

基于 AlAsSb/InAsSb 超晶格势垒的 InAs/InAsSb II 类超晶格 nBn 中波红外探测器

单一凡^{1,2}, 吴东海^{1,2*}, 谢若愚^{1,2}, 周文广^{1,2}, 常发冉¹, 李 农^{1,2}, 王国伟^{1,2},
蒋洞微^{1,2}, 郝宏玥^{1,2}, 徐应强^{1,2}, 牛智川^{1,2*}

(1. 中国科学院半导体研究所 光电子材料与器件重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049)

摘要: InAs/InAsSb II 类超晶格避免了 InAs/GaSb II 类超晶格中与 Ga 原子相关的缺陷复合中心, 具有更高的少数载流子寿命, 在高工作温度中波红外探测器制备方面有着良好的应用前景。少数载流子单极势垒结构通常被用来抑制探测器暗电流, 如 nBn 结构探测器。在 InAs/InAsSb II 类超晶格 nBn 中波红外光电探测器中, 势垒层常采用 AlAsSb 等多元合金材料, 阻挡多数载流子的输运。然而, 势垒层与吸收层存在的价带偏移 (VBO) 使得光电流往往需要在大偏压下饱和, 从而增大了探测器暗电流。本文设计了一种 AlAsSb/InAsSb 超晶格势垒, 旨在消除 VBO 并降低量子效率对偏压的依赖性。研究结果显示, 150 K 下, 设计制备的 nBn 光电探测器的 50% 截止波长为 4.5 μm , 探测器光响应在 -50 mV 的小反向偏压下达到了饱和, 3.82 μm 处的峰值响应度为 1.82 A/W, 对应量子效率为 58.8%。在 150 K 和 -50 mV 偏压下, 探测器的暗电流密度为 2.01×10^{-5} A/cm², 计算得到在 3.82 μm 的峰值探测率为 6.47×10^{11} cm²·Hz^{1/2}/W。

关键词: InAs/InAsSb; II 类超晶格; AlAsSb/InAsSb 势垒; 中波红外; 势垒探测器

中图分类号: TN215 **文献标识码:** A

Mid-wavelength infrared nBn photodetectors based on InAs/InAsSb type-II superlattice with an AlAsSb/InAsSb superlattice barrier

SHAN Yi-Fan^{1,2}, WU Dong-Hai^{1,2*}, XIE Ruo-Yu^{1,2}, ZHOU Wen-Guang^{1,2}, CHANG Fa-Ran¹, LI Nong^{1,2}, WANG Guo-Wei^{1,2}, JIANG Dong-Wei^{1,2}, HAO Hong-Yue^{1,2}, XU Ying-Qiang^{1,2}, NIU Zhi-Chuan^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Optoelectronic Materials and Devices, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: InAs/InAsSb type-II superlattice (T2SL) materials hold great promise for the development of mid-wavelength infrared photodetectors operating at high temperatures, as they avoid the defects caused by Ga atoms in InAs/GaSb T2SL and exhibit long minority carrier lifetime. To reduce the dark current, minority carrier unipolar barrier structures, such as nBn detectors, are commonly employed. In mid-wavelength infrared InAs/InAsSb T2SL nBn photodetectors, the multielement alloy such as AlAsSb is typically utilized as the barrier layer to block the transport of majority carriers. However, the small valence band offset (VBO) between the barrier and absorption layers leads to the saturation of photocurrent at high bias voltage, resulting in increased dark current. In this work, an AlAsSb/InAsSb T2SL barrier was designed to eliminate the VBO and reduce the bias dependency of quantum efficiency. The results show that the fabricated nBn photodetector exhibits a 50% cutoff wavelength of 4.5 μm at 150 K. The optical response of the photodetector saturates under a small bias of -50 mV, achieving a peak responsivity of 1.82 A/W at 3.82 μm and a quantum efficiency of 58.8%. At 150 K and -50 mV applied bias, the photodetector exhibits a dark current density of 2.01×10^{-5} A/cm².

收稿日期: 2023-10-18, 修回日期: 2023-12-12

Received date: 2023-10-18, Revised date: 2023-12-12

Foundation items: Supported by the Research Foundation for Advanced Talents of the Chinese Academy of Sciences (E27RBB03)

作者简介 (Biography): 单一凡 (2000-), 女, 山东枣庄人, 博士研究生, 主要从事红外探测器件的研究. E-mail: shanyifan@semi.ac.cn

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: dhwu@semi.ac.cn; zcnui@semi.ac.cn

cm^2 and a specific detectivity of $6.47 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$.

