

# Фотовольтаический детектор на основе гетероструктуры II типа с глубокой квантовой ямой AlSb/InAsSb/AlSb в активной области для среднего инфракрасного диапазона

© М.П. Михайлова<sup>¶</sup>, И.А. Андреев, К.Д. Моисеев, Э.В. Иванов,  
Г.Г. Коновалов, М.Ю. Михайлов, Ю.П. Яковлев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,  
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 5 августа 2010 г. Принята к печати 16 августа 2010 г.)

Созданы и исследованы фотодетекторы для спектрального диапазона 2–4 мкм на основе асимметричной гетероструктуры II типа  $p$ -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ $(p, n)$ GaSb с глубокой одиночной или тремя глубокими квантовыми ямами на гетерогранице, выращенные методом газовой эпитаксии из металлорганических соединений. Исследованы транспортные, люминесцентные, фотоэлектрические, вольтамперные и вольт-фарадные характеристики таких структур. Интенсивная положительная и отрицательная люминесценция наблюдались в спектральном диапазоне 3–4 мкм при высоких температурах (300–400 К). Спектры фоточувствительности лежали в диапазоне 1.2–3.6 мкм ( $T = 77$  К). Высокая квантовая эффективность  $\eta = 0.6–0.7$ , токовая чувствительность  $S_\lambda = 0.9–1.4$  А/Вт и обнаружительная способность  $D_\lambda^* = 3.5 \cdot 10^{11}–10^{10}$  см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ /Вт были получены в области  $T = 77–200$  К. Низкое значение емкости ( $C = 1.5$  пФ при  $V = -1$  В,  $T = 300$  К) позволило оценить быстродействие фотодетектора  $\tau = 75$  пс, что соответствует ширине полосы частот около 6 ГГц. Такие фотодетекторы перспективны для гетеродинамного приема излучения квантово-каскадных лазеров и инфракрасной спектроскопии.

## 1. Введение

В последние годы значительное внимание уделяется созданию новых типов фотодетекторов (ФД) для среднего инфракрасного (ИК) диапазона на основе гетероструктур с квантовыми ямами с целью улучшения их параметров (снижение темновых токов, улучшение быстродействия и др. [1]). В работах [2,3] сообщалось о создании квантово-размерных фотодиодов на основе гетероструктур GaAs/AlGaAs и InGaAs/SbP с двойными барьерами для интервала длин волн 3–5 мкм. Такие фотодиоды перспективны для гетеродинамного детектирования и систем коммуникаций в свободном пространстве (free space). Диапазон 2–5 мкм важен также для газового анализа, экологического мониторинга, медицинской диагностики. Преимуществом инфракрасных фотодиодов с квантовыми ямами является их высокое быстродействие (порядка нескольких пикосекунд [1]). Для детектирования в открытом пространстве нужна ширина полосы пропускания свыше 10–20 ГГц. Для передачи информации в этом случае используются квантово-каскадные лазеры, для которых время регистрации лимитируется низким быстродействием существующих фотодетекторов. К преимуществам квантово-размерных фотодиодов можно отнести также их работу при малых смещениях, с низкими темновыми токами и, как следствие, с низким уровнем шумов. Работы по таким ФД ведутся свыше 15 лет, однако в России такие исследования до последнего времени фактически не проводились. Система InAs(Sb)-AlSb обладает уникальной зонной диаграммой благодаря большому разрыву в зоне проводимости  $\Delta E_C > 1.35$  эВ,  $\Delta E_V = 0.15$  эВ и возможностью создания

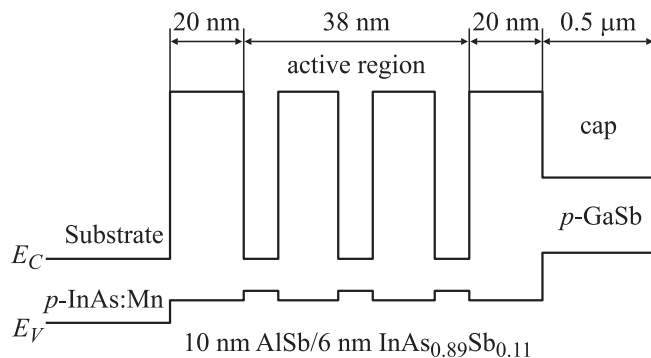
глубоких квантовых ям [4]. Это новый перспективный материал для оптоэлектронных приборов, квантово-каскадных лазеров, полевых транзисторов и резонансно-туннельных диодов [5–7].

