

共用桥腿式高性能非制冷红外焦平面探测器研究

王雅琴, 蔡光艳, 马占锋, 高健飞, 黄立*

(武汉高德红外股份有限公司, 湖北 武汉 430205)

摘要: 研制出一种新型微桥结构的氧化钒非制冷红外焦平面探测器。该微桥结构采用列相邻像素共用桥腿的方式, 极大地增加了桥腿长度, 减小热导, 能有效提高像元响应率并降低噪声等效温差 (NETD)。同时该微桥结构采用双层工艺, 增加桥面及氧化钒面积, 提升填充率, 进一步提升探测器性能。探测器器件阵列采用 384×288 , 像素为 $12 \mu\text{m}$, 读出电路采用逐行积分、逐列输出模式, 封装方式采用高可靠性的金属真空封装。测试结果表明, 探测器的 NETD 不大于 15 mK , 响应率大于 44 mV/K 。其性能指标可以满足民用、军用等领域的应用需求。

关键词: 共用桥腿; 微桥结构; 非制冷红外; 红外焦平面探测器

中图分类号: TN215 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200330

Research of high-performance uncooled infrared focal plane array detector with common-leg structure

Wang Yaqin, Cai Guangyan, Ma Zhanfeng, Gao Jianfei, Huang Li*

(Wuhan Guide Infrared Co., Ltd., Wuhan 430205, China)

Abstract: A novel micro bridge structure for uncooled vanadium oxide infrared focal plane array (IRFPA) detector was developed. This micro bridge used common-leg structure, which was shared by column adjacent pixels. Common-leg structure greatly increased the leg length, reducing the thermal conductivity, which could effectively improve the response rate and reduced the negative electron-transfer dissociation (NETD). Furthermore, the micro bridge adopted double-layer process to increase the area of the deck and the vanadium oxide, which could improve the filling rate and the detector performance. The detector array was 384×288 with $12 \mu\text{m}$ pixels. The readout integrated circuit (ROIC) adopted rolling-shutter mode for integration and a pixel-by-pixel mode for readout. The high reliability metal vacuum package was used for the device. The results showed that the NETD of the detector was less than 15 mK , and the response rate was greater than 44 mV/K . Its performance index could meet the requirements of civil and military applications.

Key words: common-leg structure; micro bridge structure; uncooled infrared; IRFPA

0 引言

非制冷红外热成像是 20 世纪 90 年代发展起来的技术,在军事、工业、交通、安防监控、气象、医学等各行业具有广泛的应用^[1]。非制冷红外焦平面探测器是热成像系统的核心,是探测、识别和分析物体红外信息的关键。非制冷红外探测器主要以微机电技术为基础,能将物体辐射的红外能量转换为电信号,然后通过电路读取、算法修正、图像处理等过程后形成红外热像图。非制冷红外焦平面探测器能够在室温状态下工作,具有体积小、质量轻、功耗小、寿命长、成本低、启动快等优点^[2]。

目前国际上非制冷红外探测器的制造厂商主要有美国 FLIR、DRS、L-3、法国 ULIS、英国 BAE 和日本 NEC^[3-6]。美国 FLIR 是高性能红外热像仪研发和生产的领先者,市场占有率为全球首位。国内非制冷红外探测器的制造厂商主要有高德红外、烟台艾睿、大立科技和北方广微等。目前非制冷红外探测器的阵列主要有 160×120、384×288、640×512 和 1280×1024 等,涵盖了低成本的小阵列探测器和高分辨率的超大面阵探测器^[7]。市面上像元尺寸以 25 μm、17 μm 和 12 μm 为主,目前已有厂商对更小像元尺寸,如 10 μm,进行了报道。非制冷红外探测器性能指标 NETD 一般小于 50 mK,响应率大于 8 mV/K。

