

引用格式: MA Runze, ZHANG Xiaoming, FENG Shuai, et al. Research Status and Prospect of Infrared Photoelectric Detection Technology (Invited)[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(10):1004006

马润泽,张晓明,冯帅,等. 红外光电探测技术研究现状及展望(特邀)[J]. 光子学报,2021,50(10):1004006

## 红外光电探测技术研究现状及展望(特邀)

马润泽<sup>1</sup>,张晓明<sup>1,2</sup>,冯帅<sup>1,2</sup>,郑军<sup>3</sup>,徐应强<sup>3</sup>,李传波<sup>1,2</sup>

(1 中央民族大学 理学院, 北京 100081)

(2 中央民族大学 光电子研究中心, 北京 100081)

(3 中国科学院半导体研究所, 北京 100083)

**摘要:** 红外探测技术在激光测距、成像、遥感、夜视等领域有重要应用,降低红外光电探测器的尺寸、重量、功耗和成本,以及提高探测器的性能是目前的研究重点。本文综述了红外探测器技术的发展历程、工作原理及研究现状并对其未来发展方向进行了展望。内容主要涵盖基于碲镉汞、II类超晶格、量子阱、量子点、硅基锗锡等材料的光子型红外光电探测器及其阵列。红外系统成本降低最终取决于在常温条件下耗尽电流限探测器阵列像素密度是否与系统光学元件的背景极限和衍射极限性能匹配,选择HgCdTe、II类超晶格和胶体量子点等材料可提高光子探测器室温性能。各种红外探测器在性能方面各具特色,在实际应用中互为补充。

**关键词:** 红外探测器;碲镉汞;量子阱;II类超晶格;量子点

中图分类号: TN215

文献标识码: A

doi:10.3788/gzxb20215010.1004006

## Research Status and Prospect of Infrared Photoelectric Detection Technology (Invited)

MA Runze<sup>1</sup>, ZHANG Xiaoming<sup>1,2</sup>, FENG Shuai<sup>1,2</sup>, ZHENG Jun<sup>3</sup>, XU Yingqiang<sup>3</sup>,  
LI Chuanbo<sup>1,2</sup>

(1 School of Sciences, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

(2 Optoelectronics Research Center, Minzu University of China, Beijing 100081, China)

(3 Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Infrared detection technology has important applications in laser ranging, imaging, remote sensing, night vision and other fields. It is the focus of research to reduce the size, weight, power consumption and cost of infrared photodetectors, and to improve the performance of the detectors. This article summarizes the development history, working principle and research status of infrared detector technology, and prospects its future direction. The content mainly covers photonic infrared photodetectors and their arrays based on mercury cadmium telluride, type II superlattices, quantum wells, quantum dots, silicon-based germanium tin and other materials. The cost reduction of infrared systems ultimately depends on the consumption under normal temperature conditions. Whether the pixel density of the current limit detector array matches the background limit and diffraction limit performance of the optical elements of the system, materials such as HgCdTe, type II superlattices and colloidal quantum dots are selected to improve the room temperature performance of the photon detector. Various infrared detectors have their own characteristics in terms of performance and complement each other in practical applications.

基金项目: 国家重点研究发展计划(No. 2018YFB2200500), 国家自然科学基金(Nos. 61974170, 61934007, 62050073)

第一作者: 马润泽(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为半导体器件与工艺。Email: 842263743@qq.com

导师(通讯作者): 李传波(1976—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为半导体光电材料与器件。Email: cbli@muc.edu.cn

收稿日期: 2021-08-01; 录用日期: 2021-09-14

<http://www.photon.ac.cn>

**Key words:** Infrared detector; HgCdTe; Quantum well; Type II superlattice; Quantum dot

**OCIS Codes:** 040.1240; 040.3060; 040.5570

## 0 引言

红外光电探测器是红外产业链的核心,其最早应用于军事领域,如今在现代战争中仍是重要战略手段。随着红外探测技术的逐渐成熟,适用于医疗、安全和商业等民用的低成本红外探测器也得到了广泛应用。

红外光电探测器新旧更迭,以多色、大规模阵列、高性能、低功耗、低成本等特点作为当前红外探测器的发展方向。碲镉汞由于自身的诸多优势在红外光电探测器的发展历程中起到了至关重要的作用,并且目前仍是应用中首选的材料体系,但碲镉汞同样存在着弊病。因此一直在寻求与碲镉汞性能相当,且成本更低的红外材料。与传统的碲镉汞红外探测器材料相比,以量子阱、II类超晶格、量子点和硅基锗锡为代表的红外探测材料生长技术成熟,并且基于这些材料的光子型红外光电探测器实现红外吸收的物理机制不同,在实际应用中互为补充。开发在室温条件下工作的红外光电探测器可以有效降低红外系统成本,目前室温条件下红外光电探测器的性能仍低于传统探测器,选择HgCdTe、II类超晶格和胶体量子点等材料可提高光子探测器室温性能。

本文首先介绍红外探测器发展历程,然后对红外探测技术中最具应用价值的成像探测器阵列进行综述,并从碲镉汞、量子阱、II类超晶格、量子点和硅基锗锡等红外探测材料的能带结构、器件性能、材料生长、以及制备工艺等方面展开讨论。

## 1 红外探测器发展历程

1800年,英国天文学家HERSCHEL W利用分光棱镜和温度计发现太阳发出的光线中除可见光外,还有一种人眼看不见的“热线”,即红外辐射,温度计成为历史上第一个红外探测器,这也成为人类了解并研究红外辐射的起点<sup>[1]</sup>。此后一百多年时间里,科学家相继发现了热电效应、光伏现象、光电导现象<sup>[2]</sup>,其发展历程如图1所示。早期的红外探测器主要基于热效应,1821年,德国物理学家SEEBECK J首次发现热电效应,并研制出了第一个热电偶;1829年,意大利物理学家NOBOILIL将几个热电偶串连起来,制作了首个热电堆;1833年,MELLONI M将热电堆材料改为碲化铋,热电堆灵敏度大幅提高;1881年,LANGLEY S P制作出测辐射热计,可以研究太阳辐照度,并测量不同波长的太阳辐射强度,比同时代热电堆的灵敏度高30倍<sup>[3]</sup>。热探测器是指吸收红外辐射引起温升,再将温升转为电量的一种探测器,在温升过程中通过测量探测器性能参数变化就可以测出材料吸收辐射的大小。热探测器对任何波长的辐射都有响应,人们无法获知红外辐射所包含的波长、相位等丰富信息<sup>[2]</sup>。

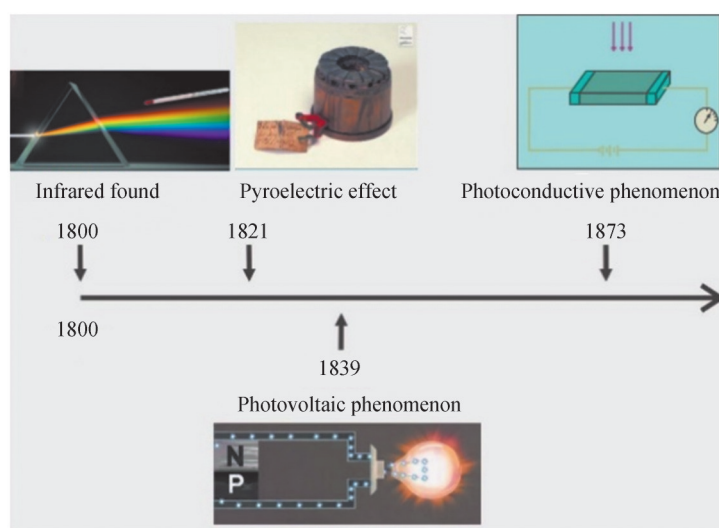


图1 红外探测器早期发展历程

Fig. 1 Early development of infrared detectors

红外探测器发展初期与热探测器有关,由于人们对红外光的理解有限,相关研究进展较为缓慢。进入20世纪后,先是PLANCK M发现了黑体辐射定律,使人们对光的量子性质有了深刻的认识,之后EINSTEIN A提出光量子假说,成功地解释了光电效应,利用光电效应检测红外光有了理论支撑,红外探测器进入快速发展时期<sup>[2]</sup>。光电导效应最早于1873年由SMITH W用硒作为海底电缆的绝缘体进行实验时发现的。1917年,CASE T用红外光的光电导效应,研制出亚硫酸铊光子探测器,将灵敏性和响应速度大幅提升<sup>[4]</sup>。从20世纪30年代起,基于光电效应的光子探测器逐渐成为了红外探测器发展的主流。

红外探测器发展初期存在灵敏度低、量子效率低等问题,极大地限制了其推广。直到第二次世界大战期间,红外探测器在军事应用中的巨大价值使其进入快速发展期,图2展示了其发展历程<sup>[5]</sup>。第二次世界大战后,CASHMAN发现铅盐家族半导体(PbSe和PbTe)显示出作为红外探测器的前景,通信、消防和搜索系统应用刺激了铅盐探测器技术快速发展,1955年美国开始大规模生产以PbS和PbTe探测器作为红外导引头的红外制导导弹<sup>[6]</sup>。从20世纪50年代开始,以碲化铋为代表的窄带隙半导体迅速发展,后来证明在扩展波长能力和提高灵敏度方面具有很好的优势<sup>[7]</sup>。1959年,LAWSON等发现了带隙可调的碲镉汞合金材料,带隙能量的可调性为红外探测器的设计提供了极大的自由度,导致红外探测器的应用跨越了短波、中波、长波和甚长波等整个红外波段<sup>[8]</sup>。目前,碲镉汞是应用最广泛的红外探测器窄带隙半导体材料之一,碲镉汞探测器在红外探测器发展史中占有至关重要的地位。

