

InAs/GaSb II 类超晶格长波红外探测器的 表面处理研究

崔玉容^{1,2}, 周易^{1,2,3*}, 黄敏¹, 王芳芳¹, 徐志成¹, 许佳佳¹, 陈建新^{1,2,3*}, 何力¹

(1. 中国科学院上海技术物理研究所 红外成像材料与器件重点实验室, 上海 200083;

2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 中国科学院大学杭州高等研究院, 浙江 杭州 310024)

摘要: 本文开展了 InAs/GaSb II 类超晶格长波红外探测器的表面处理研究。通过对不同处理工艺形成台面器件的暗电流分析, 发现 N₂O 等离子处理结合快速热退火 (RTA) 的优化工艺能够显著改善长波器件电学性能。对于 50% 截止波长 12.3 μm 的长波器件, 在液氮温度, -0.05V 偏置下, 表面处理后的暗电流密度从 5.88 × 10⁻¹ A/cm² 降低至 4.09 × 10⁻² A/cm², 零偏下表面电阻率从 17.7 Ωcm 提高至 284.4 Ωcm, 有效降低侧壁漏电流。但是该表面处理后的器件在大反偏压下仍有较大的侧壁漏电, 这可能是由于高浓度的表面电荷使得大反偏下侧壁存在较高的隧穿电流。通过栅控结构器件的变栅压实验, 验证了长波器件存在纯并联电阻及表面隧穿两种主要漏电机理。最后, 对表面处理前后的暗电流进行拟合, 处理后器件表面电荷浓度为 3.72 × 10¹¹ cm⁻²。

关键词: 二类超晶格; 长波红外探测器; 表面处理; 暗电流分析; 栅控结构

中图分类号: TN304.2; TN305

文献标识码: A

Studies on the surface treatment of InAs/GaSb type-II super-lattice long-wave infrared detectors

CUI Yu-Rong^{1,2}, ZHOU Yi^{1,2,3*}, HUANG Min¹, WANG Fang-Fang¹, XU Zhi-Cheng¹, XU Jia-Jia¹, CHEN Jian-Xin^{1,2,3*}, HE Li¹

(1. Key Laboratory of Infrared Imaging Materials and Detectors, Shanghai Institute of Technical Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200083, China;

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China;

3. Hangzhou Institute for Advanced Study, University of Chinese Academy of Sciences, Hangzhou 310024, China)

Abstract: In this work, the surface treatment of InAs/GaSb type-II super-lattice long-wavelength infrared detectors is studied. An optimizing process of N₂O plasma treatment and rapid thermal annealing was developed, which can improve the performance of long-wavelength detector with $\lambda_{50\% \text{ cut-off}} = 12.3 \mu\text{m}$ from 5.88 × 10⁻¹ A/cm² to 4.09 × 10⁻² A/cm² at liquid nitrogen temperature, -0.05V bias. Through variable area device array characterization, the sidewall leakage current was extracted. Under zero bias, the surface resistivity improved from 17.9 Ωcm to 297.6 Ωcm. However, the sidewall leakage couldn't be ignored under large inverse bias after optimizing process, where surface charge might induce the surface tunneling current. It is verified by gate-control structure that there are two main leakage mechanisms in long-wave device: pure sidewall parallel resistance and surface tunneling. At last, the surface charge was calculated to be 3.72 × 10¹¹ cm⁻² by IV curve fitting after optimizing process.

Key words: Type-II superlattice, long wavelength photodetectors, surface treatment, dark current analysis, gate-control structure

收稿日期: 2021-02-24; 修回日期: 2022-11-06

Received date: 2021-02-24, revised date: 2022-11-06

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB0402403), 国家自然科学基金 (61974152, 61904183, 61534006, 61505237, 61505235), 中国科学院青年创新促进会会员 (2016219), 上海市青年科技启明星项目 (20QA141500)。

Foundation items: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2016YFB0402403), the National Natural Science Foundation of China (61974152, 61904183, 61534006, 61505237, 61505235), the Youth Innovation Promotion Association (2016219), Shanghai Rising-Star Program (20QA141500)。

作者简介 (Biography): 崔玉容 (1990-), 女, 江苏苏州人, 博士研究生, 主要研究领域为超晶格红外探测器表面工艺, E-mail: szmdcy@163.com。

