

# InAsSb 势垒阻挡型红外探测器暗电流特性研究

陈冬琼, 王海澎, 秦强, 邓功荣, 尚发兰, 谭英, 孔金丞, 胡赞东, 太云见,  
袁俊, 赵鹏, 赵俊, 杨文运\*  
(昆明物理研究所, 云南昆明 650223)

**摘要:** 计算了不同温度下由辐射复合和俄歇复合决定的 InAsSb 材料的载流子寿命, 结果表明, 低温下 n 型 InAsSb 材料的载流子寿命受限于辐射复合过程, 而高温下 InAsSb 材料的载流子寿命取决于 Auger 1 复合过程。讨论了势垒阻挡型器件的暗电流解析模型及暗电流抑制机理, 通过在 nBn 吸收层的另一侧增加重掺杂的 n 型电极层形成 nBnn<sup>+</sup> 结构对吸收区内的载流子进行耗尽, 吸收区少数载流子浓度降低约两个数量级, 从而进一步降低器件暗电流。成功制备了 InAsSb-基 nBnn<sup>+</sup> 器件, 150 K 下器件暗电流低至  $3 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>, 采用势垒结构器件的暗电流解析模型对 150 K 下器件的暗电流进行拟合分析, 结果表明由于势垒层为 p 型掺杂, 在吸收层形成耗尽区, 导致器件中的产生复合电流并没有完全被抑制, 工作温度低于 180 K, 器件暗电流受限于产生复合电流, 工作温度高于 180 K, 器件暗电流受限于扩散电流。

**关键词:** 砷化铟; 高工作温度; 势垒; 中红外  
**中图分类号:** TN215 **文献标识码:** A

## Research on dark current characteristics of InAsSb Barrier-blocking infrared detector

CHEN Dong-Qiong, WANG Hai-Peng, QIN Qiang, DENG Gong-Rong, SHANG Fa-Lan, TAN Ying,  
KONG Jin-Cheng, HU Zan-Dong, TAI Yun-Jian, YUAN Jun, ZHAO Peng, ZHAO Jun,  
YANG Wen-Yun\*  
(Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China)

**Abstract:** The carrier lifetimes determined by radiative and Auger 1 recombination in InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> were calculated at different temperatures. For n-type InAsSb material, at low temperatures, the carrier lifetime is limited by the radiative recombination, while at high temperatures, the Auger 1 process is dominant. An analytical model of dark current for barrier blocking detectors was discussed, by adding a heavily doped n-type InAsSb electrode on the other side of the absorber layer to form an nBnn<sup>+</sup> structure to deplete the carriers in absorber, the hole concentration in absorption region was decreased about two orders of magnitude, further reducing the dark current of the devices. InAsSb-based nBnn<sup>+</sup> barrier devices have been successfully fabricated and characterized. At 150 K, the devices displayed a dark current density as low as  $3 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>, the dark current density of the detectors was fitted by the nBn-based architecture analytical current model, the experimental results indicated that due to the p-type doping of the barrier layer, a depletion region was formed in the InAsSb absorber region, resulting in incomplete inhibition of G-R current. At temperatures below 180 K, the dark current of the detector is limited by G-R process, at temperatures above 180 K, the dark current of the device is limited by diffusion current.

**Key words:** InAsSb, high operating temperature, barrier, mid-infrared

收稿日期: 2022-04-24, 修回日期: 2022-09-16

Received date: 2022-04-24, revised date: 2022-09-16

基金项目: 云南省中青年学术和技术带头人后备人才项目(202205AC160054)

Foundation items: This work was supported by Young and Middle-aged Academic and Technical Leaders Reserve Talents Project, Yunnan Province (202205AC160054).

作者简介(Biography): 陈冬琼(1989-), 女, 云南曲靖人, 硕士研究生, 主要从事光电材料与器件研究. E-mail: dqhensci@163.com

\* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: yangwenyun@olied.com

## 引言

2006年, Maimon 和 Wicks 教授最先提出了 nBn 势垒型器件结构<sup>[1]</sup>, 通过引入宽带隙势垒层将器件的耗尽区从窄带隙半导体中移除, 降低耗尽区相关暗电流, 提高红外探测器的工作温度, 目前, 势垒结构在体材料、二类超晶格及二维材料中均取得了巨大的进展。最为典型的是以色列 SCD 公司, 2012年, 以色列 SCD 报道了其研制的 XBn 结构的 640×512“Pelican”焦平面阵列器件, 150 K 工作温度, 工作偏压下器件暗电流密度为  $2\sim 3\times 10^{-7}$  A/cm<sup>2</sup><sup>[2]</sup>, 器件暗电流为扩散电流, 2014 年研发的 Hercules 系列 1 280×1 024 中心距 15 μm XBn 探测器阵列在 150 K 下暗电流为 400 fA<sup>[3]</sup>, 2021 年报道了中心距 5 μm 的 2560×2048 大面阵的 CRANE 探测器, 150 K 工作温度响应波长为 1.7~4.2 μm, 量子效率 >70%, 暗电流为 200 fA<sup>[4]</sup>。2019 年, 美国 NASA 研制了 nBn 结构的 1 024×1 024 InAs/InAsSb 焦平面器件, 150 K 下截止波长为 5 μm, 器件暗电流密度  $1\times 10^{-5}$  A/cm<sup>2</sup><sup>[5]</sup>。2022 年, 美国 NASA JPL 在 nBn 结构的基础上, 设计 p-InAs/InAsSb 吸收层的 p-CBIRD 以及 p 型和 n 型 InAs/InAsSb 组合的长波 pn-CBIRD 互补势垒红外探测器, 制备的器件均具有良好的可操作性和均匀性, 低温下成像清晰<sup>[6]</sup>。近年来国内主要的探测器研制机构开始关注该技术<sup>[7-9]</sup>, 2021 年, 牛智川等人<sup>[10]</sup>将 AlAsSb/InAsSb 超晶格势垒结构引入 p<sup>+</sup>Bn 中波超晶格器件中, 以减小器件的开启电压, 制备的单元器件在 150 K、-0.1 V 偏置电压下, 暗电流密度为  $1.2\times 10^{-4}$  A/cm<sup>2</sup>, 4.1 μm 处量子效率 29%, 比探测率为  $1.2\times 10^{11}$  cm·Hz<sup>1/2</sup>/W。胡伟达等人<sup>[11]</sup>设计并制备了可见的二硒化钨/氮化硼/二硒化钼(WS<sub>2</sub>/h-BN/PdSe<sub>2</sub>) nBn 和中波红外的黑磷/二硫化钼/石墨烯(BP/MoS<sub>2</sub>/graphene) pBp 势垒结构探测器, 推进了二维材料范德华异质结红外探测器的发展。2019 年, 昆明物理研究所成功制备 pBn 型 InAsSb 640×512 阵列器件, 150 K 工作温度、工作偏压下暗电流密度为  $\sim 3.9\times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>, 峰值探测率为  $1.06\times 10^{12}$  cmHz<sup>1/2</sup>/W<sup>[12]</sup>。本文在 pBn 器件的基础上, 首先介绍了钢铈材料载流子复合过程并对相关载流子寿命进行计算, 介绍了势垒型器件的主要暗电流解析模型, 设计并制备了 nBnn<sup>+</sup>型 InAsSb 器件, 对其暗电流特性进行分析。

## 1 物理模型及器件优化设计

### 1.1 钢铈载流子复合过程和少子寿命

钢铈光电器件的暗电流决定了器件的工作温度, 而器件的暗电流主要取决于钢铈材料的载流子复合过程及其决定的少子寿命。因此, 本文首先对钢铈材料的载流子复合过程及其决定的少数载流子寿命进行计算研究, 以明确不同工作温度下限制钢铈材料的少子寿命的复合机制, 指导高工作温度钢铈器件材料结构的优化设计。钢铈半导体材料主要载流子复合机制为: 辐射复合、俄歇复合和肖克莱里德霍尔(SRH)复合。

#### 1.1.1 辐射复合

根据 Roosbroeck 和 Shockley 提出的辐射复合决定的载流子寿命为<sup>[13]</sup>:

$$\tau_R = B(n_0 + p_0) \quad (1)$$

本征钢铈材料的辐射复合寿命为  $\tau_R^i = (2Bn_i)^{-1}$ , 其中,  $n_0$ 、 $p_0$  为平衡态电子浓度、空穴浓度,  $n_i$  为本征载流子浓度, 俘获率 B 表示为<sup>[13]</sup>:

$$B = 5.8 \times 10^{-19} \varepsilon_\infty^{1/2} \left( \frac{m}{m_e^* + m_h^*} \right)^{3/2} \left( 1 + \frac{m}{m_e^*} + \frac{m}{m_h^*} \right) \left( \frac{300}{T} \right)^{3/2} E_g^2 \quad (2)$$

其中,  $m_e^*$  和  $m_h^*$  是电子有效质量和空穴有效质量。

InAsSb 材料的本征载流子浓度的计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$n_i = (1.35 + 8.50x + 4.22 \times 10^{-3}T - 1.53 \times 10^{-3}xT - 6.73x^2) \times 10^{14} T^{3/2} E_g^{3/4} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (3)$$

根据公式(1), n 型钢铈材料的辐射复合载流子寿命表示为:

$$\tau_R^h = \frac{2\tau_R^i}{(n_0/n_i) + (n_i/n_0)} = \frac{1}{B(n_0 + n_i^2/n_0)} \quad (4)$$

#### 1.1.2 俄歇复合

InAsSb 材料中三种主要的载流子带间直接俄歇复合过程为 Auger 1 复合、Auger 7 复合及 Auger S 复合过程, 其中, Auger 1 复合是 n 型钢铈材料中的主要俄歇复合过程。

n 型掺杂钢铈的 Auger 1 少数载流子寿命表示为<sup>[15]</sup>:

$$\tau_{A1} = \frac{2\tau_{A1}^i}{1 + n_0^2/n_i^2} \quad (5)$$

其中,  $\tau_{A1}^i$  为本征钢铈的 Auger 1 寿命, 且  $\tau_{A1} =$

$$\frac{3.8 \times 10^{-18} \varepsilon^2 (1 + \mu)^{\frac{1}{2}} (1 + 2\mu) \exp\left(-\frac{q(1 + 2\mu)E_g}{(1 + \mu)kT}\right)}{\left(\frac{m_e^*}{m_h^*}\right) |F_1 F_2|^2 \left(\frac{kT}{qE_g}\right)^{3/2}}$$

根据上述公式,计算得到本征 InAsSb 材料在不同温度下的俄歇复合和辐射复合载流子寿命,如图 1 所示,从图中可以看出,低温下本征 InAsSb 材料的载流子寿命取决于辐射复合过程,高温下本征 InAsSb 材料的载流子寿命取决于 Auger 1 复合过程。

图 2 为不同掺杂浓度的 n 型 InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub> 材料在不同温度下的辐射复合和俄歇复合寿命图,随着掺

