

InAs/GaSb超晶格/GaSb体材料中短波双色红外探测器

马晓乐¹, 郭杰^{1*}, 郝瑞亭¹, 魏国帅¹, 王国伟^{2,3}, 徐应强^{2,3}, 牛智川^{2,3}

(1. 云南师范大学 云南省光电信息技术重点实验室, 云南昆明 650500;

2. 中国科学院半导体研究所 超晶格与微结构国家重点实验室, 北京 100083;

3. 中国科学院大学 材料科学与光电子工程中心, 北京 100049)

摘要: 采用 GaSb 体材料和 InAs/GaSb 超晶格分别作为短波与中波吸收材料, 外延生长制备了 NIPPIN 型短中双色红外探测器。HRXRD 及 AFM 测试表明, InAs/GaSb 超晶格零级峰和 GaSb 峰半峰宽 FWHM 分别为 17.57 arcsec 和 19.15 arcsec, 10 μm × 10 μm 范围表面均方根粗糙度为 1.82 Å。77 K 下, SiO₂ 钝化器件最大阻抗与面积乘积值 RA 为 5.58 × 10⁵ Ω·cm², 暗电流密度为 5.27 × 10⁻⁷ A·cm⁻², 侧壁电阻率为 6.83 × 10⁶ Ω·cm。经阳极硫化后, 器件最大 RA 值为 1.86 × 10⁶ Ω·cm², 暗电流密度为 4.12 × 10⁻⁷ A·cm⁻², 侧壁电阻率为 4.49 × 10⁷ Ω·cm。相同偏压下, 硫化工艺使器件暗电流降低 1-2 个数量级, 侧壁电阻率提高了 1 个数量级。对硫化器件进行了光谱响应测试, 器件具有依赖偏压极性的低串扰双色探测性能, 其短波通道与中波通道的 50% 截止波长分别为 1.55 μm 和 4.62 μm, 在 1.44 μm、2.7 μm 和 4 μm 处, 响应度分别为 0.415 A/W、0.435 A/W 和 0.337 A/W。

关键词: InAs/GaSb 超晶格; GaSb 体材料; 中短双色; 红外探测; 侧壁电阻率; 低串扰

中图分类号: TN140.3050

文献标识码: A

Mid-/Short-Wave dual-band infrared detector based on InAs/GaSb superlattice /GaSb bulk materials

MA Xiao-Le¹, GUO Jie^{1*}, HAO Rui-Ting¹, WEI Guo-Shuai¹, WANG Guo-Wei^{2,3}, XU Ying-Qiang^{2,3}, NIU Zhi-Chuan^{2,3}

(1. Yunnan Key Laboratory of Opto-Electronic Information Technology, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China;

2. State Key Laboratory for Superlattices and Microstructures, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

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

Abstract: Using GaSb bulk and InAs/GaSb superlattice as short wave and medium wave infrared absorbing materials respectively, a short/mid dual-band infrared detectors with NIPPIN structure were epitaxial growth and fabricated. HRXRD and AFM tests show the FWHM of zero order peak of InAs/GaSb superlattice and GaSb peak are 17.57 arcsec and 19.15 arcsec, respectively. Surface root mean square roughness RMS is 1.82 Å under 10 μm × 10 μm. At 77 K, the maximum product RA of resistance and area of SiO₂ passivated device is 5.58 × 10⁵ Ω·cm², the dark current density is 5.27 × 10⁻⁷ A·cm⁻², and side wall resistivity is 6.83 × 10⁶ Ω·cm. After anodic sulfuration, the maximum RA of the device is 1.86 × 10⁶ Ω·cm², the dark current density is 4.12 × 10⁻⁷ A·cm⁻², and side wall resistivity is 4.49 × 10⁷ Ω·cm. Sulfurization reduces dark current of the device by more than one order of magnitude and increases side wall resistivity by one order of magnitude under the same bias. The spectral response of the sulfurization device was tested, the device has the bias polarity-dependent dual-band detection performance with low crosstalk. The 50%

收稿日期: 2020-08-22, 修回日期: 2021-01-29

Received date: 2020-08-22, Revised date: 2021-01-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61774130 11474248, 61176127, 61006085, 61274013, 61306013)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China (61774130 11474248, 61176127, 61006085, 61274013, 61306013)

作者简介(Biography): 马晓乐(1995-), 男, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事红外探测材料与器件的研究. E-mail: xiaolema@semi.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author): E-mail: jiegg1020@sina.com

cutoff wavelengths of the short-wave and medium-wave channels are 1.55 μm and 4.62 μm , respectively. At 1.44 μm , 2.7 μm and 4 μm , the responsivity are 0.415 A/W, 0.435 A/W and 0.337 A/W, respectively.