* 通讯作者 (Corresponding authors): E-mail: zhouyi@mail.sitp.ac.cn; jianxinchen@mail.sitp.ac.cn

引言

InAs / GaSb II类超晶格近年来得到迅速的发展,是最有前景的红外光电探测材料之一^[1-3]。超晶格红外探测器可以通过两种半导体材料交替生长获得,在能带上形成电子和空穴的量子阱,当每层材料厚度非常薄并且层数很多时电子或空穴的波函数能够耦合形成微带,改变原子单层的周期厚度,可以实现覆盖3到30 μm 的红外探测^[4]。红外探测器的暗电流是影响其性能的关键参数,尤其在长波、甚长波波段,窄的禁带宽度易导致更大的暗电流,增大器件噪声。得益于III-V族材料较为成熟的生长控制技术以及超晶格材料能带灵活可调的优势,可以通过能带工程引入势垒结构,降低探测器的暗电流,如nBn、PBIBN、pBn等器件结构^[5-6]。但随着探测器像元中心距不断减小,对于台面结器件,其侧壁漏电将占据主导地位,这对超晶格探测器的台面制备和钝化工艺都提出了很高的要求^[7]。

台面结红外探测器一般通过湿法腐蚀或干法刻蚀来实现像元间的隔离。在台面形成过程中,半导体晶体周期性结构的突然终止,会导致表面悬挂键的生成,并导致表面缺陷与表面能带弯曲^[8-9],对于长波探测器,更容易表现出严重的侧壁漏电。近年来,为了抑制InAs/GaSb II类超晶格长波探测器的侧壁漏电,获得高性能的长波红外探测器,国内外研究人员不断尝试各种表面处理和钝化方式^[10-13]。使用聚合物或无机电介质覆盖台面具有一定的钝化效果^[14-15]。另一部分工作倾向于在去除天然氧化物后利用适当的原子例如硫与悬挂键进行结合的方式进行钝化^[16],但硫化物在GaSb上不具有长期稳定性,且硫化处理会侵蚀材料。因此,还可以选择组合氧化处理、高介电材料覆盖或宽禁带材料外延的方式^[17-18],尽可能的去除表面悬挂键,同时亦可保护器件免受后续工艺及环境因素的影响,从而达到降低或消除表面漏电流的目的。

本文探索并研究了II类超晶格长波的表面处理工艺,并通过不同面积阵列结构提取并分析了侧壁漏电分量;同时,利用侧壁栅控结构进行表面漏电机制的验证。最后结合暗电流拟合,提取表面电阻率及表面电荷密度。

1 实验

二类超晶格长波红外探测材料采用分子束外延(MBE)技术生长获得。器件采用PBIBN结构以

降低吸收区的电场强度,从而抑制体暗电流中的产生复合电流和隧穿电流。具体器件结构如下:首先在GaSb衬底上外延200 nm的GaSb缓冲层,然后是1.5 μm 厚的n型InAsSb缓冲层,缓冲层Si掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,随后是空穴势垒区,为40周期的n型中波超晶格16ML InAs/4ML AlSb,其Si掺杂浓度为 $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,吸收区是300周期的弱p型超晶格15ML InAs/7ML GaSb,其Be掺杂浓度为 $5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$,紧接着是电子势垒区,为60周期p型掺杂的中波超晶格7ML InAs/7ML GaSb,以及20周期p型超晶格15ML InAs/7ML GaSb,其Be掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$,最后覆盖了30 nm高掺GaSb欧姆接触层以做金属接触。

材料外延完成后,制备了如表1的5个样品。为了研究和区分器件体暗电流与侧壁漏电,将1、2、3号样品制备为不同表面处理方式,不同面积器件阵列(VADA),其光敏元为直径200 μm 、250 μm 、300 μm 、350 μm 、400 μm 、450 μm 和500 μm 圆形台面。所有光敏元台面采用标准光刻技术和电感耦合等离子体干法刻蚀实现,在台面形成后,使用NaClO:H₂O=1:10溶液浸泡30 s去除表面刻蚀损伤。之后,2号、3号样品采用了N₂O等离子体进行3min表面处理,3号样品再进行氮气氛围下250 $^{\circ}\text{C}$ 、1min的快速热退火处理。所有样品通过等离子体电感耦合化学气相沉积生长300nm厚Si₃N₄介质层作为探测器钝化层后,利用电子束蒸发设备沉积Ti/Pt/Au作为接触电极,如图1a)所示。同时1、3号样品还制备了台面直径400 μm 的栅控器件(GD),其主要区别是在侧壁钝化层上沉积了如图1b)所示的栅电极(图中显示为浅黄色、标注为Gate区域),栅极金属的制备采用了优化侧壁覆盖的生长工艺,并引出测试电极。栅控器件的主要特点是可通过栅极电压控制侧壁表面势,进而研究侧壁与表面电荷相关的漏电信息。