杂浓度增加,辐射复合寿命和 Auger 1 寿命减小,150 K 下,  $n_0/n_i \approx 600$  时, Auger 1 寿命  $\tau_{A1}$  与辐射复合寿命  $\tau_R$  相等,  $n_0/n_i$  的值大于 600 时, Auger 1 寿命  $\tau_{A1}$  小于辐射复合寿命  $\tau_R$ 。

1.1.3 SRH 复合

半导体材料中的位错、杂质等缺陷会在禁带中引入能级,形成产生-复合中心,产生复合中心能从导带中俘获电子,从价带中俘获空穴,同时产生-复合中心上的电子可以被激发到导带,向价带发射空穴。通过提高生长的材料质量、减少器件制备工艺过程中引入的杂质等可以有效地减小 SRH 复合,提

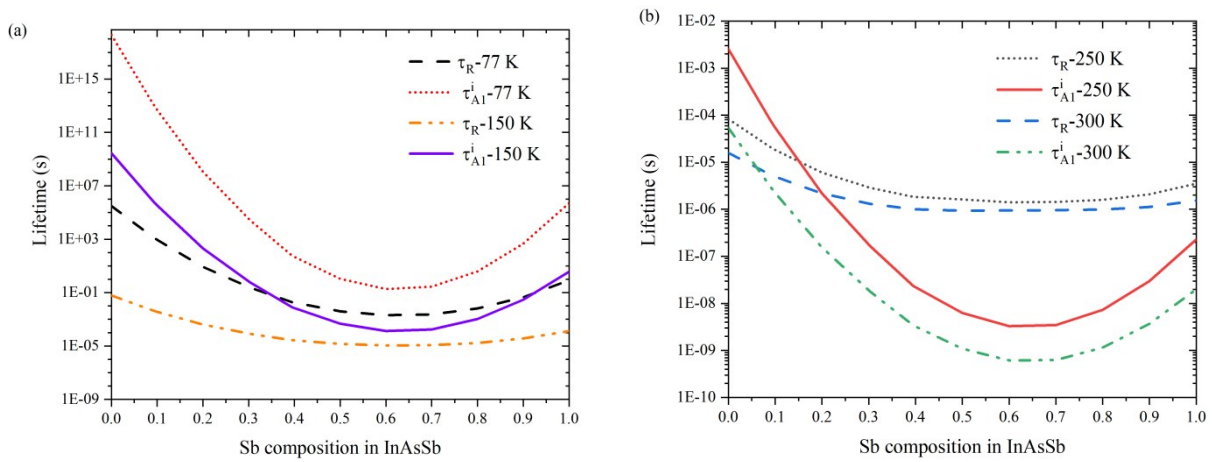


图 1 本征锑砷辐射、Auger 1 复合载流子寿命:(a) 77 K、150 K,(b) 250 K、300 K

Fig.1 Radiative and Auger 1 recombination carrier lifetimes in intrinsic InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> at: (a) 77 K and 150 K, (b) 250 K and 300 K

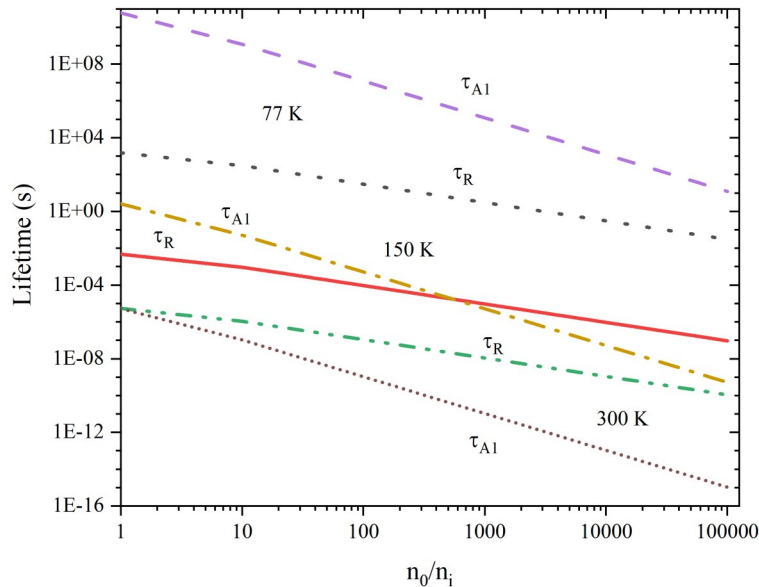


图 2 不同温度下 n 型 InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub> 辐射复合和 Auger 1 复合寿命与掺杂浓度的关系

Fig. 2 Calculated radiative and Auger 1 recombination carrier lifetimes vs doping concentration for InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub> at 77 K, 150 K and 300 K

高载流子SRH寿命。低温下SRH复合过程决定了III-V半导体材料的少数载流子寿命,SRH少子寿命表示为<sup>[16]</sup>:

$$\tau_{SRH} = \frac{\tau_{po}(N_o + n_1) + \tau_{no}(P_o + p_1)}{N_o + P_o}, \quad (6)$$

其中,  $\tau_{po} = (\sigma_p v_{th} N_t)^{-1}$ ,  $\tau_{no} = (\sigma_n v_{th} N_t)^{-1}$ ,  $\sigma_{p,n}$  为空穴/电子俘获面积,  $v_{th}$  空穴和电子的热运动速率,  $N_t$  为缺陷浓度。

综上所述,考虑各种复合机制的影响,钢砷锑的少数载流子寿命表示为:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_R} + \frac{1}{\tau_A} + \frac{1}{\tau_{SRH}}. \quad (7)$$

