

Высокоэффективные фотодиоды на основе GaInAsSb / GaAlAsSb для спектрального диапазона 0.9–2.55 мкм с большим диаметром чувствительной площадки

© И.А. Андреев, Н.Д. Ильинская, Е.В. Куницына, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 10 февраля 2003 г. Принята к печати 17 февраля 2003 г.)

В данной работе сообщаются результаты исследований, направленных на создание высокоэффективных фотодиодов для спектрального диапазона 0.9–2.55 мкм с диаметрами фоточувствительной площадки такими большими, как 1–3 мм. Разработан широкий ряд фотодиодов на основе гетероструктур GaSb / GaInAsSb / GaAlAsSb с длинноволновой границей спектральной чувствительности $\lambda = 2.4$ и 2.55 мкм. Отличительными особенностями фотодиодов являются высокая токовая монохроматическая чувствительность в максимуме спектра, высокое быстродействие, а также низкое значение плотности обратных темновых токов. Обнаружительная способность фотодиодов, оцененная по измеренной величине уровня шумов и токовой монохроматической чувствительности, в максимуме спектра достигает величины $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1) = (0.8 - 1.0) \cdot 10^{11} \text{ Гц}^{1/2} \text{ см}^2/\text{Вт}$.

1. Введение

Спектральный диапазон 0.9–3.0 мкм представляет значительный интерес для разработчиков аппаратуры, применяемой в лазерной диодной спектроскопии газов и молекул, системах лазерной дальнометрии и локации, в медицине, а также для экологического мониторинга [1–4]. Во всех перечисленных областях основной задачей является обнаружение минимально возможного оптического сигнала. В связи с этим для фотоприемника основную роль играют пороговые характеристики, определяющие значения малых оптических сигналов, которые могут быть зарегистрированы на уровне шумов. Для обеспечения минимального уровня шума необходимо, чтобы фотодиод имел низкий темновой ток и соответственно высокое темновое сопротивление при работе в фотовольтаическом режиме. При использовании фотодиода с предусилителем для получения низкого уровня шума и большой полосы пропускания устройства требуется как можно более низкое значение емкости фотодиода. Кроме того, удельная обнаружительная способность возрастает с увеличением диаметра чувствительной площадки фотодиода. Большие размеры чувствительных площадок накладывают особые требования к однородности поверхности и к качеству гетерограниц полупроводниковых эпитаксиальных структур, на основе которых изготавливаются фотодиоды.

В Лаборатории инфракрасной оптоэлектроники ФТИ им. А.Ф. Иоффе на основе многокомпонентных узкозонных твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) были созданы эффективные светодиоды [5], лазеры [6] и согласованные с ними по спектральной чувствительности фотодиоды [7], в том числе лавинные фотодиоды [8]. ЖФЭ позволяет получать объемные эпитаксиальные слои высокого качества и относительная простота и дешевизна делают ее до

сих пор привлекательной для создания оптоэлектронных приборов.

В данной работе рассматриваются особенности получения фотодиодных гетероструктур GaInAsSb / GaAlAsSb, изопериодных с GaSb, а также физические процессы, лежащие в основе работы фотодиодов на основе GaInAsSb / GaAlAsSb. Будут представлены основные характеристики фотодиодов с диапазоном спектральной чувствительности 0.9–2.55 мкм и диаметром чувствительной площадки 1–3 мм.

2. Создание изопериодных гетероструктур

$\text{GaSb} / \text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y} / \text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$

Фотодиодные гетероструктуры GaSb / $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y} / \text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ выращивались методом ЖФЭ на подложках *n*-GaSb ориентаций (100), (111)В, легированных теллуром до концентрации $(1-5) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$. В качестве компонентов шихты для эпитаксиальных слоев GaInAsSb использовались бинарные соединения InSb, GaSb, InAs. Для выращивания GaAlAsSb использовались Ga чистотой 99.999 мас%, GaSb, Al чистотой 99.9999 мас%, а также насыщающая подложка GaAs, предназначенная для введения мышьяка в жидкую фазу. Расчет равновесных значений мольных долей компонентов в жидкой и твердой фазах при фиксированном значении температуры и переохлаждения производился по термодинамическому методу, предложенному в работе [9]. С целью получения изопериодных с подложкой твердых растворов проводилось экспериментальное уточнение состава жидкой фазы, определенного с помощью теоретического расчета. Химический состав твердых растворов на поверхности и изменение состава по сколу (перпендикулярно плоскости гетерограницы) определялись методом количественного

