

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2016.01.01

焦平面红外探测器研究进展

李维, 武腾飞, 王宇

(中航工业北京长城计量测试技术研究所 计量与校准技术重点实验室, 北京 100095)

摘 要: 红外探测器在当今社会具有不可替代的作用。本文简要介绍了红外探测器的发展, 对目前几种常用光子型焦平面红外探测器进行了比较; 介绍了焦平面红外探测器在军事领域的需求及应用, 介绍了国内外焦平面红外探测器研究现状, 对几种典型的探测器性能做了比较; 讨论了焦平面红外探测器存在的问题, 对其成像非均匀性做了简要分析, 总结了焦平面红外探测器发展趋势。

关键词: 焦平面; 红外探测器; 精确制导; 成像非均匀性; 多波长

中图分类号: TN215

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2016)01-0001-04

Progress in Focal Plane Infrared Detectors

LI Wei, WU Tengfei, WANG Yu

(Science and Technology on Metrology and Calibration Laboratory, Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Infrared detectors play an important role in society today. In this paper, the development of infrared detectors is reviewed, and several kinds of focal plane photo infrared detectors are compared. The demand and the application in the military field of focal plane infrared detectors are introduced. The research status of focal plane infrared detectors at home and abroad is present. The properties of several typical focal plane infrared detectors are also present and compared. The problems in making focal plane infrared detectors are discussed and the imaging non-uniformity of focal plane infrared detectors is analyzed. The trends and prospect of focal plane infrared detectors are also summarized.

Key words: focal plane; infrared detector; precision guided weapon; imaging nonuniformity; multi-wavelength

0 引言

红外探测器广泛应用于军事、科学、工农业生产 and 医疗卫生等各个领域^[1-4], 尤其在军事领域, 红外探测器在精确制导、瞄准系统、侦察夜视等方面具有不可替代的作用^[5]。近年来, 红外探测器的需求不断增加。据美国相关公司市场调研分析师预测, 全球军用红外探测器需求额有望在 2020 年达到 163.5 亿美元, 复合年均增长率为 7.71%。

红外探测器按探测机理可分为热探测器和光子探测器, 按其工作中载流子类型可以分为多数载流子器件和少数载流子器件两大类, 按照探测器是否需要致冷, 分为致冷型探测器和非致冷型探测器。非致冷探测器目前主要是非晶硅和氧化钒探测器, 致冷型探测器主要包括碲镉汞三元化合物、量子阱红外光探测器、

II 类超晶格等。

在过去的几十年里, 大量的新型材料、新颖器件不断涌现, 红外光电探测器完成了第一代的单元、多元光导器件向第二代红外焦平面器件的跨越, 目前正朝着以大规模、高分辨力、多波段、高集成、轻型化和低成本为特征的第三代红外焦平面技术的方向发展^[1, 6-7]。

1 焦平面红外探测器应用现状

热探测器的应用早于光子探测器。热探测器包括热释电探测器、温差电偶探测器、电阻测辐射热计等。热探测器具有宽谱响应、室温工作的优点, 但是它响应时间较慢、高频时探测率低, 目前主要应用于民用领域。光子探测器是基于光电效应制备的探测器, 通过配备致冷系统, 具有高量子效率、高灵敏度、低噪声等效温差、快速响应等优点。在军事领域, 光子探测器占据主导地位。常用的光子探测器有碲镉汞 (HgCdTe)、InAs/InGaSb II 类超晶格、GaAs/AlGaAs 量子阱等。近年来量子点红外光探测器也引起广泛关

收稿日期: 2016-02-29

基金项目: 中航工业基础院创新基金资助项目 (JCY2015A002)

作者简介: 李维 (1986-), 男, 工程师, 博士, 主要从事飞秒激光微纳加工及半导体光电器件方面的研究。

注，量子点红外光探测器在理论上具有很多优点，但实际制备的量子点红外光探测器与理论预测的还是有一定差距。表 1 对几种常用的光子型焦平面红外探测器进行了比较^[8-14]。