Key words: InAs/InAsSb, type-II superlattice, AlAsSb/InAsSb barrier, mid-wavelength infrared, barrier detector

引言

相较于短波红外(SWIR)和长波红外(LWIR),中波红外(MWIR)波段探测具有一系列优势,包括热对比度强、信噪比高等,并且不易受到大气遮蔽物散射和水汽吸收的影响^[1],因此在夜视成像、气体传感、工业检测和医学诊断等领域得到了广泛应用^[2-3]。目前主流的MWIR探测器材料包括InSb和碲镉汞(HgCdTe)等。然而,InSb探测器需要在低温(80~100 K)条件下工作,这限制了它在非制冷红外成像系统中的应用^[4]。HgCdTe材料则面临着高俄歇非辐射复合、材料均匀性差、加工良率低及成分对环境有害等挑战^[5]。

基于锑化物的II类超晶格(T2SL)材料具有通过能带工程精细调节带隙的能力,同时具有俄歇复合率低、隧穿暗电流小、材料生长均匀性好、结构稳定性强、制造成本低等优势,因此在红外探测领域展现出巨大的应用潜力^[6]。然而,InAs/GaSb II类超晶格探测器受到Ga原子引入的缺陷复合中心的限制,少子寿命低(77 K下约0.14~0.8 μs)^[7-8],性能仍未达到理论预期。与之相比,无Ga的InAs/InAsSb II类超晶格能够避免与Ga有关的缺陷,具有更长的Shockley-Read-Hall (SRH)少子寿命(77 K下约1.8~9 μs)^[9-10]。同时,InAs/InAsSb II类超晶格界面结构简单,具有更简单可控的外延生长工序和更高的良品率。此外,由于缺陷能级位于导带边上方,InAs/InAsSb II类超晶格还具有更好的容忍缺陷的能力^[11]。因此,InAs/InAsSb II类超晶格已成为最具前景的MWIR探测材料之一。

目前,MWIR探测器的前沿研究方向是降低成本、尺寸、重量和功耗(C-SWaP)^[12]。为了实现这一目标,需要研制高工作温度(HOT)探测器和焦平面阵列(FPAs),以消除低温冷却系统带来的负担。这就要求探测器具有高量子效率 and 低暗电流^[13-14]。然而,传统p-i-n结构的T2SL红外探测器往往受到过量的产生-复合暗电流以及缺乏有效表面钝化导致的高表面漏电流的限制,需要在液氮温度或更低温度工作,从而大大增加了探测系统的重量和功耗。为了抑制器件暗电流,2006年Maimon和Wicks等提出了nBn型势垒结构^[15],随后单极势垒结构探测器

得到了快速发展。在单极势垒结构探测器中,宽带隙的势垒层被插入到pn结的空间电荷区中,从而阻挡多数载流子在任一方向上的流动,同时允许少数载流子从吸收层流向接触层^[16]。由于势垒结构将耗尽区限制在宽带隙的势垒层中,窄带隙的吸收层中的耗尽区几乎被消除,这有效抑制了与结有关的SRH暗电流和陷阱辅助隧穿暗电流^[17],有利于实现更高的工作温度。同时,宽带隙势垒层可以实现对吸收层的钝化,有效阻挡器件的表面漏电通道^[18],从而实现均匀性更高的焦平面阵列。近年来,美国喷气推进实验室(JPL)^[19-21]、西北大学量子器件中心(CQD)^[22-24]、新墨西哥大学^[25]、韩国i3system^[26],以及国内的昆明物理研究所^[27]、半导体研究所^[28]等机构在基于nBn结构的II类超晶格单元和焦平面红外探测器方面开展了深入研究,在低暗电流、高工作温度、多色探测等方面取得了显著成果。

为了获得基于nBn结构的探测器的最佳性能,势垒层的设计应最大化吸收层和势垒层之间的导带偏移(CBO),同时尽可能减小二者的价带偏移(VBO),使吸收层价带与势垒层价带对齐。在基于T2SL的nBn型探测器中,常用的势垒层材料包括AlAsSb^[20-21, 26]、AlGaSb^[29]、AlInSb^[30]等三元合金以及AlGaAsSb^[27, 31]等四元合金。然而,通过调节合金组分实现与GaSb衬底晶格匹配后,AlAsSb等多元合金势垒层与吸收层之间会不可避免地形成价带偏移,导致存在显著的少子势垒,阻碍少数载流子的自由流动。为了充分收集光电流,需要施加更高的偏压以克服少子势垒,这导致器件的量子效率性能存在强烈的偏压依赖性。在较高的工作偏压下,耗尽区电场会扩展到吸收层中,从而增大产生-复合和隧穿暗电流。另外,含Al组分的三元或四元合金在干法刻蚀进行台面隔离过程中容易被氧化,从而产生表面漏电流,降低器件性能。

