

Фотоэлектрические и люминесцентные свойства наногетероструктур на основе GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb, выращенных методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений

© М.П. Михайлова, И.А. Андреев[¶], Э.В. Иванов, Г.Г. Коновалов, Е.А. Гребенщикова, Ю.П. Яковлев, E. Hulcius⁺, A. Hospodkova⁺, Y. Pangrac⁺

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

⁺Institute of Physics, Academy of Sciences of Czech Republic, v.v.i 16200 Prague, Czech Republic

(Получена 29 декабря 2012 г. Принята к печати 10 января 2013 г.)

Исследованы люминесцентные и фотоэлектрические свойства гетероструктур с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb, выращенных на подложках *n*-GaSb методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений. Наблюдалась интенсивная суперлинейная люминесценция и увеличение оптической мощности в зависимости от тока накачки в диапазоне энергий фотонов 0.6–0.8 эВ при температурах $T = 77$ и 300 К. Детально изучены фотоэлектрические, вольт-амперные и емкостные характеристики исследуемых наноструктур. Фотоответ исследовался при работе фотодетектора в фотовольтаическом режиме в спектральном диапазоне 0.9–2.0 мкм. Максимум чувствительности при комнатной температуре наблюдался на длине волны 1.55 мкм. Проведены оценки квантовой эффективности, обнаружительной способности и быстродействия фотодетекторов. Квантовая эффективность и обнаружительная способность в максимуме спектра при комнатной температуре достигали величин $\eta = 0.6–0.7$ и $D_{\lambda \max}^* = (5–7) \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ соответственно. Быстродействие фотодиода, определяемое по времени нарастания импульса фотоотклика на уровне 0.1–0.9, составляет величину 100–200 пс. Полоса пропускания фотодиодов достигает 2–3 ГГц. Фотодетекторы с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb, выращенные на подложках *n*-GaSb, перспективны для использования в системах гетеродинамического приема и в информационных технологиях.

1. Введение

Фотодетекторы на основе гетероструктур с квантовыми ямами (КЯ) на основе InGaAs/AlGaAs и GaAs/AlGaAs, выращенные методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) на подложках GaAs и InP, интенсивно разрабатываются и исследуются в последние годы [1–4]. Основное внимание при этом уделялось созданию фотодетекторов ближнего (длины волн $\lambda = 0.9–2.0$ мкм) и среднего (длины волн $\lambda = 3–5$ мкм) инфракрасных (ИК) диапазонов, перспективных как для систем волоконно-оптических линий связи ($\lambda = 1.3–1.55$ мкм), так и для задач газового анализа и экологического мониторинга. Фотодетекторы на основе квантово-размерных структур на основе GaAs и InP с узкозонными слоями InGaAs в квантовой яме работают главным образом в режиме фотопроводимости при достаточно низких температурах (60–200 К) [1–3]. Преимуществом этих фотоприемников являются низкие шумы и высокое быстродействие, что важно для гетеродинамического приема излучения квантово-каскадных лазеров и для информационных технологий.

Ранее нами была разработана технология выращивания квантово-размерных структур методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) на подложках InAs [5] и исследованы их

люминесцентные и фотоэлектрические свойства. В наногетероструктурах с одиночной и тремя квантовыми ямами AlSb/InAsSb/AlSb, выращенных на подложках *p*-InAs:Mn, была обнаружена высокоинтенсивная положительная и отрицательная электролюминесценция [6] и были созданы быстродействующие фотодиоды с высокой обнаружительной способностью для среднего ИК диапазона 2–4 мкм, работающие при температурах $T = 77–250$ К [7].

Данная работа посвящена первым исследованиям фотоэлектрических и люминесцентных свойств гетероструктур, выращенных методом МОГФЭ, на основе *n*-GaSb с глубокой квантовой ямой и узкозонным твердым раствором в активной области Al(As)Sb/InAs_{0.84}Sb_{0.16}/Al(As)Sb/*p*-GaSb и созданию быстродействующих квантово-размерных фотодетекторов, работающих в фотовольтаическом режиме в ближнем ИК диапазоне (0.9–2 мкм).

