

文章编号:1001-5078(2024)05-0750-08

· 红外材料与器件 ·

pπBn 型 II 类超晶格暗电流特性研究

闫勇, 王晓华, 周朋, 刘铭
(中国电子科技集团公司第十一研究所, 北京 100015)

摘要: InAs/GaSb II类超晶格(T2SL)红外探测器由于具有宽光谱探测能力、较好的材料均匀性、可以抑制载流子俄歇复合率和灵活的能带设计等优点,在长波红外探测领域具有很大的优势。但由于暗电流较大,其性能并未达到理论预测。pπBn结构是在超晶格材料的吸收层和接触层之间增加单极势垒,以抑制G-R暗电流和隧穿暗电流。本文分别从理论上研究了吸收层、势垒层和接触层的超晶格能带结构。模拟了pπBn结构的InAs/GaSb T2SL,研究了其吸收层掺杂浓度、势垒层掺杂浓度和势垒厚度对器件暗电流的影响。通过优化吸收层掺杂浓度、势垒层厚度和掺杂浓度,得到暗电流密度为 $8.35 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 的pπBn结构InAs/GaSb T2SL,与优化前的结构相比,暗电流降低了一个数量级。研究过程不仅为pπBn结构的InAs/GaSb T2SL器件的低暗电流设计提供了指导,而且为优化超晶格器件的暗电流提供了一种系统的方法。

关键词: InAs/GaSb; 能带结构; 暗电流密度

中图分类号: TN213; O436 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.05.014

Study on dark current characteristics of pπBn type-II superlattices

YAN Yong, WANG Xiao-hua, ZHOU Peng, LIU Ming
(The 11th Institute of CETC, Beijing 100015, China)

Abstract: InAs/GaSb type-II superlattice(T2SL) infrared detectors have great advantages in the field of long-wave infrared detection due to their broad-band detection capability, high material uniformity, suppressed Auger recombination rates and flexible energy band design. However, the performances do not reach the theoretical prediction due to the large dark current. The pπBn structure is designed to add a monopole barrier between the absorption layer and the contact layer of the detector to suppress the G-R dark current and tunneling dark current. In this paper, the superlattice band structure of absorption layer, barrier layer and contact layer are studied theoretically separately. This study simulates a InAs/GaSb T2SL with pπBn structure and study its doping concentration of the absorption layer, the doping concentration of the barrier layer and the thickness of the barrier layer to reduce the dark current. Through optimizing the doping concentration of the absorption layer, the thickness and the doping concentration of the barrier layer, the pπBn structure InAs/GaSb T2SL with dark current density of $8.35 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ is obtained, which reduces the dark current by one order of magnitude as compared with that of the structure before optimization. The research process not only provides guidance for designing the low dark current with pπBn structure device, but also develops a systematic method to optimize the dark current of superlattice device.

Keywords: InAs/GaSb; band structure; dark current density

1 引言

红外探测器是能把所接受的红外辐射转换成一种可以计量的物理量的器件,它作为红外探测的核

心部件,是决定红外探测技术的关键。InAs/GaSb II类超晶格红外探测器有以下优点:(1)基于III-V材料生长技术,大面积材料均匀性好、成本低;(2)

InAs 和 GaSb 两种材料之间的晶格失配只有 0.6%，因此有望在 GaSb 衬底上生长高质量的 InAs/GaSb T2SL 材料；(3) T2SL 带隙由势阱宽度和相邻量子阱之间的相互作用强度决定，通过仔细选择超晶格层厚度，T2SL 材料系统成为具有可调谐带隙的窄间隙半导体^[1]；(4) T2SL 结构使得 InAs 层作为电子的势阱，GaSb 层作为空穴的势阱，在实空间中将电子和空穴进行分离，能带结构使得重轻空穴分离，可以有效的抑制载流子俄歇复合，降低暗电流，提高探测器工作温度；(5) 电子有效质量大，在长波范围约为碲镉汞的 3 倍，由此决定了 II 类超晶格探测器带间隧穿电流小^[2]；(6) 理论计算结果显示在相同截止波长条件下 II 类超晶格探测器的探测率高于碲镉汞红外探测器^[2]；(7) 器件结构丰富，结合 MBE 生长技术实现了丰富的超晶格器件结构，例如：单色器件结构的 $p\pi Bn$ 结构^[3]、CBIRD 结构^[4]、 pMp 结构^[5]等，双色器件结构的短波 - 中波 $pin-p\pi Mn$ 结构^[6]、中波 - 长波 pBp 结构^[7]、长波 - 长波 pBp 结构^[8]等，以及三色器件结构^[9]。

InAs/GaSb T2SL 红外探测器性能尚未到达理论预测值的一个主要原因是其具有较高的暗电流，InAs/GaSb T2SL 红外探测器的暗电流远大于相应的 MCT 红外探测器^[10]。超晶格红外探测器的暗电流主要包括体暗电流和表面漏电流两部分。对于表面漏电流，较好的解决方法就是在制备工艺过程中提高表面质量，或者在材料表面制备钝化层来进行阻挡，提高器件的工作性能^[11]。体暗电流主要由扩散暗电流、产生 - 复合暗电流和隧穿暗电流三部分组成。探测器的体暗电流部分可以通过能带和器件结构设计来抑制。例如，通过在吸收层和势垒层之间插入单极势垒结构，可以有效的抑制超晶格红外探测器的产生 - 复合暗电流和隧穿暗电流^[12]。

