

基于微悬臂梁阵列的凝视型激光告警系统的设计与实现

李 冰¹ 赵跃进¹ 张 超² 郭小虎¹ 孔令琴¹

(¹ 北京理工大学光电学院, 北京 100081

² 中国环境管理干部学院现代化教学中心, 河北 秦皇岛 066000)

摘要 设计并实现了一种基于微悬臂梁焦平面阵列的凝视型激光告警系统。该系统通过微悬臂梁焦平面阵列及成像 CCD 来实现对入射激光的精确定向。入射激光通过红外镜头辐射到微悬臂梁焦平面阵列时会使微悬臂梁发生变形,通过光读出系统将这种变化成像在 CCD 上就可以判断出激光的入射方向。实验结果表明:镜头焦距为 60 mm、微悬臂梁面元为 $80\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$ 时,告警系统的视场角为 $\pm 15^\circ$,分辨率可达到 0.5° 。此告警系统视场角大、定向精度高,并且避免了激光对 CCD 的干扰及损坏。

关键词 测量; 激光技术; 激光告警; 微悬臂梁焦平面阵列; 光学读出

中图分类号 TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0316001

Design and Realization of Staring Laser Warning System Based on Microcantilever Focal Plane Array

Li Bing¹ Zhao Yuejin¹ Zhang Chao² Guo Xiaohu¹ Kong Lingqin¹

¹ School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

² Modern Teaching Center, Environmental Management College of China, Qinhuangdao, Hebei 066000, China

Abstract A novel staring laser warning system based on microcantilever focal plane array is presented. The direction of incident laser can be measured by CCD and microcantilever focal plane array. The microcantilever bends owing to laser radiation captured by infrared lens, meanwhile CCD records the change by means of optical readout system. The experimental results indicate that the field of view is $\pm 15^\circ$ and the resolution is 0.5° , when the focal length of infrared lens is 60 mm and the microcantilever size is $80\ \mu\text{m}\times 100\ \mu\text{m}$. The warning system, with large field of view and high resolution, avoids the interference and damage of CCD caused by laser radiation.

Key words measurement; laser technique; laser warning; microcantilever focal plane array; optical readout

OCIS codes 120.1880; 100.2550; 220.4830

1 引 言

随着激光技术的迅速发展,各种激光武器和装置越来越多地应用于现代战场,其破坏能力已经严重威胁到各种军用和民用设施。因此,实时探测和识别来袭激光的波长、方位等特征信息具有重要的意义。目前,凝视型激光告警系统主要分为成

像型与非成像型两种。成像型的告警系统主要是通过红外镜头将入射激光聚焦到电荷耦合器件(CCD)等光学成像器件上,通过光斑在 CCD 上的位置来判断入射光的方向^[1-5]。非成像型的激光告警系统通常在红外镜头后部安装一个透射光栅,利用 CCD 等光学成像器件来测量激光所产生衍射谱的分布,从

收稿日期: 2013-07-30; 收到修改稿日期: 2013-10-16

基金项目: 2010 北京市优博指导教师科研项目(YB20101000701)

作者简介: 李 冰(1984—),男,博士研究生,主要从事电子对抗方面的研究。E-mail: linuocao@163.com

导师简介: 赵跃进(1958—),男,教授,博士生导师,主要从事电子稳像、太赫兹成像技术、基于微机电系统的红外成像技术等方面的研究。E-mail: yjzhao@bit.edu.cn