2. Методика создания и исследования наногетероструктур

Двойные симметричные наногетероструктуры были выращены на установке AIXTRON-200 методом МОГФЭ при низком давлении и температуре 520°C, описанном ранее в работе [8]. Структура состояла из подложки *n*-GaSb:Te, нелегированного буферного слоя

[¶] E-mail: igor@iropt9.ioffe.ru

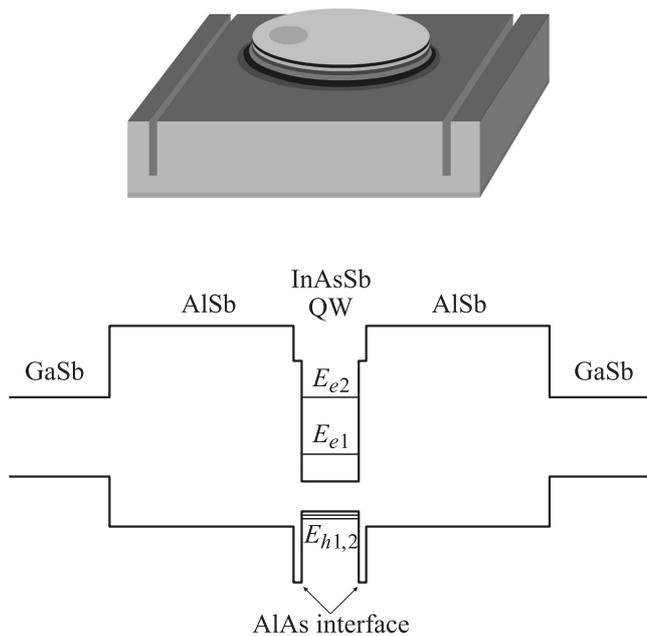


Рис. 1. Изображение мезоструктуры с диаметрами фоточувствительной площадки 500 мкм, контакта 50 мкм и энергетическая зонная диаграмма исходной наноструктуры с глубокой квантовой ямой (QW), $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.12}$, выращенной методом МОГФЭ.

p -GaSb толщиной 0.5 мкм, затем выращивались квантовая яма $\text{AlSb}(20 \text{ нм})/\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}(5 \text{ нм})/\text{AlSb}(20 \text{ нм})$ на основе нелегированного материала и накрывающий слой p -GaSb толщиной 0.5 мкм. Узкозонный твердый раствор $\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}$ имел ширину запрещенной зоны $E_g = 0.294$ эВ, холловскую подвижность $38\,000 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ (77 К) и концентрацию электронов $n = 2.6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Предполагалось, что при выращивании на границе с барьером AlSb образуется интерфейс AlAs, поскольку атомы As замещают атомы Sb на границе As/Sb. Поэтому в исследуемой структуре реально присутствует тонкий высокий барьер для дырок Al(As)Sb [9]. Выращивание таких наноструктур на подложках GaSb позволяет получить ненапряженную границу гетероструктуры GaSb/AlSb вследствие того, что оба эти соединения $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ принадлежат к так называемому семейству „6.1 A family“ (InAs – GaSb – AlSb), в котором постоянные решетки практически одинаковы [10].

Образцы для исследований были изготовлены в виде мезадиодов методом стандартной фотолитографии и мокрого травления с диаметром чувствительной площади ~ 500 мкм, точечным контактом диаметром 50 мкм со стороны накрывающего слоя p -GaSb. Исследуемая структура схематически представлена на рис. 1. Омические контакты были сформированы вакуумным напылением сплавов $\text{Cr}/\text{Au}+\text{Te}/\text{Au}$ и $\text{Cr}/\text{Au}+\text{Ge}/\text{Au}$ к подложке n -GaSb и верхнему p -слою соответственно. Меза-диоды монтировались на стандартном держателе TO-18 подложкой к основанию корпуса.