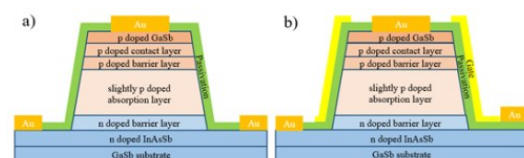


图1 InAs/GaSb超晶格探测器结构示意图,(a)为常规结构器件,(b)为栅控结构器件

Fig. 1 Schematic diagrams of InAs/GaSb superlattice detectors: (a) conventional structure device, (b) gate-controlled structure device

表1 器件列表

Table 1 List of devices

	编号	N ₂ O处理	退火处理	器件结构
第一组	1	无	无	200-500 μm VADA
	2	3 min	无	200-500 μm VADA
	3	3 min	250°C	200-500 μm VADA
第二组	1-GD	无	无	400 μm GD
	3-GD	3 min	250°C	400 μm GD

器件制备完成并通过杜瓦封装后,利用傅里叶变换红外光谱仪测试其液氮温度下的响应光谱特性,不同处理工艺下样品的响应光谱没有变化,50%截止波长为12.3 μm。再利用Keythley 4200测试系统在液氮温度下测试其电流-电压特性。

2 结果与讨论

图2(a),(b),(c)分别是1、2、3号样品中台面直径为200 μm、250 μm、300 μm、350 μm、400 μm、450 μm和500 μm的器件在液氮温度下的暗电流密度-电压曲线,为直观对比不同偏压下3个样品的暗电流密度,图2(d)比较了3个样品中台面直径为200 μm的光敏元暗电流密度-电压曲线。由图可知,各器件的暗电流密度随光敏元面积的减小而增大,均存在一定程度的侧壁漏电。但是在小反偏压下,经N₂O等离子体和快速热退火混合工艺处理后的3号样品具有最低的暗电流密度,且不同面积的光敏元具有相当的暗电流,侧壁漏电较小。对于200 μm直径器件,在-50 mV小偏压下,3号样品的暗电流密度约为 4.6×10^{-2} A/cm²,明显优于1号样品的 5.88×10^{-1} A/cm²和2号样品的 1.46×10^{-1} A/cm²。说明N₂O等离子体和快速热退火的混合工艺能够有效的降低器件暗电流。

根据不同面积器件的暗电流密度 J_{total} (A/cm²)可以拆分为体暗电流密度 J_{bulk} (A/cm²)以及侧壁暗电流密度 j_{side} (A/cm),其公式如下:

$$J_{total} = J_{bulk} + j_{side} \cdot \frac{P}{A}, \quad (1)$$

其中,台面器件的周长 $P = \pi \cdot d$,面积 $A = \frac{1}{4} \cdot \pi d^2$ 。由于 R_0A (零偏动态电阻与台面面积乘积)是器件暗电流性能的关键指标,本文将首先表征零偏下的暗电流特性。从公式(1)出发,器件 R_0A 与台面大小存在如下关系:

$$\frac{1}{R_0A} = \frac{1}{R_0A_{bulk}} + \frac{1}{r_{0surface}} \cdot \frac{P}{A}, \quad (2)$$