而获得来袭激光的波长以及方向等信息^[6-11]。

近年来,各国学者对激光辐射 CCD 所造成的材料及结构的破坏进行了大量研究^[12-16]。林均仰等^[17]通过实验指出,脉冲激光的能量密度达到 1.45 mJ/cm² 就可以导致 CCD 发生严重串扰,而达到 100 mJ/cm² 时直接导致 CCD 像素的熔化,造成永久性破坏。目前的激光告警装置大多是入射激光直接会聚到光学成像器件上,并且所使用的均是普通商用光学成像器件,因此严重降低了告警系统的使用寿命。微悬臂梁阵列作为新型的热机械器件具有更高的热承受能力。Gong 等^[18]使用 1.315 μm 的激光对焦平面阵列(FPA)进行热性能实验,指出其最高承受温度可达到 2197 K,相比于 CCD 来说具有明显的优势。高精度、长使用寿命已成为激光告警领域的热点研究对象,微悬臂梁的上述优点使其应用于激光告警系统成为可能,目前还没有相关报道。本文针对现有告警系统容易受到激光损伤的缺陷,利用微悬臂梁的热机械效应以及高损坏阈值设计了一种基于微悬臂梁阵列的凝视型激光告警系统,在保证告警能力的同时,很好地解决了激光对 CCD 损害的问题,延长了告警系统的使用寿命。

2 系统的原理分析

光学读出的红外成像技术利用了双材料微悬臂

梁的热机械效应。当有激光辐射到悬臂梁上时,两种材料的温度便会发生改变,由于二者的热膨胀系数不同,便会导致悬臂梁产生变形^[19],如图 1 所示。

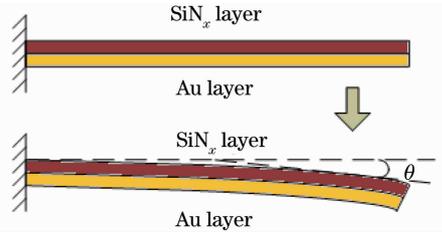


图 1 双材料悬臂梁受到红外辐射后发生变形
Fig. 1 Deflection of bimaterial cantilever under infrared radiation

双材料微悬臂梁的偏转与温度之间的关系可表示为^[20]

$$\delta = 3(\alpha_{Au} - \alpha_{SiN}) \left(\frac{n+1}{K} \right) \left(\frac{L_m^2}{d_{SiN}} \right) \times \Delta T, \quad (1)$$

式中 $n = d_{Au}/d_{SiN}$, $K = 4 + 6n + 4n^2 + \phi n^3 + (\phi n)^{-1}$, $\phi = E_{Au}/E_{SiN}$, d 为双层材料的厚度, α 为热膨胀系数, L_m 为悬臂梁的长度, E 为弹性模量。当悬臂梁受热发生变形时,通过光学读出系统,便可以使用 CCD 或 CMOS 等光学成像器件将这种变化记录下来。

成像型告警系统对入射角的判定是通过计算光斑在 CCD 上的位置来实现的。由于激光光源距离告警系统较远,因此入射激光通常作为平行光束处理,入射光通过透镜聚焦后聚焦于 FPA 像面,如图 2 所示。

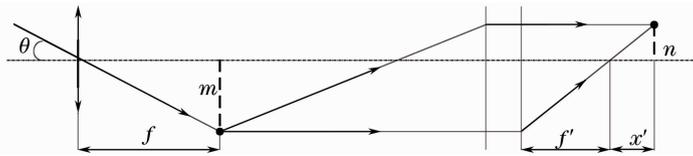


图 2 入射激光定向原理图
Fig. 2 Schematic diagram of judging incident laser direction

入射光聚焦于 FPA 后,通过后部的光学读出系统将光斑位置成像于相应的 CCD 像面上,入射角度可以表示为

$$\begin{cases} m = -\frac{n}{\beta} = -\frac{x'}{f' \cdot n} \\ \theta = \arctan \frac{m}{f} \end{cases}, \quad (2)$$

式中 f 为镜头焦距, m 为 FPA 上入射光斑相对于中心的偏移量, n 为 CCD 上光斑相对于中心的偏移量, f' 为像方焦距, x' 为像距。这种结构的激光告警系统避免了激光对 CCD 的直接照射,延长了成像系统 CCD 的寿命。

3 实验装置及过程

整个告警系统由红外镜头、微悬臂梁焦平面阵列、光学读出系统以及成像 CCD 组成。红外镜头与微悬臂梁阵列安放在系统的最前方用以捕捉并感应入射激光。光学读出系统由可见光源和光学读出系统组成, CCD 放置在像面处用以对微悬臂梁阵列成像,如图 3 所示。发光二极管(LED)光源发出的可见光通过小孔、准直透镜形成平行光,经半反半透镜入射到位于透镜 L1 前焦平面的微悬臂梁阵列的表面。使用 CCD 对没有受到激光辐射的 FPA 进行采集并将此图像作为背景图像。当有激光入射到

