优化设计方案:减薄反光板上金层厚度和制作带加强筋的反光板。在理论分析的基础上,设计制作了单元尺寸为 200 μm 的反光板金层减薄 FPA,其反光板曲率半径提高至原来金层未减薄 FPA 的 4.71 倍,系统光学检测灵敏度提高了 5.2 倍;单元尺寸为 60 μm 的反光板带加强筋 FPA,其反光板曲率半径提高至原来没有加强筋 FPA 的 4.29 倍,系统光学检测灵敏度提高了 1.18 倍。实验验证了理论分析的结果。

关键词 成像系统;焦平面阵列;非制冷红外成像;薄膜;微梁

中图分类号 O438.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0111001

Design Optimization and Fabrication of the Focal Plane Array Reflector

Mao Liang¹ Shi Haitao² Cheng Teng¹ Ou Yi³ Chen Dapeng³ Zhang Qingchuan¹

¹ Chinese Academy of Sciences Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China
² China Academy of Space Technology, Beijing, 100094, China
³ Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract In the optical readout infrared thermal imaging system, the initial reflector deformation of the focal plane array (FPA) decreases the optical detection sensitivity for the system greatly. According to the design and fabrication of the FPA, two optimized design schemes for reducing the initial deformation of the FPA reflector are put forward: thinning the Au layer on the reflector and fabricating reflector with stiffeners. Based on the theoretical analysis, a FPA with a unit size of 200 μm is fabricated and the Au layer of its reflector is thinned. Its reflector curvature radius and the optical detection sensitivity for the system are respectively increased to 4.71 times and 5.2 times of the FPA without thinning process. And a FPA with a unit size of 60 μm is fabricated, its reflector is with stiffeners. Its reflector curvature radius and the optical detection sensitivity for the system are respectively increased to 4.29 times and 1.18 times of that of the FPA without stiffeners. The experiments verified the result of theoretical analysis.

Key words imaging system; focal plane array; uncooled infrared imaging; thin films; micro-cantilever

OCIS codes 40.6808; 230.4685; 310.4165

1 引 言

随着微机电系统(MEMS)工艺的发展,近年来在军事、航天和医学等领域有着广泛应用的光学读出非制冷红外成像技术得到越来越多的关注。美国

Berkeley 大学的 Majumdar 小组发展了基于光学干涉读出方式的双材料微悬臂梁的焦平面阵列(FPA),并于 2001 年获得了人体红外图像^[1]。但光学干涉读出方式对防振要求较高,不适合商业应用。

收稿日期: 2012-06-28; **收到修改稿日期**: 2012-08-10

基金项目: 国家 973 计划(2011CB302105)、国家自然科学基金(11072233, 11102201, 11127201)、中央高校基本科研业务费专项资金(2090050017)和中国博士后科学基金(20100480684)资助课题。

作者简介: 毛 亮(1986—),女,博士研究生,主要从事红外焦平面阵列和非制冷红外成像技术等方面的研究。

E-mail: normal@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 张青川(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光学读出红外成像技术和微梁生化传感技术等方面的研究。

E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn(通信联系人)

2001~2002年, Nikon公司报道了检测热变形导致微悬臂梁转角的光学读出系统, 并得到室温下的人像^[2]。2003年, Oak Ridge国家实验室的研究小组利用点读出的光杠杆原理扫描获得红外源的热图像^[3]。三者的FPA都是利用牺牲层工艺制作的站立在硅基底上的微悬臂梁阵列结构。这种结构中, 红外光在透过硅基底时有40%的能量损失^[4], 而制作时由于热冲击或机械冲击也容易导致微梁与基底的粘连失效。

本文为了解决上述问题, 设计了无基底的双材料微悬臂梁FPA^[5], 提出了在FPA谱平面进行刀口滤波的光学读出方法^[6]。

2 FPA制作工艺

FPA单元结构如图1(a)所示, 由反光板、双材料(SiN_x/Au)变形梁、绝热梁和支撑框架组成。红外源的热辐射使FPA产生温度变化, SiN_x 和Au的热膨胀率不同导致双材料梁的变形, 反光板偏转角因此发生变化。红外源的单位温升所导致的FPA上对应探测单元的温升称为热转化效率。FPA探测单元单位温升导致反光板转角的变化称为热机械响应效率。红外成像光学读出系统如图1(b)所示, 点光源发出的可见光, 经过分光镜, 由傅里叶透镜准

直, 被FPA反光板镀金面反射后再次通过该傅里叶透镜和分光镜。刀口滤波装置放置在透镜的后焦平面上, 发生偏转的反光板的衍射谱在傅里叶透镜的后焦平面上发生平移, 此时谱平面上的刀口滤波器定义了通光与不通光区域, 反光板偏转角越大, 谱的移动量也越大, 通过刀口滤波器的能量变化就越多。成像透镜将FPA像成在CCD靶面上, CCD接收到信号后做相减处理, 将FPA反光板的热致转角变形转化为CCD图像传感器上的灰度变化, 从而在CCD靶面上形成红外目标的灰度图像。光学检测灵敏度, 即CCD上的单位灰度变化对应的反光板转角变形, 是衡量光学读出非制冷红外成像系统性能的一项重要指标。由于制作工艺的影响, FPA的反光板有初始弯曲, 相较于理想平直反光板, 谱平面上光谱发生弥散, 当反光板偏转相同角度时, 其衍射谱在谱平面上移动相同距离, 但通过刀口滤波器的能量变化减少, 降低了系统的光学检测灵敏度^[7]。为此提出了两种优化FPA单元结构的方法来改善反光板的初始弯曲: 减薄反光板上金层和制作带加强筋的反光板, 理论分析并实验验证了其对反光板初始弯曲及系统光学检测灵敏度的影响。

