

〈综述与评论〉

InAs/GaSb II类超晶格长波红外探测器研究进展

田亚芳¹, 史衍丽², 李方江¹

(1. 昆明理工大学 理学院, 云南 昆明 650091; 2. 云南大学 物理与天文学院, 云南 昆明 650091)

摘要: 本文系统报道了基于 InAs/GaSb II类超晶格(T2SLs)的长波红外探测器的研究进展。从衬底、材料生长以及器件性能角度对比分析了基于 GaSb、InAs 衬底的各种器件结构的优缺点。分析结果表明, 以 InAs 为衬底、吸收区材料为 InAs/InAs_{1-x}Sb_x、PB₁IB₂N 型的结构为相对优化的器件结构设计, 结合 ZnS 和 Ge 的多层膜结构设计或者重掺杂缓冲层, 同时采用电感耦合等离子体(inductively coupled plasma)干法刻蚀工艺, 该器件的 50%截止波长可达 12 μm, 量子效率(quantum efficiency)可提升到 65%以上, 暗电流密度降低至 1×10⁻⁵ A/cm²。并归纳总结了 InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器未来的发展趋势。

关键词: InAs/GaSb II类超晶格; 器件结构; 暗电流; 量子效率; 结构优化

中图分类号: TN213 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2023)08-0799-09

Research Progress of InAs/GaSb Type-II Superlattice Long-wave Infrared Detector

TIAN Yafang¹, SHI Yanli², LI Fangjiang¹

(1. Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650091, China;

2. School of Physics and Astronomy, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: In this study, the research progress of long-wave infrared detectors based on InAs/GaSb type-II superlattices (T2SLs) is systematically reported. The advantages and disadvantages of various device structures based on GaSb and InAs substrates are compared and analyzed from the perspective of substrate, material growth, and device performance. The results show that the structure of the device with InAs as the substrate, InAs/InAs_{1-x}Sb_x as the absorber material, and PB₁IB₂N type is a relatively optimized design. Combining the multilayer structure design of ZnS and Ge, a heavy doping buffer layer, and the inductively coupled plasma (ICP) dry etching process, the 50% cutoff wavelength of the device can achieve 12 μm, the quantum efficiency (QE) can be increased to more than 65%, and the dark current density can be reduced to 1 × 10⁻⁵ A/cm². Finally, the future development trend of InAs/GaSb T2SLs long-wave infrared detectors is summarized.

Key words: InAs/GaSb type-II superlattices, device structure, dark current, quantum efficiency, structure optimization

0 前言

随着材料技术的发展, InAs/GaSb II类超晶格(T2SLs)的优越性日益凸显, 特别适用于中长波红外(mid-and long-wave infrared, MLWIR)和甚长波红外(very long-wave infrared, VLWIR)探测^[1-4]。基于

InAs/GaSb T2SLs 的光电探测器因具有俄歇复合速率较低、载流子寿命相对较长、以及吸收系数大等特点^[5-7], 在气象监测、资源勘探、医疗诊断、农业等传感应用中发挥着关键作用^[8-10]。尤其是大尺寸红外焦平面阵列(focal plane array, FPA)具有更大的视场、更高的角度分辨率, 适合于现场跟踪和监视应用, 一直倍受人

收稿日期: 2023-05-05; 修订日期: 2023-08-07.

作者简介: 田亚芳(1978-), 女, 湖北赤壁人, 实验师, 研究方向为半导体光电材料与器件。E-mail: xntyf@sohu.com.

通信作者: 史衍丽(1969-), 女, 山东郓城人, 研究员, 博导, 研究方向为半导体光电器件物理与器件研究。E-mail: ylshikm@hotmail.com.

基金项目: 云南贵金属实验室科技计划项目(YPML-2022050220)。

们关注^[11-13]。

由于 InAs 的晶格常数 ($a=6.0584\text{\AA}$) 与 GaSb 的晶格常数 ($a=6.0959\text{\AA}$) 非常接近^[14], 因此, InAs/GaSb 超晶格 (SLs) 与 GaSb、InAs 衬底都能紧密匹配。为了降低暗电流提高探测器性能, 对基于 GaSb 的 T2SLs 探测器与基于 InAs 的 T2SLs 探测器, 国内外在改善器件结构设计上做过诸多研究。美国西北大学量子器件中心的 Abbas Haddadi 等人提出了 NBN (PBN) 结构^[15-17], 上海技术物理所 Chen Jianxin 等人采用分子束外延 (molecular beam epitaxy, MBE) 技术把结构从最初的 PIN (PIIN) 改善到现在的 $\text{PB}_1\text{IB}_2\text{N}$ ($\text{PB}_1\text{IIB}_2\text{N}$) 结构^[18-20]。随着结构的优化探测器性能也得到大幅提升。此外, 中科院半导体所的 Niu Zhichuan 团队近年来报道了一种 NMIP 结构的 InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器结构, 更是将响应波长扩展到甚长波段 (50%截止波长为 $15.2\ \mu\text{m}$)^[7]。

本文在深入调研 InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器结构的发展基础上, 系统报道了以 GaSb 为衬底和以 InAs 为衬底探测器的结构设计研究进展, 从暗电流密度、量子效率 (quantum efficiency, QE)、响应波长等器件性能角度方面对比分析了各种结构的优缺点。结合 ZnS 和 Ge 多层膜的微结构结构设计或者重掺杂缓冲层, 同时采用电感耦合等离子体 (inductively coupled plasma, ICP) 干法刻蚀工艺, 总结了提高 InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器性能的最新优化方案, 并从材料生长、高温探测、微纳结构和多色探测 4 个方向展望了 InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器未来的发展趋势。

1 基于 GaSb 的 T2SLs 探测器

以 GaSb 为衬底的长波红外探测器结构有 PIN、PBIBN、NBN 以及 PBN 型等, 其吸收区材料有 InAs/GaSb SLs, 也有 InAs/InAsSb SLs。

图 1 给出了在 GaSb 衬底上生长的 PIN 结构。该结构依次包含 $1\ \mu\text{m}$ 的 N 型 InAsSb 层、50 个周期的 Si 掺杂的 13ML InAs/7ML GaSb SLs、无掺杂的 2.5mm 的 13ML InAs/7ML GaSb SLs 吸收区、50 周期的 Be 掺杂的 13ML InAs/7ML GaSb SLs 和 50nm 的 Be 掺杂 GaSb 层。顶部 Be 掺杂的 P-GaSb 和底部 Si 掺杂的 N-InAsSb 用作电接触层。