FPA 单元上时,由于吸收红外辐射后会发生偏转, CCD 所采集到的图像也会发生相应的变化,将此时

的图像与背景图像相减就可以得到反映当前 FPA 上亮度变化的差图像,从而实现了对激光的探测^[21]。

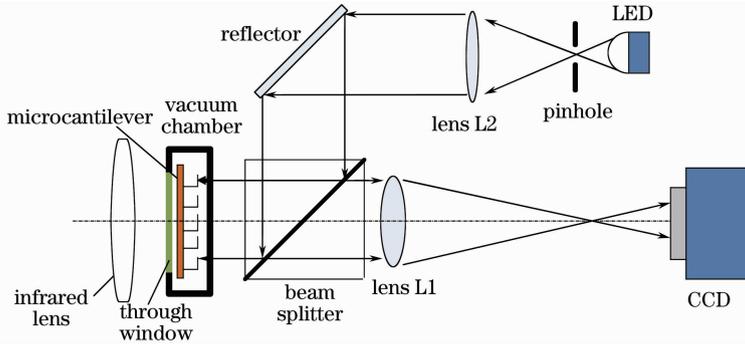


图 3 基于微悬臂梁阵列的激光告警系统结构图

Fig. 3 Schematic diagram of laser warning system based on microcantilever array

红外镜头的选取直接关系到探测精度。由于激光光源距离告警系统较远,因此入射激光通常作为平行光束处理,到达告警系统时的光斑一般大于镜头的集光孔径,通过圆形孔径光阑接收符合夫琅禾费衍射理论,入射光通过聚焦后形成艾里斑作用于 FPA 像面。为了使得 FPA 的空间分辨率得到充分发挥,根据艾里斑表达式可以确定所选用镜头的参数

$$1.22\lambda \cdot \frac{f}{D} \leq a, \quad (3)$$

式中 a 为像素尺寸, f 为镜头焦距, D 为镜头直径。

FPA 面元的尺寸通常大于 CCD 像素的尺寸,

因此放大倍数的绝对值要小于 1。将 FPA 看做为物面, CCD 是与 FPA 共轭的像面。根据牛顿垂轴放大率表达式可得

$$\beta = -\frac{b}{a} = -\frac{x'}{f'}, \quad (4)$$

式中 a 为 FPA 的尺寸, b 为 CCD 的尺寸。

系统选用的无基底微悬臂梁阵列,其像素数为 $190 \text{ pixel} \times 200 \text{ pixel}$,单元尺寸为 $100 \mu\text{m} \times 80 \mu\text{m}$,如图 4 所示。红外镜头的焦距 f 为 60 mm 。CCD 为 WATEC 公司的 WAT-525EX2, CCD 尺寸为 $1/2''$ (0.0127 m),总像素为 $811 \text{ pixel} \times 508 \text{ pixel}$,像素尺寸为 $8.4 \mu\text{m} \times 9.8 \mu\text{m}$ 。可见光选用 LED 绿光光源。为了抑制杂散光以及入射激光,在 CCD 前加入 10 dB 的衰减片以及带宽为 10 nm 的 560 nm 窄带滤光片。

4 实验结果与分析

基于以上理论研究和各项参数分析,研发了基于微悬臂梁阵列的凝视型激光告警系统的原理样机,如图 5 所示。

以波长 $1.064 \mu\text{m}$ 的脉冲激光作为激光光源,并通过准直扩束系统对激光进行扩束。由于实验空间

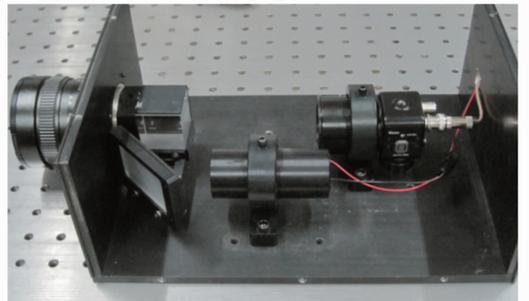


图 5 基于微悬臂梁阵列凝视型激光告警系统的原理样机

Fig. 5 Principle prototype of laser warning system based on microcantilever array