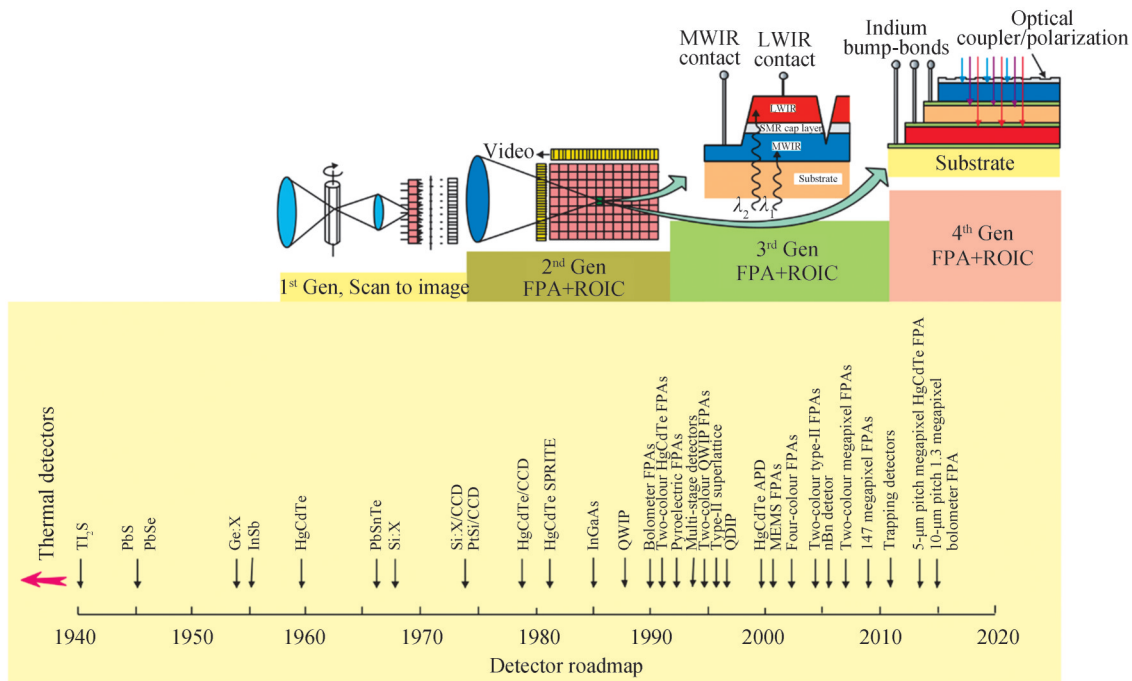


图2 红外探测器和系统的发展历史<sup>[5]</sup>

Fig. 2 History of the development of infrared detectors and systems<sup>[5]</sup>

红外探测技术历经四代技术革新。第一代的光电导探测器线性阵列已被广泛使用。第二代焦平面探测器阵列也已量产,目前凝视阵列可以有 $10^6$ 个以上的元件,并通过集成在阵列上的电路进行电子扫描<sup>[5]</sup>。第三代的碲镉汞、量子阱、II类超晶格和量子点系统展现出优异的性能并开始进入装备,预计第四代系统将比第三代系统具有更大规模、更强成像能力、包含更多信息等优势。

光学探测器主要分为光子探测器和热探测器两大类。本文主要针对基于光电效应的光子型探测器的进展进行综述。光子探测器基于入射光子流与探测器材料的相互作用而产生光电效应。半导体中的基本光激发过程如图3(a)所示,其中包括本征吸收、非本征吸收、自由载流子吸收。光子吸收可以引起半导体材料的带间跃迁和带内跃迁,大部分半导体光电探测器基于材料的带内跃迁。此外,在量子阱材料中,除带间跃迁外,还可利用阱内子带跃迁实现更长波长的探测。子带间吸收发生在与导带或价带相关的量子阱的能级之间[图3(b)]<sup>[5]</sup>。根据电子带间跃迁发生在同一种材料或者是不同材料间可将由材料构成的超晶格能带

结构定义为I型和II型能带结构。I型能带结构指电子跃迁发生在同一材料内,II型则发生在量子阱结构的不同材料内,图3(c)展示了一种典型的II型能带结构,II型超晶格能带可实现电子和空穴的空间分离。一般来说,探测器材料的选择主要基于响应波长、灵敏度和工作温度<sup>[9]</sup>等要求。

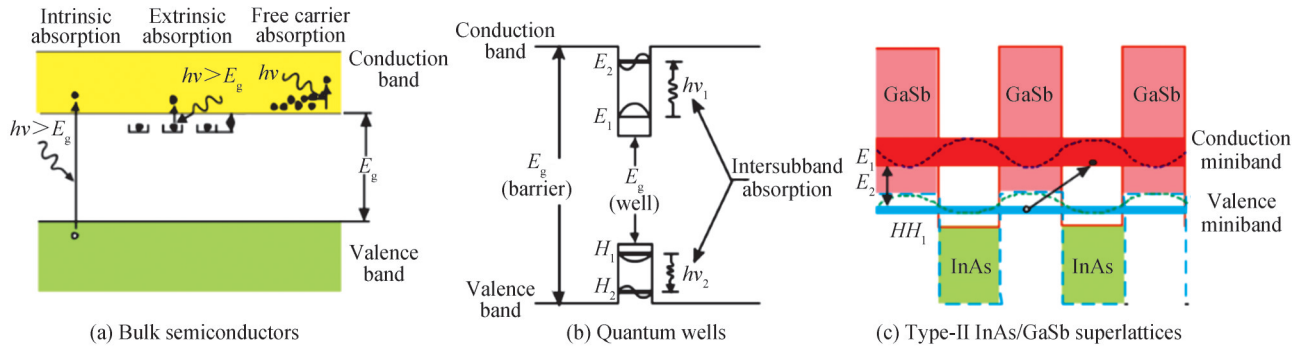


图3 光激发过程<sup>[5]</sup>

Fig. 3 Optical excitation processes<sup>[5]</sup>

## 2 红外探测器研究现状及展望

在过去的40年里,红外探测系统技术向着智能化、小型化、低功耗和低成本等方向发展<sup>[2]</sup>。人们努力开发利用各种红外探测器材料的单片结构与混合结构,其中非制冷硅微辐射计采用单片结构,其他红外材料系统(碲镉汞、量子阱、II类超晶格和量子点等)则用于混合红外焦平面阵列,这些红外探测器在性能方面各具特色,在应用方面也将形成互为补充的支撑关系。

### 2.1 红外焦平面阵列的发展趋势

焦平面阵列(Focal Plane Array, FPA)是指位于成像系统焦平面上单个探测器像元的集合,通常该定义指二维阵列。图4显示了30年来阵列大小的趋势,红外阵列上的像素数量一直呈指数级增长,符合摩尔定律,倍增时间约为18个月<sup>[10]</sup>。红外阵列的进步反映出致密电子结构的发展,随着硅集成电路(Silicon Integrated Circuit, ICs)技术的发展,根据摩尔定律,焦平面阵列理论上具有与动态随机存取存储器(Dynamic Random Access Memory, DRAM) ICs相同的开发速度,然而FPA发展速度远远滞后于DRAM<sup>[5]</sup>。

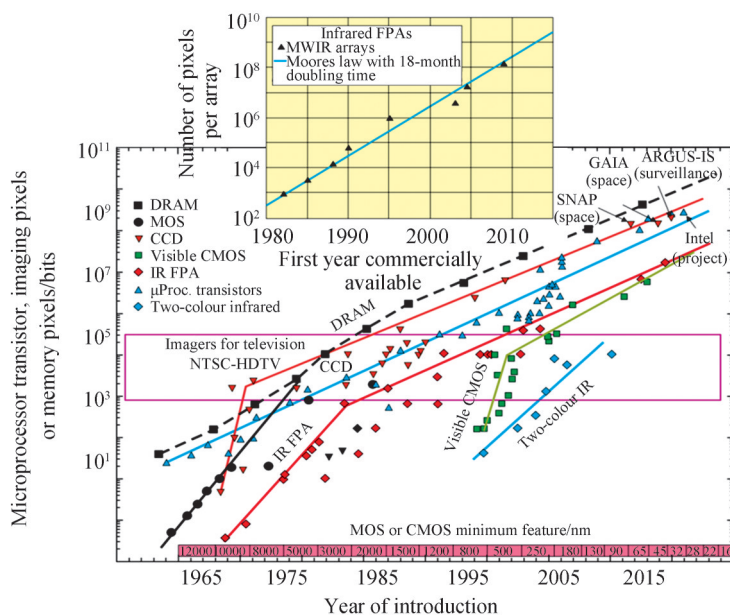


图4 成像阵列格式与硅微处理器技术和动态存取存储器的复杂性对比<sup>[10]</sup>

Fig. 4 Imaging array formats compared with the complexity of silicon microprocessor technology and dynamic access memory<sup>[10]</sup>



焦平面阵列是大多数现代红外成像系统的核心,在红外阵列中被分为混合集成和单片集成技术,核心设计问题包括性能和成本,根据不同情况倾向于不同的设计<sup>[9]</sup>。单片阵列的基本元件是如图5(c)所示的金属-绝缘层-半导体结构(Metal Insulator Semiconductor, MIS)构成<sup>[11]</sup>,具有肖特基势垒检测器的硅基FPA技术目前已经成熟到实际应用水平<sup>[9]</sup>。

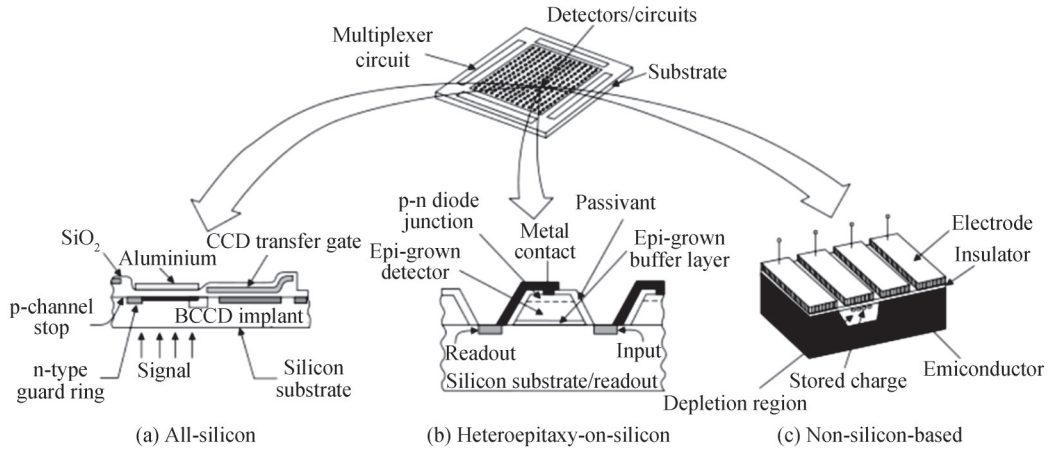


图5 单片型红外焦平面阵列<sup>[11]</sup>  
Fig. 5 Monolithic infrared focal plane array<sup>[11]</sup>

