

国外红外光电探测器发展动态

刘 武¹, 叶振华²

(1. 北京系统工程研究所, 北京 100080; 2. 中科院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘要: 主要综述三代红外光电探测器的材料体系与研究现状, 以及分析红外光电探测器的未来发展趋势。首先, 简述红外光电探测器及其三个发展阶段。然后, 论述适于三代红外光电探测器发展的碲镉汞(HgCdTe)、量子阱光探测(QWIPs, quantum-well photodetectors)、二类应变超晶格(SLS, type-II strained-layer superlattices)和量子点红外光探测(QDIPs, quantum dot IR photodetectors)四个材料体系, 以及介绍它们在三代红外光电探测器方面的研究进展。最后, 分析未来红外光电探测器的材料选择及发展趋势。

关键词: 三代; 红外; 光电探测器; 双色/多色

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Status and trends of foreign infrared photodetectors

LIU Wu, YE Zhen-hua

(1. Beijing Institute of system Engineering, Beijing 100080, China;
2. Shanghai Institute of Technical Physics, CAS, Shanghai 200083, China)

Abstract: This paper summarizes material system and status of third-generation Infrared photodetector arrays, and then analyzes the trend of infrared photodetectors. Firstly, infrared photodetector and its three main stages are introduced briefly. It is followed by discussions the material system and their progress of third-generation infrared photodetector arrays with HgCdTe photodiodes, quantum-well photoconductors, type-II strained-layer superlattices and quantum dot IR photodetectors. This paper also presents the new material choices and the trends of third-generation Infrared photodetector arrays.

Key words: third-generation; infrared; photodetector; two-color/multi-color

1 引言

红外探测成像具有作用距离远、抗干扰性好、穿透烟尘雾霾能力强、可全天候、全天时工作等优点, 在军用和民用领域都得到了极为广泛的应用^[1-2]。按照探测过程的物理机理, 红外探测器可分为两类, 即热探测器和光电探测器^[3]。光电探测器的工作原理是目标红外辐射的光子流与探测器材料相互作用, 并在灵敏区域产生内光电效应。因具有灵敏度高、响应速度快的优点, 光电探测器在预警、精确制导、火控和侦察等红外探测系统中得到广泛应用。

红外焦平面阵列可探测目标的红外辐射, 通过光电转换、电信号处理等手段, 可将目标物体的温度

分布图像转换成视频图像, 是集光、机、电等尖端技术于一体的红外光电探测器^[4-6]。目前许多国家, 尤其是美国等西方军事发达国家, 都花费大量的人力、物力和财力进行此方面的研究与开发, 并获得了成功。

红外光电探测器研究从第一代开始至今已有40余年历史, 按照其特点可分为三代^[1-2]。第一代(1970s~1980s)主要是以单元、多元器件进行光机串/并扫描成像, 以及以4×288为代表的时间延迟

作者简介: 刘 武(1963-), 男, 高级工程师, 现主要从事先进技术论证分析工作。

收稿日期: 2011-03-02

积分(TDI, time delay integration)类扫描型(scanning)红外焦平面阵列。单元、多元探测器扫描成像需要复杂笨重的二维、一维扫描系统结构,且灵敏度低。第二代红外光电探测器是小、中规格的凝视型(staring)红外焦平面阵列。 $M \times N$ 凝视型红外焦平面探测元数从1元、 N 元变成 $M \times N$ 元,灵敏度也分别从1与 $N^{1/2}$ 增长($M \times N$) $^{1/2}$ 倍和 $M^{1/2}$ 。而且,大规模凝视焦平面阵列,不再需要光机扫描,大大简化整机系统。

目前,正在发展第三代红外光电探测器。探测器具有大面阵、小型化、低成本、双色(two-color)与多色(multi-color)、智能型系统级灵巧芯片等特点,并集成有高性能数字信号处理功能,可实现单片多波段融合高分辨率探测与识别^[1-2,7-9]。因此,本文将重点综述三代红外光电探测器的材料体系及其研究现状,并分析未来红外光电探测器的材料选择及发展趋势。