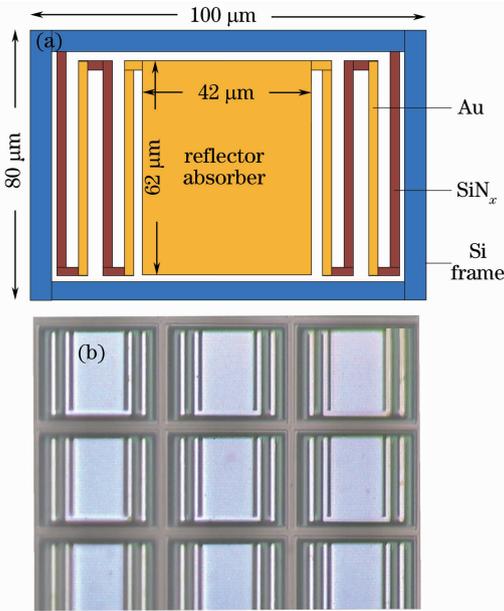


图 4 系统所选用的微悬臂梁阵列。(a) 单个微悬臂梁的尺寸;(b) 显微镜下的微悬臂梁阵列

Fig. 4 Microcantilever array in the system. (a) Size of single microcantilever; (b) photo of microcantilever array under microscope

的限制,将一面反光镜固定在二维旋转台上并放置于准直扩束系统与告警装置之间,通过转动反光镜来改

变入射激光的方向从而完成实验测试。图 6 为入射角分别为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 时,采集的原始图像。

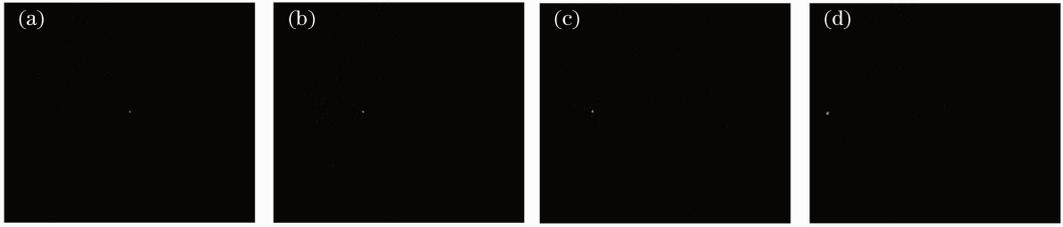


图 6 不同入射角下光斑的位置。(a) 0° 入射角;(b) 5° 入射角;(c) 10° 入射角;(d) 15° 入射角

Fig. 6 Spot directions of different incident angles. (a) 0° incident angle; (b) 5° incident angle; (c) 10° incident angle; (d) 15° incident angle

从图 6 中可以看出,随着入射角度的变化,光斑的位置也随之变化。根据(2)式可计算出激光的入射角。表 1 是通过实验得到的部分数据。

表 1 实验结果

Table 1 Experimental results

Actual $\theta / (^\circ)$	Measurement $\theta' / (^\circ)$
15	15.09
14.5	14.58
14	14.07
13.5	13.58
13	13.07
12.5	12.55
12	12.05
11.5	11.56
11	11.06
10.5	10.56
10	10.03
9.5	9.54
9	9.03
8.5	8.48
8	7.95
7.5	7.46
7	6.95
6.5	6.48
6	6.03
5.5	5.52
5	5.03
4.5	4.52
4	4.02
3.5	3.50
3	2.98
2.5	2.51
2	2.01
1.5	1.49
1	1.00
0.5	0.5
0	0.00

由表 1 可见,系统的角度误差均在 0.2° 以内,并且基本上随着入射角的增大而增加。这是由于成像透镜仅为单个球面镜像差比较大,并且光学系统的准直等问题也会导致误差的出现。

