

文章编号:1001-9014(2009)04-0249-05

光学读出红外成像中反光板变形 对光学检测灵敏度的影响

高杰¹, 张青川^{1*}, 陈大鹏², 焦斌斌², 史海涛¹, 钱剑¹, 程腾¹, 伍小平¹

(1. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽 合肥 230027;

2. 中国科学院微电子研究所, 北京 100029)

摘要:在刀口滤波光学读出方法的基础上, 讨论了反光板弯曲的情况下, 刀口滤波方法的光学检测灵敏度与反光板长度之间的关系. 分析表明, 在反光板曲率半径一定的情况下, 光学检测灵敏度首先随着反光板长度的增加而增大, 达到最大值后随着反光板长度的增加而减小. 对于不同曲率半径和长度的反光板, 分析给出反光板长度 L 和曲率半径 R 在满足 $L^2/R = \lambda$ (λ 为照明光波长) 时, 光学检测灵敏度达到最大值. 实验测量了已制作的像素尺寸分别为 $200\mu\text{m}$, $120\mu\text{m}$ 和 $60\mu\text{m}$ FPA 的光学检测灵敏度, 其实验结果和理论分析一致.

关键词:非制冷红外成像; 双材料微悬臂梁; 光学读出; 焦平面阵列

中图分类号: TB331; TN216 **文献标识码:** A

EFFECT OF REFLECTOR DEFORMATION ON OPTICAL DETECTION SENSITIVITY FOR OPTICAL READOUT INFRARED IMAGING SYSTEM

GAO Jie¹, ZHANG Qing-Chuan^{1*}, CHEN Da-Peng², JIAO Bin-Bin², SHI Hai-Tao¹,
QIAN Jian¹, CHENG Teng¹, WU Xiao-Ping¹

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and
Technology of China, Hefei 230027, China

2. Institute of Microelectronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029)

Abstract: Based on the optical readout method with knife edge filter, the relationship between the optical detection sensitivity and reflector length was discussed under the circumstance that the reflector was bent. Analysis indicates that the optical sensitivity increases with the reflector's lengthening at first, then it reaches a maximum value, and then it decreases as the reflector continues to lengthen. For the reflectors with different curvature radii and lengths, analysis shows that the sensitivity will reach a maximum value when the expression $L^2/R = \lambda$ (L is length of reflector, R is curvature of the reflector, λ is wavelength of illumination light) is satisfied. The optical detection sensitivities of the fabricated FPAs with different pixel sizes as $200\mu\text{m}$, $120\mu\text{m}$ and $60\mu\text{m}$ were obtained experimentally. The result coincides with the theoretical analysis.

Key words: uncooled infrared imaging; bi-microcantilever; optical readout; FPA

引言

非制冷红外成像技术是基于探测器吸收入射红外辐射产生温升, 从而导致探测器的物理性能发生变化, 通过检测物理变化得到红外图像. 由于不用附加制冷装置, 所以系统更加轻便, 制造更加容易. 目前热型红外探测器的 NETD 值一般在 $50 \sim 100\text{mk}$.

随着 MEMS 工艺的发展, 双材料微悬臂梁阵列结构以及各种光学读出方法被引用到红外探测领域中来, 并被加以广泛的研究. 光学读出方法由于不需在每个感热像素上集成高灵敏度的读出电路 (ROIC), 大大降低了红外焦平面阵列 (FPA, Focal Plane Arrays) 的制作难度和费用. 2000-2001 年, University of California, Berkeley 的 Majumdar 研究小组发展了基

收稿日期: 2008-09-16, 修回日期: 2009-02-03

Received date: 2008-09-16, revised date: 2009-02-03

基金项目: 自然科学基金仪器专项基金 (10627201)、重点基金 (10732080) 和国家重大基础研究计划 (2006CB300404) 资助项目

作者简介: 高杰 (1979-), 男, 安徽滁州人, 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的研究. Corresponding author: E-mail: zhangqc@ustc.edu.cn.