InAs/GaSb T2SL 器件的体暗电流，可以通过势垒结构的设计来得到抑制。在光电探测领域， $p-i-n$ 二极管是替代简单 $p-n$ 结二极管的最常用方案，其基本理论与简单 $p-n$ 结类似。在 $p-i-n$ 光电二极管中，一个不掺杂的 i 区加持在 p^+ 区和 n^+ 区中间，作为主要的光吸收层。 p^+ 区和 n^+ 区作为接触层，结合外加电压的作用，实现对吸收层通过光电效应产生的光生载流子的收集，并且进一步将电信号传入读出电路中，实现对于信号的处理。最传统的 InAs/GaSb T2SL 红外探测器是基于 $p-i-n$ 结构实现的^[13]。不同的 T2SL 材料具有不同的带隙，可以在

InAs/GaSb T2SL 吸收层和接触层之间加入具有适当能带结构的超晶格材料作为单极势垒来减小器件的暗电流。所谓单极势垒，就是指在阻挡一种载流子移动的同时不会阻挡另一种载流子的移动。通常用于作为单极势垒的超晶格材料主要包括 M 结构的 InAs/GaSb/AlSb/GaSb 超晶格^[14] 和 B 结构的 InAs/AlSb 超晶格^[15]。扩散电流是光电二极管暗电流产生的最基本机制。它由多数载流子的扩散和少数载流子的漂移组成，这种暗电流可以通过提高材料质量来减小^[16]。由于通过 SRH 复合机制产生的 G-R 暗电流的激活能接近带隙的一半，这就可以使得耗尽区降落在势垒层的同时，极大的减小 SRH 复合机制产生的 G-R 暗电流^[17]。当势垒层材料的带隙大于吸收层带隙的两倍时，在较小的反向偏压下工作的 InAs/GaSb T2SL 器件的主导暗电流机制就会由 G-R 暗电流变为扩散暗电流，减小器件的暗电流，进一步可以提高器件的性能。另外，势垒的加入可以增大耗尽区的宽度，在固定电荷数量不变的情况下，可以削弱耗尽区中电场强度的大小，从而可以减小和电场作用有关的隧穿暗电流，进而提高器件工作性能^[18]。相对于 $p\pi Mn$ 结构超晶格而言， $p\pi Bn$ 超晶格势垒具有更宽的带隙。这就可以更好地保证 G-R 暗电流的减小，另外，在生长过程中，由于 InAs/AlSb 超晶格相对于 InAs/GaSb/AlSb/GaSb 超晶格结构更加简单，因此有利于高质量材料的制备^[3]。

在形成单极势垒的同时，需要将 InAs/GaSb T2SL 的耗尽区完全降落在势垒层中，避免在窄带隙的吸收层中出现耗尽区进而产生较大的 G-R 暗电流^[17]。而耗尽层的宽度和位置与弱 p 型吸收层^[19] 的掺杂浓度以及 n 型势垒层的掺杂浓度及厚度有关^[20]。另外，单极势垒同样用于阻挡吸收层中的一种载流子通过隧道作用到达接触层所形成的隧道电流，因此必须足够厚^[18]。所以对于 $p\pi Bn$ 结构而言，吸收层的掺杂浓度以及势垒层的掺杂浓度和厚度会影响到器件暗电流的大小，因此必须对吸收层的掺杂浓度以及势垒层的掺杂浓度和厚度进行系统的分析和选择。这样才会在形成单极势垒的同时，尽可能的减小器件暗电流，提高工作性能。

本文报道了在长波红外 InAs/GaSb T2SL 探测器势垒结构设计工作。使用 Crosslight 公司的 Apsys 软件设计不同掺杂浓度的吸收层，通过改变吸收层掺杂浓度以及势垒层的掺杂浓度和厚度来进行 $p\pi Bn$ 结构 InAs/GaSb T2SL 暗电流的模拟。找到不

同势垒层的掺杂浓度和厚度与不同掺杂浓度吸收层的调制或者调控规律,找到具有最小暗电流的 $p\pi n$ 结构,为实验的生长提供理论依据。

2 能带结构模拟

在本工作中,对单极势垒结构为 InAs/AlSb 的 $p\pi n$ 结构 InAs/GaSb T2SL 进行器件结构设计来减小器件的暗电流。为了得到最佳的长波器件模型,使用参考文献[21]中的八带 $k \cdot p$ 方法结合有限元分析,利用 Apsys 软件计算了 p 型接触层 InAs/GaSb、吸收层 InAs/GaSb 和势垒层 InAs/AlSb T2SL 的能带结构。计算 p 型接触层采用的参数为:电子有效质量 (m_e) = $0.03 m_0$,空穴有效质量 (m_h) = $0.3 m_0$,辐射复合速率(B) = $1 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{s}$,电子俄歇速率(C_n) = $1 \times 10^{-36} \text{ m}^6/\text{s}$,空穴俄歇速率(C_p) = $1 \times 10^{-36} \text{ m}^6/\text{s}$ 。计算吸收层采用的参数为: $m_e = 0.02 m_0$, $m_h = 0.3 m_0$, $B = 1 \times 10^{-15} \text{ m}^3/\text{s}$, $C_n = 1 \times 10^{-36} \text{ m}^6/\text{s}$, $C_p = 1 \times 10^{-36} \text{ m}^6/\text{s}$ 。计算势垒层和 n 型接触层采用的参数为: $m_e = 0.01 m_0$, $m_h = 0.3 m_0$, $B = 2 \times 10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$, $C_n = 1 \times 10^{-36} \text{ m}^6/\text{s}$, $C_p = 1 \times 10^{-36} \text{ m}^6/\text{s}$ [22]。