经 K-P 模型计算, 在 77K 温度时, $-50\ \text{mV}$ 的反向偏压下, 该器件的暗电流密度为 $4.3 \times 10^{-5}\ \text{A}/\text{cm}^2$ 。研究表明, 低偏压下器件的暗电流主要因产生-复合过程而形成, 高偏压下主要由隧穿电流构成。在 77K 下 50%截止波长只有 $8\ \mu\text{m}$, 且量子效率低于 15%。这是

因为该结构中载流子寿命很短 (约 $1.5\ \text{ns}$)^[20], 光生载流子的扩散长度也较短。

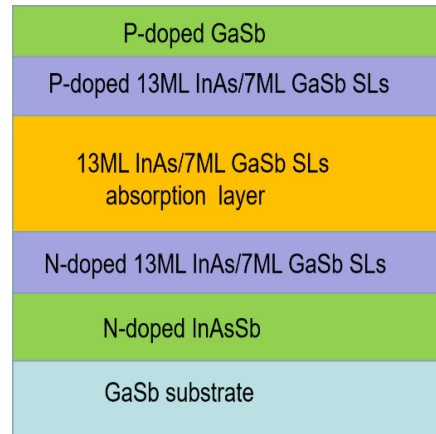


图 1 基于 GaSb 的 PIN 结构器件示意图

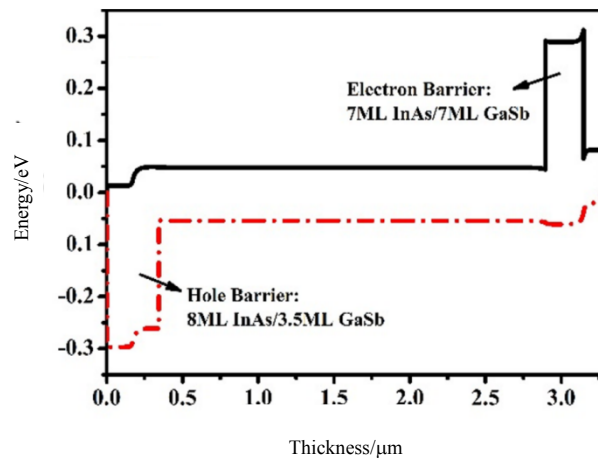
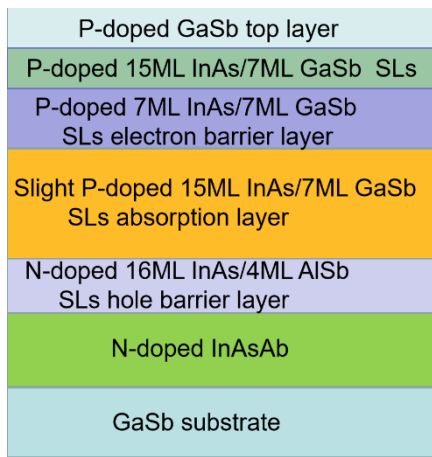
Fig.1 Schematic diagram of the PIN structure GaSb-based device

产生-复合和隧穿暗电流与带隙相关, 可以通过将较宽的带隙材料插入空间电荷区 (space charge region) 来有效地抑制它们^[18]。特别对于 InAs/GaSb SLs 材料, 可以利用 InAs/GaSb/AlSb 等异质结构能带工程设计不同的势垒结构, 在有效抑制 T2SLs 中暗电流的基础上提高量子效率。基于 T2SLs 本征材料的带电性能和补偿掺杂, Chen Jianxin 团队通过 MBE 生长技术, 引入电子势垒层和空穴势垒层, 设计出具有双势垒结构 $\text{PB}_1\text{IB}_2\text{N}$ 光电探测器^[18], 其结构如图 2(a)所示。

在 GaSb 衬底上生长 $1.5\ \mu\text{m}$ 厚的 Si 掺杂的 N 型 $\text{InAs}_{0.91}\text{Sb}_{0.09}$ 刻蚀停止层; 然后是 80 周期的 N 型掺杂的 16ML InAs/4ML AlSb SLs 空穴势垒区 B_1 , 紧接着是 300 周期轻 P 型掺杂的 15ML InAs/7ML GaSb SLs 吸收区, 和 60 周期的 P 型掺杂的 7ML InAs/7ML GaSb SLs 电子势垒区 B_2 ; 最后是 Be 掺杂的 25 周期的 15ML InAs/7ML GaSb SLs 作为能带接触缓冲层, 和 $0.05\ \mu\text{m}$ 厚的 Be 掺杂 GaSb 作为顶部接触层。

图 2(b)为双势垒 $\text{PB}_1\text{IB}_2\text{N}$ 探测器结构的全能带结构图。从 K-P 模型计算得到^[18], InAs/AlSb 空穴势垒层的能带隙为 $459\ \text{meV}$, 与吸收层的导带偏移为零, 即相对于吸收层的价带偏移约为 $356\ \text{meV}$ 。

经测试该 $\text{PB}_1\text{IB}_2\text{N}$ 结构的探测器在 80 K 下的 100%截止波长为 $12.5\ \mu\text{m}$, 这是覆盖长波红外大气窗口的技术重要波长。虽然暗电流密度在 80 K、 $-50\ \text{mV}$ 的反向偏压下为 $1.1 \times 10^{-3}\ \text{A}/\text{cm}^2$, 动态微分电阻面积乘积 (RA) 为 $14.5\ \Omega\text{cm}^2$, 但是其量子效率提高了 30%, 且比探测率 D^* 为 $1.4 \times 10^{11}\ \text{m}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。



(a) 基于 GaSb 的 PB₁IB₂N 结构器件示意图

(b) 具有 PB₁IB₂N 结构的探测器能带结构示意图^[18]

(a) Schematic diagram of the PB₁IB₂N structure GaSb-based device (b) The energy band structure alignment of the PB₁IB₂N detector^[18]

图2 基于 GaSb 的 PB₁IB₂N 结构的器件示意图及其能带结构图

Fig.2 Schematic diagram of the PB₁IB₂N structure GaSb-based device and its energy band structure alignment