Key words: InAs/GaSb superlattice, GaSb bulk material, mid-/short-wave dual-band, infrared detector, side wall resistivity, low optical cross-talk

引言

双色红外探测器具有探测波段范围广、特征信息丰富、分辨能力强、抗干扰等优点,在国内外一直是红外探测与成像领域的热点^[1-3]。正常情况下,绝大多数物体自身辐射的波长处于短波红外和中波红外范围内^[4-5],因此,中短波双色红外探测器应用更广泛。目前,可用于双色探测的材料包括 HgCdTe、量子阱和 II 类超晶格, HgCdTe 是较为成熟的一种材料体系,但其有毒、高成本、Hg 元素易挥发使材料均匀性变差的固有缺陷,限制了它的发展^[6-7]。同样,量子阱因其子带间跃迁的工作方式,对入射光波只能选择性吸收,因而量子效率低^[8-10]。而 InAs/GaSb II 类超晶格则克服了上述二者的缺点,大面积均匀性好、成本低、量子效率高、电子有效质量具有量大、隧穿电流小等优点;通过能带剪裁, InAs/GaSb II 类超晶格响应范围可从短波 2 μm 到长波 12 μm 及以上,是第三代红外探测器特别是中、长波双色红外探测器的最佳材料^[11-12]; InAs/GaSb II 类超晶格在中、短波双色探测中也有较好应用^[13, 14],但短波通道响应延伸至 2.5 μm ,会与中波通道存在一定程度的串扰。在更短波长范围内,常见的材料有 InGaAsSb、AlGaAs 和 InGaAs 等^[15-17],但是组分调整复杂,生长可重复性差。而 GaSb 体材料 0.75eV 的带隙宽度非常适合短波红外的吸收^[18-19],与 InAs/GaSb 超晶格及 GaSb 衬底晶格完美匹配,无需复杂的组分调整,且生长温度范围宽,可重复性强,极大降低了成本,有利于规模化生产。

本文在 N 型 GaSb 衬底上,采用分子束外延技术生长了基于 InAs/GaSb 超晶格和 GaSb 体材料的中短波双色红外探测器,并采用背靠背的 NIPPIN 型双二极管结构。通过刻蚀、硫化、钝化后获得双色单元探测器件,由于采用了新结构,因此主要分析了其晶体结构、表面形貌、器件 IV 特性和表面漏电流,并对红外光谱进行了简要分析。

1 材料生长及器件制备

1.1 材料设计和生长

样品外延在采用固体源的 Veeco Gen- II 分子

束外延系统的生长室内进行,此设备的 As₂ 和 Sb₂ 为裂解源,衬底为 N 型 GaSb(001)衬底。如图 1 所示,此中短双色红外探测器采用传统的 p-i-n 结构,具体为两个 pin 结组成的背靠背 n-i-p-p-i-n 结构,可通过偏压调制实现对短波红外和中波红外的分别吸收。样品由下至上依次为 N 型 GaSb 缓冲层、中波通道(mid channel)和短波通道(short channel),中波通道由 InAs/GaSb 超晶格构成,采用 InSb 界面,每周期为 8ML InAs/8ML GaSb;短波通道由 GaSb 体材料构成。由于光入射为前入射式,因此首先生长中波通道防止其对短波红外的吸收。一般双色探测器两通道间会插入一带隙较大的势垒来减小串扰降低暗电流,但因 GaSb 本身带隙较大很难有与之晶格匹配且带隙更大的材料来做势垒层,因此本文没有采用势垒层,而是采用较宽的接触层及较大的掺杂以降低串扰。N 型 GaSb 缓冲层的作用为使衬底表面更加平整从而利于余下结构的外延生长,同时也作为下电极接触层,厚度为 0.8 μm ,采用 GaTe 掺杂,掺杂浓度为 $1.54 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,掺杂浓度数据由器件生长前实验片的霍尔测试得到。中波通道包括 N 型超晶格接触层,厚度 0.5 μm ,掺杂方式为 InAs 层掺 Si,掺杂浓度为 $2.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;非掺杂超晶格吸收层,厚度 1.5 μm ,未掺杂下载流子浓度为 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$;P 型超晶格接触层,厚度 0.5 μm ,掺杂方式为 GaSb 层掺铍 Be,掺杂浓度为 $2.15 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。短波通道包括 P 型 GaSb 体材料接触层,厚度 0.5 μm ,采用铍 Be 掺杂,掺杂浓度为 $2.15 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$;非掺杂 GaSb 体材料吸收层,厚度 1.5 μm ,未掺杂下载流子浓度为 $10^{15} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$;N 型 GaSb 体材料接触层,厚度 0.5 μm ,采用 GaTe 掺杂,掺杂浓度为 $1.54 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 。