混合型FPA检测器和多路复用器被制造在不同的衬底上,通过倒装芯片键合(图6)或环孔连接来匹配,可以独立优化探测器材料<sup>[9]</sup>。混合型FPA的其他优点是机械稳定性和热特性较强,且信号处理面积大<sup>[11]</sup>。在碲镉汞混合FPA中,光伏探测器形成在透明碲镉汞或碲锌镉汞衬底上的碲镉汞外延层上<sup>[12]</sup>。

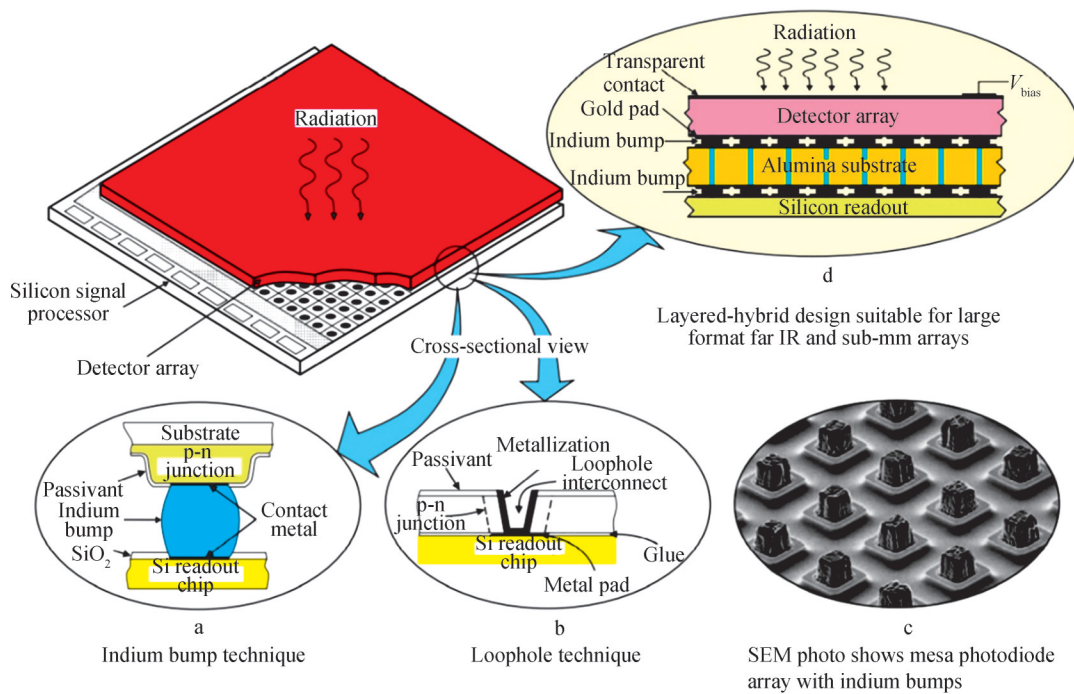


图6 混合型红外焦平面阵列互连技术<sup>[10]</sup>  
Fig. 6 Hybrid IR FPA interconnect techniques<sup>[10]</sup>

对于阵列,决定最终性能的相关数值不是探测率 $D^*$ <sup>[13]</sup>,而是热灵敏度(Noise Equivalent Delta Temperature, NEDT)和调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)<sup>[5]</sup>。热灵敏度是评价中波和长波红外热像仪的关键参数<sup>[14]</sup>,代表温差的信噪比,而MTF涉及空间分辨率<sup>[15]</sup>。热灵敏度和空间分辨率是热成像系统的主要性能指标<sup>[13]</sup>。图7为红外系统设计的 $F\lambda/d$ 空间( $F$ 为光圈, $\lambda$ 为波长, $d$ 为像素间距),展示了

当系统的孔径大小和灵敏度保持不变时,  $F\lambda$  和  $d$  之间的关系, 每条直线代表常数  $\lambda/d$  的轨迹, 从而表示性能 (热灵敏度和范围) [16]。对于远距离识别系统, 使用高  $F/\#$  光学系统来减少探测器的角压 [5], 但更小的探测器可以用更小的封装来实现优异的性能, 而不需要局限于高  $F/\#$  [17]。图 7 还包括诊断检索系统公司 (Diagnostic Retrieval Systems, DRS) 生产的各类热成像系统的数据点, 随着探测器尺寸的减小, 非制冷系统已经稳步地从“探测器限制”发展到“光学限制”, 这一情况还会持续 [16]。

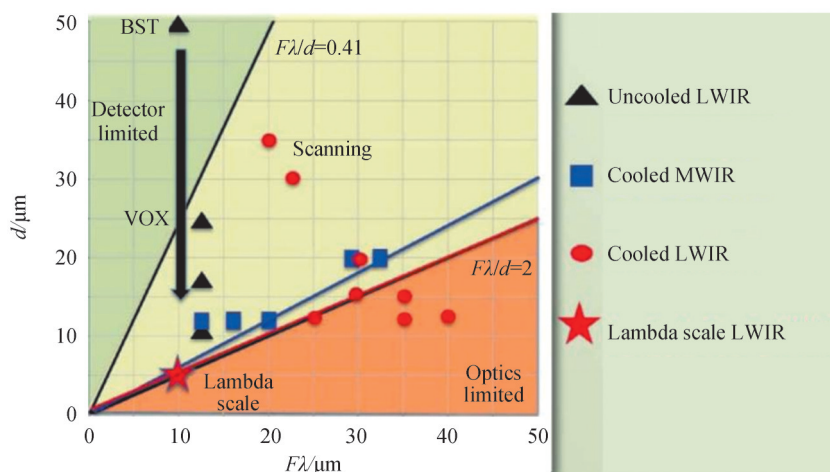


图 7 红外系统设计的  $F\lambda/d$  空间 [16]

Fig. 7  $F\lambda/d$  space for infrared system design [16]

## 2.2 碲镉汞红外光电探测器

碲镉汞 (HgCdTe) 红外焦平面探测器是一种非常重要的红外探测器。自 1959 年人工合成的碲化镉材料诞生以来, 特别是 1970 年以后 [2], 随着晶体制备技术 [18] 和外延技术的迅速发展, 碲化镉材料和器件的研究取得了很大进展。碲镉汞是一种带隙可调的半导体材料, 通过调节碲镉汞合金的成分来调节带隙 [19], 波长可覆盖光谱范围为  $1\sim 20\ \mu\text{m}$ , 因此其大多数应用集中在短波、中波和长波 [8]。此外, 碲镉汞红外探测器吸收外来光子产生的电子跃迁是能带间跃迁, 材料光吸收大, 量子效率高达  $70\%\sim 80\%$ , 且具有响应快的优点 [20], 使其成为一种重要的红外探测材料。

碲镉汞红外探测器同样存在着一些问题, 碲镉汞主要由离子键组成, 离子键之间相互作用力小 [21], 单质汞易从碲镉汞材料中逸出, 导致材料缺陷、材料不均匀和器件性能不均匀 [22]。另一个问题是碲镉汞薄膜材料生长的外延衬底成本昂贵, 为了获得更大尺寸碲镉汞材料, 必须考虑替代衬底, 但由此产生的晶格失配会极大地恶化材料质量 [20]。在各种外延技术中, 液相外延 (Liquid Phase Epitaxy, LPE) 技术是最成熟的外延方法, 可实现碲镉汞的工业化生产 [23]。而分子束外延 (Molecular Beam Epitaxy, MBE) 法或金属有机物汽相沉积 (Metal Organic Chemical Vapour Deposition, MOVPE) 法等技术则可用于制作复杂的碲镉汞多层异质结构材料 [21]。MBE 在材料和器件工程方面提供了最低生长温度、超晶格生长等能力, MBE 的生长温度低于  $200^\circ\text{C}$ , 而 MOVPE 的生长温度在  $350^\circ\text{C}$  左右 [5]。综合碲化镉汞的优缺点可以看出, 要实现高性能、低成本的碲化镉汞长波红外焦平面是非常困难的。特别是在国内, 比较现实的开发和应用是中波和短波的碲化镉汞红外探测器。

碲镉汞红外探测器经过六十多年的发展, 性能不断提升, 获得了广泛应用, 而在第三代焦平面探测器应用牵引下, 碲镉汞焦平面芯片在过去十年中进入快速发展期。图 8 显示了雷神视觉系统公司 (Raytheon Vision Systems, RVS) 的碲镉汞焦平面芯片开发时间表, 在 20 世纪 80 年代初 RVS  $32\times 32$  InSb 探测器阵列用于红外观测, 到现在 RVS 已经成功制造了  $8\ 000\times 8\ 000$  格式的阵列, 图中可以看出随着像素尺寸的减小而增加的格式 [24]。

在红外 FPA 技术中使用硅衬底是非常有吸引力的, 因为它成本低且面积大, 大多数在硅上的外延工艺都使用缓冲层来缓冲硅和碲镉汞之间的晶格不匹配产生的应变 [5]。目前, RVS 已经可以制造  $4\ 000\times 4\ 000$  格式  $20\ \mu\text{m}$  像素红外阵列, 其由使用分子束外延在硅衬底上生长的碲镉汞组成, 图 9 所示为  $4\ 000\times 4\ 000$  红