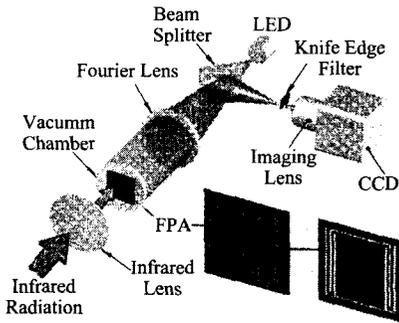


图1 刀口滤波光学读出方法的原理图
Fig.1 Schematic diagram of optical readout system

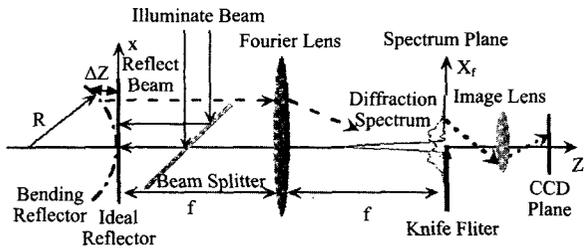


图2 光波经理想反光板和弯曲的反光板在 Fourier 透镜后焦面上的衍射谱分布
Fig.2 The two diffraction patterns on the spectrum plane of a Fourier lens after reflected from the ideal and bended reflectors on the object plane

于光学干涉读出方式的双材料微悬臂梁红外焦平面阵列,并获得了人体的热图像^[1]. 本课题组提出了刀口滤波的光学读出方法^[2],将微悬臂梁转角信号转化为 CCD 靶面上微梁像的光强信号变化. 当反光板是理想平直镜面时,光学检测灵敏度随着反光板的尺寸增大而线性增加,而反光板尺寸越小,光学检测灵敏度也越低. 在以往的研究中发现,随着反光板尺寸的减小,光学检测灵敏度并没有单调减小^[3-5]. 本文运用傅里叶光学理论对弯曲反光板的光学检测灵敏度进行了理论分析,给出不同曲率半径下光学检测灵敏度和反光板长度之间的关系,分析了最大光学检测灵敏度的条件和产生机理,并对分析结果进行了实验验证.

1 光学读出原理

刀口滤波光学读出红外成像系统的原理^[2-5]如图1所示,红外透镜将热物体的红外辐射能汇聚到放置于真空室中(0.1Pa)的FPA上,双材料微悬臂梁阵列产生温升,使得反光板产生与温升成比例的转角. LED光源发出的可见光,经过半透半反镜和傅里叶透镜准直后照在FPA镀金面上,其

反射光线再次通过该傅里叶透镜和半透半反镜,在透镜的后焦平面上放置刀口滤波装置,成像透镜将FPA像成在CCD靶面上,发生偏转的反光板的衍射谱将在傅里叶透镜的后焦平面上发生平移,移动量为 $2\theta f$ (其中 f 为傅里叶透镜的焦距, θ 为反光板的转角),此时放置在谱平面上的刀口滤波器定义了通光与不通光区域,偏转角 θ 越大,谱的移动量也越大,通过刀口滤波器的能量就越多. CCD接收到信号后做相减处理,即将FPA上的热图像转化为可见光图像.

2 光学检测灵敏度分析

刀口滤波光学读出系统的光学灵敏度被定义为^[2-5]:反光板单位转角变化($\Delta\theta$)导致的CCD灰度等级的变化(ΔI),即 $\Delta I/\Delta\theta$. 如图3所示,平面光波照射在微梁反光板上,反射光经傅里叶透镜转化为谱平面上微梁的衍射谱,当反光板发生弯曲后(图3中点画线所示,设曲率半径为 R),与理想平直反光

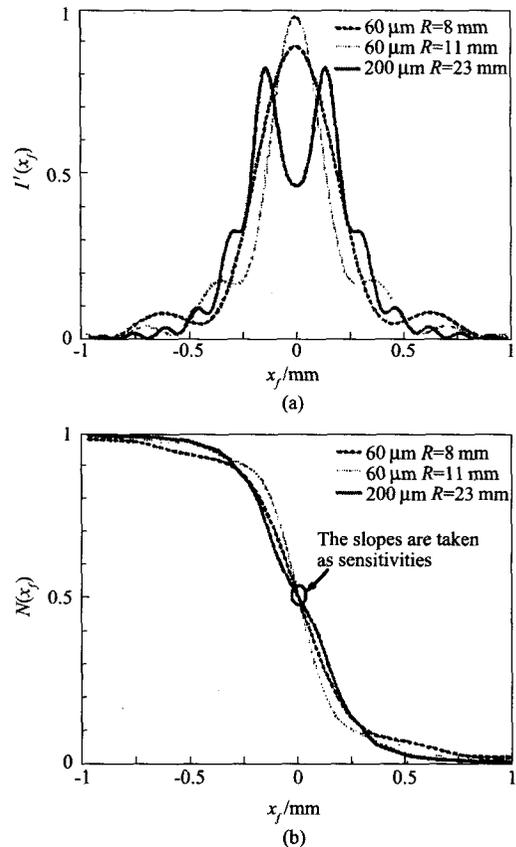


图3 数值模拟表1中三组FPA在谱平面上的归一化光强及其积分分布图 (a)光强分布 (b)光强的积分
Fig.3 Intensity distribution and intensity integrated on spectrum plane by simulation (a) intensity distribution (b) the intensity integral of curves in (a)