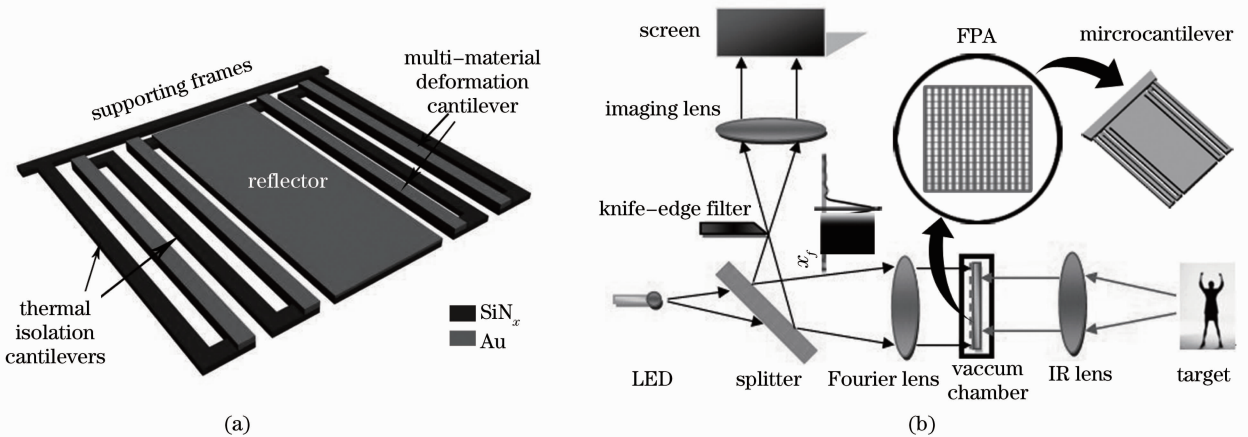


图1 (a) FPA单元结构; (b)光学读出红外成像原理

Fig. 1 (a) Structure of FPA unit; (b) principle of optical readout infrared imaging

FPA的制作工艺由4个主要步骤组成, 如图2所示。1)在清洗后的硅片上双面低压化学气相积(LPCVD)2微米厚的 SiN_x 膜; 2)在正面利用光刻得到掩模, 然后在 SiN_x 膜上刻蚀出微悬臂梁、反光板和框架的基本图形; 3)涂上光刻胶, 刻出光刻胶图形, 再溅射Au, 最后把余留的光刻胶和其上的Au一起去除, 得到间隔镀金结构; 4)在背面光刻出腐蚀

窗口并去除硅基底, 使之成为无基底FPA。

制作过程中, 反光板各层薄膜之间的晶格失配和热应力都会使反光板弯曲, 其曲率半径约为5~10 mm。该弯曲会对系统的光学检测灵敏度产生影响。

3 理论分析

在红外成像刀口滤波光学读出系统中, FPA反

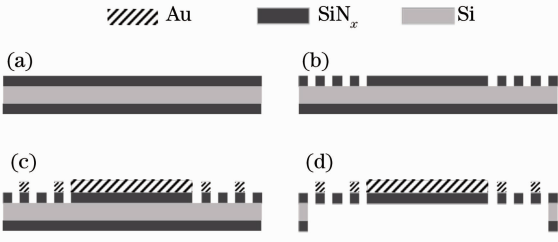


图 2 FPA 的工艺流程图。(a)在双面抛光的硅片表面沉积 SiNx; (b)在 SiNx 膜上刻蚀出基本图形; (c)得到双材料梁; (d)刻蚀硅基底得到薄膜结构

Fig. 2 Micro-fabrication process sequence of FPA. (a) Deposit SiNx on a double-polished Si wafer; (b) pattern pixel geometry; (c) form bimaterial legs; (d) wet etch the Si substrate result in a membrane structure

光板的初始弯曲及长度决定其在谱平面上衍射谱的形状,从而系统的光学检测灵敏度^[8]。变形反光板的长度为 L ,且沿长度方向的曲率半径为 R ($R > 0$),反光板被波长为 λ ($= 0.5 \mu\text{m}$),振幅为 A 的平面波照明,根据傅里叶光学^[9],在傅里叶透镜的后焦平面上,变形反光板的衍射场 $U_f(x_f; R, L)$ 可以表示为

$$U_f(x_f; R, L) = A/\lambda f \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}(x/L) \exp(j2\pi x^2/\lambda R) \times \exp(-j2\pi x x_f/\lambda f) dx, \quad (1)$$

式中 $U_f(x_f; R, L)$ 为衍射场在 x_f 轴上的分布还受参数 R, L 的影响, $f = 100 \text{ mm}$ 为傅里叶透镜的焦距, $\text{rect}(\cdot)$ 为门函数。

为了使不同 R, L 下的光学检测灵敏度之间可以比较,衍射谱的光强分布进行归一化

$$I_{\text{nor}}(x_f; R, L) = |U_f(x_f; R, L)|^2 / \int_{-\infty}^{+\infty} |U_f(x_f; R, L)|^2 dx_f. \quad (2)$$

