文章编号 2095-1531(2016)05-0588-08

集成式光读出 FPA 红外成像系统设计

褚旭红,赵跃进*,董立泉,刘 明
(北京理工大学 光电学院 北京市精密光电测量仪器和技术重点实验室,北京 100081)

摘要:本文对读出原理、像差要求、图谱质量进行深入研究,进而对读出技术进行深度整合与简化,实现光读出 FPA 红外成像系统小型化、轻量化、集成化。首先,从 FPA 的热-机械效应出发,介绍了光读出 FPA 红外成像系统的工作原理;然后,针对通常采用的光读出 FPA 红外成像系统体积大、重量大、结构复杂缺陷,提出了高集成度的新型光读出系统;接着,在分析讨论读出光路像差容限、特点的基础上,对以异形棱镜为核心元件的光读出系统进行了具体的光学仿真设计;最后,设计了集光、机、电、软技术的集成式光读出 FPA 红外成像系统。对系统样机测试结果表明:在确保成像性能的前提下,光读出 FPA 红外成像系统的体积减小到 175 mm×83 mm×105 mm。以异形棱镜为核心元件的光读出技术,在满足成像精度和灵敏度的前提下,可减小读出系统的复杂程度,有效降低了光读出 FPA 红外成像系统的体积和重量,从而促进光读出 FPA 成像系统的工业化应用。

关 键 词:FPA;红外成像;光读出;异形棱镜
中图分类号:O43 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20160905.0588

Design of integrated optical readout IR FPA imaging system

CHU Xu-hong, ZHAO Yue-jin*, DONG Li-quan, LIU Ming
(*Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: yjzhao@bit.edu.cn*

Abstract: After thorough studies on the sensing principle, the tolerance for aberration and the spectrum quality, a simplified and integrated optical readout technology has been put forward and developed, to realize the miniaturization, integration and lightweight of the optical readout focal plane array(FPA) infrared imaging system. First, based on the thermal-mechanical effect of FPA, the working principle of optical readout FPA infrared imaging system is introduced. Secondly, in view of the large size, heavy weight and complicated structure of the conventional system, a novel optical readout system with the characteristics of high integration is presented. Then, after analyzing and discussing the aberration tolerance of optical readout infrared FPA imaging system, the optical readout system containing a special-shaped prism is simulated and designed. Finally, an optical readout infrared FPA imaging system integrated with optics, mechanics, electronics and computer technolo-

收稿日期:2016-05-18;**修订日期**:2016-06-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61301190, No. 61377109)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61301190, No. 61377109)

gy is designed and realized. The system prototype is implemented and the experimental results indicate that the size of the optical readout infrared FPA imaging system is reduced to 175 mm × 83 mm × 105 mm, on the premise of guaranteeing the image quality and sensitivity. The optical readout FPA infrared imaging system with a special-shaped prism as the core component can effectively reduce the volume, weight and power consumption of the imaging system, and promote the system's industrial application.

Key words: FPA; IR imaging system; optical readout; special-shaped prism

1　引　言

红外成像技术在军用、民用领域具有广泛的应用。传统的制冷型红外成像系统受体积、重量、功耗、制作工艺、使用条件、价格等因素的限制,不利于其普及推广应用。自 1996 年 Thomas Thundat 等人[1-4]发展了一种基于电压电阻微悬臂梁技术的红外探测器,双材料微悬臂梁用于红外探测器的可行性逐渐被重视并迅速发展起来。双材料微悬臂梁红外探测器是基于红外辐射致热机械变形原理的器件[5-6],其采用某种吸收红外材料将吸收的红外线转化为热量,并将该热量传导至双材料悬臂梁令其发生变形。光读出技术则是利用光学方式探测双材料微悬臂梁的变形量并还原为红外热辐射量。当微悬臂梁形成阵列(FPA)对外界红外辐射场响应、光系统对微悬臂梁阵列各单元的变化量进行探测并按空间位置还原后,即可得到外界红外辐射场分布。