Параметры эпитаксиальных слоев $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$,
 $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$

Твердый раствор	Температура выращивания, °C	Толщина, мкм	Ширина запрещенной зоны E_g , эВ, $T = 300$ К
$\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$	600	2.2–2.8	0.53
$\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}_{0.21}\text{Sb}_{0.79}$	600	2.2–2.8	0.51
$\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$	599	1.5–2.0	1.1
$\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.96}$	599	1.5–2.0	1.3

рентгеноспектрального анализа с помощью рентгеновского микроанализатора JXA-5 CAMEBAX.

В результате на подложке GaSb(100) из жидкой фазы молекулярного состава воспроизводимо были получены эпитаксиальные слои твердых растворов $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ на границе области несмешиваемости при $T = 600^\circ\text{C}$ и переохлаждении $\Delta T = 3^\circ\text{C}$. В случае использования подложки GaSb(111)В, при неизменных технологических условиях и составе жидкой фазы, содержание индия в твердой фазе возрастало до $x = 0.24$. При температуре $T = 599^\circ\text{C}$ были выращены слои твердых растворов $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$, $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.96}$, используемые в качестве широкозонного „окна“ создаваемых фотодиодных гетероструктур. Средняя скорость роста составляла 3.0–4.0 мкм/мин для твердых растворов GaInAsSb и 1–1.5 мкм/мин для GaAlAsSb соответственно. Параметры полученных эпитаксиальных слоев представлены в таблице.

Согласно данным рентгеновской дифрактометрии, все образцы имели положительное рассогласование периодов решеток слоя и подложки: $\Delta a/a = (2-8) \cdot 10^{-4}$ при комнатной температуре. При этом значения полуширин кривых дифракционного отражения составляли 15–20'' для слоев и 10–12'' для подложки, что указывает на высокое структурное совершенство эпитаксиальных слоев и планарность границы раздела подложка-слой. Полуширина пиков фотолюминесценции для эпитаксиальных слоев $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ составляла $\Delta h\nu = 16-18$ мэВ при $T = 80$ К (рис. 1), что характерно для однородных по составу твердых растворов. Значения ширин запрещенных зон твердых растворов (см. таблицу), определенные при исследовании спектров фотолюминесценции и пропускания (рис. 1, 2), хорошо согласуются с результатами расчета, проводимого при помощи полуэмпирической формулы, в которой E_g четверного твердого раствора в случае прямых переходов определяется интерполяцией ширин запрещенных зон бинарных соединений с использованием параметров прогиба тройных соединений [10].

3. Фотодиоды с длинноволновой границей спектральной чувствительности 2.40–2.55 мкм

Для создания высокоэффективных длинноволновых фотодиодов на основе твердых растворов $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$ необходимо дополнительно решить ряд технологических проблем, таких как снижение концентрации основных носителей в активной области для приборов с высоким быстродействием; снижение токов утечки; получение омических контактов и достижение высокой линейности выходного сигнала.

Нами были созданы и подробно исследованы фотодиоды на основе гетероструктур $n\text{-GaSb}/n\text{-Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}/p^+\text{-Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}_y\text{Sb}_{1-y}$, выращенных на подложках GaSb с ориентациями (100), (111)В (см. таблицу). Активная область легировалась теллуром в широком диапазоне концентраций $n = (0.2-20) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$, в то время как широкозонное „окно“ — германием до концентрации $p = 8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. На основе выращенных слоев методом стандартной

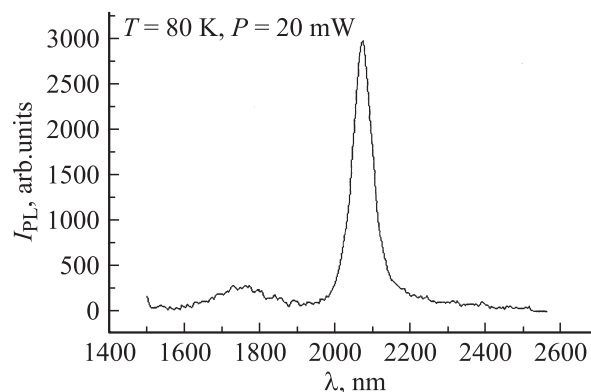


Рис. 1. Спектр фотолюминесценции эпитаксиального слоя $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ при $T = 80$ К. Параметры пика интенсивности I_{PL} : $\lambda_{\max} = 2.075$ мкм, $\Delta h\nu = 17.3$ мэВ.

