

# 非制冷势垒型 InAsSb 基高速中波红外探测器

贾春阳<sup>1,3</sup>, 邓功荣<sup>2</sup>, 赵鹏<sup>2</sup>, 朱之贞<sup>4</sup>, 赵俊<sup>2\*</sup>, 张逸韵<sup>1,3\*</sup>

(1. 中国科学院半导体研究所 半导体照明研发中心, 北京 100083;

2. 昆明物理研究所, 云南昆明 650223;

3. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100049;

4. 陆装驻重庆军代局驻昆明地区第一军代室, 云南昆明 650000)

**摘要:** 高速响应的中波红外探测器在自由空间光通信和频率梳光谱学等新兴领域的需求逐渐增加。中长波 XB<sub>n</sub> 势垒型红外光探测器对暗电流等散粒噪声具有显著抑制作用。本文在 GaSb 衬底上采用分子束外延技术生长了 nBn 和 pBn 两种结构的 InAsSb/AlAsSb/AlSb 中波红外光探测器材料, 并通过微纳加工工艺制备了可用于射频响应特性测试的 GSG 结构探测器。XRD 和 AFM 的测试结果表明, 两种结构的外延片都具有较好的晶体质量。器件暗电流测试结果表明, 相较于 nBn 器件, 在室温和反向偏压 400 mV 的工作条件下, 直径 90 μm 的 pBn 器件表现出更低的暗电流密度 0.145 A/cm<sup>2</sup>, 说明该器件在室温非制冷环境下表现出较低的噪声水平。不同台面直径的探测器的暗电流测试表明, pBn 器件的表面电阻率低于对照的 nBn 器件的表面电阻率。另外, 根据探测器的电容测试结果, 可零偏压工作的 pBn 探测器具有完全耗尽的势垒层和部分耗尽的吸收区, nBn 的吸收区也存在部分耗尽。探测器的射频响应特性表明, 直径 90 μm 的 pBn 器件的响应速度在室温和 3 V 反向偏压下可达 2.62 GHz, 对照的 nBn 器件的响应速度仅为 2.02 GHz, 响应速度提升了 29.7%, 初步实现了在中红外波段下可快速探测的室温非制冷势垒型光电探测器。

**关键词:** InAsSb 基; 非制冷; 高速; 中波红外; 势垒型探测器

中图分类号: O43 文献标识码: A

## Uncooled InAsSb-based high-speed mid-wave infrared barrier detector

JIA Chun-Yang<sup>1,3</sup>, DENG Gong-Rong<sup>2</sup>, ZHAO Peng<sup>2</sup>, ZHU Zhi-Zhen<sup>4</sup>, ZHAO Jun<sup>2\*</sup>, ZHANG Yi-Yun<sup>1,3\*</sup>

(1. R&D Center for Solid-State Lighting, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

2. Kunming Institute of Physics, Kunming 650223, China;

3. Center of Materials Science and Optoelectronics Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. The first military representative office in Kunming area of the Military Representative Bureau of Land Forces in Chongqing, Kunming 650000, China)

**Abstract:** The demand for high-speed response mid-wave infrared (MWIR) photodetectors (PDs) is gradually increasing in emerging fields such as free-space optical communication and frequency comb spectroscopy. The XB<sub>n</sub> barrier infrared photodetectors greatly suppress shot noise originated from the device dark current. In this work, InAsSb/AlAsSb/AlSb-based nBn and pBn barrier MWIR PDs were grown on GaSb substrates using molecular beam epitaxy (MBE). The GSG PDs were fabricated to realize the radio frequency (RF) response testing. X-ray diffraction (XRD) and atomic force microscopy (AFM) results indicate that both epitaxial structures exhibit good crystal quality. The 90 μm diameter pBn PDs exhibit a lower dark current density of 0.145 A/cm<sup>2</sup> compared to the nBn PDs operating at room temperature (RT) and a reverse bias of 400 mV, which indicates the uncooled barrier PDs perform with low noise. Capacitance tests reveal that the pBn PDs, operating at zero bias, show a fully depleted barrier layer and partially depleted absorption region, while the nBn absorption region also exhibits partial depletion. RF response characterization demonstrates

收稿日期: 2023-07-05, 修回日期: 2023-07-19

Received date: 2023-07-05, Revised date: 2023-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(62174156)

Foundation items: Supported by the National Natural Science Foundation of China (62174156)

作者简介 (Biography): 贾春阳 (1998—), 男, 河南周口人, 硕士生, 主要研究领域为碲化物基红外探测器. E-mail: cyjia@semi.ac.cn

\* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: yzhang@semi.ac.cn, junzhao80@163.com

that the 90  $\mu\text{m}$  diameter pBn PDs achieve 3 dB bandwidth of 2.62 GHz at room temperature and under a 3 V reverse bias, which represents a 29.7% improvement over the corresponding nBn PDs, only achieving 3 dB bandwidth of 2.02 GHz. This signifies a preliminary achievement of uncooled barrier MWIR PDs capable of fast detection.

