

文章编号: 1672-8785(2025)12-0036-11

锑化物超晶格红外探测技术的突破与发展

陈建新^{1,2} 周 易^{1,2} 徐志成^{1,2} 白治中^{1,2}

黄 敏^{1,2} 丁瑞军^{1,2} 何 力^{1,2}

(1. 红外探测全国重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083)

摘 要: 锑化物超晶格红外探测器具有均匀性好、暗电流低和量子效率高等优点, 又基于其能带灵活可调的特点, 可以覆盖 3~30 μm 范围的探测波长, 是实现高性能短波、中波、长波以及双色红外探测器的优选技术。中国科学院上海技术物理研究所自“十一五”布局发展超晶格红外焦平面技术, 十多年来在超晶格能带结构设计、材料外延生长、焦平面芯片制备、长波器件暗电流抑制以及超晶格工程化与产业化方面取得了体系性突破和进展。本文从锑化物超晶格的基本技术原理出发, 梳理总结了上海技术物理研究所在超晶格红外探测器方面的研究进展, 并对后续发展趋势作了初步探讨。

关键词: 红外探测器; 超晶格; 锑化物

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11972/j.issn.1672-8785.2025.12.004

Breakthrough and Development of Antimonide Superlattice Infrared Detection Technology

CHEN Jian-xin^{1,2}, ZHOU Yi^{1,2}, XU Zhi-cheng^{1,2}, BAI Zhi-zhong^{1,2},

HUANG Min^{1,2}, DING Rui-jun^{1,2}, HE Li^{1,2}

(1. National Key Laboratory of Infrared Detection Technologies, Shanghai 200083, China;

2. Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China)

Abstract: Antimonide superlattice infrared detectors have advantages such as good uniformity, low dark current, and high quantum efficiency. Furthermore, due to their flexible and tunable energy band structure, they can cover a detection wavelength range of 3–30 μm , making them a preferred technology for realizing high-performance short-wave, mid-wave, long-wave, and two-color infrared detectors. The Shanghai Institute of Technical Physics (SITP), Chinese Academy of Sciences, began developing superlattice infrared focal plane array technology during the 11th Five-Year Plan period. Over the past decade, SITP has achieved systematic breakthroughs and progress in superlattice energy band structure design, epitaxial growth of materials, focal plane array chip fabrication, dark current suppression in long-wave devices, and the engineering and industrialization of superlattices. Starting from the basic technical principles of antimonide superlattices, this paper sum-

收稿日期: 2025-11-06

作者简介(Biography): 陈建新(1968-), 男, 研究员, 主要从事 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器及新型红外光电器件研究。E-mail: jianxinchen@mail.sitp.ac.cn

marizes the research progress of SITP in superlattice infrared detectors and provides a preliminary discussion of future development trends.

Key words: infrared detector; superlattice; antimonide

0 引言

高性能红外探测器在军用和民用等诸多领域具有不可或缺的应用价值。自 20 世纪中叶以来,凝聚态物理、半导体材料和集成电路不断发展,有力地推动了高性能红外探测器的快速进步。在此过程中,先后发展了铅盐、InSb、HgCdTe 等多种材料体系,以及 GaAs/AlGaAs 量子阱、锑化物超晶格等低维结构红外探测技术。自 1958 年至今, HgCdTe 红外探测器经历了第一代单元、多元探测器,第二代中小型规模焦平面阵列,第三代大规模、高灵敏度、多色焦平面阵列,在航天遥感、深空探测、国防安全、资源探测、医学诊断、工业控制等方面发挥了极为重要的作用。

锑化物超晶格红外探测技术具有均匀性高、波长可调谐性、暗电流低等特点,是制备大规模长波、双色红外焦平面探测器的优选技术。1987 年,美国洛斯阿拉莫斯国家实验室的 Smith D L 和 Xerox 公司的 Mailhot C 提出了将 InAs/GaSb 超晶格用于红外探测的设想^[1]。1994 年, Yang M J 和 Bennett B R 等首次报道了 InAs/GaSb II 类超晶格红外探测器^[2]。接着,美国喷气推进实验室、海军实验室、西北大学、Hughes 实验室、雷神公司、L3 Harris 公司等先后开展了 InAs/GaSb 超晶格材料生长、器件制备与应用等方面的研究,实现了超大规模(4k×6k)中波、大规模(2k×2k)长波和中波/长波双色(1280×720)以及高工作温度(180 K)焦平面阵列,并将其应用于军事和民用等诸多领域^[3-8]。

中国科学院上海技术物理研究所(以下简称“上海技物所”)自“十一五”开始期间布局发展锑化物超晶格红外探测技术,2011 年获得了我国第一个超晶格红外焦平面探测器,

2012 年研制并报道了首个高性能中波红外探测器,2013 年首次将超晶格探测技术拓展至长波红外焦平面阵列,2015 年率先研制并报道了第一个超晶格双色红外焦平面阵列,并于 2022 年首次将超晶格长波红外焦平面阵列应用于航天工程项目。本文简要回顾上海技物所锑化物超晶格红外探测器的技术突破和发展历程,并评述锑化物薄膜和超晶格红外探测器的后续发展趋势。

1 InAs/GaSb 超晶格红外探测器的技术原理与特点

InAs ($a = 6.0584 \text{ \AA}$) 和 GaSb ($a = 6.0959 \text{ \AA}$) 的晶格常数极其相近, InAs、GaSb、AlSb 通常被称为“6.1 $\text{\AA}$ ”体系(见图 1)或锑化物半导体。当 InAs 和 GaSb 排列在一起时, InAs 导带底位于 GaSb 价带顶的下方约 160 meV 处,因此电子被限制在 InAs 层中,而空穴被限制在 GaSb 层中。由于每一层 InAs 和 GaSb 均为纳米级厚度,相邻 InAs 和 GaSb 层中的电子和空穴会因相互作用而分别在导带和价带中形成电子微带和空穴微带。当有光子入射时,激发电子从空穴微带跃迁到电子微带,形成光吸收。由此产生的电子或空穴,通过扩散或漂移运动到达外电路,形成电信号。