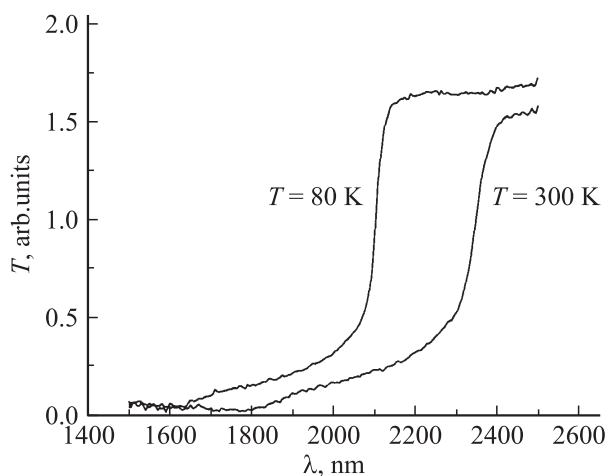


Рис. 2. Спектры пропускания эпитаксиального слоя $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ (толщина ~ 2 мкм.)

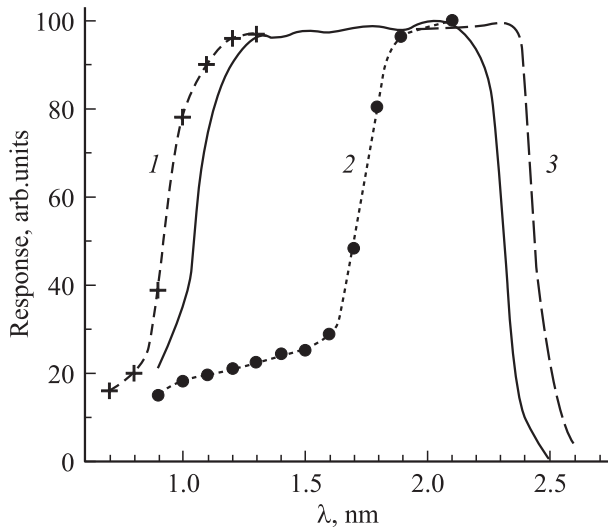


Рис. 3. Спектральное распределение фоточувствительности фотодиодов на основе GaInAsSb при $T = 300$ К: сплошная линия — активная область $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$ и широкозонное „окно“ $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$; 1 — „окно“ $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.96}$; 2 — „окно“ GaSb; 3 — активная область $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}_{0.21}\text{Sb}_{0.79}$.

фотолитографии создавались образцы меза-фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 1–3 мм. Омические контакты AuGe/Ni/Au и Cr/Au/Ni/Au формировались к слою p -GaAlAsSb и подложке n -GaSb соответственно.

Спектральное распределение чувствительности типичного фотодиода на основе $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82} / \text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$ при комнатной температуре представлено на рис. 3 (сплошная линия). Как видно из рисунка, длинноволновая граница составляет 2.4 мкм при $T = 300$ К. Ширина запрещенной зоны узкозонного твердого раствора $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$, определенная по длине волны, где чувствительность фотодиода уменьшается в 2 раза от максимальной, составила величину 0.53 эВ при $T = 300$ К, что согласуется с данными, полученными при исследовании фотолюминесценции и спектров пропускания (см. таблицу). В случае использования в активной области твердого раствора $\text{Ga}_{0.76}\text{In}_{0.24}\text{As}_{0.21}\text{Sb}_{0.79}$ длинноволновая граница спектральной чувствительности фотодиода смещается в сторону больших длин волн до $\lambda = 2.55$ мкм (рис. 3, линия 3). Спад чувствительности в коротковолновой области спектра происходит по причине сильного поглощения коротковолнового излучения в широкозонном „окне“. Наличие „окна“ существенно снижает потери созданных светом носителей из-за поверхностной рекомбинации. Выбор материала этого слоя дает дополнительные возможности с точки зрения управления положением коротковолновой границы спектральной чувствительности и влияния на величину обратных темновых токов в структуре. Таким образом, коротковолновая граница спектральной чувствительности фотодиода определяется

шириной запрещенной зоны материала „окна“ и составляет 0.9 мкм для $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$ (рис. 3, сплошная линия), 0.8 мкм для $\text{Ga}_{0.50}\text{Al}_{0.50}\text{As}_{0.04}\text{Sb}_{0.96}$ (рис. 3, кривая 1) и 1.6 мкм для GaSb (рис. 3, кривая 2).