### 1.2 钢砷锑势垒型器件暗电流解析模型

类似于InGaAs、HgCdTe红外探测器<sup>[17]</sup>,InAsSb势垒型器件暗电流机制主要包括扩散电流 $J_{diff}$ 、产生-复合电流 $J_{g-r}$ 、直接带间隧穿电流 $J_{btb}$ 、缺陷辅助隧穿电流 $J_{tat}$ 。在下面的暗电流公式中, $N_D$ 、 $N_A$ 为吸收层施主掺杂浓度和势垒层的受主掺杂浓度, $\tau_{e,h}$ 和 $\mu_{e,h}$ 分别为电子和空穴的寿命和迁移率, $E_t$ 为陷阱能级, $M^2$ 是陷阱势能,取 $1 \times 10^{-23} \text{ eV}^2 \text{ cm}^3$ , $N_t$ 是激活陷阱密度, $m_t$ 是陷阱有效质量, $E$ 为电场强度。

势垒层是宽带隙半导体材料,与钢砷锑吸收层相比其本征载流子浓度很低,来自势垒层的扩散电流非常小可忽略,因此,扩散电流近似为:

$$J_{diff} = \sqrt{qk_B T} \left\{ \left( \frac{n_{iA}^2}{N_D} \sqrt{\frac{\mu_h}{\tau_h}} \tan\left(\frac{x_n - w_A}{L_h}\right) \right) \left[ \exp\left(\frac{qU}{k_B T}\right) - 1 \right] \right\}. \quad (8)$$

吸收层耗尽区内的产生复合电流表示为<sup>[18]</sup>:

$$J_{g-r} = \frac{2n_{iA} w_A k_B T}{(V_b - U) \tau_{CR}} \sinh\left(\frac{qU}{2k_B T}\right) f(b), \quad (9)$$

其中,

$$f(b) = \begin{cases} \frac{1}{2\sqrt{b^2 - 1}} \ln(2b^2 + 2b\sqrt{b^2 - 1} - 1) & b > 1 \\ 1 & b = 1 \\ \frac{1}{\sqrt{b^2 - 1}} \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{1 - b^2}}{b}\right) & b < 1 \end{cases},$$

$$b = \exp\left(-\frac{qU}{k_B T}\right) \cosh\left[\frac{E_t - E_i}{k_B T} + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\tau_e}{\tau_h}\right)\right],$$

陷阱辅助隧穿电流,表示为<sup>[18]</sup>:

$$J_{tat} = \frac{q^2 m_t M^2 N_t U}{8\pi \hbar^3 (E_{gA} - E_i)} \exp\left(\frac{-4\sqrt{2m_t}(E_{gA} - E_i)^3}{3qE\hbar}\right), \quad (10)$$

直接隧穿电流表示为<sup>[18]</sup>:

$$J_{btb} = \frac{q^3 EU \sqrt{2m_e}}{4\pi^2 \hbar^2 \sqrt{E_{gA}}} \exp\left(\frac{-4\sqrt{2m_e}(E_{gA})^3}{3qE\hbar}\right). \quad (11)$$

### 1.3 钢砷锑 nBn 器件暗电流抑制机理研究与结构优化

nBn势垒阻挡型结构器件可以有效抑制低温下的SRH电流,更高性能的高温红外探测器的制备需要根据钢砷锑器件在高温下的暗电流特性,不断优化器件的结构。随着温度升高InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub>本征载流子浓度不断增大,77 K下为 $9.13 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ,150 K下为 $8.65 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,室温下则增至 $2.64 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,材料的本征寿命随温度升高而降低。因此,钢砷锑器件的高温探测的主要障碍是钢砷锑吸收区过高的本征载流子浓度,在吸收区的另一侧增加n型重掺杂电极层使吸收层内的载流子耗尽,降低吸收区载流子浓度,从而降低器件暗电流,促进高工作温度高性能钢砷锑阵列器件的发展。图3为采用Sentaurus仿真软件计算的nBn和nBnn<sup>+</sup>器件-0.4 V下电子和空穴浓度分布图,与nBn相比,nBnn<sup>+</sup>吸收区少子空穴浓度约降低了2个数量级,这将进一步降低器件的暗电流,因此在高温探测领域nBnn<sup>+</sup>结构比nBn结构器件更具优势。

## 2 器件制备和测试

### 2.1 器件制备

采用分子束外延技术在GaSb(100)衬底上生长探测器材料结构,如图4(a)所示,材料结构从下到上依次包括GaSb衬底、GaSb缓冲层、500 nm掺杂浓度为 $5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的n型InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub>底电极接触层、3 μm非故意掺杂InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub>吸收层、150 nm非故意掺杂AlAsSb/AlSb复合势垒层及300 nm掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 的n型InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub>顶电极接触层,n型掺杂剂为Si。图4(b)为材料的SEM照片,从图中可以清晰的分辨出各层材料及其厚度,均与设计值相吻合。采用MBE外延生长材料,首先,利用干法刻蚀加湿法腐蚀到InAsSb底电极接触层形成探测器台面结构,接着利用ICPCVD沉积300 nm SiO<sub>2</sub>介电层作为钝化层,降低台面侧壁漏电流,然后通过RIE刻蚀形成电极孔,最后用磁控溅射法沉积Ti/Pt/Au作为金属电极,制备的单元器件实物照片如图4(a)右上角的插图所示,器件为圆形台面,直径为210 μm。制备完成的单元器件被封装进入带有盲冷屏的液氮变温杜瓦进行测试,采用KEYSIGHT