В данной работе сообщается о создании и исследовании фотовольтаического детектора на основе асимметричной гетероструктуры II типа  $p$ -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ $(p, n)$ GaSb с глубокой одиночной или несколькими квантовыми ямами на гетерогранице, работающего в диапазоне 2–4 мкм.

## 2. Методика создания и исследования фотодиодов

Наногетероструктуры, содержащие 1 или 3 квантовые ямы 20 нм AlSb/5 нм InAs $_{0.84}$ Sb $_{0.16}$ /20 нм AlSb и накрывающие слои  $(p, n)$ -GaSb толщиной 0.5 мкм, были выращены на  $p$ -подложках InAs(100):Mn методом газовой эпитаксии из металлорганических соединений (MOVPE) низкого давления на установке AXTRON-200 при температуре 500°C в атмосфере водорода в лаборатории MOVPE Института физики Чешской академии наук [8]. Схематическая зонная диаграмма структуры с тремя квантовыми ямами представлена на рис. 1. Накрывающий слой GaSb был преднамеренно не легирован, тогда как подложка InAs была легирована акцепторной примесью Mn до концентрации  $p = 10^{17}$  см $^{-3}$  при  $T = 300$  К. В структурах с одной или тремя квантовыми ямами (КЯ), содержащих AlSb-барьеры толщиной 20 нм, ширина квантовых ям InAsSb составляла 5 нм. При  $T < 100$  К подложка становилась полупроводником, что позволяло измерять магнитотранспортные свойства.

<sup>¶</sup> E-mail: Mikh@irop1.ioffe.ru



**Рис. 1.** Схематическая зонная диаграмма асимметричной гетероструктуры с тремя глубокими квантовыми ямами AlSb/InAsSb/AlSb на интерфейсе.

Магнитотранспортные свойства полученных структур исследовались на прямоугольных образцах холловской геометрии с шестью омическими контактами в полях до 5 Тл при низкой температуре  $T = 77.4$  К. Величина холловской подвижности в образце с одиночной квантовой ямой AlSb/InAs<sub>0.84</sub>Sb<sub>0.16</sub>/AlSb шириной 5 нм, выращенной на подложке  $p$ -InAs(100):Mn, составляла  $\mu = 5000$  см<sup>2</sup>/(В·с). Данные измерений показали, что на границе II типа  $p$ -InAs/AlSb существует электронный канал, аналогичный наблюдаемому нами ранее [9]. Величина транспортного уширения [10]  $2\Gamma = 2\hbar/\tau_{tr}$ , где  $\tau_{tr} = \mu m^*/e = 10^{-13}$  с была оценена при значении эффективной массы электронов в твердом растворе InAsSb  $m^* = 0.016m_0$ . Значение  $2\Gamma = 16$  мэВ было получено при учете того факта, что подвижность определяется рассеянием на неоднородностях интерфейса [11]. Как отмечено в работе [10], для двойной гетероструктуры InAs/AlSb величина  $2\Gamma$  связана с шириной линии межподзонных переходов и хорошо согласуется с данными для нашей структуры с квантовой ямой, рассчитанными из полуширины спектра люминесценции такой структуры  $\Delta h\nu = 21$  мэВ при  $T = 77$  К, полученной из данных работы [12]. Эти результаты свидетельствуют о хорошем качестве гетерограницы исследуемых структур с КЯ, выращенных методом МОГФЭ (MOVPE).

