

红外成像系统及其应用

李相迪¹, 黄 英¹, 张培晴², 宋宝安¹, 戴世勋², 徐铁峰¹, 聂秋华¹

(1. 宁波大学信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315211; 2. 宁波大学红外材料及器件实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 红外成像技术是一种通过摄取景物热辐射分布图像, 并将其转换为人眼可见图像技术, 近年来红外成像技术发展迅速, 在军事、工业、农业、医学等各领域显示出越来越重要的应用。本文对红外成像系统的原理、组成及应用进行了分析, 总结了其研究现状, 并对其发展前景进行了展望。

关键词: 光学; 红外技术; 成像系统; 红外材料; 红外探测器

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.03.001

Infrared imaging system and applications

LI Xiang-di¹, HUANG Ying¹, ZHANG Pei-qing², SONG Bao-an¹, DAI Shi-xun², XU Tie-feng¹, NIE Qiu-hua¹

(1. Infrared Materials and Devices Laboratory of Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. College of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: Infrared imaging technology is the method which converts the thermal radiation of the target into the visible image. In recent years, infrared imaging technology has rapidly developed and shown more and more important applications in various fields. The principle, compositions and applications of infrared imaging system are analyzed, and the research process is summarized. Finally, the potential applications and development prospects are discussed.

Key words: optics; infrared; imaging system; infrared material; infrared detector

1 红外成像系统简介

虽然早在1800年物理学家赫歇尔就发现了红外线, 但红外成像技术的实际应用却始于第二次世界大战期间。红外成像即根据热力学零度以上一切物体都在发射热红外线的原理, 通过感应红外线然后呈现出肉眼可见的图像。红外成像的发展来源主要是军事需求, 近年来, 随着机器视觉技术的迅速发展及热成像精度的提高, 红外热成像技术的研究与应用已逐渐扩大到现代工业、农业、生物、食品和医疗等领域, 呈现出越来越广泛普及的趋势^[1]。

本文在简要阐述了红外热成像原理的基础上, 分析了红外成像装置各个组成部分的研究进展, 以及红外热成像技术在各领域中的应用情况, 分析了目前存在的问题, 并展望了未来可能应用研究的领域及方向。

2 红外成像系统的原理及组成

2.1 红外成像的原理及系统组成

自然界中波长在2.0~1000 μm之间的电磁波

称为热红外线(也叫热辐射), 只要物体温度在热力学零度(-273℃)之上都可以发出红外光。由于人眼无法识别红外光, 因此必需使用特殊的装置实现红外信号的可视化, 即红外成像系统。典型的红外成像系统由光学系统, 红外探测器和电子处理系统组成。光学系统主要的作用是将目标物体热辐射成像在红外探测器的感光面上, 探测器将红外光信号转换成数字信号量, 最后通过电子处理系统把数字信号转换成人眼能看到的图像。

在红外成像系统中, 光学系统和红外探测器是关键的部分, 决定着红外成像系统的成像质量和应用范围。随着红外光学技术的长足发展及其实际应用范围的不断扩展, 人们对于红外成像的质量

基金项目: 浙江省自然科学基金(No. LQ12F05004); 宁波市自然科学基金(No. 2012A610116)资助。

作者简介: 李相迪(1989-), 男, 学士, 研究方向为红外硫系玻璃及红外成像系统。

收稿日期: 2013-07-09; **修订日期:** 2013-08-13

和应用范围的要求日益增加,推动了红外成像技术的快速发展。

2.2 红外镜头材料

目前常用的红外透镜材料主要有锗单晶、硒化锌(ZnSe)晶体和硫系玻璃等。锗单晶是重要的半导体材料,是目前用来制造红外光学镜头以及保护红外镜头的红外光学窗口的主要材料,目前60%以上的中低端红外光学镜头和50%的高端红外光学镜头均为锗单晶制造。硒化锌材料是另一种常用的红外镜头材料,基本不存在杂质吸收,散射损失极低,被广泛应用在红外夜视装置中。