表 1 几种常用的光子型焦平面红外探测器比较

常见探测器	优点	缺点
HgCdTe 探测器	本征吸收、带隙可调、高探测率、高量子效率、高响应速率、低功耗、低暗电流	HgCdTe 薄膜均匀性差带来探测率和探测波长的不确定性、缺陷密度较高、成品率较低、机械强度较差、衬底昂贵且面积小
Ⅱ类超晶格探测器 InAs/InGaSb	本征吸收、较大的带隙调节范围、高探测率、可吸收正入射光、高吸收系数、高量子效率	分子束外延生长工艺技术不够成熟、暗电流较高、衬底价格较高且质量不如 GaAs 材料
量子阱红外探测器 GaAs/AlGaAs	带隙可调、大面积均匀性好、成熟的Ⅲ/V族半导体工艺、高成品率、低成本、高响应速率、抗辐射	非本征吸收、量子效率较低、暗电流较高、不吸收正入射光
量子点红外探测器 InAs/GaAs QDs	响应垂直入射，工作温度高，响应光谱可调，暗电流低	量子点均匀性难以保证、量子效率低、吸收区域薄

在精确制导领域，主流制导方式有红外制导和雷达制导，这两种方式各有优势，在某些特定的场合，红外制导更是显示出其不可替代性。与雷达制导的主动探测相比，红外探测是被动探测，它不辐射电磁波，有利于提高飞机的隐蔽性能。另一方面，红外探测器的工作波长比雷达探测的微波要短 3 到 4 个量级，这样红外成像分辨力更高，可以满足某一特定细节的高精度成像需求。而且红外探测还具有准确可靠、保密性好、抗电子干扰性强等优势。例如在电子、光电对抗、以及使用隐身战机的情况下，特别是数字射频存储干扰技术的扩散，雷达型空空导弹在受到干扰时失效的几率大大提高，因此雷达型导弹难以消灭所有的视距外目标。国外对装备机载雷达的隐身飞机进行空战模拟，结果发现当距离较远时，机载雷达难以发现敌机。这就意味着，红外制导型空空导弹在未来空战

中的地位将有所提升。

国外第四代空空导弹制导系统中，如美国的响尾蛇、英国阿斯拉姆、俄罗斯 R-73、法国米卡红外型、德国依尔伊斯特、以色列“怪蛇”系列等最新型号都采用了基于焦平面红外探测的红外制导技术。国产武器装备也是如此，空空导弹中应用抗干扰型多元成像导引头，能够高离轴角发射，并具备超机动性；在防空导弹中采用红外成像导引头，较好地解决了超低空飞行引信容易误启动的情况；在反坦克导弹中使用了红外焦平面成像式自导头，配有非冷却式光电探测器，成为非致冷式红外成像制导反坦克导弹。

在瞄准系统、侦察夜视领域，焦平面红外探测器也具有广泛的应用前景。据报道，一款夜间瞄准系统升级设备将用于美国海军陆战队 AH-1 眼镜蛇攻击直升机，此机载夜间瞄准系统是一个光电前视红外塔楼状传感器组件，能为海军陆战队提供远程监视、跟踪、高空目标探测、测距和激光指示^[15]。美国海军战斗机专家正在更新自航母起飞的 F/A-48 战斗轰炸机机载前视红外瞄准系统，以达到给飞行员提供大幅增加的目标检测和识别范围、先进激光指示能力、远离海岸行驶的精确评估、光电和红外成像的目的^[16]。

2 焦平面红外探测器研究现状

2.1 国内研究现状

国内研制焦平面红外探测器主要研究机构有上海技术物理研究所、昆明物理研究所、国防科学技术大学、南京理工大学等单位^[17-22]。上海技术物理研究所砷镉汞红外探测器的研制方面，包括材料生长、器件工艺设计、电路设计方面都积累了丰富的经验^[17-18]。南京理工大学在红外焦平面阵列非均匀性校正上开展了深入的研究^[22]。

目前，焦平面红外探测器产业化发展迅速，国内已有多家企业具有生产致冷型或非致冷型焦平面红外探测器的能力，其所生产的典型产品指标如表 2 所示^[23-24]。近年来，国内已建有具有自主知识产权的 8 英寸 0.25 μm 非致冷红外探测器生产线，新型氧化钒 800 ×600 高分辨力非致冷焦平面红外探测器及Ⅱ类超晶格红外探测器短波、中波和长波产品均已面世^[25]，这些成果对于提升国家自主创新能力和国家战略装备的研制具有重要意义。总体来看，国产焦平面红外探测器的制造能力正在迅速提高，不仅实现了从衬底、外延、芯片、封装到致冷机的自行设计和研发，也实现了从材料到组件的全国产化。