外阵列<sup>[24]</sup>。

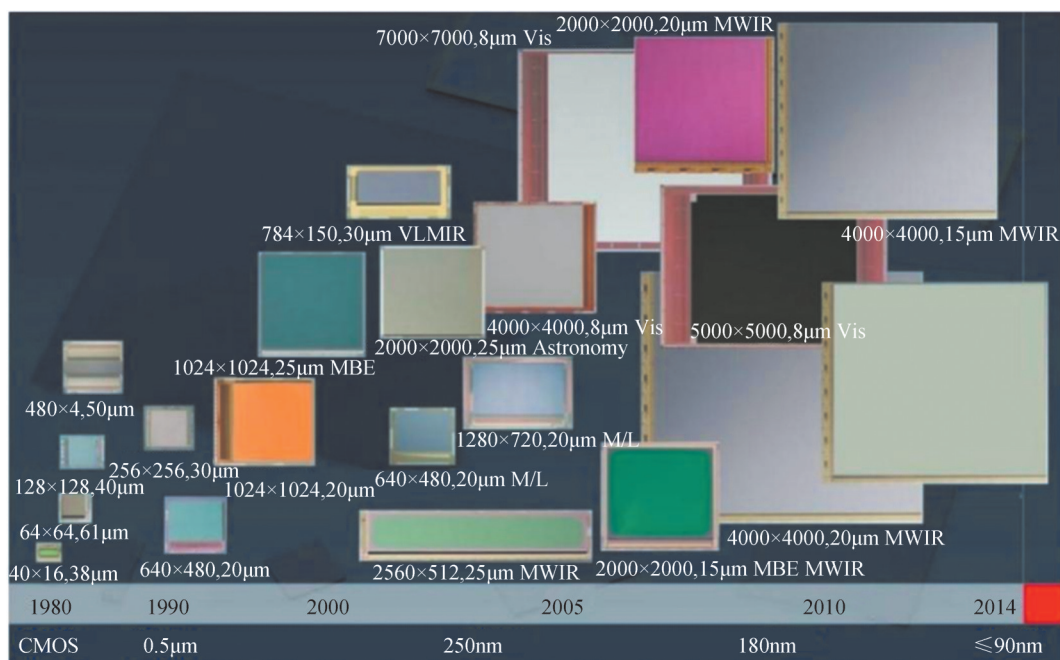


图8 雷神视觉系统公司的碲镉汞开发时间表<sup>[24]</sup>

Fig. 8 Timeline for HgCdTe development at Raytheon Vision Systems<sup>[24]</sup>

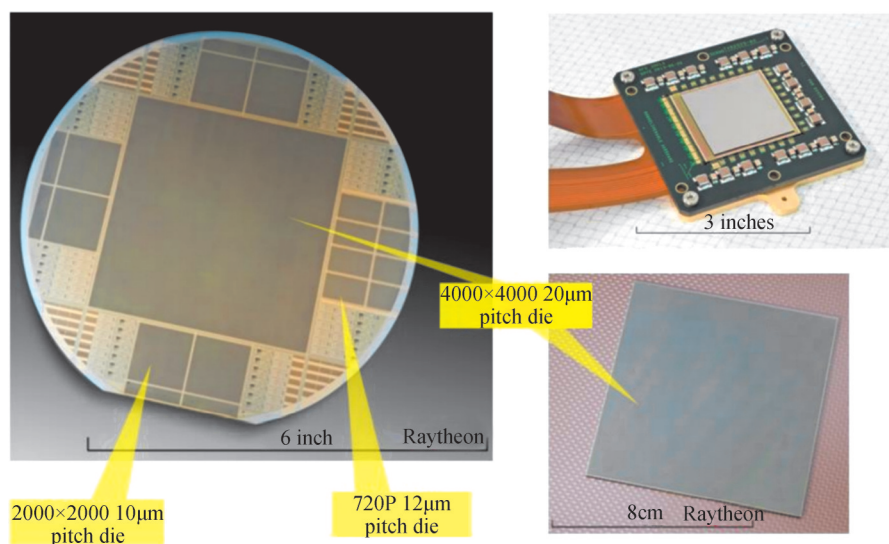


图9 RVS 碲镉汞 4 000×4 000 红外阵列<sup>[24]</sup>

Fig. 9 RVS HgCdTe 4 000×4 000 infrared array<sup>[24]</sup>

目前,成像系统的小尺寸、低重量、低功耗和低成本仍是红外探测器技术发展趋势<sup>[16]</sup>。由2.2节可知,红外系统成本降低最终取决于在常温条件下耗尽电流探测器阵列像素密度是否与系统光学元件的背景极限和衍射极限性能匹配<sup>[18]</sup>。耗尽电流受限的p-i-n光电二极管需要较长的间接复合(Shockley Read Hall, SRH)载流子寿命,以满足低暗电流的要求。HgCdTe的SRH寿命长,使其成为室温工作的理想材料<sup>[18]</sup>。SRH产生复合机制决定了轻掺杂n型和p型碲镉汞的载流子寿命:数据表明,掺杂浓度低于 $10^{15}\text{cm}^{-3}$ ,在77K时长波n型HgCdTe的载流子寿命的范围为2~20µs。而中波材料的寿命通常稍长,在2~60µs的范围内<sup>[25]</sup>。过去10年,随着掺杂技术及外延技术的提高,在低温和低掺杂浓度下的SRH载流子寿命得到了大幅提升,不同的工作中的寿命超过200µs甚至达到50ms<sup>[26]</sup>。LEE D等制备的p-i-n HgCdTe光电二极管,SRH复合中心的寿命在0.5~10ms<sup>[27]</sup>。



碲镉汞红外焦平面探测器仍然在很多方面占据主导地位,碲镉汞材料的多种用途使得碲镉汞材料体系变得越来越重要。MBE和MOVPE的发展使人们可以制得更复杂、更精确的碲镉汞多层结构;同时依靠工艺中各个部分的改进增加精确加工程度,将会大大促进新一代碲镉汞红外探测器前沿热点技术的发展<sup>[28]</sup>。

### 2.3 量子阱红外光电探测器

碲镉汞红外探测器虽占据主流地位,但由于碲镉汞材料中Hg-Te键脆弱,仍然很难制备大规模长波红外焦平面碲镉汞光电探测器阵列<sup>[29]</sup>。量子阱红外光电探测器(Quantum Well Infrared Photodetector, QWIP)是一种适用于中长波红外波段的混合探测器,通过改变势阱的宽度和势垒的高度,可以获得3~18  $\mu\text{m}$ 甚至更长的光谱响应。其工作原理如图10所示,外部施加电场,吸收红外光子可以将载流子从量子阱的基态光激发到连续介质中,从而产生光电流<sup>[30]</sup>。图中还包含三种暗电流机制,每种暗电流机制掌握支配不同的温度,基态隧穿在30 K以下起主要作用,热辅助隧穿在30~45 K之间起主要作用,而热激发在更高温度下起主要作用<sup>[31]</sup>。

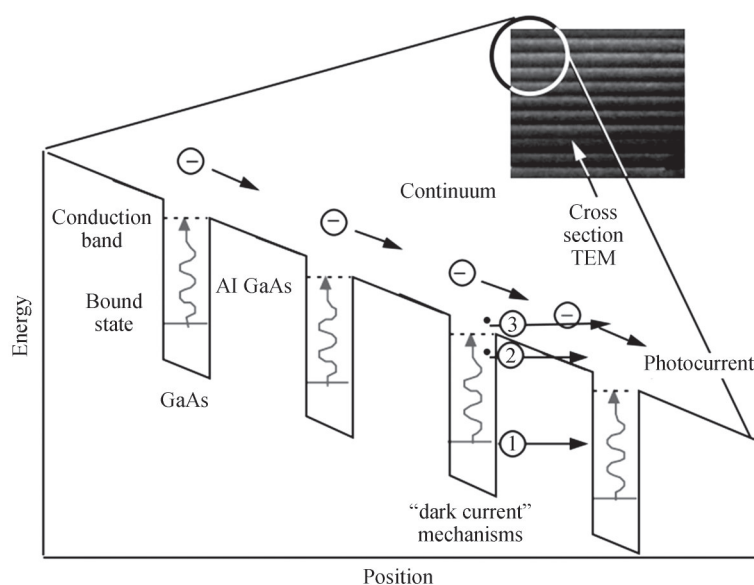


图10 量子阱红外探测器工作原理<sup>[20]</sup>

Fig. 10 Working principle diagram of quantum well infrared detector<sup>[20]</sup>

20世纪80年代,美国贝尔实验室研制出GaAs/AlGaAs量子阱红外探测器<sup>[31]</sup>,量子阱红外探测器进入快速发展期。相比较于HgCdTe探测器,GaAs/AlGaAs量子阱器件具有使用基于成熟GaAs生长和标准加工制造技术等优点<sup>[32]</sup>,但因其能带结构和吸收效率的限制,在红外响应波段较窄,在中波波段区域性能较差<sup>[30]</sup>,HgCdTe探测器与量子阱探测器对比如表1所示。量子阱探测器使用带隙较宽的III-V族材料,除了提到的光导型量子阱材料(GaAs/AlGaAs),还有光伏型量子阱材料(InAs/InGaSb, InAs/InAsSb)<sup>[33]</sup>。与传统的碲镉汞探测器相比,量子阱红外探测器具有暗电流低、器件均匀性好、成本低且可大规模制备等优点<sup>[34]</sup>。然而量子阱红外探测器的缺点来源于自身的工作方式,由于子带间跃迁的基本限制,该探测器的光谱响应波段很窄<sup>[30]</sup>。并且量子阱红外探测器在较高温度工作(>70 K)时量子效率过低,通常低于10%<sup>[35]</sup>。

在过去的几十年中,大多数基于子带间跃迁的QWIP主要为对称结构<sup>[36]</sup>,通过重掺杂阱层改善器件性能<sup>[37]</sup>,但受到波函数对称性选择规则限制,高掺杂会增加器件的暗电流,探测率也随之降低<sup>[38]</sup>。采用非对称量子阱结构可以提高其光吸收,获得高的响应度,进而提升其性能<sup>[38-39]</sup>。在基于 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}/\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 的非对称QWIP子带间跃迁,打破了选择规则,获得了高的子带间吸收,其中 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 中In浓度(y)的增加对探测器的性能起着关键作用:由于具有很强的重叠波函数,从而可提高探测器的响应度,过高的In浓度会使QWIP的性能变差,但性能仍优于其对称结构的器件<sup>[40]</sup>。