На полученных структурах были изучены вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики, спектры и интенсивность электролюминесценции в зависимости от тока накачки, спектры фоточувствительности в фотovoltaическом и фотодиодном режимах в температурном интервале 77–300 К.

Спектры электролюминесценции (ЭЛ) изучались с помощью автоматизированной установки на базе монохроматора МДР-2 с дифракционной решеткой 300 штр/мм. Излучение, выходящее из структуры со стороны накрывающего слоя p -GaSb, регистрировалось охлаждаемым InSb-фотодетектором фирмы Judson Ltd. Методика измерений ЭЛ детально описана в работе [6]. При исследовании ЭЛ питание образцов осуществлялось прямоугольными импульсами тока с коэффициентом заполнения 50% и частотой повторения 610 Гц. Амплитуда импульсов тока варьировалась в интервале $\pm(0-200)$ мА. Спектры фоточувствительности исследовались с помощью монохроматора SPM-2 и глобара в качестве источника ИК излучения. Сигнал с исследуемых образцов измерялся методом синхронного детектирования с помощью усилителя SR830 на частоте 500 Гц.

3. Результаты и обсуждение

Электролюминесценция в наногетероструктурах на основе GaSb с глубокой квантовой ямой AlSb/InAsSb/AlSb исследовалась в интервале энергий фотонов 0.6–0.8 эВ в зависимости от тока накачки. Были проведены теоретические расчеты положения квантово-размерных уровней для электронов и дырок методом четырехзонной модели Кейна [11]. Было установлено, что в исследуемой структуре при комнатной температуре в глубокой яме шириной 5 нм имеются два электронных уровня с энергиями $E_{e1} = 0.394$ эВ и $E_{e2} = 1.22$ эВ. Для дырок в такой яме имеются пять энергетических уровней, энергии двух из них равны $E_{h1} = 0.029$ эВ и $E_{h2} = 0.047$ эВ.

Излучательная рекомбинация происходит при переходе носителей между уровнями E_{e1} и E_{h1} . Энергия излучаемого фотона составляет $E_{e1} + E_g(\text{InAsSb}) + E_{h1}$, которая при 300 К равна $h\nu = 0.669$ эВ. При температуре жидкого азота, $T = 77$ К, энергия максимума люминесценции составляет $h\nu = 0.717$ эВ. Особенность исследуемой гетероструктуры с высоким барьером Al(As)Sb на гетерогранице состояла в большой величине разрыва в зоне проводимости на гетерогранице между барьером и первым электронным уровнем E_{e1} : $\Delta E_c = 1.27$ эВ.

В таких квантово-размерных структурах нами были впервые обнаружены суперлинейная люминесценция и возрастание оптической мощности излучения в зависимости от тока накачки в интервале 25–200 мА при 77 и 300 К [9]. На рис. 2 представлены спектры ЭЛ, при этом соответствующие значения тока накачки указаны на рис. 2 в качестве параметра. При комнатной температуре и прямом смещении („+“ на p -GaSb) спектры

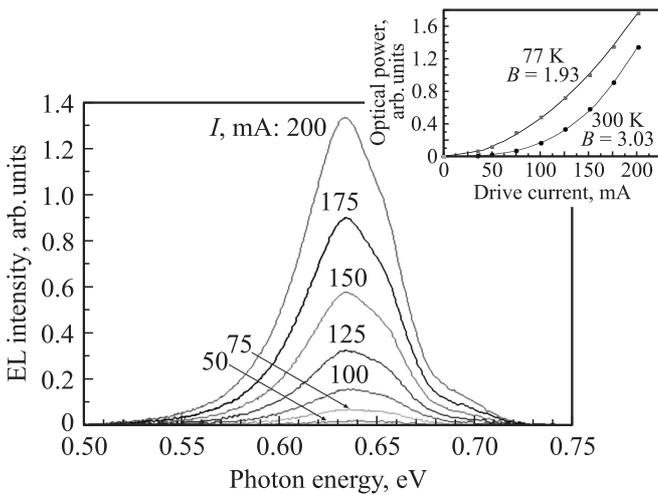


Рис. 2. Спектр элетролюминесценции (EL) гетероструктуры $n\text{-GaSb}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/\text{InAsSb}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/p\text{-GaSb}$ при $T = 300\text{ K}$ и прямом смещении. Величины токов накачки I указаны. На вставке — зависимость оптической мощности P от тока накачки I в прямом смещении, $T = 77$ и 300 K и аппроксимация формулой $P = AI^B$. $B = 1.93$ (77 K), 3.03 (300 K).