板相比,光程差为两倍的 ΔZ (ΔZ 为弯曲反光板与理想平直反光板在坐标 x 处沿 Z 方向的距离), ΔZ 可以表示为($x \ll R$)

$$\Delta Z = R - \sqrt{R^2 - x^2} \approx x^2/2R \quad (1)$$

所以坐标 x 处由于镜面弯曲造成的相延迟为

$$\phi(x) = (2\pi/\lambda)2\Delta Z = 2\pi x^2/\lambda R \quad (2)$$

其中 λ ($=0.5 \mu\text{m}$) 为照明光波长,则弯曲反光板的衍射谱光强分布为^[3]

$$I(x_f, R, L) = (A/\lambda f)^2 \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}(x/L) \exp(j2\pi x^2/\lambda R) \times \exp(-j2\pi x x_f/\lambda f) dx \right|^2 \quad (3)$$

其中 f ($=100\text{mm}$) 为傅里叶透镜焦距. 将衍射谱的光强分布 $I(x_f, R, L)$ 进行归一化处理得

$$I'(x_f, R, L) = I(x_f, R, L) / \int_{-\infty}^{+\infty} I(x_f, R, L) dx_f \quad (4)$$

当刀口在 x_f 处时, CCD 接收的归一化光强表示为

$$N(x_f, R, L) = \int_{-\infty}^{+\infty} I'(x_f, R, L) dx_f \quad (5)$$

$N(x_f, R, L)$ 在 $x_f=0$ 处的斜率代表系统归一化的光学检测灵敏度 Θ :

$$\Theta(R, L) = \frac{d}{dx_f} N(x_f, R, L) \Big|_{x_f=0} \times \frac{d}{d\theta} x_f \text{rad}^{-1} \quad (6)$$

由光杠杆原理,微梁转角 $d\theta$ 引起衍射谱位移 dx_f 为

$$dx_f = 2fd\theta \quad (7)$$

由式(5)~式(7),得到反光板弯曲情况下归一化的光学检测灵敏度 Θ

$$\Theta(R, L) = \frac{\pi}{180} \frac{2}{\lambda L} \left| \int_{-\infty}^{+\infty} \text{rect}(x/L) \exp(j2\pi x^2/\lambda R) dx \right|^2 \text{deg}^{-1} \quad (8)$$

针对本课题组已经成功制作的三组不同尺寸的 FPA (见表 1), 根据式(4)分别绘制衍射谱光强归一化分布, 如图 3(a) 所示. 根据式(5)绘制了刀口位置与 CCD 接收的归一化光强关系, 如图 3(b) 所示. 由式(8), 分别绘制了曲率半径 $R=8, 11, 23\text{mm}$ 时, 反光板尺寸和光学检测灵敏度的关系图, 如图 4 所示. 一方面, 在曲率半径一定的情况下, 光学检测灵敏度并不随反光板长度的增加而单调增大, 而是在某一固定长度达到最大值; 另一方面, 对于不同曲率半径的反光板, 最大灵敏度所对应的反光板长度, 随着曲率半径的减小而减小. 图 4 中标出了已制作的三组 FPA 的反光板尺寸和对应的归一化灵敏度 (Θ 的下标对应表 1 中阵列序号): $\Theta_1 = 2 \text{deg}^{-1}$, $\Theta_2 = 3.8 \text{deg}^{-1}$, $\Theta_3 = 3.2 \text{deg}^{-1}$. 则有 $\Theta_2/\Theta_1 = 1.9$, $\Theta_2/\Theta_3 = 1.19$. 通过式(8), 分别绘制了像素尺寸为 $60 \mu\text{m}$,