1.2 器件制造

器件工艺过程主要包括图 2 所示的 12 个步骤,第 1 步光刻形成版标图形,为之后的工艺过程做标对;第 2 步 PECVD 沉积 SiO₂ 掩膜层;第 3 步光刻形成台面图形;第 4 步以 SiO₂ 为硬掩膜 ICP 刻蚀材料至 N 型 GaSb 缓冲层形成台面,使用气体为 CH₄/Cl₂/Ar;第 5 步 ICP 刻蚀材料表面残余 SiO₂;第 6 步阳极硫化填

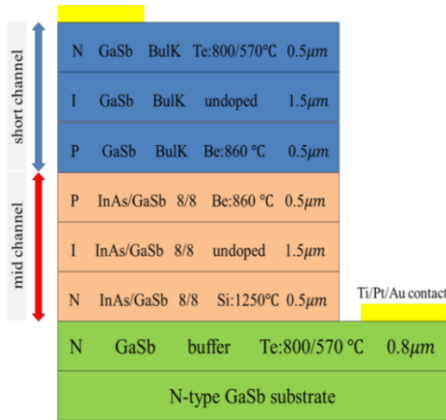


图1 InAs/GaSb 超晶格/GaSb 体材料中短波双色红外探测器结构图

Fig. 1 Structure diagram of mid-/short-wave dual-band infrared detector based on InAs/GaSb superlattice/GaSb bulk material

充台面侧壁的悬挂键^[20], 硫化液由 24g Na₂S·9H₂O 与 500 ml 乙二醇超声搅拌制成, 使用的电压为 25 V, 电流 12 mA; 第 7 步沉积 SiO₂ 物理钝化; 第 8 步光刻形成开孔图形; 第 9 步以光刻胶做掩膜, ICP 刻蚀 SiO₂ 钝化层形成开孔, 此开孔用来使金属电极与材料接触; 第 10 步光刻形成电极图形, 光刻胶使用负胶; 第 11 步电子束蒸发 Ti (50 nm)/Pt (50 nm)/Au (300 nm) 作为金属电极; 最后一步使用标准剥离工艺剥离多余金属完成器件制造。



图2 工艺流程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of process flow

因有文章指出硫化会对材料表面及侧壁造成损伤且时效短不稳定^[21], 并且有学者不硫化, 直接 SiO₂ 物理钝化取得不错效果^[22], 因此本文使用 a 组 (阳极硫化再钝化) b 组 (直接 SiO₂ 钝化) 两对照组来做对比研究硫化的利弊, 如图 3 所示。

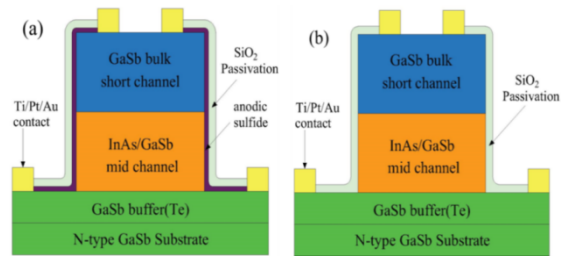


图3 器件垂直剖面结构示意图(a)阳极硫化+钝化,(b)直接 SiO₂钝化

Fig. 3 Schematic diagram of device vertical profile (a) Anodic sulfuration+passivation, (b) direct SiO₂ passivation

1.3 材料和探测器性能表征方法

本文中高分辨率 X 射线衍射 (HRXRD) 仪为 Jordan Valley JV-QC3 X 型, 使用波长为 1.54 Å 的 Cu K_α 辐射, 以 ω-2θ 方式扫描, 用于检测超晶格周期厚度、材料应变等信息; 原子力显微镜 (AFM) 为 NanoScape III a (Digital Instruments) 型, 工作方式为非接触式, 对样品无损伤, 横向与纵向分辨率分别为 1.5 nm 和 0.05 nm, 达到原子级; 扫描电子显微镜 (SEM) 型号为 Nove Nanosem 650, 用于观察器件侧壁形貌; 暗电流测试使用 CRX-4K 低温探针台, 安捷伦 B1500A 半导体设备分析仪, 测试温度范围可由 7 K 至 300 K; 红外光谱测试使用 Vertex-70 傅里叶变换红外光谱仪 (FTIR), 其可覆盖远红外 (15 cm⁻¹) 至紫外 (28 000 cm⁻¹) 的超宽光谱区域, 光谱分辨率优于 0.4 cm⁻¹, 文中测试温度为 77 K。