非制冷红外探测器主要分为读出电路、微桥结构和真空封装三大模块^[8]。读出电路将每个像元的微小电阻变化以电信号形式输出。微桥结构吸收红外辐射能量,引起桥面热敏材料电阻变化,通过桥腿与读出电路导通,从而将温度的变化转化成电路可读取的电学信号。真空封装将微桥结构置于真空环境中,避免与空气导热,确保吸收的微小红外能量能够引起热敏材料的电阻变化^[9]。微桥结构作为吸收红外能量部分,其结构的设计和制造水平,直接决定了非制冷探测器的性能指标^[10]。目前,各大厂商使用的微桥结构主要有单层微桥结构、双层微桥结构和伞状微桥结构。单层结构工艺简单,便于生产制备。双层结构和伞状结构工艺流程较长,制备难度大。双层结构和伞状结构可以提高像元填充系数以获得更高的吸收率,同时为像元小型化提供可行性方案。文中通过对双层微桥结构的桥腿进行创新型设计,采用列相邻像元

共用式桥腿结构,极大的增加了桥腿长度,减小热导,大幅提升探测器性能。共用式桥腿结构中桥腿与桥面分置于上下两个平面,属于双层结构的一种。但共用式桥腿结构设计的单个像元桥腿占据了两个两像元空间,可做桥腿延长设计。共用式桥腿结构为本研究首创,未见其它文献进行同种结构报道。

以 12 μm 像元尺寸为例,共用式桥腿单根长度可达 140 μm,是传统双层结构桥腿(70 μm 左右)长度的 2 倍。文中采用共用式桥腿,制备的 384×288 @12 μm 双层结构探测器,其 NETD 不大于 15 mK,相较于传统双层结构提升 2 倍以上。

1 探测器设计与制备

1.1 探测器工作原理

非制冷红外探测器系统的工作原理是光学系统接受被测物体的红外辐射,经过光谱滤波后将红外辐射能量信息反映在焦平面阵列上。焦平面阵列敏感元接收红外辐射后桥面升温,引起桥面内热敏材料的电阻变化,从而引起电路中电压(或电流)的变化。读出电路对电信号的变化进行积分放大,经 A/D 转换后送入微机做视频图像处理,再经 D/A 转换形成代表温度信号的视频图像^[11]。

微桥结构的设计和制备直接决定了像元阵列的热容、热导和吸收率等,从而决定探测器性能的优劣,故需要对微桥结构进行精心设计。非制冷焦平面探测器的电压响应率计算公式为:

$$R_v = I_b \alpha R \eta / G (1 + \omega^2 \tau^2)^{1/2} \quad (1)$$

式中: I_b 为偏置电流; α 为热敏电阻薄膜温度系数; R 为电阻; η 为吸收率; G 为热导。如公式(1)所示: 1) 响应率与热导 G 成反比,即要求微桥桥面与衬底之间尽量小的热导,故应采用细长型桥腿; 2) 响应率与吸收率 η 成正比,为获得更大的吸收率,要求微桥结构对红外辐射有尽量大的有效吸收面积; 3) 结构稳定可靠。

