

激光与光电子学进展

锑基 II 类超晶格 InAs/InAsSb 红外探测器的研究进展

杜鹏飞, 叶伟^{*}, 萧生, 李梦飞

陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723001

摘要 新型材料结构的设计是提高红外探测器性能的有效途径。锑基 II 类超晶格 InAs/InAsSb 作为红外光敏材料时结构稳定, 且具有低暗电流、高温工作特性以及优越的光电转化效率, 是研制高温工作红外探测器的理想材料。综述了基于锑化物 II 类超晶格 InAs/InAsSb 的研究进展, 介绍了现阶段应用在典型单极势垒结构中的两种红外探测器性能, 并对锑化物 II 类超晶格 InAs/InAsSb 探测器的发展进行展望。

关键词 探测器; 锑化物; II 类超晶格; 红外探测器

中图分类号 TN215 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1700004

Research Progress of Antimony-Based Type-II Superlattice InAs/InAsSb Infrared Detector

Du Pengfei, Ye Wei^{*}, Xiao Sheng, Li Mengfei

School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, Shaanxi, China

Abstract The design of new material structure is an effective way to improve the performance of the infrared detector. Antimony-based type-II superlattice InAs/InAsSb, as infrared photosensitive material, has stable structure, low dark current, high temperature operating characteristics and superior photoelectric conversion efficiency, which is the ideal material for developing infrared detectors at high temperature. This paper reviews the research progress of antimony-based type-II super-lattices InAs/InAsSb, introduces the performance of two kinds of infrared detectors applied in typical unipolar barrier structures, and prospects the development of antimony-based type-II superlattice InAs/InAsSb.

Key words detectors; antimony compounds; type-II superlattice; infrared detector

1 引言

近年来, 基于半金属石墨烯、黑磷(BP)、过渡金属硫化物(TMDs)等二维材料及其异质结构的探测器引起了研究人员的广泛关注。随着红外技术的快速发展, 基于二维材料的探测器已经取得了较为理想的研究成果^[1], 包括超高的响应度、超广的探测波段以及超灵敏的光检测。研制尺寸更小、质量更轻以及具有低光子通量探测能力和可在高温环境中工作^[2]的中波红外光电探测器已经成为相关领域的热点。二维材料^[3]可以利用应变工程的灵活性调节器件的光电特性, 有望克服传统光电探测器在高温工作下的技术障碍。但二维材料及其光电探测器也面临着一些挑战, 如: 石墨烯的超高迁移率^[4]适用于高速光电探测器, 但其单原子层和零带隙会影响结构的光子吸收、外量子效率; 石墨

烯光电探测器产生的暗电流较大, 但同时伴随高噪声和高功耗等缺点; 宽带隙的TMDs可以克服石墨烯的缺点, 但其光响应波长范围有限, 且容易受到光载流子捕获效应的影响, 响应速度较慢; BP的带隙介于石墨烯和TMDs之间, 涵盖了从近红外到中波红外的光谱响应, 但其稳定性较差^[5]。II-VI半导体碲镉汞(MCT)是目前较成功的红外光电探测器材料, MCT生长在晶格匹配的碲锌镉(CZT)衬底上, 可以提供从短波红外(SWIR)到超长波红外(VLWIR)连续截止波长范围的覆盖, 也可以获取较高的外量子效率和较低的暗电流, 这对器件的性能有较大的改善。高质量的材料是制备高性能光电器件的基础保障^[6], III-V族半导体的离子化学键更少, 比II-VI族半导体更坚固。因此, 用III-V族半导体锑化物作为红外探测器材料时可获得更好的器件性能。

收稿日期: 2021-11-12; 修回日期: 2022-01-03; 录用日期: 2022-01-11

基金项目: 陕西省教育厅专项科学研究计划(17JK0144, 18JK0151)、陕西理工大学人才启动项目(SLGQD2017-19)

通信作者: *yewei518@163.com

为了提高红外探测器的工作性能,人们针对新型材料体系超晶格选择和器件结构设计进行了研究。如 Woolley 等^[7]研制出Ⅲ-V 族锑化物 InAsSb 材料,该材料表现出了高电子迁移率和光学吸收系数以及低热产生率等优异特性。基于锑的Ⅲ-V 族材料可以显著改善器件暗电流和噪声性能,这与目前较先进的 MCT 探测器形成竞争,且目前各种类型的Ⅱ型超晶格(T2SL)结构,如 NBN^[8-10]、互补势垒红外探测器(CBIRD)^[11]、W 结构^[12]、M 结构^[13]、N 结构^[14]、双势垒异质(PBIBN)结构^[15]和 PBN 探测器已经被证明具有良好的工作性能。