量子阱红外探测器具有低功耗、快速响应等特性,符合大面阵FPA制造的要求<sup>[41]</sup>。目前,大多数量子阱红外探测器的发展都基于GaAs基晶格匹配的GaAs/AlGaAs多量子阱<sup>[30]</sup>,其在可生产性和成本方面具有潜



在优势。量子阱红外探测器还有许多需要完善的工作,提高性能的关键是优化量子阱的结构参数,降低暗电流,改变材料的能态分布,提高量子效率,从而实现准确的探测目标<sup>[42]</sup>。

表1 HgCdTe探测器与量子阱探测器对比  
Table 1 Comparison between HgCdTe detector and quantum well detector

Detector type	Working principle	Preparation method	Quantum efficiency/%	Suitable working temperature/K	Advantage
HgCdTe	Intrinsic absorption based on interband electron excitation	MOCVD/ LBE/MBE	~70~80	35~77	Low dark current, low power consumption, high detection rate
GaAs/AlGaAs	Extrinsic absorption based on inter subband transition	MBE/ MOCVD	8	<50	Large area with good uniformity and low cost

## 2.4 II类超晶格红外光电探测器

碲镉汞仍在红外探测器材料中占据重要地位,但有着难以实现大规模阵列及成本过高等弊病<sup>[43]</sup>,而量子阱红外探测器同样有着不能直接探测垂直入射辐射、量子效率低及红外响应波段较窄等弊病<sup>[30]</sup>。II类超晶格红外探测器在具备碲镉汞和量子阱红外探测器的优点的同时,解决了两者存在的问题,被认为是具有良好前景的红外探测器<sup>[20]</sup>。

超晶格的概念由ESAKIL和TSUR在1977年提出,它由两种具有不同带隙的半导体材料构成,其结构与量子阱结构相似,不同之处是超晶格的势阱深度不同和势垒层极薄<sup>[44]</sup>。现阶段对于超晶格结构的研究工作主要集中在材料体系和维度方面<sup>[45]</sup>。根据两种能带的构型,可以将超晶格分为三种类型,第一类以GaAs/Ga<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>As为代表,第二类以InAs/GaSb为代表,第三类以HgTe/CdTe为代表<sup>[45]</sup>。因此,根据两种材料的能带带隙是否重叠可将II类超晶格结构分为两种能带结构,如图11所示<sup>[43]</sup>。当带隙存在部分重叠时,带隙结构为“禁带跨接”型的II类超晶格结构;反之,当带隙不存在重叠时,带隙结构为“禁带错位”型的II类超晶格结构。II类超晶格红外探测材料由于其独特的“断裂带隙”能带结构而具有量子效率高、暗电流低、带隙可调、响应时间短、成本低及大面积材料均匀性好等优点<sup>[46]</sup>,使其在长波及甚长波范围内具有优异的器件性能<sup>[47]</sup>,从而具有良好的发展潜力。

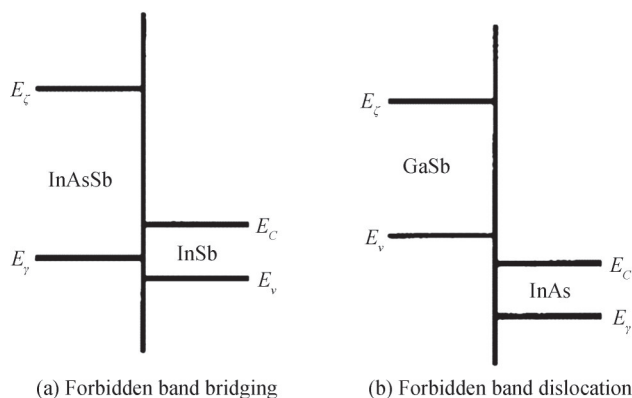


图11 II类超晶格能带结构<sup>[43]</sup>  
Fig. 11 Type II superlattice energy band structure<sup>[43]</sup>

铟化物II类超晶格是III-V族超晶格材料的重要组成部分,因其均匀性好、暗电流低等优点成为制备红外探测器的核心材料<sup>[48]</sup>,使红外探测器具备更大像素规模、更好热分辨率、更高帧率等功能<sup>[49]</sup>。铟化物II类超晶格材料中,最早发展起来的是InAs/GaSb超晶格体系,其优势在于量子效率高和带隙可调<sup>[48]</sup>,但在超晶格GaSb层中本征Ga缺陷不能完全避免,相对其他超晶格体系少子寿命会急剧减少<sup>[50]</sup>;而属于非Ga的InAs/InAsSb体系可以避免InAs/GaSb超晶格体系中少子寿命过少的问题<sup>[51]</sup>,要面临合金InAsSb中As和

Sb的成分控制以及吸收系数下降等问题<sup>[50-53]</sup>,HgCdTe和II类超晶格光电二极管的特性对比如表2所示。

表2 77 K时HgCdTe和T2SL光电二极管的典型特性<sup>[54]</sup>  
Table 2 Typical properties of HgCdTe and T2SL photodiodes at 77 K<sup>[54]</sup>

Parameter	HgCdTe	InAs/GaSb SL	InAs/InAsSb SL
Background doping/cm <sup>-3</sup>	5×10 <sup>13</sup>	<10 <sup>15</sup>	>10 <sup>15</sup>
Quantum efficiency/%	80	~50~60	~40
Thermal GR carrier lifetime/μs	10	~0.1	~1
D*(λc=10μm, FOV=0)/(×10 <sup>12</sup> ·cm·Hz <sup>1/2</sup> ·W <sup>-1</sup> )	3	1	0.4

基于锑化物的II型超晶格已成为红外光电探测器重要选择之一,探测器发展方向是减少红外探测系统的尺寸、重量和功率。为此,需要提高器件的工作温度,以减轻冷却系统的负担<sup>[55]</sup>。然而,随温度升高,由SRH、辐射和俄歇复合引起的少数载流子指数衰减,导致高温热噪声增加<sup>[56]</sup>。可行的解决方案是增加少数载流子的寿命,从而减少暗电流,提升量子效率,提升探测器的性能<sup>[57]</sup>。为此,可采用“非Ga”InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>II类超晶格材料,充分利用长的少数载体寿命的优点,且材料生长更为简易,比同类InAs/GaSbII类超晶格有更好的缺陷容错能力<sup>[58-59]</sup>。在高性能pBn中波光电探测器的演示中,InAs/InAsSbII类超晶格用作的吸收区<sup>[60]</sup>其量子效率高达57.6%,暗电流密度低至5.39×10<sup>-5</sup>A/cm<sup>2</sup>,有效降低俄歇复合速率,大大减少了中波成像系统的尺寸、重量和功率<sup>[61]</sup>。

国际上,锑化物红外探测器已全面进入第三代,而国内锑化物红外探测器目前处于第二代焦平面阵列实现批产阶段。主要的锑化物红外探测器实现了国产化,走产品开发与预先研究相结合的道路,第三代大阵列焦平面样机还处于研究阶段,锑化物红外探测器领域技术发展路线如图12所示<sup>[62]</sup>。目前,国内在锑化物II类超晶格材料生长、器件应用与物性研究方面均取得了长足进步<sup>[48]</sup>,与国外锑化物红外探测器设计与制造技术相比,存在5年以内的差距,体现在阵列规模、工作温度、外延衬底等方面。

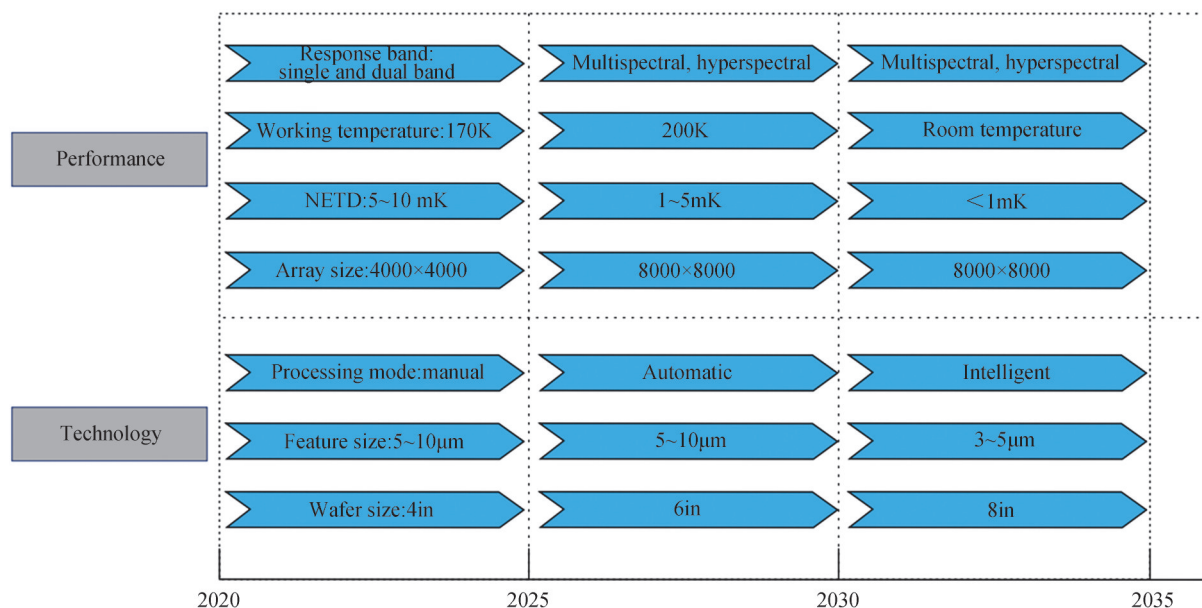


图12 锑化物红外探测器领域发展路线<sup>[62]</sup>

Fig. 12 Development roadmap in the field of antimonide infrared detectors<sup>[62]</sup>

## 2.5 量子点红外光电探测器

得益于外延技术的进步,量子结构光电探测器在III-V族材料生长和器件性能方面取得了巨大进展<sup>[63]</sup>。量子阱红外光电探测器的发展不仅推动了传统红外探测技术的进步,还造就了新型器件量子点红外光电探测器(Quantum Dot Infrared Photodetector, QDIPs)。量子点红外探测器于1998年首次被PHILLIPS等论证<sup>[64]</sup>,其结构类似于量子阱红外探测器,不同之处是量子点在三个维度都有尺寸的限制<sup>[63]</sup>。与商用量子阱