当刀口滤波器的滤波位置位于 x_f 时,即刀口边界在 x_f ,由图 1(b)可知只有一 $\infty \sim x_f$ 的光线才能通过刀口滤波器到达 CCD,此时 CCD 上接收到的归一化光强为

$$N(x_f; R, L) = \int_{-\infty}^{x_f} I_{\text{nor}}(x_f; R, L) dx_f, \quad (3)$$

显然 $N(x_f; R, L)$ 在 x_f 处的变化率物理意义为:刀口边界位于 x_f 时的归一化光学检测灵敏度。成像系统一般使刀口滤波器的边界位于衍射谱中心(或滤波位置在衍射谱中心),因此 $N(x_f; R, L)$ 在 $x_f = 0$ 处的斜率代表成像系统的归一化光学检测灵敏度 Θ

$$\Theta(R, L) = \left. \frac{d}{d\theta_{\text{mir}}} N(x_f; R, L) \right|_{x_f=0} = \left. \frac{d}{dx_f} N(x_f; R, L) \right|_{x_f=0} \times \left. \frac{d}{d\theta_{\text{mir}}} x_f \right|_{x_f=0} = \left. \frac{\pi}{180} \frac{2}{\lambda L} \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}(x/L) \exp(j2\pi x^2/\lambda R) dx \right|^2 (\text{rad}^{-1}). \quad (4)$$

因此,当反光板的长度一定,系统的光学检测灵敏度由反光板的初始弯曲决定。

对于现有的 FPA,反光板与双材料变形梁上 Au 层厚度相同,为了提高 FPA 的热机械响应率,双材料梁需要具有较厚的 Au 层,但 Au 层的残余应力比 SiNx 层的残余应力大得多,使反光板有较大的弯曲变形,而反光板上 Au 层的作用是反射可见光,其厚度要求远低于双材料梁上的 Au 层;且由 Au 与 SiNx 薄膜构成的反光板的抗弯刚度可以通过改变其结构提高,为此提出了两种改善 FPA 结构的方法来降低反光板的初始弯曲:减薄反光板上金层厚度和制作带加强筋的反光板。

4 金层减薄的反光板

4.1 分析与设计

为了验证前面的理论分析,制作了单元尺寸为 $200 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 的 FPA1[#],在它的双材料梁和反光板上分别生长 Au 层,使双材料梁上 Au 层厚度为 $0.2 \mu\text{m}$,而反光板上 Au 层的厚度为 $0.025 \mu\text{m}$,这种方法仅比原有的 FPA 制作工艺多一块掩模板,容易实现。FPA2[#] 是传统方法制作的对照 FPA,其反光板和双材料梁上 Au 层厚度相同,都是 $0.2 \mu\text{m}$ 。FPA 的结构参数如表 1 所示。图 3 为 FPA[#] 和 FPA2[#] 反光板的长变方向的表面形貌图,其中不规则曲线是 Veeco Profiler 观测的 FPA 的反光板沿长度方向的表面形貌图,平滑曲线是 Veeco Profiler 拟合的表面形貌,并得到曲率半径。测量结果表明,通过该优化设计,反光板的曲率半径由 5.3 mm (FPA2[#]) 提高到 25 mm (FPA1[#])。

利用(2)式模拟 FPA1[#] 和 FPA2[#] 的反光板(长度都为 $180 \mu\text{m}$) 在谱平面上的衍射谱光强分布,如图 4 所示。当反光板完全平整时,曲率半径 $R = \infty$,衍射谱是一个标准的夫琅禾费衍射(图中的虚线所示),能量集中在零级;当反光板存在弯曲变形时衍射谱被弥散, FPA2[#] 比 FPA1[#] 的弯曲程度大,其衍射谱的弥散效应也更明显。衍射谱的弥散导致光学检测灵敏度的下降,利用(3)式,可获得与图 4 对应的归一化光强积分 $N(x_f; R, L)$ 分布图。图中曲线

中心点的斜率代表成像系统的光学检测灵敏度。由图 5 可知,反光板长度为 $180\ \mu\text{m}$ 时,理想平整反光板的光学检测灵敏度是 $12.56\ /(^{\circ})$,FPA1[#] 与 FPA2[#] 的

光学检测灵敏度分别为 $2.56\ /(^{\circ})$ 和 $0.46\ /(^{\circ})$,反光板的弯曲变形降低了光学检测灵敏度。

表 1 FPA 反光板的结构参数

Table 1 Structural parameters of FPA reflectors

	Unit size / $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	Reflector length / μm	Thickness of Au layer on reflector / μm	Thickness of Au layer on cantilever / μm	Thickness of SiN _x layer on reflector / μm
FPA1 [#]	200×200	180	0.025	0.2	2
FPA2 [#]	200×200	180	0.2	0.2	2

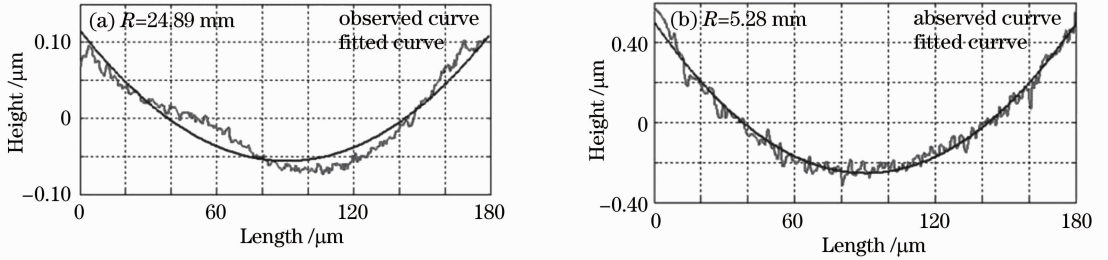


图 3 反光板沿长度方向的表面形貌图(Veeco Profiler)。(a) FPA1[#] ; (b) FPA2[#]