除了 InAs/GaSb T2SLs 外, InAs/InAs_{1-x}Sb_x T2SLs 已被证明比 InAs/GaSb 具有更长的载流子寿命, 并已被提出作为红外光电探测器的替代方案^[16]。与 InAs ($a=6.0584\text{\AA}$) 和 GaSb ($a=6.0959\text{\AA}$) 相比, InAs 和 InAs_{1-x}Sb_x (InAs_{0.45}Sb_{0.55} 的晶格常数 $a=6.3250\text{\AA}$)^[21]化合物不是紧密晶格匹配的^[17], 其组成层厚度的改变必须仔细考虑 InAs_{1-x}Sb_x 层, 在需要大量 Sb 的 LWIR 和 VLWIR 体系中尤其如此。因此, 设计器件结构时, 在保障探测器有较高的吸收系数基础上, 必须提供良好的应变平衡, 以确保高质量的材料具有较长的少子扩散长度, 从而实现高量子效率; 此外, 还需设计一个高度可控的势垒, 有效阻挡导带中的大多数电子的同时, 确保价带中少数空穴的自由移动。为解决上述问题, 可以在超晶格中加入含 Sb 组分较大的 ($x>0.5$) 的 InAs_{1-x}Sb_x 合金, 同时降低 InAs 厚度, 并通过模拟计算精确控制应变平衡, 这可以增加电子空穴波函数的交叠^[16], 从而得到较大的吸收系数; 另外, 为了在导带中产生势垒, 在 InAs 中间插入一层薄薄的 AlAs, 由于 AlAs ($a=5.6622\text{\AA}$)^[22]与 InAs ($a=6.0584\text{\AA}$) 材料之间有 6.5% 的晶格失配, 只能使用一个或两个单层组成的薄层。

基于上述分析, 在抑制暗电流的基础上提高量子效率和探测率, 对于 GaSb 为衬底的探测器, USA 西北大学^[15]提出了吸收区为 InAs/InAs_{1-x}Sb_x 材料的 NBN (PBN) 结构的探测器。在 Te 掺杂的 N 型 GaSb 晶圆上以 MBE 方式生长 0.1 μm 的 GaSb 缓冲层和 0.5 μm N 掺杂 InAs_{0.91}Sb_{0.09} 缓冲层, 以使表面光滑; 然后是 0.5 μm 的 N⁺接触层; 接着是 6 μm 的轻掺杂 N 型吸收

区, 其材料由每周期 28ML InAs/7ML InAs_{0.45}Sb_{0.55} 的 SLs 组成, 再是 0.5 μm 势垒层, 其材料由每周期 6/2/6/7ML 的 InAs/AlAs/InAs/InAs_{0.45}Sb_{0.55} SLs 组成; 最后是 0.5 μm 的 N 接触层。N 接触超晶格的设计类似于吸收区 SLs 的设计, 采用 Si 作为 N 型掺杂剂。该 NBN 结构如图 3 所示。

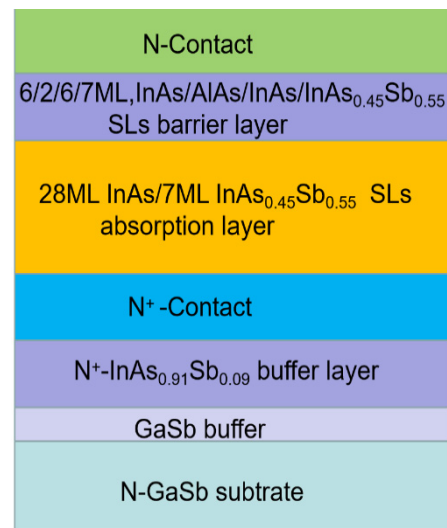


图3 基于 GaSb 的 NBN 结构器件示意图

Fig.3 Schematic diagram of the NBN structure GaSb-based device

图 4 为该 NBN 结构探测器的能带结构及工作原理示意图。从图 (a) 中可以看出 InAs/AlAs/InAs/InAs_{0.45}Sb_{0.55} SLs 势垒阻止了大多数电子的输运, 同时允许少数空穴和光生载流子从左边的有源区域扩散。即在具有势垒层的超晶格中, 产生了能带对齐和有效带隙。图(b)中的彩色矩形表示材料的禁带宽度。

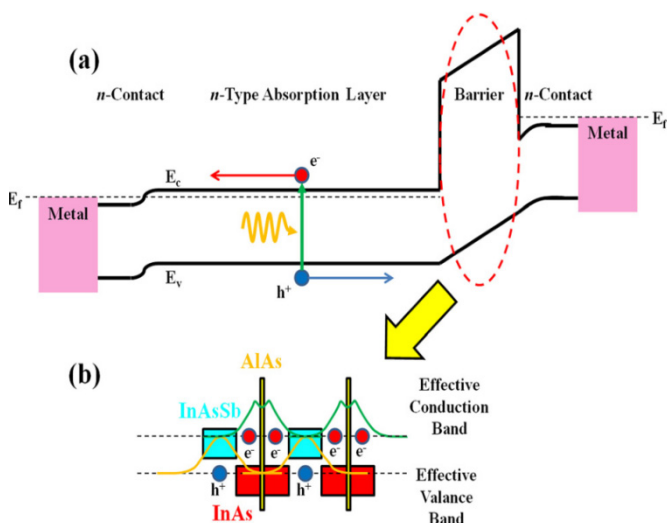


图4 具有NBN结构的探测器工作原理及能带结构示意图^[16]:
(a) NBN结构的探测器工作原理示意图; (b) NBN结构的探测器能带结构及有效带隙图

Fig.4 The energy band structure alignment and schematic diagram of working principle of the NBN detector^[16]: (a) Schematic diagram of working principle for the NBN detector; (b) The band alignment and the creation of an effective band-gap for the NBN detector

经测试, 该 NBN 结构的探测器在 77 K 时具有 10 μm 的 50%截止波长, 且其暗电流密度在 77 K 和 -90 mV 偏置电压下为 4.4×10^{-4} A/cm², 而 -90 mV 是器件量子效率饱和的偏置电压。动态微分电阻面积乘积 RA 在 -90 mV 偏置时达到其局部最大值 119 Ωcm²。在正面光照和没有应用任何抗反射 (anti-reflection) 涂层的情况下, 该探测器在 77K 时的饱和量子效率高达 54%, 这证实了材料的高质量, 同时表明量子效率仍随着器件厚度的增加而增加, 此时不受少子扩散长度的限制。另外, 该探测器的探测率为 2.8×10^{11} cm·Hz^{1/2}·W⁻¹, 且在 -70~-90 mV 时保持相对稳定^[16]。很显然, 该 NBN 结构探测器的综合性能明显高于之前所述的 InAs/GaSb SLs 探测器, 这使得其成为 LWIR 红外成像应用的理想选择。