InAs/InAsSb T2SL 比 InAs/GaSb T2SL 具有更长的少数载流子寿命^[16],能很好地改善器件的高温工作性能。Wu 等^[17]设计出了高温工作条件下基于 InAs/InAsSb T2SL 的中波长 PBN 探测器,该探测器在高温(300 K)和施加偏压(-50 mV)时对应的暗电流密度为 0.44 A/cm²,外量子效率为 39%,比探测率为 $2.5 \times 10^9 \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}$,表现出良好的高温工作性能。红外探测器目前正处于第三代向第四代发展的过渡阶段,高性能、高冷却速度的探测器在未来应用中具有重要意义,为了将锑基Ⅱ类超晶格 InAs/InAsSb 更好地应用在红外探测器的过渡阶段,研究人员将目光集中到了容易实现大面积低缺陷材料生长、器件工艺成熟、性能优越的锑基Ⅱ类超晶格红外探测器上。因

此,本文主要综述了锑基Ⅱ类超晶格 InAs/InAsSb 的研究进展,介绍了现阶段应用在两种单极势垒结构探测器上的工作性能,并对锑基Ⅱ类超晶格 InAs/InAsSb 探测器的发展进行了展望。

2 锑化物 InAs/InAsSb T2SL 的研究进展

在半导体超晶格材料体系中,基于Ⅲ-V 族半导体的超晶格材料是人们的研究热点,其带隙在 0.1~1.7 eV 之间,可作为红外波段光电子器件的材料,也可应用在工业检测、监控、测温、医学以及光电搜索、侦探、气象卫星和气候监测^[18-19]等方面。Esaki 等^[20]首次提出超晶格概念,从理论上考虑单晶半导体中的一维周期势(超晶格)。在外延生长过程中通过控制合金成分或掺杂杂质密度的周期性可以获得超晶格,如图 1 所示。其中,实线和虚线分别表示正弦和周期方阵势, E_g 为半导体材料的禁带宽度, V 为周期超晶格的幅值。图 1(a) 为单晶半导体中施主或受主杂质的周期性交替变化,在导带 E_c 和价带 E_v 中,电子能量作为超晶格方向上距离的函数,为施主和受主杂质的交替生长形成周期性结构。在交替杂质体系中,周期超晶格峰与峰之间的幅值在理论上可以取能带间隙范围内的任意值。但在合金成分交替体系中,该值约为两种材料能量带隙的一半左右,图 1(b) 为合金成分的周期性变化图。

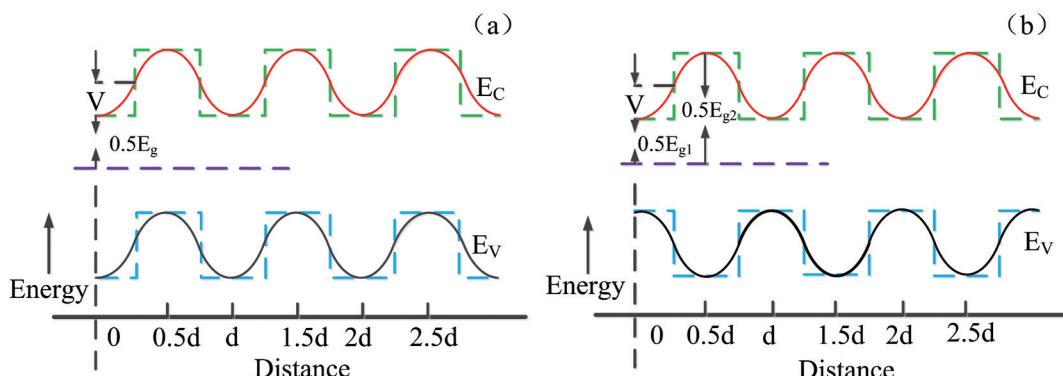


图 1 半导体材料超晶格示意图。(a)单晶半导体中杂质的周期性变化;(b)合金成分的周期性变化^[20]

Fig. 1 Schematic diagram of superlattice of semiconductor materials. (a) Periodic change of impurity in single crystal semiconductor; (b) periodic change of alloy composition^[20]

Smith 等^[21]的研究表明,Ⅱ类短周期 InAs/GaSb 超晶格可以获得足够薄的窄带隙材料,且该材料具有良好的光学吸收特性。图 2 为 InAs/GaSb T2SL 带隙的结构示意图。其中,相邻 InAs 层间电子波函数的重叠使导带中形成了电子微带,相邻 GaSb 层间空穴波函数的重叠使价带中形成了空穴微带。GaSb 层的空穴带和 InAs 层电子带间的间接跃迁可用于红外辐射检测。空穴微带和电子微带分别在价带和导带,当红外辐射照射到 InAs/GaSb T2SL 时,分布在空穴微带中的电子吸收光子的能量跃迁到导带微带,将价带最低点和导带最高点间的能量差作为 InAs/GaSb T2SL 的有效