Fig. 3 Reflector surface profile of FPAs along the length direction by a Veeco Profiler. (a) FPA1[#] ; (b) FPA2[#]

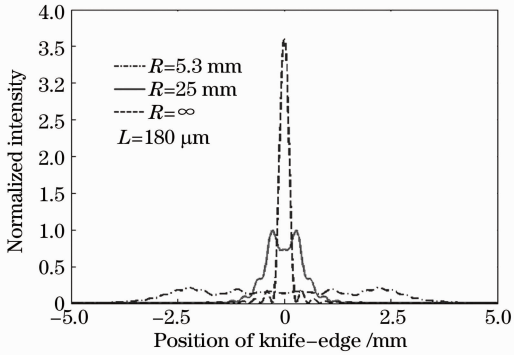


图 4 FPA1[#] 和 FPA2[#] 的反光板在谱平面上的衍射谱光强分布

Fig. 4 Normalized intensity distribution of diffraction spectrum of FPA1[#] and FPA2[#] reflectors on the spectrum plane

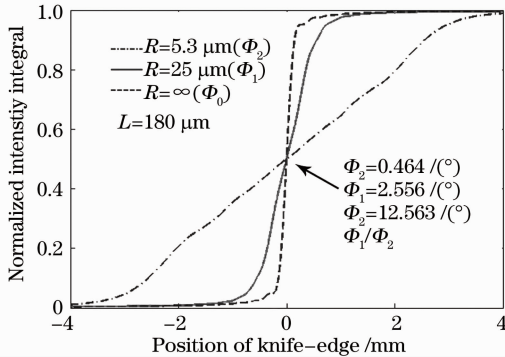


图 5 FPA1[#] 和 FPA2[#] 的反光板归一化光强积分分布
Fig. 5 Normalized intensity integral distribution of reflectors of FPA1[#] and FPA2[#]

4.2 实验结果

为了验证理论分析结果,用实验检测 FPA1[#] 和 FPA2[#] 的光学检测灵敏度。实验光路为图 1(b)中的光学读出系统(由于光学检测灵敏度与热源无关,所以不需要热源和红外透镜),FPA 固定在一个分辨率为 0.02° 的精密旋转台上,置于图中所示位置。像平面上使用 12 bit(70 dB)的 CCD,转动旋转台,记录各个反光板偏转角(相当于旋转台的转角)对应的 CCD 灰度,得到如图 6 所示的转角-灰度关系曲线。曲线中心点的斜率代表 FPA 的光学检测灵敏度。

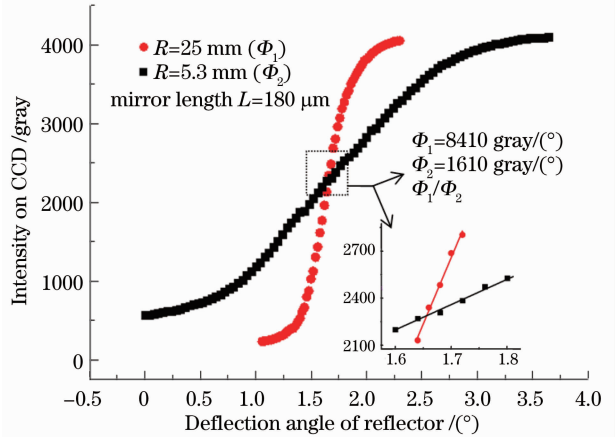


图 6 FPA1[#] 和 FPA2[#] 在 CCD(12 bit)上灰度与反光板偏转角的实验关系曲线

Fig. 6 Experimental relation between the gray level on CCD (12 bit) and the deflection angle of the reflectors of FPA1[#] and FPA2[#]

形状上,图 6 的两条实验曲线与图 5 的两条理论曲线非常接近。如图 6 所示,FPA1[#] 和 FPA2[#] 中心点的斜率,即 FPA 的光学检测灵敏度实验值分别为 8410 gray/(°)和 1610 gray/(°),两者之比约为 5.2,而理论分析结果为 $\theta_1/\theta_2=5.5$,理论与实验相

符。在室温下 FPA1[#] 和 FPA2[#] 对人体的成像结果如图 7 所示,其中 FPA1[#] 由于有较高的光学检测灵敏度,得到了更高的响应。实验证明了反光板带薄金的结构能有效降低反光板的初始弯曲,进而提高成像效果。