图 1 所示为 InAs/GaSb T2SL 常用作吸收层结构的 13 ML (Monolayer) InAs/7 ML (Monolayer) GaSb 的能带结构。

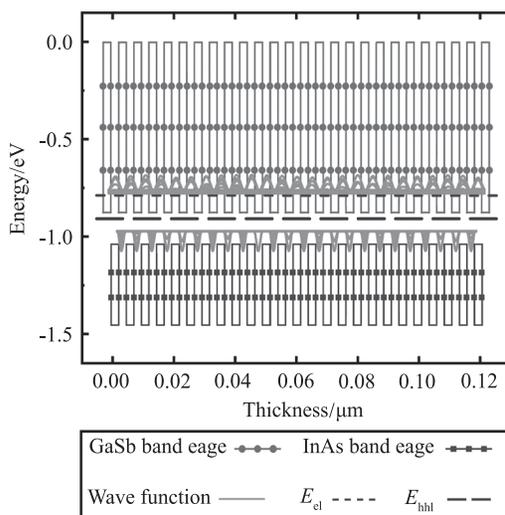


图 1 13 ML InAs/7 ML GaSb 超晶格能带对齐和微带示意图

Fig. 1 Energy band alignment and microstrip diagram of 13 ML InAs/7 ML GaSb superlattice

从图中可以看出 InAs 和 GaSb 组成超晶格结构时,由于导带和价带的偏移导致了电荷的转移。其中电子主要进入 InAs 层,而空穴主要存在于 GaSb 层。InAs 和 GaSb 交替外延时,InAs 层(GaSb 层)类似于电子势阱(空穴势垒),并在势阱(势垒)中形成量子化能级;相邻势阱(势垒)中的电子(空穴)波函

数相互交叠最终形成了类似于体材料能带结构的虚拟微带。当有辐射光入射时,微带之间的电子空穴会发生与直接禁带半导体类似的跃迁行为,从而实现光的吸收和探测[1]。13 ML InAs/7 ML GaSb T2SL 微带之间的带隙 E_g^p 为 0.12 eV。图 2 所示为 InAs/GaSb T2SL 中常用作 p 型接触层结构的 8 ML InAs/8 ML GaSb 的能带结构。

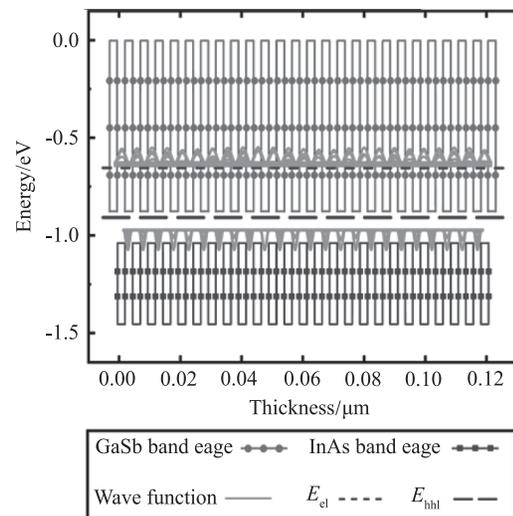


图 2 8 ML InAs/8 ML GaSb 超晶格能带对齐和微带示意图

Fig. 2 Energy band alignment and microstrip diagram of 8 ML InAs/8 ML GaSb superlattice

与吸收层结构类似,电子主要进入 InAs 层,空穴主要存在于 GaSb 层中,8 ML InAs/8 ML GaSb 超晶格带隙 E_g^p 为 0.25 eV。

图 3 为常用于 InAs/GaSb T2SL 中空穴势垒层结构的 16 ML InAs/4 ML AlSb 超晶格的能带结构,从图中可以看出,当 InAs 和 AlSb 形成超晶格结构时,电子主要进入 InAs 层,空穴主要存在于 AlSb 层。16 ML InAs/4 ML AlSb 超晶格带隙 E_g^B 为 0.58 eV。

通过以上计算得到了本征吸筹层超晶格的带隙,但由于实验上 InAs 是 n 型半导体, GaSb 是 p 型半导体,当 13 ML InAs 和 7 ML GaSb 组成 T2SL 结构时,材料为 n 型半导体,少子为空穴。超晶格二极管的耗尽区宽度很小,这意味着光生载流子几乎需要扩散整个吸收层才能达到 PN 结形成光电流。对吸收层进行 p 型掺杂可以使少子变为电子,空穴的扩散长度要远小于电子的扩散长度,当空穴作为少子时不利于对光生载流子的收集,进而降低探测器的量子效率[20]。但吸收层内过高的 p 型掺杂会产生多余的空穴,会复合光生电子,降低器件的光电流。因此,合适的吸收层掺杂浓度对于器件量子效率的提高起着至关重要的作用。