根据量子力学原理,电子微带和空穴微带的能量位置分别由 InAs 层厚和 GaSb 层厚决定。通过改变 InAs/GaSb 超晶格的周期厚度,可以调节电子微带和空穴微带的能量位置,实现可覆盖 3~30 μm 范围的红外探测能力。超晶格探测材料的这一特性,使其具有非常高的设计灵活性。另外,超晶格能带的灵活调节特点非常有利于实现双色和多色红外焦平面,从而在一个阵列上实现对不同波段红外辐射的探测成像。

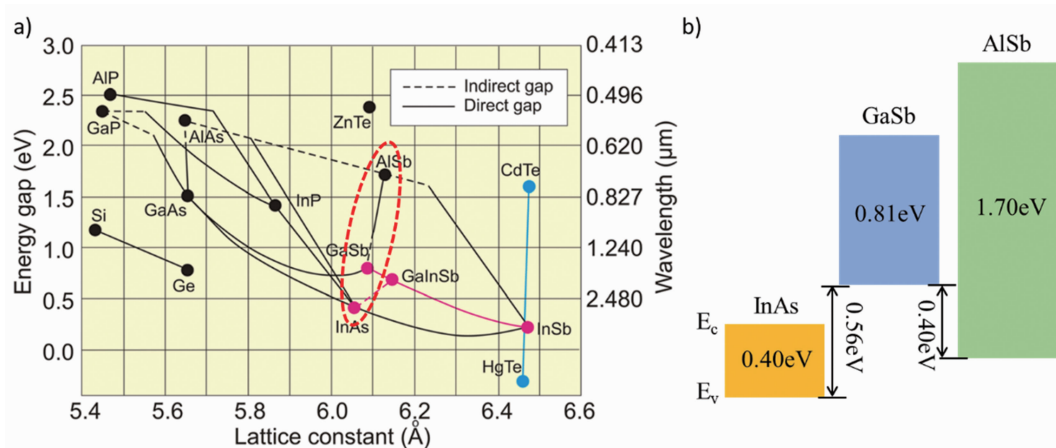


图 1 (a)部分半导体材料的晶格常数与其禁带宽度、响应波长的关系；(b) 6.1 Å 家族 (InAs/GaSb/AlSb 材料系统)能带排列的示意图

2 铟化物超晶格焦平面探测器的技术突破与进展

2.1 铟化物超晶格探测器的能带结构设计

能带结构计算在超晶格探测器研究中扮演重要角色。仿真计算中主要关注超晶格材料的带边性质和布里渊区中心附近的能带结构。 $k \cdot p$ 模型是对布里渊区中心附近的能带结构进行建模的方法^[9]。

对于处在周期性电势中的电子，其波函数满足布洛赫定律：

$$\psi_{nk}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}} u_{nk}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

$$\left\{ \frac{p^2}{2m_0} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} + V(\mathbf{r}) + \frac{\hbar}{m_0} \mathbf{k} \cdot \mathbf{p} + \frac{\hbar^2}{4m_0^2 c^2} [\nabla V \times \mathbf{p}] \cdot \boldsymbol{\sigma} \right\} \times u_{nk}(\mathbf{r}) = E_n(\mathbf{k}) u_{nk}(\mathbf{r}) \quad (2)$$

式中， m_0 是电子质量； σ 是电子自旋。

选取 $k_0 = 0$ 处的本征函数 $u_{n0}(\mathbf{r})$ 为基矢。根据微扰理论， $u_{nk}(\mathbf{r})$ 可以表示为 $u_{n0}(\mathbf{r})$ 的线性组合：

$$u_{nk}(\mathbf{r}) = \sum_m^N a_m u_{m0}(\mathbf{r}) \quad (3)$$

$$\sum_m^N H_{nm} a_m = E_n(\mathbf{k}) a_n \quad (4)$$

采用 Löwdin 微扰理论处理上述 $k \cdot p$ 方程^[10]。考虑导带、重空穴、轻空穴和自旋轨道分裂带，自旋耦合具有双重简并性，总共 8 带，哈密顿量可表述为 8×8 矩阵。

在周期为 L 的超晶格结构中，材料参数随 L 作周期性变化，因此哈密顿矩阵元也是周

期性变化的。采用傅里叶变换方法对 8 带 $k \cdot p$ 方程数值求解本征值和本征函数^[11]。考虑一维方向的异质结构，假设 z 方向为生长方向， z 方向上的周期为 L ，对 a_n 作傅里叶展开^[11]：

$$\begin{cases} a_n(\mathbf{r}) = \sum_j F_n(j) \varphi_j(z) e^{i(k_x x + k_y y)} \\ \varphi_j(z) = \frac{1}{\sqrt{L}} e^{i2\pi j(z/L)} \end{cases} \quad (5)$$

根据上述方程，我们编写了 8 带 $k \cdot p$ 模型的数值求解程序，在能带结构的计算中采用 77 K 下的材料参数，取 InAs 价带顶的能量为 0，所有其它能级位置都是基于 InAs 价带顶能量进行计算的。图 2 所示为计算得到的 77 K 下周期结构为 13.8/7.8 MLs (Monolayer) 的 InAs/GaSb 超晶格的能带结构。其中，图 2(a) 所示为垂直于生长方向的 (100) 和 (110) 方向的能量色散关系；图 2(b) 所示为沿着生长方向的 (001) 方向的能量色散关系。算得的截止波长为 9.76 μm，计算中考虑了 InSb 界面结构的影响。