2 结果与讨论

2.1 材料晶体结构与表面形貌

图 4 为短波体材料/中波超晶格/GaSb 衬底结构的 HRXRD 图, 图中 GaSb 衬底峰与 GaSb 短波体材料峰重合, 它们与超晶格零级衍射峰间距为 109 arcsec, 超晶格处于张应变, 晶格失配度为 -0.090 5%, 表明 InAs/GaSb 超晶格与 GaSb 材料极好的晶格匹配程度。GaSb 衬底峰与超晶格零级衍射峰的半高宽 (FWHM) 分别为 19.15 arcsec 和 17.57 arcsec, 显示出极好的结晶质量。由超晶格卫星峰间距可知其实际周期厚度为 48.876 9 Å, 与设计值 48.614 8 Å 相差无几, 0.262 1 Å 的差值来自于生长 InSb 界面时设备 In 快门响应时间略快所造成的轻微误差, 超晶格卫星峰峰尖处的分叉现象源自界面生长时的无序^{[23],[24]}。

采用原子力显微镜和扫描电镜对样品的表面形貌、表面粗糙度及截面形貌进行了测试, 如图 5 所

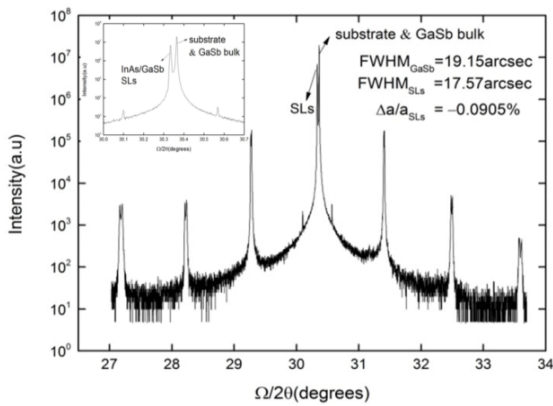


图4 样品的高分辨率X射线衍射(HRXRD)图像
Fig. 4 High-resolution X-ray diffraction (HRXRD) image of the device

示。图5(a)为样品表面的光学显微镜图像, $730\ \mu\text{m} \times 550\ \mu\text{m}$ 范围内表面平整、色泽均匀且几乎没有缺陷。图5(b)为样品表面的AFM图像, 在 $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 的范围内, 样品表面均方根粗糙度(RMS)为 $1.82\ \text{\AA}$, 同时可看到清晰的原子台阶, 表明样品表面极高的平整度。图5(c)为样品截面的SEM图像, 截面光滑平整、界面清晰, 图中缺陷主要为测试时切开样品时的材料断裂四溅所致, 因为其材料与外延生长时的多种位错结构有明显区别, 短波通道的GaSb体材料与中波通道的InAs/GaSb超晶格分层明显, 且均与设计值 $2.5\ \mu\text{m}$ 相差无几, 中波通道的InAs/GaSb超晶格与其下方的N型GaSb缓冲层亦有明显分层, 图中白色条带为Si掺杂的InAs/GaSb超晶格N型接触层。

2.2 探测器的光电性能

2.2.1 硫化工艺对暗电流和RA的影响研究

本文比较了单纯 SiO_2 钝化和阳极硫化+ SiO_2 钝化工艺对直径为 $200\ \mu\text{m}$ 器件性能的影响, 在不同温度 ($77\ \text{K}$ 、 $90\ \text{K}$ 、 $110\ \text{K}$ 、 $130\ \text{K}$ 、 $150\ \text{K}$ 、 $170\ \text{K}$ 、 $190\ \text{K}$ 、

$210\ \text{K}$ 、 $230\ \text{K}$) 下测试了暗电流密度 J 和阻抗面积乘积值 $R \cdot A$ 随偏压的变化曲线, 如图6所示。其中, (a)和(c)为硫化+ SiO_2 钝化器件的性能曲线, (b)和(d)为只有 SiO_2 钝化器件的性能曲线。由图可知, 经硫化+ SiO_2 钝化的器件阻抗在 $-60\ \text{mV}$ 偏压下达到最大值, 当温度从 $77\ \text{K}$ 到 $230\ \text{K}$ 变化时, 阻抗值由 $1.86 \times 10^6\ \Omega \cdot \text{cm}^2$ 减小至 $2.59 \times 10^3\ \Omega \cdot \text{cm}^2$, 相应的暗电流密度由 $4.12 \times 10^{-7}\ \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增大至 $2.68 \times 10^{-5}\ \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。只 SiO_2 钝化的器件阻抗在 $-140\ \text{mV}$ 偏压下达到最大值, 温度从 $77\ \text{K}$ 到 $230\ \text{K}$ 时, 阻抗值由 $5.58 \times 10^5\ \Omega \cdot \text{cm}^2$ 减小至 $4.01\ \Omega \cdot \text{cm}^2$, 相应的暗电流密度由 $5.27 \times 10^{-7}\ \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 增大至 $2.42 \times 10^{-2}\ \text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。同样温度下经硫化器件的阻抗值更大暗电流密度更小, 特别在高温 $150\ \text{K}$ 以上时, 硫化后的器件暗电流比未硫化器件低1-2个数量级。