表 2 国内焦平面红外探测器典型产品指标

探测器类型	材料	阵列规模	像元间距/ μm	光谱范围/ μm	噪声等效温差
非致冷型	非晶硅	640 $\times$ 480	25	8 ~14	$\leq 60 \text{ mK}$ ($F/1$, 50 Hz , 300 K)
	非晶硅	400 $\times$ 300	25	8 ~14	$\leq 40 \text{ mK}$ ($F/1$, 50 Hz , 300 K)
	氧化钒	400 $\times$ 300	17	8 ~14	$\leq 60 \text{ mK}$ ($F/1$, 50 Hz , 300 K)
致冷型	碲镉汞	640 $\times$ 512	15	3.7 ~4. 8	$\leq 18 \text{ mK}$ ($F/2$, $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 35^\circ\text{C}$)
	Ⅱ类超晶格	320 $\times$ 256	30	3.7 ~4. 8	$\leq 13 \text{ mK}$ ($F/2$, $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 35^\circ\text{C}$)
	Ⅱ类超晶格	320 $\times$ 256	15	7.4 ~10. 5	$\leq 25 \text{ mK}$ ($F/2$, $T_1 = 20^\circ\text{C}$, $T_2 = 35^\circ\text{C}$)

2.2 国外研究现状

国外焦平面红外探测器的生产厂商主要分布在美国、英国、法国、德国、日本及以色列等国^[1, 26]。表 3 列出了目前国外典型的焦平面红外探测器性能指标^[27-28]。

表 3 国外公司典型的焦平面红外探测器性能指标

探测材料	阵列规模	像素尺寸/ μm	光谱范围/ μm	操作温度/K
VO _x	640 $\times$ 480	28 $\times$ 28	8 ~ 14	300
InGaAs	650 $\times$ 512	25 $\times$ 25	0. 4 ~ 1. 7	300
Si: As	2048 $\times$ 2048	18 $\times$ 18	5 ~ 28	7. 8
Si: As BIB	320 $\times$ 240	50 $\times$ 50	2 ~ 28	4 ~ 10
InSb	1024 $\times$ 1024	15 $\times$ 15	3 ~ 5	77
HgCdTe	4096 $\times$ 4096	15 $\times$ 15 10 $\times$ 10	1. 0 ~ 5. 4	37
HgCdTe	1280 $\times$ 1024	15 $\times$ 15	3. 4 ~ 7. 8	77 ~ 100
HgCdTe	640 $\times$ 512	15 $\times$ 15	8 ~ 9	40
HgCdTe	640 $\times$ 512	16 $\times$ 16	8 ~ 10	90

美国 Raythen 公司已研制出一种双波段 HgCdTe 红外焦平面阵列结构^[29]，而且还将会作为对现有的地基和机载战术系统进行升级的第三代产品而获得进一步的发展。在非致冷型探测器领域，Raythen 公司正在与美国陆军夜视与电子传感器管理局及美国国防高级研究计划局(DARPA) 联合研制 2048 $\times$ 1536(三百万像元级) 非致冷焦平面阵列^[30]。

在小型探测器研究领域，DARPA 已成功研制了一

系列像元间距为 5 ~8 μm 的红外探测器^[31]，而作为 DARPA 的大口径海洋基础数据阵列计划的一部分，一种基于像元间距为 5 μm 的碲镉汞焦平面阵列的中波红外相机也已被研制出^[31]。

美国 Northrop Grumman 公司研制的硒化铅探测器被认为是焦平面红外探测的一大突破，这种致冷型光子探测器具有很高的灵敏度和成像速率，但价格低廉，无需采用低温制冷装置^[31]。

法国 Sofradir 公司的红外探测器产品较多，包括 HgCdTe, InSb, InGaAs, QWIP 以及微测辐射热计，覆盖了短波红外^[32]、中波红外^[33]、长波红外^[34] 光谱。近期公司又推出了像元间距为 10 μm 的 Daphnis 系列红外探测器，该探测器是世界上第一款采用小像元间距技术制成的致冷型中波红外成像产品，非常适合电光系统研究人员用来研制陆基、机载和舰载军事系统^[34]。