近年来,随着非制冷型探测器制造技术的突破性进展,红外成像系统在民用领域有了广泛的应用,随之而来的问题是如何降低其制造成本,而红外镜头便是其重要的影响因素。由于锗单晶和硒化锌材料等都比较稀有昂贵,对于红外热成像系统中常用的非球面、衍射面等一直采用传统的单点金刚石车削工艺加工,成本高、效率低。因此寻找一种性价比高而且易于加工的替代材料成为必然的选择^[2]。硫系红外玻璃可以克服锗单晶、硒化锌单晶及多晶加工成本高、不能制造大尺寸光学元件的缺点,作为非晶态的物质,而且转变温度可以达到250℃以上,可以采用热压的方法加工成任意的形状如图1,从而大大降低红外成像镜头的生产成本而备受红外业界的关注^[3-5]。

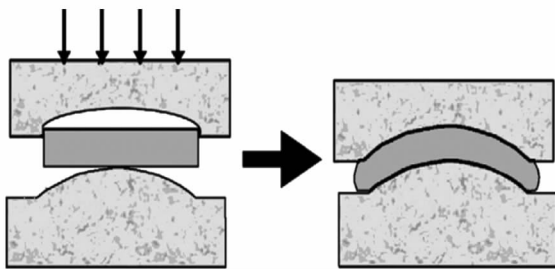


图1 硫系玻璃精密热压示意图

2.3 红外镜头的设计

红外热成像技术的基础是红外探测器以及红外透镜材料。红外透镜材料较大的折射率会产生不可忽略的色散,尤其是当入射光线具有宽的光谱范围时,色散更为严重,且红外成像设备通常需工作在较大的温度范围,对红外光学系统的设计和制造提出更高的要求。因此近年来,众多学者提出含二元衍射面的非球面透镜及具备温度补偿自适应功能的红外光学系统^[6]。

在成像光学系统中,二元光学衍射透镜同普通透镜一样会聚入射光线,但它不是根据折射,而是衍射原理。由于衍射作用透镜产生色差的有效焦距同

波长成反比^[7]:

$$f(\lambda) = \frac{\lambda_0}{m\lambda} f_0 \quad (1)$$

式中, f_0 为设计波长 λ_0 的焦距; m 为衍射级次(一般取 $m=1$)。从式(1)可以看出,随着波长变长,其焦距成线性变短。而传统的折射透镜的随着波长变长,折射率减小,焦距变长;因此二者产生的色差正好相反,在光学系统的设计中可以相互抵消。其示意图如图2所示。

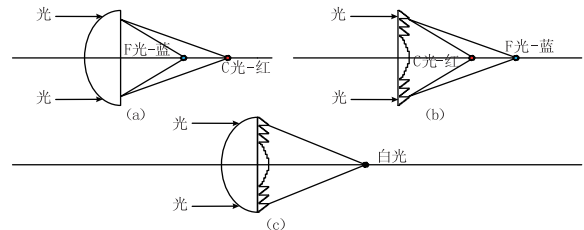


图2 含二元衍射面非球面消色差原理图

含二元衍射面非球面在消除色差,简化光学系统结构等方面有着十分大的优势。特别是在中长波红外应用中,镜面热辐射杂光减小,显著提高光学系统校正球差、彗差、像散、畸变的能力,减小光学系统的零件数量,提高光学系统的透过率,简化光学系统结构,减小光学系统体积。可以提高系统的信噪比,因此二元衍射面非球面中波红外光学系统中有着重要的应用价值^[8-9]。

2.4 红外探测器

红外探测器是红外成像系统的重要组成部分。红外探测器的工作原理是以红外辐射与敏感材料的相互作用产生的各种效应为基础进行工作的。敏感单元的某些物理量,如尺寸大小、温度、电阻等会随着红外辐射强度的不同而发生相应的变化,根据这些物理量的变化就可以对红外辐射进行探测。红外探测器根据探测原理的不同可分为光子探测器与热探测器两大类^[10-12]。

2.4.1 热探测器

热红外探测器基于热敏材料吸收红外辐射产生的热效应,根据热效应的机制不同又可分为微测辐射热计、热释电和热堆3种类型^[13]。

微测辐射热计的主要工作原理是通过具有热敏特性的探测材料,识别温度的变换使其电阻发生变换的热敏电阻效应。目前研究的主要材料有半导体、Ti金属薄膜及高温超导材料^[14]。在半导体材料中, VO_x 因其具有高的TCR值,低的热导率,以及制备工艺与硅工艺兼容,较低的噪声等优点备受关注。