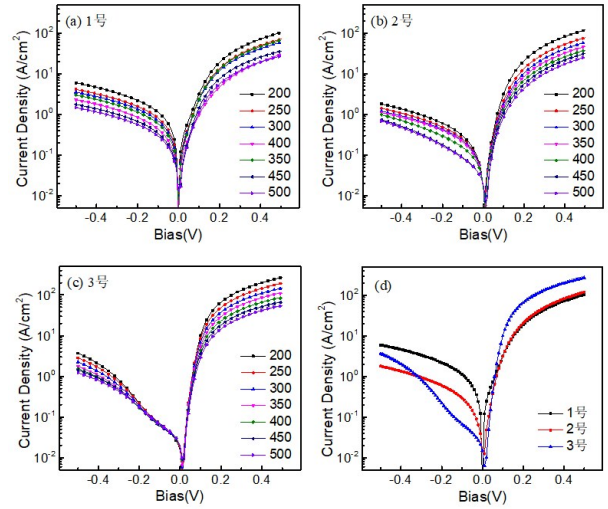


图2 不同处理工艺样品不同台面面积器件的暗电流密度-电压特性曲线(a)1号无处理未退火,(b)2号N₂O处理未退火,(c)3号N₂O处理并退火,(d)1、2、3号样品直径200 μm的光敏元

Fig. 2 I-V curve of varying area devices with (a) no treatment without annealing, (b) N₂O treatment without annealing, (c) N₂O treatment with annealing, and (d) pixels with a diameter of 200 μm for samples No. 1, No. 2, and No. 3

通过 R_0A 与 P/A 的线性拟合,即可得到 R_0A_{bulk} 以及表面电阻率 $r_{0surface}$ (Ωcm)的大小,如图3所示。不同面积器件系列中均存在侧壁漏电流,图中的线性拟合斜率的倒数即为零偏时的 $r_{0surface}$ 的大小,结果如表2所示。1号样品中的电学性能随光敏元尺寸变化最大,表面并联电阻率仅17.7 Ωcm,对应着严重的侧壁漏电流存在,超过了长波探测器体暗电流大小;而经过优化工艺处理后的3号样品,其表面并联电阻率有了明显提升,约为284.4 Ωcm,相较未进行表面处理的1号器件提升了约16.1倍。且对于3号样品,不同面积器件在小反偏下均表现出相当的 $(R_0A)^{-1}$,说明了优化工艺对侧壁漏电有很显著的抑制效果,且具有很好的稳定性。

为了进一步研究不同工艺中的侧壁漏电机制,在每个偏置电压下,根据公式(1)对1号和3号样品的不同周长面积 P/A 比光敏元的暗电流密度 J_{total} 进行线性拟合,取斜率为侧壁暗电流密度 j_{side} ,从而得到侧壁暗电流密度随偏压的变化曲线,如图4所示。1号样品的侧壁电流具有很高的线性度,与表面并联电阻引起的暗电流曲线相吻合,说明1号样品的侧壁漏电主要是由于表面存在较小的并联电阻。3号样品的侧壁电流,在小反偏压下比1号器件下降约2个量级,且在-0.1~0 V电压范围内,仍表现出较

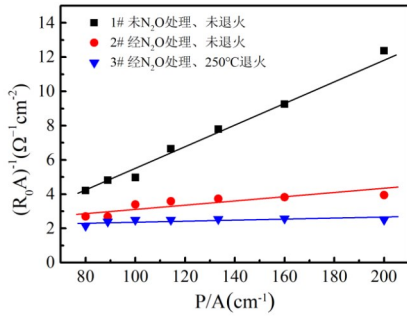


图3 变面积光敏元的 $(R_0 A)^{-1}$ 与 P/A 的关系

Fig. 3 Relationship between $(R_0 A)^{-1}$ and P/A of varying area device

表2 拟合计算得到表面电阻率

Table 2 Surface resistivities obtained by simulation

参数	1号	2号	3号
$r_{0surface}$	17.7 Ωcm	64.1 Ωcm	284.4 Ωcm

高的线性度,但在较大反偏压下,侧壁电流密度随偏压成指数级上升,表现出隧穿电流特性。

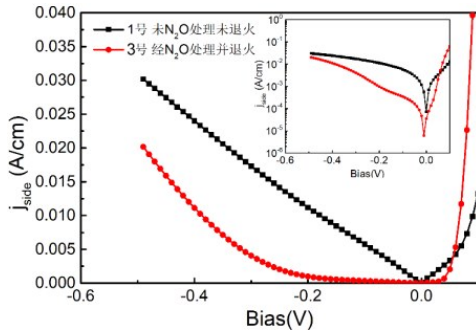


图4 1,3号样品侧壁表面漏电流随偏压的变化(主图纵坐标为线性坐标,右上角图纵坐标为对数坐标)