3 存在的问题及发展趋势

目前主流的焦平面红外探测器具有成像系统体积小、质量轻、功耗低、系统灵敏度高、工作帧频高等一系列优点，但其缺点也很明显，如 HgCdTe 红外探测器材料均匀性相对较差，Ⅱ类超晶格探测器分子束外延生长工艺不够成熟，量子阱红外探测器不吸收正入射光，量子效率相对较低，量子点红外探测器也存在量子点材料不均匀的问题。除此之外，不同材料制备的焦平面红外探测器还存在一个共性的问题，那就是焦平面红外探测器存在成像非均匀性问题。相比于单点扫描和线阵扫描，焦平面阵列由于规模大，所以其成像非均匀性问题就比较突出。成像非均匀性也称固有空间噪声，是指焦平面阵列在均匀辐射输入时，各单元输出的不一致性^[35]。造成图像非均匀的因素是多方面的，包括红外焦平面阵列中各探测单元的响应特性不一致；红外光学系统的影响，如镜头加工精度、镜头孔径等因素影响；红外焦平面外界输入的影响；红外焦平面阵列中无效探测单元的影响；红外焦平面阵列温度变化的影响；读出电路本身非均匀性及读出电路与探测器耦合非均匀性的影响^[36]。非均匀性影响测量精度，特别是在弱信号探测时尤为严重。

目前的校正方法主要有两类，一类是定标类校正，另一类是场景类校正^[36]。定标类校正方法主要包括一点校正法、两点校正法、多点校正法和插值校正法，场景类校正方法包括时域高通滤波算法、神经网络法、维纳滤波法、小波滤波法等^[37-42]。定标类校正方法处理数据较少，可实现实时校正，不需场景运动，但是

定标类校正方法校正系数固定不变,不能够随着器件工作温度及环境状态的变化而自适应变化。场景类校正法不需定标,可依据场景的变化自适应计算各个探测单元的增益和偏执系数,但是场景类校正法计算量大,校正精度低,难以在实际应用中推广。目前在军事中广泛应用的校正方法主要是定标类校正方法。为了进一步提升红外焦平面成像的均匀性、提升武器装备中制导精度,开展红外探测器成像非均匀性参数校正的新方法研究以及探测器数据采集系统的定性检查和定量校准是迫切和必要的。

焦平面红外探测器的发展趋势主要体现在以下几个方面。首先是探测器向高集成度、小型化方向发展,这主要体现在像元间距越来越小,阵列规模越来越大。目前的长波红外器件规模可以达到 640×512 ,中、短波器件规模可以达到 1024×1024 甚至 4096×4096 ,Sofradir 公司生产的 DAPHNIS 型 HgCdTe 探测器,其像元间距仅为 $10 \mu\text{m}$ 。其次是非致冷型红外探测器研究热度增加,与致冷型红外探测器相比,非致冷型红外探测器探测精度略差,但是由于没有致冷系统,它具有价格低、功耗低、质量轻、体积小易于便携设计等一系列优点^[43],此外,低温致冷系统和复杂的扫描装置是红外系统的主要故障源,所以非致冷热成像还具有可靠性高的优势。最后是多波长焦平面红外探测成为研究热点。单一波长的红外探测容易受外界环境干扰导致探测能力和准确度下降,在红外制导武器中,单一波长的红外探测器一旦受对应波段的激光武器攻击,很难避免被致盲。采用多波段探测,可以有效地避免外界干扰,降低虚警率,提高系统对假目标的鉴别能力,满足未来战场的需要。例如,荷兰的 IRSCAN 和法国的“斯皮拉尔”舰用红外警戒系统等都采用的是双波段探测。

4 总结

红外探测器在军事领域特别是精确制导领域具有重要的地位,在焦平面红外探测器的制备方面,国内焦平面红外探测器生产能力迅速提高,但总体上,国内与国外还存在一定的差距。焦平面红外探测器存在成像非均匀性的问题,对焦平面阵列红外探测器进行非均匀性校正可以极大提高其探测精度。非致冷型焦平面红外探测器研究热度增加,高集成度、多波长探测也是焦平面红外探测器的发展趋势。

参 考 文 献

[1] Rogalski A. Infrared detectors: an overview [J]. Infrared

Physics&Technology, 2002, 43: 187-210.