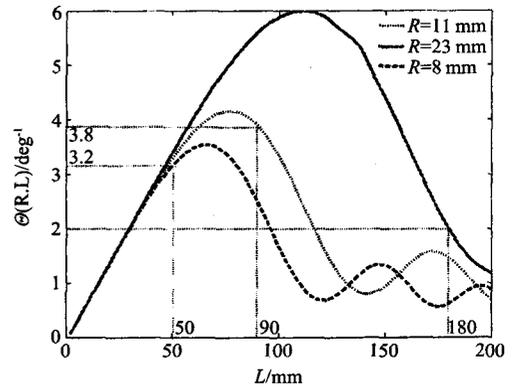


图 4 表 1 中三组 FPA 的光学灵敏度和反光板尺寸的关系
Fig. 4 The relationship between reflector length and optical sensitivity of FPA s in Table 1

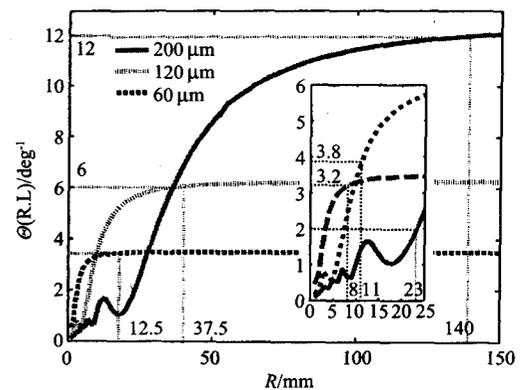


图 5 归一化光学检测灵敏度与反光板曲率半径的关系
Fig. 5 The relationship between normalized optical detection sensitivity and curvature of reflector

$120 \mu\text{m}$ 和 $200 \mu\text{m}$ 时, 光学检测灵敏度随反光板曲率半径变化的关系图, 如图 5 所示. 随着反光板曲率半径的增大, 灵敏度趋向于各自的最大值. 反光板尺寸越大, 其趋向的饱和值也越大, 但要求反光板曲率半径也越大 (反光板越平整). 以像素尺寸 $200 \mu\text{m}$ 为例, 当曲率半径达到 140mm , 光学检测灵敏度基本达到饱和值, 实际制作的 $200 \mu\text{m}$ FPA 的曲率半径仅为 23mm , 其光学检测灵敏度只达到饱和值的 $1/6$. 对于 $120 \mu\text{m}$ 和 $60 \mu\text{m}$ 的 FPA, 当曲率半径分别达到 37.5mm 和 12.5mm 时, 灵敏度已接近饱和.

3 实验结果

利用 Veeco NT1000 表面形貌测量系统, 分别测量了表 1 中 FPA 反光板的曲率半径, 图 6(a)~图 6(c) 分别为 $200 \mu\text{m}$ 、 $120 \mu\text{m}$ 和 $60 \mu\text{m}$ 像素尺寸的 Veeco 照片, 图 6(d)~图 6(f) 为对应的沿反光

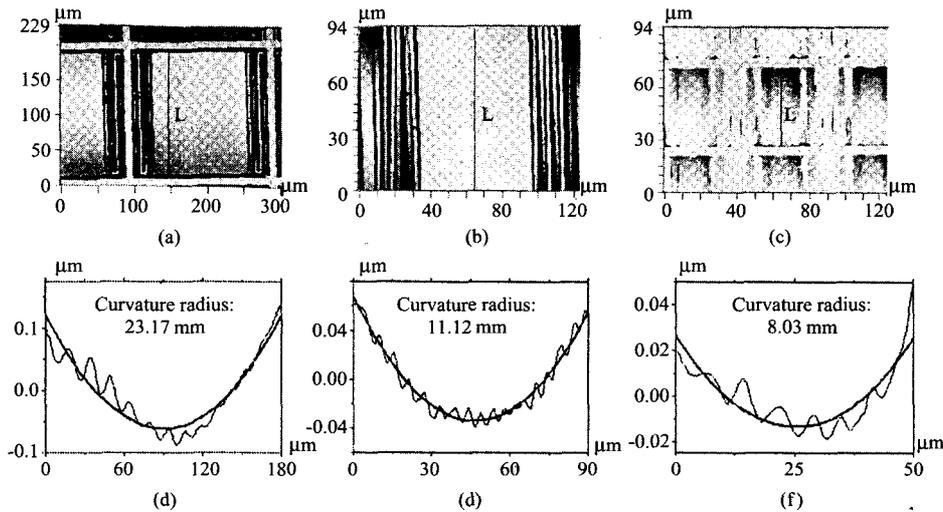


图6 表1中三组FPA的曲率半径,其中(a)、(b)、(c)Veeco照片,(d)、(e)、(f)为沿L方向的形貌及其拟合曲线
Fig.6 The curvature of the FPAs in Table 1, (a), (b), (c) are photos of the FPAs (d), (e), (f) are contour and the fitted curves