带隙,这种有效带隙取决于层的厚度和界面的组成。

高性能制冷型红外探测器均采用半导体化合物材料,在Ⅲ-V 族半导体中,可将大量 InAsSb 生长在缓冲层上以实现宽范围截止波长的调节。最新研究表明, InAsSb 材料可实现的截止波长 λ 约为 12.4 μm ^[23]。晶格相互匹配的Ⅲ-V 族半导体 T2SL 在截止波长方面具有很高的灵活性,可以达到较高的量子效率,且相比其他族类的半导体,不易受带间隧穿的影响^[16]。InAsSb、InAlSb 制备探测器的工艺相对简单、成本较低,是高温工作红外探测器领域的重要材料。InAsSb 材料具有Ⅲ-V 族半导体中最小的带隙,但 InAs_{1-x}Sb_x

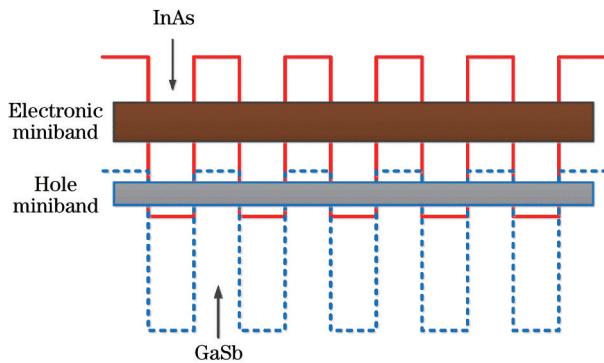


图 2 II 类 InAs/GaSb 应变层超晶格的带隙结构^[22]

Fig. 2 Bandgap structure of type-II InAs/GaSb strained layer superlattice^[22]

材料的能量并没有完全控制在中等成分范围内,因此, InAsSb 在较低温度(77 K)和 8~14 μm 波长范围内工作时没有足够小的带隙。为了解决上述问题,人们设计出一种新的 III-V 族 InAs/InAsSb T2SL 结构^[24]。该结构由若干交错的薄晶体层组成,通过 II 类能带排列,T2SL 的有效能带比单个材料组成的结构更窄,可以保持晶格匹配或应变平衡条件,从而实现窄带隙目的。此外,用 InAs/InAsSb T2SL 替代 InAs/GaSb T2SL 可以提高超晶格材料的少数载流子寿命,降低器件的暗电流。将 InAs/InAsSb T2SL 作为器件吸收层的红外

探测器,具有生长简单、缺陷容错性好以及载流子寿命长的优点,可以很好地降低器件的暗电流^[25]。采用合适的工艺可以提高器件的表面质量,进而降低噪声电流,提高系统的检测性能^[26],但会导致器件的截止波长变小^[27],光吸收减弱等问题。为了实现高量子效率,需要将构成器件的材料外延生长在优质且晶格匹配的材料衬底上。与同类 InSb 与 MCT 器件一样,基于 InAs/InAsSb 的红外探测器能在高温条件下工作的同时保有 III-V 族半导体加工工艺简单的优势。在中波红外(MWIR)和长波红外(LWIR)探测器中用 InAs/InAsSb T2SL 作为吸收层时,可使探测器表现出优异的工作性能。用微透镜和微环谐振器^[28]可以增强 InAs/InAsSb T2SL 红外探测器的光谱响应。大多数 InAs/InAsSb T2SL 结构通过分子束外延(MBE)技术生长在 GaSb 衬底上^[25],也可以通过金属氧化物化学气相沉积(MOCVD)技术生长^[29-30]。生长在 Si、GeSi、AlSb^[31] 和 GaAs^[32] 衬底上的技术也有报道,但不同的生长条件会引起材料中残余应变和带隙的变化。InAs 和 InAsSb 之间的三种能带对齐示意图如图 3 所示。其中:图 3(a) 为具有低 Sb 组分和有序排列的 InAs_{1-x}Sb_x 超晶格结构^[33];图 3(b) 为 InAs/InAs_{0.93}Sb_{0.07} 生长在 InAs 衬底上的结构示意图^[34];图 3(c) 为通过磁传输测量给出的两个跃迁质量降低的最低结果^[35]。

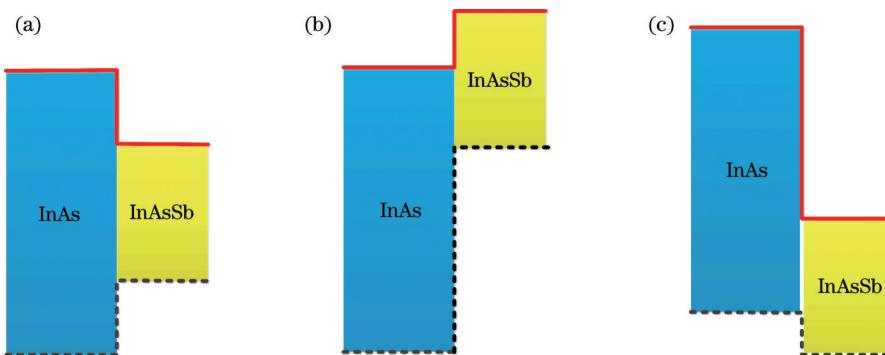


图 3 InAs 和 InAsSb 的能带对齐示意图。(a) 低 Sb 组分和有序排列的 InAs_{1-x}Sb_x 超晶格结构; (b) 生长在 InAs 衬底上的 InAs/InAs_{0.93}Sb_{0.07} 结构; (c) 两个跃迁的质量降低结果