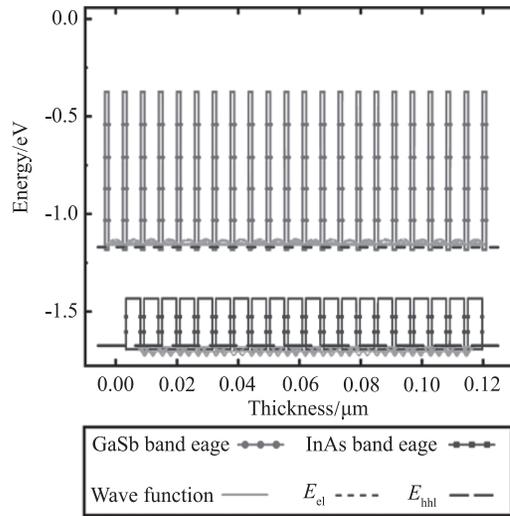


图3 16 ML InAs/4 ML AlSb 超晶格能带对齐和微带示意图
Fig.3 Energy band alignment and microstrip diagram of 16 ML InAs/4 ML AlSb superlattice

3 pπBn 结构探测器的暗电流

pπBn 结构的器件结构示意图和能带图如图 4 所示。根据其他学者的研究结果,它包含了 0.5 μm 厚的 p 型掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 8 ML InAs/8 ML GaSb 空穴接触层,2 μm 厚的弱 p 型掺杂的 13 ML InAs/7 ML GaSb 吸收层,0.2 ~ 0.5 μm 厚的 16 ML InAs/4 ML AlSb 空穴势垒层以及 n 型掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 16 ML InAs/4 ML AlSb 电子接触层。根据 $k \cdot p$ 模型计算,InAs/AlSb 空穴势垒层的带隙 $E_g^B = 0.58 \text{ eV}$,与吸收层的导带偏移为零,意味着相对于吸收层的价带偏移 ΔE_c 为 0.46 eV。结合前面的讨论,选择具有弱 p 型掺杂吸收层和 n 型掺杂势垒层的 p πbn 结构器件作为研究对象。

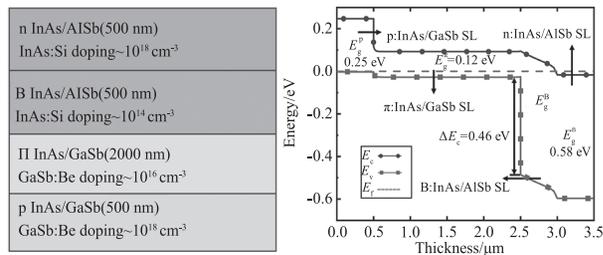


图4 pπBn 结构 InAs/GaSb T2SL 的器件结构和能带结构示意图
Fig.4 Energy band alignment and microstrip diagram of 8 ML InAs/8 ML GaSb superlattice

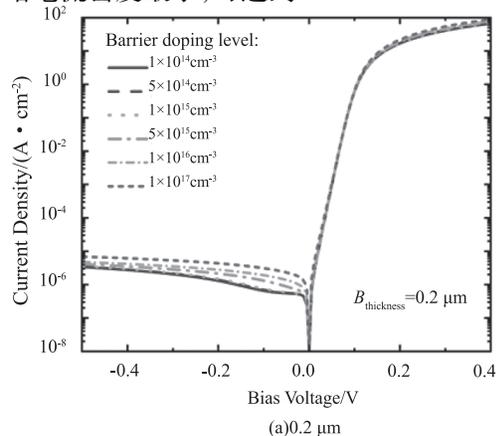
探测器的暗电流主要由五个来源: $I_{\text{dark}} = I_{\text{diff}} + I_{\text{gr}} + I_{\text{btb}} + I_{\text{tat}} + I_{\text{Rshunt}}$, 其中 I_{diff} , I_{gr} , I_{btb} , I_{tat} 分别是扩散, G-R, 直接隧穿, 缺陷辅助隧穿暗电流^[23]。 I_{Rshunt} 是欧姆漏电流, 造成欧姆漏电流产生的原因是表面漏电流或者材料中存在的位错缺陷等, 通常对于体暗电流的贡献很低, 可忽略不计。重点

关注 I_{diff} , I_{gr} , I_{btb} 和 I_{tat} , 忽略了 I_{Rshunt} 电流。模拟的暗电流包括 I_{diff} , I_{gr} , I_{btb} 和 I_{tat} 。InAs/GaSb T2SL 光电探测器的基本工作原理基于 PN 结, 因此 PN 结形成的耗尽区直接影响带器件暗电流的大小。在 pπBn 结构 InAs/GaSb T2SL 器件中, 吸收层和势垒层构成了光伏型探测器中的 PN 结, 因此对于吸收层和势垒层结构的研究具有重要意义。使用集成了泊松方程和电流连续性方程等数值模型的 Apsys 软件, 通过改变吸收层掺杂浓度以及势垒层的掺杂浓度和厚度来进行 pπBn 结构 InAs/GaSb T2SL 暗电流的模拟。其中吸收层的弱 p 型掺杂浓度包括 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。势垒层厚度包括 0.2 μm, 0.3 μm, 0.4 μm, 0.5 μm, 掺杂浓度分别为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 。