Для исследования электролюминесцентных, электрических и фотоэлектрических свойств структуры были приготовлены методом стандартной фотолитографии и мокрого травления в виде мезодиодов с диаметром чувствительной площадки 300 мкм. Спектры электролюминесценции регистрировались с помощью монохроматора Digikrom-480, синхронного детектора Stanford S-580 и охлаждаемого InSb-фотодиода (Judson ltd.). Для стабилизации измерений при температурах выше комнатной диоды монтировались на специальном держателе с термохолодильником.

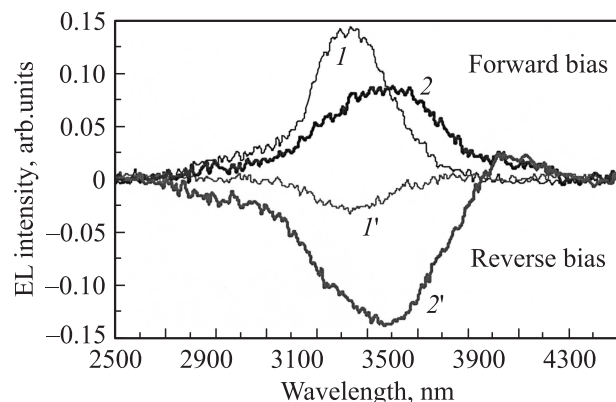
Спектры фоточувствительности исследовались в диапазоне температур 77–300 К с помощью монохроматора SPM-2 с глобаром в качестве источника излучения. Квантовая эффективность оценивалась по сравнению с

чувствительностью калиброванного термостолбика фирмы Карл Цейс.

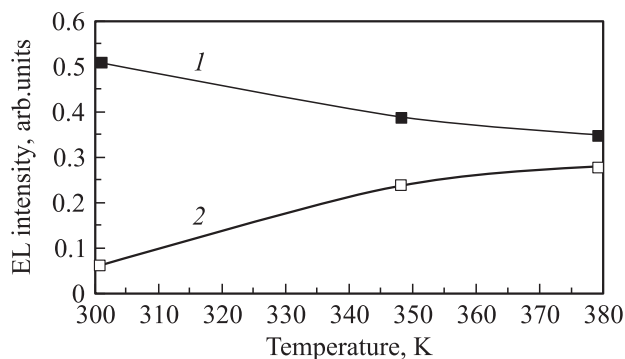
### 3. Результаты и обсуждение

Исследования спектров электролюминесценции в диапазоне температур 77–300 К показали высокую интенсивность как положительной, так и отрицательной электролюминесценции при прямом и обратном смещении (минус на  $p$ -подложке) соответственно в интервале энергий фотонов 0.3–0.4 эВ [12].

На рис. 2 представлены спектры положительной и отрицательной электролюминесценции структуры  $p$ -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ $p$ -GaSb при температуре  $T=28$  и 106 °С. Температурная зависимость оптической мощности положительной и отрицательной электролюминесценции в интервале высоких температур 300–380 К при токе накачки  $i = 200$  мА показана на рис. 3. Как видно из рисунка, мощность отрицательной ЭЛ возрастает, а



**Рис. 2.** Спектры положительной и отрицательной люминесценции гетероструктуры  $p$ -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ $p$ -GaSb при прямом («+» на  $p$ -InAs) и обратном («-» на  $p$ -InAs) смещении, при токе накачки  $i = 50$  мА и двух температурах  $T$ , °С: 1, 1' — 28, 2, 2' — 106.



**Рис. 3.** Температурные зависимости интенсивности электролюминесценции (ЭЛ) для структуры  $p$ -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ $p$ -GaSb с одиночной квантовой ямой. 1 — положительная ЭЛ (прямое смещение), 2 — отрицательная ЭЛ (обратное смещение). Ток накачки  $i = 200$  мА.