2.2 铟化物超晶格材料的分子束外延生长

在 InAs/GaSb 超晶格红外探测器结构中通常会包含几百周期甚至上千周期的 InAs 与 GaSb 层。然而，因为 InAs 的晶格常数比 GaSb 小 0.75%，且高质量的超晶格结构主要生长在 GaSb 衬底上，所以在其周期中要插入适当厚度 InSb 的界面层以实现应力补偿的外延材料。由于 InSb 的晶格常数比 InAs 以及 GaSb

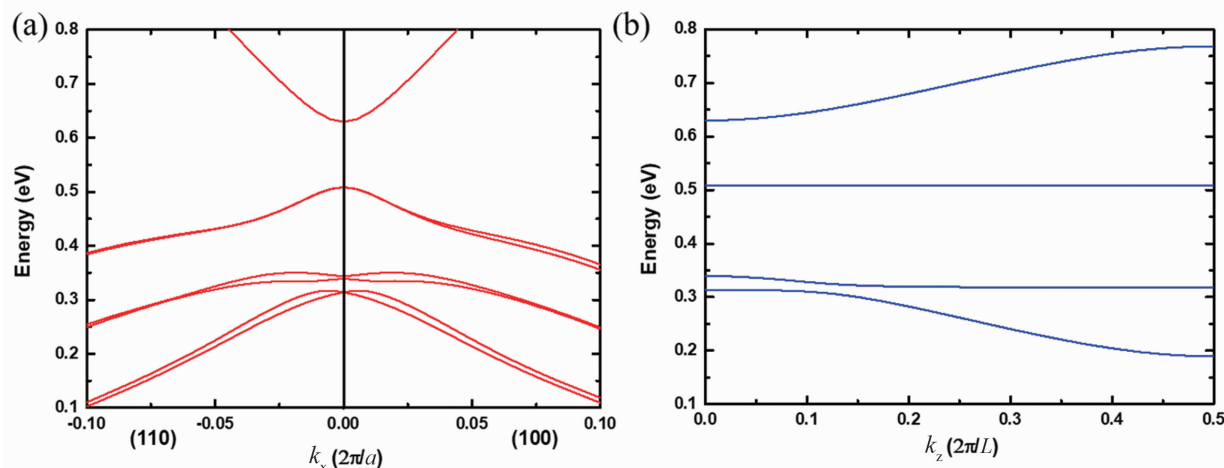


图 2 InAs/GaSb (13.8/7.8 MLs) II 类超晶格的能量色散关系: (a)垂直于生长方向; (b)沿着生长方向

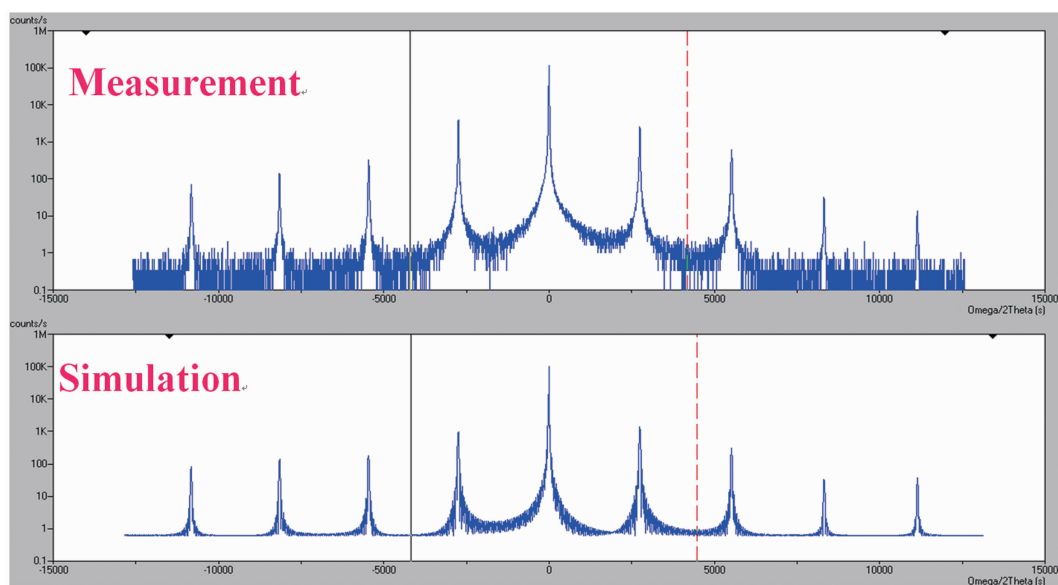


图 3 8ML InAs/12ML GaSb 超晶格材料的 X-射线双晶衍射曲线和仿真曲线

的晶格常数大 7% 左右, InSb 界面层的插入使得材料维持二维生长的难度加大, 界面粗糙度也有可能变差; 在超晶格周期性结构中, 界面将不断重复, 因此要确保界面层性质在整个超晶格生长过程中的一致性。

图 3 所示为经界面优化的 8ML InAs/12ML GaSb 超晶格外延材料的高精度 X-射线双晶衍射曲线和仿真曲线。从中可以清晰地观测到 4 级卫星衍射峰。根据各衍射峰的相对角间距可以测得超晶格的周期厚度为 6.09 nm, 各个卫星衍射峰的半高全宽小于 30", 充分说明生长的超晶格材料具有很好的晶格完整性。