**Key words:** InAsSb-based, midwave infrared, photodetector, uncooled, high speed detection

## 引言

中波红外(3~5  $\mu\text{m}$ )光电探测器在远距离成像、导弹制导等领域得到了广泛应用。自由空间光通信和频率梳光谱学等新兴领域对高速响应的红外光探测器的需求也逐渐增加<sup>[1]</sup>。由于中波长红外探测器材料带隙较窄,实现中波波段的高性能红外探测器十分困难。在高工作温度下,探测器通常遭受严重的热噪声干扰。为了实现高信噪比,需要抑制暗电流并增加入射光强度。隧穿、产生-复合和扩散等暗电流造成的散粒噪声对探测器的性能影响较大<sup>[2]</sup>。2006年以来<sup>[3]</sup>,通过宽带隙势垒层对扩散、产生-复合以及隧穿暗电流产生的抑制作用,中长波 XB<sub>n</sub>势垒型红外光探测器的出现极大程度地提高了器件的探测性能,各种材料体系例如 InSb<sup>[4]</sup>和 InAsSb 体材料<sup>[4-6]</sup>以及 InAs/GaSb<sup>[7]</sup>和 InAs/InAsSb<sup>[8]</sup>超晶格材料都发展了势垒型结构器件。在 nBn 结构中,为了有效收集光电流,需要施加较低的反向偏压以获得最小的工作暗电流,而 pBn 器件在零偏压下能够让势垒层完全耗尽而具有较高的响应度,允许了器件在零偏压下工作<sup>[9]</sup>。另外,具有额外耗尽区的 pBn 器件相较于 nBn 器件,由于内建电场的存在能够促进光生载流子的分离和收集,从而有利于提高其响应特性。

在本工作中,我们制备了不同直径的 nBn 和 pBn 结构的中波 InAsSb/AlAsSb 红外接地-信号-接地(Ground-Signal-Ground, GSG)探测器,并对制备的探测器进行了变温暗电流特性、结电容特性和室温射频响应特性的表征测试。通过比较 nBn 和 pBn 器件的测试结果,我们发现直径 90  $\mu\text{m}$  的 pBn 器件在室温和反向偏压 400 mV 工作时,具有更低的暗电流密度(0.145 A/cm<sup>2</sup>)和更高的 3 dB 带宽(2.62 GHz)。

## 1 材料生长、器件制备和测试

本文通过固态源分子束外延技术在 2 英寸的 n 型 Te-GaSb 衬底上分别外延生长 nBn 和 pBn 两种势垒型结构器件。生长过程如下所示:先在衬底上生

长 GaSb 缓冲层来获得平整表面以及减少材料应力和位错,接着生长重掺杂的( $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )n 型 InAsSb 接触层,然后生长 2.5  $\mu\text{m}$  厚的非故意掺杂( $10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) InAsSb 体材料吸收层。吸收层上生长了 150 nm 厚的 AlAsSb/AlSb 数字合金电子势垒层,通过在 AlAsSb 层中插入超薄的 AlSb 层实现了吸收区和势垒层价带偏移的显著减少,有助于空穴向 p 型接触层运输<sup>[10]</sup>。最后,分别生长 300 nm 厚的重掺杂( $10^{18} \text{ cm}^{-3}$ )n 型 InAsSb 和 p 型 GaSb 接触层用于形成 nBn 和 pBn 器件结构。其中,Si 和 Be 分别被用作 n 型和 p 型掺杂源。完成样片的外延生长后,通过原子力显微镜(D3100, Veeco, USA)和高分辨 X 射线衍射仪(Bede D1, United Kingdom)对晶片进行表征以确保获得高质量的材料。通过激光划片将 2 英寸的外延片划裂为  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  的样片,样片经过标准工艺处理,包括台面定义、钝化和金属蒸镀工艺,制成直径从 10  $\mu\text{m}$  到 100  $\mu\text{m}$  的圆形台面单管探测器。台面定义工艺包括通过电感耦合等离子体(Inductively Coupled Plasma, ICP)进行的干法刻蚀工艺,还包括利用柠檬酸基混合溶液进行的湿法腐蚀工艺,其目的是去除器件侧壁上的离子诱导损伤和表面态。为了表征探测器的射频响应特性,射频探针需要与探测器的金属电极互相耦合,因此探测器需要具备三个电极,分别为接地(Ground)、信号(Signal)和 Ground 电极,其中两个 Ground 电极相连与下接触层形成欧姆接触,Signal 电极与上接触层形成欧姆接触,如图 1(c)和 1(e)所示。通过低温探针台和半导体参数分析仪(Keithley 4200, America)来测试探测器在 77~300 K 温度范围内的电学特性。探测器的光学响应特性在我们之前的工作中介绍过<sup>[10]</sup>,在 300 K 下光电探测器截止波长约为 4.8  $\mu\text{m}$ ,基本与 InAsSb 吸收层的带隙一致。在 300 K 和反向偏置为 450 mV 时,饱和量子效率在 55%~60%。通过探针台和响应频率为 10 MHz~67 GHz 的矢量网络分析仪(Keysight PNA-X N5247B, America),对探测器进行射频响应特性表征。