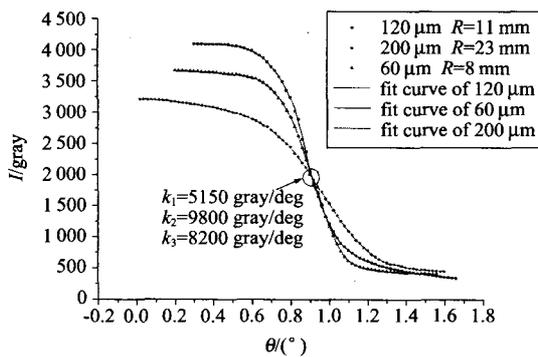


图7 实验测定的表1中三组FPA的灰度转角关系
Fig.7 Relationship between the intensity on the CCD and the inclination angle of the reflector in Table 1

板长度 L 方向的轮廓曲线. 采用图1实验光路, 测量其转角灰度变化曲线. 将FPA置于一个分辨率为 0.00125° 的精密旋转台上, 采用 0.025° 的步长, 像平面上使用12bit(70dB)的CCD接收光强, 记录下每一步旋转对应的灰度值. 由于旋转台的旋转导致FPA衍射谱的平移, 等效于移动刀口进行滤波, 因此转角灰度曲线在任何一个位置的斜率即代表刀口滤波器位于该位置时的光学灵敏度. 实验结果如图7所示, 三组FPA的光学检测灵敏度(对应刀口在谱平面上 $x_f = 0$ 位置)分别为: $K_1 = 5150 \text{ gray/deg}$, $K_2 = 9800 \text{ gray/deg}$, $K_3 = 8200 \text{ gray/deg}$, 有 $K_2/K_1 = 1.9$, $K_2/K_3 = 1.2$, 与式(8)中模拟计算的比值 ($\Theta_2/\Theta_1 = 1.9$, $\Theta_2/\Theta_3 = 1.19$) 一致, 说明式(8)关于反光板弯曲情况下的光学检测灵敏度模型是正确的.

表1 制作的微梁阵列尺寸参数及对应的光学检测灵敏度
Table 1 The dimension of the FPAs and the optical detection sensitivity of the FPAs

阵列序号	像素尺寸 (μm)	反光板长度 L (μm)	Veeco 测定的曲率半径 R (mm)	理论模拟的光学检测灵敏度 Θ (deg^{-1})	实验测定的光学检测灵敏度 K (gray/deg)
1	200	180	23	2	5150
2	120	90	11	3.8	9800
3	60	50	8	3.2	8200

4 光学检测灵敏度优化分析和讨论

由傅里叶光学理论, 当一束平行光(平面波)照射到发生弯曲的反光板上时, 其反射回的波阵面(波前)将发生弯曲, 经傅里叶透镜变换后, 在其谱平面上复振幅将重新分布, 如图2所示, 当反光板的尺寸 L 较小时, ΔZ_{max} (ΔZ_{max} 为弯曲反光板与理想平直反光板在边缘处沿 Z 方向的距离)造成的位相延迟小于 $\pi/2$, 反光板上各点(从中心到边缘)经过傅里叶透镜后在衍射谱中心位置的光强依次减小, 但每一点在谱平面上中心位置的光强都是正叠加, 所以中心位置的光强在增大. 随着反光板长度 L 的增加, 当 ΔZ_{max} 所造成的位相延迟达到 $\pi/2$ 时, 反光板上边缘的点在谱平面中心位置的光强贡献为零, 此时中心的叠加光强达到最大值. 如果反光板长度 L 继续增大, 使得 ΔZ_{max} 所造成的位相延迟超过 $\pi/2$, 超出部分的点在谱平面上中心位置的光强产生负叠加效果, 此时中心位置的光强将减小, 即式(2)应满足

$$\phi(x) |_{x=L/2} = 2\pi(L/2)^2/\lambda R = \pi/2, \quad \text{化简得 } L-R \text{ 应满足关系式}$$