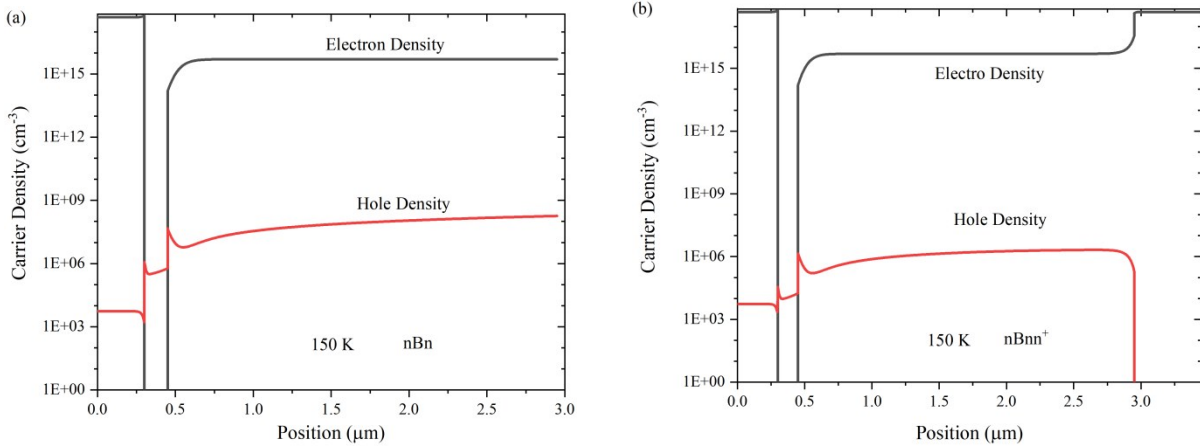


图3 150 K下载流子浓度纵向分布:(a)nBn结构,(b)nBnn+结构

Fig. 3 Vertical distribution of carrier density at 150 K : (a) nBn structure, (b) nBnn<sup>+</sup> structure

B1500对器件进行*I-V*测试,采用E4990A对器件进行*C-V*测试。

2.2 结果及分析

器件的*C-V*曲线如图5(b)所示,根据公式(12),计算得到势垒层的掺杂浓度为 $7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,吸收层InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub>的掺杂浓度为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ,结合扫描电容显微技术的测试结果,如图5(a)所示,可以确定势垒层掺杂类型为p型,属于剩余杂质掺杂。

$$\left(\frac{A}{C}\right)^2 = \frac{2}{q\epsilon_0\epsilon_s} \cdot \frac{V_{bi} - V}{N_{res}}, \quad (12)$$

其中, $\epsilon_0$ 为真空介电常数, $\epsilon_s$ 为InAsSb材料的相对介电常数, $d$ 是耗尽区宽度, $N_{res}$ 是施主掺杂浓度, $V_{bi}$ 是内建电势差。

图6为利用Sentaurus仿真软件计算的不同偏置电压下器件的能带排列图,平衡态下器件的 $\Delta E_c = 1.3 \text{ eV}$ , $\Delta E_v \approx 90 \text{ meV}$ ,高的导带差能有效阻挡从电

极接触层到吸收层的多数载流子(电子),小的价带差不阻挡从吸收层到帽层的少数载流子(空穴)。值得注意的是由于盖帽层和吸收层的掺杂浓度不一样,也会形成空穴势垒,影响少数载流子空穴的传输。

器件在不同偏置电压下的光谱响应曲线如图7所示,由于受水蒸气吸收的影响,在 $3.6 \mu\text{m}$ 器件光谱响应降低。从图6所示的能带排列图可以看出, $-0.2 \text{ V}$ 偏置电压下,势垒层和吸收层界面依然存在约 $50 \text{ meV}$ 的空穴势垒,阻碍了光生载流子的输运;随着反向偏置电压的增加,势垒层-吸收层界面空穴势垒减小,当反向偏压为 $-0.4 \text{ V}$ 时,势垒层和吸收层界面不存在空穴势垒,光生载流子无阻碍地输运至电极接触层,器件的响应达到饱和,上述分析结果也证明了实验制备器件的能带图与模拟计算的能带图是一致的。

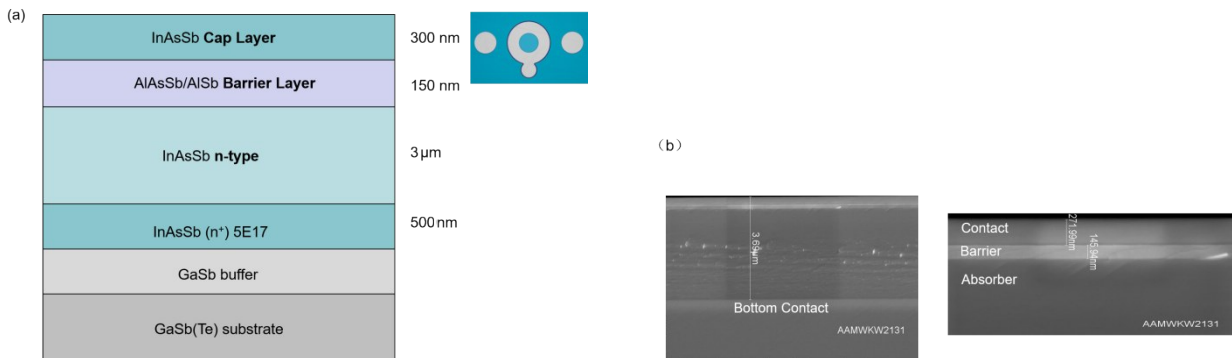


图4 (a)材料结构图(右上角为制备单元器件实物照),(b)材料SEM显微照片

Fig. 4 (a) Material structure(A photo of the fabricated single detector is displayed at the top right), (b) SEM image of the material