## 2 结果与讨论

### 2.1 材料质量表征

图 1(a)中,不同结构的探测器样片的 X 射线衍射谱结果显示,从左到右的谱线峰分别对应于 InAsSb 吸收层和 GaSb 缓冲层/衬底。其中, nBn 和 pBn 外延片的 InAsSb 吸收区的峰值分别出现在 60.69 度和 60.67 度, GaSb 衬底的峰值则出现在 60.72 度。因此, InAsSb 吸收层与 GaSb 衬底的晶格失配分别为  $-108 \text{ acsec}$  和  $-180 \text{ acsec}$ , 符合预期, 表明 nBn 和 pBn 器件的 InAsSb 吸收区和 GaSb 衬底几乎是晶格匹配条件下生长。因此, nBn 和 pBn 外延片都具有良好的材料质量。图 1(b)和 1(d)原子力显微镜扫描的结果显示, 在一个  $5 \times 5 \mu\text{m}^2$  的区域内, nBn 和 pBn 外延片的均方根粗糙度分别为  $1.7 \text{ \AA}$  和  $2.1 \text{ \AA}$ , 表明生长后的 nBn 和 pBn 外延片具有良好的表面形貌。

### 2.2 器件的变温暗电流特性

图 2(a)显示了器件直径为  $90 \mu\text{m}$  的 nBn 和 pBn 探测器单管芯片的变温暗电流密度-电压特性。测试时, 单管探测器放置在温度可变的低温探针台上, 通过探针台直流探针与 Keithley 4200 半导体参数分析仪连接, 对探测器样片分别进行室温和低温电学特性表征。低温探针台可以实现  $77 \sim 300 \text{ K}$  的温度调控, 温度调控的梯度 (STEP) 为  $25 \text{ K}$ , 探针台设置有红外辐射屏蔽窗口以消除背景辐射。在  $300 \text{ K}$  下, nBn 和 pBn 探测器在反向偏压  $400 \text{ mV}$  时的暗电流密度分别为  $0.188 \text{ A/cm}^2$  和  $0.145 \text{ A/cm}^2$ 。

在  $150 \text{ K}$  下, nBn 和 pBn 探测器在反向偏压  $400 \text{ mV}$  时的暗电流密度分别为  $3.4 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$  和  $1.2 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$ 。与 nBn 探测器相比, pBn 探测器在  $300 \text{ K}$  和  $150 \text{ K}$  温度下暗电流密度略低但基本保持在同一数量级, 且随着温度下降得更快。低暗电流密度归因于 AlAsSb/AlSb 数字合金势垒对多数载流子的有效阻挡<sup>[11]</sup>。图 2(b)显示了  $77 \sim 300 \text{ K}$  时, 直径为  $90 \mu\text{m}$  的 nBn 和 pBn 探测器的  $R_{\phi}A$  (微分电阻和器件面积的乘积) 随反向偏压的变化曲线, 温度变化的梯度 (STEP) 为  $25 \text{ K}$ 。nBn 和 pBn 的  $R_{\phi}A$  在  $150 \text{ K}$  时分别为  $9.72 \times 10^2 \Omega \cdot \text{cm}^2$  和  $5.97 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ , 在  $300 \text{ K}$  时下降为  $3.53 \Omega \cdot \text{cm}^2$  和  $17.23 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。可以发现  $R_{\phi}A$  随着温度的升高而快速下降, 主要是因为高工作温度下扩散过程和热电子发射引起的泄漏电流增加。扩散电流 ( $J_{\text{diff}}$ ) 和热电子发射电流 ( $J_{\text{ther}}$ ) 随温度的增加遵循以下公式<sup>[12]</sup>:

$$J_{\text{diff}} \sim T^3 \cdot \left[ \exp\left(\frac{-E_a}{k_b T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$J_{\text{ther}} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{k_b T}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_b}{k_b T}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

其中,  $E_a$  和  $\Phi_b$  分别是吸收层和电子势垒层的激活能,  $V_b$  为施加的偏置电压。  $T$ ,  $q$ ,  $k_b$  和  $A^*$  分别是工作温度、单元电荷量、玻尔兹曼常数和理查森常数。

图 2(c) 显示了在  $400 \text{ mV}$  反向偏压下, nBn 和 pBn 探测器表现出  $77 \sim 300 \text{ K}$  的  $R_{\phi}A$  与温度倒数 ( $1000/T$ ) 之间的关系, 温度变化的梯度 (STEP) 为

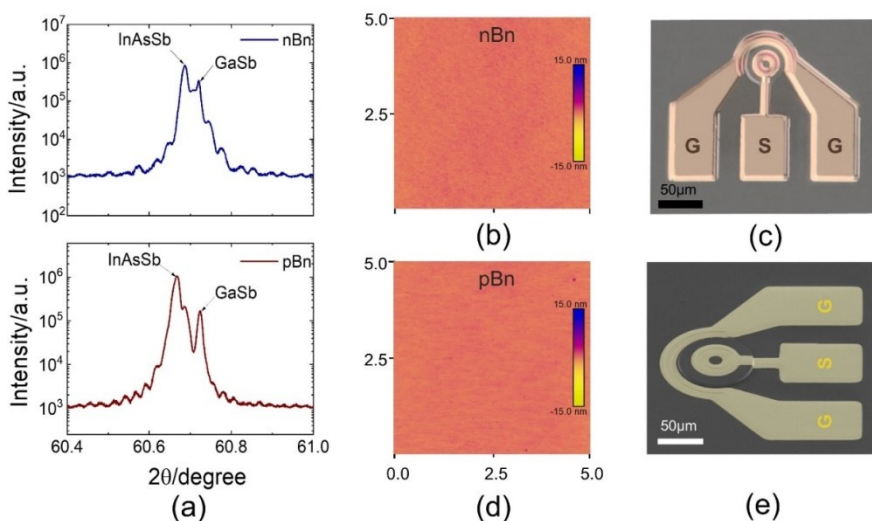


图 1 (a)为 nBn 和 pBn 外延片的 X 射线衍射谱; (b)和 (d)分别为 nBn 和 pBn 外延片的原子力显微扫描图; (c)和 (e)分别为制备的圆形 GSG 探测器的光学照片和扫描电子照片