InAs/GaSb 超晶格结构由 InAs 和 GaSb 两

种化合物构成, 并且在每个超晶格周期中插入了 InSb 界面。这三种化合物的最优生长窗口并不交叠。另外, InAs 与 GaSb 在生长过程中微观表面表现出不尽相同的动力学特性。为了获得高质量超晶格材料, 必须兼顾三种化合物各自的生长动力学条件, 从而找出最优化的生长温度。图 4 为经优化后生长得到的超晶格材料的原子力显微照片。图中可以清晰地观测到原子台阶, 从另一个侧面反映了所生长材料的质量。

图 5 显示了不同周期结构的超晶格样品的响应光谱。图中标注的数字是周期内 InAs 和 GaSb 的厚度(单位为 nm), 每条光谱曲线对应

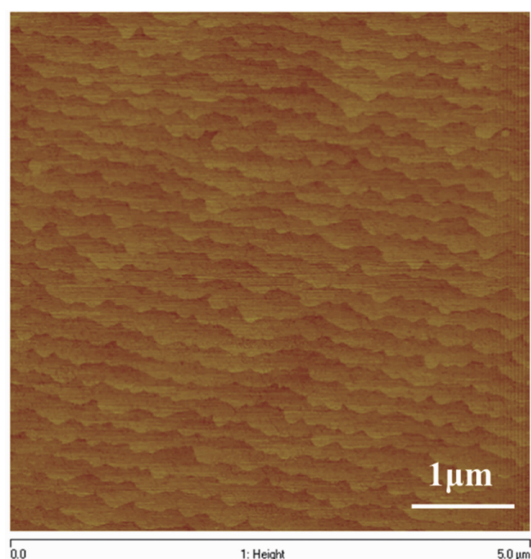


图 4 超晶格外延材料的原子力显微照片

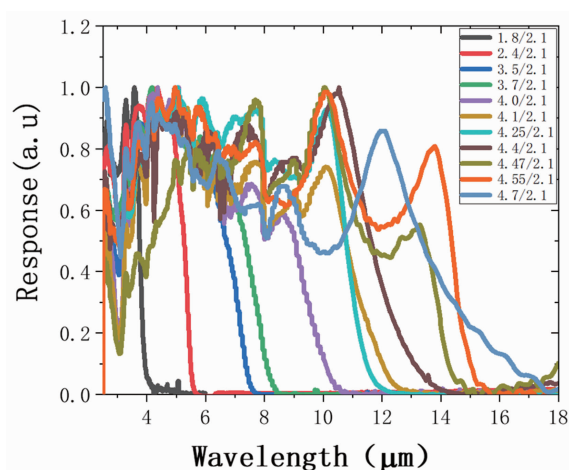


图 5 不同周期下超晶格样品的响应光谱。图中标注的数字代表周期内 InAs/GaSb 的厚度(nm)

不同的周期厚度。通过改变超晶格周期厚度,得到了覆盖中波红外、长波红外、甚长波红外波段的超晶格材料。

2.3 铋化物超晶格红外焦平面器件研制技术

经过多年的工艺优化和技术探索,我们建立了铋化物超晶格红外焦平面器件制备技术链。图 6 为超晶格红外焦平面制备的主要工艺流程图。超晶格红外焦平面探测器采用台面型像元芯片,台面形成与侧壁钝化是焦平面制备的关键工艺。台面形成的方法主要有湿法腐蚀和干法刻蚀两种,其中干法刻蚀具有各向异性强、均匀性好、重复性高等优势。侧壁损伤是

InAs/GaSb 超晶格材料的微台面刻蚀的主要考量指标。像元台面的侧壁钝化采用电感耦合等离子体-化学气相沉积(Inductively-Coupled Plasma Chemical Vapor Deposition, ICP-CVD)法沉积硅基介质膜的方式。半导体侧壁与介质膜之间的物理化学性质是钝化工艺优化的重点。

InAs/GaSb 超晶格焦平面像元芯片与读出电路之间采用钢柱相互衔接。钢柱互联的方式可以采用压力直接倒焊(压力的选择根据面阵大小、像元尺寸等因素变化),也可以采用钢柱回熔倒焊。由于焦平面探测器均采用背入射辐照方式,为了提高器件的光响应,我们发展了衬底减薄与去除技术,以消除自由载流子的吸收效应。

2011 年,我们初步突破了超晶格结构设计-材料外延生长-芯片制备-倒焊互联等全链条技术,并获得了原型器件。2012 年,我们研制并报道了具有较高性能的 128×128 超晶格红外焦平面探测器^[12]。在 77 K 工作温度下,该器件的响应截止波长为 $5.2 \mu\text{m}$,盲元率为 1.2%,响应非均匀性为 5.4%,噪声等效温差(Noise Equivalent Temperature Difference, NEDT)为 33.4 mK。

超晶格红外探测材料具有俄歇复合低、均匀性好等特点,是发展长波红外焦平面器件的优选技术。发展长波红外探测器的首要难点是如何抑制暗电流。在长波红外波段,由于超晶格的电子微带与空穴微带的能量差仅为百毫电子伏特量级(比如 $10 \mu\text{m}$ 波长器件的带隙约为 124 meV, $12.5 \mu\text{m}$ 波长器件的带隙约为 100 meV),电子非常容易经热激发从空位微带跃迁至电子微带,形成暗电子。另外,在长波红外波段,通过隧穿(特别是缺陷辅助隧穿)形成的暗电流也变得更加显著。

为克服长波红外探测器的暗电流难题,在提升材料性能的基础上,利用铋化物超晶格体系能带结构灵活可调的特点,设计了一种可抑制暗电流的势垒结构。通过在长波探测器结构中引入较宽带隙的中、短波超晶格,抑制产生-