ЭЛ имели симметричную форму с максимумом при энергии фотона $h\nu = 0.634\text{ эВ}$ ($\lambda = 1.96\text{ мкм}$) и шириной на полувысоте $55\text{--}60\text{ мэВ}$ (рис. 2). Экспериментальные энергии максимумов спектров ЭЛ хорошо согласовывались с расчетными данными. Так, экспериментальные значения положения максимумов ЭЛ для $T = 300$ и 77 K составили $h\nu_{\text{exp}} = 0.634$ и 0.718 эВ соответственно.

При $T = 77\text{ K}$ интенсивность излучения в максимуме спектра была выше в 1.5 раза. Нами обнаружено, что интегральная оптическая мощность излучения P в зависимости от тока накачки изменялась суперлинейно и могла быть описана законом $P = AI^B$, где A — подгоночный параметр, I — ток накачки, B — показатель степени, который менялся от 3 при 300 K до 2 при 77 K (рис. 2). На вставке к рис. 2 показана зависимость оптической мощности от тока накачки. Наблюдаемые эффекты были объяснены вкладом в излучательную рекомбинацию электронно-дырочных пар, созданных в результате ударной ионизации горячими электронами, разогретыми на скачке потенциала в зоне проводимости на гетерогранице со слоем $\text{Al}(\text{As})\text{Sb}$ и первым электронным уровнем E_{e1} ($\Delta E_c = 1.27\text{ эВ}$). Энергия таких разогретенных электронов превышала значение пороговой энергии ионизации для электронов внутри ямы: $\Delta E_c - E_{e1} = 0.876\text{ эВ} > E_{e1} + E_g(\text{InAsSb}) + E_{h1} > 0.669\text{ эВ}$ [11].

Кроме того, как было показано в [12], ожереккомбинация в глубоких квантовых ямах должна быть существенно подавлена. Теоретические оценки возможных случаев ударной ионизации в зависимости от разрыва зон на гетерогранице и ширины квантовых ям, проведенные в [11], хорошо согласовывались с экспериментом. Отметим, что при обратном смещении зависимость

интенсивности ЭЛ от тока накачки была практически линейной в полулогарифмическом масштабе.

Высокая интенсивность излучательной рекомбинации, обнаруженная в интервале энергий фотонов $0.6\text{--}0.8\text{ эВ}$, позволила нам исследовать возможность создания на основе наногетероструктур, выращенных на подложках $n\text{-GaSb}$, эффективных фотодетекторов.

Вольт-амперные характеристики $I(U)$ фотодетекторных структур были исследованы в температурном диапазоне $T = 77\text{--}300\text{ K}$ и соответствовали резкому гетеропереходу. Значения плотностей темнового тока были низкими по сравнению с таковыми в фотодиодах на основе объемных гетероструктур $\text{GaSb}/\text{GaInAsSb}/\text{AlGaAsSb}$ [13] и составляли $j = 2 \cdot 10^{-5}$ и $2 \cdot 10^{-2}\text{ A/cm}^2$ при 77 и 300 K соответственно. Дифференциальное сопротивление в нуле смещений составляло $R_0 = \Delta U/\Delta I = 2\text{--}6\text{ кОм}$ при 300 K и $10\text{--}60\text{ МОм}$ при 77 K . Прямые ветви структур слабо зависели от температуры. Отсечка на оси абсцисс составляла $0.5\text{--}0.6\text{ эВ}$. В интервале напряжений $100\text{--}900\text{ мВ}$ прямые ветви ВАХ (рис. 3) аппроксимировались выражением $I = I_0 \exp(qU/nkT)$, где параметр неидеальности образца с квантовой ямой $d = 5\text{ нм}$ составлял ~ 27 при 77 K и ~ 7 при 300 K , что соответствовало туннельному механизму протекания темнового тока в структурах. Спектры фоточувствительности были исследованы в спектральном диапазоне $0.9\text{--}2.0\text{ мкм}$ как в фотовольтаическом режиме, так и при приложении обратного смещения. Нормированные спектры фототока, измеренные в фотовольтаическом режиме при 300 и 77 K , приведены на рис. 4. На этом же рисунке показан спектр ЭЛ наногетероструктуры с одиночной квантовой ямой при токе накачки 200 мА . Фоточувствительность в структуре с квантовой ямой появляется за счет реализации переходов между заполненным электронным уровнем E_{e1} и пустым уровнем E_{e2} (внутризонный переход) $E_{e2} - E_{e1} = 1.22\text{ эВ} - 0.394\text{ эВ} = 0.826\text{ эВ}$, что соответствует длине волны $\sim 1.5\text{ мкм}$ и достаточно