本文提出了一种基于AlAsSb/InAsSb超晶格电子势垒的nBn型InAs/InAsSb II类超晶格中波红外探测器结构。通过采用超晶格材料取代多元合金材料作为势垒层,能够进行更灵活的能带设计,同时避免了含Al组分多元合金易氧化的问题。使用经验紧束缚方法进行能带结构设计,使得nBn势垒型探测器的势垒层与吸收层具有对齐的价带排列

和大的导带偏移,从而充分阻挡多数载流子的输运,并允许光生少数载流子的自由流动。基于 AlAsSb/InAsSb 势垒的 nBn 型中波红外探测器,在量子效率的偏压依赖性得到显著降低的同时,具有优越的暗电流性能。

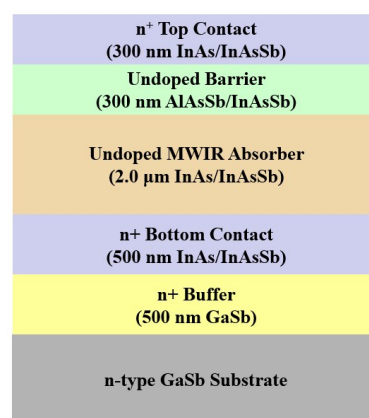
1 器件结构设计

暗电流和量子效率是衡量红外探测器探测性能的重要指标,为了实现器件的高温工作,需要兼顾抑制暗电流和提高量子效率两个方面。然而,器件吸收层采用的 InAs/InAsSb II 类超晶格材料面临着少子空穴垂直扩散长度短和光学吸收弱等挑战^[32],限制了器件的量子效率。这是由于 InAs/InAsSb II 类超晶格的 InAsSb 层引入了较高的压缩应变,需要较厚的 InAs 层引入拉伸应变进行补偿,这一方面加大了 InAsSb 量子阱的分离,导致空穴在外延生长方向的有效质量增大,扩散长度减小;另一方面减弱了 InAs 量子阱中电子波函数和 InAsSb 量子阱中空穴波函数的空间交叠,导致吸收系数降低。为了克服这些问题,本结构设计采用了高 Sb 组分(Sb 组分达到 0.5)的 InAs/InAs_{0.5}Sb_{0.5} 超晶格吸收层,原子层数(MLs)为每周期 10/2。通过提高 InAs/InAsSb II 类超晶格的 Sb 组分,可以在单个超晶格周期内减小 InAs 和 InAsSb 层的厚度,增加电子-空穴波函数的交叠,从而获得更高的吸收系数和量子效率。吸收层材料的带隙宽度约为 0.27 eV。

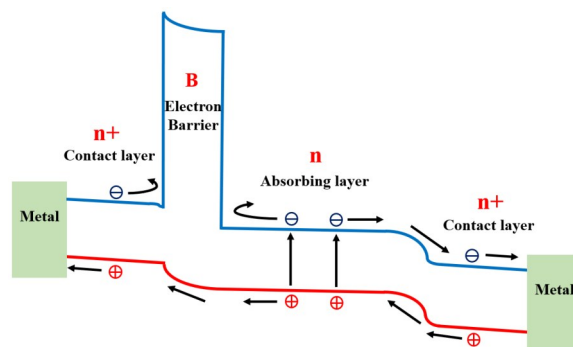
为了充分抑制暗电流,同时减小量子效率的偏压依赖,nBn 单极势垒结构在吸收层和势垒层的异质结界面处需要具有足够高的导带偏移和接近零的价带偏移。为了满足这些要求,本结构设计选用 AlAsSb/InAsSb 超晶格作为势垒层材料。AlAsSb 与 InAsSb 之间存在巨大的导带偏移,可以将电子限制在很深的量子阱中,从而实现宽带隙的电子势垒。同时 AlAsSb/InAsSb 超晶格的价带取决于 InAsSb 层的组分和厚度,通过调节 InAsSb 层的组分和厚度可以调节价带位置。为了简化外延生长过程,势垒层超晶格选用了与吸收层相同的 Sb 组分。根据以上设计思想,设计的势垒层超晶格结构为每周期 3/5 MLs AlAs_{0.5}Sb_{0.5}/InAs_{0.5}Sb_{0.5},带隙宽度约为 0.85 eV。

图 1(a)为中波 nBn 器件结构示意图,器件由 n 型上接触层、宽带隙势垒层、n 型吸收层和 n 型下接触层组成。n 型上接触层较薄,可以减少光子在到达吸收层之前的损耗,提高量子效率。采用经验紧束缚方法(Empirical Tight-Binding Method, ETBM)