Fig. 3 Schematic diagram of the band alignment between InAs and InAsSb. (a) InAs_{1-x}Sb_x superlattice structure with low Sb component and ordered arrangement; (b) InAs/InAs_{0.93}Sb_{0.07} structure grown on InAs substrate; (c) mass reduction results for two transitions

对于 MWIR 和 LWIR, InAs/GaSb 是最常用的 T2SL 吸收层, InAs/GaSb 的发展已经比较成熟,通过调节 InAs 和 GaSb 的厚度可以改变超晶格材料的禁带宽度,实现 3~32 μm 波段范围内的红外探测^[36]。该材料在能带结构方面表现出了较大的价带偏移,但少数载流子寿命较低,导致器件的暗电流过高。InAs/InAsSb T2SL 很好地弥补了少数载流子寿命较短的不足,使器件产生的暗电流较小,用该材料制成的探测器可以在 MWIR 范围内工作,但其吸收效率和空穴迁移率较低^[37-38],导致器件光学性能下降。MWIR 的 InAs/InAsSb T2SL 红外焦平面阵列比 InSb 的工作温度至

少提高了 40~50 K,因此, InAs/InAsSb T2SL 在许多成像应用中取代了 InSb 红外焦平面阵列技术,且其在低温下具有非常低的暗电流密度,适用于更高要求的应用场合。将 Ga 原子引入 InAs 层中^[39],可改善材料的吸收效率和光学性能,形成 InGaAs/InAsSb T2SL 结构。InGaAs/InAsSb T2SL 是一种新型本征吸收窄禁带半导体材料,生长在晶格匹配的 InP 或 GaSb 衬底上,具有灵活的设计空间,可实现整个红外波段内响应光谱的调节。此外,研究人员还提出一类新的锑化物,即 II 类四元合金超晶格结构材料,进一步完善了超晶格材料体系。

3 锑化物 InAs/InAsSb T2SL 应用的典型势垒结构

InAs/InAsSb T2SL 红外探测器的结构主要有 PIN 光电二极管和势垒结构光电探测器。PIN 光电二极管主要由 P 型、无意掺杂 I 层和 N 型半导体材料组成。势垒光电探测器包括 NBN 结构、PBN 结构、p-π-M-n 结构、pMp 结构等。为了减小器件的暗电流，人们提出了不同类型势垒结构的探测器。对于Ⅲ-V 族半导体化合物，可根据实际目的设计出符合需要的材料结构，以抑制扩散、带间隧穿和复合电流的产生。

3.1 NBN 结构

White 在 1983 年首次提出了一种高阻抗的光电导体势垒探测器^[40]。相比其他结构的探测器，NBN 结构最大的特点是用高势垒层取代 PN 结中的耗尽层。Maimon 等^[41]的研究表明，单势垒结构通过抑制 SRH 过程减小复合电流的产生和器件的表面漏电流等多种情况，进而抑制暗电流的产生。

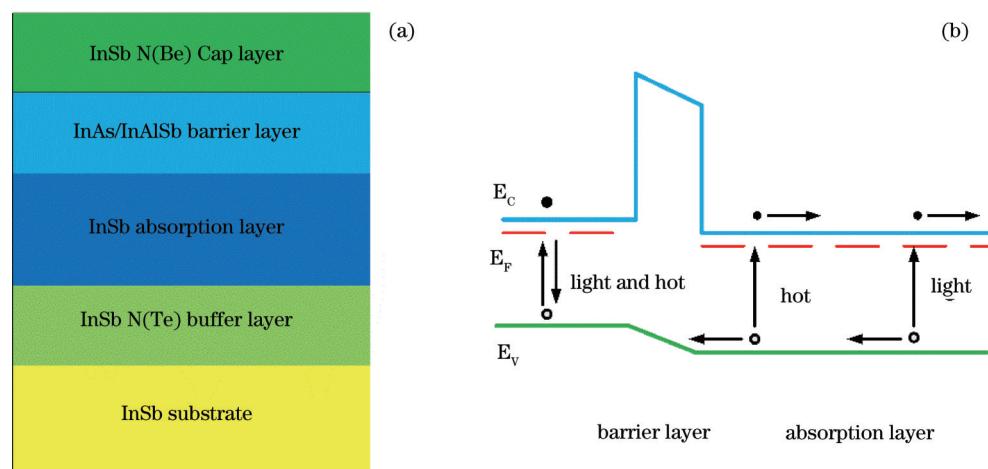


图 4 器件的结构示意图。(a)NBN 结构探测器；(b)理想 NBN 结构在反偏压下的能带图

Fig. 4 Schematic diagram of device structure. (a) NBN structure detector; (b) energy band diagram ideal NBN structure under reverse bias