目前,很多双材料悬臂梁焦平面阵列红外成像光学系统的研究集中在如何进一步提高成像系统的探测灵敏度,其大多数系统的光路都是采用 4f 系统[7-11],读出系统镜片数量多,体积大、重量重,功耗大。本文对 FPA 红外成像系统的光读出技术进行了深入分析与讨论,提出了以异形棱镜为核心的高集成度光读出方法。在分析讨论读出光路像差容限、特点的基础上,对以异形棱镜为核心元件的光读出系统进行了光学仿真设计。最后,设计了集光、机、电、软技术的完整的集成式光读出 FPA 红外成像系统。系统样机试制及样机测试结果表明,集成式光读出 FPA 红外成像系统可以在确保成像质量、探测灵敏度的前提下,有效减小体积、重量、功耗,简化读出系统,提高成像系统的可靠性。

2　理论分析

2.1　光读出 FPA 红外成像系统组成与工作原理

光读出 FPA 红外成像系统主要由红外成像镜头(IR LENS)、真空封装的 FPA(FPA In Vacuum)、光读出系统(Optical Readout System)和图像处理系统(Imaging System)组成,如图 1 所示。

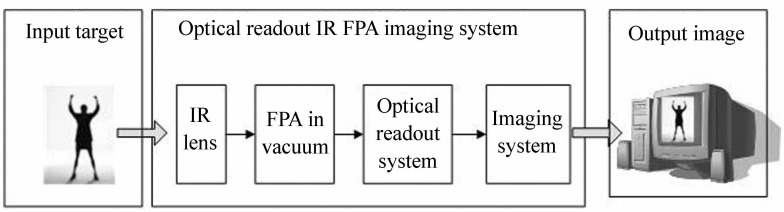


图 1　FPA 红外成像系统

Fig. 1　Principle schematic diagram of IR FPA imaging system

目标的红外辐射被红外成像镜头聚焦成像在真空封装的 FPA 上。真空封装的 FPA 是基于热-机械转换的热探测器件,输出信号为像元在红外辐射作用下的角度变化量。该器件基于 MOEMS 技术,每个像元由微悬臂梁支撑的反射单元组成,微悬臂梁由热膨胀系数差异较大的两层材料

(SiNx-Au/Al)组合构成[12],如图2所示。

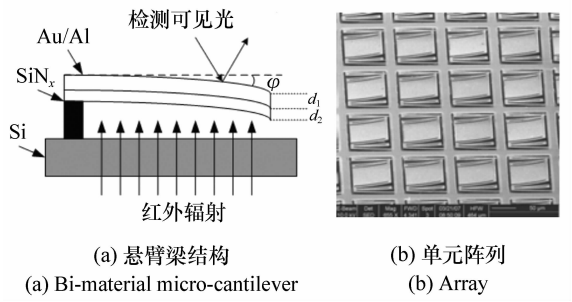


图2 FPA原理图

Fig. 2 Principle schematic of FPA

双材料梁吸收来自目标的红外热辐射后,产生弯曲形变,从而引起像元反射单元产生偏转$\Delta\theta$[13]。该偏转角的量值与其吸收的热辐射相关。偏转角$\Delta\theta$为光读出系统的输入信号,光读出系统是基于阿贝二次成像理论、利用空间滤波原理实现的非接触测量系统,其组成如图3所示。

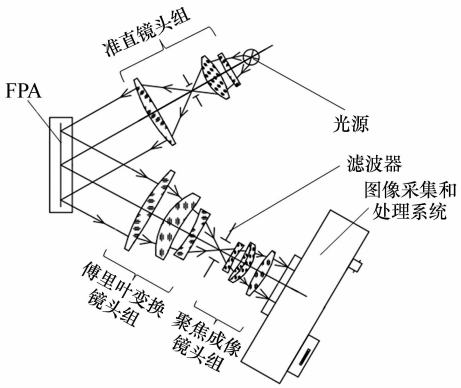


图3 光读出系统

Fig. 3 Sketch of optical readout system

该系统属于4f系统的变形。光源发出的光被准直镜头组准直以后,照亮FPA并被FPA各个像元反射;被FPA每个像元反射以后的光线由傅里叶变换镜头组聚焦成像在谱平面上,由谱平面放置的滤波器进行滤波。FPA像元吸收热产生形变前后,谱平面上的光能量分布如图4所示。