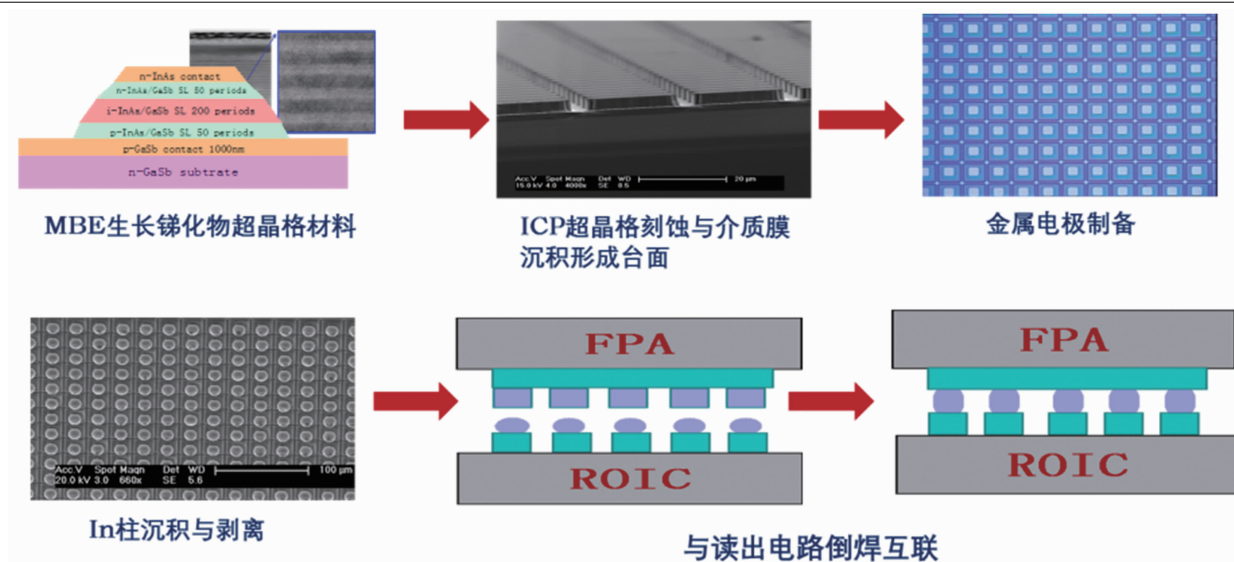


图 6 超晶格红外焦平面制备的工艺流程简图

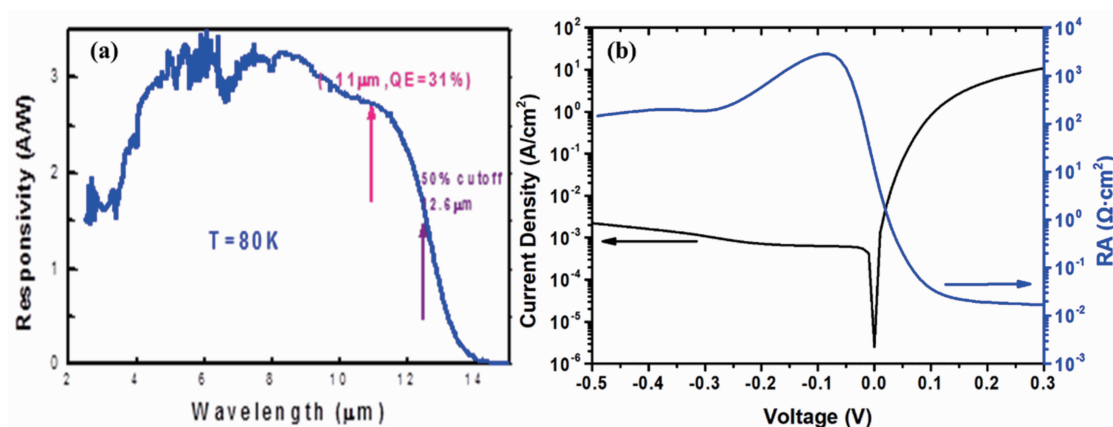


图 7 (a)长波超晶格的响应光谱; (b)长波超晶格的电流-电压特性

复合电流和隧穿电流等。同时研究也发现,引入宽带隙势垒也有助于抑制超晶格像元台面的侧壁漏电流。

图 7 所示为所生长的势垒型长波超晶格探测器的响应光谱和暗电流特性。可以看出,在液氮温度下,该器件的 50% 截止波长为 $12.6 \mu\text{m}$, -50 mV 偏置下的暗电流密度为 $6.2 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$, 结阻抗为 $1.4 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

图 8 所示为十多年来上海技物所超晶格研究团队在长波红外探测器暗电流抑制方面的进展情况。可以看出,长波红外探测器的暗电流密度从最初的近 1000 倍 R07 水平,到 2023 年已经优于 R07 水平。图中展示的是美国喷气推进实验室、雷神公司、海军实验室、西北大学等研究机构的报道结果。这是依据他们公开发

表的数据(主要是 2004 年 1 月至 2014 年 12 月)综合而成的。可以看出,我们实验室抑制暗电流的突破时间路径与国外大致相当。

超晶格长波红外焦平面研制中要突破的主要技术难点是像元台面的侧壁漏电抑制,以及超晶格像元芯片与读出电路耦合之后的底填充技术。2013 年,研究团队获得了国内首个超晶格长波红外焦平面(规格为 320×256)^[13]; 2014 年,将器件的截止波长拓展至 $12 \mu\text{m}$; 2017 年,研制出了第一个百万像素(1024×1024) $10.5 \mu\text{m}$ 超晶格长波红外焦平面器件^[14]; 2022 年和 2024 年相继实现了 1024×1024 和 2048×2048 规模的 $12.5 \mu\text{m}$ 超晶格长波红外焦平面探测器^[15]。