红外探测器相比,量子点红外探测器更有潜力开发出灵敏度高、可高温操作的下一代红外探测器<sup>[65]</sup>,量子点的三维量子限制使量子点具有相对较高的工作温度、较低的暗电流和高探测率<sup>[66]</sup>,这些独特的特性使量子点红外探测器在很多方面都表现出了良好的性能,已经成为 III-V 族量子阱红外探测器的重要替代品<sup>[67]</sup>。

目前,在硅衬底上异质集成 III-V 族材料引起了广泛的关注,这在高速计算和传感领域开发新的集成电路设计和应用提供了无数可能性,在硅衬底上实现量子点红外探测器在成本和高分辨率焦平面阵列方面具有优势<sup>[68]</sup>。作为一种大规模的片上光电探测器阵列的关键技术,在硅衬底上异质集成 III-V 族材料将显著降低成本并提升性能<sup>[69]</sup>。尽管 III-V 型量子点红外探测器在硅上具有优势,但由于 III-V 型和硅材料之间较大的晶格失配和热膨胀系数(Coefficient Of Thermal Expansion, CTE)的差异,为实验进展带来了巨大挑战<sup>[68]</sup>。图 13 展示了锑基 III-V 族材料体系的组成和波长,以及能隙和晶格常数,可以明显看出 Si(晶格常数,  $a_0=5.4310 \text{ \AA}$ ,  $1 \text{ \AA}=0.1 \text{ nm}$ )和大多数 III-V 化合物之间存在较大的晶格失配<sup>[70]</sup>。

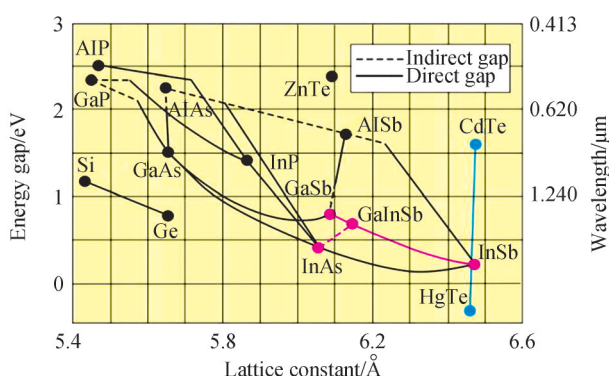


图 13 锑基 III-V 族材料体系的组成和波长<sup>[71]</sup>

Fig. 13 Composition and wavelength diagram of Sb-based III-V material systems<sup>[71]</sup>

目前,解决 III-V 化合物与 Si 之间的晶格失配问题是完成在 Si 衬底上直接生长 III-V 化合物的主要任务之一。晶格失配和不同的热膨胀系数往往会在 III-V/Si 界面和 III-V 衬层中形成高密度缺陷<sup>[70]</sup>,导致器件性能严重下降<sup>[72]</sup>。在硅衬底上异质集成 III-V 族材料通常采用直接外延生长和晶圆键合技术。对于直接外延生长技术,目前由于形成了一个低位错密度的无反相界的 GaAs 缓冲层,已经成功地证明了仅使用分子束外延就可以在硅衬底上直接生长 InAs/GaAs,表明在大面积、低成本的硅衬底生长 III-V 族量子点,会大大促进量子点红外探测器的发展<sup>[73]</sup>。与外延集成方法相比,直接晶圆键合是一种更直接、更实用的实现 III-V 族化合物与硅衬底之间异质集成的方法,且能够对 III-V 族材料和互补金属氧化物半导体进行单独的晶圆加工,在最后阶段进行集成<sup>[70]</sup>,并且晶圆键合技术克服了异质外延生长不可避免的晶格失配和热膨胀系数失配的缺点<sup>[74]</sup>。

与其他类型的红外探测器相比,III-V 型量子点红外探测器具有优越的品质和商业可行性的前景,并且在硅上异质外延生长的 III-V 量子点激光器也取得了巨大的成功,III-V 型量子点为近红外和中红外光谱区域的高性能和高密度芯片级光子集成提供了新的机遇<sup>[70]</sup>。量子点红外探测器仍需优化外延生长条件并突破晶片键合技术的局限性来进一步提高器件性能<sup>[75]</sup>,在不久的将来,III-V 型量子点器件单片集成在 Si 上,具有改进的功能性、复杂性和高集成密度。

自组装外延量子点的替代品之一是胶体量子点(Colloidal Quantum Dot, CQD)材料,具有光学特性尺寸可调和制造成本低等优点<sup>[19]</sup>。近十年来,胶体量子点光电探测器的研究取得了重大进展,CQD 可以为 InGaAs、InSb、InAsSb、HgCDTe、T2SLs 等材料,与外延量子点相比,这些纳米颗粒可以提高 CQD 光电探测器的性能<sup>[76]</sup>。从性能角度来看,基于 PbS CQD 的短波光电探测器已经实现了与商业 InGaAs 光电二极管相当的探测率,在热电冷却温度下保持快速响应时间<sup>[77]</sup>。这种新型 CQD 材料红外技术与目前广泛使用的廉价 CMOS 相机相匹配<sup>[78]</sup>,在硅上集成的 CQD 薄膜光电二极管制作的短波红外相机已投入使用<sup>[79]</sup>。CQD 相机应用需要在较小的像素上进行低成本的高清成像,而不需要极高的灵敏度,在半导体工艺及材料制备技术提高的条件下,未来将达到很好的性能。但受限于低载流子迁移率及大的暗电流等,胶体量子点红外探



测器仍难以达到目前主流的 InGaAs、HgCdTe、InSb 和 T2SL 等光电二极管的暗电流及高速特性<sup>[77]</sup>。

## 2.6 硅基锗锡红外光电探测器

基于互补金属氧化物半导体(Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS)工艺的可见光成像芯片技术成熟,具有工作电压低、功耗小、允许对图像数据进行随机存取、制备成本低等优势,市场占有率逐年提高,已取代电荷耦合元件(Charge Coupled Device, CCD)成像技术成为未来的主导。受硅材料带隙的限制,基于硅 CMOS 工艺的成像芯片的光响应波长截止到 1.1  $\mu\text{m}$ ,只能实现较小范围的短波红外响应。为解决这一问题,可采用如上讨论的硅衬底上引入 III-V 族、IV-VI 等窄带隙化合物半导体材料(直接材料生长或者采用倒装焊技术引入化合物探测芯片)实现更大范围的红外探测。不过,人们更期待在硅衬底上直接生长 CMOS 工艺兼容的 IV 族材料,以降低成本,提高成像芯片的集成度。锗是大家最为熟悉的 IV 族材料,带隙小于硅材料,同属金刚石型晶体结构,具有 CMOS 工艺兼容性好的优点,不过响应波长也只能拓展到 1.55  $\mu\text{m}$ 。在锗材料内引入少量锡材料形成锗锡合金,可以使其带隙减小。根据锡的组分不同,锗锡材料的带隙在 0~0.8 eV 之间连续可调,可实现宽谱红外探测。在锗材料中引入 2% 的锡组分,可使其在 1.55  $\mu\text{m}$  的光吸收系数提高一个量级<sup>[80]</sup>;而引入仅 3% 的锡组分,即可将响应波长扩展至 1.8  $\mu\text{m}$ <sup>[81]</sup>。当锡组分大于 8% 时,锗锡将转变为直接带隙材料<sup>[82]</sup>,在硅基光源方面也有很大的应用前景,使锗锡成为近期的研究热点。硅、锗锡材料间晶格失配较大( $>4.2\%$ )、锡在锗内的固溶度低等问题,导致在硅衬底上外延高质量的锗锡吸收层仍存在一些技术难点:首先,因晶格失配原因在硅上外延锗会引入大量穿透位错,使得其成像芯片的灵敏度不高;其次,锡固溶度较低,材料高温耐受性差,需避免高温工艺。也正是这些原因,多年来,基于硅基 IV 族材料的红外成像芯片技术的发展受到了一定的限制。

在解决硅/锗晶格失配的研究方面,人们提出采用缓冲层方法来提高其晶体质量,锗组分渐变弛豫是最早采用的方法,通过逐步增加锗组分将晶格常数从硅过渡到锗,产生的失配位错散布到缓冲层中从而保证顶层锗的晶体质量,然而厚达 10  $\mu\text{m}$  以上的缓冲层难于满足器件集成及应用要求。麻省理工大学的科研人员提出低温锗缓冲层技术<sup>[83]</sup>,在硅锗界面释放晶格失配,实现锗薄膜在硅衬底上的直接外延,极大地扩展了硅基锗材料的应用范围。通过高温循环退火等提高晶体质量的工艺<sup>[84]</sup>,材料的穿透位错可降到  $10^5 \text{ cm}^{-2}$  量级<sup>[85]</sup>。在这样的缓冲衬底上进行锗锡外延,其晶体质量大幅提高。美国亚利桑那州立大学、斯坦福大学、德国斯图加特大学、比利时 IMEC、中国科学院半导体所、新加坡国立大学以及日本名古屋大学等单位在硅基锗锡材料生长及探测器等研究方面较为活跃。目前已可以采用 MBE、气相沉积法(Cheical Vapor Deposition, CVD)等手段外延生长锡组分高达 20% 的硅基锗锡合金,其探测器响应波长已拓展到 3  $\mu\text{m}$ 。值得指出的是,锡在锗材料内的固溶度较低,锗锡材料的温度稳定性不高,很容易析出表面,生长温度越高,其分凝效应越严重,WEIGSCHEIDER W 指出<sup>[86]</sup>,当外延温度高于 300  $^{\circ}\text{C}$  时,大部分锡将分凝到表面,而外延温度太低,则会影响外延材料的晶体质量。一般认为,200~300  $^{\circ}\text{C}$  是比较合适的锗锡外延温度,低熔点锡材料的引入使得在如此低温条件下也能外延晶体质量较好的硅基锗锡材料。