Fig. 1 (a) X-ray diffraction spectra of nBn and pBn epitaxial wafers; (b) and (d) atomic force microscopic images for nBn and pBn epitaxial wafers; (c) and (e) optical and scanning electron micrographs of the fabricated circular GSG detector

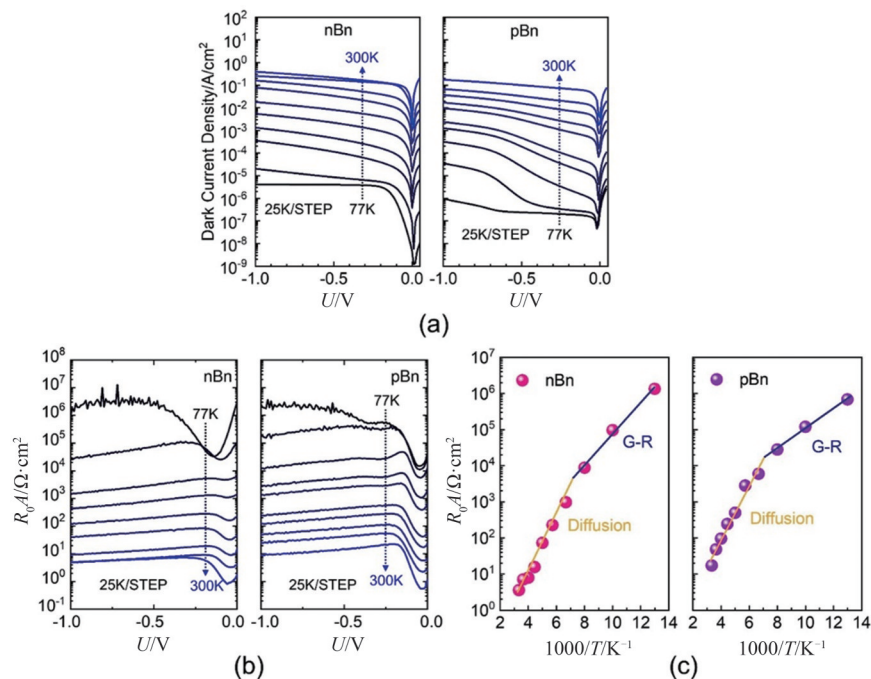


图2 77~300 K温度下直径90  $\mu\text{m}$ 的nBn和pBn探测器单管芯片:(a)暗电流密度-电压曲线;(b)微分电阻和器件面积的乘积 $R_0A$ 随反向偏压的变化曲线;(c) $R_0A$ 随 $1000/T$ 的变化曲线

Fig. 2 (a) Dark current density-voltage curves; (b) differential resistance and device area product ( $R_0A$ ) versus reverse bias; (c) Arrhenius plot of  $R_0A$  at -400 mV for 90  $\mu\text{m}$  nBn and pBn detector single-element chips at temperatures ranging from 77 K to 300 K

25 K。在150~300 K的温度范围内,暗电流和温度的依赖性更接近 $E_g/k_bT$ ,符合扩散电流的特征。通过使用公式(1)提取出nBn和pBn探测器的激活能分别约为267 meV和262 meV,这非常接近InAsSb吸收层带隙<sup>[13]</sup>。而在150 K以下电流大致遵循 $E_g/2k_bT$ 关系,表明在这些温度下,暗电流主要由耗尽区SRH产生,产生-复合(Generation-Recombination, G-R)过程在暗电流密度成分中起主导作用,这表明在低温下仍然有继续改善暗电流特性的空间。nBn和pBn的中波红外光电探测器从G-R机制向扩散机制过渡的温度转折点约为150 K,显示探测器可以在高温条件下工作。

### 2.3 器件暗电流的尺寸效应

由于势垒型红外探测器对于体内暗电流可以起到较好的抑制作用,因此我们关注与台面周长和面积有关的表面泄露暗电流。通过抑制表面漏电流可以进一步提高探测器的工作性能。图3(a)显示了从20~100  $\mu\text{m}$ 直径的nBn和pBn器件于室温工作的暗电流密度和电压的关系,尺寸变化的梯度(STEP)为10  $\mu\text{m}$ 。从图中可以明显观察到pBn和nBn器件的暗电流密度随着尺寸的增加逐渐降低,同时相同台面直径的pBn相较于nBn器件有更低的暗电流密度,且nBn具有更强的尺寸依赖性。图3(b)

显示从20~100  $\mu\text{m}$ 的nBn和pBn探测器的微分电阻和台面面积的乘积 $R_0A$ 随反向偏压的变化曲线。pBn和nBn器件的暗电流密度随着尺寸的增加逐渐增加。从图3(c)中可以看出,在相同反向偏压400 mV工作时,pBn和nBn器件 $R_0A$ 随台面直径的增加而增大, $R_0A$ 和尺寸的变化关系在周长对面积比( $P/A$ )增加时更为明显。这是因为随着探测器的尺寸变化,由于 $R_0A$ 的平方根与约翰逊噪声成反比关系<sup>[14]</sup>。通常情况下可以通过分析 $(R_0A)^{-1}$ 与 $P/A$ 的变化趋势,采用以下公式计算得到20~100  $\mu\text{m}$ 直径的探测器体材料以及表面漏电对暗电流的贡献<sup>[15]</sup>:

$$\frac{1}{R_0A} = \frac{1}{(R_0A)_{bulk}} + \frac{1}{\rho_{surface}} \times \frac{P}{A}, \quad (3)$$