2 三代探测器的材料体系与发展现状

红外光电探测器的材料很多,但真正适于发展三代红外光电探测器,即响应波段灵活可调的双色与多色红外焦平面阵列器件的材料则很少。目前,主要有传统的HgCdTe和QWIPs,以及新型的二类SLs和QDIPs,共四个材料体系^[1,7]。作为长波红外(LWIR),特别是双色与多色红外的光电探测材料,它们的主要特性如表1所示。下面对三代红外光电探测器的四个材料体系及其各自的发展现状进行简单地介绍。

表1 HgCdTe、二类超晶格和量子阱作为长波红外探测材料的主要特性

参数	HgCdTe	QWIPs	Type-II SLs
探测机理	光伏型	光导型	光伏型
吸收模式	直接正入射	光栅耦合	直接正入射
光谱响应	宽谱	窄带	宽谱
量子效率	$\geq 70\%$	$\leq 10\%$	$\approx 50\% \sim 60\%$
增益	1	0.2 (30~50阱)	1
热产生寿命	$\approx 1 \mu\text{s}$	$\approx 10 \text{ps}$	$\approx 0.1 \mu\text{s}$
R_0A 值 ($\lambda_c = 10 \mu\text{m}$)	$300 \Omega\text{cm}^2$	$104 \Omega\text{cm}^2$	$100 \Omega\text{cm}^2$
探测率 ($\lambda_c = 10 \mu\text{m}, \text{FOV} = 0$)	2×10^{12} $\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$	10^{10} $\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$	10^{11} $\text{cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$

2.1 HgCdTe 材料及其三代红外探测器

HgCdTe 红外光电探测器现已广泛应用于预警卫星、侦察、制导、遥感和天文等领域。由于, HgCdTe 外延薄膜的生长技术已趋于成熟,用分子束

外延(MBE)或金属有机化合物气相沉积(MOVPE)等技术可以制备多层或更加复杂的器件结构,能获得适于三代双色、多色红外光电探测器发展需要的HgCdTe 多层异质结材料。

国际上知名研究机构有美国 DRS、Raytheon、法国 Sofradir、英国 SELEX 和德国 AIM 等,已研制、生产的高水平商用碲镉汞红外焦平面探测器有:长波 640×480 、中波 2048×2048 、短波 4096×4096 、双色/双波段 1280×720 ^[1,4-6]。表2 是美国 Raytheon、法国 Sofradir 和英国 SELEX 公司报道的相同像素规格、响应波段与像元尺寸的单色和双色红外光电探测器性能情况。

表2 双色 HgCdTe 红外焦平面探测器性能表

公司	波段/ μm	规模	像元尺寸/ μm	材料	工作模式	技术参数
雷声夜视系统公司(RVS)	MW/LW (5.5/10.5)	640×480	20	MBE 的 Si(CZT) 基碲镉汞薄膜	顺序积分,同时读出	有效像元率大于 98%, 帧频大于 60 Hz, NETD 分别为 18 mK 与 26.8 mK
		1280×720	20			
法国 LETI 和 Sofradir	MW/MW 3.4-4.2/ 4.4-4.8	640×480	24	MBE 的 CZT 基碲镉汞薄膜	时间同步,空间错位半个像元	光谱串音小于 1.5%, NETD 小于 20 mK(100 Hz), >99%
						MW/LW 3-5/ 8-10
英国 SELEX	MW/LW 3-5/ 8-10	640×512	24	MOVPE 外延的 GaAs 基 HgCdTe 薄膜	顺序积分,同时读出	$9.5\text{e}6/2.3\text{e}6$, NETD: 中波 14mK、长波 23mK

最近,英国 SELEX 公司报道了硅基 HgCdTe 双色探测器和砷化镓基 HgCdTe 三色红外光电探测器的研究进展^[10-11]。硅基 HgCdTe 双色探测器规模为 320×256 ,中波与长波截止波长为 $5.0 \mu\text{m}/9.5 \mu\text{m}$,噪声等效温差(NETD)分别为 $16.6 \text{mK}/32.8 \text{mK}$,有效像元率分别为 $99.4\%/98.2\%$ 。三色红外光电探测器是由采用 MOVPE 在砷化镓(GaAs)衬底上生长的 N-P-P-p-n 型多层异质结 HgCdTe 薄膜材料,通过微台面阵列隔离、表面钝化与金属化层制作以及钢柱阵列制备来获得的。三色红外光电探测器是在两个背靠背光电二极管的双色红外光电探