Температурные зависимости длинноволновой границы спектральной чувствительности фотодиода на основе $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82} / \text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$ представлены на рис. 4. Температурный коэффициент изменения ширины запрещенной зоны узкозонного твердого раствора $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82}$, определенный в диапазоне температур $T = -40$ – 60 °С, составил величину $\alpha = -3.8 \cdot 10^{-4}$ эВ/К. Оцененный нами температурный коэффициент сдвига длинноволнового края спектральной чувствительности на длине волны $\lambda_{(1/2)\text{max}}$ имеет значение 1.6 нм/К. Токовая монохроматическая чувствительность в максимуме спектра ($\lambda_{\text{max}} = 2.0$ – 2.2 мкм) $S_{\lambda} = 1.0$ – 1.1 А/Вт, что соответствует квантовой эффективности 0.6–0.7 без специального антиотражающего покрытия. Нанесение пленок SiO_2 и Si_3N_4 в качестве антиотражающих покрытий позволило нам достигнуть увеличения чувствительности почти на 30% на длине волны, близкой к $\lambda = 2$ мкм. Однако при этом также существенно возросла величина обратных темновых токов фотодиода и, следовательно, ухудшалось соотношение сигнал/шум.

Исследование вольт-фарадных характеристик показало, что распределение примеси в гетероструктуре резкое, концентрация основных носителей в активной области в зависимости от уровня легирования может варьироваться в широком диапазоне $n = (2$ – $200) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ в соответствии с конкретной задачей (рис. 5). Для высокого быстродействия необходимо, чтобы собственная емкость фотодиода была минимальной и, следовательно, концентрация основных носителей должна быть низкой. При этом следует учитывать тот факт, что значение

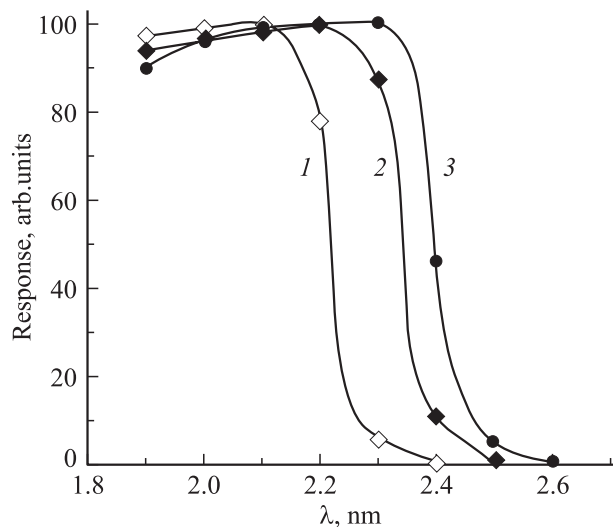


Рис. 4. Длинноволновая граница спектральной чувствительности фотодиода $\text{Ga}_{0.78}\text{In}_{0.22}\text{As}_{0.18}\text{Sb}_{0.82} / \text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.975}$ при температурах T , °С: 1 — (–40), 2 — 20, 3 — 60.

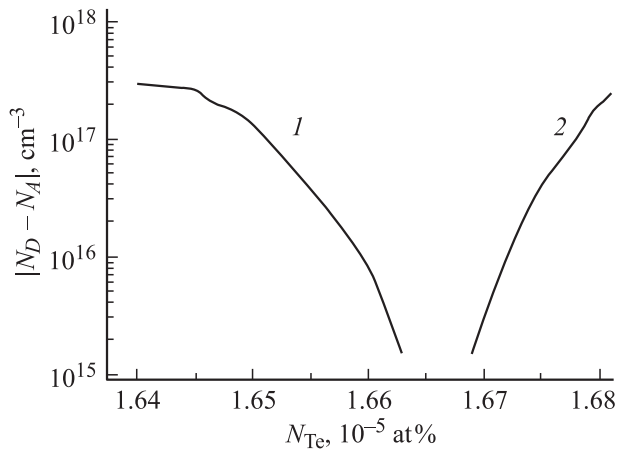


Рис. 5. Концентрация $|N_D - N_A|$ в эпитаксиальном слое GaInAsSb в зависимости от концентрации теллура N_{Te} (ат%) в жидкой фазе: 1 — p -тип проводимости, 2 — n -тип.