Delli 等^[45]报道了外延生长锑化物 InAs/InAsSb T2SL 的 NBN 探测器，该器件在 200 K 温度和 100 mV 反向偏压下的截止波长为 5.5 μm，暗电流密度为 1.4×10^{-2} A/cm²，响应率为 0.88 A/W，比探测率为 1.5×10^{10} cm·Hz^{1/2}·W，表现出良好的工作性能。

3.2 PBN 结构

为了解决传统 NBN 势垒探测器需要施加偏置电压的操作，人们提出了具有零偏置电压操作优势的 PBN 势垒探测器^[16]。目前，已有的 PBN 势垒探测器的性能非常有限，特别是零偏置下的工作特性没有得到很好的证明^[46]。PBN 结构由 P 型接触、宽带隙阻挡层和 N 型吸收层三部分组成。大部分损耗电场会穿过宽带隙阻挡层，从而抑制暗电流的生成。在器件结构中，当接触层为 P 型掺杂时，可以确保势垒相对于吸收层

NBN 结构主要由 N 型吸收层、势垒层以及 N 型电极层三部分构成。以锑化物 InAs/InAsSb T2SL 为例，组成 NBN 势垒探测器的结构示意图如图 4(a)所示。其中，InAs/InAsSb 作为单极势垒层，可以有效抑制器件产生的暗电流。NBN 结构对材料的能带要求较高，在晶格匹配的 InAs、GaSb 和 AlSb 材料体系中能够满足要求，将 T2SL 材料用在这种结构中也可以很好地改善器件性能。西北大学的量子器件研究中心(CQD)、IAF 等机构已经对 NBN 结构器件中的 InSb、InAsSb 和 InAs/InAsSb T2SL 等材料体系进行了大量研究，且取得了一定的研究成果^[42]。在理想的 NBN 结构中，势垒层价带与吸收层价带的能级差为零，势垒全部在导带，电子层的光生或热生电子无法到达吸收层，最终与空穴复合，没有电流产生^[43-44]，在吸收层产生的载流子均能顺利到达两侧电极产生信号，理想 NBN 结构在施加反向偏压时，其能带结构示意图如图 4(b)所示。其中，E_c 为导带，E_F 为费米能级，E_v 为价带，light 和 hot 表示光热复合。

有一个近似为零的价带偏移量，同时，也没有空穴转移的障碍^[47]，使器件实现零偏置。InAsSb 材料的红外焦平面阵列研究取得了很好的进展，利用Ⅲ-V 族 InAs/InAsSb T2SL 组成的单势垒或双势垒结构成功实现了器件在高温条件下的工作目的。Ⅲ-V 族锑化物材料和 PBN 结构演化示意图如图 5 所示。当器件的工作温度达到 77 K 以上时，载流子的热产生会增加暗电流的生成^[48]。图 5(a) 中，以 InSb 作为器件的衬底，其外延 P⁺-N-N⁺ 结构的工作温度约 100 K。随着工作温度的增加，电子泄漏从 P⁺ 接触区开始产生暗电流。因此，通过改进结构抑制这种电子泄漏路径，如图 5(b) 所示。其中，在 P⁺ 接触区和 N 吸收区之间嵌入一层很薄的 P⁺ 型 In_{1-x}Al_xSb 层，得到 P⁺-P⁺-N-N⁺ 结构，即 PBN 结构。对于嵌入层 P⁺ 型 In_{1-x}Al_xSb，其厚度足够小，没有超过

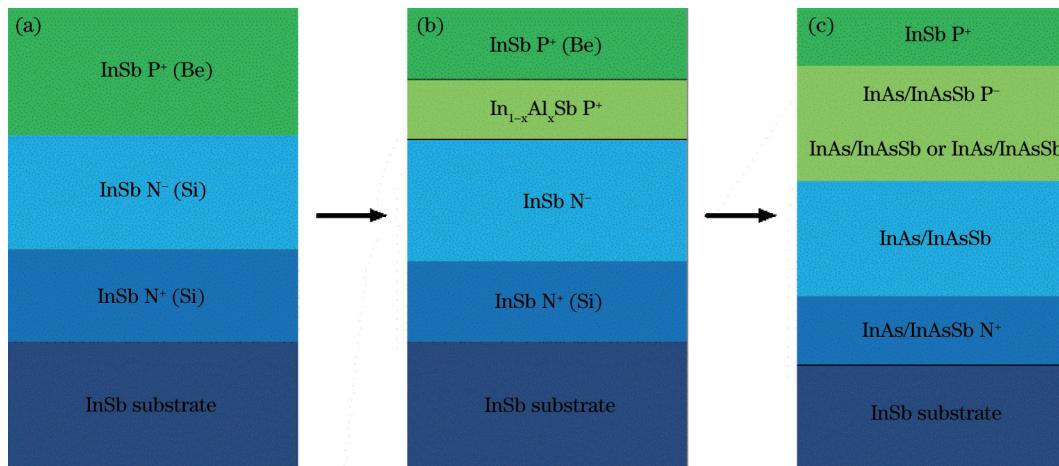
图 5 器件结构示意图。(a) P^+ -N- N^+ 结构探测器; (b) PBN 结构探测器; (c) 双势垒 PBN 结构探测器