热释电探测器的主要工作原理在于外界的温度迅

速变化时导致晶体自发极化强度发生改变。由于热释电探测器工作时需要以适当的频率改变入射的场景温度和参考温度以获得目标探测信号,因此热释电探测器的显著特点是需要一个调制器,单片式红外热释电探测器结构如图3。热释电探测器具有功耗小,携带方便,响应速度快,工作频带宽等特点,但由于工作环境的变化需要用不同性质的热释电敏感材料。

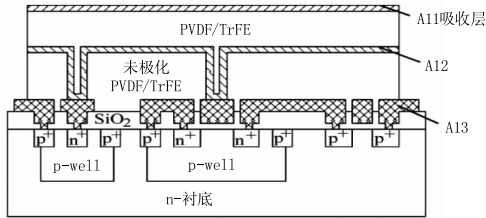


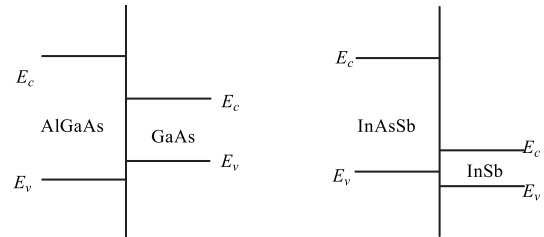
图3 单片式红外热释电探测器结构图

热堆的主要原理是基于塞贝克效应。早期的热堆材料主要是半金属或复合半导体如铋碲。这种材料具有低热导、低电阻等优点,但缺点是制作工艺不能与硅集成电路工艺兼容。近年来采用复合机械加工技术制作的Si和Al结构热堆可以与CMOS工艺兼容,大大方便了后续读出电路的工艺设计以及器件最终各向异性腐蚀技术的应用。

2.4.2 光子探测器

光子探测器基于光电效应,其对波长的探测选择性强,信噪比高,响应速度快,但光子型探测器通常需要低温工作,必须配备昂贵且笨重的制冷设备,高成本和难以小型化的缺点制约着其向民用领域应用的扩展。光子探测器中应用最广的红外材料当属碲镉汞(HgCdTe),由于它具有较高的光子吸收率,在相同温度下,HgCdTe材料热激发产生的载流子的暗电流较小,因而能获得很高的信噪比。但是HgCdTe通常只能工作在低温条件,高额的成本限制了其应用的范围,不能大规模的应用于民用。之后人们发现了超晶格多量子阱,其结构为:在构成超晶格的两种材料中,如果其中一种材料的禁带能级完

全包含在另一种材料的禁带能级中,则由这两种材料构成的超晶格为I类超晶格。图4(a)为典型的GaAs/GaAlAs I类超晶格能带结构图^[15]。虽然I类超晶格的稳定性好,能制造大规模双色红外焦平面器件阵列,但由于与碲镉汞探测器之间在暗电流、探测器灵敏度还存在着较大的差距,因此难以大规模的使用。后来,人们的研究的目光开始转向另一类超晶格结构的材料:其中某一种材料的禁带能级空间不完全包含在材料另一种材料禁带能级空间之中,这两种材料所构成的超晶格能带结构为II类超晶格结构,如图4(b)所示^[16]。



(a) GaAs/AlGaAs构成的I类超晶格能带结构 (b) InAsSb/InSb构成的II类超晶格能带结构

图4 超晶格能带结构示意图

近年来科学家又研发出一类新型的量子阱红外探测器(QWIP)。与其他探测器相比,QWIP具有相应速度快,探测率与HgCdTe相近和探测波长可调节的优点,而且可以利用MBE和MOCVD等先进工艺生长出高品质、大面积和均匀的量子阱材料,用以制备大面积探测器阵列。表1对HgCdTe、II类超晶格及量子阱三种材料的性能进行了对比,可以看出InAs/InGaSb II类超晶格探测器具备能吸收正入射光能量、量子效率高、积分时间短(1~2ms)和帧速率高的优点,由于量子阱探测器不能吸收正入射光能量,因此需要在探测器表面需要制作复杂的光栅结构,增加了器件工艺的复杂性^[17]。随后在半导体超晶格、量子阱基础上发展出了量子点红外光电探测器(QDIP),省去了表面光栅的制作,降低了器件工艺的复杂性和成本。