测器的中间势垒区增加一个响应居中波段 (IM, intermediate wavelength) 的有源区。短波、长波工作是其相应光电二极管在小反偏下实现的。当电子势垒在短波光二极管大反偏下被降低时, IM 有源区光生少数载流子能从 IM 有源区注入到短波光二极管, 从而实现居中波段工作, 进而实现红外光电探测器的三色探测。HgCdTe 三色红外光电探测器的性能, 与两个背靠背光电二极管中间势垒区的掺杂浓度水平, 以及势垒和短波光二极管结区之间相对位置有密切的关系。目前, MOVPE、分子束外延 (MBE) 可精确控制纵向的组分变化、原位掺杂浓度以及各种过渡区相对位置, 能实现三色、四色探测的 HgCdTe 多层异质结材料生长。

2.2 QWIPs 材料及其三代红外探测器

QWIPs 利用量子阱中能级电子跃迁原理实现目标的红外辐射探测, 其探测波长可覆盖 $6 \sim 20 \mu\text{m}$ 。由于材料和器件工艺成熟、产量高、成本低, 经过近 15 年的快速发展, 已成为长波致冷型红外焦平面器件的两大主要分支之一^[1,7]。基于“能带工程”和“波函数工程”获得的量子阱材料, 能级结构可“柔性裁减”的 QWIPs 非常适合于发展双色、多色的红外焦平面列阵器件。

目前, 美国和英、法、德、瑞典等欧洲发达国家已研制出全电视制式的 640×512 (包含 640×480) 长波红外焦平面器件和中等规模的 320×240 (包含 $256 \times 256, 384 \times 288$ 格式) 双色器件产品。美国 NASA/ARL 联合研制的大面阵 1024×1024 长波红外焦平面和 NASA/JPL 研制的 1024×1024 双色、 640×512 四色红外焦平面, 代表了当前 GaAs/AlGaAs 量子阱红外探测器的最高研究水平^[1,7]。

2009 年, 美国国家航空航天局 (NASA) 下属的喷气推进实验室 (JPL, Jet Propulsion Laboratory), 报道了 1024×1024 规格、 $30 \mu\text{m}$ 像元的中波/长波双色红外焦平面列阵的性能, 技术参数是在 68 K 制冷 $f/2$ 视场角和 300 K 背景下获得的。MWIR 和 LWIR 的响应波段分别为 $3.5 \sim 5.5 \mu\text{m}$ 和 $6.5 \sim 9.0 \mu\text{m}$, 噪声等效温差 (NETD) 分别为 27 mK 和 40 mK, 有效像元率分别为 99% 和 97.5%^[1,7]。

2002 年, 喷气推进实验室 (JPL) 研制出 640×512 四色焦平面, 探测波段分别位于 $4 \sim 6 \mu\text{m}$ 、 $8.5 \sim 10 \mu\text{m}$ 、 $10 \sim 12 \mu\text{m}$ 和 $13 \sim 15 \mu\text{m}$ 。每个像元内的四色探测在空间上是横向错位排列的。四个波段背景限温度分别为 40 K, 50 K, 60 K, 120 K ($f/5$ 视场角、300 K 背景), NETD 分别为 21.4 mK,