Fig. 4 The leakage current on the sidewall surface of samples No. 1 and No. 3 (the ordinate of the main graph is a linear coordinate, and the ordinate of the upper right graph is a logarithmic coordinate)

超晶格材料在台面刻蚀后,侧壁很容易产生受损的晶格,生成悬挂键,导致较严重的表面漏电通道。与常规空气氧化物不同的是,等离子氧化能够提高器件的性能^[19]。使用 N_2O 等离子表面处理工艺后,表面悬挂键与O结合,在钝化层和超晶格界面处会形成一层高质量氧化层,减少了表面悬挂键,提高了表面电阻率。而退火过程,进一步增加了表面悬挂键与O的结合,提高了表面并联电阻率。

为进一步验证表面漏电机理,我们对1,3号样品还制备了栅控结构器件1-GD、3-GD,栅控器件能

够有效地拆分与表面势相关的侧壁漏电流,通过调节栅压,可以调节表面势,改变表面电荷数量。1-GD、3-GD器件在不同栅压下的IV曲线如图5所示,1号器件在不同栅压下暗电流未发生明显变化,说明该器件表面漏电不受栅压的影响,表现出纯并联电阻主导的特性。而3号器件在测试栅压从-10 V变化至40 V的过程中,暗电流在小反偏下几乎不变,但在大反偏下,暗电流密度逐渐降低,这说明大反偏隧穿电流由表面电荷引起。增大栅压,可以降低表面电荷数量,从而抑制大反偏隧穿电流,在-0.5 V偏压下,暗电流密度由1.54 A/cm²降至 $V_g=40\text{V}$ 时的0.82 A/cm²。在正栅压下,栅控结构器件可以排斥表面积聚的空穴或增加表面的电子。因此3号样品在零栅压下,其表面势小于0,表面处于空穴聚集状态,聚集的空穴使得局域有效载流子浓度变大,增加了载流子隧穿的发生几率。

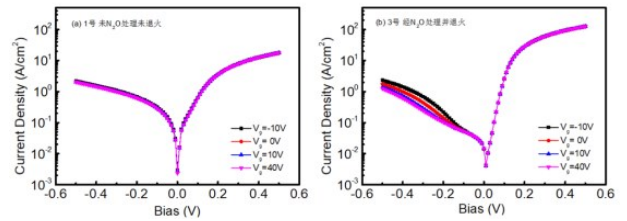


图5 不同栅压下样品暗电流随电压的变化(a)1号无处理未退火,(b)3号 N_2O 处理并退火

Fig. 5 I-V curves under different gate voltages (a) Sample No. 1, (b) Sample No. 3

栅控器件验证了,长波器件会存在与表面势无关的纯并联电阻,而优化工艺能够增加侧壁并联电阻率;另一方面,大偏压下的电流上升则是由表面电荷所导致的。

为了得到表面电荷密度,可进行表面层暗电流拟合。为了简化,可将表面一个德拜长度(L_D)内的半导体材料作为表面层,并假设表面空间电荷 Q_s 均匀地分布在此空间内,则表面有效载流子浓度 N_{eff} 为:

$$N_{eff} = \frac{Q_s}{L_D} + N_A \quad , \quad (3)$$

拟合包含漂移-扩散(Diff)、产生复合(GR)、缺陷辅助隧穿(TAT)、带间直接隧穿(BTB)以及表面并联电阻等5种机制的暗电流成分^[20],具体公式详见附件。

1,3号样品的电流机制拟合结果,如图6所示,其中采用的拟合参数为体材料暗电流参数^[21],

见表3。

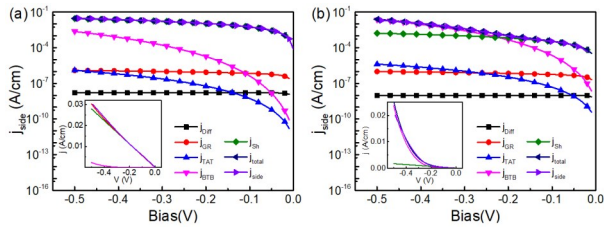


图6 0栅压下侧壁漏电流的数值拟合(a)1号未处理未退火,(b)3号 N_2O 处理退火(主图纵坐标为对数坐标,左下角图纵坐标为线性坐标)