Темновые токи и дифференциальное сопротивление в нуле напряжения смещения для структур с одной и тремя квантовыми ямами на гетерогранице

Параметр	Одноямная структура N 1322		Трехямная структура N 1323	
	$T = 300\text{ K}$	$T = 77\text{ K}$	$T = 300\text{ K}$	$T = 77\text{ K}$
Дифференциальное сопротивление				
$R_0$ , Ом при 10 мВ	28	$2.6 \cdot 10^3$	42	$3.3 \cdot 10^3$
$R_0A$ , Ом · см <sup>2</sup>	$2.0 \cdot 10^{-2}$	1.8	$3.0 \cdot 10^{-2}$	2.4
Темновой ток $I_d$ , А при				
$U = -0.2\text{ В}$	$2.4 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-5}$	$1.0 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-5}$
$U = -0.6\text{ В}$	$2.8 \cdot 10^{-3}$	$7.2 \cdot 10^{-5}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$	$5.0 \cdot 10^{-5}$

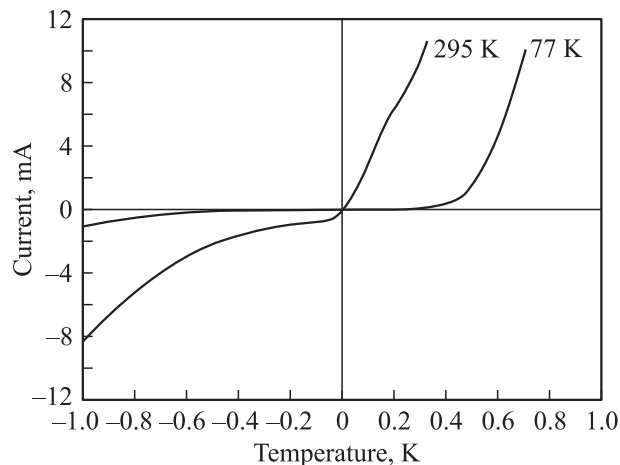


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики гетерофотодиода с тремя квантовыми ямами в активной области при малых смещениях.  $T = 77$  и 295 К.

положительной — падает с ростом температуры. Высокая эффективность отрицательной ЭЛ обусловлена падением величины безызлучательной оже-рекомбинации с увеличением температуры. Кроме того, как показано в [13], оже-рекомбинация может быть подавлена на гетерогранице II типа. Это позволяет использовать предложенную структуру, переключая ее в режим светодиода или фото диода при высоких температурах.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемых структур, представленные на рис. 4, имели выпрямляющий характер и соответствовали резкому гетеропереходу. Значение темновых токов для трехямной структуры было ниже, чем для одноямной (см. таблицу).

Дифференциальное сопротивление было рассчитано из измерений ВАХ при малых смещениях вблизи нуля для структур с одиночной и тройной квантовыми ямами при трех температурах 77, 250 и 300 К. Результаты измерений приведены в таблице. Так же указано произведение  $R_0A$ , где  $A$  — размер чувствительной площадки мезадиода. Нормализованные спектральные характеристики фоточувствительности при  $T = 77$  и 295 К показаны на рис. 5 для структур с одиночной квантовой ямой. Спектры фоточувствительности были локализова-

ны в интервале длин волн 1.0–3.4 мкм при  $T = 77$  К и 1.2–3.8 мкм при 295 К. Характер спектра соответствует спектру гетероперехода  $p\text{-InAs}/p(n)\text{-GaSb}$ . В одноямной структуре наблюдается добавочный слабый пик в области 4.0–4.5 мкм. Отметим, что аналогичный длинноволновый пик ранее наблюдался также в спектрах отрицательной электролюминесценции и его спектральное положение не изменялось с изменением полярности смещения [12]. Мы полагаем, что этот пик обусловлен переходом с поверхностного состояния акцептора Mn, расположенного вблизи интерфейса [13]. Абсолютная чувствительность в максимуме спектра для образца с 3 квантовыми ямами на гетерогранице была в 1.5 раза выше, чем в одноямных гетероструктурах в фотовольтаическом режиме. При приложении небольшого положительного смещения сигнал фототовета слабо возрастал. Как видно из таблицы, при увеличении температуры от 77 до 300 К фоточувствительность падала на 3 порядка в соответствии с изменением дифференциального сопротивления. Темновые токи в трехямных структурах были меньше, чем в одноямных. Так, при