表1 HgCdTe、II类超晶格及量子阱长波红外探测器的性能比较(77K)

Parameter	HgCdTe	QWIP (n-type)	InAs/CaInSb SL
IR absorption	Normal incidence	$E_{optical} \perp$ plane of well required Normal incidence; no absorption	Normal incidence
Quantum efficiency	$\geq 70\%$	$\leq 10\%$	$\approx 30\% \sim 40\%$
Spectral sensitivity	Wide-band	Narrow-band (FWHM = 1 ~ 2 μm)	Wide-band
Optical gain	1	0.2 (30 ~ 50 wells)	1
Thermal generation lifetime	$\approx 1 \mu\text{s}$	$\approx 10\text{ps}$	$\approx 0.1 \mu\text{s}$
RoA product ($\lambda = 10 \mu\text{m}$)	$300 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$	$200 \Omega \cdot \text{cm}^2$
Detectivity ($\lambda = 10 \mu\text{m}$) ($\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \text{W}^{-1}$)	2×10^{12}	2×10^{10}	5×10^{11}

国外多家研究机构采用金属有机化学气相沉积(MOCVD)或分子束外延(MBE)自组织生长量子点,先后研制出中波 256×256 、双色(中、长波) 320×256 、长波 640×512 焦平面阵列,由于其自身具有的优点,未来将与HgCdTe、InSb和QWIP等探测器和非制冷微测辐射热计等探测器展开激烈的竞争^[18]。

3 红外成像系统的应用

3.1 军事领域的应用

红外成像技术起源于军事技术,随着红外成像技术的发展与成熟,其在军事领域的应用也越来越广泛。红外夜视仪和红外枪瞄系统可以使士兵在黑暗环境中发现潜在的“敌人”,并精确瞄准,大大提高了单兵的作战能力,目前红外夜视仪已经成为各国军队普遍采用的装备。在制导领域,红外成像制导技术目前已经成为研究的新热点,这是一种可以使导弹威力倍增的高效费比技术。其具备隐蔽性好、能昼夜工作、穿透烟雾能力强等优点,是一种全天候的制导方式,具有在各种复杂战术环境下自主搜索、识别和跟踪目标的能力。此外,红外成像系统还可以应用于各种实地战争中的侦查、探测装置、自动跟踪、识别及抗干扰装置等许多军用设备^[19-20]。

3.2 工业领域的应用

工业生产中,大多设备发生故障的地方温度都发生明显变化,可以利用红外成像及测温技术来发现工业设备仪器的故障并及时进行维修,而且红外成像检测装置具备远距离非接触操作,检测速度快,精度高等优点,尤其对某些高温、高压、有毒、有害或带电等环境的设备检测具有其他手段不可比拟的优势。带电设备的红外诊断技术目前已经成为一门新兴的学科。它是利用带电设备的致热效应,采用红外成像仪器获取从设备表面发出的红外辐射信号,从而判断出设备的工作状况,如图5所示。由于红外检测技术具有不需停电、准确高效、远距离等优点,克服了定期检修的盲目性,具有很高的安全性和经济价值。

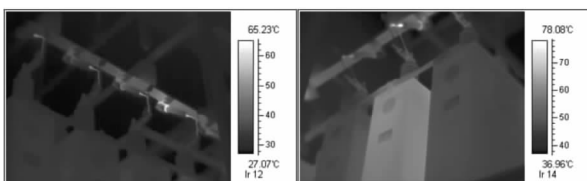


图5 带电工作的电阻丝和电容器的红外成像图

3.3 农业领域的应用

随着科技的进步,农业生产已经从落后的传统耕种逐渐发展到依赖高科技的现代农业,现代化农业与过去普通的农业相比,机械自动化是其主要特点,但红外成像技术在现代农业中也发挥着日益重要的作用。如将红外成像技术应用于农作物生长监测、苗圃大棚室温监控、农作物病虫害预防等^[21],可以大大提高农作物的生产品质和生产效率。此外,在农产品加工过程中,农产品品质无损检测、深加工监测控制、农产品储藏控制等也离不开红外成像和探测技术^[22]。为确保食品质量和安全,监测其温度是十分重要的。由于热成像技术可以无损、快速、非接触式测量,大大避免了食品的交叉感染和损坏。考虑到食品上产生的细菌通常是在食品表面生长,通过快速测量食品表面的温度,红外热像仪可以提供有关危险情况的重要信息。

