

〈综述与评论〉

第三代红外探测器的发展与选择

史衍丽^{1,2}

(1.昆明物理研究所, 云南 昆明 650023; 2.微光夜视技术重点实验室, 陕西 西安 710065)

摘要: 随着军事应用对高性能、低成本红外技术的需求, 红外探测器像元数目从少于100元的一代发展到10万元中等规模的二代, 到百万像素的三代, 何谓第三代? 在众多的材料和器件中, 可作为第三代红外探测器的材料以及器件有哪些? 在红外探测器技术飞速发展的今天, 我们该作如何的选择? 结合以上问题, 对当前国际上作为第三代红外探测器选择的碲镉汞、量子阱以及II类超晶格探测器材料、器件进行了分析, 总结了第三代红外探测器的特征, 为国内第三代红外探测器的发展提供选择与参考。

关键词: 第三代红外探测器; 碲镉汞; 量子阱; II类超晶格

中图分类号: TN215 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2013)01-0001-08

Choice and Development of the Third-Generation Infrared Detectors

SHI Yan-li^{1,2}

(1.Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;
2.Science and Technology on Low-light-level Night Vision Laboratory, Xi'an 710065, China)

Abstract: With the requirement of military application and development of the infrared detectors toward high performance and low cost, infrared detectors continuously develop from the first generation with low density pixel number below 100 to second generation with middle number of pixel about 100 000 till to third Generation with megapixel number. What is the third generation infrared detector? How to choose the device and material as the third generation infrared detector? HgCdTe, quantum well infrared detectors and type-II superlattices infrared detectors have been thought as third generation infrared detectors in the world, the corresponding materials and devices were discussed in order to understand the characterization of the three kinds detectors, the aim is to advance the development of our third generation infrared technology.

Key words: third generation infrared detectors, HgCdTe, QWIPs, type- II superlattices

0 引言

红外探测器技术是红外技术的核心, 红外探测器的发展引领也制约着红外技术的发展。红外探测器的发展起源于1800年英国天文学家威廉·赫胥尔对红外线的发现, 随后出现了热电偶、热电堆、测热辐射计等热电、热探测器。1917年美国人Case研制出第一支硫化铊光电导红外探测器, 19世纪30年代末, 德国人研制出硫化铅(PbS)光电导型红外探测器, 红外探测器的发展历程如图1所示^[1]。二次世界大战加速了红外探测器的发展, 使人们认识到红外探测器在

军事应用中的价值。二次世界大战后半导体技术的发展进一步推动了红外技术的发展, 先后出现了PbTe、InSb、HgCdTe、Si掺杂、PtSi等探测器。早期研制的红外探测器存在波长单一、量子效率低、工作温度低等问题, 大大地限制了红外探测器的应用。1959年英国Lawson发明碲镉汞红外探测器, 红外探测器的发展由此呈现出蓬勃发展的局面。碲镉汞红外探测器自发现以来一直是红外探测器技术的首选, 它在红外探测器发展历程中占有重要的地位。美国、英国、法国、德国、以色列以及中国等国家的红外研究工作者对碲镉汞红外探测器的发展投入了极大的精力, 并持续不

收稿日期: 2012-12-06

作者简介: 史衍丽(1969-), 女, 山东郓城人, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为红外探测器物理与器件研究。

基金项目: 国家自然基金重点项目, 编号: U1037602。

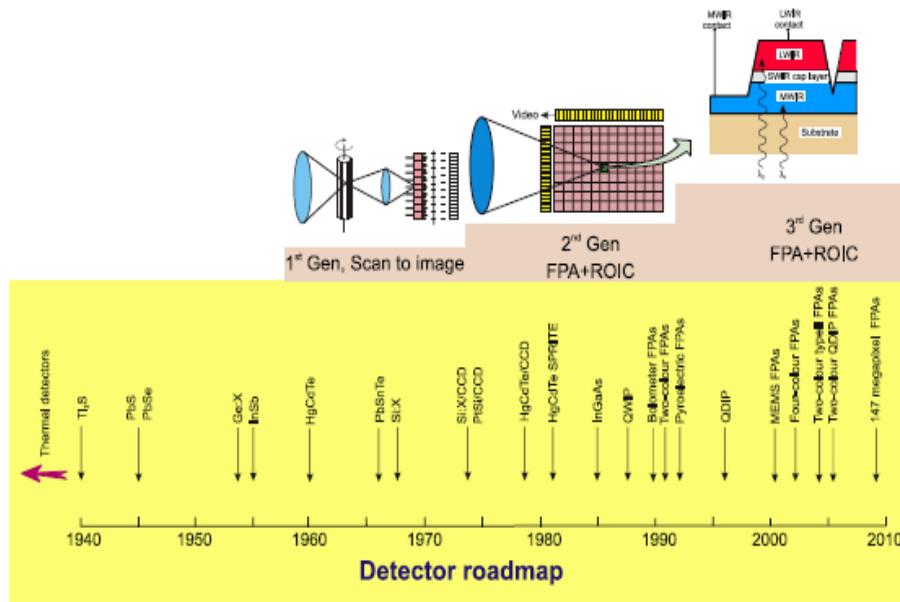


图1 红外探测器的发展历程

断地进行研究和改进；同时，碲镉汞材料与器件存在的不足也不断激发研究者对红外新材料和新器件技术发展的热潮。碲镉汞红外探测器几乎成为一个标准，每种新材料和新器件技术的出现与存在，首先是要与碲镉汞进行比较，并在某方面具备明显的优势。低维量子阱红外探测器技术、II类超晶格红外探测器技术的发展就是最好的实例。由于材料设计的灵活性，材料生长和器件制备技术的成熟性，这两类材料克服了大面积碲镉汞材料和器件技术上存在的不均匀性及稳定性问题，在短短20多年的发展中获得了广泛的应用，在国际上被认为是与碲镉汞并存的三代红外探测器技术。