计算了 nBn 结构器件导带和价带的能带结构,如图 1(b)所示。吸收层与势垒层的价带对齐,能带偏移几乎全部落在导带内,导带偏移约为 0.71 eV。这意味着器件具有足够大的导带偏移,AlAsSb/InAsSb 单极势垒可以有效阻挡多数载流子的输运。同时,器件中不存在空穴势垒,光生空穴可以通过势垒层快速输运到上接触层。基于 AlAsSb/InAsSb 超晶格的 nBn 结构实现了理想的载流子输运和收集的效果,能够有效抑制暗电流、增大光电流,并显著降低量子效率的偏压依赖性,从而获得信噪比高、探测性能优异的光电探测器。



(a)



(b)

图 1 nBn 结构光电探测器:(a)结构示意图;(b)能带结构图
Fig. 1 The nBn photodetector: (a) schematic diagram; (b) schematic band structure diagram

2 材料生长、器件制造与性能表征

设计了合适的器件结构后,采用 Veeco Gen II 固态源分子束外延(MBE)系统在 2 英寸的 n 型(001)GaSb 衬底上生长了 MWIR nBn 结构超晶格材料。首先在衬底上生长了厚度为 500 nm 的 GaSb 缓

冲层,用以光滑衬底表面、提高外延生长质量,随后依次生长 500 nm 厚的 n 型掺杂 ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) InAs/InAs_{0.5}Sb_{0.5} 下接触层,2 000 nm 厚的非故意掺杂 InAs/InAs_{0.5}Sb_{0.5} 吸收层,300 nm 厚的非故意掺杂 AlAs_{0.5}Sb_{0.5}/InAs_{0.5}Sb_{0.5} 电子势垒层,以及 300 nm 厚的 n 型掺杂 ($\sim 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) InAs/InAs_{0.5}Sb_{0.5} 上接触层。其中接触层采用硅(Si)作为 n 型掺杂剂。

外延生长材料后,通过标准光刻、刻蚀和金属化技术将样品制备为直径为 100~400 μm 的单元光电探测器。采用基于 BCl₃ 的电感耦合等离子体 (ICP) 干法刻蚀进行台面隔离,结合柠檬酸基湿法腐蚀溶液去除干法刻蚀中高能离子轰击导致的侧壁损伤。采用电子束蒸发在顶部和底部接触层沉积 50 nm Ti/50 nm Pt/300 nm Au 金属电极。器件未进行钝化,也没有涂覆抗反膜层。完成工艺流片后,将样品封装于液氮制冷的低温杜瓦瓶中进行光学和电学测试。利用 Bruker Vertex 80v 傅里叶变换红外光谱仪和 Keithley 570 电流放大器测试器件的光谱响应,结合 170 Hz 的斩波器调制的 500 °C 黑体源得出器件的响应度和量子效率。采用 Lake shore CPX 低温探针台和 Agilent B1500A 半导体器件参数分析仪测试了 100~300 K 温度范围内器件的变温暗电流特性。

3 结果与讨论

器件的光学性能如图 2 所示。器件在 150 K 条件下的 50% 截止波长为 $\sim 4.5 \mu\text{m}$,与器件吸收层的理论设计值相符合。器件在 $3.82 \mu\text{m}$ 处的峰值响应度为 1.82 A/W,对应 $2.0 \mu\text{m}$ 厚度的吸收区的量子效率为 58.8%。图 2(b) 的插图为 150 K 下器件在 $3.82 \mu\text{m}$ 处的量子效率随偏压的变化趋势,可以看出仅需 -50 mV 的反向偏压即可完全提取器件的光生载流子,表明器件光响应的偏压依赖性显著降低。通常情况下,nBn 结构器件的开启偏压在 -200~-400 mV 之间^[20-21, 27, 31],量子效率在 40%~60% 范围^[20, 26, 31]。本文提出的基于 AlAsSb/InAsSb 超晶格势垒的 nBn 结构有效降低了探测器量子效率的偏压依赖性,同时实现了较好的量子效率性能。量子效率仍有小的偏压依赖性,可能是由于势垒两侧的吸收区和接触层的掺杂水平不同,其中 n 型接触层为重掺杂以形成欧姆接触,吸收层则保持低掺杂水平,因此两侧费米能级不同,从而导致器件工作时需要外加一定偏压。需要注意的是,理想的 nBn 型势垒结构器件是传统意义上的光伏和光导器件的

结合,当势垒层与吸收层保持相同的掺杂类型时,该结构中没有 p-n 结结构,因而没有内建电场,需要外加小的偏压来实现光生载流子的充分提取。因此,通过优化能带设计和调整掺杂水平,可以进一步减小 nBn 结构器件的偏压依赖性,但是无法使器件在零偏压下工作。