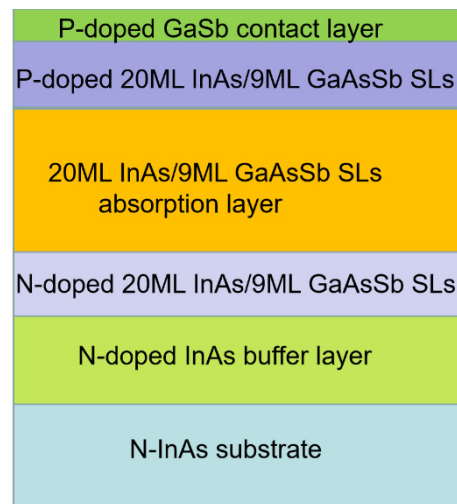
2 基于 InAs 的 T2SLs 探测器

尽管取得诸多进展, InAs/GaSb T2SLs 光电探测器仍然存在少数载流子寿命短的问题。研究表明, T2SLs 结构中少数载流子寿命短主要是由 Shockley-Read-Hall (SRH) 复合引起的^[23-24], 而 SRH 复合又是由材料缺陷引起的。因此, 对于器件应用而言非常迫切需要生长具有高晶体完美度的低缺陷超晶格材料。传统的 InAs/GaSb 超晶格大多生长在 GaSb 衬底上, 由于 InAs 在 GaSb 衬底上受到拉伸应变, 通常在

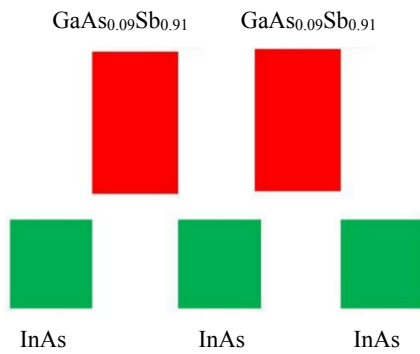
InAs/GaSb 界面上插入 InSb 单分子层来平衡应变^[14]。此外, 基于 GaSb 的 InAs/GaSb SLs 的典型生长温度约为 400 °C^[20], 如此低的生长温度是缺陷密度高和少数载流子寿命短的主要原因。

为了获得高质量的 T2SLs 材料并提高 SRH 寿命, 开始了基于 InAs 衬底的 InAs/GaAsSb SLs 探测器的研究^[25-26]。通过在 InAs 衬底上生长 T2SLs 材料, 不需要刻意的界面设计来平衡层之间的应变, 这更容易生长高质量的材料, 且能够显著提高 T2SLs 材料的生长温度 (约 480 °C)^[14]。较高的生长温度有利于促进二维外延, 提高晶体质量, 还可以有效降低 SRH 复合概率, 提高少数载流子寿命。同时, InAs 层厚度主要决定了 T2SLs 探测器的截止波长, 通过在 InAs 衬底上生长 SLs, 在每个周期内增加 InAs 层厚度以扩大截止波长将非常简单^[20]。因此, 基于 InAs 的 InAs/GaAsSb SLs 可以作为长波长和超长波长红外探测器的另一种材料选择。

为了进行应变补偿, Chen Jianxin 团队^[20]在 GaSb 层中引入 9%的 As, 得到与 InAs 衬底晶格匹配的 GaAs_{0.09}Sb_{0.91} 三元化合物。在 480 °C 温度下, 采用 MBE 技术在未掺杂的 N 型 InAs 衬底上生长的 T2SLs 器件, 其结构从下到上依次为: 首先是 1.0 μm 厚的 Si 掺杂 InAs 缓冲层, 然后是 0.5 μm 厚的 Si 掺杂 20ML InAs/9ML GaAsSb SLs, 接着是 2.5 μm 厚的非掺杂 20ML InAs/9ML GaAsSb SLs 吸收区, 最后是 0.5 μm 厚的 Be 掺杂 20ML InAs/9ML GaAsSb SLs, 并在其表面覆盖 50 nm 掺 Be 的 GaSb 接触层。该 PIN 结构如图 5(a)所示。



(a) 基于 InAs 的 PIN 结构器件示意图
(a) Schematic diagram of the PIN structure InAs-based device



(b) 具有PIN结构的探测器能带结构示意图^[14]

(b) Band alignment of the InAs/GaAs_{0.09}Sb_{0.91} superlattice^[14]

图5 基于InAs的PIN结构的器件示意图及其能带结构图

Fig.5 Schematic diagram of the PIN structure InAs-based device and its energy band structure alignment

应用K-P模型计算InAs/GaAs_{0.09}Sb_{0.91}超晶格的能带结构如图5(b)所示^[14], InAs导带底部位于GaAs_{0.09}Sb_{0.91}价带顶部下方, 带偏移能量为70 meV^[14]。因此, InAs/GaAs_{0.09}Sb_{0.91}异质结构仍然保持“断隙”的II类超晶格能带结构, 这使得我们可以通过使用与InAs/InAsSb超晶格相比相对较薄的InAs层来实现截止波长。

经测试, 该PIN结构器件在80 K时具有10 μm的50%截止波长, 且其暗电流密度和零偏置电阻面积(R_0A)在80 K和-30 mV偏置电压下分别为 $4.01 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 、 $36.9 \Omega\text{cm}^2$ 。很明显, 在相同器件结构、暗电流密度相当的情况下, 基于GaSb的PIN器件的50%截止波长要比基于InAs的PIN器件的短2 μm。可以预见, 在截止波长相同且工作温度也相同的情况下, 基于GaSb的PIN器件的暗电流密度要比基于InAs的PIN器件的高许多。其原因在于, 基于InAs的器件的载流子寿命(10 ns)比基于GaSb的(1.5 ns)器件高出近7倍^[20], 而基于InAs的器件的缺陷密度比基于GaSb的器件低了一个数量级以上^[14]。所以, 基于GaSb器件的产生-复合(generation-recombination)电流密度远远大于基于InAs器件的GR电流密度, GaSb基器件的高陷阱辅助隧穿电流主要是由于其缺陷密度高于InAs基器件。另外, 该器件在80 K时量子效率为45%左右, 探测率为 $7.4 \times 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ 。

随着外延和制造技术的发展, 在以上的PIN结构基础之上, 2020年该团队的Huang Min等人^[13]对以InAs为衬底、器件结构PB₁IB₂N (PB₁ΠB₂N)的InAs/GaAsSb长波红外探测展开了研究, 并研制出了大尺寸(320×256)高性能的FPA。在80 K时, 该探测器100%截止波长为9.5 μm, 在-0.02 V偏压下器件显示出 $1.7 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 的均匀暗电流和 $1.5 \times 10^3 \Omega\text{cm}^2$

的动态微分电阻面积(RA)。在400 μs积分时间、300 K背景和F/2.0光学条件下, FPA的噪声等效温差和可操作性分别为20.7 mK和99.2%^[13]。该高性能FPA进一步验证了基于InAs的InAs/GaAsSb T2SLs在LWIR检测中的可行性。