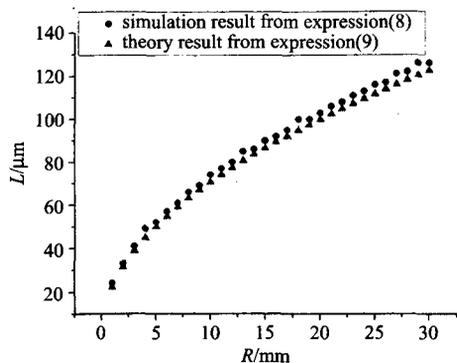


图8 最大光学检测灵敏度所要满足的 $L-R$ 关系
Fig.8 The relationship between L and R derived from Eqs. (8) and (9)

$$L^2/R = \lambda, \quad (9)$$

即要取得最大的光学检测灵敏度,反光板长度和曲率半径就必须满足式(9);在取得最大光学检测灵敏度条件下,任意给一定曲率半径就有确定的反光板长度与之对应。取 $R=1\sim 30\text{mm}$ 之间的整数时,通过式(9),分别计算对应的 L 值,绘出 $L-R$ 的关系曲线(图8中三角点)。为了进行验证,在同样条件下,通过式(8),计算得到灵敏度 Θ 取得最大值时所对应的反光板长度 L (图8中圆点),从图中可知对于相同的 R ,相应的 L 值差别很小,而且它们的变化趋势一致,所以上述关于最大灵敏度满足条件的理论是合理的。

由残余应力的理论^[6]可知,反光板的曲率半径主要取决于 MEMS 的制造工艺以及 SiN_x/Au 的厚度比,与反光板长度 L 无关。在上述条件都相同的情况下,制作的 FPA 有相同的曲率半径。在已知曲率半径的情况下,可以根据式(9)设计合理尺寸的反光板;另一种可能的途径是通过热处理的方法来调整 SiN_x/Au 的应力分布^[7],控制反光板的曲率达到预测值,使得 FPA 的灵敏度达到最大值。由于在 FPA 制作过程中, SiN_x 薄膜通过 LPCVD(低压化学汽相沉积)制作,其沉积温度在 600°C 左右,若通过热处理的方法来控制反光板的曲率半径,要求循环的温度达到 LPCVD 反应的沉积温度^[7],所以可行的方法是在已知工艺条件以及 SiN_x/Au 的各项参数情况下(曲率半径一定),通过式(9)设计合理的反

光板长度与该曲率半径相匹配从而获得最优的灵敏度。

5 结语

本文对不同反光板曲率半径下的灵敏度进行了讨论。理论分析表明,在反光板曲率半径一定的情况下,随着反光板尺寸的变化,光学检测灵敏度存在最大值;对于不同曲率的反光板,最大灵敏度所对应的反光板长度,随着曲率半径的减小而减小。其次,讨论了最大光学检测灵敏度的产生机理,给出了取得最大光学检测灵敏度的必要条件,并通过弯曲反光板的光学检测灵敏度进行数值模拟,验证了理论分析的结果。最后,讨论了提高光学检测灵敏度的途径,为进一步优化设计 FPA 提供理论依据。

REFERENCES

- [1] Zhao Y, Mao M, Horowitz R, et al. Optomechanical uncooled infrared imaging system; design, microfabrication and performance[J]. *J. MEMS*, 2002, **11**(2): 136—146.
- [2] DUAN Zhi-Hui, ZHANG Qing-Chuan, WU Xiao-Ping, et al. Uncooled optically readable bimaterial micro-cantilever infrared imaging device[J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2003, **20**(12): 2130—2132.
- [3] MIAO Zheng-Yu, ZHANG Qing-Chuan, GUO Zhe-Ying, et al. Optical readout method for microcantilever array sensing and its sensitivity analysis[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(6), 594—596.
- [4] GUO Zhe-Ying, ZHANG Qing-Chuan, CHEN Da-Peng, et al. Optical-readout room temperature infrared imaging[J]. *J. Experimental Mechanics*(郭哲颖,张青川,陈大鹏,等.光学读出室温物体红外成像.实验力学), 2005, **20**(2): 213—218.
- [5] DONG Feng-Liang, ZHANG Qing-Chuan, WU Xiao-Ping, et al. Bi-material micro-cantilever uncooled infrared imaging system-design and fabrication of Micro-Cantilever Array[J]. *J. Infrared Millim. Waves*(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.红外与毫米波学报), 2005, **24**(6): 409—413.
- [6] Stoney G G. The tension of metallic films deposited by electrolysis[C]. London: proc Roy. Soc. A, 1989, **82**, 172—175.
- [7] Lin I K, ZHANG Yan-Hang, ZHANG Xin. The deformation of microcantilever-based infrared detectors during thermal cycling[J]. *J. Micromech. Microeng*, 2008, **18**, 075012.