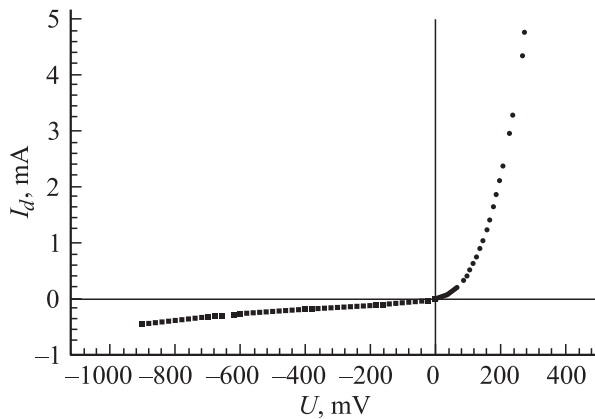


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика фотодиода на основе GaInAsSb/GaAlAsSb с диаметром чувствительной площадки 2 мм при $T = 300$ К.

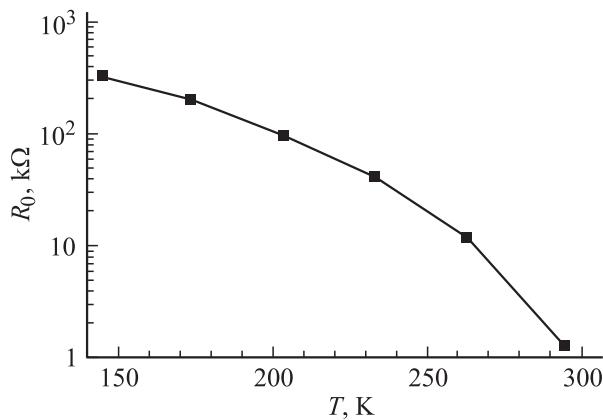


Рис. 7. Температурная зависимость шунтирующего сопротивления R_0 фотодиода на основе GaInAsSb/GaAlAsSb с диаметром 2 мм.

темнового тока имеет локальный минимум при концентрации $n = (8-20) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, которую в данном случае можно считать оптимальной. При этом необходимое количество теллура, вводимого в расплав, составляет $N_{Te} = 1.67 \cdot 10^{-5} \text{ ат\%}$ (рис. 5).

Быстродействие фотодиода определяется тремя процессами: временем пролета носителями активной области ($t_{tr} = 10^{-11} - 10^{-12} \text{ с}$); временем диффузии созданных носителей до области пространственного заряда (в нашем случае носители рождаются непосредственно в области пространственного заряда); и наконец, RC -компонентой. Быстродействие рассматриваемых фотодиодов определяется RC -компонентой и при работе на нагрузку $R_l = 50 \text{ Ом}$, при собственной емкости фотодиода $C = 1000 - 2000 \text{ пФ}$ (диаметр 2.0 мм), не превышает величины $t_{0.1-0.9} = 120 - 250 \text{ нс}$, что является хорошим результатом для фотодиодов с таким большим диаметром рабочей площадки.

Как было упомянуто выше, существуют требования к величине обратного темнового тока фотодиода, поскольку обнаружительная способность определяется величиной темнового тока I_d (фотодиодный режим) или шунтирующим сопротивлением $R_0 = (dU/dI)_{U=0}$ (фотovoltaический режим). Пример вольт-амперной характеристики (ВАХ) типичного фотодиода с диаметром чувствительной площадки 2 мм представлен на рис. 6, а на рис. 7 показана температурная зависимость шунтирующего сопротивления R_0 от температуры. И темновой ток и шунтирующее сопротивление сильно зависят от значения ширины запрещенной зоны твердого раствора и механизма протекания темнового тока:

$$I_d \propto \exp(-E_g/nkT), \quad (1)$$

где n — параметр, который определяется природой темнового тока и изменяется от $n = 1$ (механизм межзонной рекомбинации) до $n = 2$ (механизм генерации-рекомбинации). В связи с этим представлялось необходимым изучить природу темнового тока в структуре $n\text{-GaSb}/n\text{-GaInAsSb}/p^+\text{-GaAlAsSb}$. Нами исследовались прямые и обратные вольт-амперные характеристики при различных температурах. Типичные зависимости темнового тока от обратного смещения при различных температурах для фотодиода с активным диаметром 2 мм представлены на рис. 8, а. На рис. 8, б показана температурная зависимость обратного тока при смещении $U = -0.2 \text{ В}$. Там же показан расчетный ход температурных зависимостей для генерационно-рекомбинационного (Г-Р) и диффузионного механизмов прохождения тока. Очевидно, что экспериментальные данные наилучшим образом согласуются с зависимостью для Г-Р тока. Ток такой природы имеет температурную зависимость вида $I \propto T^{3/2} \exp(-E_g/2kT)$. Энергия активации для этой зависимости составила величину $E_A^* = 0.3 \text{ эВ}$, что близко к половине значения ширины запрещенной зоны материала активной области фотодиода (GaInAsSb, $E_g(0) \approx 0.6 \text{ эВ}$). Отклонение экспериментальной зависи-

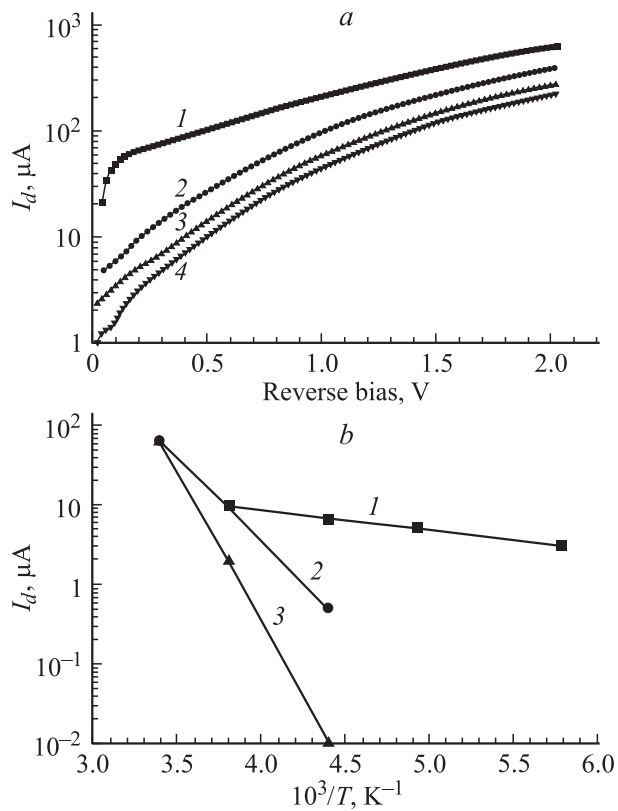


Рис. 8. Обратный темновой ток I_d фотодиода на основе GaInAsSb/GaAlAsSb с длинноволновой границей спектральной чувствительности $\lambda = 2.4$ мкм и с диаметром 2 мм: *a* — вольт-амперные характеристики при температурах T , °C: 1 — 22, 2 — (–10), 3 — (–70), 4 — (–100). *b* — температурные зависимости при напряжении обратного смещения $U = -0.2$ В (1); 2, 3 — расчетные зависимости тока генерации-рекомбинации (2) и диффузионного (3).

мости от расчетной для Г-Р тока при низких температурах связано с возрастанием влияния туннельной компоненты темнового тока [11], температурная зависимость которой более слабая и которая становится определяющей в узкозонных материалах при высоких напряжениях и низких температурах.

При комнатной температуре для обратных напряжений свыше 0.2–0.5 В зависимость $I(U)$ слабая ($I \propto W \propto U^{1/2}$) и описывается соотношением

$$I_{G-R} = qn_iWA/\tau_{\text{eff}}, \quad (2)$$

где q — заряд электрона, A — площадь p – n -перехода, W — ширина слоя объемного заряда, n_i — собственная концентрация носителей заряда, τ_{eff} — эффективное время жизни неосновных носителей заряда. При значениях $n_i = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $W \approx 1$ мкм из экспериментальной величины тока получим $\tau_{\text{eff}} = (1.8-9) \cdot 10^{-7} \text{ с}$, что значительно выше приводимых в литературе значений и близко к излучательному времени жизни для твердых растворов GaInAsSb. Плотность обратного темнового тока для лучших диодов составила $j = 3 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}^2$ при

обратном напряжении $U = -(0.2-1.0)$ В. Анализ прямых ветвей ВАХ показал, что ток аналитически может быть представлен зависимостью $I \propto \exp(qU/nkT)$, где n увеличивается с понижением температуры от $n = 1.9$ до значения $n = 2.8$. Это свидетельствует о смене механизма прохождения темнового тока от генерационно-рекомбинационного к туннельному.