何谓第三代红外探测器技术，目前国际上并没有一个非常明确的定义。波兰Rogalski分析总结了当前对红外探测器发展的需求，提出了第三代红外探测器包含的3部分内容，具体如下^[1]：

- 1) 高性能、高分辨力具有多波段探测的制冷焦平面；
- 2) 中等性能或高性能的非制冷焦平面；
- 3) 成本非常低的非制冷焦平面。

以上3项内容其实质体现了对探测器高性能、低成本的要求。高性能的具体要求是：大面积，像元为100万以上；另外，在 $F^{\#}=2$ 的条件下，三代红外探测器性能（典型值为噪声等效温差）比二代红外探测器高一个量级；双色和多色探测是三代红外探测器的一个显著特征，主要是为了提高对复杂背景或伪装目标的识别率。低成本的要求一直是红外探测器的一个主要发展内容，在二代红外探测器的发展基础上，通过改进器件技术、提高工作温度等方法将进一步降低

Fig.1 Roadmap of infrared detectors

制造成本，达到可作为耗用品使用的成本。以上3项内容为“或”的关系，只要满足了一条就能称为第三代红外探测器技术。理由很简单，由于在不同的条件下，应用需求各有不同、各有侧重，需要的探测器功能和种类也就不同。目前不同的国家对第三代红外探测器的选择主要是出于自身的发展与应用需求，对材料和器件技术进行有选择的发展，最终目的是为了实现高性能、低成本的红外探测器^[1-3]。

在第三代红外探测器中单色探测器主要有大面积InSb中波红外探测器、InGaAs近红外探测器以及非制冷红外探测器。InSb红外探测器用于中波3~5 μm ，具有量子效率高、可靠性好、均匀性好的优势，目前最大的探测器规格已达到 $2\text{k} \times 2\text{k}$ ^[4]。存在的主要问题是波长不可调，器件工作温度低，在77K工作。InGaAs近红外探测器工作波段为0.9~1.7 μm ，作为波长扩展，长波方向可达到2.6 μm ，短波方向延伸到可见光，其探测器规格也达到 $1\text{k} \times 1\text{k}$ ^[5-7]。InGaAs近红外探测器量子效率高，器件性能好，室温下探测率达到 $10^{14}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。存在的问题是与InSb探测器类似，InGaAs近红外探测器覆盖的工作波段仅限于近红外波段，不能跨越到中波和长波，只能作为大面积单色器件，目前已获得了大量、广泛的应用^[5,7]。非制冷红外探测器作为第三代低成本红外探测器的选择，主要有氧化钒、非晶硅非制冷红外探测器，在成本、体积、重量及应用的便利性、可靠性等方面具有明显的优势。随着非制冷红外探测器物理、材料和器件技术的不断提高，其器件性能不断提高，目前报道的实用化探测器的最好水平是：在像元中心距离为17 μm 的条件下，其噪声等效温差已经达到30mK，国

际上还在进行进一步缩小中心距离的研发工作。在美国期望的成本目标是对于小型 640×480 氧化钒非制冷探测器热像仪, 系统成本不高于 500 美元。

双色或多色红外探测器通过同时提取目标光谱信息和温度信息, 降低误警率, 提高识别率。在第三代红外探测器中双色和多色红外探测器目前只有碲镉汞、量子阱和 II 类超晶格红外探测器, 前者通过调节组分, 后两者通过调节组分、厚度或应变实现双色或多色红外探测, 这三者同时也能实现高性能大面积的红外探测器, 故在国际上被公认为第三代红外探测器的候选^[1-3]。三种红外探测器实现红外吸收的物理机制不同, 导致三种器件的性能各具优缺点, 其应用领域也各有不同。文章主要结合碲镉汞、量子阱和 II 类超晶格红外探测器的能带结构、材料生长、器件性能以及应用进行讨论, 以深入地理解这三种红外探测器存在的优缺点, 为第三代红外探测器的发展、选择以及应用提供参考。

1 三种主要的三代红外探测器

在半导体物理学中, 从外来光子引起的载流子跃迁方式来看, 碲镉汞、量子阱和 II 类超晶格红外探测器分别属于带间跃迁、子带间跃迁以及微带间跃迁, 其示意图分别如图 2 中的(a)、(b)、(c)所示。不同的跃迁方式决定了其材料主要的属性——量子效率大小。另外, 这三类材料构成元素间的互作用不同, 导致了材料的均匀性、稳定性和牢固性不同, 以及在器件性能方面显著的差异。