Fig. 6 Simulation of side-wall leakage current under 0 gate voltage (a) Sample No. 1, (b) Sample No. 3 (the ordinate of the main picture is logarithmic coordinates, and the ordinate of the lower left picture is linear coordinates)

表3 拟合过程中采用的部分材料参数^[21]

Table 3 Parts of parameters used in the dark current simulation

参数	数值	参数	数值
m_e	$0.03 m_0$	$M^2 \cdot m_e$	$1 \times 10^{-23} \cdot m_0 (eV^2 \cdot cm^3)$
m_h	$0.4 m_0$	τ_{gr}	1.5 ns
μ_e	$1000 (cm^2/Vs)$	Et	0.03 eV
μ_h	$100 (cm^2/Vs)$	N_i	$2 \times 10^{15}/cm^3$

暗电流的拟合结果如表4所示,表面并联电阻率 $r_{surface}$ 与零偏时推导得到的表面电阻率 $r_{0surface}$ 的数值相当,进一步说明零偏下,器件的表面漏电由表面并联电阻机制主导。结合 N_2O 等离子与快速热退火的混合处理工艺,将表面并联电阻率从 $17.9 \Omega cm$ 提升至 $297.6 \Omega cm$,提升了约16.6倍。而通过拟合BTB隧穿电流则可得3号样品仍存在较高的表面有效载流子浓度 $N_{eff} = 9.60 \times 10^{16} cm^{-3}$,进而计算得到表面电荷浓度 $Q_s = 3.72 \times 10^{11} cm^{-2}$ 。表面高浓度有效载流子增加了隧穿机制的发生几率,结合栅控结果表明,聚集的空穴使得表面局域有效载流子浓度变大,在大反偏压下,结区电场强度高,带间隧穿电流主导其表面漏电。

表4 拟合计算得到的表面并联电阻率和表面电荷

Table 4 Surface parallel resistivities and surface charges obtained by simulation

参数	1号	3号
$r_{surface}$	$17.9 \Omega cm$	$297.6 \Omega cm$
N_{eff}	$6.2 \times 10^{16}/cm^3$	$9.6 \times 10^{16}/cm^3$
Q_s	$2.33 \times 10^{11} cm^{-2}$	$3.72 \times 10^{11} cm^{-2}$

3 总结

在本文中,我们研究了InAs/GaSb二类超晶格光电探测器侧壁的表面性质,通过不同面积光敏元的电流-电压测试,拟合提取出侧壁的暗电流密度。并通过栅控结构器件的变栅压实验,验证了长波器件存在纯并联电阻及表面隧穿两种主要漏电机理。 N_2O 等离子处理可以消除部分表面悬挂键,结合 N_2O 等离子与快速热退火的混合处理工艺可以进一步降低器件的侧壁漏电流。对两个器件的侧壁漏电流进行拟合,结合工艺使表面并联电阻率从 $17.9 \Omega cm$ 增加至 $297.6 \Omega cm$,大大提高了器件的整体电学性能,但是器件在大反偏压下仍有较大的隧穿漏电,是由于存在浓度一定浓度的表面电荷。