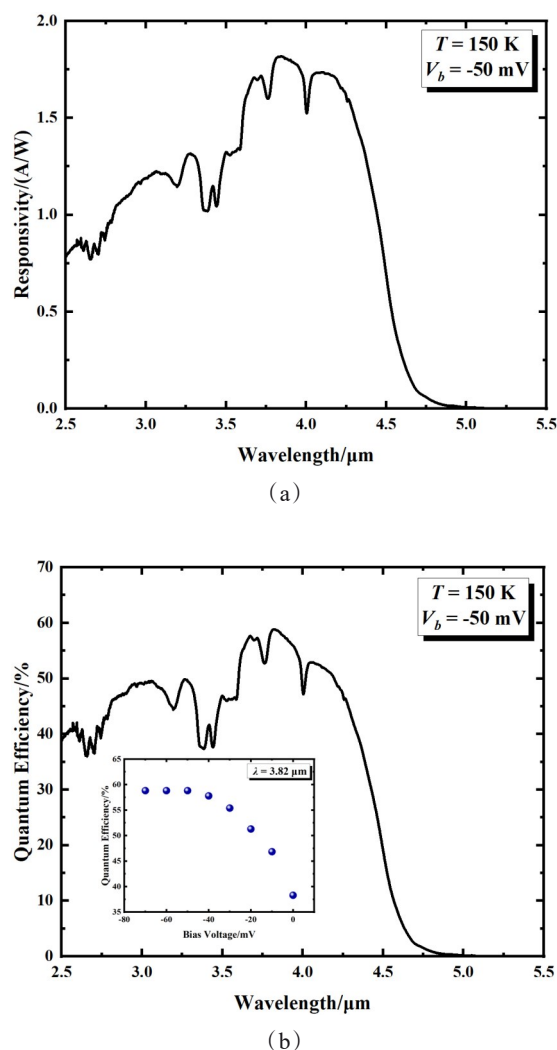


图2 nBn光电探测器在 150 K 和 -50 mV 反向偏压下的(a)响应度谱;(b)量子效率谱;插图为 $3.82 \mu\text{m}$ 处器件的量子效率随偏压的变化

Fig. 2 The nBn photodetector at 150 K and -50 mV applied bias: (a) responsivity spectrum; (b) quantum efficiency spectrum; the inset represents the quantum efficiency of the nBn photodetector at $3.82 \mu\text{m}$

图 3(a) 为台面直径为 $320 \mu\text{m}$ 的 nBn 光电探测器在 100~300 K 温度范围内的暗电流密度与偏压的依赖关系。在 -50 mV 偏压下,器件在 150 K 时的暗

电流密度为 $2.01 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$, 随着温度的升高, 暗电流密度逐渐增加, 在 300 K 时增大到 0.54 A/cm^2 。从图 3(a) 中可以看出, 当反向偏压大于 -100 mV 时, 在较高温度下, J - V 曲线的斜率较小, 器件暗电流以扩散暗电流为主, 但同时存在较小比例的产生-复合暗电流。在较低的温度下, J - V 曲线的斜率相对较大, 产生-复合暗电流所占比例更大。nBn 器件中的产生-复合暗电流主要来源于外加反向偏压下, 势垒层与吸收层界面附近形成的耗尽电场, 随着温度的降低或反向偏压的增大, 产生-复合电流变得更为显著。图 3(b) 为 -50 mV 的饱和偏压下, 器件在 100~300 K 温度范围内的暗电流密度与温度倒数 ($1000/T$) 的 Arrhenius 指数关系图。根据公式 (1), 可以拟合得出光电探测器在不同温度下的暗电流主导机制^[16]:

$$J_d(T) \sim T^{\frac{3}{m}} \exp\left(-\frac{E_g}{mk_B T}\right) \approx H \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right), \quad (1)$$

其中, $m = 1$ 时暗电流为扩散主导, $m = 2$ 时暗电流为产生-复合主导, E_g 为禁带宽度, k_B 为玻尔兹曼常数, T 为器件温度, E_a 为活化能。当温度在 160~300 K 范围内, 由 Arrhenius 曲线的斜率拟合得到的活化能 E_a 约为 270 meV, 与根据响应光谱得到的器件吸收层的禁带宽度 275 meV 相近, 表明在 160~300 K 的温度范围内, 探测器的暗电流由扩散暗电流主导。在 100~160 K 范围内, Arrhenius 曲线斜率有明显转变, 拟合可得较低温度下器件的活化能 E_a 约为 181 meV, 接近吸收层禁带宽度的一半, 表明该温度范围内器件的暗电流由产生-复合暗电流主导。由于设计的 AlAsSb/InAsSb 超晶格势垒具有零价带偏移, nBn 器件实现了 -50 mV 的低饱和偏压, 避免了器件在高反向偏压下工作导致的较大产生-复合暗电流。势垒结构有效抑制了 160 K 以上的产生-复合暗电流, 有利于实现高工作温度性能。