告警系统的另外一个重要指标就是角分辨率。这里可以将 FPA 单元看做物,那么在其共轭的 CCD 像面上将产生相应的像。当入射激光角度发生变化时,CCD 上像的位置也就发生相应的改变,而当两个像刚好被区分时,入射角之间的差值即为系统能够辨别的最小角度。根据(2)式可以得出系统最小分辨角 $\Delta\theta$ 的表达式为

$$\begin{cases} \Delta = \frac{\Delta'}{\beta} \\ \Delta\theta = \arctan \frac{\Delta}{f} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 Δ' 为 CCD 上的偏移距离, Δ 为 FPA 上的偏移距离。由(5)式可以看出角分辨率与镜头焦距、放大率有关。并且,入射光斑在 FPA 上每偏移一个单位面元所对应的角度即是系统的分辨率。本系统的放大率设置为 0.5,FPA 可以完全成像于 CCD 上。根据(5)式可计算得出系统的角分辨率为 0.15° 。

在实验过程中,当入射角度改变 0.15° 时,光斑会有部分发生重叠,导致判断出现错误。当入射角改变不小于 0.5° 时,相当于在 FPA 上偏移约不小于 4 个面元的距离,CCD 上可清晰分辨像点位置,即系统实际角分辨率为 0.5° 。实际的分辨率低于理论值,这是由于成像透镜仅为一个单球面透镜,无法对球差、彗差等误差进行校正,并且装调误差、系统的准直等问题都会引起像差增大,从而降低了实际角分辨率。系统角分辨率可以通过改进成像系统以及使用图像处理等手段来进一步提高。

5 结 论

针对目前激光告警技术的要求,提出并研制了一种基于微悬臂梁阵列的凝视型激光告警系统。该系统使用焦距为 60 mm 红外镜头、面元为 $100\ \mu\text{m}\times 80\ \mu\text{m}$ 的 FPA,实现 $\pm 15^\circ$ 的告警视场角, 0.5° 的角分辨率。与传统的凝视型的激光告警系统相比,在保证各项告警指标的同时,很好地避免了由于入射激光的直接辐射对 CCD 所造成的干扰以及热伤害。本系统通过对成像系统的完善以及对图像进行更好的去噪处理,有望进一步提高探测精度。

参 考 文 献

- Xu Yuannan, Zhao Yuan, Jin Chenfei, *et al.*. Design of the imaging satellite-borne laser warning system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 357-360.
许元男, 赵 远, 靳辰飞, 等. 一种成像型星载激光告警系统的设计[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(3): 357-360.
- Ying Jiaju, Wang Yongzhong, He Yongqiang, *et al.*. Analysis of detective sensitivity for omni-directional laser warning system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 1038-1042.
应家驹, 王永仲, 何永强, 等. 全向激光告警系统的探测灵敏度分析[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 1038-1042.
- Dong Hongjun, Zhou Zhongliang, Wang Long. Subpixel location algorithm for laser spot in fish-eye imaging laser warning system[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(9): 0917002.
董红军, 周中亮, 王 龙. 鱼眼成像型激光告警系统光斑中心亚像元定位方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(9): 0917002.
- Ying Jiaju, Wang Yongzhong, He Yongqiang, *et al.*. Location error analysis of laser spot in imaging laser warning system[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(3): 431-436.
应家驹, 王永仲, 何永强, 等. 成像激光告警的光斑定位误差分析[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(3): 431-436.
- Zhang Weian, Wang Long, Ren Jianguo. Research on laser threat source localization of omni-directional laser warning system based on scattering laser detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0115004.
张维安, 王 龙, 任建国. 针对散射激光的全向激光告警系统激光威胁源定位技术研究[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0115004.
- Wang Long, Wang Yongzhong, Shen Xueju, *et al.*. Design of staring laser threat detection system based on Michelson interferometer[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(3): 0312003.
王 龙, 王永仲, 沈学举, 等. 基于迈克耳孙干涉仪的凝视型激光告警系统设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(3): 0312003.
- Zhang Jilong, Tian Erming, Wang Zhibin. Laser warning receiver based on sinusoidal transmission grating[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(3): 326-330.
张记龙, 田二明, 王志斌. 基于正弦透射光栅的激光告警接收机研究[J]. *红外与激光工程*, 2006, 35(3): 326-330.
- Zhang Chao, Niu Yanxiong, Su Ping, *et al.*. Design and realization of staring laser detecting and warning system based on sinusoidal grating [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(10): 1016001.
张 超, 牛燕雄, 苏 平, 等. 基于正弦光栅的凝视型激光探测告警系统的设计与实现[J]. *中国激光*, 2012, 39(10): 1016001.
- Tian Erming, Zhang Jilong, Li Xiao, *et al.*. Study on miniature static Fourier transform spectrometer used in laser warning receiver[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, 29(3): 853-857.
田二明, 张记龙, 李 晓, 等. 激光告警系统中小型静态傅里叶