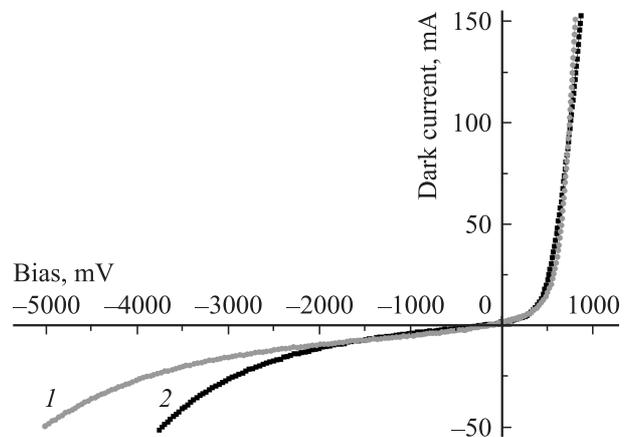


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики гетероструктуры $n\text{-GaSb}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/p\text{-GaSb}$ при 77 (1) и 300 K (2).

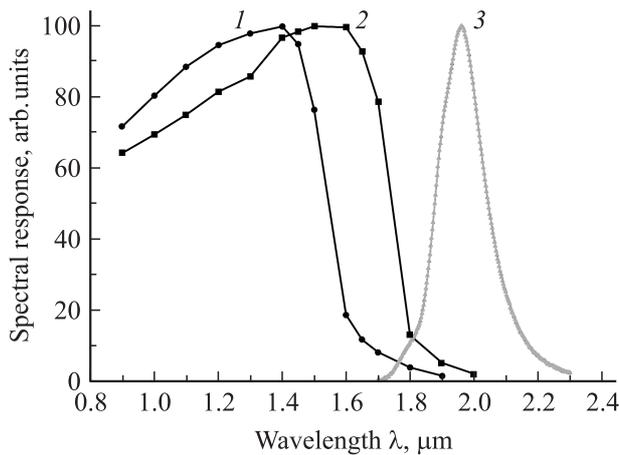


Рис. 4. Спектральное распределение фоточувствительности гетероструктуры $n\text{-GaSb}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/p\text{-GaSb}$ при 77 (1) и 300 К (2). 3 — спектр элетролюминесценции при прямом смещении и токе накачки 200 мА.

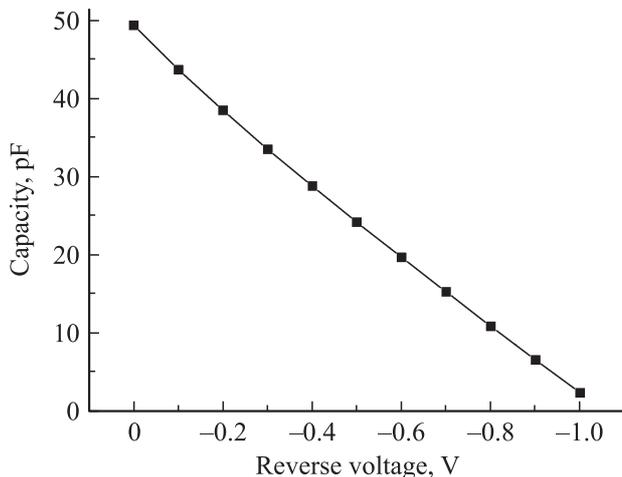


Рис. 5. Вольт-фарадная характеристика гетероструктуры $n\text{-GaSb}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/p\text{-GaSb}$ при 300 К.