1.1 碲镉汞红外探测器

碲镉汞红外探测器属于直接带隙半导体材料, 吸收外来光子产生的电子跃迁为带间跃迁, 即电子从价带跃迁到导带, 这种跃迁方式的优点是材料光吸收大, 量子效率高, 高达 70%~80%, 器件光响应大、响应率高。其次, 碲镉汞材料通过调节 Cd 组分的数值大小, 碲镉汞材料的禁带宽度随之变化, 从 HgTe

半金属变到禁带宽度约 1.5 eV 的 CdTe 半导体, 对应的响应波长连续可调, 如图 3 所示, 图中给出了碲镉汞在 Γ 点的禁带宽度以及截止波长随 Cd 组分的变化关系^[1]。另外, 碲镉汞材料电子有效质量小, 迁移率高, 响应速度快, 可作高频器件。碲镉汞材料具有的以上优点使之成为一种最重要的红外探测器材料。相对优点而言, 其缺点也是非常明显的。碲镉汞是一种主要由离子键结合的三元半导体材料, 碲和镉、碲和汞之间通过离子键的方式连接, 其互作用力小。构成元素汞非常不稳定, 容易从碲镉汞材料中逸出从而造成材料的缺陷、材料的不均匀以及器件性能的不均匀, 这是碲镉汞材料固有的问题, 在长波应用时尤其突出。因为在长波领域由于组分变化导致的器件响应波长变化更大。如图 4 所示, 对于截止波长为 $15 \mu\text{m}$ 的探测器, 其组分变化 $\Delta x=0.002$, 截止波长变化约 $0.56 \mu\text{m}$; 而对于截止波长为 $7 \mu\text{m}$ 的中波红外探测器, 其组分变化 $\Delta x=0.002$, 截止波长仅变化约 $0.12 \mu\text{m}$, 两者变化速率接近 5 倍。随着器件响应波长的变化, 器件暗电流也随之发生较大的变化^[8-9]。由此可见, 对长波探测器而言, 由于碲镉汞组分的不均匀导致的器件性能不均匀性更严重。另外, 对于碲镉汞长波探测器, 其禁带宽度变小, 带间隧穿电流大, 暗电流大, 器件性能恶化。为了获得好的器件性能, 对材料生长质量以及器件工艺要求更加严格, 导致成品率低, 器件成本更高。

碲镉汞红外探测器存在的另外一个主要问题是碲镉汞薄膜材料生长的外延衬底问题, 与碲镉汞晶格匹配的衬底是碲锌镉衬底, 但目前市售的碲锌镉衬底最大直径大约为 $\phi 90 \text{ mm}$, 而且成本昂贵。欲获得更大尺寸的衬底和碲镉汞材料, 必须考虑替代衬底以及晶格不匹配带来的质量问题, 对于长波红外探测器而言, 替代衬底上生长的长波碲镉汞材料质量仍然需要进一步改进和提高。

综合碲镉汞的优点和缺点可见, 实现高性能、低

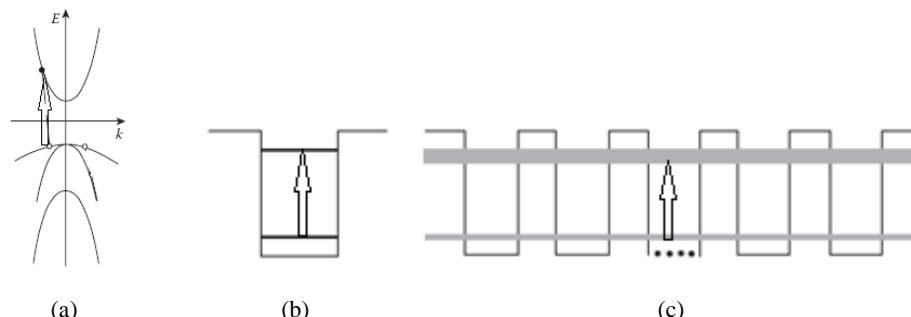


图 2 (a) 碲镉汞带间跃迁, (b) 量子阱子带间跃迁, (c) 超晶格形成的微带间跃迁的示意图

Fig.2 (a) Illustration of electron transition from valence band to conductance band in MCT, (b) Transition between bound states in a QWIP, (c) Transition between minibands in a superlattice

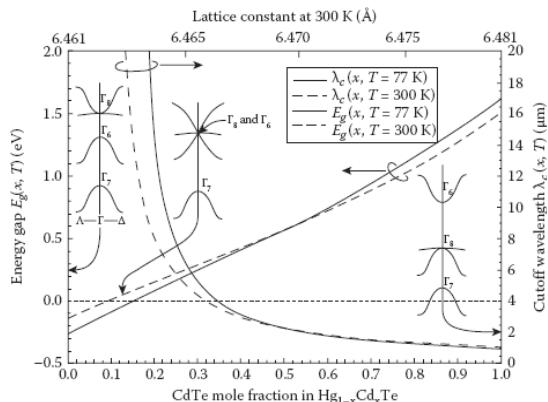


图3 碲镉汞在 Γ 点的禁带宽度以及截止波长随Cd组分的变化关系

Fig.3 Bandgap and cutoff wavelength of HgCdTe vary with Cd composition at Γ point

成本的碲镉汞长波红外探测器技术难度非常大,尤其在国内,比较现实的发展及应用是中波和短波碲镉汞红外探测器。

1.2 量子阱红外探测器

量子阱红外探测器的名称来源于其构成材料在能带结构上构成电子或空穴势阱,外来光子引起的电子或空穴跃迁属于子带间跃迁,在外加电场的作用下光生载流子被收集形成光电流,其工作原理见图5。