3.1 势垒层掺杂浓度对器件暗电流的影响

选择吸收层掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的 pπBn 器件, 研究势垒层结构对于器件暗电流的影响。首先固定势垒层厚度, 通过改变势垒层的掺杂浓度来计算暗电流密度, 从而对比分析势垒层掺杂浓度对于器件暗电流的影响。

如图 5 所示, 固定不同的势垒层厚度, 势垒层的掺杂浓度从 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 增加到 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$, 共选取 6 个不同的浓度。图 5(a) ~ 图 5(e) 分别是探测器的势垒层厚度为 0.2 μm ~ 0.5 μm 时, 器件的暗电流密度随势垒层掺杂浓度变化的暗电流密度特性曲线。从图中可以看到, 随着势垒层掺杂浓度变大, 器件的暗电流密度变大。原因是势垒层掺杂浓度的增加使得吸收层和势垒层形成的 PN 结主要分布在窄带隙的吸收层中, 增大 G-R 暗电流, 使得器件的暗电流密度增大。对于势垒厚度为 0.5 μm 的器件, 当势垒层的掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时, 器件的暗电流密度最小, 可达到 $8.35 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。



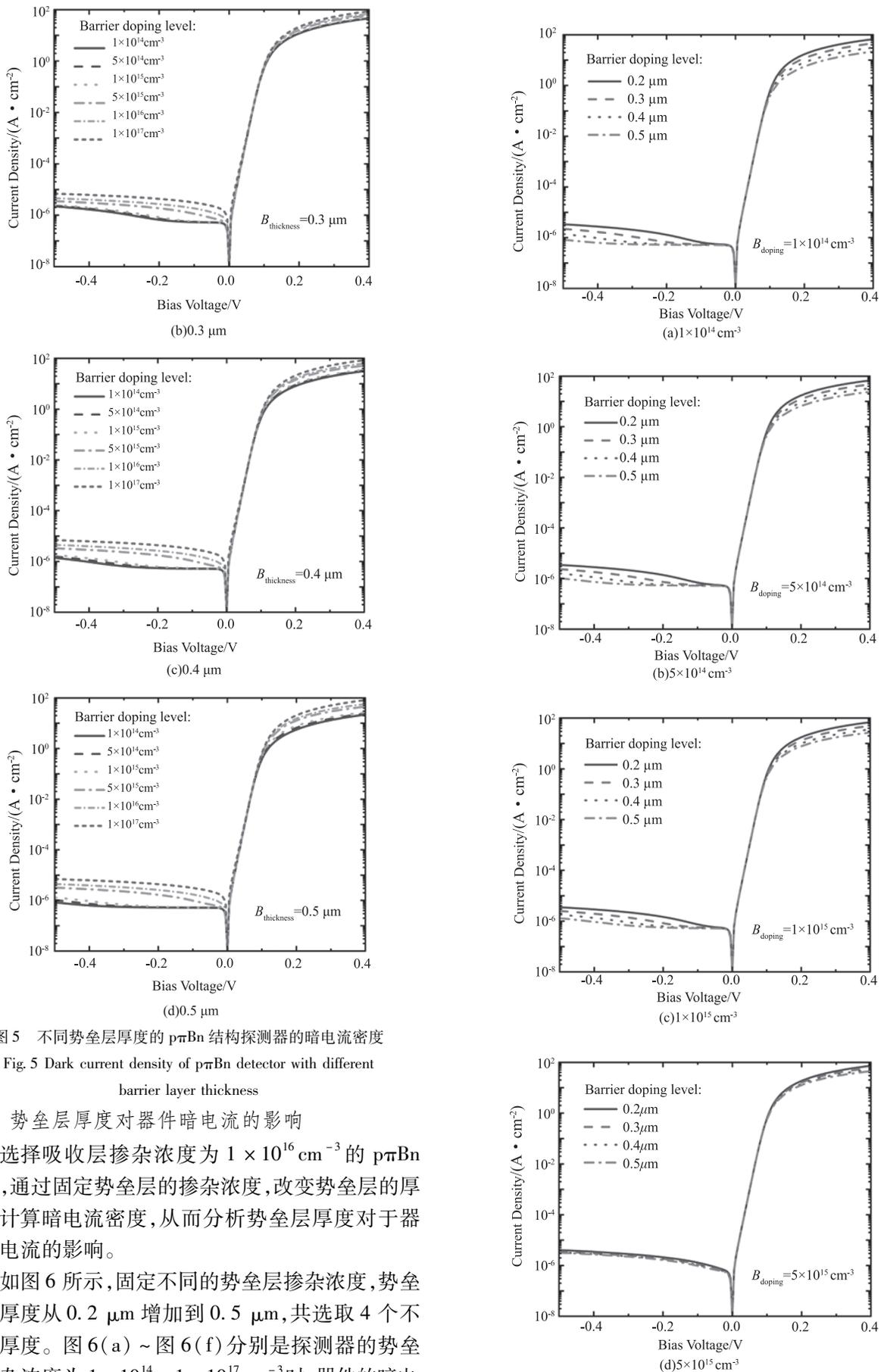


图5 不同势垒层厚度的 $p\pi Bn$ 结构探测器的暗电流密度

Fig. 5 Dark current density of $p\pi Bn$ detector with different barrier layer thickness