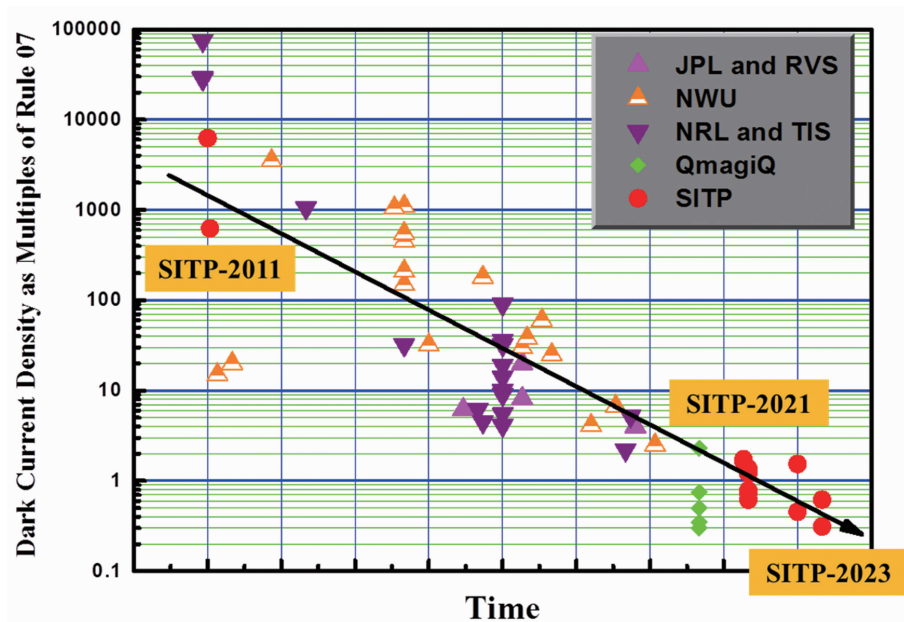


图 8 上海技物所在超晶格长波红外探测器暗电流抑制方面的研究进展

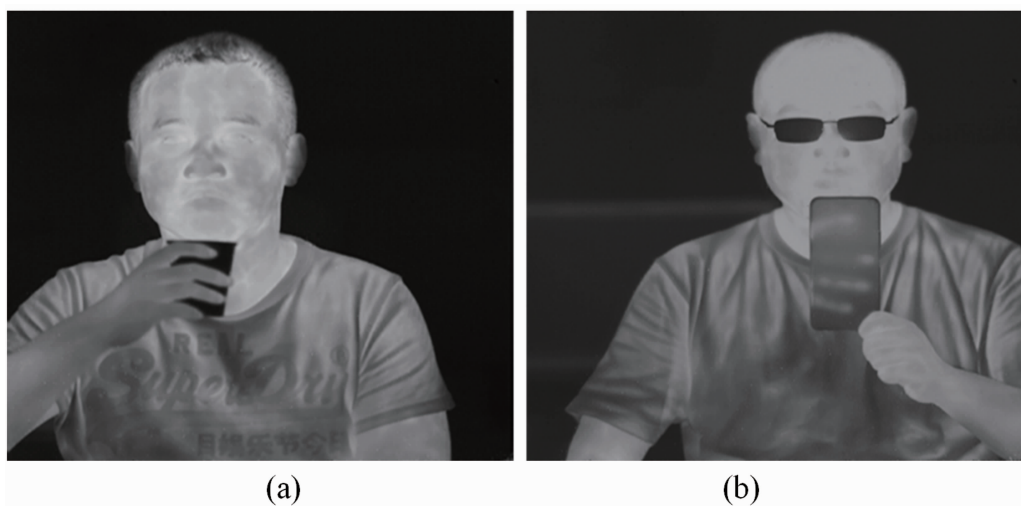


图 9 1024×1024 超晶格长波红外焦平面器件的成像图：(a)截止波长为 10.5 μm ；(b)截止波长为 12.5 μm

1024×1024 超晶格长波红外焦平面器件的像元尺寸为 18 μm ，读出电路的输入级为直接注入(Direct Injection, DI)方式。截止波长为 10.5 μm 的焦平面器件工作在 80 K 温度下，噪声等效温差为 31 mK，盲元率小于 1%，像元非均匀性优于 10%。截止波长为 12.5 μm 的焦平面器件工作在 60 K 温度下时，NETD 值为 21 mK，盲元率小于 1%，像元非均匀性优于 8%。图 9 是截止波长分别为 10.5 μm 和 12.5 μm 的百万像素超晶格红外焦平面器件的实验室成像演示图。

双/多色红外探测器可以获取多个谱段的红外信息，进而增强光电系统的探测能力。我们发展了基于偏压极性转换选择不同探测谱段的叠层双色红外探测器技术：2015 年研制出了我国首个双色超晶格红外焦平面器件，其响应波段分别为 3~4 μm 和 4~5 μm (中波/中波)^[16]；随后又拓展至中波/短波(1.7~2.6 μm /3.7~4.8 μm)、中波/长波(3~5 μm /8~10 μm)以及长波/长波(5~7.5 μm /8~10.5 μm)双色红外焦平面器件。图 10 所示为 1280×1024 中波/中波^[17]、320×256 中波/长波、640×512