其中, $(R_0A)_{bulk}$ 为去除表面泄漏影响后,探测器的体积微分电阻和台面面积的乘积, $\rho_{surface}$ 为探测器的表面电阻率。 $P$ 为台面周长, $A$ 为台面面积。随着台面尺寸增加, $P/A$ 减小,侧壁上的表面缺陷带来的钉扎效应降低,因此器件通过表面导电通道导致的泄露电流的占比逐渐降低。图3(d)中pBn器件相对平缓的拟合曲线说明具有较高的侧壁电阻率,根据斜率的倒数计算出约为 $1.7 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 。相比之下,nBn器件的表面电阻率为 $3.1 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 。另外,提取得到的nBn和pBn的 $R_0A$ 体积分量分别为5.27

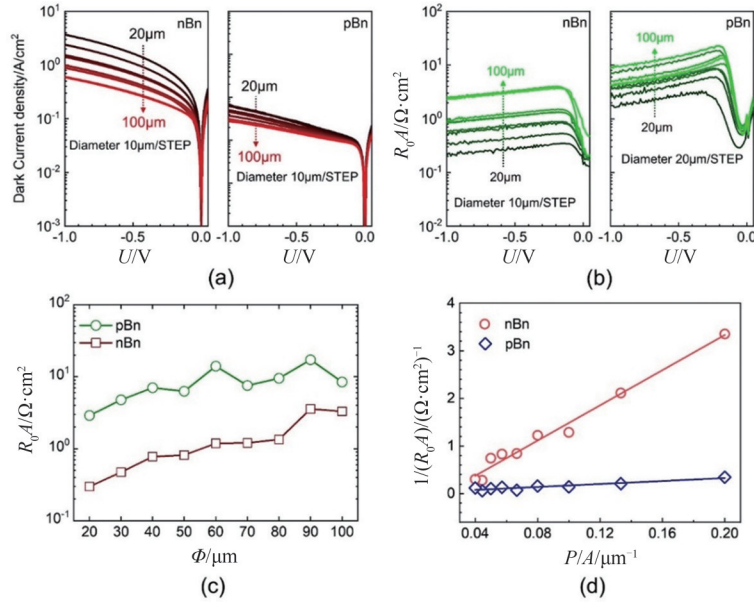


图3 20~100  $\mu\text{m}$  直径的nBn和pBn器件于室温下的(a)暗电流密度和电压变化曲线和(b)  $R_{\phi}A$  随反向偏压的变化曲线;(c) 在400 mV反偏时,pBn和nBn器件  $R_{\phi}A$  随台面直径的变化;(d)  $(R_{\phi}A)^{-1}$  与周长对面积( $P/A$ )的变化曲线  
Fig. 3 (a) Dark current density-voltage curves of nBn and pBn devices with diameters ranging from 20  $\mu\text{m}$  to 100  $\mu\text{m}$  at room temperature;(b) variation curves of  $R_{\phi}A$  with reverse bias;(c)  $R_{\phi}A$  varied with mesa diameters for pBn and nBn devices at a reverse bias of 400 mV;(d) variation of  $(R_{\phi}A)^{-1}$  over the perimeter-to-area ratio ( $P/A$ )

$\Omega \cdot \text{cm}^2$  和  $16.60 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。由此可见,pBn器件相较于nBn器件的表面电阻率更高,对表面泄露电流的抑制作用更强,因此具有更低的暗电流特性。

#### 2.4 器件的结电容

图4(a)给出了室温下通过C-V测试得到的不同直径nBn和pBn探测器的结电容随反向偏压的变化曲线。对于势垒层完全耗尽的pBn探测器,器件电容可以由AlAsSb/AlSb势垒层电容和InAsSb吸收区耗尽层电容的串联组合给出,并通过以下的公式计算得到探测器的电容<sup>[9]</sup>:

$$C_{total} = \frac{C_{dep} C_{bar}}{C_{dep} + C_{bar}}, \quad (4)$$

其中, $C_{total}$ 是总电容, $C_{dep}$ 是InAsSb耗尽区的电容, $C_{bar}$ 是势垒层的电容。在反向偏置条件下,InAsSb的耗尽主要发生在势垒层的吸收区侧,其电容表达式为:

$$C_{dep(bar)} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_{dep(bar)} A}{d_{dep(bar)}}, \quad (5)$$

其中, $\epsilon_0$ 为自由空间介电常数, $\epsilon_{dep}$ 和 $\epsilon_{bar}$ 分别是InAsSb和AlAsSb/AlSb的相对介电常数, $A$ 是器件面积, $d_{dep}$ 和 $d_{bar}$ 为InAsSb耗尽区和势垒层的厚度。其中, $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_{dep}$ 、 $\epsilon_{bar}$ 、 $d_{bar}$ 和 $A$ 均为常数, $d_{dep}$ 是随着施加的反向偏压变化的变量。图4(a)中可以看出,pBn的结电容随反向偏压的增大而减少,说明 $d_{dep}$ 先降低后增