在电学和光学表征后, 根据公式 (2) 计算了器件的探测率 (D^*):

$$D^* = R_i \left[2qJ + \frac{4k_B T}{R \times A} \right]^{-\frac{1}{2}}, \quad (2)$$

其中, R_i 为器件的响应度, J 为器件的暗电流密度, $R \times A$ 为微分电阻与结面积的乘积, q 为电荷电量。图 4(a) 为计算得出的器件在 150 K 下的探测率谱。在 -50 mV 的偏压下, 器件在 $3.82 \mu\text{m}$ 处的峰值探测率为 $6.47 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。图 4(b) 显示了 nBn 探

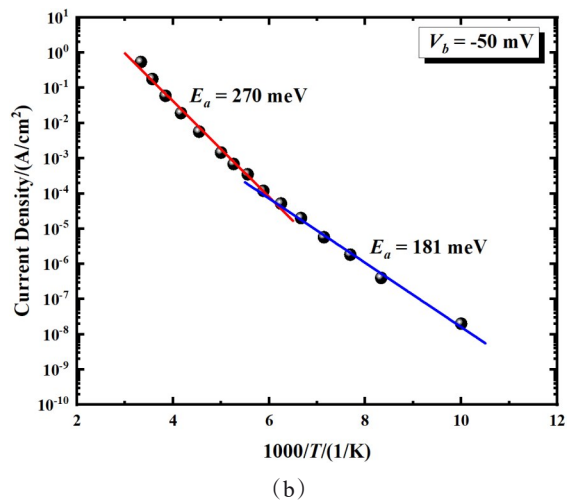
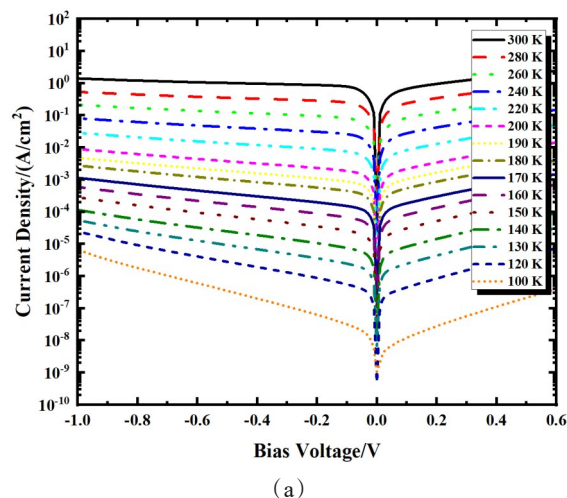


图3 nBn 光电探测器: (a) 100~300 K 下, 暗电流密度随外加偏压的变化; (b) -50 mV 下, 暗电流密度的 Arrhenius 图

Fig. 3 The nBn photodetector: (a) dark current density vs. applied bias characteristic at temperatures ranging from 100 K to 300 K; (b) Arrhenius plot of the dark current density under -50 mV applied bias

测器的探测率随温度的变化特性, 随着温度升高, 器件探测率由 100 K 时的 $2.05 \times 10^{13} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 下降到 300 K 时的 $3.25 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。在 2π 视场 (FOV) 和 300 K 温度背景下, 设定截止波长为 $3.82 \mu\text{m}$ 的理想探测器, 其背景限制探测率 (BLIP) 为 $4.17 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ 。如图 4(b) 所示, 器件在温度低于 150 K 时的探测率均高于 BLIP 探测率, 器件处于 BLIP 工作模式。通过优化器件结构设计和材料外延生长, 进一步抑制暗电流、提高量子效率, 可以获得更高的 BLIP 工作温度。