хорошо согласуется с данными эксперимента по спектральному распределению фоточувствительности. Максимум фотоответа находится при $\lambda \approx 1.55$ мкм (300 К) и 1.3 мкм (77 К). Отметим, что абсолютные значения фототока в максимуме были близкими при комнатной и азотной температурах. Эти данные резко контрастируют с характеристиками ранее исследованных фотодетекторов с квантовыми ямами на основе $\text{AlSb}/\text{InAsSb}/\text{AlSb}$, выращенных методом МОГФЭ на подложках p -, n - InAs , в которых чувствительность в максимуме спектра при 77 и 300 К различалась на 3 порядка [7,14]. Так, при комнатной температуре ампер-ваттная монохроматическая чувствительность на длине волны 1.55 мкм составила величину 0.6–0.7 А/Вт, а обнаружительная способность в максимуме спектра достигала величины $(5\text{--}7) \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

Измерение емкости исследуемых структур на частоте 1 МГц при $T = 300$ К показало ее низкое значение в интервале обратных смещений до -1 В (рис. 5). Емкость падала от 50 до единиц пФ, что обеспечивало время отклика фототока при нагрузке $R_L = 50$ Ом $\tau = 100\text{--}200$ пс и соответствовало полосе пропускания 2–3 ГГц. Нами были исследованы также характеристики фотодетекторов при обратном смещении до -3 В. При малых напряжениях (до -1 В) и воздействии светом с длинами волн $\lambda = 1.1$ и 1.6 мкм (1.55 мкм) наблюдалось лавинное умножение носителей с коэффициентом $M = 15$, которое начиналось при обратных смещениях вблизи $U = -0.5$ В (рис. 6). Пороговая энергия ионизации для электронов в исследуемой квантовой яме была оценена как $E_{ie} = 0.67$ эВ [11]. При дальнейшем увеличении напряжения этот коэффициент практически не менялся. Вероятно, это связано с туннелированием электронов с уровня E_{e2} через треугольный барьер, образуемый стенкой ямы и AlSb при приложении электрического поля. Однако этот механизм требует дальнейшего изучения.

Было проведено сравнение параметров наших квантово-размерных фотодетекторов, выращенных методом МОГФЭ на подложках GaSb , с известными литературными данными для детекторов на основе структур с КЯ $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ и $\text{AlSb}/\text{InGaAs}/\text{AlSb}$, выращенных методом МПЭ на подложках GaAs и InP , работающих на межподзонных переходах [4,12] в спектральном диапазоне 1.3–1.8 мкм. Эти фотодетекторы работают при обратном смещении $-(5\text{--}20)$ В, их спектральные характеристики лежат в диапазоне 0.5–1.8 мкм, обнаружительная способность составляет величину $\sim D_{\lambda}^* = 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Вт}^{-1} \cdot \text{Гц}^{1/2}$ при достаточно низких температурах, $T = 60\text{--}210$ К [1].