3.4 安防领域的应用

现如今大多数的夜间监控系统为可见光摄像头进行拍摄,除了需要人力实时监测之外,尤其在光线差的地方成像十分模糊,监测人员根本看不清录像,以致于夜间犯罪案件频频发生。为了解决这一问题,红外夜视监控系统应运而生,如图6所示,它可以无论白天黑夜进行实时监控,即使在伸手不见五指的夜晚也能将周围的环境看的一清二楚,既节省人力又有效阻止不法分子进行盗窃等犯罪行为。在黑暗的夜晚,没有强光,物体发出的红外光,可以通过车载夜视仪,帮助我们识别路段,同时就算对面有强光过来,由于红外光不受强光的影响,照常可以帮助我们分别过来的车辆。此外,红外成像装置在火灾防治和消防救援等领域也有着重要的应用。如对煤层自燃高温火源区域的探测一直是煤矿防火治理中的重大难题。红外成像探测法可以快速区分燃烧区与正常区域温度的差异,准确地测出煤层火源位置、范围和燃烧程度^[23]。



图6 利用红外热成像装置监控小区安全

3.5 医疗领域的应用

由于红外波段包含了大量生物分子的特征谱线,因此可以利用红外成像技术对人体进行医疗诊断。如利用红外热像仪在海关出入境检疫口岸对大量出入境人群的体温进行非接触式快速测量,根据体温的变化及时发现病患,在 SARS 和禽流感期间发挥了巨大的作用。另一方面,由于红外波段包含大量分子特征谱,可以将红外成像技术用于癌症的识别。红外显微成像技术能够在分子水平上反映组织中生物大分子结构组成及官能团振动方式的改变^[24],当自身的细胞发生病变时,通过此技术就可以分别出来,而且此技术用的是被动成像原理,因此对人体的伤害十分小。肿瘤是严重威胁人类健康和生命的疾病,尽管目前肿瘤诊断技术(内窥镜技术、影象技术和肿瘤标志物检查技术等)迅速发展,但最终还是依赖于形态学的诊断来确定肿瘤的性质,分化程度及预后等。由此导致对肿瘤诊断存在一定的主观性,而红外显微成像技术是一种准确、高效、客观的肿瘤诊断技术^[25]。图 7 为利用 LI-COR 公司开发出的商品化的红外荧光探针和红外荧光染料,在小白鼠体内实现多种肿瘤细胞如 A431(表皮癌),SW620(结肠癌),22Rv1(前列腺癌),PC3MLN4(前列腺癌)标记的示意图,此方法可实现活动生物的红外成像,为肿瘤的研究提供了新的途径^[26]。

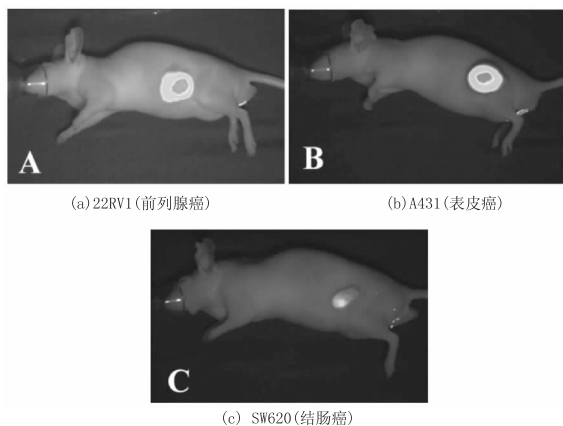


图 7 利用红外荧光探针检测

4 总结和展望

红外材料及光学集成技术在不断进步,但仍然存在问题,有待进一步探讨。由于其研究技术水平尚未成熟,所用材料特殊性使其价格远超非红外成像设备,这阻碍了其在军用、民用领域的普遍应用。在我国,红外成像的仿真手段、测试方法与评价标准和国外有着很大差距,没有一套完整统一的规范化标准,这在一定程度上制约了红外技术的发展。