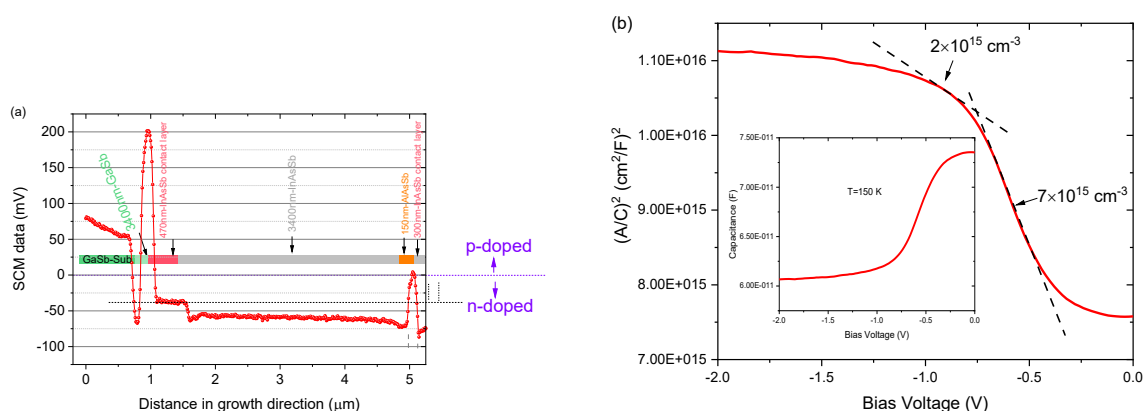


图 5 (a)材料的SCM分布图,(b)150 K下 InAsSb 器件的(A/C)<sup>2</sup>-V 特性曲线,插图为器件的 C-V 曲线

Fig. 5 (a)SCM profile of the as grown material (b) (A/C)<sup>2</sup>-V of the InAsSb detector at 150 K

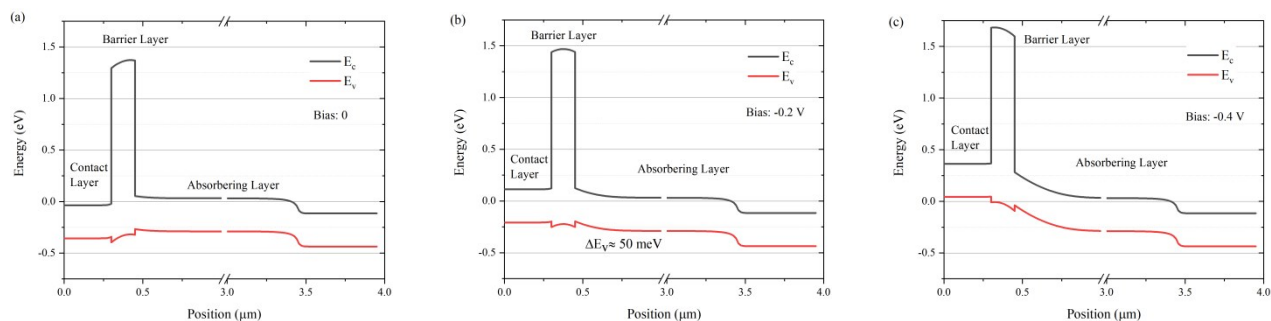


图 6 不同偏置电压下器件能带图:(a)0 V, (b)-0.2 V, (c) -0.4 V

Fig. 6 Simulated band diagram of the nBnn+ device at : (a) 0 V, (b)-0.2 V, (c) -0.4 V

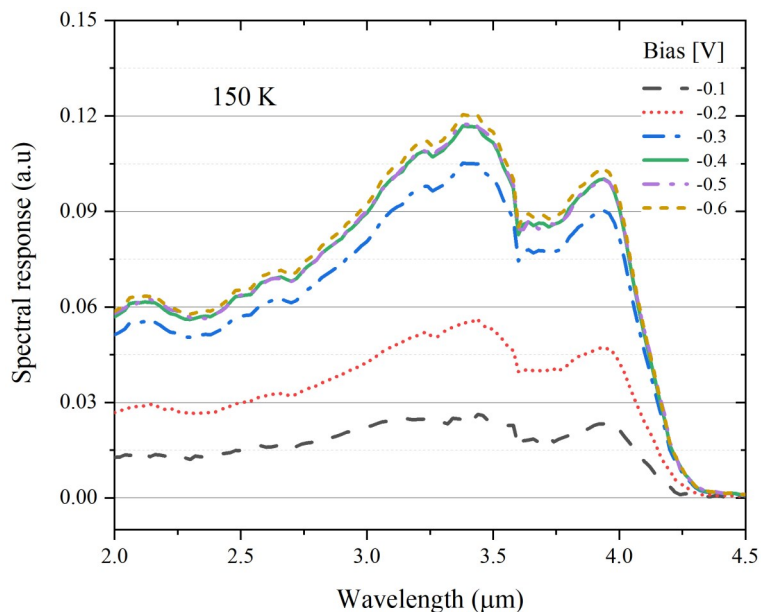


图 7 器件在不同偏压下的光谱响应曲线

Fig. 7 Spectral response plot of the device under different biases

图8(a)为100~280 K下器件的暗电流密度-电压曲线,由于AlAsSb/AlSb势垒层为p型掺杂,AlAsSb/AlSb势垒层-InAsSb吸收层界面形成耗尽层,出现耗尽区相关产生-复合电流,且随着反向偏置电压增大,势垒层和吸收层界面耗尽区向吸收层扩展,产生-复合电流增加,J-V曲线较斜。高温下J-V曲线较平,基本不随反向偏置电压变化,扩散电流为主要器件暗电流。图8(b)是-0.4 V偏置电压下器件的Arrhenius曲线,工作温度低于180 K时,暗电流激活能为171 meV,暗电流以产生复合电流为主,工作温度高于180 K时,暗电流激活能为304 meV,接近150 K下InAsSb的带隙295 meV,器件暗电流以扩散电流为主。