Fig. 5 Schematic diagram of the device structure. (a) P^+ -N- N^+ structure detector; (b) PBN structure detector; (c) double barrier PBN structure detector

应变松弛的临界厚度,且具有和 InSb 相同的平面晶格常数。为了进一步减小高温工作时的暗电流,引入两种宽带隙势垒结构,将 PN 结的耗尽区从低带隙吸收区扩展到宽带隙势垒区,如图 5(c) 所示,该结构能抑制复合电流和隧穿电流的产生。

基于 PBN 结构的演化,Wu 等^[49]通过引入双势垒结构的设计研制出基于 PBN 结构的高性能 InAs/InAsSb T2SL 中波长红外探测器。在 150 K 温度和 -120 mV 的偏置电压下,该探测器的暗电流密度为 $1.21 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$,比探测率为 $6.9 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}$ 。

除上述两种典型的势垒结构,单极势垒器件 (PBP)^[50]、CBIRD^[51] 两种结构也有报道。图 6 为两种能带结构示意图。其中:图 6(a) 为 PBP 结构的能带示意图,接触层和吸收层均采用 P 型应变层材料(如 InAs 或 GaSb),势垒层采用 T2SL 结构的材料(如 InAs/AlSb),这样就可以保证 GaSb 衬底晶格的匹配;图 6(b) 为 CBIRD 结构的能带示意图,空穴势垒层和电子势垒层之间是吸收层。各层材料为 N 型 InAs 或 AlSb、InAs/GaSb T2SL 和 P 或 N 型 InAlSb。这两种结构的器件在工作时表现出良好的性能。

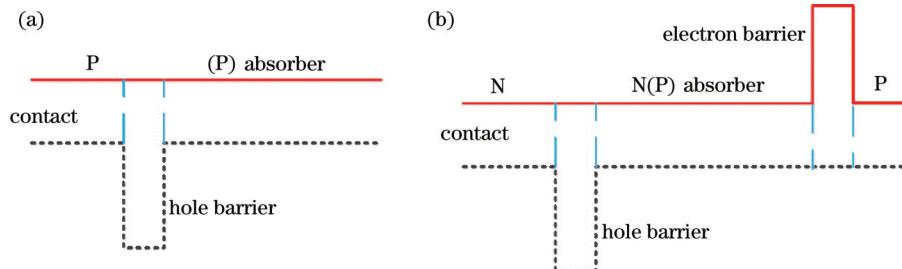


图 6 器件的能带结构示意图。(a) PBP 结构; (b) CBIRD 结构

Fig. 6 Schematic diagram of band structure of device. (a) PBP structure; (b) CBIRD structure

随着 II 类超晶格技术及理论的不断完善,基于锑化物 InAs/InAsSb T2SL 的雪崩探测器(APD)目前尚处于探索阶段。Mallick 等^[52]首次报道了 InAs/GaSb T2SL 的中波长红外 APD,在 77 K 温度下的响应截止波长约为 4.1 μm ,在施加负偏压 20 V 下的增益可达到 600。Ong 等^[53]报道了作为吸收层的 InGaAs/GaAsSb T2SL 的 APD,其吸收截止波长为 2.5 μm ,响应度为 0.47 A/W 。Huang 等^[54]设计了一种高增益、低噪声的 InAs/GaSb T2SL 的 APD,但该探测器的性能只是仿真结果。目前,关于锑化物 T2SL 的 APD 报道较少,但随着 II 类超晶格技术及理论的不断完善,基于锑化物 II 类超晶格 InAs/InAsSb 的 APD 在未来的应用中

具有一定的发展潜力。

4 结 论

锑化物 InAs/InAsSb T2SL 作为红外探测器高温工作下的理想材料,在不同应用领域中将会有许多关键的挑战。近年来,人们对 III-V 族材料外延生长理论和工艺的研究使 T2SL 技术有了显著的进展。此外, InAs/InAsSb 超晶格的提出,避免了引入 Ga 后在禁带中产生复合中心,有效提高了少数载流子寿命,且随着 II 类超晶格技术及理论的不断完善,锑化物超晶格红外波焦平面技术在可操作性、均匀性、稳定性以及可扩展性上的优势将更明显。基于锑化物 II 类超晶格