图 10 超晶格双色红外焦平面器件的成像图: (a)中波/中波; (b)中波/长波; (c)长波/长波

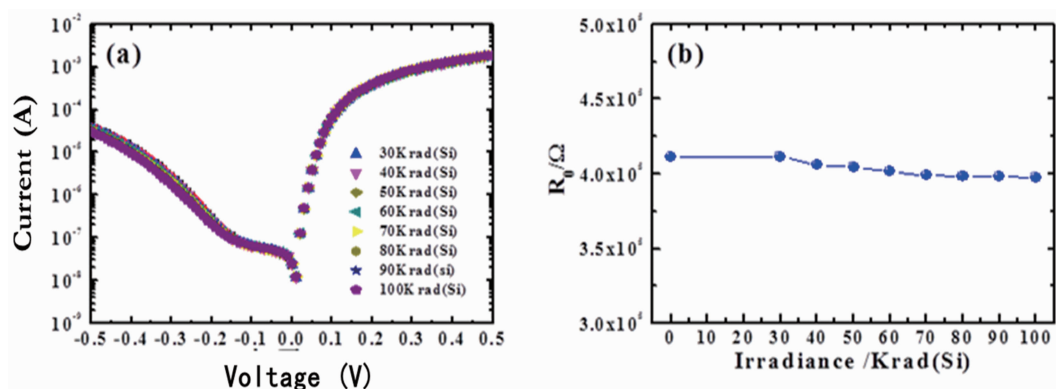


图 11 超晶格红外焦平面器件在 Co60 辐照条件下的性能变化情况: (a)暗电流; (b)结阻抗

长波/长波双色红外焦平面器件的实验室演示成像。

2.4 锑化物超晶格红外焦平面探测器的工程化

由于超晶格红外探测器是一种新型红外探测技术,为实现器件的工程化应用,需要对其进行可靠性研究。我们主要开展了高温/低温存储、高温/低温动态、温度冲击、力学、抗

辐射以及开关机等试验,以验证器件的有效性;同时进行了超晶格红外焦平面器件的抗辐照能力测试和评估,以及低温下的器件失效机制分析。图 11 所示为超晶格红外焦平面器件在 Co60 辐照条件下的性能变化情况。可以看出,经历 100 krad (Si)辐照后,超晶格红外焦平面器件的零偏阻抗由 $4.12 \times 10^5 \Omega$ 变化为 $3.98 \times 10^5 \Omega$,表明器件的抗辐照特性可以满

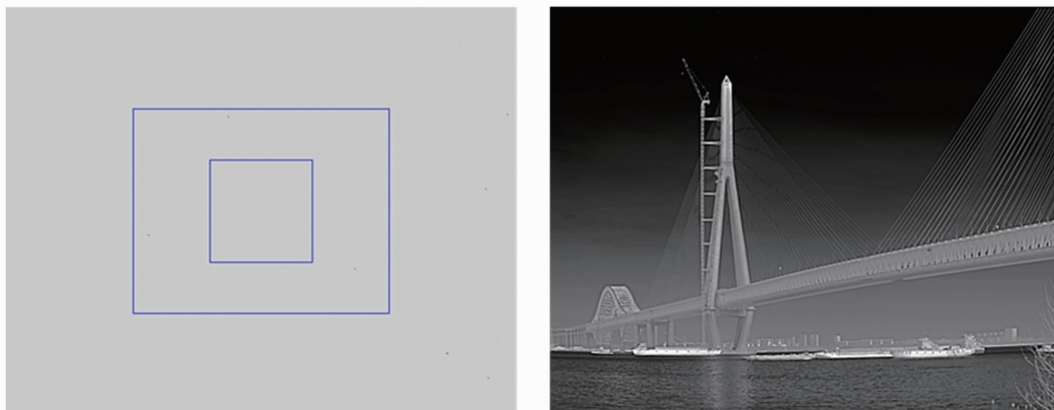


图 12 640×512 长波红外焦平面产品的盲元分布和演示成像

足航天应用需求。2022 年,三款超晶格红外焦平面器件成功应用于多个航天载荷,开展对地和对空观测试验。

2.5 铋化物超晶格红外焦平面探测器的产品化

对于铋化物超晶格红外探测器采用的 III-V 族化合物半导体材料,其物理化学性能稳定,有利于提升材料生长和器件工艺的稳定性、可控性以及批次间一致性。在实现技术突破和工程化的基础上,2020 年团队开展了铋化物超晶格红外探测器技术的产品化工作。以团队成员为核心的中科爱毕赛思光电科技有限公司经过 5 年左右的努力,建立起了超晶格红外焦平面的批产加工能力,实现了 320×256、640×512、1024×1024 等多种规格的超晶格中波、长波红外焦平面器件。外延材料的成品率达到 80%,长波红外探测器的成品率达到 30%,640×512 长波红外探测器的有效像元率可控制在 99.9%。我们为国内多家用户提供了自主可控的高性能红外焦平面器件方案。图 12 所示为 640×512 长波红外焦平面产品的盲元分布和演示成像。该器件的盲元数为 21 个,有效像元率为 99.994%。

3 铋化物超晶格探测器的最新进展和未来趋势

3.1 性能提升与功能拓展

近年来,铋化物超晶格取得了长足的发展。中波和长波红外焦平面的面阵规模分别达

到 4k×6k 和 2k×2k,响应盲元率也已经可以控制在小于 0.2% 和小于 0.5% 的水平,显示出了铋化物超晶格红外焦平面的优势和潜力,后续将朝着更大规格、更小像元尺寸、更高工作温度,以及甚长波、双(多)色等方向发展。与此同时,多维度集成探测、雪崩探测、片上集成信息处理等也将是超晶格红外焦平面的重要发展方向。