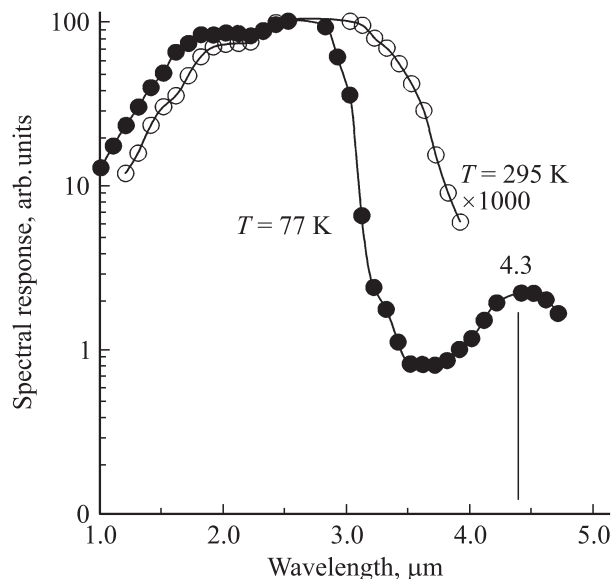
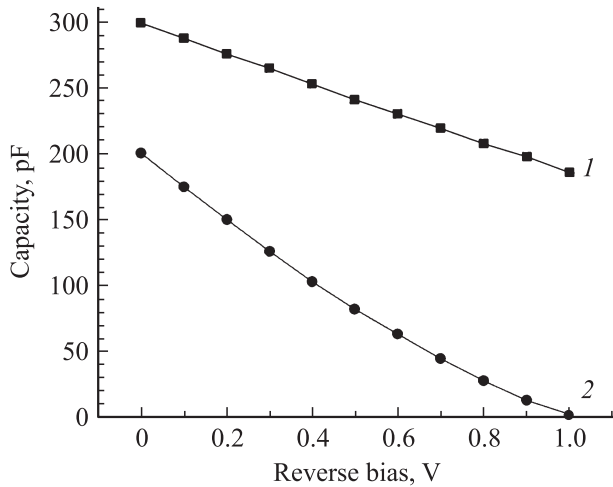


Рис. 5. Нормализованные спектры фоточувствительности для фото диода с одной квантовой ямой при  $T = 77$  и 295 К.



**Рис. 6.** Зависимость емкости от обратного смещения для гетерофотодиода с одиночной квантовой ямой (1) и тремя квантовыми ямами (2) при  $T = 300$  К.

$T = 77$  К плотность обратного тока при  $V = -0.4$  В составляла  $J_1 = 5.5 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> и  $J_3 = 3.4 \cdot 10^{-2}$  А/см<sup>2</sup> для одноямных и трехъямных гетероструктур соответственно.

В фотовольтаическом режиме фоточувствительность и квантовая эффективность были оценены как  $S_\lambda = 0.9-1.4$  А/Вт и  $\eta = 0.6-0.7$ . Эквивалентная мощность шума (при учете только темновых шумов) и обнаружительная способность для одноямного фото диода были рассчитаны в максимуме спектра при  $\lambda = 3$  мкм и  $T = 77$  К по известным соотношениям. Получены значения  $NEP = 6 \cdot 10^{-14}$  Вт/Гц<sup>1/2</sup>,  $D_\lambda^* = 3.5 \cdot 10^{11}$  см<sup>2</sup>·Гц<sup>1/2</sup>/Вт. Обнаружительная способность в интервале температур 77–200 К менялась в диапазоне  $3.5 \cdot 10^{11}-10^{10}$  см<sup>2</sup>·Гц<sup>1/2</sup>/Вт.

Полученное высокое значение обнаружительной способности фотовольтаического детектора на основе асимметричной гетероструктуры II типа  $p$ -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ $(p, n)$ -GaSb с глубокой квантовой ямой на гетерогранице, выращенной методом МОГФЭ, сравнимо с параметрами фото диодов на основе сверхрешеток  $p$ - $n$ -InAs и квантово-размерных детекторов на основе двойных гетероструктур GaAlAs/GaAs и InGaAs/InP [1], выращенных методом МПЭ, работающих в спектральном диапазоне 2–3 мкм, а также с параметрами коммерческих InAs-фото диодов.