采用钢砷锑势垒阻挡型器件暗电流解析模型对150 K下器件的暗电流进行拟合,其他的影响都计算为欧姆电流 $J_{shunt}$ ,结果如图9(a)所示,拟合中吸收层和势垒层的掺杂浓度采用C-V测试的估算结果,InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub>材料的辐射复合和俄歇复合寿命采用1.1节的计算结果,SRH复合寿命取300 ns,150 K下InAs<sub>0.91</sub>Sb<sub>0.09</sub>材料的禁带宽度为0.3 eV, $N_i = 6 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ , $E_i = 0.81E_g$ 。从暗电流拟合分析结果图9(a)可以看出,整个反向偏压范围内,器件暗电流受限于产生-复合电流。图9(b)为Sentaurus TCAD仿真计算的势垒层界面处载流子空间电荷密度分布,进一步证实了产生-复合电流是由p型掺杂势垒层在吸收层形成耗尽区引起,即该器件还没有

达到完全抑制产生复合电流的效果,器件结构还需优化设计。势垒层在生长过程中为剩余杂质掺杂,为了抑制产生复合电流,应该使耗尽区尽可能进入势垒层,增加n型钢砷锑吸收层的掺杂浓度,使吸收层掺杂浓度远大于势垒层掺杂时,可以减小产生复合电流的大小,但相应地钢砷锑材料的载流子寿命会下降,一般不推荐。此外,合理设计AlAsSb势垒层和InAsSb吸收层的n型掺杂浓度,消除势垒层-吸收层界面吸收层中耗尽区,减小甚至完全消除产生复合电流,以进一步降低器件暗电流。

### 3 结论

优化钢砷锑势垒阻挡型器件结构,通过在n型吸收层的另一侧加入重掺杂接触层,制作了nBnn<sup>+</sup>器件,测试分析了器件的暗电流温度特性。150 K工作温度,-0.4 V下器件的暗电流密度为 $3 \times 10^{-6} \text{A/cm}^2$ ,采用nBn器件暗电流解析模型对150 K温度下器件的暗电流进行分析拟合,结果表明由于势垒层为p型剩余杂质掺杂,吸收层为n型掺杂,在吸收层中形成耗尽区,形成产生复合电流,暗电流拟合结果与Arrhenius曲线分析结果相吻合。180 K工作温度下,制备的器件并未工作在扩散限,为了进一步抑制产生复合电流,需要优化势垒层、吸收层的掺杂类型和掺杂浓度,以消除吸收层耗尽区,减小甚至完全消除工作偏压下的产生-复合电流。

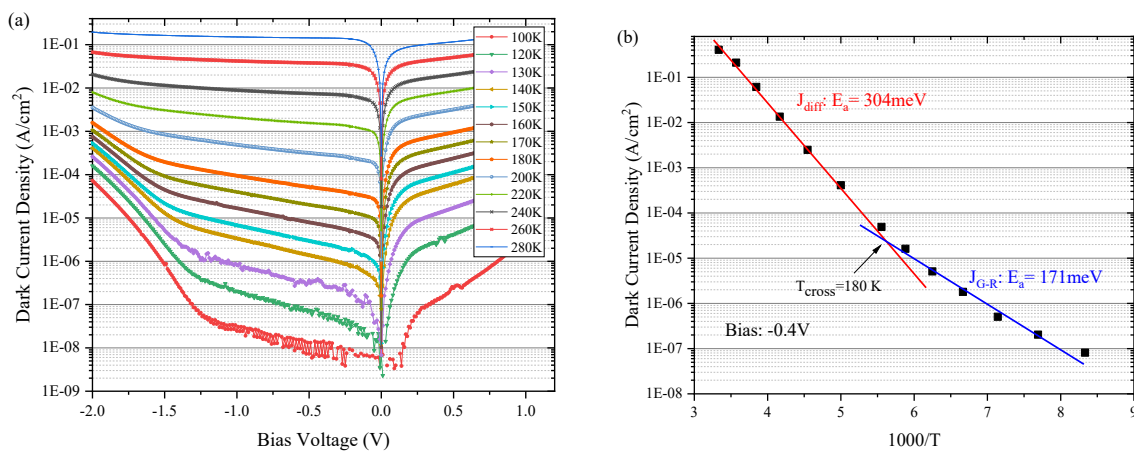


图8 (a)100~280 K器件暗电流密度-电压曲线, (b)-0.4 V下器件的Arrhenius曲线

Fig. 8 (a) J-V plot of the device at 100~280 K, (b) Arrhenius's curve of the dark current at -0.4 V