3.2 超表面微纳光学结构集成探测

利用人工光子微结构可以提升红外光的入射效率,大幅提升器件光响应率(量子效率),弥补超晶格红外探测器吸收系数小的弱点。2011 年,美国麻省理工学院微光子中心报道了集成多层介质层的超宽带(2~4 μm)中红外探测器,在 0~75°入射角下的透光率提高了 60%。2016 年,美国空军实验室利用微球透镜将中波红外探测器的灵敏度提高了 100 倍。2018 年,美国喷气推进实验室提出了一种单片集成微透镜的 InAsSb nBn 探测器,在 250 K 下的峰值探测率达到 $2.7 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。与没有集成微透镜的探测器相比,该器件的工作温度提高了 25 K。

4 结束语

经过多年努力,上海技物所在超晶格红外探测技术方面实现了从结构设计、材料生长、器件制备到工程化与产业化的全链条突破。超晶格红外焦平面在大面阵的均匀性、稳定性、量产能力等方面显示出了独特优势。随着在铋

化物超晶格基础材料物理性质和器件物理研究的不断深入, 以及新结构超晶格红外探测器的不断发展, 超晶格红外焦平面器件的性能将会得到进一步提升, 进而成为高性能红外焦平面探测器的优选技术。

致 谢

中国科学院上海技术物理研究所材器中心的很多同事和学生先后参加了铋化物超晶格红外焦平面探测器的研制工作, 同时红外焦平面组件的杜瓦封装和制冷机研制分别由组件技术研究室和第四研究室完成。在此一并表示感谢!

参考文献

- [1] Smith D L, Mailhot C. Proposal for strained type II superlattice infrared detectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, **62**(6): 2545–2548.
- [2] Yang M J, Bennett B R. InAs/GaSb infrared photovoltaic detector at 77 K [J]. *Electronics Letters*, 1994, **30**(20): 1970–1971.
- [3] Manurkar P, Ramezani-Darvish S, Nguyen B-M, 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.
- [4] Nguyen B M, Bogdanov S, Pour S A, et al. Minority electron unipolar photodetectors based on type II InAs/GaSb/AlSb superlattices for very long wavelength infrared detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(18): 183502.
- [5] Sundaram M, Reisinger A, Dennis R, et al. 1024 × 1024 LWIR SLS FPAs: Status and characterization [C]. *SPIE*, 2012, **8353**: 83530W.
- [6] Steenbergen E H, Connelly B C, Metcalfe G D, et al. Significantly improved minority lifetime observed in a long-wavelength infrared III-V type-II superlattice comprised of InAs/InAsSb [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, **99**(25): 251110.
- [7] Hoglund L, Ding D Z, Soibel A, et al. Minority carrier lifetime in mid-wavelength infrared InAs/InAsSb superlattices: Photon recycling and the role of radiative and Shockley-Read-Hall recombination mechanisms [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, **105**: 193510.
- [8] Ting D Z, Soibel A, Khoshakhlagh A, et al. Antimonide e-SWIR, MWIR, and LWIR barrier infrared detector and focal plane array development [C]. *SPIE*, 2018, **10624**: 1062410.
- [9] Willatzen M, Lew Yan Voon L C. *The $k \cdot p$ method: Electronic properties of semiconductors* [M]. Heidelberg: Springer, 2009.
- [10] Livneh Y, Klipstein P C, Klin O, et al. $k \cdot p$ model for the energy dispersions and absorption spectra of InAs/GaSb type-II superlattices [J]. *Physical Review B*, 2012, **86**(23): 235311.
- [11] Gershoni D, Henry C H, Baraff G A. Calculating the Optical Properties of Multidimensional Heterostructures Application to the Modeling of Quaternary Quantum Well Lasers [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1993, **29**(9): 2433–2450.
- [12] 许佳佳, 金巨鹏, 徐庆庆, 等. 128 × 128 元 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2012, **31**(6): 501–504.
Xu J J, Jin J P, Xu Q Q, et al. 128 × 128 infrared focal plane arrays based on Type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2012, **31**(6): 501–504.
- [13] 许佳佳, 陈建新, 周易, 等. 320 × 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外焦平面探测器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2014, **33**(6): 598–601.
Xu J J, Chen J X, Zhou Y, et al. 320 × 256 long wavelength infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2014, **33**(6): 598–601.
- [14] Wang F, Xu Z, Bai Z, et al. Fabrication of a 1024 × 1024 format long wavelength infrared focal plane array based on type-II superlattice and barrier enhanced structure [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2021, **115**: 103700.
- [15] 白治中, 黄敏, 徐志成, 等. 12.5 μm 1024 × 1024 长波 InAs/GaSb II 类超晶格红外焦平面探测器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2024, **43**(6): 716–720.

- Bai Z Z, Huang M, Xu Z C, et al. 12.5 μm 1024 $\times$ 1024 long-wavelength infrared InAs/GaSb Type II superlattice focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, **43**(6): 716–720.
- [16] 白治中, 徐志成, 周易, 等. 320 $\times$ 256 元 InAs/GaSb II 类超晶格中波红外双色焦平面探测器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2015, **34**(6): 738–743.
- Bai Z Z, Xu Z C, Zhou Y, et al. 320 $\times$ 256 dual-color mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2015, **34**(6): 738–743.
- [17] 白治中, 黄敏, 徐志成, 等. 1280 $\times$ 1024 元 InAs/GaSb II 类超晶格中/中波双色红外焦平面探测器 [J]. *红外与毫米波学报*, 2024, **43**(4): 437–441.
- Bai Z Z, Huang M, Xu Z C, et al. 1280 $\times$ 1024 dual-color mid-wavelength infrared InAs/GaSb superlattice focal plane arrays [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2024, **43**(4): 437–441.