为了更直观地观察两组器件性能随温度的变化情况, 绘制了在 $-100\ \text{mV}$ 偏压下两组器件性能随温度的变化情况, 如图7所示。在 $-100\ \text{mV}$ 偏压下, 经硫化与只钝化器件随温度的升高暗电流密度均逐步增大, 阻抗值均逐步减小, 但只钝化的器件暗电流增大的趋势更快, 阻抗下降趋势更加明显, 说明硫化在减少表面悬挂键和表面缺陷方面起到了至关重要的作用。

2.2.2 硫化工艺对侧壁电阻率的影响研究

图6(c)和(d)中, 两组器件的阻抗值均随反向偏压的增大而下降明显, 说明在大的反向偏压下, 与偏压相关的隧穿暗电流在总暗电流中起主导作用。但两组器件的下降趋势不同, 硫化器件的下降明显说明硫化器件中以隧穿暗电流成分为主, 只钝化的器件中其他类型的暗电流(表面漏电流)占比较大。为进一步分析两组器件的暗电流机制, 制备了不同台面大小的器件进行研究, 器件台面直径由

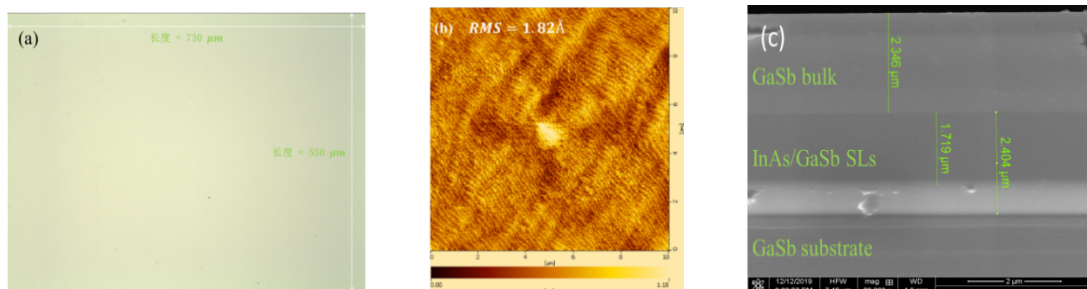


图5 样品表面光学显微镜图像(a)、表面AFM图像(b)和截面SEM图像(c)
Fig. 5 Optical microscope image of the sample surface (a) AFM image of the surface (b) and SEM image of the section(c)