像元吸热产生偏转角$\Delta\theta$,引起谱平面上谱能量分布产生Δx的平移量。需要特别说明的是,光读出系统主要探测Δx,所以其波长可以选择可见光。

在谱平面上放置刀口滤波器后,通过滤波器

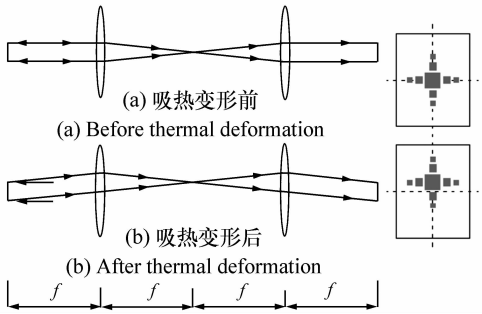


图4 读出系统谱平面谱图

Fig. 4 Flat spectrum of optical readout system

的光束能量ΔE将随着Δx的变化而变化。因此,被傅里叶逆变换镜头再次聚焦成像在CCD上的光束能量,将包含FPA像元偏转角$\Delta\theta$信息。图像处理系统对CCD的输出信号进行一定处理后,输出人眼可见的目标物体红外热图像。特别说明的是,光读出系统的功能是实现对FPA结构单元偏转角的测量,因此,考虑到光学材料、器件等因素的影响,通常采用可见光读出系统。

2.2 异形棱镜光读出系统方案设计

从光学角度看,该光读出系统的最大特点是系统中具有两个探测器——FPA和CCD。系统的探测灵敏度、空间分辨率等各项光电技术指标,都同时受这两个探测器性能的限制。该系统的另一个特点是,系统整体为被动红外成像,但却带有一个可见光光源。以FPA为界,系统的前半部分工作波段为红外,后半部分的工作波段为可见光,且前半部分和后半部分有相互独立的物象共轭面。在光学设计过程中,这两部分可以单独进行。对系统后半部分来说,FPA所在位置是前半部分的像平面,同时也是后半部分的物平面,后半部分的像平面是CCD面,系统的优化设计可以分段、分步进行,根据CCD及FPA像元尺寸进行优化设计,而不必优化至衍射极限。

自20世纪90年代开始,随着现代光学制造技术的发展,非球面、自由曲面加工技术逐渐成熟,使得非球面广泛应用于光学各个领域[14-18]。根据上述光读出系统的特点,结合现代光学设计与制造技术,综合考虑光读出FPA红外成像系统工程实现的难度、成本、系统性能改善、体积重量、功耗、可靠性、装调复杂程度等问题,本文提出了

新型的高集成度光读出 FPA 红外成像系统,如图 5所示。

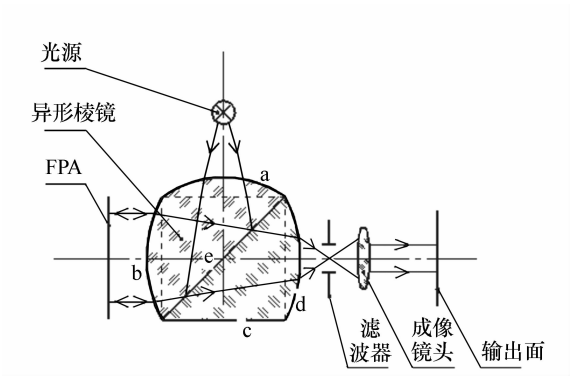


图 5　集成式光读出系统

Fig. 5　Sketch of integrated optical readout system

该方案是在图 3 基础上,反复进行优化、改进、整合,其特点是:照明和傅里叶变换由一个异型棱镜独立完成,大大减少了光学元件的数量,从而使成像系统体积、重量都大大降低。随着元件数量减少,功耗、复杂度都得以下降,可靠性随之提高。该系统自照明至滤波的光路,结构完全对称,自 FPA(序号 3)至像面的光路,也属于对称结构,结合非球面的运用,对系统像差进行进一步修正,可以使系统性能得到进一步提升。

3　系统设计

3.1　设计分析

根据系统成像原理,本系统获得的红外图像是灰度图像。评价该成像系统性能的主要技术指标分两大类:一类是评价系统所成图像与目标物的相似程度,如空间分辨率、畸变等;另一类是体现系统的最小可测量信号值,如噪声等效温差 NETD。