InAs/InAsSb 的 APD 目前尚处于探索阶段,但具有一定的发展潜力,该研究对基于锑化物第三代向第四代红外探测器的发展具有重要研究意义和实用价值。

参 考 文 献

- [1] Li J H, Niu L Y, Zheng Z J, et al. Photosensitive graphene transistors[J]. Advanced Materials, 2014, 26(31): 5239-5273.
- [2] Martyniuk P, Rogalski A. HOT infrared photodetectors [J]. Opto-Electronics Review, 2013, 21(2): 239-257.
- [3] 胡万彪, 张婉, 顾成鼎. 二硫化钼光电探测器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1900006. Hu W B, Zhang W, Gu C D. Review of molybdenum disulfide photodetectors[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1900006.
- [4] 李晨, 杨研伟, 夏田, 等. 基于木材上激光诱导石墨烯集成传感器的研究[J]. 中国激光, 2022, 49(2): 0202005. Li C, Yang Y W, Xia T, et al. Integrated sensor based on laser-induced graphene on wood[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(2): 0202005.
- [5] Long M S, Wang P, Fang H H, et al. Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(19): 1803807.
- [6] 王江, 罗林保. 基于氧化稼日盲紫外光电探测器的研究进展[J]. 中国激光, 2021, 48(11): 1100001. Wang J, Luo L B. Advances in Ga₂O₃-based solar-blind ultraviolet photodetectors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(11): 1100001.
- [7] Woolley J C, Smith B A. Solid solution in a IIIBV compounds[J]. Proceedings of the Physical Society, 1958, 72(2): 214-223.
- [8] Soibel A, Hill C J, Keo S A, et al. Room temperature performance of mid-wavelength infrared InAsSb nBn detectors[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 70: 121-124.
- [9] Klem J F, Kim J K, Cich M J, et al. Comparison of nBn and nBp mid-wave barrier infrared photodetectors[J]. Proceedings of SPIE, 2010, 7608: 76081P.
- [10] 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.
- [11] Rafol S B, Soibel A, Khoshakhlagh A, et al. Performance of a 1/4 VGA format long-wavelength infrared antimonides-based superlattice focal plane array [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2012, 48(7): 878-884.
- [12] Vurgaftman I, Canedy C L, Jackson E M, et al. Analysis and performance of type-II superlattice infrared detectors[J]. Optical Engineering, 2011, 50(6): 061007.
- [13] Nguyen B M, Hoffman D, Huang E K W, et al. Background limited long wavelength infrared type-II InAs/GaSb superlattice photodiodes operating at 110 K [J]. Applied Physics Letters, 2008, 93(12): 123502.
- [14] Salihoglu O, Muti A, Kutluer K, et al. "N" structure for type-II superlattice photodetectors[J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(7): 073505.
- [15] Gautam N, Kim H S, Kutty M N, et al. Performance improvement of longwave infrared photodetector based on type-II InAs/GaSb superlattices using unipolar current blocking layers[J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(23): 231107.
- [16] Aytac Y, Olson B V, Kim J K, et al. Effects of layer thickness and alloy composition on carrier lifetimes in mid-wave infrared InAs/InAsSb superlattices[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(2): 022107.
- [17] 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.
- [18] 吕衍秋, 鲁星, 鲁正雄, 等. 锑化物红外探测器国内外发展综述[J]. 航空兵器, 2020, 27(5): 1-12. Lü Y Q, Lu X, Lu Z X, et al. Review of antimonide infrared detector development at home and abroad[J]. Aero Weaponry, 2020, 27(5): 1-12.
- [19] 段雨晗, 丛明煜, 蒋大勇, 等. 电压调制 ZnO 紫外探测器光响应截止波长的研究[J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2004001. Duan Y H, Cong M Y, Jiang D Y, et al. Spectral response cutoff wavelength of ZnO ultraviolet photodetector modulated by bias voltage[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2004001.
- [20] Esaki L, Tsu R. Superlattice and negative differential conductivity in semiconductors[J]. IBM Journal of Research and Development, 1970, 14(1): 61-65.
- [21] Smith D L, Mailhiot C. Proposal for strained type-II superlattice infrared detectors[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 62(6): 2545-2548.
- [22] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M. InAs/GaSb type-II superlattice infrared detectors: future prospect[J]. Applied Physics Reviews, 2017, 4(3): 031304.
- [23] Svensson S P, Sarney W L, Hier H, et al. Band gap of InAs_{1-x}Sb_x with native lattice constant[J]. Physical Review B, 2012, 86(24): 245205.
- [24] Lackner D, Steger M, Thewalt M L W, et al. InAs/InAsSb strain balanced superlattices for optical detectors: material properties and energy band simulations[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(3): 034507.
- [25] Xu T F, Wang H L, Chen X Y, et al. Recent progress on infrared photodetectors based on InAs and InAsSb nanowires[J]. Nanotechnology, 2020, 31(29): 294004.
- [26] Tong J C, Tobing L Y M, Ni P N, et al. High quality InAsSb-based heterostructure n-i-p mid-wavelength infrared photodiode[J]. Applied Surface Science, 2018, 427: 605-608.
- [27] Ting D Z, Soibel A, Khoshakhlagh A, et al. Advances in III-V semiconductor infrared absorbers and detectors[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 97: 210-216.
- [28] Lubyshev D, Fastenau J M, Kattner M, et al. T2SL mid- and long-wave infrared photodetector structures grown on (211)B and (311)A GaSb substrates[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11002: 110020N.