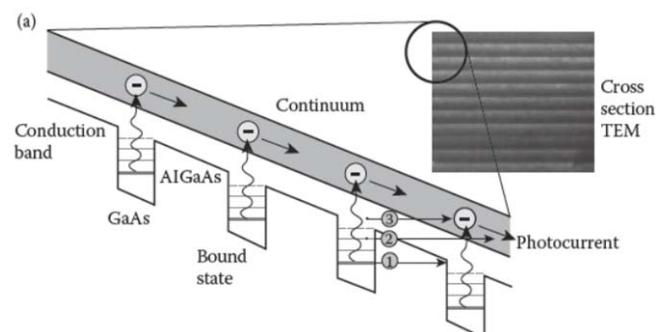


图5 量子阱红外探测器工作原理示意图

Fig.5 Schematic figure of the QWIPs working mechanism under bias

目前已经获得稳定生产并广泛应用的量子阱红外探测器主要是GaAs/AlGaAs量子阱红外探测器。GaAs/AlGaAs量子阱红外探测器基于成熟的III-V族材料生长技术和器件工艺技术,通过分子束外延(MBE)或有机化学汽相沉积(MOCVD)薄膜材料生长系统进行材料生长,采用GaAs衬底,没有晶格不匹配问题,衬底尺寸目前可以达到6英寸(150mm),可生长大面积、均匀性好的量子阱材料;构成元素Ga、As与Al、As之间是共价键结合,互作用力大,材料牢固稳定,可耐受天基高能离子辐射,适于制备天基红外探测器。通过改变材料组分、厚度可方便地调节势阱内的能级位置,器件响应波长从中波

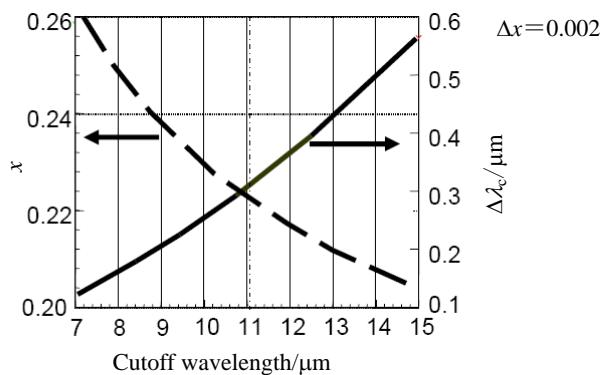


图4 碲镉汞组分变化0.002时截止波长的变化

Fig.4 Cutoff wavelength of HgCdTe vary with Cd composition varing 0.002

3μm到甚长波30μm连续可调,按照理论计算,量子阱探测器能够响应长至200多微米的太赫兹波段^[10]。量子阱红外探测器工艺成熟,大面积器件性能均匀、稳定,适于产业化^[3,11-13]。

与碲镉汞长波红外探测器相比,量子阱长波红外探测器突出的优势就是大面积量子阱材料均匀性好,制备的长波红外探测器均匀性好、成品率高、可靠性好,经过后续读出电路简单的处理,即能获得非常均匀的成像画面,目前已制备出1k×1k的长波、中波红外探测器以及1k×1k中长波双色焦平面探测器^[13],其中1k×1k的长波量子阱焦平面探测器已经有市售产品。国内的研究团队采用长波量子阱材料在较短时间内也研制出具有较好性能的320×256量子阱焦平面探测器,并获得了较好的成像效果^[11],图6给出了在晚上10点对1km、6.8km处建筑物的成像效果,图像没有经过任何增强处理,6.8km处的高塔及建筑物细节仍清晰可见,充分体现了量子阱探测器优越的产业化优势。量子阱红外探测器的另外一个优势在于便于制备双色或多色大面积红外探测器,通过生长材料时调节材料组分、厚度,可依次生长不同波段的红外探测器材料实现双色或多色探测。目前世界上最多的多色探测就是采用量子阱材料,实现了四色探测,面阵规模达到640×512^[14],获得了比较好的成像效果,如图7所示。

量子阱红外探测器存在的不足之处来源于量子阱红外探测器的工作方式,因为是子带间跃迁,导带基态的载流子完全靠外部掺杂提供,通常其数量级最多为10¹⁸~10¹⁹cm⁻³,与价带提供的电子相比,数量级差3~4个量级。另外,由于跃迁矩阵元的选择定则,只有平行于表面的入射光才能被量子阱材料吸收,以上两个原因导致了量子阱红外探测器量子效率

低, 约为 8%, 远远小于碲镉汞材料, 因此在相同的积分时间和光学系统条件下, 量子阱长波红外探测器性能比碲镉汞长波红外探测器低^[12]。为了提高其性能, 只有通过延长积分时间, 牺牲响应时间, 所以量子阱长波红外探测器可以广泛地应用到响应不要求很快的场合。量子阱红外探测器存在的另外一个问题是, 为了降低暗电流获得较好的器件性能, 量子阱红外探测器通常在较低的温度下工作, 工作温度一般在 65~73 K 范围, 导致的问题是提高了制冷要求, 相应地增加了系统的功耗、降低了制冷机的寿命。