3.1.1　照明通道设计要求

照明通道要为读出系统提供读出光束,其不平行度,会引起谱平面上谱加宽,如图 6 所示。

其中,虚线为不同角度的照明光引起的谱平面能量分布,在总能量相等的情况下,其显示效果为各条虚线的叠加。理想状态下,谱平面上获得的是 FPA 的夫琅和费衍射图样,强度分布可以表示为:

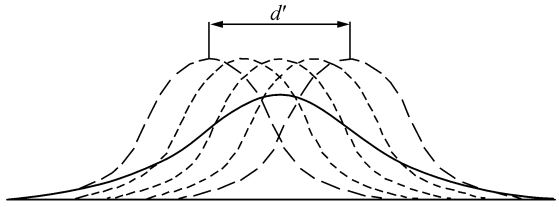


图 6　照明光束不平行形引起的谱展宽

Fig. 6　Spectrum extended width of under un-paralled light beam

$$I = I_0\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2\left(\frac{\sin\beta}{\beta}\right)^2, \tag{1}$$

式中:

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda}a\sin\theta_x,$$

$$\beta = \frac{\pi}{\lambda}b\sin\theta_y.$$

在横向光强分布为:

$$I = I_0\left(\frac{\sin\alpha}{\alpha}\right)^2. \tag{2}$$

中央亮斑的横向宽度为:

$$\Delta x = \frac{\lambda}{a}f. \tag{3}$$

在光读出 FPA 红外成像系统中,a 为 FPA 像元线性尺寸,f 为光读出系统读出通道的傅里叶变换镜头焦距,λ 为光读出系统采用的照明光的波长。

为保证系统响应灵敏度,照明通道光束不平行度引起的中心亮斑偏移量 d 应远小于中心亮斑的半宽度,设定为 $0.1\times\frac{1}{2}\Delta x$。

3.1.2　读出通道设计要求

根据图 3 可知,光读出 FPA 红外成像系统是基于傅里叶光学设计的。根据傅里叶变换镜头对衍射光成像的特点可知,傅里叶变换镜头需要满足以下要求[19]:(1)对两组物像共轭面修正像差。第一组为无穷远的物面和位于焦平面的像面,光阑在前焦面上(正向光路);第二组为位于前焦面的物面和无穷远的像面,光阑在后焦面上(逆向光路)。(2)补偿谱点位置的非线性误差,即平行于光轴出射的主光线需满足正弦条件。(3)严格修正畸变以外的各种单色像差,使全视场像差达到衍射极限。

3.1.3 谱平面谱分布要求

根据图5可知,经过FPA的平行光线,从异型棱镜表面 b 射入,d 射出,相当于厚透镜。根据像差理论,谱平面上的球差为:

$$\delta L'_K = \frac{n_1 u_1 \sin u_1}{n'_K u'_K \sin u'_K}\delta L_1 - \frac{1}{2n'_K u'_K \sin u'_K}\sum S_- . \tag{4}$$

根据式(4),谱平面的球差由两部分组成。式(4)的前一项为物方球差的贡献,这部分球差由FPA前端的红外光学镜头决定,读出系统无法进行修正,另一部分由b面到d面光学变换的过程造成,该像差会引起谱宽度增加,从而影响成像系统探测灵敏度,造成NETD下降。为确保成像系统的性能,其值应远小于中心亮斑的宽度,设定为 $0.1\Delta x$。

3.2 仿真结果

根据3.1的分析,光读出系统首先满足成像的空间分辨要求,即将FPA清晰成像在CCD表面上。这与FPA像元和CCD像元的像元线性尺寸直接相关。其次,满足谱平面获得清晰谱的要求,从而确保光读出FPA红外成像系统的探测灵敏度。这与照明光波长、FPA像元线性尺寸、读出系统傅里叶变换焦距相关。