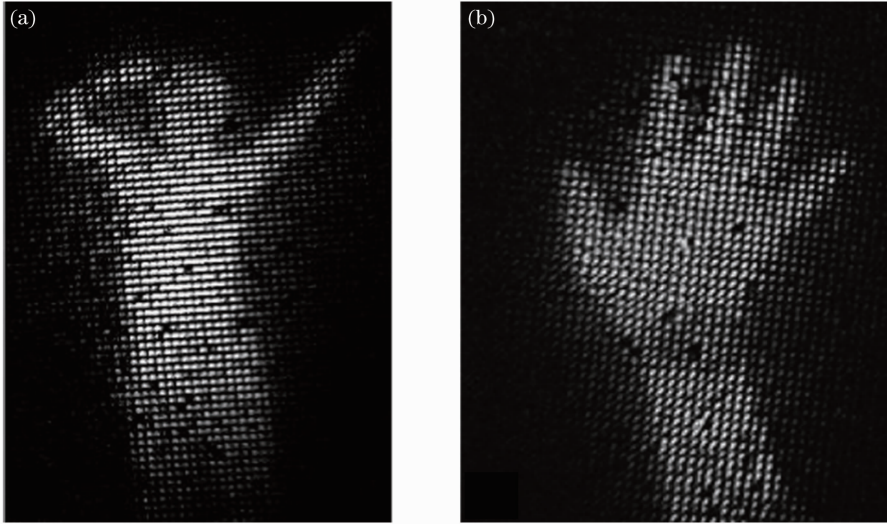


图 7 人体的热成像结果。(a) FPA1[#]; (b) FPA2[#]

Fig.7 Thermal imaging results of human body. (a) FPA1[#]; (b) FPA2[#]

5 带加强筋结构的反光板

5.1 分析与设计

对于 SiN_x/Au 双材料反光板,SiN_x 层越厚,反光板的抗弯刚度越大,其初始弯曲越小,因此将 SiN_x 层加厚能降低反光板的初始弯曲。然而加厚反光板的 SiN_x 层,在工艺上需要两次沉积 SiN_x,第一次沉积双材料梁上的薄 SiN_x,第二次沉积反光板上的厚 SiN_x,这个过程在工艺上难以实现。双材料梁与反光板上的 SiN_x 厚度相同,而 SiN_x 增厚会降

低双材料梁的热机械响应率。为了同时满足降低反光板初始弯曲且不降低双材料梁的热机械响应率的要求,设计了单元尺寸为 60 μm×60 μm,反光板带加强筋结构的 FPA3[#] (如图 8 所示)。在这种结构中,通过在硅片上刻蚀小槽、利用薄膜生长时对小凹槽的覆盖性质,制作了宽度为 2 μm,深度为 1.5 μm 的加强筋。这种方法只需沉积一次 SiN_x,降低了工艺难度。FPA3[#] 与无加强筋的对照 FPA4[#] 的设计参数如表 2 所示。

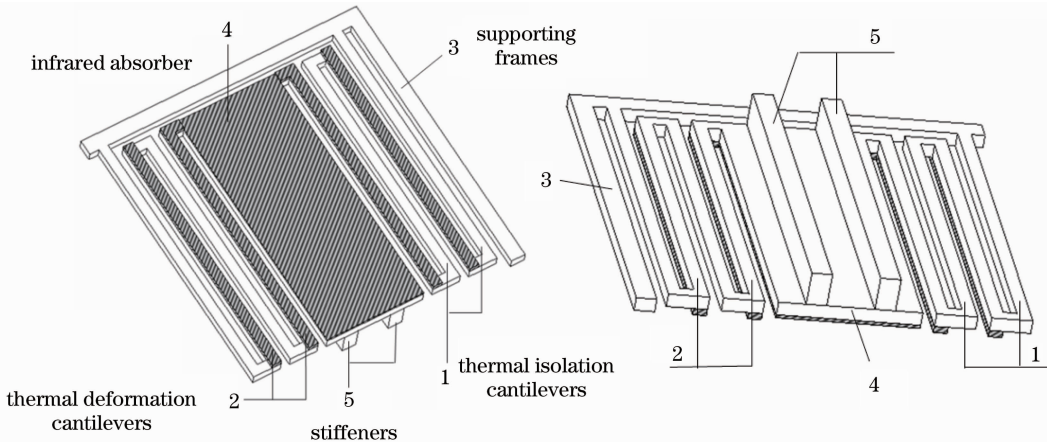


图 8 反光板带加强筋结构的 FPA 单元

Fig.8 Schematic diagram of a FPA unit with stiffeners on the reflector

表 2 反光板带加强筋 FPA 的结构参数

Table 2 Structural parameters of FPA with stiffeners on the reflector

	Unit size / $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$	Reflector length / μm	Thickness of Au layer on reflector / μm	Thickness of SiN_x layer on reflector / μm	Width and depth of stiffeners / $\mu\text{m}\times\mu\text{m}$
FPA3 [#]	60 \times 60	50	0.025	1.2	2 \times 1.5
FPA4 [#]	60 \times 60	50	0.025	1.2	Without stiffeners

在其他条件不变的条件下,反光板带加强筋前后的曲率半径之比可以根据材料力学求得。对带加强筋的反光板横截面建立如图 9 所示的坐标系,易知此时截面对 y 轴方向的形心矩为

$$I_{\text{str},yc} = \frac{\tau\alpha^3}{12} + \tau\alpha \left[\frac{bc(a+c)}{a\tau w + 2bc} \right]^2 + \frac{bc^3}{6} + 2bc \left[\frac{a+c}{2} - \frac{bc(a+c)}{a\tau w + 2bc} \right]^2, \quad (5)$$

式中 a 为反光板 SiN_x 层的厚度, b 为加强筋的宽度, c 为加强筋的高度, τ 为反光板的厚度, 由材料力学, 反光板曲率半径为

$$1/R = M/(EI), \quad (6)$$

式中 M 为由于残余应力失配引起的弯矩, I 为截面对形心的惯性矩, E 为弹性模量; 则普通反光板和带加强筋反光板的曲率半径之比为

$$R_{\text{str}}/R_{\text{com}} = I_{\text{str},yc}/I_{\text{com},yc} = \frac{I_{\text{str},yc}}{\frac{\tau\alpha^3}{12}}, \quad (7)$$