由于GaSb和InAs的材料性质, 以上这些利用InAs衬底作为N接触的器件自然采用了P-on-N极性结构^[6,9,27]。然而为了匹配读出电路(readout integrated circuit, ROIC)的不同极性, 还应设计基于InAs衬底的N-on-P极性的器件结构。此外, InAs/GaSb T2SLs长波红外探测器器件除了以MBE的方式生长外, 还可以以金属有机化学气相沉积(metal-organic chemical vapor deposition, MOCVD)的方式生长, 且该方式的生长温度高(530℃)^[28], 有利于生长高质量的器件材料。2020年中科院苏州纳米研究所的Teng Yan等人^[29]报道了利用MOCVD在InAs衬底上生长InAs/GaSb T2SLs, 实现了具有N-on-P极性的高性能长波红外探测器, 以满足不同外围电路的需求。在MOCVD生长的InAs基InAs/GaSb T2SLs探测器中, 锌(Zn)被作为P型掺杂剂, 但由于其高扩散率^[30]可能会破坏异质结并降低器件性能(造成高泄漏电流), 因此在P型区域生长后插入未掺杂的T2SLs间隔层, 以防止Zn扩散到势垒层。

通过MOCVD生长在InAs衬底上的具有N-on-P极性的InAs/GaSb器件结构如图6所示, 从下到上依次包含: 200 nm厚的P-MWSL接触层($P=1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$), 200 nm厚的未掺杂的MWSL间隔层, 200 nm厚的N-MWSL势垒层($N=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), 1.0 μm厚的N-LWSL吸收区($N=2 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), 最后是20 nm厚的高掺杂顶部接触层($N=1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$)。其中, P-MWSL和N-MWSL由6ML InAs/8ML GaSb SLs组成, 截止波长为4 μm; N-LWSL吸收区由20ML InAs/8ML GaSb SLs组成, 截止波长为10 μm。

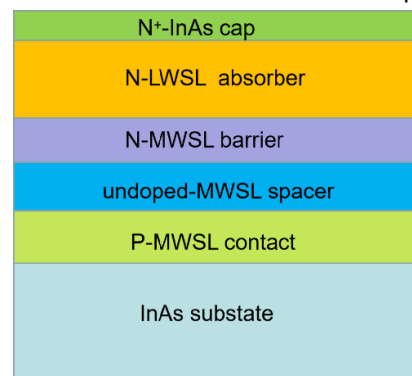


图6 基于InAs的N-on-P极性结构器件示意图

Fig.6 Schematic diagram of an N-on-P polar structure InAs-based device

经测试,该 N-on-P 极性的器件在 80K 时 100%截止波长为 $12\ \mu\text{m}$, $-0.1\ \text{V}$ 偏压下,暗电流密度为 $6.0 \times 10^{-4}\ \text{A}/\text{cm}^2$,探测率为 $8.3 \times 10^{10}\ \text{cm}\cdot\text{Hz}^{1/2}\cdot\text{W}^{-1}$ 。可见,该器件表现出了与 P-on-N 器件相当的性能。但是,其量子效率并不高(24%)。

3 量子效率和暗电流的改进

对于 LWIR 光电探测器来说,量子效率和暗电流是实现高探测率的两个关键参数。T2SLs 光电探测器电学性能虽然可以通过增加势垒层的结构设计而得到很大的改善,但仍存在吸收系数有限、反射损失等问题^[31],这使得难以实现高量子效率,同时还需要尽可能地减小暗电流。为了提高器件性能,除了以上从器件结构上进行优化之外,还可以从物理光学的角度引入微结构设计,同时从制备工艺方面进行优化,如刻蚀,以提高器件性能。

为提高器件的量子效率,Zhou Yi 等人^[31]通过实验和模拟计算的方法,研究一组不同吸收区厚度的基于 InAs 衬底的 InAs/GaAsSb T2SLs LWIR 探测器时,观察到了高量子效率(高于 65%)。研究发现增强的光学响应主要归因于高 N 掺杂 InAs 缓冲层与 T2SLs 之间的折射率差异,引起多重反射和双层薄膜干涉,形成谐振腔效应,这不仅增加了入射光的传播路径,而且在某些波长处大大降低了表面反射损失,从而导致光在 SLs 材料中的收集,并有效地增强光吸收。此外,该研究工作通过调整 InAs 缓冲层的掺杂浓度进一步降低缓冲层的折射率,成功实现了一个高 QE(大于 65%)的基于 InAs 的 T2SLs LWIR 探测器,该探测器吸收区域薄至 $3.55\ \mu\text{m}$,且没有任何 AR 涂层。该研究结果提供了一种简单而有效的方法来提高薄膜光电探测器的光学吸收,尤其是对于吸收系数低的材料。此基于 InAs 的 InAs/GaAsSb 探测器为如图 7 所示的 PBIBN 结构。

在 480°C 温度下,以 MBE 方式在 N 型 InAs 衬底上生长 $1.2\ \mu\text{m}$ Si 掺杂 ($N=2 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$) 的 InAs 缓冲层,然后是 35 周期 Si 掺杂 ($N=1.5 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$) 的 13ML InAs/5ML GaAsSb N 型 SLs,一个空穴势垒和梯度势垒, $3.55\ \mu\text{m}$ 厚的 Be 掺杂 ($N=2.5 \times 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$) 的 22ML InAs/9ML GaAsSb SLs 吸收区,一个电子势垒和 20 周期 Be 掺杂 ($P=1 \times 10^{17}\ \text{cm}^{-3}$) 的 22ML InAs/9ML GaAsSb P 型 SLs,最后在其顶部添加一薄的 Be 掺杂 ($P=1 \times 10^{18}\ \text{cm}^{-3}$) InAs 接触层。

除了以重掺杂缓冲层的方式在缓冲层与 T2SLs 之间形成大的折射率差、引起多重反射和双层薄膜干涉、从而有效地增强光吸收之外,还可以采用物理气

相沉积(physical vapor deposition, PVD)方法在去除衬底之后的缓冲层表面沉积多层薄膜,使探测器与多层薄膜结合形成 F-P 腔共振,通过入射光与探测器的耦合激发共振效应,能调控器件 50%的截止波长^[32];同时,多层薄膜也会影响入射光在器件表面的反射,从而提高了器件光谱响应。由于硫化锌(ZnS)和锗(Ge)或它们的组合对长波红外辐射没有吸收或吸收微弱,因此长波 InAs/GaSb T2SLs 红外 FPA 的设计和生长多采用由 ZnS 和 Ge 组成的多层薄膜结构^[32]。