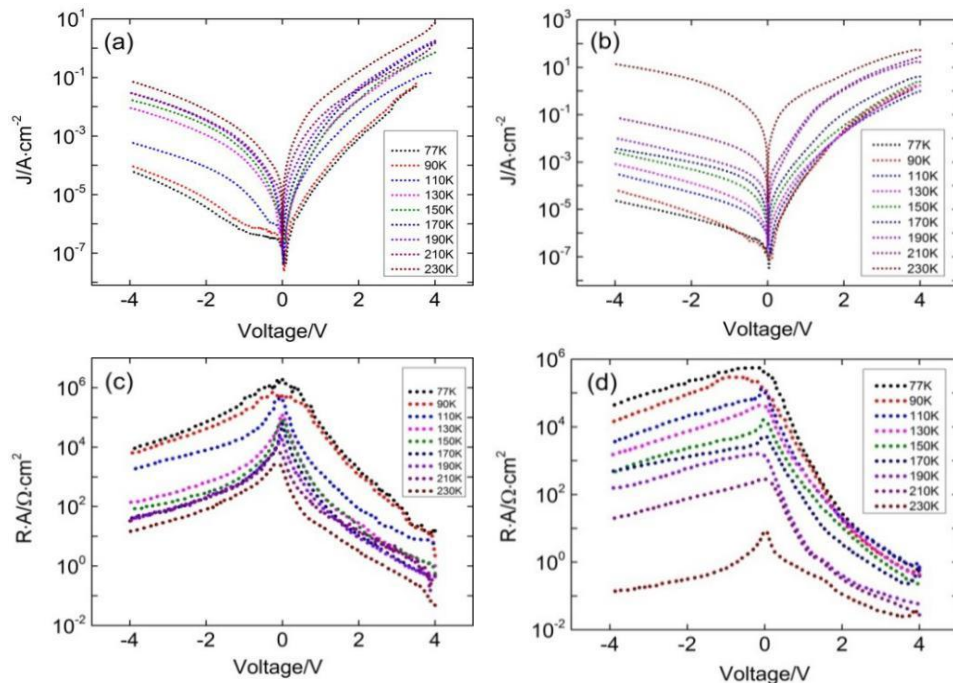


图6 不同温度下器件的暗电流密度J和R·A随偏压的变化曲线,(a)、(c)为硫化+SiO₂钝化器件,(b)、(d)为SiO₂钝化器件
Fig. 6 Curve of dark current density J and R·A at different temperatures vs bias for sulfurized +SiO₂ passivated devices (a) and (c) and SiO₂ passivated devices (b) and (d)

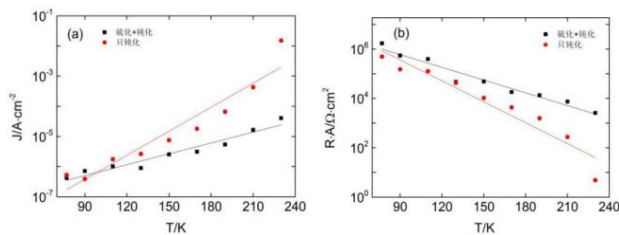


图7 -100 mV 偏压下器件暗电流密度(a)和R·A值(b)随温度变化的曲线
Fig. 7 Curves of the dark current density (a) and R·A value (b) of the device varying with temperature under bias voltage of -100 mV

大到小为 500 μm、300 μm、200 μm、100 μm 和 50 μm。器件的表面漏电流随周长/面积比值(P/A)的增大而增大,即随台面半径的减小,表面漏电流在总暗电流中的比重增大。通常可以采用零偏阻抗与面积乘积(R₀A)对暗电流成分进行分析,如公式(1)所示,

$$\frac{1}{R_0 A} = \frac{1}{(R_0 A)_{Bulk}} + \frac{1}{\rho_{surface}} \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中,R₀A与总暗电流相关,等式右边第一项(R₀A)_{Bulk}与体漏电流相关,第二项与表面漏电流相关,其中ρ_{surface}为侧壁电阻率,其值越大,表明表面漏电流越小。图8为不同台面大小的器件R₀A在77K随P/A

A值变化的数据及其拟合曲线。曲线的斜率为1/ρ_{surface}。拟合得到:单纯SiO₂钝化器件的侧壁电阻率为6.83 × 10⁶ Ω·cm,硫化后提高一个数量级,达到4.49 × 10⁷ Ω·cm,器件侧壁的表面漏电流被有效地抑制。

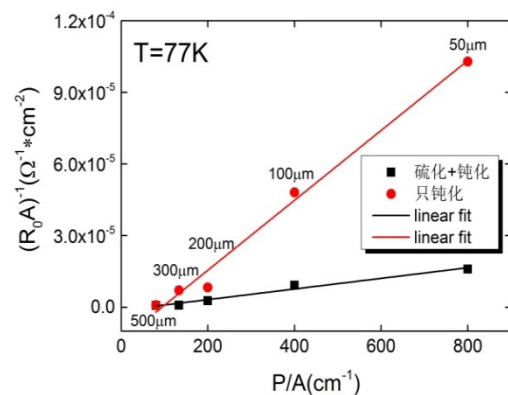


图8 77K不同台面面积器件的R₀A随P/A值变化的数据及其拟合曲线
Fig. 8 The data of R₀A changing with P/A value of devices with different mesa area at 77 K and its fitting curve

2.2.3 双色探测器的光谱响应研究

为了验证该探测器的双色探测性能,在77 K和不同偏压下对硫化器件进行了光谱响应测试。图9(a)和(b)显示出器件在正向和反向偏压下分别响应

短波和中波红外。图9(a)中,短波通道(正偏)截止波长约 $1.60\ \mu\text{m}$,50%截止波长为 $1.55\ \mu\text{m}$,与GaSb体材料带隙对应;在零偏压时出现微弱的光谱响应,随着正向偏压的增大,响应逐渐增强,并在5V偏压下达达到饱和;正偏下,器件在中波红外范围无任何响应。图9(b)中,中波通道(反偏)截止波长为 $5.0\ \mu\text{m}$,50%截止波长为 $4.62\ \mu\text{m}$,与8 ML InAs/8 ML GaSb超晶格的截止波长对应。中波通道在零偏压无响应,在 $-0.2\ \text{V}$ 偏压下出现微弱响应,随着反向偏压的增大,响应逐渐增强,并在 $-1.35\ \text{V}$ 偏压下响应饱和。反偏下,中波通道在短波红外范围内无响应。光谱响应显示了器件具有依赖偏压极性、低串扰的中、短波双色探测性能。