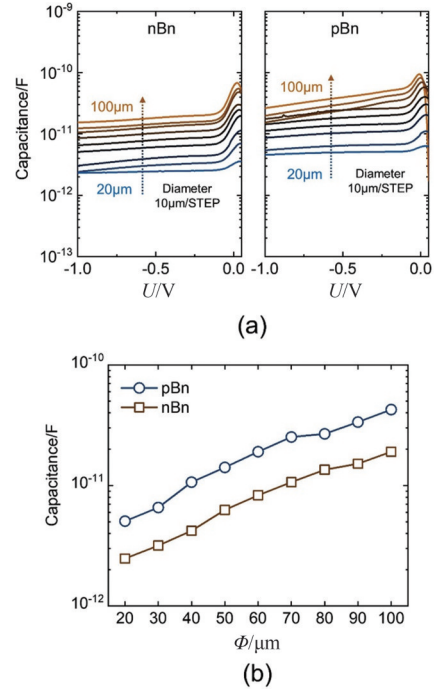


图4 (a)室温下不同直径的nBn和pBn探测器的结电容随反向偏压的变化曲线;(b)反偏400 mV下结电容与台面直径的变化曲线

Fig. 4 (a) Junction capacitance versus reverse bias for nBn and pBn detectors with different diameters at room temperature;(b) variation in junction capacitance with mesa diameters at a reverse bias of 400 mV

加。而 nBn 探测器表现出和 pBn 相似的结电容-电压的变化曲线,由此可见,由于 nBn 异质结的能级偏移和掺杂浓度的不匹配,会在势垒区与吸收层/接触层的界面上形成耗尽区<sup>[16]</sup>。相较于 nBn 器件, pBn 势垒层完全耗尽且 InAsSb 吸收区具有更强的耗尽,  $C_{dep}$  和  $C_{bar}$  都表现得更高,因此在相同工作条件下相同台面面积的 pBn 探测器结电容比 nBn 更高,如图 4 (b) 所示,且随着台面直径的增加,结电容逐渐增大。

## 2.5 器件的射频响应特性

通过 Keysight PNA-X N5247B 矢量网络分析仪、探针台和飞秒激光光源,在 0~3 V 反向偏压范围内对不同尺寸的 nBn 和 pBn 探测器在 10 MHz~67 GHz 之间进行了室温射频响应特性测试。根据图 5 推算出在 3 V 反向偏压下的 40  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$ 、70  $\mu\text{m}$ 、80  $\mu\text{m}$ 、90  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$  直径的圆形 nBn 和 pBn 红外探测器的 -3 dB 截止频率( $f_{3dB}$ )。这里特别值得注意的是,与传统 p-i-n 器件不同,本文里制备的势垒型器件  $f_{3dB}$  随着探测器直径的增加而逐渐增大。通常以载流子漂移为主要输运机制的 p-i-n 探测器的总  $f_{3dB}$  可以通过以下公式计算<sup>[17]</sup>:

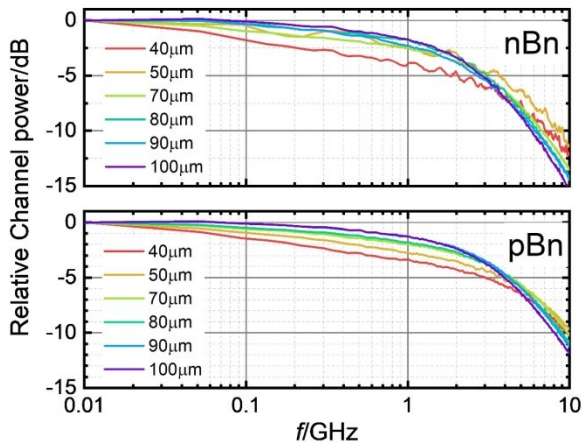


图 5 在 300 K 下施加 -3 V 偏压的 40  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$ 、70  $\mu\text{m}$ 、80  $\mu\text{m}$ 、90  $\mu\text{m}$  和 100  $\mu\text{m}$  直径的 nBn 和 pBn 探测器的归一化频率响应特性

Fig. 5 The normalized frequency response of 40  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$ , 70  $\mu\text{m}$ , 80  $\mu\text{m}$ , 90  $\mu\text{m}$  and 100  $\mu\text{m}$  diameter nBn and pBn detectors with -3 V bias applied at 300 K

$$f_{3dB} = \sqrt{\frac{1}{f_T^{-2} + f_{RC}^{-2}}} \quad , \quad (6)$$

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi RC} \quad , \quad (7)$$

$$f_T = \frac{\sqrt{2} v_{sat}}{\pi d_i} \quad , \quad (8)$$

其中,  $R$  为探测器电阻、 $C$  为探测器电容、 $v_{sat}$  为饱和漂移速度、 $d_i$  为吸收区厚度。一般随着 p-i-n 探测器直径的增加,探测器的  $R$  和  $C$  都会增大,导致  $f_{RC}$  减小以至总  $f_{3dB}$  减小。但是图 6 (b) 中的台面直径依赖的 -3 dB 截止频率变化趋势恰恰相反,势垒型探测器的 -3 dB 截止频率随着探测器台面直径的增加而增大。从工作原理上来说,势垒型探测器的载流子输运机制介乎光电导效应和光伏效应之间,势垒型探测器在开启后内部载流子输运过程类似光电导探测器,表面载流子寿命对响应速度会产生影响。如前所述, nBn 和 pBn 的表面泄露电流是器件侧壁上表面态和内部体材料之间由于能带弯曲形成表面漏电通道、在偏压下载流子向上下接触层输运所导致。因此,表面和体内材料输运过程会共同影响载流子运动速度。通过表面漏电通道输运的载流子的寿命  $\tau$  相比耗尽区的漂转载流子寿命长,根据公式  $f = 1/(2\pi\tau)$  可知,靠近表面的载流子响应速度较