- [2] Chorier P, Delannoy A. Sofradir latest developments for infrared space detectors [J]. SPIE, 2011, 8012(1): 34-38.
- [3] Maurer T, Wilson D L, Smith S R, et al. Search and detection comparing midwave and longwave infrared [J]. Optical Engineering, 2009, 48(11): 933-956.
- [4] Breniere X, Manissadjian A, Vuilleumet M, et al. Reliability optimization for IR detectors with compact cryo-coolers [J]. Proceedings of the SPIE, 2005, 5783: 187-198.
- [5] 魏楞杰. 谈谈空空导弹的制导系统 [EB/OL]. (2015-07-19) [2016-02-16]. <http://www.afwing.com/weapon/aa-missile-homing-guidance.html>.
- [6] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(9): 091101.
- [7] 何力, 杨定江, 倪国强, 等. 先进焦平面技术导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [8] Phillips J D, Edwall D D, Lee D L. Control of Very-Long-Wavelength Infrared HgCdTe Detector-Cutoff Wavelength [J]. Journal of Electronic Materials, 2002, 31(7): 664-668.
- [9] Itsuno M, Phillips J D, Velicu S. Predicted Performance Improvement of Auger-Suppressed HgCdTe Photodiodes and p-n Heterojunction Detectors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58(2): 501-507.
- [10] Youngdale E R, Meyer J R, Hoffman C A, et al. Auger lifetime enhancement in $\text{InAs}/\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{Sb}$ superlattices [J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(23): 3160-3162.
- [11] Gunapala S D, Bandara K M S V, Levine B F, et al. Very long wavelength $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$ quantum well infrared photodetectors [J]. Applied Physics Letters, 1994, 64(17): 2288-2290.
- [12] Levine B F, Choi K K, Bethea C G, et al. New $10 \mu\text{m}$ infrared detector using intersubband absorption in resonant tunneling GaAlAs superlattices [J]. Applied Physics Letters, 1987, 50(16): 1092-1094.
- [13] Bhattacharya P, Su X H, Chakrabarti S, et al. Characteristics of a tunneling quantum-dot infrared photodetector operating at room temperature [J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(19): 191106.
- [14] Phillips J, Kamath K, Bhattacharya P. Far-infrared photoconductivity in self-organized InAs quantum dots [J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(16): 2020-2022.
- [15] 黄庆红. 美国海军陆战队为眼镜蛇攻击直升机提供红外监视和瞄准设备 [EB/OL]. (2015-04-28) [2016-01-20]. <http://www.dsti.net/Information/News/94084>.
- [16] 黄庆红. 美国海军请求雷神公司更新 F/A-18 战斗轰炸机机载红外瞄准系统 [EB/OL]. (2015-07-17) [2016-01-20]. <http://www.dsti.net/Information/News/95239>.
- [17] 焦翠灵, 王仍, 张莉萍, 等. $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ 梯度带隙薄膜材料生长及红外透射光谱研究 [J]. 光子学报, 2015, 44(8): 6-9.

(下转第 37 页)

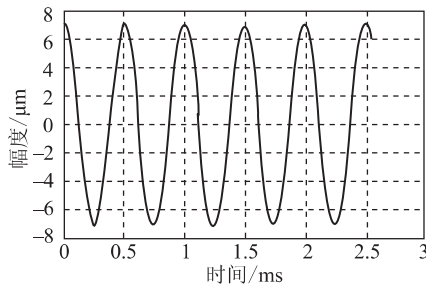


图 7 2 kHz 振动位移曲线

振幅微振动台,具有良好的动态特性,较高的频率响应,较大的振动幅度,较低的位移失真度。该振动台的工作频率范围、最大振幅、位移失真度指标达到设计要求,适合高频传感器的校准。