3.2 势垒层厚度对器件暗电流的影响

选择吸收层掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 的 $p\pi Bn$ 器件,通过固定势垒层的掺杂浓度,改变势垒层的厚度来计算暗电流密度,从而分析势垒层厚度对于器件暗电流的影响。

如图6所示,固定不同的势垒层掺杂浓度,势垒层的厚度从 $0.2 \mu\text{m}$ 增加到 $0.5 \mu\text{m}$,共选取4个不同的厚度。图6(a)~图6(f)分别是探测器的势垒层掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件的暗电

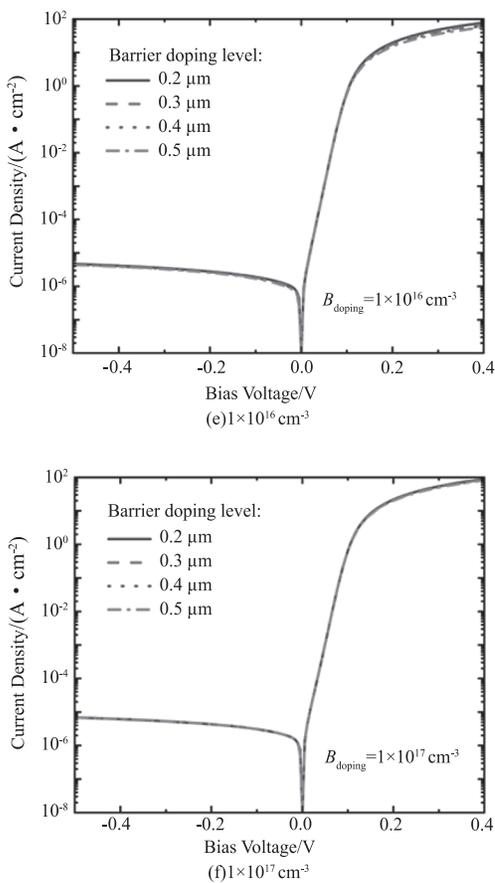


图6 不同势垒层掺杂浓度的 pπBn 结构探测器的暗电流密度
Fig. 6 Dark current density of pπBn detector with different barrier doping level

流密度随势垒层厚度变化的暗电流密度特性曲线。从图中可以看到,随着势垒层厚度变大,器件的暗电流密度变小。原因是势垒层厚度的增加使得吸收层和势垒层形成的 PN 结完全分布在宽带隙的势垒层中,减小 G-R 暗电流,使得器件的暗电流密度减小。另一方面,势垒层厚度的增加可以削弱耗尽区中电场的大小,从而可以减小和电场作用有关的隧穿暗电流。对于势垒层掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的器件,当势垒层的厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 时,器件的暗电流密度最小,可达到 $8.35 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。

3.3 吸收层掺杂浓度对器件暗电流的影响

分别对势垒层的厚度和掺杂浓度进行改变,计算器件的暗电流密度,可以知道器件势垒层厚度越厚,掺杂浓度越小器件的暗电流越小。但势垒层越厚,在器件刻蚀台面的过程中会破坏原本完整的晶体结构。在此过程中,由于悬挂键,化学反应和污染物结合在台面的侧壁表面上而产生缺陷,导致形成各种表面态。这些表面态对器件性能是不利的,因为它们可能分布在超晶格的带隙内和/或引起表面

处的带弯曲,进一步形成漏电通道^[24]。因此,选择厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 、掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 的势垒层作为进一步研究吸收层掺杂浓度对于 pπBn 器件暗电流密度影响的势垒层结构。

如图7所示,选定势垒层厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ 的势垒层结构,改变势垒层掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \sim 1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,吸收层掺杂浓度为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 进行暗电流密度计算。图7(a)~图7(c)分别是探测器的吸收层掺杂浓度

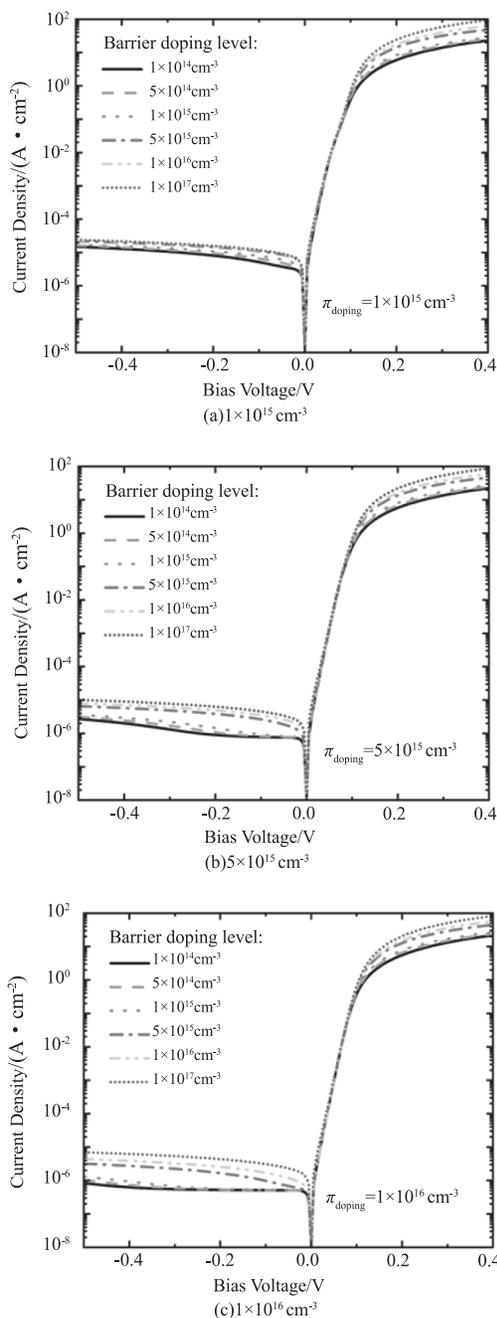


图7 不同吸收层掺杂浓度的势垒层厚度为 $0.5 \mu\text{m}$ pπBn 结构探测器的暗电流密度
Fig. 7 Dark current density of $0.5 \mu\text{m}$ barrier thickness pπBn detector with different absorption layer doping level