45.2 mK, 13.5 mK, 44.6 mK (40 K)^[1,7]。

2.3 二类 SLS 材料及其三代红外探测器

InAs/GaSb 二类 SLS 红外光电探测器具有一些独特的优点, 是 HgCdTe 和 GaAs/AlGaAs 量子阱材料之外的新一代红外探测器材料, 也是近年来颇受关注的面向第三代焦平面器件技术的发展方向之一^[12-13]。首先, 通过调节二类 SLS 中 InAs 势阱的宽度或采用 GaInSb 势垒能控制二类 SLS 结构的有效带隙, 红外探测器响应波长能覆盖 $3 \sim 20 \mu\text{m}$ 整个范围。其次, InAs/GaSb 二类 SLS 对红外辐射的吸收是基于重空穴子带至电子子带的跃迁, 即带间子带跃迁, 探测器无需光栅耦合就能工作, 在大大降低了器件制备的难度同时又提高了探测器的量子效率。并且带间子带跃迁也决定了 InAs/GaSb 二类 SLS 红外光电探测器是光伏型探测器, 无需外加大的偏压。最后, 通过降低 InAs/GaSb 二类 SLS 红外光电探测器的暗电流, 可提高探测器的工作温度和灵敏度, 同时可以利用 III-V 族半导体材料较为成熟的材料技术和器件工艺, 能降低红外光电探测器的成本。二类 SLS 探测材料具有响应波长可调节的优点, 也非常适合于发展双色、多色的红外焦平面列阵器件。

光伏型二类 SLS 红外光电探测器具有很高的量子效率, 可以减少积分时间^[1,7,12]。例如, 德国 Fraunhofer 应用物理研究所研制的 256×256 中波二类 SLS 红外光电探测器, 5 ms 积分时间时 NETD 为 11.1 mK, 而积分时间为 1 ms 时 NETD 也能达到 25 mK。 320×256 规格、 $30 \mu\text{m}$ 像元的长波二类 SLS 红外光电探测器, 0.23 ms 积分时间时 NETD 为 33 mK ($f/2$ 视场角, 300 K 背景)。这些技术参数性能基本达到 HgCdTe 的水平。最近, 雷声公司和 JPL 实验室获得了 640×512 规格的二类 SLS 中波红外焦平面探测器^[1,7]。

2009 年, 报道了 384×288 规格、 $40 \mu\text{m}$ 像元的 InAs/GaSb 二类 SLS 双色红外焦平面探测器。两个波段 NETD 分别为 29.5 mK ($3.4 \mu\text{m} \sim 4.1 \mu\text{m}$) 和 16.5 mK ($4.1 \mu\text{m} \sim 5.1 \mu\text{m}$) (73 K 制冷、2.8 ms 积分时间、 $f/2$ 视场角和 300 K 背景)^[1,7]。

2.4 QDIPs 材料及其三代红外探测器

量子点又称“人造原子”, 目前量子点作为提高电子与光电子器件性能的一种手段, 已经被广泛应用^[14-15]。量子点的尺寸很小, 通常只有 10 nm, 因此其具有独特的三维光学限制特性。与量子阱红外光电探测器相比, 量子点红外光电探测器具有无需

制作表面光栅就能响应垂直入射的红外光照射,以及工作温度更高等优势。

目前,量子点红外光电探测器的研究主要集中在量子阱中嵌入量子点(DWELL, dot-in-a-well)的异质结构^[16]。因此,DWELL异质结构的红外探测器兼备了传统QWIPs和QDIPs的特点。一方面,与量子点红外光电探测器一样,在正入射时不需要光栅或光耦合,并具有较高的工作温度。另一方面,可以通过共同控制QDs(Quantum Dots)尺寸、形状、应变和材料组分,以及QWs(Quantum Wells)尺寸来灵活调节DWELL异质结构红外光电探测器的响应波长。而且,QDIPs器件的光谱响应波段具有偏压选择特性,可在MWIR、LWIR以及甚长红外波段(VLWIR, > 14 μm)的光谱范围内实现双色、多色探测,非常适合于发展三代以及未来新一代红外光电探测器^[14-15]。

最近,报道的640×512规格、8.1 μm 截止波长的DWELL结构光电探测器,其NETD为40 mK(60 K工作温度, $V_B = -350$ mV, $f/2$ 视场角,30 Hz帧频和300 K背景)。在三代红外光电探测器方面,Varley等人实现了320×256规格DWELL结构的MWIR/LWIR双色红外光电探测器,其MW和LW的NETD分别为55 mK和70 mK^[1,7]。