Исследование вольт-фарадных характеристик показало значительную разницу в параметрах структур с одиночной и тройной квантовой ямой на гетерогранице (рис. 6). В одноямной структуре при изменении обратного смещения от 0 до 1 В емкость слабо менялась в интервале  $C = 200-300$  пФ. Интересным явилось резкое уменьшение емкости от  $C = 200$  пФ в нуле смещения до 1.5 пФ при  $T = 300$  К для трехъямных фото диодов. Эти значения соответствуют быстродействию  $R_L C = 75$  пс при нагрузке  $R_L = 50$  Ом. Такое поведение

емкости можно объяснить тем фактом, что при последовательном соединении нескольких конденсаторов, когда они соединены разноименно, суммарная емкость всегда меньше емкости любого конденсатора, входящего в соединение. Действительно, в трехъямном образце мы имеем дело с несколькими последовательно соединенными  $p$ - $n$ -переходами, содержащими 4 AlSb-барьера. При этом быстродействие не должно зависеть от размера площади образца. Таким образом, в нашем случае мы получаем быстродействующий фото диод с полосой  $\sim 10$  ГГц. Ранее нами были описаны быстродействующие фото диоды на основе объемных гетероструктур GaInAsSb/AlGaAsSb для спектрального диапазона 1.6–2.4 мкм с шириной полосы около 2 ГГц [14], а также лавинные фото диоды для диапазона 2–4 мкм [15]. Представленные в данной работе фото диоды с квантовыми ямами в активной области перспективны для гетеродинамического детектирования квантово-каскадных лазеров, информационных сетей, медицинской диагностики, экологического мониторинга.

## 4. Заключение

Асимметричные гетероструктуры II типа  $p$ -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ $p(n)$ -GaSb с одиночной и тремя квантовыми ямами на гетерогранице выращены методом МОГФЭ и исследованы их люминесцентные, транспортные и фотоэлектрические свойства. Интенсивная положительная и отрицательная электролюминесценция наблюдалась в спектральном диапазоне 3–4 мкм при  $T = 300-380$  К. Исследование температурной зависимости положительной и отрицательной люминесценции показало, что описанные в работе светоизлучающие структуры могут работать при высоких температурах в режиме светодиода/фото диод при переключении напряжения смещения.

Впервые детально изучены спектральные, вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики мезафото диодов с квантовыми ямами AlSb/InAsSb/AlSb в активной области в интервале температур 77–300 К в диапазоне длин волн 1–4 мкм. Была получена высокая токовая монохроматическая чувствительность  $S_\lambda = 0.9-1/4$  А/Вт, квантовая эффективность  $\eta = 0.6-0.7$  и оценена обнаружительная способность  $3.4 \cdot 10^{11}-10^{10}$  см<sup>2</sup>·Вт<sup>-1</sup>·Гц<sup>1/2</sup> при  $T = 77-200$  К. Наблюдалось резкое падение емкости диода в зависимости от обратного смещения ( $C = 1.5$  пФ при обратном смещении  $U = -1$  В,  $T = 300$  К) для фотодетектора с тремя квантовыми ямами в активной области, что соответствует быстродействию 75 пс и полосе пропускания свыше 6 ГГц. Параметры исследованных в данной работе фотодетекторов с квантовыми ямами в активной области сравнимы с характеристиками квантово-размерных фотодетекторов на основе InGaAs/InP, GaAlAs/GaAs, полученных методом молекулярно-пучковой эпитаксии, а также с параметрами коммерческих фото диодов

$p$ - $n$ -InAs/InAsSbP, однако превосходят их по быстродействию.

Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории МОГФЭ Института физики Чешской академии наук за выращивание квантово-размерных гетероструктур.

Работа частично поддержана программой президенту-ма РАН.