单层微桥结构桥腿和有效红外吸收面占据同一平面,如图 1 所示,无法同时满足低热导和高吸收面积的需求,即无法满足小型化器件的性能要求,将逐步被双层微桥结构所取代。

双层结构(如图 2 所示)桥面在上吸收红外辐射,桥腿在下形成长桥腿低热导设计。有空间进行长桥

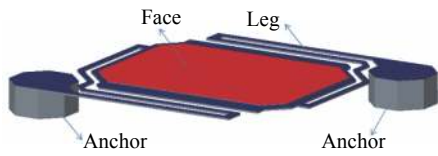


图 1 单层微桥结构

Fig.1 One-layer structure of microbolometer

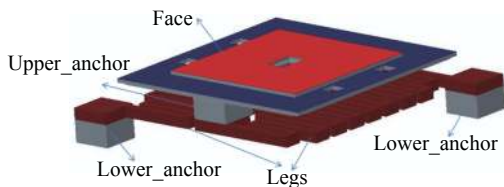


图 2 双层微桥结构

Fig.2 Double-layer structure of microbolometer

腿和大吸收面积的设计。

伞状双层结构(如图 3 所示)伞在上层做吸收面,桥面和桥腿在下面一层,形成了大吸收面积设计^[12]。

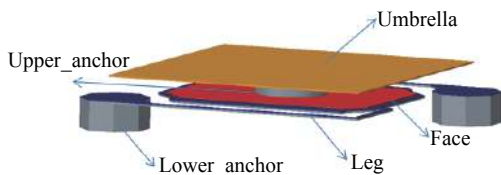


图 3 伞状双层微桥结构

Fig.3 Double-layer (umbrella) structure of microbolometer

1.2 微桥结构设计

在器件小型化进程中,像元尺寸逐步缩小,为保证低热导的需求,需做进一步延长桥腿设计。共用式桥腿设计使得单个像元桥腿可以占据两个像元空间,如图 4 所示,列相邻两个像元共用一根长桥腿,极大的延长了桥腿长度。图 4(a)中,桥面 1、2、3 相互独立,分别对应阵列中其中一列像元中的三个像元位置,独立的桥面吸收红外辐射不会形成热信号的串扰。桥面 1、2 共用桥腿 1,桥腿 1 同时占据桥面 1、2 的半个像元位置,即桥腿 1 占据了一个像元位置;同理桥面 2、3 共用的桥腿 2 也占据了一个像元位置。故连接桥面 2 的桥腿 1 和 2 总共占据了两个像元位置。像元工作时,以桥面 2 位置像元为例,桥面 2 的热信号通过支撑薄膜连接的上端连接锚柱 1、2 传到至桥腿 1、2,桥腿 1、2 通过下端连接锚柱 1、2 与电路导通,从而形成电学回路。

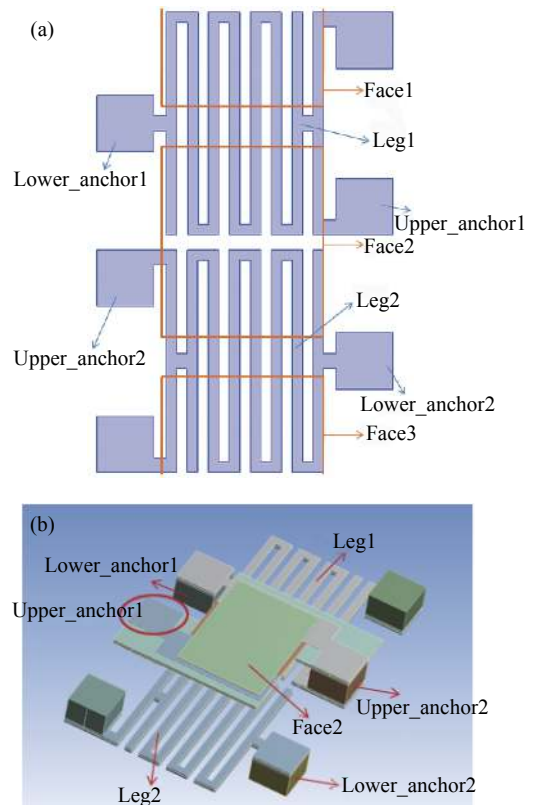


图 4 共用式桥腿微桥结构平面示意图 (a) 和三维图 (b)

Fig.4 Plane schematic (a) and 3-D diagram (b) of common-leg structure

如图 4(b) 所示,共用式桥腿结构中的像元桥面占据一个像元的上层位置空间;中间层为桥腿层,每根桥腿占据本像元的半个像元位置,延伸出一半的桥腿占据列相邻像元的半个像元空间。由于每个桥面均通过两根桥腿向电路基底导通,故可以认为单个像元所拥有的桥腿占据了两个像元空间。

单个像元桥腿可以占据两个像元空间,给桥腿设计留出了足够的空间,可以根据探测器性能需求,选用不同宽度和长度的桥腿。在小像元设计中,由于像元尺寸限制,为延长桥腿降低热导一般会采用小尺寸桥腿设计。小尺寸桥腿对光刻机台的曝光和对准要求极高,工艺难度大。共用桥腿设计由于桥腿设计空间增大,桥腿长度增加,相同热导需求下,可采用尺寸相对较宽的桥腿,减小了工艺难度。另外,读出电路采用逐行积分模式,当选通某行像元后,将此行的像素点采集逐个输出为有用信号,而与此列相邻的像元是不导通不工作的,即选通行像元输出信号时与其共用桥腿的像元处于不通电状态,故列相邻共用式桥腿结构不会形成电学短路与信号串扰。