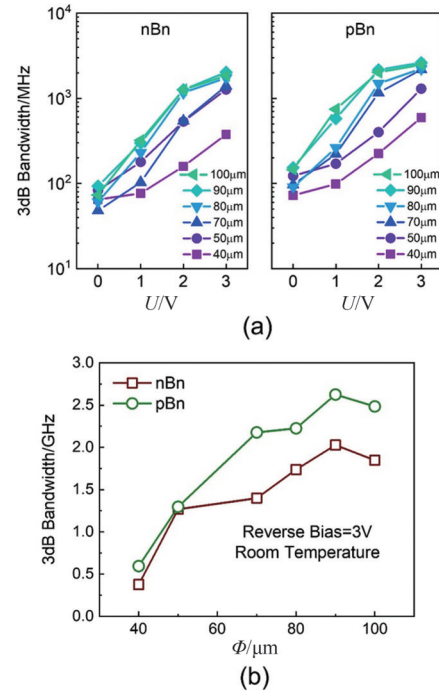


图 6 不同尺寸的 nBn 和 pBn 探测器:(a) -3 dB 截止频率随反向偏压的变化曲线;(b) 在 3 V 反向偏压下的 -3 dB 截止频率随台面直径的变化曲线

Fig. 6 nBn and pBn detectors with different sizes: (a) bias-dependent plot of -3 dB cutoff frequency; (b) variation of -3 dB cutoff frequency with mesa diameters at a reverse bias of 3 V

低,则表面泄露载流子漂移和扩散寿命将与器件 $RC$ 效应共同影响探测器带宽性能。随着台面直径的增加,侧壁表面附近与体内形成的耗尽区比例逐渐减少,表面泄露载流子的影响逐渐减小,响应速度不断增加。具体来说,nBn探测器从 $40\ \mu\text{m}$ 直径的光电探测器的 $0.37\ \text{GHz}$ 增加到 $90\ \mu\text{m}$ 直径二极管的 $2.02\ \text{GHz}$ ;pBn探测器从 $40\ \mu\text{m}$ 直径的光电探测器的 $0.59\ \text{GHz}$ 增加到 $90\ \mu\text{m}$ 直径二极管的 $2.62\ \text{GHz}$ (图6(b))。

图6(a)展示了对不同尺寸的nBn和pBn探测器在 $0\sim 3\ \text{V}$ 反向偏压范围内的 $-3\ \text{dB}$ 截止频率特性。随着反向偏压的增大,不同尺寸的器件的 $-3\ \text{dB}$ 带宽也随之增大。在低反向偏压下nBn和pBn器件的响应较慢,nBn探测器的截止频率落在 $60\sim 320\ \text{MHz}$ 之间而pBn探测器的截止频率落在 $70\sim 750\ \text{MHz}$ 之间。随着施加偏压的增加, $-3\ \text{dB}$ 截止频率增加。在反向偏压 $3\ \text{V}$ 下,nBn和pBn器件的 $-3\ \text{dB}$ 带宽可以达到 $2.02\ \text{GHz}$ 和 $2.62\ \text{GHz}$ 。pBn器件的响应速度相较于nBn器件提升了约 $29.7\%$ 。在低偏压下,光生载流子的提取主要依赖扩散,截止频率较低<sup>[18]</sup>。对于具有宽带隙势垒层型的光电探测器,相较于高速的p-i-n二极管,其耗尽区几乎落在宽禁带的势垒区一侧,导致吸收区产生的光生载流子的输运依赖于浓度梯度的扩散作用而非因空间电荷区的漂移作用。但由于pBn器件实现了势垒层的完全耗尽和吸收区的部分耗尽,以及由于nBn异质结的能量偏移在势垒型吸收区界面产生的部分耗尽,反向偏压的增加提高了这部分载流子的响应速度。根据图4电容测试结果,pBn器件的电容相较于nBn器件更高,根据电容公式(4)和(5),pBn内部相较于nBn存在更厚的耗尽区,因此在偏压作用下pBn内部更强耗尽区的内建电场对探测器的响应速度有更高的提升。在高偏压下,pBn器件的吸收区部分耗尽,并且整个光电探测器内存在电场,使得这部分漂移的载流子实现了高偏压下的更高 $-3\ \text{dB}$ 截止频率。除此之外,随着反向偏压的增加,nBn和pBn器件的 $R_0A$ (图3(b))和结电容(图4(a))逐渐减小,考虑到 $RC$ 限制带宽公式, $RC$ 频率带宽逐渐增大,也对高偏压下探测器带宽的增加做出了贡献。