Полученные в данной работе фотовольтаические детекторы работают без смещения, в фотовольтаическом режиме, в диапазоне 0.5–2 мкм при комнат-

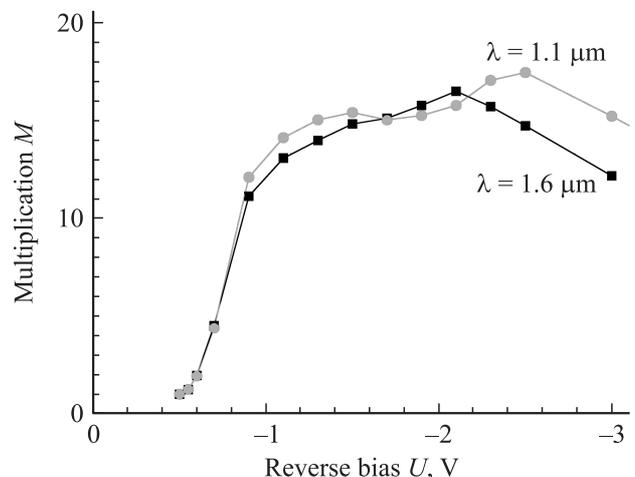


Рис. 6. Зависимость умножения фототока в гетероструктуре $n\text{-GaSb}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/\text{InAs}_{0.84}\text{Sb}_{0.16}/\text{Al}(\text{As})\text{Sb}/p\text{-GaSb}$ при обратном смещении. $T = 300$ К.

ной температуре, имеют слабую температурную зависимость спектральной чувствительности в диапазоне 77–300 К и высокое быстродействие ($\tau = 100\text{--}200$ пс), сравнимое, например, с таковым в фотодетекторах на основе InGaAs/GaAs, описанных в каталоге фирмы Hamamatsu [15]. Кроме того, улучшение характеристик квантово-размерных фотодетекторов в фотовольтаическом режиме по сравнению с режимом фотопроводимости приводит к уменьшению шумов, к возрастанию отношения сигнал/шум и увеличению обнаружительной способности.

4. Заключение

Методом газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений выращены гетероструктуры на подложках n -GaSb с глубокой квантовой ямой Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb, и исследованы их люминесцентные, электрические, вольт-фарадные и фотозлектрические свойства в диапазоне энергий фотонов 0.6–0.8 эВ. В таких наноструктурах наблюдалась суперлинейная люминесценция в диапазоне энергий фотонов 0.6–0.8 эВ и увеличение оптической мощности в 2–3 раза за счет эффекта ударной ионизации в глубокой квантовой яме и вклада в излучательную рекомбинацию добавочных электронно-дырочных пар.

Детально изучены фотозлектрические, вольт-амперные и емкостные характеристики исследуемых наноструктур с глубокой одиночной квантовой ямой. Проведены оценки обнаружительной способности и быстродействия фотодетекторов в фотовольтаическом режиме. Обнаружительная способность в максимуме спектра достигала величины $(5\text{--}7) \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ при комнатной температуре.

Проведено сравнение параметров исследуемых фоточувствительных структур с параметрами описанных в литературе квантово-размерных фотодетекторов, выращенных методом МПЭ на подложках GaAs и InP, работающих в ближнем ИК диапазоне 1.3–1.8 мкм. Исследованные фотодетекторы, работающие в фотовольтаическом режиме, обладают слабой температурной зависимостью в максимуме фоточувствительности в диапазоне 77–300 К, обнаружительная способность при комнатной температуре близка к опубликованным данным для фотодетекторов, выращенных методом МПЭ на подложках GaAs и InP. Описанные в настоящей работе структуры характеризуются высоким быстродействием, $\tau = 100\text{--}200$ пс, что соответствует полосе пропускания 2–3 ГГц, поэтому они перспективны для гетеродинного приема излучения квантово-каскадных лазеров и использования их в оптических линиях связи в ближнем ИК диапазоне ($\lambda = 1.3\text{--}1.55$ мкм). Получен коэффициент умножения $M = 15$ при обратном смещении в слабых электрических полях, что может быть использовано при соответствующей оптимизации для создания лавинных фотодиодов с низким уровнем шумов. Выращивание на-

ногетероструктур на основе GaSb с различной шириной квантовых ям позволит сместить спектральные характеристики излучателей и фотодетекторов в средний ИК диапазон (3–5 мкм).

Работа поддержана грантом РФФИ № 12-02-00597, программой № 24 президиума РАН и грантовым агентством Чешской Республики (грант № 13-15286s).