1.3 II类超晶格红外探测器

从物理上分析, II类超晶格红外探测器的出现正好克服了碲镉汞和量子阱红外探测器存在的问题, 同时具备两者的优势, 即具有超越碲镉汞的性能和量子阱红外探测器的产业化优势, 成为被国际上看好的第三代红外探测器的最佳选择之一^[1,8-9,15-16]。II类超晶格红外探测器是一种低维材料体系, 采用类似量子阱红外探测器材料的生长方法进行超晶格材料生长, 不同之处在于超晶格的势阱和势垒层都非常薄, 约为几个单分子层厚度 (对于中波探测材料, 约 2~3 nm), 势阱中的电子通过势垒隧穿形成微带, 外来入射光子产生的跃迁在微带之间完成, 通过调节组分、厚度以

及界面的应变可调节微带的位置, 从而达到调节类似材料“禁带宽度”的效果。理论计算结果显示 II类超晶格具有从短波到甚长波的红外探测能力, 另外, 还可以用于太赫兹探测^[17-18]。II类超晶格红外探测器的能带结构奇特, 其空穴势阱位置高于电子势阱, 电子和空穴分别被限制在不同的材料层, 这种非常特殊的能带结构被称之为 II类能带结构, 如图 8(a)所示; 与此不同的量子阱能带结构称之为 I类能带结构 (其电子势阱和空穴势阱位于同一材料层), 如图 8(b)所示。II类超晶格能带结构形成的结果就是无需外界电注入即实现了载流子反转; 另外, 电子和空穴之间的复合大大降低, 这种材料特性对于制备中、长波红外激光器是非常有利的, 同时可望制备“发光-光接收”或“光接收-发光”单片集成光电器件。

与碲镉汞材料相比, II类超晶格材料的优势体现在以下几方面: 第一, II类超晶格材料的电子有效质量大, 在长波范围约为碲镉汞的 3 倍, 尤其在甚长波, 随着波长增长, 碲镉汞的电子有效质量变小, 而 II类超晶格材料的电子有效质量却不变。由此决定了 II类超晶格探测器带间隧穿电流小, 器件暗电流小。第二, 通过应变对能带结构的调节作用, 能有效降低俄歇复

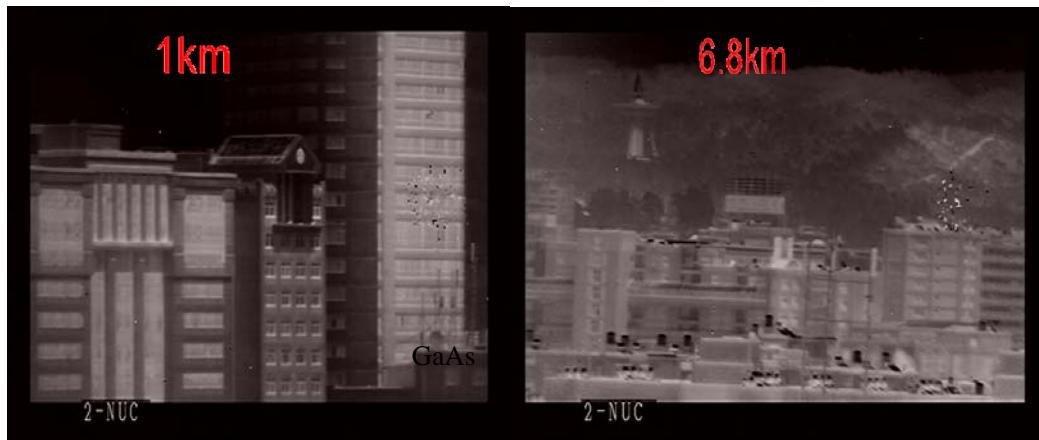


图 6 国内研制的量子阱焦平面探测器成像效果: (a) 1 km, (b) 6.8 km

Fig.6 Imagery taken by QWIPs made in Kunming Institute of Physics: (a) 1 km, (b) 6.8 km

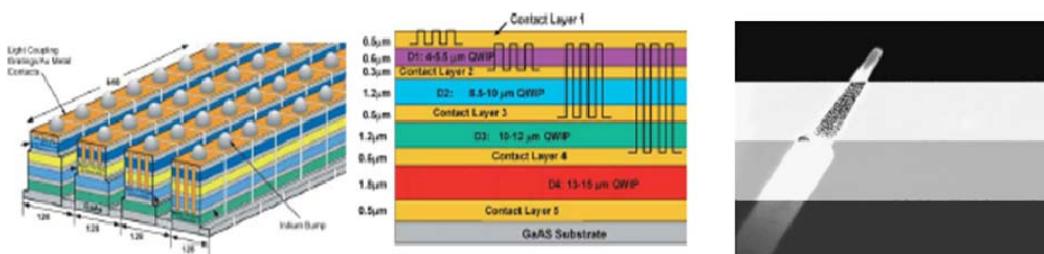


图 7 640×512 四色量子阱红外探测器器件和材料结构示意图, 以及电烙铁在 4 个波段的成像效果

Fig.7 Schematic illustration of device and material structure 640×512 QWIP with four color detecting and imagery of hot iron in four color