- [29] 苑汇帛, 李林, 乔忠良, 等. MOCVD 生长 GaAsP/GaInP 量子阱材料的发光特性[J]. 中国激光, 2014, 41(5): 0506002.
- Yuan H B, Li L, Qiao Z L, et al. Optical characteristics of GaAsP/GaInP quantum well grown by metal-organic chemical vapor deposition[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(5): 0506002.
- [30] 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.
- [31] Durlin Q, Perez J P, Cerutti L, et al. Midwave infrared barrier detector based on Ga-free InAs/InAsSb type-II superlattice grown by molecular beam epitaxy on Si substrate[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 96: 39-43.
- [32] Michalczewski K, Kubiszyn Ł, Martyniuk P, et al. Demonstration of HOT LWIR T2SLs InAs/InAsSb photodetectors grown on GaAs substrate[J]. Infrared Physics & Technology, 2018, 95: 222-226.
- [33] Kurtz S R, Biefeld R M. Magnetophotoluminescence of biaxially compressed InAsSb quantum wells[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(3): 364-366.
- [34] Zhang Y H. Continuous wave operation of InAs/InAs_xSb_{1-x} midinfrared lasers[J]. Applied Physics Letters, 1995, 66(2): 118-120.
- [35] Tang P J P, Pullin M J, Li Y B, et al. A magneto-photoluminescence investigation of the band offset between InAs and arsenic-rich InAs_{1-x}Sb_x alloys[J]. Applied Physics Letters, 1996, 69(17): 2501-2503.
- [36] Ongstad A P, Kaspi R, Moeller C E, et al. Spectral blueshift and improved luminescent properties with increasing GaSb layer thickness in InAs-GaSb type-II superlattices[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(4): 2185-2188.
- [37] Zhang Y H. Antimonide-related strained-layer heterostructures[J]. Optoelectronic Properties of Semiconductors and Superlattices, 1997, 3: 461.
- [38] Sai-Halasz G A, Tsu R, Esaki L. A new semiconductor superlattice[J]. Applied Physics Letters, 1977, 30(12): 651-653.
- [39] 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.
- [40] Rogalski A, Martyniuk P, Kopytko M, et al. InAsSb-based infrared photodetectors: thirty years later on[J]. Sensors, 2020, 20(24): 7047.
- [41] 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.
- [42] Soibel A, Hill C J, Keo S A, et al. Room temperature performance of mid-wavelength infrared InAsSb nBn detectors[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(2): 023512.
- [43] Steenbergen E H. InAsSb-based photodetectors[M]// Tournié E, Cerutti L. Mid-infrared optoelectronics. Amsterdam: Elsevier, 2020: 415-453.
- [44] Klipstein P C, Livneh Y, Glozman A, et al. Modeling InAs/GaSb and InAs/InAsSb superlattice infrared detectors [J]. Journal of Electronic Materials, 2014, 43(8): 2984-2990.
- [45] Delli E, Letka V, Hodgson P D, et al. Mid-infrared InAs/InAsSb superlattice nBn photodetector monolithically integrated onto silicon[J]. ACS Photonics, 2019, 6(2): 538-544.
- [46] Deng G R, Chen D Q, Yang S P, 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.
- [47] Cohen-Elias D, Uliel Y, Cohen N, et al. Short wavelength infrared pBn GaSb/AlAsSb/InPSb photodetector [J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 85: 81-85.
- [48] Ashley T, Burke T M, Emeny M T, et al. Epitaxial InSb for elevated temperature operation of large IR focal plane arrays[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5074: 95-102.
- [49] Wu D H, Li J K, Dehzangi A, et al. High performance InAs/InAsSb type-II superlattice mid-wavelength infrared photodetectors with double barrier[J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 109: 103439.
- [50] Klipstein P C, Avnon E, Benny Y, et al. InAs/GaSb type-II superlattice barrier devices with a low dark current and a high-quantum efficiency[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 9070: 90700U.
- [51] 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.
- [52] Mallick S, Banerjee K, Ghosh S, et al. Midwavelength infrared avalanche photodiode using InAs-GaSb strain layer superlattice[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2007, 19(22): 1843-1845.
- [53] Ong D S G, Ng J S, Goh Y L, et al. InAlAs avalanche photodiode with type-II superlattice absorber for detection beyond 2 μm[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2011, 58(2): 486-489.
- [54] Huang J, Banerjee K, Ghosh S, et al. Dual-carrier high-gain low-noise superlattice avalanche photodiodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(7): 2296-2301.