虽然红外成像技术存在一定的问题,但是它潜在的能力不可以低估。随着硅集成电路技术和工艺的日益成熟,红外成像技术的缺点将会逐步得到改善;在纳米技术的帮助下,测量的精度也将得到大量的提高;同时第二类超晶格材料和量子点探测器的发展,也将大幅度的改善光探测器工作条件。随着红外新材料和新技术的进步,红外成像设备的成本将逐渐降低,其在民用的道路上将会有更大的突破。

参考文献:

- [1] Wang Ruifeng, Yang Xianjiang, WU Weidong. Development of infrared thermal imaging technology [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(6): 699 - 702. (in Chinese)
王瑞凤, 杨宪江, 吴伟东. 发展中的红外热成像技术 [J]. *红外与激光工程*, 2008, 37(6): 699 - 702.
- [2] Yu Huaizhi. *Infrared optical material* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
余怀之. *红外光学材料* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [3] Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, et al. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41: 847 - 852. (in Chinese)
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用 [J]. *红外与激光工程*, 2012, 41: 847 - 852.
- [4] Chen Guorong, Zhang Xianghua. Development of fine molded chalcogenide glasses for IR night vision [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2004, 1: 3 - 7. (in Chinese)
陈国荣, 章向华. 红外夜仪用精密模压硫系玻璃研究进展 [J]. *硅酸盐通报*, 2004, 1: 3 - 7.
- [5] Luo Shoujun, Huang Fuyuan, Zhan Daojiao, et al. Development of chalcogenide glasses for infrared thermal imaging system [J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(1): 9 - 13. (in Chinese)
骆守俊, 黄富元, 詹道教, 等. 硫系玻璃在红外成像系统应用进展 [J]. *激光与红外*, 2010, 40(1): 9 - 13.
- [6] Leng Jiakai, Cui Qingfeng, Pei Xuedan, et al. Spherochromatism of hybrid diffractive-refractive apochromatic telescope objectives [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(5): 171 - 177. (in Chinese)
冷家开, 崔庆丰, 裴雪丹, 等. 折衍射混合复消色差望远物镜中的色球差 [J]. *光学学报*, 2008, 28(5): 171 - 177.
- [7] Pei Xuedan, Cui Qingfeng, Leng Jiakai, et al. Design and