合, 提高载流子有效寿命, 提高器件性能。图9显示了在相同的响应波长以及掺杂条件下, 与碲镉汞材料相比, 由于重轻空穴分离, II类超晶格材料的俄歇复合降低。以上两个因素导致在长波以及甚长波范围II类超晶格红外探测器能够实现更高的器件性能和工作温度。理论计算结果显示在相同截止波长条件下II类超晶格探测器的性能超越碲镉汞红外探测器, 如果保持相同的性能, II类超晶格长波红外探测器将比碲镉汞长波红外探测器提高30°C的工作温度, II类超晶格中波红外探测器比碲镉汞中波红外探测器将提高10°C的工作温度^[9]。如图10所示, 图中长波II类超晶格红外探测器的器件性能已经明显超过碲镉汞长波红外探测器的性能, 这是目前确定的唯一能超越碲镉汞红外探测器器件性能的探测器。图中同时也给出了德国IAF、美国西北大学、美国海军实验室、TSI等

报道的探测率实际测试结果, 在截止波长9 μm处、温度78 K下探测率平均值大于 $1 \times 10^{11} \text{ cmHz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$ 。实测结果与理论计算值相比, 有1~2个量级的差异, 说明目前II类超晶格红外探测器在材料设计、材料生长及器件工艺等方面还有待进一步完善, 器件性能还有进一步提升的空间^[8]。第三, 基于III-V族材料生长方式, 采用先进的MBE薄膜材料生长系统进行材料生长, 衬底采用晶格匹配的GaSb衬底, 能够生长大面积均匀性好的II类超晶格红外探测器材料, 包括长波红外探测材料; 第四, II类超晶格材料构成元素之间化学键强, 材料稳定性好, 对工艺的要求大大降低, 器件产业化优势明显, 成本可望大大低于碲镉汞红外探测器。另外, 美国、中国也在尝试在GaAs衬底上进行II类超晶格材料的生长, 以进一步降低成本^[19]。

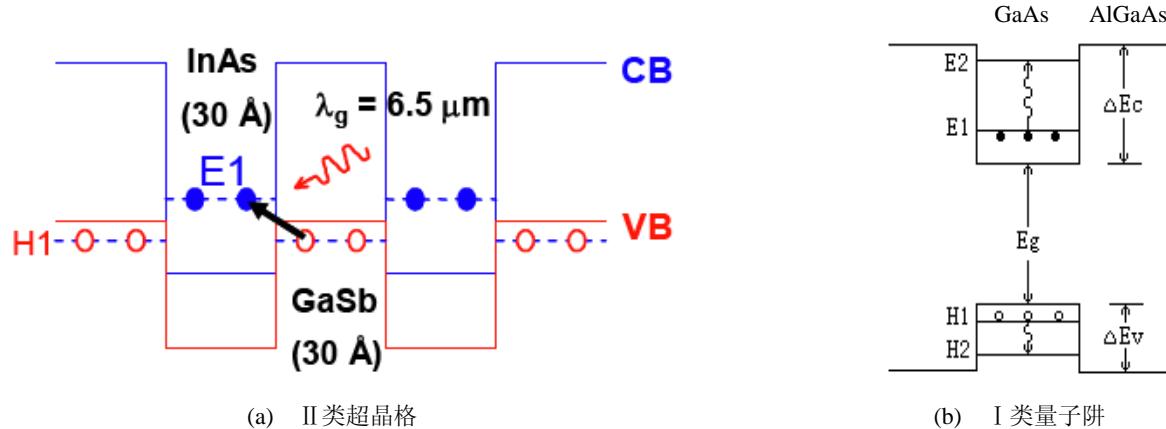


图8 I类量子阱和II类超晶格的能带结构

Fig.8 Energy structure of type I for QWIP and Type II for InAs/GaSb superlattices