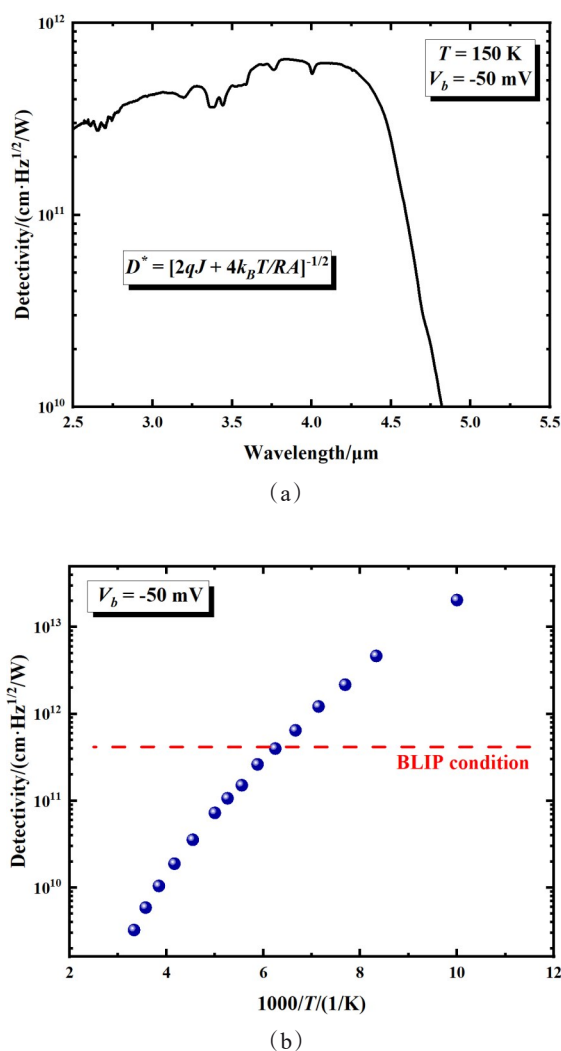


图4 nBn 光电探测器:(a) 150 K、-50 mV 下的探测率谱;(b) 3.82 μm 处,探测率随温度倒数的变化:虚线为 300 K 背景和 2π 视场的理想光电探测器的 BLIP 探测率

Fig. 4 The nBn photodetector: (a) specific detectivity spectrum at 150 K and -50 mV applied bias; (b) specific detectivity vs. $1000/T$ at 3.82 μm : the dotted line shows the BLIP detectivity for an ideal photodetector with 300 K background and 2π field of view

4 结论

综上所述,本文提出了一种具有 $\text{AlAs}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}/\text{InAs}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ 超晶格势垒的 nBn 结构 $\text{InAs}/\text{InAs}_{0.5}\text{Sb}_{0.5}$ 中波红外光电探测器。超晶格势垒层与吸收层之间具有零价带偏移,使得探测器在 -50 mV 的小反向偏压下实现光响应饱和,从而显著降低了 nBn 结构势垒探测器量子效率的偏压依赖性。在 150 K 下,光电探测器的 50% 截止波长为 4.5 μm ,峰值响应度为 1.82 A/W,饱和量子效率为 58.8%。测试了 100~

300 K 范围内暗电流密度-偏压的温度依赖性,提取了热活化能,分析了不同温度下势垒探测器的暗电流主导机制。测试结果表明,超晶格势垒显著抑制了产生-复合暗电流,器件在 160 K 以上具有扩散限制性能。探测器在 150 K 和 -50 mV 下的暗电流密度为 2.01×10^{-5} A/cm²,并在 3.82 μm 处达到 6.47×10^{11} cm·Hz^{1/2}/W 的峰值探测率。基于超晶格势垒的 nBn 结构中波红外探测器的 BLIP 温度达到 150 K,器件具有高温工作潜力。

References

- [1] Kaushal H, Kaddoum G. Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques [J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2016, **19**(1): 57-96.
- [2] Bui D A, Hauser P C. Analytical devices based on light-emitting diodes—a review of the state-of-the-art [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2015, **853**: 46-58.
- [3] Fleming L, Gibson D, Song S G, *et al.* Reducing N₂O induced cross-talk in a NDIR CO₂ gas sensor for breath analysis using multilayer thin film optical interference coatings [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2018, **336**: 9-16.
- [4] Klipstein P, Aronov D, Ben Ezra M, *et al.* Recent progress in InSb based quantum detectors in Israel [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2013, **59**: 172-181.
- [5] Rogalski A. HgCdTe infrared detector material: history, status and outlook [J]. *Reports on Progress in Physics*, 2005, **68**(10): 2267.
- [6] Alshahrani D O, Kesaria M, Anyebe E A, *et al.* Emerging Type-II Superlattices of InAs/InAsSb and InAs/GaSb for Mid-Wavelength Infrared Photodetectors [J]. *Advanced Photonics Research*, 2022, **3**(2): 2100094.
- [7] Donetsky D, Belenky G, Svensson S, *et al.* Minority carrier lifetime in type-2 InAs-GaSb strained-layer superlattices and bulk HgCdTe materials [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **97**(5): 052108.
- [8] Connolly B C, Metcalfe G D, Shen H, *et al.* Time-resolved photoluminescence study of carrier recombination and transport in type-II superlattice infrared detector materials [C]// *Infrared Technology and Applications XXXIX*. SPIE, 2013, **8704**: 266-274.
- [9] Olson B V, Shaner E A, Kim J K, *et al.* Time-resolved optical measurements of minority carrier recombination in a mid-wave infrared InAsSb alloy and InAs/InAsSb superlattice [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, **101**(9): 092109.
- [10] Hoglund L, Ting D Z, Khoshakhlagh A, *et al.* Influence of radiative and non-radiative recombination on the minority carrier lifetime in midwave infrared InAs/InAsSb superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(22): 221908.
- [11] 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.
- [12] Manissadjian A, Rubaldo L, Rebeil Y, *et al.* Improved