- 变换光谱仪的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(3): 853-857.
- Zhang Jilong, Wang Zhibin, Li Xiao, *et al.*. A review of laser warning receivers based on spectral discrimination and coherent detection[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2006, 20(2): 95-101.
张记龙, 王志斌, 李 晓, 等. 光谱识别与相干识别激光告警接收机评述[J]. *测试技术学报*, 2006, 20(2): 95-101.
- Wang Long, Wang Yongzhong, Shen Xueju, *et al.*. Study of wide-angle staring laser threat detection system based on grating diffraction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(3): 0312005.
王 龙, 王永仲, 沈学举, 等. 基于光栅衍射的广角凝视型激光告警技术研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(3): 0312005.
- Bi Juan, Zhang Xihe, Ni Xiaowu. Mechanism for long pulse laser-induced hard damage to the MOS pixel of CCD image sensor[J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(11): 114210.
毕 娟, 张喜和, 倪晓武. 长脉冲激光对组成 CCD 图像传感器的 MOS 光敏单元的硬破坏机理研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(11): 114210.
- Qiu Dongdong, Zhang Zhen, Wang Rui, *et al.*. Mechanism research of pulsed-laser induced damage to CCD imaging devices[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(2): 0214006.
邱冬冬, 张 震, 王 睿, 等. 脉冲激光对 CCD 成像器件的破坏机理研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(2): 0214006.
- Zhu Zhiwu, Zhang Zhen, Cheng Xiangai, *et al.*. Damage phenomenon and probability of CCD detectors under single-laser-pulse irradiation[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 113-118.
朱志武, 张 震, 程湘爱, 等. 单脉冲激光对 CCD 探测器的硬损伤及损伤概率[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(1): 113-118.
- Zhang Yingyuan, Zheng Rongshan, Liu Jinsong. Analysis of pulsed laser disturbance and damage on satellite-borne detector[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(9): 1758-1760.
张英远, 郑荣山, 刘劲松. 脉冲激光对星载探测器的干扰和损伤分析[J]. *电子与信息学报*, 2006, 28(9): 1758-1760.
- Zhang Qiang, Wang Yuefeng, Han Yudong, *et al.*. Simulation of mixture frequency laser irradiation on CCD detectors [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2010, 31(5): 787-792.
张 强, 汪岳峰, 韩玉东, 等. 混合频率激光干扰 CCD 探测器的仿真研究[J]. *半导体光电*, 2010, 31(5): 787-792.
- Lin Junyang, Shu Rong, Huang Genghua, *et al.*. Study on threshold of laser damage to CCD and CMOS image sensors[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2008, 27(6): 475-478.
林均仰, 舒 嵘, 黄庚华, 等. 激光对 CCD 及 CMOS 图像传感器的损伤阈值研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2008, 27(6): 475-478.
- Gong C, Zhao Y, Dong L, *et al.*. The tolerable target temperature for bimaterial microcantilever array infrared imaging [J]. *Opt & Laser Technol*, 2013, 45: 545-550.
- Zhao Y, Mao M, Horowitz R, *et al.*. Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance[J]. *J Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(2): 136-146.
- Zhao Y, Choi J, Horowitz R, *et al.*. Characterization and performance of optomechanical uncooled infrared imaging system [C]. *SPIE*, 2003, 4820: 164-174.
- Liu Ming. Optical Readout of Micro-Cantilever Focal Plane Array [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2008.
刘 明. 微悬臂梁焦平面阵列光学读出技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2008.