尽管通过低温缓冲层技术已大幅提升了硅基锗锡材料的晶体质量,穿透位错仍然高于  $10^5 \text{ cm}^{-2}$ ,所制备的探测器也具有较大的暗电流密度( $0.078 \text{ A/cm}^2$ )<sup>[84,87]</sup>,较成熟的铟镓砷探测器有较大差距。本文作者团队发现的锡自催化硅基锗锡横向生长技术可突破传统外延工艺晶格失配限制,实现无位错硅基锗锡材料的生长<sup>[88]</sup>,为大失配条件下的异质材料外延提供了一个可行之法。

## 3 结论

红外探测器的发展与选择直接关系到国防和工业的发展,碲镉汞红外探测器由于其优异的性能,将在未来继续扩大其应用范围。而量子阱红外探测器可以在长波领域实现大规模阵列,弥补在长波范围内碲镉汞存在的材料均匀性问题。II 类超晶格红外探测器在长波及甚长波范围内实现了更优异的性能,在理论和器件性能方面都展现出巨大的发展潜力和应用前景。可以预见,以碲镉汞、量子阱、超晶格和量子点为代表的传统红外探测器仍将主导整个红外探测领域,并在应用方面形成互为补充的支撑关系。

红外探测技术发展的核心是提高其性能,下一代红外光子探测芯片将集中在更大数量像素、更高帧率、多色化、片上操作和高工作温度等方面,并在在实际应用时权衡尺寸、功耗、成本等参数,达到最优化设计。

未来民用和军用红外探测器发展主要通过提高FPA的工作温度来减少红外成像系统的成本,HgCdTe等材料表现出的良好性能往往需要在低温下工作,这对器件实现小型化、低成本和便携性等方面十分不利。目前采用热电制冷的高工作温度红外探测器发展十分迅速,通过提高器件的工作温度,可大幅节约其冷却成本,从而降低芯片的功耗并增加其可靠性。

#### 参考文献

- [1] HERSCHEL W. 'The Scientific Papers of Sir William Herschel' at 100[J]. *Astronomy & Geophysics*, 2012, 53(2):13.
- [2] HU Weida, LI Qing, CHEN Xiaoshuang, et al. Recent progress on advanced infrared photodetectors[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, 68(12):42-76.  
胡伟达,李庆,陈效双,等.具有变革性特征的红外光电探测器[J].*物理学报*, 2019, 68(12):42-76.
- [3] BARR E S. Historical survey of the early development of the infrared spectral region[J]. *American Journal of Physics*, 1960, 28(1):42-54.
- [4] CASE T W. Notes on the change of resistance of certain substances in light[J]. *Physical Review*, 1917, 9(4):305-310.
- [5] ROGALSKI A. Next decade in infrared detectors[C]. *SPIE*, 2017, 10433: 104330L.
- [6] LOVELL D J. The development of lead salt detectors[J]. *American Journal of Physics*, 1969, 37(5):467-478.
- [7] LAWSON W D, NIELSEN S N, PUTLEY E H, et al. Preparation and properties of HgTe and mixed crystals of HgTe-CdTe[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1959, 9(3-4):325-329.
- [8] ELLIOTT T. Recollections of MCT work in the UK at Malvern and Southampton[C]. *SPIE*, 2009, 7298: 72982M.
- [9] ROGALSKI A. Infrared detectors: an overview[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43(3-5):187-210.
- [10] ROGALSKI A. Progress in focal plane array technologies[J]. *Progress in Quantum Electronics*, 2012, 36(2-3):342-473.
- [11] SCRIBNER D A, KRUEER M R, KILLIANY J M. Infrared focal plane array technology[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1991, 79(1):66-85.
- [12] ZHOU Liqing. The status and development of substrates for HgCdTe epilayer[J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(11): 808-811.  
周立庆.碲镉汞外延用衬底材料的现状和发展[J].*激光与红外*, 2005, 35(11): 808-811.
- [13] HOLST G C, MCHUGH S W. Review of thermal imaging system performance[C]. *SPIE*, 1992, 1:78-84.
- [14] PARK S K, SCHOWENGERDT R A, KACZYNSKI M A. Modulation-transfer-function analysis for sampled image systems[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(15):2572.
- [15] PLANINSIC G. Infrared thermal imaging: fundamentals, research and applications[J]. *European Journal of Physics*, 2011, 32(5):1431.
- [16] ROBINSON J, KINCH M, MARQUIS M, et al. Case for small pixels: system perspective and FPA challenge[C]. *SPIE*, 2014, 9100: 91000I.
- [17] HOLST G C, DRIGGERS R G. Small detectors in infrared system design[J]. *Optical Engineering*, 2012, 51(9):6401.
- [18] ARMSTRONG J M, SKOKAN M R, KINCH M A, et al. HDVIP five-micron pitch HgCdTe focal plane arrays[C]. *SPIE*, 2014, 9070: 907033.
- [19] ROGALSKI A, KOPYTKO M, MARTYNIUK P, et al. Comparison of performance limits of the HOT HgCdTe photodiodes with colloidal quantum dot infrared detectors[J]. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 2020, 68(4):845-855.
- [20] SHI Yanli. Choice and development of the third-generation infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(1):1-8.  
史衍丽.第三代红外探测器的发展与选择[J].*红外技术*, 2013, 35(1):1-8.
- [21] GOLDBERG A C, KENNERLY S W, LITTLE J W, et al. Comparison of HgCdTe and QWIP dual-band focal plane arrays[C]. *SPIE*, 2001, 4369:532-546.
- [22] LI Xingliang, NIU Chunhui, MA Muyan, et al. Research on the thermal damage of HgCdTe infrared detector under laser irradiation of 10.6  $\mu\text{m}$  wavelength[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(1):6-9.  
栗兴良,牛春晖,马牧燕,等.10.6 $\mu\text{m}$ 激光辐照碲镉汞红外探测器热损伤研究[J].*红外技术*, 2016, 38(1):6-9.
- [23] REDDY M, PETERSON J M, VANG T, et al. Molecular beam epitaxy growth of HgCdTe on large-area Si and CdZnTe substrates[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2011, 40(8):1706-1716.
- [24] HOLLAND A D, BELETIC J, STARR B, et al. RVS large format arrays for astronomy[C]. *SPIE*, 2016, 9915: 99152X.
- [25] KINCH M A, AQARIDEN F, CHANDRA D, et al. Minority carrier lifetime in p-HgCdTe[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2005, 34(6):880-884.
- [26] GRAVRAND O, ROTHMAN J, DELACOURT B, et al. Shockley - read - hall lifetime study and implication in HgCdTe photodiodes for IR detection[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, 47(10):5680-5690.
- [27] LEE D, DREISKE P, ELLSWORTH J, et al. Performance of MWIR and LWIR fully-depleted HgCdTe FPAs[C]. *The 2019 U.S. Workshop on the Physics and Chemistry of II - VI Materials*, 2019: 189-190.

- [28] BELETIC J W, BLANK R, GULBRANSEN D, et al. Teledyne imaging sensors: infrared imaging technologies for astronomy and civil space[C]. SPIE, 2008, 7021:70210H.
- [29] LEI W, ANTOSZEWSKI J, FARAONE O. Progress, challenges, and opportunities for HgCdTe infrared materials and detectors[J]. Applied Physics Reviews, 2015, 2(4):041303.
- [30] LU Wei, LI Ning, ZHEN Honglou, et al. A new family in infrared optoelectronics—quantum well infrared detectors[J]. Science in China: Physics, Mechanics & Astronomy, 2009, 39(3):336-343.  
陆卫, 李宁, 甄红楼, 等. 红外光电子学中的新族——量子阱红外探测器[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2009, 39(3):336-343.
- [31] WEI Tingting. Research status and prospects of quantum well infrared detectors[J]. Science & Technology Information, 2009, 1(22):475-477.  
卫婷婷. 量子阱红外探测器研究现状及展望[J]. 科技信息, 2009, 1(22):475-477.
- [32] ROBO J A, COSTARD E, TRUFFER J P, et al. QWIP focal plane arrays performances from MWIR up to VLWIR [C]. SPIE, 2009, 7298:72980F.
- [33] GUERIAUX V, BERURIER A, HUET O, et al. Quantum well infrared photodetectors: present and future[J]. Optical Engineering, 2011, 50(6):1013.
- [34] ROGALSKI A. Assessment of HgCdTe photodiodes and quantum well infrared photoconductors for long wavelength focal plane arrays[C]. SPIE, 1999, 40(4):279-294.
- [35] GENDRON L, KOENIGUER C, MARCADET X, et al. Quantum cascade detectors [J]. Infrared Physics & Technology, 2005, 47(1-2):175-181.
- [36] ZEIRI N, SFINA N, ABDIBEN N S, et al. Intersubband transitions in quantum well mid-infrared photodetectors[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60(C):137-144.
- [37] BILLAHA A, DAS M K. Influence of doping on the performance of GaAs/AlGaAs QWIP for long wavelength applications[J]. Opto-Electronics Review, 2016, 24(1):25-33.
- [38] KHAN M A, PAVEL A A, ISLAM N, et al. Intersubband transition in asymmetric quantum well infrared photodetector [J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2013, 12(4):521-523.
- [39] CHEAH C W, KARUNASIRI G, TAN L S. Analysis of AlGaAs/GaAs/InGaAs n-type step multiple quantum wells for the optimization of normal incident absorption[J]. Semiconductor Science & Technology, 2002, 17(9):1028.
- [40] BILLAHA M A, DAS M K. Performance analysis of AlGaAs/GaAs/InGaAs-based asymmetric long-wavelength QWIP [J]. Applied Physics A: Materials Science & Processing, 2019, 125(7):457.
- [41] SHI Y. Development and application of large format QWIP FPA[C]. SPIE, 2009, 7383:738303.
- [42] SHI Yanli. Development status of quantum well infrared photodetectors in the euramerican countries [J]. Infrared Technology, 2005, 27(4):274-278.  
史衍丽. 国外量子阱红外焦平面探测器的发展概况[J]. 红外技术, 2005, 27(4):274-278.
- [43] ZENG Gehong, SHI Yanli, ZHUANG Jisheng. Principles, status and prospect of type II superlattice infrared detectors [J]. Infrared Technology, 2011, 33(6):311-314.  
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(6):311-314.
- [44] ESAKI L, TSU R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors[J]. IBM Journal of Research and Development, 1970, 14(1):61-65.
- [45] WANG Guowei, XU Yingqiang, NIU Zhichuan. Development of high-performance novel low-dimensional structure antimonide infrared FPAs: challenges and solutions[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2014, 44(4):368-389.  
王国伟, 徐应强, 牛智川. 新型低维结构锑化物红外探测器的研究与挑战[J]. 中国科学:物理学 力学 天文学, 2014, 44(4):368-389.
- [46] GONG Feng, MA Wenquan, TAN Zhen, et al. Research on Sb-based type-II superlattice MW infrared focus plane array [J]. Laser & Infrared, 2014, 44(3):258-260.  
巩锋, 马文全, 谭振, 等. 锑基II类超晶格中波红外焦平面探测器技术[J]. 激光与红外, 2014, 44(3):258-260.
- [47] BAJAJ J, SULLIVAN G, LEE D, et al. Comparison of type-II superlattice and HgCdTe infrared detector technologies [C]. SPIE, 2007, 6542:65420B.
- [48] LIU Shengda, FANG Dan, FANG Xuan, et al. Advances in epitaxial growth, structural and optical properties of antimonide-based type-II superlattices[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2021, 42(2):165-186.  
刘胜达, 房丹, 方铤, 等. 锑化物II类超晶格材料外延生长, 结构及光学特性研究进展[J]. 发光学报, 2021, 42(2):165-186.
- [49] ZHOU Yi, CHEN Jianxin, XU Qingqing, et al. Long wavelength infrared detector based on type-II InAs/GaSb superlattice[J]. Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2013, 32(3):210-213.  
周易, 陈建新, 徐庆庆, 等. 长波InAs/GaSb II类超晶格红外探测器[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(3):210-213.