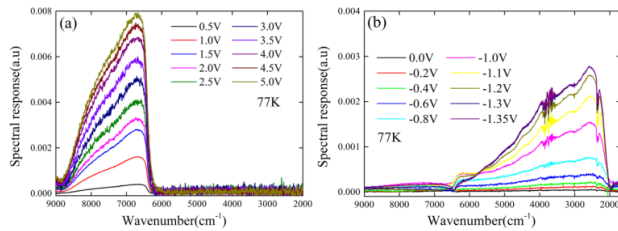


图9 77 K器件的归一化光谱响应曲线 (a)正偏-短波通道, (b)反偏-中波通道

Fig. 9 Normalized spectral response curve of the device (a) short wave channel, (b)middle wave channel

利用标准 DTGS 探测器和 500°C 黑体在 77 K 下对无减反膜的硫化器件响应光谱进行校准,获得器件的响应度如图 10 所示。短波通道 $1.44\ \mu\text{m}$ 处, $5.0\ \text{V}$ 偏压下响应度达到 $0.415\ \text{A/W}$;中波通道 $2.7\ \mu\text{m}$ 处, $-1.35\ \text{V}$ 偏压下响应度达到 $0.435\ \text{A/W}$, $4\ \mu\text{m}$ 处响应度为 $0.337\ \text{A/W}$ 。此外中波通道在 $1.6\ \mu\text{m}$ 附近有一明显响应,它在偏压由 $-0.2\ \text{V}$ 至 $-1.0\ \text{V}$ 时逐渐增大,在 $-1.0\ \text{V}$ 至 $-1.35\ \text{V}$ 时又逐步减小,这一响应可能来源于 P 型 GaSb 层与 P 型 InAs/GaSb 超晶

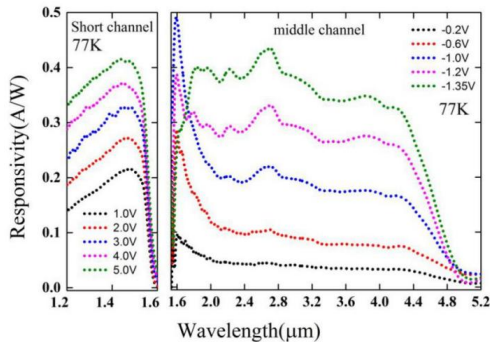


图 10 黑体校准后的器件响应度曲线

Fig. 10 Blackbody spectral responsivity curve of the device

格界面异质结的内建电场。

3 结论

外延生长并制备了基于 InAs/GaSb 超晶格和 GaSb 体材料的 NIPPIN 型中短波双色红外探测器。超晶格零级卫星峰和 GaSb 峰的半峰宽 FWHM 分别为 $17.57\ \text{arcsec}$ 和 $19.15\ \text{arcsec}$, $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ 范围内样品表面均方根粗糙度 RMS 为 $1.82\ \text{\AA}$, 表明材料有极高的外延质量。对器件进行了硫化与钝化对比, $77\ \text{K}$ 下硫化和 SiO_2 钝化器件的最高阻抗分别为 $1.86 \times 10^6\ \Omega \cdot \text{cm}^2$ 和 $5.58 \times 10^5\ \Omega \cdot \text{cm}^2$, 不同温度和台面尺寸的 I-V 测试得到硫化和钝化器件侧壁电阻率分别为 $4.49 \times 10^7\ \Omega \cdot \text{cm}$ 和 $6.83 \times 10^6\ \Omega \cdot \text{cm}$, 表明硫化可有效减少侧壁表面漏电流, 提升器件性能。对硫化器件进行了光谱响应测试, 短波通道与中波通道的 50% 截止波长分别为 $1.55\ \mu\text{m}$ 和 $4.62\ \mu\text{m}$, 峰值响应度分别为 $1.44\ \mu\text{m}$ 处的 $0.415\ \text{A/W}$ 和 $2.7\ \mu\text{m}$ 处的 $0.435\ \text{A/W}$, 中波通道在 $4\ \mu\text{m}$ 处响应度为 $0.337\ \text{A/W}$ 。此器件在未采取势垒层, 而是采取较大的掺杂和接触层厚度提高势垒的情况下, 可通过偏压调制实现低串扰的中短波双色红外探测, 且结构简单无需组分调整可重复性强。