Reference

- [1] Klipstein P C, Avnon E, Benny Y, et al. Type II Superlattice Infrared Detector Technology at SCD [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2018, **47**:5725-5729.
- [2] Hu Wei-Da, Li Qing, Chen Xiao-Shuang, Lu Wei. Recent progress on advanced infrared photodetectors. [J]*Acta Phys. Sin.*, (胡伟达, 李庆, 陈效双, 陆卫. 具有变革性特征的红外光电探测器. *物理学报*), 2019, **68**(12): 120701.
- [3] Wang P, Xia H, Li Q, et al. Sensing infrared photons at room temperature: from bulk materials to atomic layers [J]. *Small*, 2019, **15**(46): 1904396.
- [4] Sai-Halasz G A, Esaki L, Harrison W A. InAs-GaSb superlattice energy structure and its semiconductor-semimetal transition [J]. *Physical Review B*, **18**(6): 2812 (1978).
- [5] Haddadi A, Chevallier R, Dehzingi 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):101104.1-101104.4.
- [6] N. Gautam, E. Plis, H. S. Kim, M. N. Kutty, S. Myers, A. Khoshakhlagh, L. R. Dawson and S. Krishna. Heterostructure Band Engineering of Type-II InAs/GaSb Superlattice based Longwave Infrared Photodiodes using Unipolar Current Blocking Barriers. *Proc. Of SPIE Vol. 7660* (2010) doi:10.1117/12.849889
- [7] Plis E A, Kutty M N, Krishna S. Passivation techniques for InAs/GaSb strained layer superlattice detectors [J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2013, **7**(1):45-59.
- [8] Steinshneider, J, Weimer, M, Kaspi, R, et al. Visualizing Interfacial Structure at Non-Common-Atom Heterojunctions with Cross-Sectional Scanning Tunneling Microscopy [J]. *Physical Review Letters*, **85**(14):2953-2956.
- [9] Koushik Banerjee, Siddhartha Ghosh, Elena Plis, et al. Study of Short- and Long-Term Effectiveness of Ammonium Sulfide as Surface Passivation for InAs/GaSb Superlattices Using X-Ray Photoelectron Spectroscopy [J]. *Journal of Electronic Materials*, **39**(10):p.2210-2214.
- [10] Peng R, Jiao S, Li H, et al. The influence of surface pas-

- sivation on dark current contributing mechanisms of the InAs/GaSb superlattice [J]. *Journal of Electronic Materials*, 2016, **45**(1): 703–708.
- [11] E.A. Plis, M.N. Kutty, S. Myers, *et al.* Performance improvement of long-wave infrared InAs/GaSb strained-layer superlattice detectors through sulfur-based passivation [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2011, **54** (3) : 216–219.
- [12] Omer Salihoglu, Abdullah Muti, Kutlu Kutluer, *et al.* Passivation of type II InAs/GaSb superlattice photodetectors with atomic layer deposited Al₂O₃ [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **111**(7):1248.
- [13] Herrera M, Chi M, Bonds M, *et al.* Atomic scale analysis of the effect of the SiO₂ passivation treatment on InAs/GaSb superlattice mesa sidewall [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, **93**(9):2545.
- [14] H. S. Kim, E. Plis, N. Gautam, *et al.* Reduction of surface leakage current in InAs/GaSb strained layer long wavelength superlattice detectors using SU-8 passivation [J]. *Applied Physics Letters*, **97** (14) : p. 143512.1–143512.3.
- [15] Andrew Hood, Manijeh Razeghi, Edward H. Aifer, *et al.* On the performance and surface passivation of type II InAs/GaSb superlattice photodiodes for the very-long-wavelength infrared [J]. *Applied Physics Letters*, **87**(15) : p.151113.1–151113.3.
- [16] Bessolov V N, Lebedev M V. Chalcogenide passivation of III - V semiconductor surfaces [J]. *Semiconductors*, 1998, **32**(11):1141–1156.
- [17] Slavnikov V S, Nesmelov N S, Slavnikova M M, *et al.* Effects of nitriding on surface charge densities in anodic oxide-InAs structures [J]. *russian physics journal*, 1999, **42**(1):125–125.
- [18] Robert Rehm, Martin Walther, Frank Fuchs, *et al.* Passivation of InAs/(GaIn)Sb short-period superlattice photodiodes with 10 μm cutoff wavelength by epitaxial overgrowth with Al_{1-x}Ga_x(1-x)As_ySb_{1-y} [J]. *Applied Physics Letters*, **86**(17):p.173501.1–173501.3.
- [19] Nolde J A, Stine R, Jackson E M, *et al.* Effect of the oxide-semiconductor interface on the passivation of hybrid type-II superlattice long-wave infrared photodiodes [C]// Spie Opto. International Society for Optics and Photonics, 2011
- [20] Nguyen J, Ting D Z, Hill C J, *et al.* Dark current analysis of InAs/GaSb superlattice at low temperatures [J]. *Infrared Physics and Technology* 2009, **52**: 317–321.
- [21] Vurgaftman I, Meyer J R, Ram-Mohan L R. Band parameters for III - V compound semiconductors and their alloys [J]. *Journal of Applied Physics*, 2001, **89**(11):5815–5875.