为 $1 \times 10^{15} \sim 1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件的暗电流密度随势垒层掺杂浓度变化的暗电流密度特性曲线。从图中可以看到,随着吸收层掺杂浓度的增加,器件的暗电流在减小。这是因为吸收层掺杂浓度越大,吸收层中的耗尽区越窄,大部分的耗尽区降落在势垒层中,减小了 G-R 暗电流。当吸收层掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、势垒层掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ 时,器件的暗电流密度最小,为 $8.35 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。

图 8 所示为势垒层掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,改

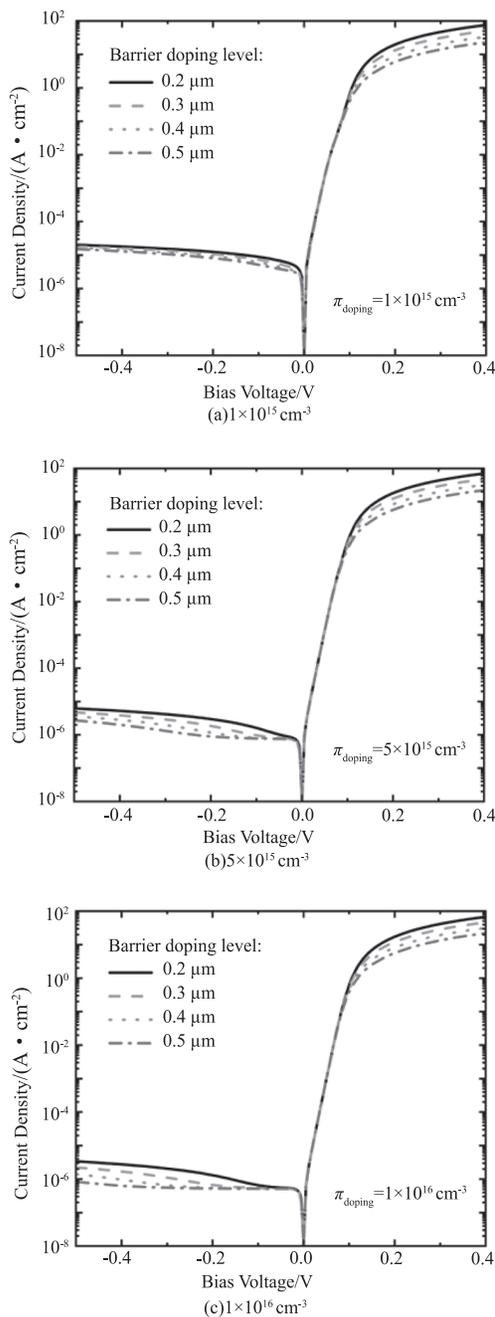


图 8 不同吸收层掺杂浓度的势垒层掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ p π Bn 结构探测器的暗电流密度

Fig. 8 Dark current density of $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ barrier doping p π Bn detector with different absorption layer doping level

变势垒层厚度为 0.2 ~ 0.5 μm 进行暗电流密度计算的结果。图 8(a) ~ 图 8(c) 吸收层掺杂浓度分别为 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。从图中可以看到,当势垒层的掺杂浓度高于吸收层的掺杂浓度时,势垒层厚度的变化对于器件的暗电流没有显著影响,此时耗尽区存在于吸收层中。当势垒层的掺杂浓度低于吸收层的掺杂浓度时,势垒层厚度的变化对于器件的暗电流影响较大,势垒层越厚,器件的暗电流越小。当吸收层掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 、势垒层厚度为 0.5 μm 时,器件的暗电流密度最小,为 $8.35 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。

4 结论

本论文对 p π Bn 结构 InAs/GaSb T2SL 长波红外探测器通过理论计算进行器件结构设计。首先,针对 13 ML InAs/7 ML GaSb 的长波吸收层,使用八带 $k \cdot p$ 方法计算能带结构。计算吸收层的带隙值为 0.12 eV。使用相同计算方法计算 8 ML InAs/8 ML GaSb p 型接触层的带隙值为 0.25 eV, 16 ML InAs/4 ML AlSb 势垒层的带隙值为 0.58 eV。