SHI Rui 等人通过仿真与实验的方法建立的多层膜结构的器件模型如图 8 所示。在该模型中,采用完全匹配层(perfect matched layer, PML)作为分析电磁散射问题的吸收边界条件,且在相邻像素之间使用周期边界条件^[32]。器件的电极材料为金(Au),本征吸收材料为 14ML InAs/7ML GaSb 的 T2SLs,采用 PVD 方法在 InAsSb 缓冲层表面沉积了由 ZnS 和 Ge 组成

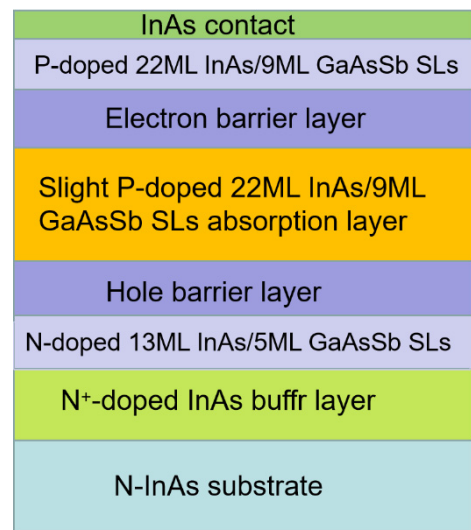


图 7 高掺杂缓冲层的 PBIBN 结构器件示意图

Fig.7 Schematic diagram of a the PBIBN structure device with a highly doped buffer layer

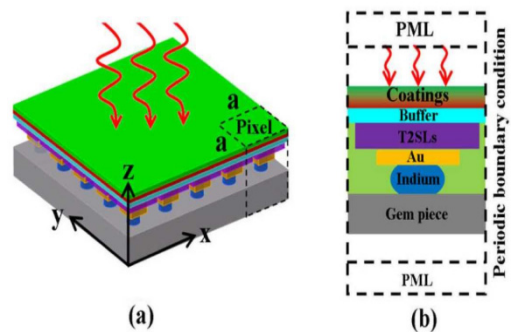


图 8 多层薄膜结构的器件模型:(a) 3D 结构示意图;(b) 背入射的中心截面图^[32]

Fig.8 The multilayer coatings structure of the device model: (a) 3D structure diagram; (b) Back incident center cross-section^[32]

的多层涂层。实验表明,与没有多层薄膜的 FPA 相比,多层薄膜使其响应峰位置从 8.7 μm 和 10.3 μm 扩展到 9.8 μm 和 11.7 μm , 50%响应截止波长从 11.6 μm 移动到 12.3 μm , 并且在波长为 12 μm 处的响应强度增加了 69%^[32]。可见,优化的多层薄膜不仅可以调控 FPA 的响应波长,还可以增强光谱响应,这种微结构设计为实现更高灵敏度和更高成像能力的长波红外探测器提供了更好的平台。

InAs/GaSb T2SLs 虽然被认为是第三代高性能 LWIR 探测器 FPA 的最佳候选材料^[33-34],但 FPA 的台面型结构使得探测器表面电流不可忽视,该表面电流是暗电流的重要组成部分。表面电流来自于探测器侧壁表面,被认为是来自于台面形成过程中周期性晶体结构的突然终止,导致侧壁表面附近的能带弯曲,使得多数载流子积聚或电导率类型反转^[35]。湿法刻蚀和干法刻蚀均可用于 InAs/GaSb 超晶格 FPA 的台面形成,而消除壁面游离 Sb 和 GaSb 是优化刻蚀工艺的关键^[36]。研究认为,在湿法刻蚀过程中,游离 Sb 会在表面形成,从而在表面产生电流通道^[37];而电感耦合等离子体(ICP)干法刻蚀由于其各向异性,在刻蚀过程中能去除游离的 Sb 和 GaSb,从而减少暗电流,且提高 ICP 的温度有助于刻蚀副产品汽化,防止游离 Sb 和 GaSb 在侧壁表面形成。此外,在 170°C 的 ICP 刻蚀不仅可以使器件暗电流密度降到 1×10^{-5} A/cm,而且还能得到接近垂直的光滑侧壁,这对于具有小像素间距的大阵列 FPA 是非常必要的^[38]。

综上所述,基于 GaSb 与基于 InAs 的 InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器,目前基本上有以上 5 种典型器件结构及相应材料参数。不同的材料和不同的结构参数,对应于不同器件性能。基于以上 5 种典型器件结构及相应材料参数,整理性能参数对比如表 1 所示。表中所有性能参数均是在 75~80 K 温度范围内测得。需要特别说明的是,InAs-substrate 的 PB₁IB₂N 结构的探测器暗电流密度和量子效率是器件经过了微结构处理和 ICP 刻蚀工艺之后测得的。

从表中可以看出,对基于 GaSb 的探测器而言, PB₁IB₂N 结构器件的量子效率高出 PIN 结构器件的一倍,但同时其暗电流密度明显增大;而 NBN 结构探测器的综合性能显著高于前两者。此外,InAs/GaSb II 类超晶格长波红外探测的结构,从最初的以 GaSb 为衬底的 PIN 结构发展到现在的以 InAs 为衬底的 PB₁IB₂N 结构,其截止波长、暗电流密度及量子效率均有显著的改善。产生这一现象的主要原因是在 InAs 衬底上生长 T2SLs 材料时,不需要刻意的界面设计来平衡层之间的应变,这使得生长高质量的材料相对于在 GaSb 衬底上的更容易,且能够提高 T2SLs 材料的生长温度,较高的生长温度有利于促进二维外延,提高晶体质量;同时,InAs 层厚度主要决定了 T2SLs 探测器的截止波长,通过在 InAs 衬底上生长 SLs,在每个周期内增加 InAs 层厚度以扩大截止波长也变得相对简单。

表 1 不同结构的 GaSb/InAs 探测器性能参数对比

Table 1 Comparison of detector performance parameters of different structures

Structure	GaSb-substrate			InAs-substrate	
	PIN	PB ₁ IB ₂ N	NBN	PIN	PB ₁ IB ₂ N
Absorption layer material	InAs/GaSb	InAs/GaSb	InAs/InAsSb	InAs/InAsSb	InAs/InAsSb
Absorption layer parameter	13/7, 2.5 μm	15/7, 2.5 μm	28/7, 4 μm	20/9, 2.5 μm	22/9, 3.55 μm
$\lambda_c/\mu\text{m}$	8	12.5	10	10	12.0
$J_D/(A/\text{cm}^2)$	4.3×10^{-5}	1.1×10^{-3}	4.4×10^{-4}	4.01×10^{-5}	1.7×10^{-5}
$R_0A/\Omega\text{cm}^2$	-	14.5	119	36.9	1.5×10^3
QE	<15%	30%	54%	45%	>60%
$D^*/(\text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1})$	-	1.4×10^{11}	2.8×10^{11}	7.4×10^{10}	-