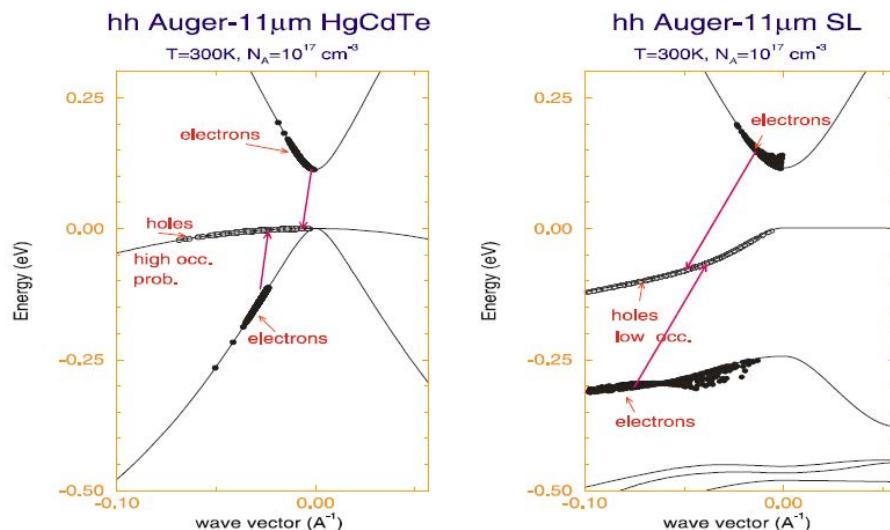


图9 碲镉汞和II类超晶格材料俄歇复合示意图

Fig.9 Auger recombination of HgCdTe and type-II superlattice material

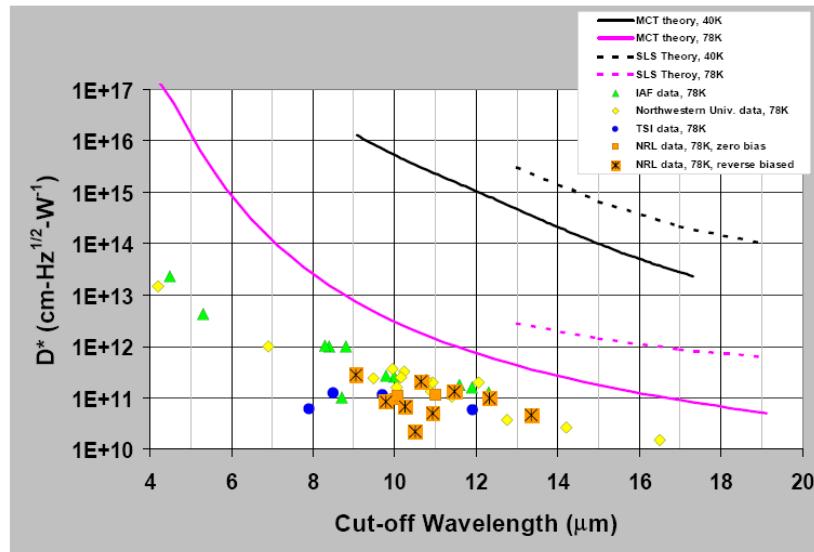


图 10 理论计算的碲镉汞和 II 类超晶格性能比较

Fig.10 Comparison of the calculated performance result of HgCdTe and Type-II superlattices

在实际的器件研制方面,2011年美国西北大学和美国空军实验室成功研制出 $1\text{ k}\times 1\text{ k}$ 截止波长 $11\text{ }\mu\text{m}$ 的II类超晶格长波焦平面探测器^[20],在 $F^{\#}=4$ 、积分时间 0.13 ms 、 81 K 的工作温度下 $\text{NETD}=23.6\text{ mK}$, $10\text{ }\mu\text{m}$ 附近量子效率大于40%,对人体的成像效果如图11所示。在甚长波方面报道了截止波长为 $19\text{ }\mu\text{m}$ 及 $32\text{ }\mu\text{m}$ 的II类超晶格红外探测器^[21],在 50 K 及 32 K 的工作温度下两个探测器的探测率分别达到 $3.71\times 10^{10}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 、 $1.05\times 10^{10}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。在中波探测方面,已报道截止波长为 $3.7\text{ }\mu\text{m}$ 的II类超晶格红外探测器,在 80 K 的工作温度下探测率达到 $8\times 10^{13}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ ^[22]。国内昆明物理研究所也研制出截止波长为 $4.5\text{ }\mu\text{m}$ II类超晶格红外探测器在 77 K 的工作温度下探测率达到 $4.7\times 10^{12}\text{ cmHz}^{1/2}\text{W}^{-1}$ 。以上研制结果充分体现了II类超晶格红外探测器在中波、长波以及甚长波探测具备的高性能和高温工作的技术优势。

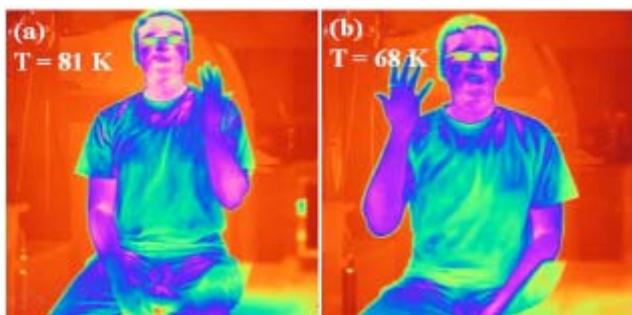


图 11 $1\text{ k}\times 1\text{ k}$ 截止波长 $11\text{ }\mu\text{m}$ 的II类超晶格红外探测器在 81 K 和 68 K 的成像效果

Fig.11 Imagery of $1\text{ k}\times 1\text{ k}$ type-II superlattices infrared detectors with cutoff wavelength 11 micron at 81 K and 68 K

与量子阱红外探测器相比,II类超晶格探测器的优势在于通过类似于带间吸收的光学吸收机制,II类超晶格材料可获得高的量子效率,目前报道的量子效率最高可达到81%^[20];另外,能够吸收垂直材料表面的入射光,在器件工艺上不需要制备光栅。器件隧穿电流小,器件暗电流小,可在高温工作。

在理论和实验两方面,II类超晶格都显示了其优越的器件性能,作为新一代光电材料和器件,具有巨大的发展潜力和应用前景。

2 结语

对第三代红外探测器的发展与选择直接关系到未来战场上的武器装备水平与精确打击能力的较量,欲做到比敌方看得清,看得远,先发制人不被打,唯一的选择就是尽快发展高性能第三代红外探测器。碲镉汞、量子阱和II类超晶格红外探测器作为国际上已经认可的第三代红外探测器,在器件物理和器件性能方面各具特色,在应用方面也将形成互为补充的支撑关系。在人们特别关注的长波领域,量子阱红外探测器具有明显的产业化优势,可望在国内率先实现长波大面阵的实用化,满足国内对长波大面阵红外探测器的应用需求。在此基础上还可以尽快实现量子阱中长波双色红外探测器的实用化。长波碲镉汞材料和器件方面存在的均匀性问题制约着其在大面阵高性能长波红外探测器的发展,可考虑其在高性能大面阵中波、短波红外探测器方面发展并尽快实现产业化。II类超晶格红外探测器作为一种新型光电材料和器件,德国在2005年已经实现了中波双色的产品化和应用,