文中为 384×288 阵列像素 12 μm 的探测器,设计宽度为 0.35 μm 和 0.5 μm 两种不同尺寸桥腿,如图 5 所示,均采用共用式桥腿设计。0.35 μm 桥腿长度设计长度达到 140 μm,0.5 μm 桥腿设计长度达到 120 μm。采用双层结构,桥面在桥腿上面一层,填充率可达到 85%。

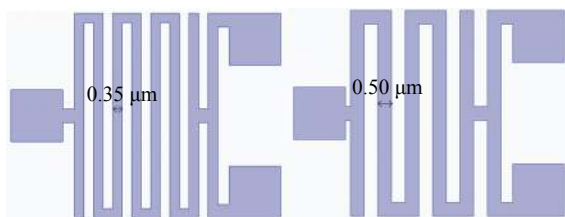


图 5 0.35 μm 和 0.5 μm 宽度共用桥腿设计图

Fig.5 Layout of common-leg width with 0.35 μm and 0.5 μm

1.3 微桥结构制备

读出电路采用逐行积分、逐列输出模式工作,制备工艺为标准的半导体工艺。读出电路经测试后开始制备微桥结构的反射层。反射层为金属铝,反射层上面旋涂第一层牺牲层,然后开始桥腿制作,桥腿完成后旋涂第二层牺牲层。第二层牺牲层上面为桥面结构,经氮化硅沉积、氧化钒沉积、金属沉积、干法刻蚀、清洗、牺牲层释放等工艺后形成微桥结构。氧化钒为探测器的热敏材料。氮化硅薄膜具有低应力、绝缘的特点,在微桥结构中起机械支撑和绝缘层的作用。微桥结构制备工艺流程如图 6 所示。

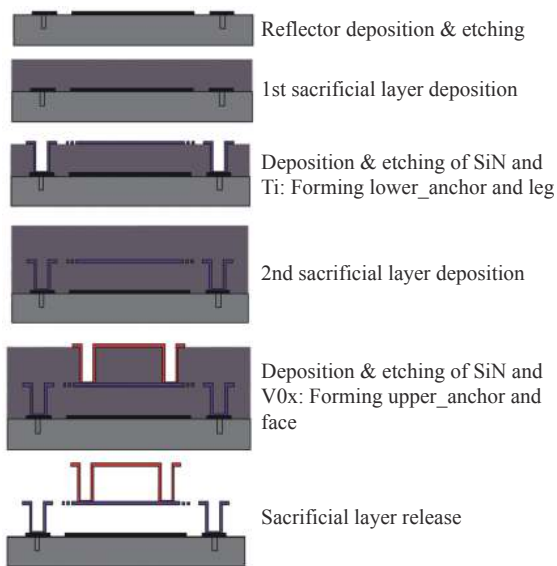


图 6 微桥结构主要工艺流程

Fig.6 Outline of micro bridge fabrication process

1.4 芯片封装

为确保探测器的正常工作,需对器件进行真空封装。金属封装具有高真空性,高可靠性的特点。金属封装主要由窗口、待封装芯片、半导体制冷器、金属管壳和吸气剂等组成。文中采用金属管壳封装,封装使用主要部件如图 7 所示。

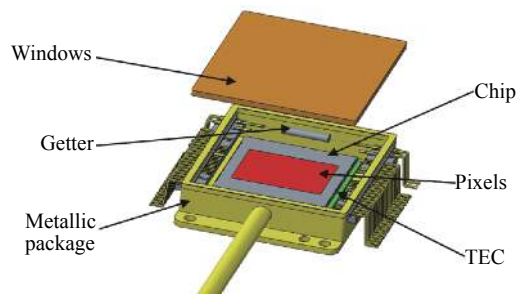


图 7 IRFPA 金属封装部件

Fig.7 Components of IRFPA metallic package

2 器件测试

384×288 12 μm 共用桥腿式非制冷红外探测器封装完成后,依据国标 GB/T 13584—2011 和 GB/T 17444—1998 进行性能参数测试,同时与传统双层结构的相同面阵探测器进行性能比较。为研究共用桥腿结构对探测器性能的影响,共用桥腿式结构与传统双层结构相比,仅改变桥腿连接方式,不改变其他参数,即面阵大小、像元中心距、封装方式和测试参数等均相同。如表 1 所示为共用桥腿结构与传统双层结构的基本参数对比。