参 考 文 献

- [1] Gunnar Gnad, Roland Kasper. Power drive circuits for piezo-electric actuators in automotive applications [C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. 2006: 1597 – 1600.
- [2] 陶继增,王中宇,李程. 压电叠堆在正弦电压激励下振动位移特性的研究[J]. 计测技术, 2006, 26(6): 20 – 22.
- [3] Agbossou K, Dion J L, Carignan S, et al. Class D amplifier for a power piezoelectric load. [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency control, 2000, 47(4): 1036 – 1041.
- [4] Yan B, Prasad S E, Blacow R, et al. A linear high-voltage high-power amplifier for use with piezoelectric actuators. [C]//Proceedings of the 6th Cansmart Workshop Smart Materials and Structures. 2003: 247 – 252.
- [5] 鄢珂,胡敏强,金龙,等. 叠层型压电驱动器的应用研究[C]//第十二届中国小电机技术研讨会. 上海: 中国电子元件行业协会微电机与组件分会, 2007.
- [6] 田健仲,朱虹,张俊方. 串联谐振电路 Q 值计算与仿真分析[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2009(S1): 92 – 96.
- [7] 梁予,王社柱. 电感电容损耗电阻的讨论[J]. 物理测试, 2002(5): 17 – 19.
- [8] 陶继增,于娅楠,李金颖,等. 压电陶瓷厚度对硬度计加载控制稳定度的影响[J]. 航空科学技术, 2010(6): 29 – 31.
- [9] 岳桢干. 法国 Sofradir 公司总部将乔迁新址谋求全面发展一各类红外探测器研究现状简介(上) [J]. 红外, 2013, 34(12): 39 – 44.
- [10] 岳桢干. 法国 Sofradir 公司总部将乔迁新址谋求全面发展一各类红外探测器研究现状简介(中) [J]. 红外, 2014, 35(1): 45 – 48.
- [11] 岳桢干. 法国 Sofradir 公司总部将乔迁新址谋求全面发展一各类红外探测器研究现状简介(下) [J]. 红外, 2015, 36(6): 33 – 48.
- [12] 袁祥辉. 固体图像传感器及其应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1996.
- [13] 代少升,李季碧,张天琪,等. 红外焦平面阵列成像及其非均匀性校正技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- [14] 陈锐,谈新权. 红外图像非均匀性校正方法综述[J]. 红外技术, 2002, 24(1): 1 – 3.
- [15] 代少升,袁祥辉. 红外图像非均匀性实时校正的新技术[J]. 光学精密工程, 2004, 12(2): 201 – 204.
- [16] Dai S H, Zhang T Q. A nonlinear piecewise scheme for non-uniformity correction in IRFPA [J]. IEICE transactions on Electronics, 2008, 10: 1698 – 1701.
- [17] 代少生,高健,张天琪. 一种红外焦平面阵列非均匀性校正的新方法[J]. 半导体光电, 2008, 29(4): 122 – 126.
- [18] 吴传玺,代少升. 基于中值滤波的红外焦平面阵列非均匀性神经网络校正[J]. 红外, 2010, 21(8): 14 – 18.
- [19] Dai S H, Zhang T Q. An improved non-uniformity correction algorithm for IRFPA based on neural network [J]. IEICE transactions on Electronics, 2009, 5(5): 736 – 739.
- [20] 杨立,杨桢. 红外热成像测温原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [21] 高磊,翟永成,梁清华,等. 红外焦平面读出电路集成数字输出[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(6): 1686 – 1691.
- [22] 尹爽,朱颖峰,黄一彬,等. 红外焦平面杜瓦冷屏挡光环杂散辐射的抑制[J]. 红外技术, 2015, 37(11): 916 – 920.
- [23] 覃钢,李东升. 分子束外延碲镉汞薄膜的砷掺杂技术[J]. 红外技术, 2015, 37(10): 858 – 863.
- [24] 郑鑫,江天,程湘爱. 波段外激光辐照光导型 InSb 探测器的一种新现象[J]. 物理学报, 2012, 61(4): 419 – 425.
- [25] 秦屹. 基于场景的红外焦平面阵列非均匀性校正[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [26] 高德红外. 产品中心[EB/OL]. [2016-01-20]. <http://www.wuhan-guide.com/default/category-134.html>.
- [27] 大立科技. 产品中心[EB/OL]. [2016-01-20]. <http://www.dali-tech.com/products>
- [28] 张海龙. 专访高德红外董事长黄立: 成就百年老店必须让企业拥有核心竞争力[EB/OL]. (2015-09-10) [2016-01-20]. <http://www.c114.net/news/16/a918044.html>.
- [29] 邢素霞. 外热成像与信号处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [30] Rogalski A. Infrared Detectors for the Future [J]. Acta Physica Polonica, 2009, 116(3): 389 – 404.
- [31] Rogalski A. History of infrared detectors [J]. Opto-Electronics Review, 2012, 20(3): 279 – 308.
- [32] 岳桢干. 美国 Raytheon 公司研究人员谈下一代电光/红外探测器的发展(上) [J]. 红外, 2014, 35(8): 47 – 48.
- [33] 岳桢干. 美国 Raytheon 公司研究人员谈下一代电光/红外探测器的发展(下) [J]. 红外, 2014, 35(9): 48.
- [34] 岳桢干. 美国研究人员谈红外系统的最新进展(下) [J]. 红外, 2015, 36(1): 46 – 48.

(上接第 4 页)