### 3 结论

本文通过分子束外延技术在GaSb衬底上分别生长了nBn和pBn两种势垒型结构的InAsSb/AlAsSb/AlSb基中波红外光探测器,经过台面定义、

钝化工艺和金属蒸镀工艺制备了可用于射频响应特性测试的GSG结构探测器。在室温和反向偏压 $400\ \text{mV}$ 下,直径 $90\ \mu\text{m}$ 的pBn器件的暗电流密度低于nBn器件。不同尺寸探测器的电学特性表征结果得到pBn器件的表面电阻率为 $1.7\times 10^4\ \Omega\cdot\text{cm}$ ,而nBn器件为 $3.1\times 10^3\ \Omega\cdot\text{cm}$ 。进一步计算得到pBn和nBn器件的体 $R_0A$ 分别为 $16.60\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ 和 $5.27\ \Omega\cdot\text{cm}^2$ ,说明pBn器件相较于nBn器件对表面泄露电流的抑制作用更强,具有更低的暗电流噪声。 $CV$ 测试显示pBn探测器具有完全耗尽的势垒层和部分耗尽的吸收区,而nBn的吸收区也呈现部分耗尽的情况。通过频率响应特性的测试得到直径 $90\ \mu\text{m}$ 的pBn器件在室温和 $3\ \text{V}$ 反向偏压下具有高达 $2.62\ \text{GHz}$ 的响应速度,比nBn器件的响应速度提高了约 $29.7\%$ 。本研究初步实现了在中红外波段下能够快速探测的室温非制冷势垒型光探测器,为室温中波高速红外探测器及光通讯模块的发展提供了重要的技术参考。

### References

- [1] Huang J, Shen Z, Wang Z, *et al.* High-Speed Mid-Wave Infrared Uni-Traveling Carrier Photodetector Based on InAs/InAsSb Type-II Superlattice [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2022, **43**(5):745 - 748.
- [2] Peng R, Jiao S, Jiang D, *et al.* Investigation of dark current and differential resistance contributing mechanisms in type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2016, **27**(5):4566 - 4570.
- [3] 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.
- [4] Klipstein P. "XB n" barrier photodetectors for high sensitivity and high operating temperature infrared sensors [C] // Andresen, B F; Fulop, G F; Norton, P R. Infrared Technology and Applications XXXIV. SPIE, 2008: 69402U.
- [5] Klipstein P, Klin O, Grossman S, *et al.* High operating temperature XBn-InAsSb bariode detectors [C] // Razeghi, M; Tournie, E; Brown, G J. Quantum Sensing and Nanophotonic Devices IX. SPIE, 2012: 82680U.
- [6] CHEN Dong-Qiong, WANG Hai-Peng, QIN Qiang, *et al.* Research on dark current characteristics of InAsSb Barrier blocking infrared detector [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (陈冬琼, 王海澎, 秦强, 等. InAsSb势垒阻挡型红外探测器暗电流特性研究 [J]. *红外与毫米波学报*), 2022, **41**(5): 810-817.
- [7] Plis E, Rodriguez J B, Balakrishnan G, *et al.* Mid-infrared InAs/GaSb strained layer superlattice detectors with nBn design grown on a GaAs substrate [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2010, **25**(8):85010.
- [8] Ting D Z, Soibel A, Khoshakhlagh A, *et al.* Development of InAs/InAsSb Type II Strained-Layer Superlattice Unipolar Barrier Infrared Detectors [J]. *Journal of Electronic Ma-*

- terials, 2019, **48**(10):6145 - 6151.
- [9] Klem J F, Kim J K, Cich M J, *et al.* Comparison of nBn and nBp mid-wave barrier infrared photodetectors [C]// Razeghi, M; Sudharsanan, R; Brown, G J. Quantum Sensing and Nanophotonic Devices VII. SPIE, 2010: 76081P.
- [10] Deng G, Yang W, Gong X, *et al.* High-performance uncooled InAsSb-based pCBn mid-infrared photodetectors [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, **105**:103260.
- [11] Deng G, Yang W, Zhao P, *et al.* High operating temperature InAsSb-based mid-infrared focal plane array with a band-aligned compound barrier [J]. *Applied Physics Letters*, 2020, **116**(3):31104.
- [12] Deng G, Song X, Fan M, *et al.* Upside-down InAs/InAs<sub>1-x</sub>Sb<sub>x</sub> type-II superlattice-based nBn mid-infrared photodetectors with an AlGaAsSb quaternary alloy barrier [J]. *Optics express*, 2020, **28**(9):13616 - 13624.
- [13] Steenbergen E H. InAsSb-based photodetectors [M]// Mid-infrared Optoelectronics. Elsevier, 2020: 415 - 453.
- [14] Henini M, Razeghi M. Handbook of infrared detection technologies[M]. Elsevier, 2002.
- [15] Huang E K, Hoffman D, Nguyen B-M, *et al.* Surface leakage reduction in narrow band gap type-II antimonide-based superlattice photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2009, **94**(5):53506.
- [16] Kinch M A. State-of-the-art infrared detector technology [M]. Bellingham, Washington (1000 20th St. Bellingham WA 98225-6705 USA): SPIE, 2014.
- [17] Oehme M, Werner J, Kasper E, *et al.* High bandwidth Ge p-i-n photodetector integrated on Si [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, **89**(7):71117.
- [18] Wang Y, Nordin L, Dev S, *et al.* High-speed mid-wave infrared holey photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2023, **133**(10):104501.