本文采用的主要器件参数如表1所示。

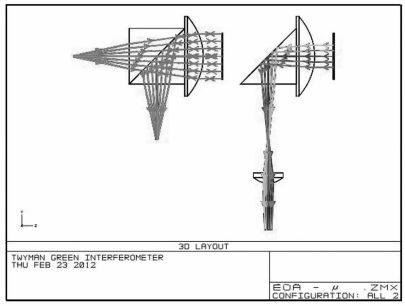
表1 主要器件参数

Tab.1 Parameters of the main devices

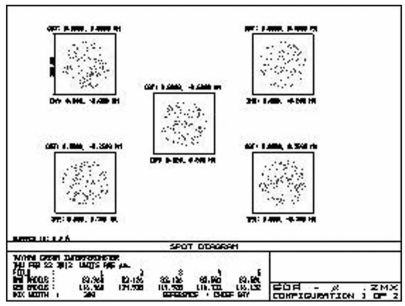
	Characteristic	Value
光源	波长/nm	525~531
FPA	像元数	256×256
	有效面积 $H\times W$/mm×mm	184×140
	单像元有效面积 $H\times W$/μm×μm	59×79
CCD	有效像元数 $H\times W$	659×494
	有效面积/mm×mm	48.9×65.2
	单像元有效面积 $H\times W$/μm×μm	9×9

综上分析,结合本文所采用的主要器件的参数,建立以异形棱镜为核心器件的光读出系统的仿真模型,并完成系统仿真、优化,如图7。

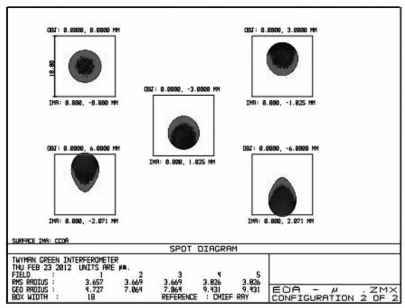
根据图7可以看出,分照明通道和读出通道两个结构,根据3.1的设计要求,以谱平面上的弥散斑(图7(b))和像平面上的弥散斑(图7(c))为完成判据。



(a) 模型
(a) Model



(b) 谱平面弥散斑
(b) Defocused spots on spectral flat



(c) 像平面弥散斑
(c) Defocused spots on image plane

图7 光学读出系统仿真

Fig.7 Simulations of optical readout system

从仿真结果看出,图5所示系统进行了进一步简化,其核心元件异形棱镜也得到进一步简化:a面和d面简化为平面,只留b面为复杂的自由曲面,如图8所示。

异形棱镜由胶合的分束棱镜和平凸透镜胶合而成,其中:分束棱镜为胶合的直角棱镜,在直角棱镜的斜面上50%光束透射,50%光束反射折转90°;平凸透镜的凸面为关键面,对光源发出的光进行准直,对FPA反射的光进行傅里叶变换。根据使用条件、需求,结合加工难度、成本、材料性能

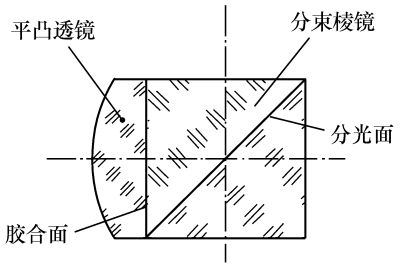


图 8　异形棱镜

Fig. 8　Special-shaped prism

等因素,本文使用的异形棱镜采用的是常规光学材料 K9 玻璃。

3.3　设计结果

根据仿真数据,光学系统设计如图 9 所示。

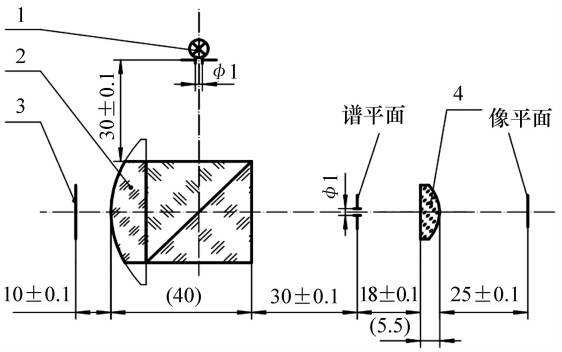
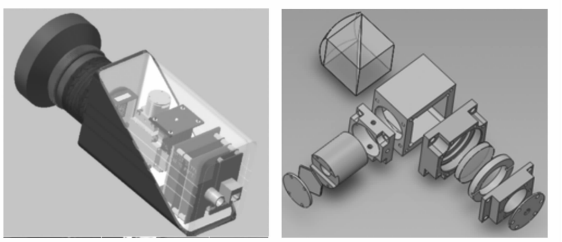