式中 R_{str} 和 $I_{\text{str},yc}$ 分别为带加强筋的反光板的曲率半径和截面对过形心的 y 轴的惯性矩, R_{com} 、 $I_{\text{com},yc}$ 分别为普通反光板的曲率半径和截面对过形心的 y 轴的惯性矩。

把表 2 设计参数代入(6)式得

$$R_{\text{str}}/R_{\text{com}} = 4.29. \quad (8)$$

可见,加强筋结构使得反光板平整度提高了 4.29 倍。

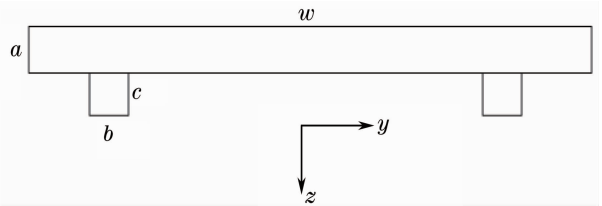


图 9 计算反光板截面形心矩的坐标系
Fig. 9 Coordinate system for calculating the centroid moment of reflector

图 10 为 FPA3[#] 和 FPA4[#] 的显微照片(左上角为单个像素), 在 FPA3[#] 的反光板上沿长度方向分布两根加强筋。图 10 中反光板上的凹痕是由于工艺限制, 对刻槽不能完全填充而产生的。图 11(a), (c) 分别是利用 Veeco Profiler 观测的 FPA3[#] 与 FPA4[#] 的表面形貌, 图 11(b), (d) 分别为 FPA3[#] 与 FPA4[#] 沿长度方向反光板的表面形貌图, 拟合出的曲率半径分别为 33.21 mm 和 7.86 mm。可见, FPA3[#] 与 FPA4[#] 的曲率半径之比为 4.23, 与理论预测值(4.29)相吻合。

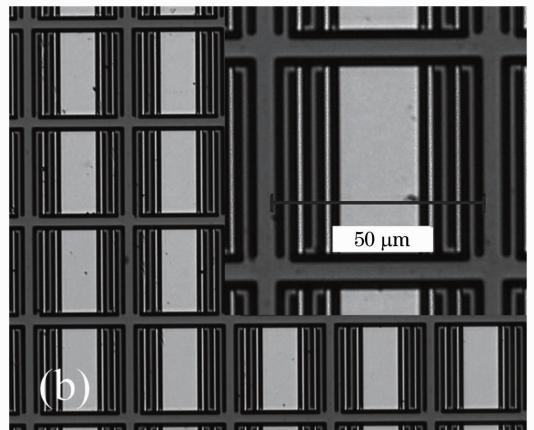
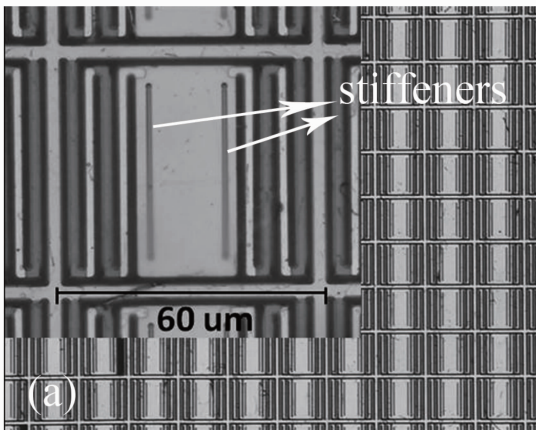


图 10 反光板带加强筋 FPA3[#] 和反光板不带加强筋 FPA4[#] 的显微照片。(a) FPA3[#]; (b) FPA4[#]

Fig. 10 Micrograph of portion FPA3[#] with stiffeners on the reflector and portion FPA4[#] without stiffeners.

(a) FPA3[#]; (b) FPA4[#]

利用(2)式模拟 FPA3[#] 和 FPA4[#] 的反光板(长度都为 50 μm)在谱平面上的衍射谱光强分布, 如图 12 所示。从方框中的细节图可以看出, 反光板弯曲程度

较大的 FPA4[#] 的衍射谱更弥散。利用(3)式, 获得了与图 12 对应的归一化光强积分 $N(x_f; R, L)$ 分布图(图 13)。由图 13 中可知, 反光板长度为 50 μm 时, 理