图 8 所示为两种不同宽度共用桥腿结构与传统双层结构探测器相比较的坏元分布图,探测器的盲元率均控制在 0.1% 以内。

图 9 所示为探测器的噪声分布图,噪声统计图呈很好的高斯分布,说明像元均匀性好。与传统双层结构相比,噪声图无明显变化,共用桥腿结构不会引入额外的噪声。图 10 所示为 NETD 直方图,NETD 分布呈高斯分布。桥腿宽度为 0.5 μm 的探测器 NETD 在 10~20 mK 之间,平均为 15.4 mK;桥腿宽度为 0.35 μm 的探测器由于桥腿长度大幅增加,其 NETD 在 9~15 mK 之间,平均为 11.2 mK。传统双层结构的探测器 NETD 在 21~41 mK 之间,平均为 31.5 mK。与传统双层结构探测器相比,共用桥腿结构的 NETD 性能指标提升了

表 1 共用桥腿结构与传统双层结构的 IRFPA 探测器基本参数

Tab.1 Parameter of common-leg and regular double-layer structure IRFPA detector

	Array	Pitch/ μm	Face area/ μm^2	Leg width/ μm	Leg length/ μm	Non-uniformity of Res.	Package
Common-leg width=0.5 μm	384 \times 288	12	121	0.5	120	1.2%	metallic
Common-leg width=0.35 μm	384 \times 288	12	121	0.35	140	0.6%	metallic
Regular double_layer	384 \times 288	12	121	0.35	70	0.8%	metallic