图 9　光读出系统设计结果

Fig. 9　Design result of optical readout system

其核心元件异形棱镜结构组及读出系统设计结果,如图 10 所示。



(a) 成像系统
(a) Imaging system

(b) 读出光路组件
(b) Optical readout module

图 10　光读出系统设计图

Fig. 10　Design model of optical readout system

图 10(a)是成像系统总装配图,图 10(b)是以异形棱镜为核心的读出光路爆炸图,所有光学零件都安装在该组件中,因此,系统装配难度大大降低,工作可靠性得以提高。

4　验证与测试

根据 3.3 的设计结果,光读出 FPA 红外成像系统,如图 11 所示。

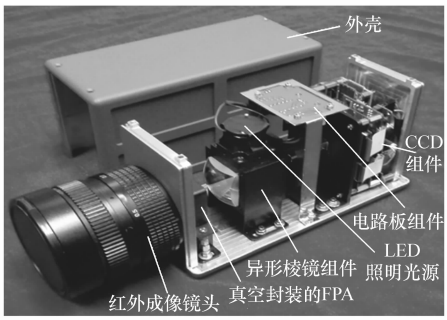
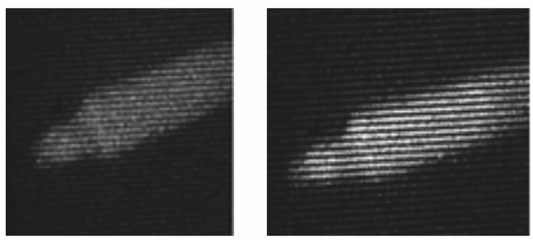


图 11　集成式光读出 FPA 红外成像系统

Fig. 11　Integrated optical readout IRFPA imaging system

该系统由红外成像镜头、真空封装的 FPA、异形棱镜组件、CCD 组件)、LED 照明光源和电路板组件及外壳组成,其体积为(不含红外成像镜头):175 mm×83 mm×105 mm。

采用该系统对电烙铁成像,获得图像与相同环境下 4f 系统获得图像对比,如图 12 所示。



(a) 4f系统获取
(a) From the 4f optical readout system

(b) 集成式光读出系统获取
(b) From the integrated optical readout IR FPA imaging system

图 12　电烙铁图像

Fig. 12　Image of the iron

图 12(a)是在实验平台上按照图 3 搭建 4f 读出系统获取的电烙铁图像,图 12(b)是采用本文设计的集成式光读出系统获取的电烙铁图像。可以看出,集成式光读出系统获取的图像,清晰度与 4f 系统获取的图像基本一致,亮度略有增加。由此可知,集成式光读出 FPA 红外成像系统在体

积、重量大大缩小、元器件数量也大大减少的情况下,其成像质量和探测灵敏度和4f系统基本一致。

5 结 论

近年来,非制冷红外成像技术被现代军用及民用技术研究机构广泛重视,但其研究重点大都集中在如何提高成像系统的探测灵敏度。但是,如果FPA红外成像系统要在工业上得到广泛的应用,其体积、重量、功耗、可靠性等性能指标也必须满足需求。

本文针对通常采用的光读出FPA红外成像系统体积大、重量大、结构复杂等缺陷,提出了高集成度的新型光读出系统,旨在实现光读出FPA红外成像系统小型化、轻量化、集成化,从而促进光读出FPA成像系统的工业化应用。理论分析、仿真以及验证样机的试制、测试表明,以异形棱镜为核心元件的集成式光读出FPA红外成像系统,在满足成像精度和灵敏度的前提下,大大减小了读出系统的复杂程度,使光读出FPA红外成像系统体积减小到175 mm×83 mm×105 mm。

参考文献:

[1] SCOTT R H,GREGORY S M. High sensitivity 25 and 50 pitch microcantilever IR imaging arrays[J]. *SPIE*,2007,6542:65421F-7.

[2] KWON W,JONG E,CHI H. A high fill-factor uncooled infrared detector with thermo-mechanical bimaterial structure[J]. *SPIE*,2007,6542:65421O-8.

[3] ZHAO J. High Sensitivity Photomechanical MW-LWIR imaging using an uncooled MEMS microcantilever array and optical readout[J]. *SPIE*,2005,5783:506-514.

[4] TORUN H,UREY H. Uncooled thermo-mechanical detector array with optical readout[J]. *SPIE*,2005,5957:59570O-8.