## Список литературы

- [1] S. Haywood, M. Missons. In: *Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics*, ed. by A. Krier (Springer Series in Optical Sciences, 2006) p. 429.
- [2] B.F. Levine. *J. Appl. Phys.*, **74**, R-01 (1996).
- [3] E. Lina, A. Gusman, J. Sanchez-Rocha et al. *Infr. Phys. Technol.*, **44**, 383 (2003).
- [4] W. Kruppa, M.J. Yang, B.R. Bennet, J.B. Boss. *Appl. Phys. Lett.*, **85**, 774 (2004).
- [5] J. Devenson, R. Teissier, O. Cathabard, A.N. Baranov. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 111 (2007).
- [6] D.H. Chow, E.T. Yu, J.R. Sonderson et al. *J. Appl. Phys.*, **68**, 3744 (1990).
- [7] M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, Yu.P. Yakovlev. *Semicond. Sci. Technol.*, **19**, R109 (2004).
- [8] E. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrac, T. Simecek, K.D. Moiseev, E.V. Ivanov, M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev. *Abstracts of 8th Int. Conf. MIOMD* (Bad Ischl, Austria, 4-16 May, 2007) p. 184; A. Nakagawa, H. Kroemer, J.H. English. *Appl. Phys. Lett.*, **54**, 1893 (1989).
- [9] S. Sasa, M. Nakai, M. Turukawa, M. Inoe. *Conf. Ser.*, **187**, 363 (2005).
- [10] M.P. Mikhailova, K.D. Moiseev, T.I. Voronina et al. *J. Appl. Phys.*, **102**, 13710 (2007).
- [11] М.П. Михайлов, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев, Е. Hulicius, А. Hospodkova, J. Pangrac, T. Simecek. *ФТП*, **44** (2), 69 (2010).
- [12] М.П. Михайлова, Т.Н. Данилова, Г.Г. Зегря, А.Н. Именков, К.Д. Моисеев, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **33**, 351 (1999).
- [13] K. Moiseev, E. Ivanov, V. Romanov, M. Mikhailova, Yu. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrac, T. Simecek. *Phys. Procedia*, **3**, 1189 (2010).
- [14] Yu.P. Yakovlev, I.A. Andreev, S.S. Kizhaev, E.V. Kunitsyna, M.P. Mikhailova. *Proc. of SPIE*, v. 6636, 66360D-1 (2000).
- [15] M.P. Mikhailova, I.A. Andreev. In: *Mid-Infrared Semiconductor Optoelectronics*, ed. by A. Krier (Springer Series in Optical Sciences, 2006) p. 542.

Редактор Т.А. Полянская

## Photovoltaic detector based on type II heterostructure with deep AlS/InAsSb/AlSb quantum well in an active layer for the mid-infrared spectral range

M.P. Mikhailova, I.A. Andreev, K.D. Moiseev,  
E.V. Ivanov, G.G. Kononov, M.Yu. Mikhailov,  
Yu.P. Yakovlev

loffe Physicotechnical Institute,  
Russian Academy of Sciences,  
194021 St. Petersburg, Russia

**Abstract** Photodetectors for the spectral range 2–4  $\mu\text{m}$  based on type II asymmetric  $p$ -InAs/AlSb/InAsSb/AlSb/ $(p, n)$ -GaSb heterostructure with a single or triple deep quantum wells on the interface grown by metal-organic vapor phase epitaxy were designed. Transport, luminescent, photoelectric, current-voltage and capacity-voltage characteristics were studied. Intensive positive and negative electroluminescence was observed in the spectral range 3–4  $\mu\text{m}$  at high temperature (300–400 K). Spectra photocensitivity were in the spectral range 1.2–3.6  $\mu\text{m}$ . High quantum efficiency  $\eta = 0.6$ –0.7, current sensitivity  $S_\lambda = 0.9$ –1.4 A/W and detectivity  $D_\lambda^* = 3.5 \cdot 10^{11}$ – $10^{10}$  cmHz<sup>1/2</sup>/W were found at  $T = 77$ –200 K. Low value of capacity ( $C = 1.5$  pF at  $V = -1$  V,  $T = 300$  K) let us to evaluate speed response of the photodetectors under study as  $\tau = 75$  ps, that corresponds to bandwidth about 6 GHz. Such photodiodes are promising for heterodyne detection of quantum-cascade lasers and infrared spectroscopy.