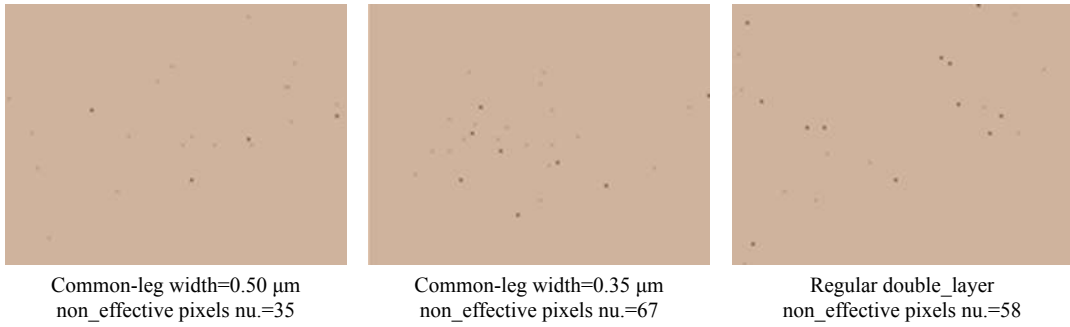


图 8 坏元分布图

Fig.8 Map of non_effective pixels

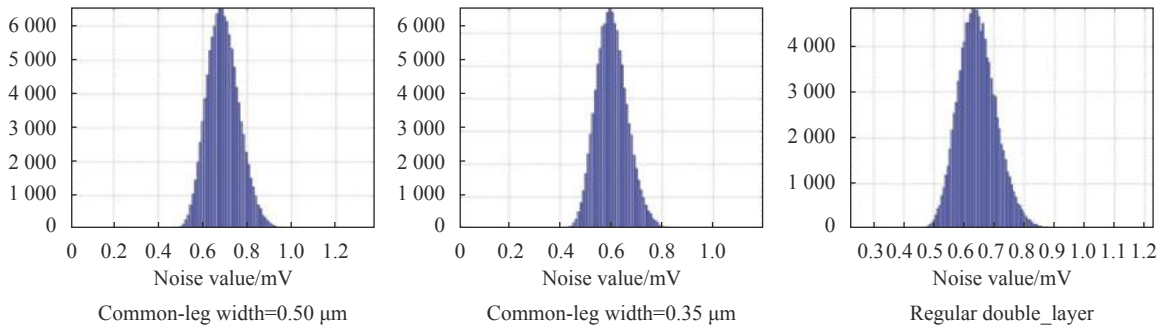


图 9 噪声直方图

Fig.9 Noise histogram

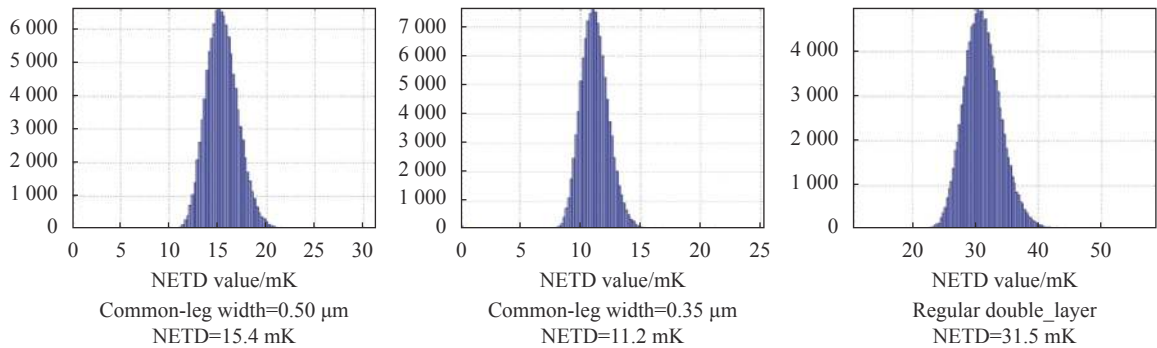


图 10 NETD 直方图

Fig.10 NETD histogram

50%~64%，共用式桥腿探测器 NETD 性能指标优异。

图 11 所示为响应率直方图，探测器的响应率集中度，响应率非均匀性为均在 1.2% 以内，阵列具

有良好的均匀性和一致性。桥腿宽度为 0.5 μm 的探测器响应率均值为 44.8 mV/K，响应率非均匀性为 1.1%。桥腿宽度为 0.35 μm 的探测器响应率均值为

53.9 mV/K, 响应率非均匀性为 0.6%。传统双层结构的探测器响应率均值为 23.4 mV/K, 响应率非均匀性

为 0.8%。与传统双层结构探测器相比, 共用式桥腿结构探测器响应率提升了 90%~130%。

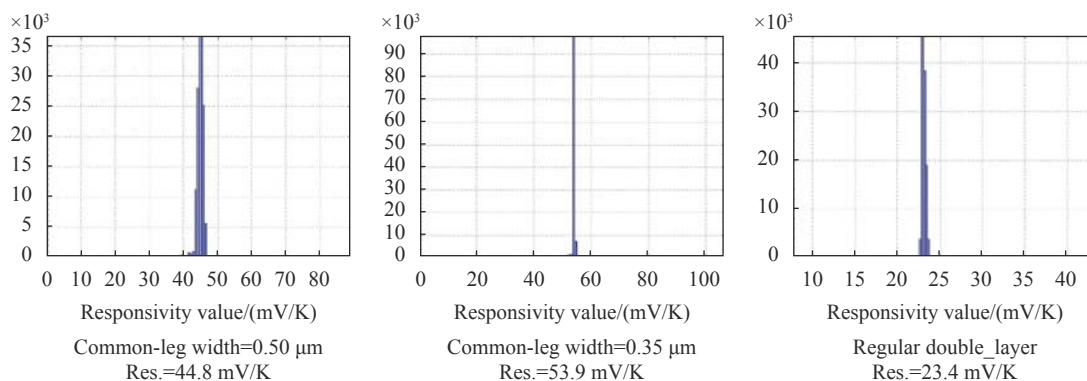


图 11 响应率直方图

Fig.11 Responsivity histogram

对比图 10 和图 11, 桥腿宽度为 0.35 μm 的探测器性能参数优于桥腿宽度为 0.5 μm 的探测器。但共用桥腿宽度为 0.35 μm 的桥腿长度较长, 其热响应时间约为 16 ms, 而共用桥腿宽度为 0.5 μm 的探测器的热响应时间约为 13 ms, 共用桥腿宽度为 0.5 μm 的探测器在快速运动场景中具有更实用优势。桥腿宽度为 0.35 μm 的探测器适用于成像场景不会迅速变化, 但对成像画面要求较高的情况。桥腿宽度为 0.5 μm 的探测器可适用于快速变化场景, 对成像画面要求不是特别高的情况。