接着通过改变吸收层掺杂浓度以及势垒层的掺杂浓度和厚度来进行 p π Bn 结构 InAs/GaSb T2SL 暗电流的模拟。根据计算结果可知,当固定势垒层厚度时,势垒层的掺杂浓度相对于吸收层的掺杂浓度越小,器件的暗电流越小。此时耗尽区主要降落在宽带隙的势垒层中,有利于减小 G-R 暗电流。势垒层掺杂浓度相对于吸收层的掺杂浓度越高时,器件的暗电流密度就会越大。此时耗尽区大部分降落在窄带隙的吸收层中,促进了 G-R 暗电流的形成。当固定势垒层掺杂浓度时,势垒层越厚,器件的暗电流密度越小。此时势垒有效的阻挡了隧穿暗电流。另外,当势垒层的掺杂浓度相对于吸收层的掺杂浓度越高时,势垒层厚度的变化对于器件暗电流密度的变化没有明显影响。此时的耗尽区主要降落在吸收层中,形成了 G-R 暗电流,相对于隧穿暗电流更加占据了暗电流的主导地位。最终设计的吸收层掺杂浓度为 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 势垒层掺杂浓度为 $1 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$, 势垒层厚度为 0.5 μm 的 p π Bn 结构 InAs/GaSb T2SL 长波红外探测器器件暗电流密度可减小到 $8.35 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ 。相对于优化前降低了一个数量级,吸收层掺杂浓度和势垒层掺杂浓度以及势垒层厚度对器件暗电流的影响规律,对于实验生长材料具有重要意义。

参考文献:

- [1] Wang J, Zhang Y. Band-gap corrected density functional

- theory calculations for InAs/GaSb type II superlattices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116:214301.
- [2] Rogalski A, Antoszewski J, Faraone L. Third-generation infrared photodetector arrays [J]. *Journal of Applied Physics*, 2009, 105:091101.
- [3] Alchaar R, Rodriguez J B, Höglund L, et al. Characterization of an InAs/GaSb type-II superlattice barrier photodetector operating in the LWIR domain [J]. *AIP Advances*, 2019, 9:055012.
- [4] 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, 95:023508.
- [5] 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, 95:183502.
- [6] Hoang A M, Chen G, Haddadi A, et al. Demonstration of high performance bias-selectable dual-band short-/mid-wavelength infrared photodetectors based on type-II InAs/GaSb/AlSb superlattices [J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102:011108.
- [7] Plis E A, Krishna S S, Gautam N, et al. Bias switchable dual-band InAs/GaSb superlattice detector with pBp architecture [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, 3:234 – 240.
- [8] Plis E, Myers S, Ramirez D, et al. Dual color longwave InAs/GaSb type-II strained layer superlattice detectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015, 70:93 – 98.
- [9] Hoang A M, Dehzangi A, Adhikary S, et al. High performance bias-selectable three-color short-wave/mid-wave/long-wave infrared photodetectors based on type – II InAs/GaSb/AlSb superlattices [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6:24144.
- [10] Plis E A. InAs/GaSb Type – II superlattice detectors [J]. *Advances in Electronics*, 2014, 2014:1 – 12.
- [11] Knorr Jr D B, Williams K S, Baril N F, et al. Use of 3-aminopropyltriethoxysilane deposited from aqueous solution for surface modification of III-V materials [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 320:414 – 428.
- [12] Delaunay P, Nguyen B M, Hoffman D, et al. High-performance focal plane array based on InAs-GaSb superlattices with a 10 μm cutoff wavelength [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2008, 44:462 – 467.
- [13] Wei Y, Bae J, Gin A, et al. Type II InAs/GaSb superlattices for high-performance photodiodes and FPAs [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2003, 5246:501 – 511.
- [14] Nguyen B-M, Hoffman D, Delaunay P-Y, et al. Dark current suppression in type II InAs/GaSb superlattice long wavelength infrared photodiodes with M-structure barrier [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91:163511.
- [15] Xu Z, Chen J, Wang F, 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.
- [16] Rogalski A. Infrared detectors: an overview [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2002, 43:187 – 210.
- [17] Klipstein P. "XBn" barrier photodetectors for high sensitivity and high operating temperature infrared sensors [J]. *Proceedings of SPIE-the International Society for Optical Engineering*, 2008, 6940:69402U.
- [18] Gopal V, Plis E, Rodriguez J B, et al. Modeling of electrical characteristics of midwave type II InAs/GaSb strain layer superlattice diodes [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104:124506.
- [19] Hoffman D, Nguyen B M, Delaunay P Y, et al. Beryllium compensation doping of InAs/GaSb infrared superlattice photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91:143507.
- [20] Delmas M, Rossignol R, Rodriguez J B, et al. Design of InAs/GaSb superlattice infrared barrier detectors [J]. *Superlattices and Microstructures*, 2017, 104:402 – 414.
- [21] Qiao P F, Mou S, Chuang S L. Electronic band structures and optical properties of type-II superlattice photodetectors with interfacial effect [J]. *Optics Express*, 2012, 20:2319 – 2334.
- [22] Li Y, Xiao W, Wu L, et al. Dark current characteristic of p-i-n and nBn MWIR InAs/GaSb superlattice infrared detectors [J]. *2019 IEEE 4th Optoelectronics Global Conference (OGC)*, 2019:70 – 75.
- [23] Klein B, Plis E, Kutty M, et al. Varshni parameters for InAs/GaSb strained layer superlattice infrared photodetectors [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44:075102.
- [24] Banerjee K, Ghosh S, Mallick S, et al. Electrical characterization of different passivation treatments for long-wave infrared InAs/GaSb strained layer superlattice photodiodes [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2009, 38:1944 – 1947.