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.E. Levine. *J. Appl. Phys.*, **74**, R1 (1996).
- [3] E. Luna, A. Gusman, J. Sanches-Rocha et al. *Infr. Phys. Technol.*, **44**, 383 (2003).
- [4] N. Georgiev, T. Dekorsy, F. Eichhorn, M. Helm, M.P. Semtsiv, W.T. Masselink. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 210 (2003).
- [5] Y. Toušková, E. Hulicius, J. Pangrac, T. Šimeček, V. Yurka, P. Hubik, Y.Y. Mareš, Y. Krištofik. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 1811 (2004).
- [6] М.П. Михайлова, Э.В. Иванов, К.Д. Моисеев, Ю.П. Яковлев, E. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrac, T. Šimeček. *ФТП*, **44** (2), 69 (2010).
- [7] М.П. Михайлова, И.А. Андреев, К.Д. Моисеев, Э.В. Иванов, Г.Г. Коновалов, М.Ю. Михайлов, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **45** (2), 251 (2011).
- [8] K.D. Moiseev, E.V. Ivanov, G.G. Zegrya, M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrac, K. Melichar, T. Šimeček. *Appl. Phys. Lett.*, **88**, 132 102 (2006).
- [9] M.P. Mikhailova, E.V. Ivanov, L.V. Danilov, K.V. Kalinina, N.D. Stoyanov, G.G. Zegrya, Yu.P. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrac, M. Zikova. *J. Appl. Phys.*, **112** (2), 023108 (2012).
- [10] H. Kroemer. *Physica E*, **20** (3–4), 196 (2004).
- [11] Л.В. Данилов, Г.Г. Зегря. *ФТП*, **42** (5), 566 (2008) [*Semiconductors*, **42**, 550 (2008)].
- [12] J.H. Smet, L.H. Peng, Y. Hirayama, G.G. Tonslad. *Appl. Phys. Lett.*, **64**, 986 (1994).
- [13] Yu.P. Yakovlev, I.A. Andreev, S.S. Kizhaev, E.V. Kunitsyna, M.P. Mikhailova. *Proc. SPIE*, **6636**, 66360D-1 (2000).
- [14] M.P. Mikhailova, I.A. Andreev, K.D. Moiseev, E.V. Ivanov, N.D. Stoyanov, Yu.P. Yakovlev, E. Hulicius, A. Hospodkova, J. Pangrac, K. Melichar. *Proc. SPIE*, **7138**, 713 813 (2008).
- [15] *Каталог фирмы Hamamatsu Photonics*: <http://hamamatsu.com>

Редактор Л.В. Шаронова

Photoelectric and luminescent properties of nanoheterostructures based on GaSb with deep quantum well Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb grown by MOVPE

M.P. Mikhailova, I.A. Andreev, E.V. Ivanov, G.G. Kononov, E.A. Grebentshikova, Yu.P. Yakovlev, E. Hulicius⁺, A. Hospodkova⁺, Y. Pangrac⁺

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

⁺Institute of Physics,
Academy of Sciences of Czech Republic, v.v.i
16200 Prague, Czech Republic

Abstract The luminescent and photoelectrical properties of GaSb-based heterostructures with deep Al(As)Sb/InAsSb/Al(As)Sb quantum well were studied. The structures were grown by MOVPE (metal-organic vapor phase epitaxy) method. Intense superlinear luminescence and enhance of the optical power were observed in dependence on drive current in the spectral range of 0.6–0.8 eV at the temperatures $T = 77$ and 300 K. Spectral response of the photodetector was studied at the photovoltaic mode in the range of 0.9–2.0 μm with maximum sensitivity at $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ($T = 300$ K). High quantum efficiency $\eta = 0.6$ –0.7 and detectivity $D_{\lambda \text{ max}}^* = (5$ –7) $\cdot 10^{10} \text{ W}^{-1} \cdot \text{cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}$ were achieved at room temperature. The speed of response is estimated as 100–200 ps. The photodetector bandwidth of 2–3 GHz was reached. These quantum well photodetectors are prospective for heterodyne spectroscopy and information technology.