4 发展趋势

InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器在短短十几年内取得了快速发展,随着新型器件结构的创新、材料生长技术的优化和器件制备工艺的完善,InAs/GaSb T2SLs 红外探测器在性能提升、高温工作、多色探测

等方面将得到进一步的发展:

1)生长机理探索,MBE 生长技术优化。InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器性能主要受制于材料质量而非理论预测。面对 AlSb、GaSb、InSb 等 Sb 化物的反常生长速率^[39],探索 Sb 化物的 MBE 生长机理已成为提高器件性能亟待解决的问题;同时需要进一步优化

MBE 生长技术, 提高生长温度, 降低材料缺陷密度, 提升材料的生长质量, 从而降低器件的暗电流和提高量子效率。

2) 采用光学调控, 发展钝化技术。除了在能带结构及材料生长领域进行不断的研究以优化器件性能外, 光学调控也是非常有效的一种方法。光学调控通常采用表面微纳结构, 如光子晶体、陷光结构^[40]、表面等离子体增强等, 调控入射光的空间分布, 提高器件对红外光的吸收和相应光谱的变化; 另外, 还需发展新型钝化技术, 进一步抑制探测器表面漏电, 对于 FPA 尤其需要寻找更合适的钝化工艺。

3) 发展 HOT 器件, 实现高温探测。现有的 InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器均是制冷型器件, 体积大使得移动受限, 同时成本也高。已有报道^[41]实现了室温下 (300 K) InAs/GaSb T2SLs 短波红外探测器的应用, 但实现高温 (150 K) 乃至室温下的长波探测, InAs/GaSb T2SLs 红外探测器仍然面临很大的技术挑战。

4) 拓宽成像谱域, 实现多色探测。InAs/GaSb T2SLs 红外探测器不仅在改进单色探测器性能方面逐步成熟, 同时, 在双色红外探测^[17]成像方面也取得一系列的进展。多色探测能同时得到不同波段的光谱信息, 显著提高对目标物的识别与跟踪, 且该技术还能够提供先进的彩色处理算法以进一步提高灵敏度, 使其高于单色成像仪。InAs/GaSb T2SLs 多色长波红外探测器的产业化具备广阔的前景, 将成为新一代红外探测系统最有力的竞争者。

5 总结

InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器的衬底材料有 GaSb 和 InAs 两种, 本文系统报道了基于这两种衬底的器件结构设计的研究进展。器件结构从最初的 PIN (PIIN) 发展到现在的 NBN (PBN) 和 PB_1IB_2N ($PB_1\Pi B_2N$) 结构, 其吸收区材料从 InAs/GaSb 改善到 InAs/InAs_{1-x}Sb_x 或 InAs/GaAs_{1-x}Sb_x, 随着器件结构的优化探测器性能也得到大幅提升。综合考虑截止波长、暗电流和量子效率等相关因素, 以 InAs 为衬底、吸收区材料为 InAs/InAs_{1-x}Sb_x、结构为 PB_1IB_2N 型的长波红外探测器体现出较好的器件性能。再结合 ZnS 和 Ge 多层膜的微结构设计或者重掺杂缓冲层, 同时采用 ICP 干法刻蚀工艺, 该器件的 50%截止波长达到 12 μm , 量子效率提升到 65%以上, 暗电流密度降低到 $1 \times 10^{-5} \text{A/cm}^2$ 。与此同时, 与 Sb 基能带工程相关的物理学将给 InAs/GaSb T2SLs 长波红外探测器结构带来新的性能提升^[42], 对应的 FPA 在可操作性、空间均匀、可扩展性等方面将表现越来越出色。

参考文献:

- [1] Nguyen B M, Hoffman D, WEI Y, et al. Very high quantum efficiency in type-II InAs/GaSb superlattice photodiode with cutoff of 12 μm [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(23): 231108.
- [2] 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.
- [3] LI Xiaochao, JIANG Dongwei, ZHANG Yong, et al. Investigations of quantum efficiency in type-II InAs/GaSb very long wavelength infrared superlattice detectors[J]. *Superlattices and Microstructures*, 2016, **92**: 330-336.
- [4] Khoshakhlagh A, Höglund L, Ting D Z, et al. High performance long-wave type-II superlattice infrared detectors[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2013, **31**(3): 03C122.
- [5] Kim H S, Cellek O O, LIN Z Y, et al. Long-wave infrared nBn photodetectors based on InAs/InAsSb type-II superlattices[J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(16): 161114.
- [6] ZHAO Yu, TENG Yan, HAO Xiujuan, et al. Optimization of long-wavelength InAs/GaSb superlattice photodiodes with Al-free barriers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, **32**(1): 19-22.
- [7] HAN Xi, XIANG Wei, HAO Hongyue, et al. Very long wavelength infrared focal plane arrays with 50% cutoff wavelength based on type-II InAs/GaSb superlattice[J]. *Chin. Phys. B*, 2017, **26**(1): 018505.
- [8] Plis E, Khoshakhlagh A, Myers S, et al. Molecular beam epitaxy growth and characterization of type-II InAs/GaSb strained layer superlattices for long-wave infrared detection[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B, Nanotechnology and Microelectronics: Materials, Processing, Measurement, and Phenomena*, 2010, **28**(3): C3G13-C3G18.
- [9] TENG Yan, ZHAO Yu, WU Qihua, et al. High-performance long-wavelength InAs/GaSb superlattice detectors grown by MOCVD [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2018, **31**(2): 185-188.
- [10] TING D Z Y, Hill C J, Soibel A, et al. A high-performance long wavelength superlattice complementary barrier infrared detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **95**(2): 023508.
- [11] Pierre-Yves Delaunay, Binh Minh Nguyen, Darin Hoffman, et al. 320×256 infrared focal plane array based on type II InAs/GaSb superlattice with a 12 μm cutoff wavelength[C]//*Proc. of SPIE*, 2007, **6542**: 654204-1.
- [12] WANG Fangfang, XU Zhicheng, BAI Zhizhong, 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 and Technology*, 2021, **115**: 103700.
- [13] HUANG Min, CHEN Jianxin, XU Zhicheng, et al. InAs/GaAsSb Type-II superlattice LWIR focal plane arrays detectors grown on InAs substrates[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, **32**(8): 453-456.
- [14] XU Zhicheng, CHEN Jianxin, WANG Fangfang, et al. High performance InAs/GaAsSb superlattice long wavelength infrared photo-detectors grown on InAs substrates[J]. *Semiconductor Science and Technology*,