3 红外光电探测器的发展趋势

3.1 未来光电探测材料的选择^[1,7]

虽然,HgCdTe材料存在制备困难、均匀性差、器件工艺特殊和稳定性差等缺点,致使HgCdTe红外光电探测器的成品率低。为此,人们始终没有放弃寻找更低成本、更高稳定性的新型红外光电探测材料的努力。但是,在量子效率、工作温度、响应速度和多光谱探测等综合性能上,迄今还没有一种新材料能同时具有等同或超过HgCdTe材料的优点。所以,为满足未来军事、天文和航天应用更高的性能要求,HgCdTe材料在未来相当长的一个时间段内仍然是三代、四代IRFPAs探测器的首选。与此同时,HgCdTe红外探测器自身也在进行降低成本、拓展波长等追求,以提高竞争力。

QWIPs光电探测器是GaAs基材料,在本身材料与器件工艺方面具有稳定性高、成本低的优势。相对HgCdTe探测器而言,在均匀性、成本方面具有明显的优势。但是,QWIPs红外光电探测器的量子效率比碲镉汞低约1个数量级,同时工作温度要求要低约10~30 K。从IRFPAs探测器的功能特征上看,QWIPs技术将重点在VLWIR和超大规格方面

拓展自身的优势。

InAs/GaSb二类SLS红外光电探测器是新一代红外探测器材料。由于InAs和GaSb的最优生长温度并不相同,以及InAs/GaSb界面有两种类型,即类InSb和类GaAs界面,致使高质量InAs/GaSb超晶格材料的外延生长是获得SLS红外光电探测器的关键。在器件制备技术上,InAs/GaSb超晶格探测器需要有效抑制台面侧壁的表面漏电。在解决了材料生长与器件制备工艺后,二类SLS红外光电探测器将是三代、未来四代红外光电器件技术的重要发展方向之一。

与QWIP光电探测器相比,QDIPs红外探测器具有直接响应垂直入射红外光照射以及工作温度更高等优势。然而,目前阻碍QDIPs红外探测器性能提高的技术瓶颈主要来自组装量子点尺寸均匀性较差和量子点密度较低。在提高了量子点尺寸均匀性与密度后,QDIPs将是三代、未来四代红外光电器件重要材料选择。

3.2 红外光电探测器的新概念

所有成像探测技术的发展都有三个阶段^[1-2,17]:①探测信号的强度,得到目标的“黑白照片”,这是初级阶段;②探测信号的强度和波长,得到目标的“彩色照片”,达到中级阶段;③探测信号强度、波长、相位以及偏振状态,得到目标的“全息照片”,这才达到成像探测技术的高级阶段。目前,在军事、民用和天文的快速发展,驱使红外成像技术从初级阶段的“黑白照片”向中级阶段的“彩色照片”过渡,其标志是美国、法国、英国和德国等研制出了双(多)色、多波段的三代红外光电探测器^[1-2]。为追求更高阶段的成像探测技术,未来还将继续发展甚长波、双色与多色和主被动双模,以及探索在目标辐射入射方向上原位像素级分光和像素级偏振选择等功能结构的红外焦平面探测器。

3.2.1 甚长波红外焦平面探测器^[18-19]

甚长波热红外波段具有最高的大气窗口目标辐射能量,是红外探测技术中最为重要的波段。这一波段的红外焦平面器件能提高探测系统的探测距离、缩短探测时间和精确探测目标温度等,具有十分重要的需求背景。空间大气垂直探测和弹道导弹预警探测都迫切需求甚长波红外焦平面探测器。因具有更高的量子效率和更高的工作温度,碲镉汞(HgCdTe)光伏型探测器将继续向14 μm ,16 μm 和20 μm 红外波段拓展探测能力。美国、法国都先后

报道了 16 μm HgCdTe 红外焦平面探测器的实验室成像情况。而具有较好均匀性的量子阱光探测 (QWIPs) 光电探测器在甚长波和大规模红外焦平面阵列器件方面,将与 HgCdTe 光伏型探测器技术形成互补。为提高大气层温度与湿度、深空冷目标的探测性能,甚长波红外焦平面探测器还将是红外光电器件研究领域的热点。