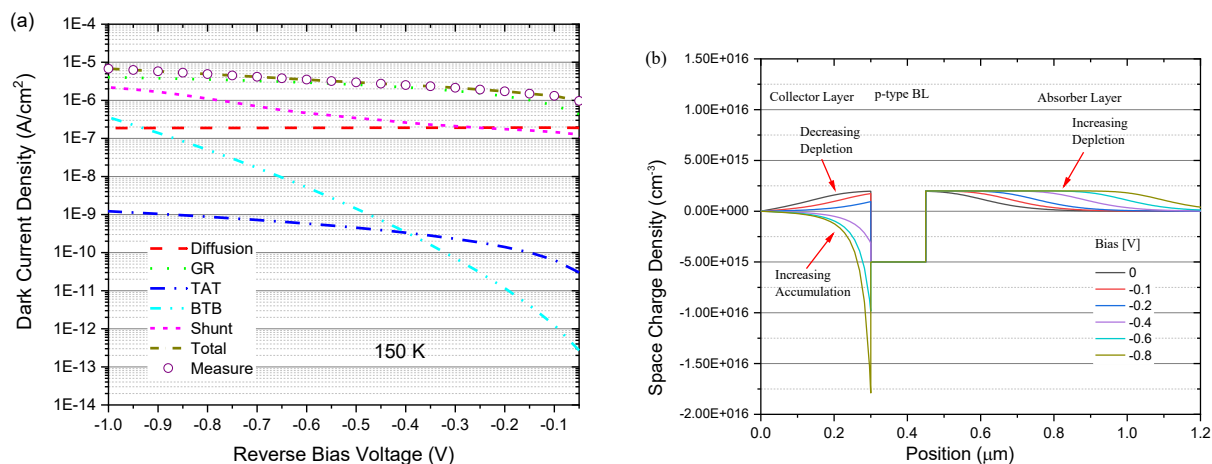


图9 (a)150 K 暗电流密度拟合和实验结果密度分布, (b)Sentaurus 计算势垒层界面处的空间电荷密度分布

Fig. 9 (a)Calculated dark current components and the experimental  $J$ - $V$  plot at 150 K, (b) the space charge density distribution at the barrier interfaces calculated by Sentaurus

## References

- [1] 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.
- [2] Philip K, Olga K, Steve G, *et al.* High Operating Temperature XBn-InAsSb Bariode Detectors [C]. Proc. of SPIE, 2012, **8268**: 8268U.
- [3] Karni Y, Aronov E, Ezra M B, *et al.* Large format 15  $\mu\text{m}$  pitch XBn detector [C]. Proc. of SPIE, 2014, **9070**: 90701F.
- [4] Shkedy L, Armon E, Avnon E, *et al.* HOT MWIR detector with 5 $\mu\text{m}$  pitch [C]. Proc. of SPIE, 2021, **11741**: 117410W.
- [5] David Z T, Alexander S, Arezou K, *et al.* The emergence of InAs/InAsSb type-II strained layer superlattice barrier infrared detectors [C]. Proc. of SPIE, 2019, **11002**: 110020F.
- [6] David Z T, Sir B R, Sam A K, *et al.* Dvelopment of type-II superlattice long wavelength infrared focal plane arrays for land imaging[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, **123**:104133.
- [7] HUANG Liang, LI Zhi-Feng, CHEN Ping-Ping, *et al.* Far infrared reflection spectra of InAs<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub> (x=0-0.4) thin films. *Journal of Applied Physics*, 2013, **113**:213112.
- [8] WANG Ting-Ting, XIONG Min, ZHAO Ying-Chun, *et al.* Planar mid-infrared InAsSb photodetector grown on GaAs substrate by MOCVD. *Applied Physics Express*, 2019, **12**: 122009.
- [9] XIE Hao, LIN Hong-Yu, YANG Wang, *et al.* Liquid phase epitaxy growth and photoluminescence of InAs<sub>1-x-y</sub>Sb<sub>x</sub>P<sub>y</sub> epilayer [J]. *Materials Research Express*, 2019, **6**: 085912.
- [10] SHE Li-Fang, JIANG Jun-Kai, CHEN Wei-Qiang, *et al.* Mid-wave infrared p+-B-n InAs/InAsSb type-II superlattice photodetector with an AlAsSb/InAsSb superlattice barrier [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2022, **121**:104015.
- [11] CHEN Yun-Feng, WANG Yang, WANG Zhen, *et al.* Unipolar barrier photodetectors based on van der Waals heterostructures[J]. *Nature Electronics*, 4, 357-363.
- [12] DENG Gong-Rong, YANG Wen-Yun, Zhao Peng, *et al.* High operating temperature InAsSb-based mid-infrared focal plane array with a band-aligned compound barrier. *Appl.Phys.Lett*, 2020, **113**:031104.
- [13] Humphreys R G. Radiative lifetime in semiconductors for infrared detection. *Infrared Physics*, 1986, **26**(6): 337-342.
- [14] Rogalski A, Zwikowski K. Intrinsic carrier concentration and effective masses in InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub>. *Infrared Phys*, 1989, **29**:35-42.
- [15] Blakemore J S. *Semiconductor Statistics* [M]. New York: Pergamon Press, 1962: 221.
- [16] Shockley W, Read W T. Statistics of the recombinations of holes and electrons. *Physical Review*, 1951, **83**: 228.
- [17] YE Z H, NU X N, ZHANG H Y, *et al.* Study of dark current for mercury cadmium telluride long. Structures [J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2004, **23**(2), 86-90. (叶振华, 胡晓宁, 张海燕, 等. 不同结构的碲镉汞长波光伏探测器的暗电流研究, *红外与毫米波学报*, 2004, **23**(2), 86-90.)
- [18] Martyniuk P, Wrobel J, Plis E, *et al.* Performance modeling of MWIR InAs/GaSb/B - Al<sub>0.2</sub>Ga<sub>0.8</sub>Sb type-II superlattice nBn detector. *Semiconductor Science and Technology*, 2012, **27**(5): 055002.