- IR detectors to swap heavy systems for SWaP[C]//Infrared Technology and Applications XXXVIII. SPIE, 2012, **8353**: 1085–1093.
- [13] Martyniuk P, Rogalski A. HOT infrared photodetectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2013, **21**(2): 239–257.
- [14] Kinch M A. The Future of Infrared; III-Vs or HgCdTe? [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, **44**(9): 2969–2976.
- [15] Maimon S, Wicks G W. nBn detector, an infrared detector with reduced dark current and higher operating temperature [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89** (15): 151109.
- [16] Rhiger D R, Smith E P, Kolasa B P, *et al.* Analysis of III-V Superlattice nBn Device Characteristics [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, **45**(9): 4646–4653.
- [17] Martyniuk P, Rogalski A. Modeling of InAsSb/AlAsSb nBn HOT detector's performance limit[C]//Infrared Technology and Applications XXXIX. SPIE, 2013, **8704**: 564–572.
- [18] Kim Y, Alotaibi S, Henini M, *et al.* Uncooled mid-wavelength InAsSb/AlAsSb heterojunction photodetectors [J]. *Appl Materials*, 2023, **11**(8): 081104.
- [19] Soibel A, Ting D Z, Rafol S B, *et al.* Mid-wavelength infrared InAsSb/InAs nBn detectors and FPAs with very low dark current density [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **114**(16): 161103.
- [20] Ting D Z, Soibel A, Khoshakhlagh A, *et al.* Mid-wavelength high operating temperature barrier infrared detector and focal plane array [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, **113**(2): 021101.
- [21] Ting D Z, Rafol S B, Keo S A, *et al.* InAs/InAsSb Type-II Superlattice Mid-Wavelength Infrared Focal Plane Array With Significantly Higher Operating Temperature Than InSb [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2018, **10**(6): 1–6.
- [22] Haddadi A, Chevallier R, Chen G, *et al.* Bias-selectable dual-band mid-/long-wavelength infrared photodetectors based on InAs/InAs_{1-x}Sb_x type-II superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(1): 011104.
- [23] Wu D H, Dehzangi A, Razeghi M. Demonstration of mid-wavelength infrared nBn photodetectors based on type-II InAs/InAs_{1-x}Sb_x superlattice grown by metal-organic chemical vapor deposition [J]. *Applied Physics Letters*, 2019, **115**(6): 061102.
- [24] Wu D H, Li J K, 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.
- [25] Bishop G, Plis E, Rodriguez J B, *et al.* nBn detectors based on InAs/GaSb type-II strain layer superlattice [J]. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2008, **26** (3): 1145–1148.
- [26] Kim Y H, Lee H J, Kim Y C, *et al.* HOT InAs/InAsSb nBn detector development for SWaP detector[C]//Infrared Technology and Applications XLVII. SPIE, 2021, **11741**: 164–168.
- [27] Deng G R, Song X B, Fan M G, *et al.* Upside-down InAs/InAs_{1-x}Sb_x type-II superlattice-based nBn mid -infrared photodetectors with an AlGaAsSb quaternary alloy barrier [J]. *Optics Express*, 2020, **28**(9): 13616–13624.
- [28] Jiang J K, Wang G W, Wu D H, *et al.* High-performance infrared photodetectors based on InAs/InAsSb/AlAsSb superlattice for 3.5 μm cutoff wavelength spectra [J]. *Optics Express*, 2022, **30**(21): 38208–38215.
- [29] Rodriguez J B, Plis E, Bishop G, *et al.* nBn structure based on InAs/GaSb type-II strained layer superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **91**(4): 043514.
- [30] Wang D, Donetsky D, Kipshidze G, *et al.* Metamorphic InAsSb-based barrier photodetectors for the long wave infrared region [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, **103**(5): 051120.
- [31] Ariyawansa G, Duran J, Reyner C, *et al.* InAs/InAsSb Strained-Layer Superlattice Mid-Wavelength Infrared Detector for High-Temperature Operation [J]. *Micromachines*, 2019, **10**(12): 806.
- [32] Webster P T, Riordan N A, Liu S, *et al.* Absorption properties of type-II InAs/InAsSb superlattices measured by spectroscopic ellipsometry [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(6): 061907.