在长波大面阵红外探测器以及甚长波探测方面也显示了优越的器件性能和产业化前景，可以相信，Ⅱ类超晶格红外探测器的发展对于高性能、低成本的红外技术应用将具有更加重要的作用。

参考文献：

- [1] Rogalski A. New material systems for third generation infrared detectors[C]//Proc. of SPIE, 2009, **7388**: 1-12.
- [2] Cabanski W. 3rd Gen focal plane array IR detection modules and applications[C]//Proc. of SPIE, 2004, **5406**: 184-192.
- [3] Gabby Sarusi, QWIP or other alternative for third generation infrared systems[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, **44**: 439-444.
- [4] Hoffman A W, Corrales E, Lovea P J et al. 2 k×2 k InSb for astronomy [C]//Proc. of SPIE, *Optical and Infrared Detectors for Astronomy*, 2004, **5499**: 59-67
- [5] Hoelter T R, Barton J B. Extended short wavelength spectral response from InGaAs focal plane array[C]//Proceeding of SPIE, *Infrared Technology and Application XXIX*, 2003, **5074**: 481-490.
- [6] Coben M J, Olsen G H. Room temperature InGaAs camera for NIR imaging[C]//Proceeding of SPIE, *Infrared detectors and Instrumentation*, 1993, **1946**: 436-443.
- [7] Alan Hoffman, Todd Sessler, Joseph Rosbeck, et al. Megapixel InGaAs arrays for low background applications[C]//Proc. of SPIE, *Infrared Technology and Applications XXXI*, 2005, **5783**: 32-38.
- [8] Jagmohan Bajaj, Manijeh Razeghi. Comparison of type-Ⅱ superlattice and HgCdTe infrared detector technologies[C]//Proc. of SPIE, 2007, **6542**, 65420B.
- [9] Meimei Z Tidrow, Zheng Lucy, Hank Barcikowski, et al. Recent success on SLS FPAs and MDA's new direction for development[C]//Proc. of SPIE, 2009, **7298**: 72981O.
- [10] Liu H C, Song C Y, SpringThorpe A J, et al. Terahertz quantum-well photodetector[J]. *Applied Physics Letters*, 2004, **84**(20):4068-4070.
- [11] Shi Y L. Development and application of large format QWIP FPA[C]//SPIE, 2009, **7383**: 1-11.
- [12] 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.
- [13] Gunapala S D, Bandara S V, Liu J K, et al. 1024×1024 pixel MWIR and LWIR QWIP focal plane arrays and 320x256 MWIR:LWIR pixel colocated simultaneous dualband QWIP focal plane arrays[C]//Proc. of SPIE, 2005, **5783**: 789-803
- [14] Bandara S V, Gunapala S D, Liu J K, et al. Four-band quantum well infrared photodetector array[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2003, **44**: 369-375.
- [15] Martin Walther, et al. InAs/GaSb type-Ⅱ short-period superlattices for advanced single and dual-color focal plane arrays[C]//Proc. of SPIE, 2007, **6542**: 654206.
- [16] 史衍丽. 锡基Ⅱ类超晶格红外探测器—第三代红外探测器的最佳选择[J]. 红外技术, 2011, **33**(11): 621-624.
- [17] Li L L, Xu W, Zeng Z, et al. Terahertz band-gap and optical absorption in InAs/GaSb type Ⅱ superlattices[J]. *Terahertz Science and Technology* 2008(1): 216-229.
- [18] Li L L, Xu W, Zeng Z, et al. Terahertz band-gap in InAs/GaSb type Ⅱ superlattices[J]. *Microelectronics Journal*, 2009, **40**: 812-814.
- [19] Razeghi M, Huang E K W, Nguyen B M, et al. Type-Ⅱ antimonide-based superlattices for the third generation infrared focal plane arrays[C]//Proc. of SPIE, *Infrared Technology and Applications XXXVI*, 2010, **7660**: 76601F
- [20] Paritosh Manurkar, Shaban Ramezani-Darvish, Binh-Minh Nguyen, et al. High performance long wavelength infrared mega-pixel focal plane array based on type-Ⅱ superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(19): 193505-1-13.
- [21] Razeghi M, Wei Y, Gin A, et al. High performance Type Ⅱ InAs/GaSb superlattices for mid, long, and very long wavelength infrared focal plane arrays[C]//Proc. of SPIE, *Infrared Technology and Applications XXXI*, 2005, **5783**: 86-97.
- [22] Hill C J, Li J V, Mumolo J M, et al. MBE grown type-Ⅱ superlattice photodiodes for MWIR and LWIR imaging applications[C]//Proc. of SPIE, *Infrared Technology and Applications XXXIII*, 2007, **6542**: 654205.