- diffraction efficiency of a multi-layer diffractive optical element[J]. *Acta Photonica Sinic*, 2009, 38(5): 104 - 109. (in Chinese)
- 裴雪丹, 崔庆丰, 冷家开, 等. 多层衍射光学元件设计原理与衍射效率的研究[J]. *光子学报*, 2009, 38(5): 104 - 109.
- [8] Wang Xuexin, Jiao Mingyin. Athermalization design for infrared optical systems[J]. *Applied Optics*, 2009, 30(1): 129 - 133. (in Chinese)
- 王学新, 焦明印. 红外光学系统无热化设计方法的研究[J]. *应用光学*, 2009, 30(1): 129 - 133.
- [9] Liu Yufeng, Li Lin. Application of binary optical lens in resource satellite[J]. *Optical Technique*, 2004, 30(5): 589 - 592. (in Chinese)
- 刘玉凤, 李林. 二元光学透镜在资源卫星中的应用[J]. *光学技术*, 2004, 30(5): 589 - 592.
- [10] Fan Jinxiang, Yang Jianyu. Development trends of infrared imaging detecting technology[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41: 3145 - 3153. (in Chinese)
- 范晋祥, 杨建宇. 红外成像探测技术发展形势分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41: 3145 - 3153.
- [11] Li Guohua, Wu Lixin, Wu Miao, et al. Current status and applications of infrared thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, 33(3): 227 - 230. (in Chinese)
- 李国华, 吴立新, 吴淼, 等. 红外热像技术及其应用的研究进展[J]. *红外与激光工程*, 2004, 33(3): 227 - 230.
- [12] Liu Xingming, Han Lin, Liu Litian. Research and development of uncooled infrared detectors[J]. *Electronic Component*, 2005, 28: 415 - 420. (in Chinese)
- 刘兴明, 韩琳, 刘理天. 室温红外探测器研究与进展[J]. *电子器件*, 2005, 28: 415 - 420.
- [13] Lü Yuqiang, Hu Ming, Wu Miao, Zhang Zhisheng, Liu Zhigang. New development of thermal infrared detector[J]. *Piezoelectrics and Acoustooptics*, 2006, 28: 407 - 410. (in Chinese)
- 吕宇强, 胡明, 吴淼, 张之圣, 刘志刚. 热红外探测器的最新进展[J]. *压电与声光*, 2006, 28: 407 - 410.
- [14] S Terterian, B Nosh, H Sharifi, et al. Fabrication and performance of InAs/GaSb-based superlattice LWIR detectors[C]//*Proceedings of the SPIE*, 2010: 7660100.
- [15] Zeng Gehong, Shi Yanli, Zhuang Jisheng. Principles, status and prospect of type II superlattice infrared detectors[J]. *Infrared Technique*, 2011, 33: 311 - 314. (in Chinese)
- 曾戈虹, 史衍丽, 庄继胜. II类超晶格红外探测器的机理、现状与前景[J]. *红外技术*, 2011, 33: 311 - 314.
- [16] H C Liu. Quantum dot infrared detectors[J]. *Opto-Electronics Review*, 2003, 11(1): 1 - 5.
- [17] Phillips J, Kamath K, Bhattacharya P, et al. Far-infrared photoconductivity in self-organized InAs quantum dots[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72(16): 2020 - 2022.
- [18] Phillips J, Kamath K, Bhattacharya P, et al. Far-infrared photoconductivity in self-organized InAs quantum dots[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1998, 72(16): 2020 - 2022.
- [19] Wang Ruifeng, Wu Weidong, Zhang Yanpu. Summarization of countermeasures for the IR guided missile[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(12): 1103 - 1105. (in Chinese)
- 王瑞凤, 吴伟东, 张彦朴. 抗红外制导导弹方法综述[J]. *激光与红外*, 2006, 36(12): 1103 - 1105.
- [20] Yang Zheng, Zhou Wei, Xu Huizhong. Forecast of IR imaging system applied in military field[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 691 - 694. (in Chinese)
- 杨争, 周伟, 徐惠忠. 红外成像系统在军事领域的应用前景[J]. *红外与激光工程*, 2008, 37: 691 - 694.
- [21] Oerke E C, Steiner U S, Dehne H W, et al. Thermal imaging of cucumber leaves affected by downy mildew and environmental conditions [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(9): 2121 - 2132.
- [22] Kim Y, Ling P P. Machine vision guided sensor positioning system for leaf temperature assessment[J]. *Trans of the ASAE*, 2001, 44(6): 1941 - 1947.
- [23] Cui Yongyi. Early prediction of coal spontaneous combustion and fire detection technology [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2002: 77 - 80. (in Chinese)
- 崔洪义. 煤炭自燃早期预测预报与火源探测技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2002: 77 - 80.
- [24] Petrovsky A, Schellenberger E, Josephson L, et al. Near-infrared fluorescent imaging of tumor apoptosis[J]. *Cancer Res*, 2003, 63(8): 1936 - 1942.
- [25] Gao Xiuli, Chen Libo, Yu Yongli. Applications of molecular imaging in human cancer gene therapy [J]. *Chinese Journal of medical imaging technology*, 2007, 23(7): 1100 - 1103. (in Chinese)
- 高秀丽, 陈立波, 余永利. 分子影像在人类肿瘤基因治疗中的应用[J]. *中国医学影像技术*, 2007, 23(7): 1100 - 1103.
- [26] Joy L Kovar, William Volecheck, Eva Sevic-Muraca, et al. Characterization and performance of a near-infrared 2-deoxyglucose optical imaging agent for mouse cancer models [J]. *Analytical Biochemistry*, 2009, 384: 254 - 262.