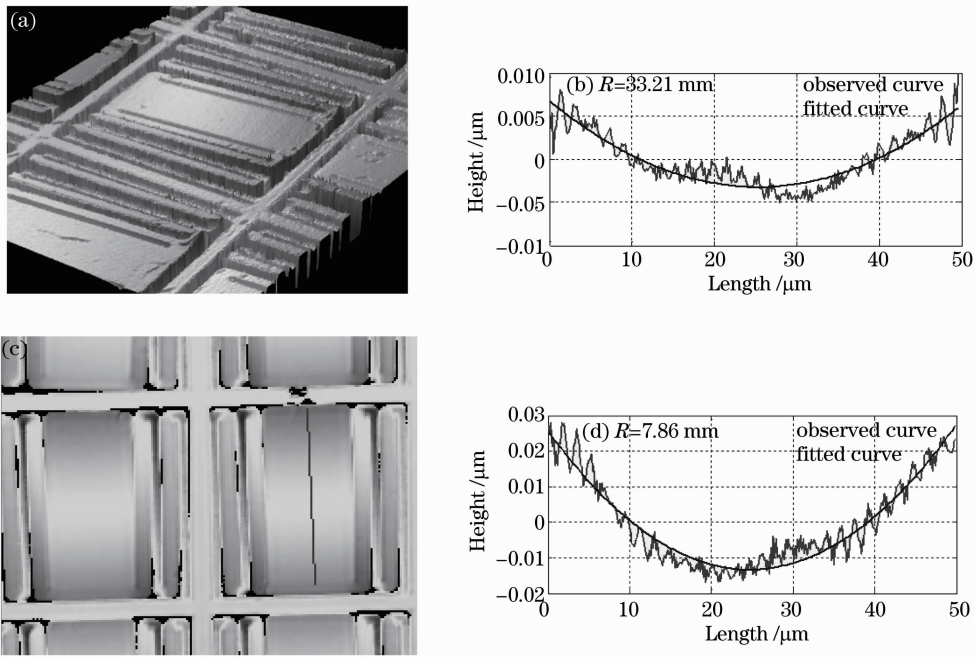


图 11 Veeco 测量图。(a) 观测的 FPA3[#] 表面形貌；(b) FPA3[#] 沿长度方向反光板的表面形貌；
(c) 观测的 FPA4[#] 表面形貌；(d) FPA4[#] 沿长度方面的表面形貌

Fig. 11 Images measured by a Veeco Profiler. (a) Observed surface profile of FPA3[#] ; (b) surface profile of FPA3[#] along the length direction; (c) observed profile of FPA4[#] ; (d) surface profile of FPA4[#] along the length direction

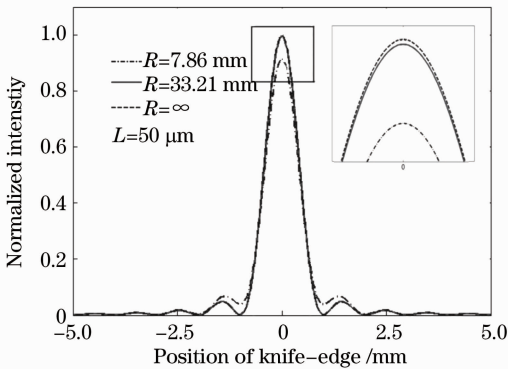


图 12 FPA3[#] 和 FPA4[#] 的反光板在谱平面上的衍射谱光强分布

Fig. 12 Normalized intensity distribution of diffraction spectrum of reflectors of FPA3[#] and FPA4[#] on the spectrum plane

想平整反光板的光学检测灵敏度是 $3.49 / (^{\circ})$, FPA3[#] 和 FPA4[#] 的光学检测灵敏度分别为 $3.47 / (^{\circ})$ 和 $3.19 / (^{\circ})$, 反光板弯曲变形较小的 FPA3[#] 的光学检测灵敏度较大。

5.2 实验结果

利用 3.2 节的实验方法和实验装置, 分别测得了 FPA3[#] 与 FPA4[#] 的转角-灰度关系曲线, 如图 14 所示, 其光学检测灵敏度分别为 $10600 \text{ gray}/(^{\circ})$ 和 $9000 \text{ gray}/(^{\circ})$, 两者之比约为 1.18。FPA3[#]、

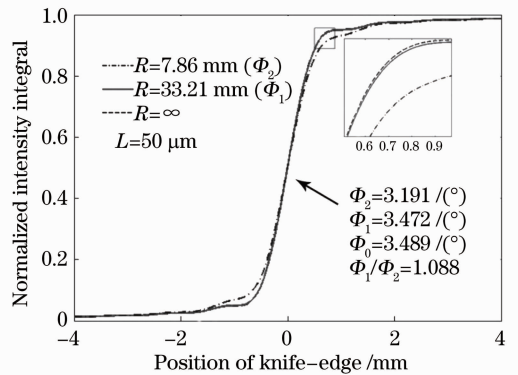


图 13 FPA3[#] 和 FPA4[#] 的反光板归一化光强积分分布
Fig. 13 Normalized intensity integral distribution of reflectors of FPA3[#] and FPA4[#]

FPA4[#] 的理论光学检测灵敏度之比为 $3.47/3.19 = 1.09$, 与实验相吻合。其在室温下 FPA3[#] 和 FPA4[#] 的成像结果如图 15 所示, 其中 FPA3[#] 有更高的响应。实验证明了加强筋结构能有效提高反光板的平整度, 从而提高成像效果。

6 讨 论

在 MEMS 加工过程中, 通过改进工艺使 Au 层和 SiN_x 层的残余应力相匹配, 能够降低反光板的初始弯曲。但需要对加工工艺进行比较彻底的研究和控制, 费用昂贵且周期较长, 不能在短时间内取得成

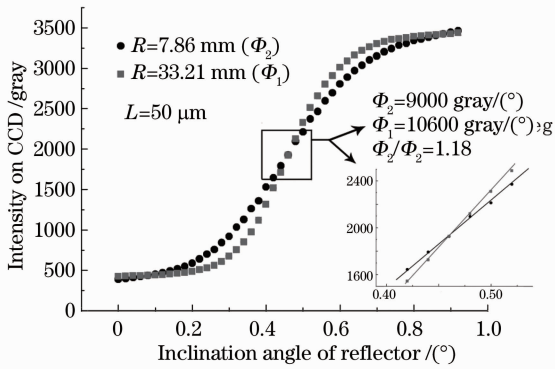


图 14 FPA3[#] 和 FPA4[#] 在 CCD(12 bit)上灰度与反光板偏转角的实验关系曲线

Fig. 14 Experimental relation between the gray level on CCD(12 bit) and the deflection angle of the reflectors of FPA3[#] and FPA4[#]