3 结 论

研制出阵列规模为 384×288 像元尺寸为 12 μm 的非制冷红外焦平面探测器, 通过新型的共用式桥腿设计, 与传统双层结构探测器相比大幅提升了探测器性能。通过两种不同桥腿宽度设计, 制备两种不同性能探测器, 可满足不同的应用场景。产品性能优异, 性能指标分布集中。两种探测器的 NETD 不大于 15 mK, 响应率大于 44 mV/K, 可满足高性能需求领域的应用。

共用式桥腿结构为本研究首创, 对探测器性能提升较大, 同时可能会存在一些问题: 共用式桥腿结构中由于单个桥腿连接两个桥面, 可能会导致微桥结构平整性变差; 共用式桥腿结构中单根桥腿的断裂或坍塌会导致至少两个像元的失效, 在探测器上形成至少两个连续盲点, 该结构对桥腿的稳定性要求更高。但共用式桥腿设计给予了桥腿更广阔的设计空间, 在小

像元探测器进程中具有重要研究意义。

参考文献:

- [1] Niklaus F, Vieider C, Jakobsen H. MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review[C]//MEMS/MOEMS technologies and applications, III, 2008, 6836: 68360D.
- [2] Lei Shuyu, Fang Hui, Liu Jun, et al. Research on domestic 640×512 uncooled VOx infrared focal plane array [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(12): 759-763. (in Chinese)
- [3] Hay K A. Large format VOx microbolometer UFPA development at ITC[C]//Infrared Detectors and Focal Plane Arrays, VIII, 2006, 6295: 629505.
- [4] Li C, Han C J, Skidmore G D, et al. DRS uncooled VOx infrared detector development and production status[C]//Infrared Technology and Applications, XXXVI, 2010, 7660: 76600V.
- [5] Rogalski A. Infrared detectors: An overview [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43(3-5): 187-210.
- [6] Scribner D A, Krueer M R, Killiany J M. Infrared focal plane array technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1991, 79(1): 66-85.
- [7] Becker S, Imperinetti P, Yon J J, et al. Latest pixel size reduction of uncooled IR-FPA at CEA, LETI[C]//Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications, IX, 2012, 8541: 85410C.
- [8] Feng Tao, Jin Weiqi, Si Junjie. Uncooled infrared FPA--A review and forecast [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(3): 177-184. (in Chinese)
- [9] Kimata M, Tokuda T, Tsuchinaga A, et al. Vacuum packaging technology for uncooled infrared sensor [J]. *IEEE Transactions*

- on *Electrical and Electronic Engineering*, 2010, 5(2): 175-180.
- [10] Zhao Y, Mao M Y, Horowitz R, et al. Optomechanical uncooled infrared imaging system: design, microfabrication, and performance [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2002, 11(2): 136-146.
- [11] Liu Chuanming, Yao Libin. Study on digital readout circuit for infrared FPA detectors [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(3): 125-133. (in Chinese)
- [12] Li C C, Han C J, Skidmore G D. Overview of DRS uncooled VOx infrared detector development [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(6): 061017.



第一作者简介：王雅琴 (1991-)，女，硕士，研发工程师，主要从事非制冷红外探测器的研究，重点进行非制冷红外探测器的结构设计和版图布局设计。全面研究非制冷红外探测器工作原理，关键材料和研制 MEMS 工艺等方面，参与完成多种型号探测器的设计和投产。Email: wangyaqinll@163.com



通讯作者简介：黄立 (1963-)，男，硕士，主要从事红外热成像系统与红外武器装备的研发，重点进行红外芯片设计、制造与封装测试全产业链技术的研发。是武汉高德红外股份有限公司的创始人，建立了民营企业第一个“精确武器制导导弹研究院”，创建了红外技术军民融合协同创新体系。曾获得军队科技进步二等奖、教育部技术发明二等奖、中国光学工程学会创新产品一等奖和湖北省科技进步一等奖等众多奖项。Email: 312094306@qq.com