[5] ODEN P I,DATSKOS P G,THUNDAT T,*et al*.. Uncooled thermal imaging using a piezoresistive microcantilever[J]. *Applied Physics Letters*,1996,69(21):18.

[6] 杨广立,冯飞,熊斌,等. 微机械光读出红外成像阵列器件机械特性对其性能的影响[J]. 光学 精密工程,2007,15(5):699-705.
YANG G L,FENG F,XIONG B,*et al*.. Effect of mechanical characteristic of an micro-mechanical optically readable infrared imaging array device on its performance[J]. *Opt. Precision Eng.*,2007,15(5):699-705. (in Chinese)

[7] GONG C,ZHAO Y,DONG L Q,*et al*.. All-optical background subtraction readout method for bimaterial cantilever array sensing[J]. *Optics Express*,2015,23(16):20576-205811.

[8] FENG Y,ZHAO Y J,LIU M,*et al*.. Image quality improvement by the structured light illumination method in an optical readout cantilever array infrared imaging system[J]. *Optics Letters*,2015,8(6):1390-1393.

[9] 张志刚,毛亮,程腾,等. 利用消杂散光的偏振光技术提高光学读出红外成像检测灵敏度[J]. 红外与毫米波学报,2013,32(4):331-336.
ZHANG ZH G,MAO L,CHENG T,*et al*.. A technology for eliminating stray light optical readout of FPA[J]. *Infrared Millim. Waves*,2013,32(4):331-336. (in Chinese)

[10] KONG Y M,LIU R W,JIAO B B,*et al*. The thermal-mechanical performance of the uncooled infrared optical-readout bimaterial FPA[J]. *Microsystem Technologies*,2015,7(21):1495-1500.

[11] WANG M,TAKASHIRO T,TANAKA S. Infrared thermal detector array using $Eu(TTA)_3$-based temperature sensitive paint for optical readable thermal imaging device[J]. *J. Micromechanics and Microengineering*,2015,20(9):035012.

[12] 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.
LIU M. Optical readout of micro-cantilever focal plane array[D]. Beijing: Graduate Beijing Institute of Technology, 2008. (in Chinese)

[13] LAI J,PERAZZO T,SHI Z,*et al*. Optimization and performance of high-resolution micro-optomechanical thermal sensors [J]. *Sensors and Actuators A*,1997,58:113-119.

[14] 徐乐,张春雷,代雷,等. 高精度非回转对称非球面加工方法研究[J]. 中国光学,2016,9(3):364-370.
XU L,ZHANG CH L,DAI L,*et al*.. Research on manufacturing method of non-rotationally symmetrical aspheric surface with high accuracy[J]. *Chinese Optics*,2016,9(3):364-370. (in Chinese)

[15] GARRARD K,DOW T,SOHN A,*et al*.. Design tools for freeform optics[J]. *SPIE*,2005,5784:587410-587411.

[16] JIANG X,SCOTT P,WHITEHOUSE D. Freeform surface characterization-a fresh sreategy[J]. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*,2007,56(1):553-556.

[17] ROGERS J R. A comparison of anamorphic, keystone, and Zernike surface types for aberration correction[J]. *SPIE*, 2010,7652:76520B-76528B.

[18] 程德文. 自由曲面光学系统设计方法及其在头盔显示技术中的应用研究[D]. 北京:北京理工大学,2011.
CHENG D W. Study on design methods of free-form imaging systems and their application in head-mounted displays [D]. Beijing:Graduate Beijing Institute of Technology,2011. (in Chinese)

[19] 王之江. 光学设计手册[M]. 北京:机械工业出版社,1994.
WANG ZH J. *Optical Design Manual*[M]. Beijing:China Machine Press,1994. (in Chinese)

作者简介:

褚旭红(1976—),女,山西人,博士后,2006、2013 年于北京理工大学分别获得硕士、博士学位,主要从事 MEMS 的红外成像技术、波前编码技术、光电仪器等方面的研究。E-mail: chuxuhong001 @ bit.edu.cn

赵跃进(1958—),男,北京人,教授,1986、1990 年于北京理工大学分别获得硕士、博士学位,现为北京理工大学光电学院教授,主要从事 MEMS 技术、图像处理、THz 成像技术、波前编码技术、光电仪器等方面的研究。E-mail:yjzhao@ bit.edu.cn