- 2017, **32**(5): 055011.
- [15] Hoang A M, CHEN G, Chevallier R, et al. High performance photodiodes based on InAs/InAsSb type-II superlattices for very long wavelength infrared detection[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **104**: 251105.
- [16] Haddadi A, CHEN G, Chevallier R, et al. InAs/InAs_{1-x}Sb_x type-II superlattices for high performance long wavelength infrared detection[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, **105**: 121104.
- [17] Haddadi A, Dehzangi A, Chevallier R, et al. Bias-selectable nBn dual-band long-/very long-wavelength infrared photodetectors based on InAs/InAs_{1-x}Sb_x/AlAs_{1-x}Sb_x type-II superlattices[J]. *Scientific Reports*, 2017, **7**(1): 3379.
- [18] XU Zhicheng, CHEN Jianxin, WANG Fangfang, et al. MBE growth and characterization of type-II InAs/GaSb superlattices LWIR materials and photodetectors with barrier structures[J]. *Journal of Crystal Growth*, 2017, **477**: 277-282.
- [19] HUANG Min, CHEN Jianxin, XU Jiajia, et al. ICP etching for InAs-based InAs/GaSb superlattice long wavelength infrared detectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **90**: 110-114.
- [20] WANG Fangfang, CHEN Jianxin, XU Zhicheng, et al. Performance comparison between the InAs-based and GaSb-based type-II superlattice photodiodes for long wavelength infrared detection[J]. *Optics Express*, 2017, **25**(3): 1629-1635.
- [21] Kyrtos A, Matsubara M, Bellotti E. Investigation of the band gaps and bowing parameter of InAs_{1-x}Sb_x alloys using the modified Becke-Johnson potential[J]. *Physical Review Materials*, 2020, **4**(1): 014603.
- [22] 管飞. 固态电子与器件[DB/OL]. [2018-04-06]. <http://www.doc88.com/p-8458470353567.html>.
- GUAN Fei. Solid State Electronics and Devices [DB/OL]. [2018-04-06]. <http://www.doc88.com/p-8458470353567.html>.
- [23] Donetsky D, Svensson S, Vorobjev L E. Carrier lifetime measurements in short-period InAs/GaSb strained-layer superlattice structures[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, **95**(21): 212104.
- [24] Connelly B C, Metcalfe G D, SHEN H, et al. Direct minority carrier lifetime measurements and recombination mechanisms in long-wave infrared type II superlattices using time-resolved photoluminescence[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, **97**(25): 251117.
- [25] WANG Fangfang, CHEN Jianxin, XU Zhicheng, et al. InAs-based type-II superlattice long wavelength photodetectors[C]//*Proc. of SPIE*, 2016, **9755**: 975519.
- [26] WANG Fangfang, CHE Jianxin, XU Zhicheng, et al. InAs-based InAs/GaSb type-II superlattices: growth and characterization[J]. *Cryst. Growth*, 2015, **416**: 130-133.
- [27] HUANG Yong, XIONG Min, WU Qihua, et al. High-performance mid-wavelength InAs/GaSb super-lattice infrared detectors grown by production-scale metalorganic chemical vapor deposition[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2017, **53**(5): 1-5.
- [28] 滕葵. MOCVD生长的长波InAs/GaSb超晶格红外探测器研究[D]. 北京: 中国科学技术大学, 2021.
- TENG Yan. Studies on Long-wavelength InAs/GaSb Superlattice Infrared Detectors Grown by MOCVD[D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2021.
- [29] LIU Jiafeng, TENG Yan, HAO Xiujuan, et al. Long-wavelength InAs/GaSb superlattice detectors on InAs substrates with n-on-p polarity[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2020, **56**(5): 1-6.
- [30] Swaminathan V, Reynolds Jr C L, Geva M. Zn diffusion behavior in InGaAsP/InP capped mesa buried heterostructures[J]. *Applied Physics Letters*, 1995, **66**(20): 2685-2687.
- [31] HUANG Min, CHEN Jianxin, ZHOU Yi, et al. Light-harvesting for high quantum efficiency in InAs-based InAs/GaSb type-II superlattices long wavelength infrared photodetectors[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **114**(14): 141102.
- [32] 史睿, 周建, 白治中, 等. 基于多层薄膜的长波红外 InAs/GaSb II类超晶格焦平面光响应调控研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2022, **41**(1): 248-252.
- SHI Rui, ZHOU Jian, BAI Zhizhong. Tuning the optical response of long-wavelength InAs/GaSb type-II superlattices infrared focal plane arrays with multi-coatings[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2022, **41**(1): 248-252.
- [33] WANG Liang, XU Zhicheng, XU Jiajia, et al. Fabrication and characterization of InAs/GaSb type-II superlattice long-wavelength infrared detectors aiming high temperature sensitivity[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, **38**(21): 6129-6134.
- [34] 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.
- SHI Yanli. Choice and development of the third-generation infrared detectors[J]. *Infrared Technology*, 2013, **35**(1): 1-8.
- [35] GIN A, WEI Y, BAE J, et al. Passivation of type II InAs/GaSb superlattice photodiodes[J]. *Thin Solid Films*, 2004, **447**: 489-492.
- [36] Papis-Polakowska E. Surface treatment of GaSb and related materials for the processing of mid-infrared semiconductor devices[J]. *Electron Technology: Internet Journal*, 2005, **37**(4): 1-34.
- [37] HUANG Min, CHEN Jianxin, XU Jiajia, et al. ICP etching for InAs-based InAs/GaSb superlattice long wavelength infrared detectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2018, **90**: 110-114.
- [38] XU Jiajia, XU Zhicheng, BAI Zhizhong, et al. Effects of etching processes on surface dark current of long-wave infrared InAs/GaSb superlattice detectors[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, **107**: 103277.
- [39] 郝宏玥, 吴东海, 徐应强, 等. 高性能碲化物超晶格中红外探测器研究进展(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2022, **51**(3): 32-41.
- HAO Hongyue, WU Donghai, XU Yingqiang, et al. Research progress of high performance Sb-based superlattice mid-wave infrared photodetector (Invited)[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, **51**(3): 32-41.
- [40] 蒋洞微, 徐应强, 王国伟, 等. 基于碲化物二类超晶格的多色红外探测器研究进展[J]. *人工晶体学报*, 2020, **49**(12): 2211-2220.
- JIANG Dongwei, XU Yingqiang, WANG Guowei, et al. Research progress in antimonide-based type-II superlattice multi-color infrared detectors[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2020, **49**(12): 2211-2220.
- [41] Arash D, Abbas H, Romain C, et al. NBN extended short-wavelength infrared focal plane array[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(3): 591-594.
- [42] Rogalski A. Next decade in infrared detectors[C]//*Proc. of SPIE*, 2017, **10433**: 104330L.