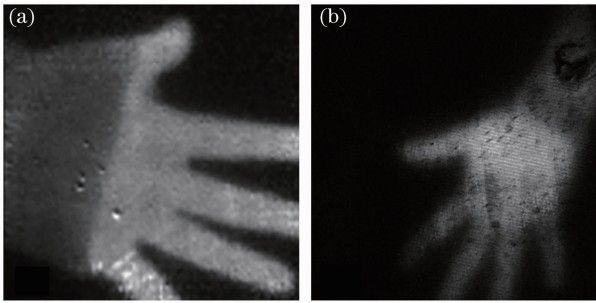


图 15 热成像结果。(a) FPA3[#]; (b) FPA4[#]
Fig. 15 Thermal imaging results obtained by
(a) FPA3[#]; (b) FPA4[#]

效。因此从反光板的结构设计出发提出优化方案。减薄反光板上金层可以降低反光板的初始弯曲。当 FPA 像素尺寸为 $200\ \mu\text{m}$ 时, Au 层厚度 $0.025\ \mu\text{m}$ 的反光板曲率半径是金层厚度 $0.2\ \mu\text{m}$ 的 4.71 倍。其缺陷在于 Au 层若太薄(小于 $0.025\ \mu\text{m}$)就不能有效反射可见光,所以反光板上的 Au 层一般为 $0.025\ \mu\text{m}$ 左右。这个厚度仍然使反光板具有 $25\ \text{mm}$ 左右的曲率半径(此时的 SiN_x 厚度为 $2\ \mu\text{m}$)。为了进一步优化,在反光板的 SiN_x 层上制作了加强筋。当 FPA 像素尺寸为 $60\ \mu\text{m}$, 反光板上金层已经减薄为 $0.025\ \mu\text{m}$ 时,带加强筋的反光板曲率半径是不带加强筋的 4.29 倍。该方法的缺陷是不仅在工艺上增加了一次光刻对准和刻蚀的过程,而且由于工艺起始就需要对硅片进行刻蚀,容易使干净的硅片受到“污染”,降低了 SiN_x 和硅片之间的黏附性,加大后续工艺难度。

7 结 论

为了降低无基底 FPA 反光板初始弯曲对光学检测灵敏度的影响,提出了两种优化方案:减薄反光板上金层和制作带加强筋的反光板,并依据方案设计制作了反光板金层减薄的 FPA(单元尺寸为 $200\ \mu\text{m}$)和反光板带加强筋结构的 FPA(单元尺寸为 $60\ \mu\text{m}$)。理论分析了优化设计对反光板初始弯曲及系统光学检测灵敏度的影响。FPA 表面形貌的测量结果证明这两种结构上的优化都分别将反光板曲率半径提高至原来的 4 倍以上。同时,灰度转角实验结果证明改进方案都有效提升了系统的光学检测灵敏度,与理论分析相符。红外成像实验结果证明改进方案都提高了系统对红外热源的响应。

参 考 文 献

- 1 Y. Zhao, M. Mao, R. Horowitz *et al.*. Optomechanical uncooled infrared imaging system; design, microfabrication, and performance [J]. *Microelectromechanical Systems*, 2002, **11**(2): 136~146
- 2 T. Ishizuya, J. Suzuki, K. Akagawa *et al.*. Optically readable bi-material infrared detector [C]. *SPIE*, 2001, **4369**: 342~349
- 3 L. Senesac, J. Corbeil, S. Rajic *et al.*. IR imaging using uncooled microcantilever detectors [J]. *Ultramicroscopy*, 2003, **97**(1-4): 451~458
- 4 C. Li, B. Jiao, S. Shi *et al.*. A novel uncooled substrate-free optical-readable infrared detector; design, fabrication and performance [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(7): 1981~1986
- 5 Dong Fengliang, Zhang Qingchuan, Wu Xiaoping *et al.*. Bimaterial micro-cantilever uncooled infrared imaging system-design and fabrication of microcantilever array [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2005, **24**(6): 409~413
董凤良, 张青川, 伍小平等. 双材料微梁阵列非制冷红外成像系统——微梁阵列的设计与制作 [J]. *红外与毫米波学报*, 2005, **24**(6): 409~413
- 6 Z. Miao, Q. Zhang, Z. Guo *et al.*. Optical readout method for microcantilever array sensing and its sensitivity analysis [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6): 594~596
- 7 H. Shi, Q. Zhang, J. Qian *et al.*. Optical sensitivity analysis of deformed mirrors for microcantilever array IR imaging [J]. *Opt. Express*, 2009, **17**(6): 4367~4381
- 8 Cheng Teng, Zhang Qingchuan, Gao Jie *et al.*. Analysis of optical readout sensitivity for uncooled infrared imaging based on optical readout [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0204002
程腾, 张青川, 高杰等. 光学读出非制冷红外成像技术的光学灵敏度分析 [J]. *光学学报*, 2012, **32**(2): 0204002
- 9 J. W. Goodman. Introduction to Fourier Optics [M]. Roberts & Company Publishers, 2005

栏目编辑: 李文喆