3.2.2 双色与多色探测器^[1-2]

随着材料、器件和系统技术的进步,探测器将向更多的光谱波段发展,以获得目标的“彩色”热图像,更丰富、更精确、更可靠地得到目标的信息。双色与多色红外探测器通过在深度方向上垂直集成两个、多个波段的探测结构,不仅能实现两个波段的探测在空间上完全同步,为准确地获取目标信息提供了一个真正意义上的新自由度,可极大地提高目标的识别能力。这在对存在模糊背景或者目标特性在过程中不断发生变化的目标探测而言,具有非常重要的意义。可以预见,发展大阵列规格、小像元尺寸的双色和多色工作的红外焦平面阵列光电探测器将是 2020 年前世界各国发展的重要内容。

3.2.3 主被动双模器件^[1-2,20]

红外主被动三维双模成像探测器 (InfraDIs, 3D Infrared Active/passive Dual-mode Imaging-detectors) 采用单一器件,实现对激光返回信号以及热红外信号进行同时集成探测的成像器件,是本世纪初针对军事需求而提出的新概念。在像素级水平上对微弱光信号进行放大和信号时间的精确测量,可实现对红外辐射信号以及激光返回信号的高灵敏度、高速探测和成像,为目标探测和识别提供新的自由度。该技术的优势是基于红外被动和主动探测的互补,可提高红外探测系统在复杂战场环境下的目标识别能力(红外像、轮廓像和距离像)。

3.2.4 多光谱红外焦平面探测器

高级的红外成像系统要求光谱分辨率越来越高,并将经历多光谱、高光谱和超光谱的发展过程。目前,国际上通常都采用在红外光学系统上进行棱镜、光栅等对红外辐射进行分光,以实现红外多光谱、高光谱成像。但西澳大利亚大学最近报道了一种新型的多光谱成像技术。它是基于微机械系统 (MEMS) 结构阵列的像素级分光型红外焦平面探测器来实现的。该类红外焦平面探测器的每个像元在各自目标辐射入射方向上都对应一个分立的微机械系统结构,并通过红外焦平面探测器读出电路给像素级微机械系统结构提供输入电压来控制每个像元

上入射红外辐射的波段。这种基于像素级分光功能的红外焦平面探测器可有效简化多光谱成像的光学系统,其高的光谱选择灵活性和分光精确性会推动多光谱成像技术的深入发展。

3.2.5 偏振选择红外焦平面探测器^[1-2,21]

红外偏振成像技术可以很好地解决普通红外探测技术常遇到的背景杂乱问题,比传统的红外成像技术在目标感知、认知和识别上有着明显的优势。为有效利用目标的反射辐射和自发辐射中包含的偏振信息,国外早在 20 年前就已经开展了相关的偏振选择红外焦平面探测器和红外偏振成像技术的研究。偏振红外探测器是在红外焦平面探测器的前视光场上集成具有起偏功能的像素级金属网格光栅阵列或光子晶体等,以实现某一波长内的 S 光、P 光分离,即实现偏振。通过新增一个获取目标偏振信息的维度,基于偏振红外探测器可提高目标识别的准确性、有效性,对未来的红外成像系统可发挥重要的作用。

总之,为简化红外成像系统结构并提高探测的可靠性与探测性能,红外焦平面探测器的复杂度和集成度会越来越高,捕获的信息必然会越来越丰富。换言之,未来在红外探测技术从初级阶段向中级阶段、高级阶段发展的驱使下,红外光电探测器将主要依托多层材料的精密生长技术、智能处理的读出电路技术和微纳结构的精细加工技术,不断探索新型材料、新颖结构和光机电集成一体化等的集成与耦合技术,以提升未来红外光电系统的应用价值。