- [50] OLSON B V, SHANER E A, KIM J K, et al. Identification of dominant recombination mechanisms in narrow-bandgap InAs/InAsSb type-II superlattices and InAsSb alloys[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(5):052106.
- [51] MANYK T, MICHALCZEWSKI K, MURAWSKI K, et al. InAs/InAsSb strain-balanced superlattices for longwave infrared detectors[J]. Sensors, 2019, 19(8):1907.
- [52] ARIYAWANSA G, REYNER C J, STEENBERGEN E H, et al. InGaAs/InAsSb strained layer superlattices for mid-wave infrared detectors[J]. Applied Physics Letters, 2016, 108(2):022106.
- [53] DU P, FANG X, ZHAO H B, et al. Mid- and long-infrared emission properties of  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$  quaternary alloy with Type-II InAs/GaSb superlattice distribution[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 847:156390.
- [54] ROGALSKI A, MARTYNIUK P M, KOPYTKO M. Type-II superlattice photodetectors versus HgCdTe photodiodes [C]. SPIE, 2019, 11151:1115114.
- [55] REIBEL Y, TAALAT R, BRUNNER A, et al. Infrared SWAP detectors: pushing the limits[C]. SPIE, 2015, 9451: 945110.
- [56] WU D H, DEHZANGI A, ZHANG Y Y, et al. Demonstration of long wavelength infrared type-II InAs/InAs $_{1-x}$ Sb $_x$  superlattices photodiodes on GaSb substrate grown by metalorganic chemical vapor deposition [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(24):241103.
- [57] WU D, DURLIN Q, DEHZANGI A, et al. High quantum efficiency mid-wavelength infrared type-II InAs/InAs $_{1-x}$ Sb $_x$  superlattice photodiodes grown by metal-organic chemical vapor deposition[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(1): 011104.
- [58] AYTAC Y, OLSON B V, KIM J K, et al. Evidence of a shockley-read-hall defect state independent of band-edge energy in InAs / In ( As, Sb ) type-II superlattices[J]. Physical Review Applied, 2016, 5(5):054016.
- [59] PRINS A D, LEWIS M K, BUSHELL Z L, et al. Evidence for a defect level above the conduction band edge of InAs/ InAsSb type-II superlattices for applications in efficient infrared photodetectors[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106 (17): 171111.
- [60] WU D, LI J, DEHZANGI A, et al. Mid-wavelength infrared high operating temperature pBn photodetectors based on type-II InAs/InAsSb superlattice[J]. AIP Advances, 2020, 10(2):025018.
- [61] ZHANG Y, DENG G, CHEN D, et al. High operating temperature pBn barrier mid-wavelength infrared photodetectors and focal plane array based on InAs/InAsSb strained layer superlattices[J]. Optics Express, 2020, 28(12):17611-17619.
- [62] LV Yanqiu, LU Xing, LU Zhengxiong, et al. Review of antimonide infrared detector development at home and abroad [J]. Aero Weaponry, 2020, 27(5):1-12.  
吕衍秋, 鲁星, 鲁正雄, 等. 碲化物红外探测器国内外发展综述[J]. 航空兵器, 2020, 27(5):1-12.
- [63] GUNAPALA S D, BANDARA S V, LIU J K, et al. Quantum well infrared photodetector technology and applications [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2014, 20(6):154-165.
- [64] PHILLIPS J, KAMATH K, BHATTACHARYA P. Far-infrared photoconductivity in self-organized InAs quantum dots [J]. Applied Physics Letters, 1998, 72(16):2020-2022.
- [65] JIA Yanan, XU Bo, WANG Zhanguo. Research progresses on quantum dot infrared photodetectors[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(3):314-320.  
贾亚楠, 徐波, 王占国. 量子点红外探测器的研究进展[J]. 半导体光电, 2012, 33(3):314-320.
- [66] ROGALSKI A, ANTOSZEWSKI J, FARAONE L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 105(9):091101.
- [67] RYZHII V. The theory of quantum-dot infrared phototransistors[J]. Semiconductor Science & Technology, 1996, 11 (5):759.
- [68] BAO S Y, WANG Y, LINA K, et al. A review of silicon-based wafer bonding processes, an approach to realize the monolithic integration of Si-CMOS and III - V-on-Si wafers[J]. Journal of Semiconductors, 2021, 42(2):023106.
- [69] BOWERS J E, BOVINGTON J T, LIU A Y, et al. A path to 300 mm hybrid silicon photonic integrated circuits[C]. IEEE, 2014, 1:1-3.
- [70] REN A, YUAN L M, XU H, et al. Recent progress of III - V quantum dot infrared photodetectors on silicon[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2019, 46(7): 14441-14453.
- [71] ROGALSKI A, MARTYNIUK P, KOPYTKO M. InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: future prospect [J]. Applied Physics Reviews, 2017, 4(3):031304.
- [72] DI L, GUNTHER R, ROEL B, et al. Hybrid integrated platforms for silicon photonics[J]. Materials, 2010, 3(3):1782.
- [73] YOSHIKAWA H, ARAKAWA Y, IWAMOTO S, et al. InAs/GaAs quantum dot infrared photodetectors on on-axis Si (100) substrates[J]. Electronics Letters, 2018, 54(24):1395-1397.
- [74] GEORGE I, BECAGLI F, LIU H Y, et al. Dislocation filters in GaAs on Si [J]. Semiconductor Science and Technology, 2015, 30(11):114004.
- [75] BEANLAND R, SÁNCHEZ A M, CHILDS D, et al. Structural analysis of life tested 1.3  $\mu\text{m}$  quantum dot lasers[J].

- Journal of Applied Physics, 2008, 103(1):014913.
- [76] STIFF-ROBERTS A D. Quantum-dot infrared photodetectors: a review[J]. SPIE Reviews, 2009, 1(1):031607.
- [77] PAWEL M, EPIMITHEAS G, JORICK M, et al. Thin-film quantum dot photodiode for monolithic infrared image sensors[J]. Sensors, 2017, 17(12):2867.
- [78] HAFIZ S B, SCIMECA M, SAHU A, et al. Colloidal quantum dots for thermal infrared sensing and imaging[J]. Nano Convergence, 2019, 6(1): 1-22.
- [79] IMEC develops infrared thin-film sensor with 'record' pixel density[EB/OL].[2019-10-23]. <https://optics.org/news/10/10/38>.
- [80] YE K H, ZHANG W, OEHME M, et al. Absorption coefficients of GeSn extracted from PIN photodetector response[J]. Solid-State Electronics, 2015, 110:71.
- [81] SU S J, CHENG B W, XUE C L, et al. GeSn p-i-n photodetector for all telecommunication bands detection[J]. Optics Express, 2011, 19(7):6400.
- [82] CHEN R, LIN H, HUO Y J, et al. Increased photoluminescence of strain-reduced, high-Sn composition  $\text{Ge}_{1-x}\text{Sn}_x$  alloys grown by molecular beam epitaxy[J]. Applied Physics Letter 2011, 99:181125.
- [83] LUAN H, LIM D R, LEE K K, et al. High-quality Ge epilayers on Si with low threading-dislocation densities[J]. Applied Physics Letter, 1999, 75: 2909.
- [84] ZHAO Y, WANG N, YU K, et al. High performance silicon-based GeSn p-i-n photodetectors for short-wave infrared application[J]. Chinese Physics B, 2019, 28(12): 128501.
- [85] LEONHARDT D, HAN S M, Dislocation reduction in heteroepitaxial Ge on Si using  $\text{SiO}_2$  lined etch pits and epitaxial lateral overgrowth[J]. Applied Physics Letter, 2011, 99:111911.
- [86] WEGSCHEIDER W, OLAJOS J, MENCZIGAR U, et al. Fabrication and properties of epitaxially stabilized Ge/ $\alpha$ -Sn heterostructures on Ge(001) [J]. Journal of Crystal Growth, 1992, 123: 75.
- [87] TRAN H, PHAM T, MARGETIS J, et al. Si-Based GeSn Photodetectors toward Mid-Infrared Imaging Applications [J]. ACS Photonics, 2019, 6(11):2807-2815.
- [88] ZHANG D L, LIU Z, ZHANG D L, et al. Sn-guided defect-free GeSn lateral growth on Si by molecular beam epitaxy [J]. Journal of Physical Chemistry C, 2015, 119:17842-17847.