Reference

- [1] BAI Y, ZHAO L, Ju D, *et al.* Wide-angle, polarization-independent and dual-band infrared perfect absorber based on L-shaped metamaterial [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7).
- [2] KOPYTKO M, GAWRON W, KEBŁOWSKI A, *et al.* Numerical analysis of HgCdTe dual-band infrared detector [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2019, **51**(3).
- [3] TANG X, ACKERMAN M M, CHEN M, *et al.* Dual-band infrared imaging using stacked colloidal quantum dot photodiodes [J]. *Nature Photonics*, 2019, **13**(4): 277–282.
- [4] MO D, CHEN S, CHEN L, *et al.* Similarity criteria of target thermal radiation characteristics and their application to infrared radiation of jet engine exhaust system [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2018, 125.
- [5] WILLIAMS D. Infrared Radiation [J]. *The Physics Teacher*, 1963, **212**(1).
- [6] MAINZER N, LAKIN E, ZOLOTAYABKO E. Point-defect influence on $1/f$ noise in HgCdTe photodiodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2002, **81**(4): 763–765.
- [7] NOKHWAL R, SAXENA R S, A B L S, *et al.* Study of dislocations in HgCdTe epilayers at (1 1 1)B and (1 1 0) surfaces using modified defect etchant [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015(71): 378 – 383.
- [8] KALUGIN N G, JING L, BAO W, *et al.* Graphene-based quantum Hall effect infrared photodetector operating at liquid Nitrogen temperatures [J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99.
- [9] ROGALSKI A. New material systems for third generation in-

- frared photodetectors [J]. *Opto-Electronics Review*, 2008, **16**(4): 458-482.
- [10] TANG C-C, IKUSHIMA K, LING D C, *et al.* Quantum Hall Dual-Band Infrared Photodetector [J]. *Physical Review Applied*, 2017, **8**(6).
- [11] HADDADI A, CHEVALLIER R, DEHZANGI A, *et al.* Extended short-wavelength infrared nBn photodetectors based on type-II InAs/AlSb/GaSb superlattices with an AlAsSb/GaSb superlattice barrier [J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **110**(10).
- [12] 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]. *Sci Rep*, 2016, **6**: 24144.
- [13] LV Yanqiu, PENG Zhenyu, CAO Xiancun, *et al.* 320×256 mid-/short-wavelength dual-color infrared detector based on InAs/GaSb superlattice [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, **1**: 72-76.
- [14] ZHU Xubo, PENG Zhenyu, CAO Xiancun, *et al.* Mid-/short-wavelength dual-color infrared focal plane arrays based on type-II InAs/GaSb superlattice [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, **48**(11): 102-107.
- [15] CHAUHAN D, PERERA A G U, LI L H, *et al.* Effect of a current blocking barrier on a 2 - 6 μm p-GaAs/AlGaAs heterojunction infrared detector [J]. *Applied Physics Letters*, 2016, **108**(20).
- [16] CRAIG A P, JAIN M, WICKS G, *et al.* Short-wave infrared barrier detectors using InGaAsSb absorption material lattice matched to GaSb [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, **106**(20).
- [17] HOWARD W. YOON M C D, GEORGE P. Eppeldauer. Performance Comparisons of InGaAs, extended InGaAs, and Short-wave HgCdTe Detectors between 1 μm and 2.5 μm [J]. *The International Society For Optical Engineering*, 2006, 6297.
- [18] ABROUG S, SAADALLAH F, YACOUBI N. Photothermal investigations of doping effects on opto-thermal properties of bulk GaSb [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 484.
- [19] PINO R, KO Y, DUTTA P S. Enhancement of infrared transmission in GaSb bulk crystals by carrier compensation [J]. *Journal of Applied Physics*, 2004, **96**(2): 1064-1067.
- [20] Papis-Polakowska E, J. Kaniewski, J. Szade, *et al.* Passivation studies of GaSb-based superlattice structures [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 567.
- [21] PLIS E, KHOSHAKHLAGH A, MYERS S, *et al.* Performance improvement of InAs/GaSb strained layer superlattice detectors by reducing surface leakage currents with SU-8 passivation [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, **96**(3).
- [22] GIN A, WEI Y, BAE J, *et al.* Passivation of type II InAs/GaSb superlattice photodiodes [J]. *Thin Solid Films*, 2004, **447-448**: 489-492.
- [23] LIU G J, FRUHBERGER B, SCHULLER I K, *et al.* Quantitative structural characterization of InAs/GaSb superlattices [J]. *Journal of Applied Physics*, 2006, **100**(6).
- [24] ZHANG X B, RYOU J H, DUPUIS R D, *et al.* Improved surface and structural properties of InAs/GaSb superlattices on (001) GaSb substrate by introducing an InAsSb layer at interfaces [J]. *Applied Physics Letters*, 2007, **90**(13).