4 结束语

红外光电探测器被动地接受红外辐射,具有灵敏度高、响应速度快等特点。红外光电探测器的材料很多,但真正适于发展三代响应波段灵活可调的双色与多色红外焦平面阵列器件的材料,则只有传统的 HgCdTe、QWIPs 以及新型的二类 SLS 与 QDIPs,共四个材料体系。目前,红外光电探测器正从二代向三代过渡,其标志是出现了具有实用化水平的双色、多色红外焦平面阵列探测器。未来在红外探测技术从初级阶段向中级阶段、高级阶段发展的驱使下,红外光电探测器将主要依托多层材料的精密生长技术、智能处理的读出电路技术和微纳结构的精细加工技术,不断探索新型材料、新颖结构和光机电集成一体化,以更多地获取目标红外辐射中包含的强度、波长、相位和偏振等信息。

参考文献:

- [1] A Rogalski, J Antoszewski, L Faraone. Third-generation infrared photodetector arrays[J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105(9): 091101-1-091101-44.
- [2] Antoni Rogalski. Infrared detectors: status and trends[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2004, 27: 59-210.
- [3] Tang Dingyuan, Mi Zhengyu. *Conspectus of optic-electronic device*[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1989.
汤定元, 糜正瑜. *光电器件概论*[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 1989.
- [4] P R Bratt, S M Johnson, D R Rhiger, et al. Historical perspectives on HgCdTe material and device development at Raytheon Vision Systems[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7298: P72982U-1.
- [5] Philippe Bensussan, Philippe Tribolet, et al. 50 Years of Successful Mct Research and Production in France[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7298: P72982N-1.
- [6] W E Tennant, J M Arias, J Bajaj. HgCdTe at Teledyne[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7298: P72982V-1.
- [7] Rogalski. New material systems for third generation infrared detectors[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7388: P73880J-1.
- [8] F Pistone, M Vuillermet. Latest Developments in Compact IR Cooled Detectors[J]. *Proc. of SPIE*, 2008, 7113: P711302.
- [9] S Horn, P Norton, T Cincotta, et al. Challenges for third-generation cooled imagers[J]. *Proceeding of SPIE*, 2003, 5074: 44-51.
- [10] L G Hipwood, I M Baker, C L Jones. LW IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE for use in Multispectral Imaging[J]. *SPIE*, 2008, 6940: P69400G-1.
- [11] P Abbott, L G Hipwood, C L Jones, et al. Three Band Infrared Detection (MW/MW/LW) using HgCdTe grown by MOVPE[J]. 5th EMRS DTC Technical Conference-Edinburgh, 2008.
- [12] Sanjay Krishna. Infrared Focal Plane Arrays Based on Dots in a Well and Strained Layer Superlattices[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7222: P72220P-1.
- [13] Meimei Z Tidrow, Lucy Zheng. Recent Success on SLS FPAs and MDA's new Direction for Development[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7298: P72981O-1.
- [14] Thomas E Vandervelde, Michael C Lenz, Eric Varley, et al. Multicolor Quantum Dots-in-a-Well Focal Plane Arrays[J]. *Proc. of SPIE*, 2008, 6940: P694003-1.
- [15] Adrienne D Stiff-Roberts. Quantum-dot infrared photodetectors: a review[J]. *Journal of Nanophotonics*, 2009, 3: P03160.
- [16] Sanjay Krishna. Infrared Focal Plane Arrays Based on Dots in a Well and Strained Layer Superlattices[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7222: 72220P-1.
- [17] S Horn, P Norton, T Cincotta, et al. Challenges for third-generation cooled imagers[J]. *Proceeding of SPIE*, 2003, 5074: 44-51.
- [18] O Gravrand, Ph Chorier. Status of very long infrared wave focal plane array development at DEFIR[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7298: P729821-1.
- [19] L G Hipwood*, C L Jones, C Maxey, et al. VLW IRFPAs made from HgCdTe grown by MOVPE[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7298: P729822-1.
- [20] J Antoszewski, J M Dell, L Faraone. HgCdTe technology in Australia[J]. *Proc. of SPIE*, 2009, 7298: P729830-1.
- [21] Nie Jinsong, Wang Zhen. Overview of infrared polarization imaging technology[J]. *Infrared Technology*, 2006, 28(2): 63-67.
聂劲松, 汪震. 红外偏振成像探测技术综述[J]. *红外技术*, 2006, 28(2): 63-67.