Таким образом, согласно нашим исследованиям, объемная составляющая обратного темнового тока фотодиодов на основе Ga_{0.78}In_{0.22}As_{0.18}Sb_{0.82}/Ga_{0.66}Al_{0.34}As_{0.025}Sb_{0.795} состояла из двух компонент: генерационно-рекомбинационной и туннельной. Дальнейшее уменьшение темнового тока может быть достигнуто при усовершенствовании технологии создания фотодиодных структур, например, при выращивании активной области с использованием редкоземельных элементов для снижения фоновых концентраций примесей [12], или при использовании свинца в качестве растворителя при выращивании GaInAsSb [13]. Данные методы приводят к существенному повышению качества эпитаксиальных слоев — снижению концентрации дефектов и фоновых примесей, что в итоге приводит к повышению эффективного времени жизни носителей в активной области структуры и, как следствие (см. (2)), к снижению плотности обратных темновых токов. Кроме того, уменьшения поверхностной составляющей обратного темнового тока, обусловленной наличием поверхностных утечек, можно добиться при помощи выбора оптимального способа формирования поверхностной меза-геометрии [14] либо путем сульфидной пассивации боковой поверхности мезы фотодиодных структур на основе GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb [15].

Обнаружительная способность фотодиодов, оцененная по измеренной величине уровня шумов и ампер-ваттной чувствительности, в максимуме спектра достигает величины $D^*(\lambda_{\text{max}}, 1000, 1) = (0.8-1.0) \cdot 10^{11} \text{ Гц}^{1/2} \text{ см/Вт}$. Нелинейность выходного сигнала не превышает 0.1%.

4. Заключение

Созданы и исследованы высокоэффективные быстродействующие фотодиоды на основе GaInAsSb/GaAlAsSb с длинноволновой границей спектральной чувствительности $\lambda = 2.4$ и 2.55 мкм с большим диаметром чувствительной площадки. Плотность обратного темнового тока при обратном смещении $U = -(0.2-1.0)$ В для лучших диодов достигает $j = 3 \cdot 10^{-3} \text{ А/см}^2$. Изучение природы темнового тока показало, что объемная составляющая обратного темнового тока исследуемых фотодиодов состоит из двух компонент: генерационно-рекомбинационной и туннельной.

Авторы благодарят Я.В. Терентьева и Т.Б. Попову за помощь в проведении измерений, интерес к работе и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] A.I. Nadezhdinski, A.M. Prokhorov. *Proc. Conf. Applications Tunable Diode Lasers*. Proc. SPIE, **1724**, 2 (1992).
- [2] R.J. Becherer. *Proc. Conf. Laser Focus World*, May 1993, p. 71.
- [3] R. Martini, C. Bethear, F. Capasso, C. Gmachl, R. Paiella, E.A. Whittaker, H.Y. Hwang, D.L. Sivco, J.N. Baillargeon, A.Y. Cho, H.C. Liu. *Abstracts Book 5th Int. Conf. MID-IR Optoelectronic Materials and Devices (MIOMD-V)*, Sept. 8–11, 2002 (Annapolis, Maryland, USA) p. 04–05.
- [4] T.L. Troy, S.N. Thennadil. *J. Biomedical Optics*, **6** (2), 167 (2001).
- [5] K.D. Moiseev, M.P. Mikhailova, B.I. Zhurtanov, T.I. Voronina, O.V. Andreychuk, N.D. Stoyanov, Yu.P. Yakovlev. *Appl. Surf. Sci.*, **142**, 257 (1999).
- [6] А.Н. Баранов, Е.А. Гребенщикова, Б.Е. Джуртанов, Т.Н. Данилова, А.Н. Именков, Ю.П. Яковлев. *Письма ЖТФ*, **14** (20), 1839 (1988).
- [7] И.А. Андреев, М.А. Афраилов, А.Н. Баранов и др. *Письма ЖТФ*, **15** (7), 20 (1989). [*Sov. Techn. Phys. Lett.*, **15** (7), 15 (1989)].
- [8] И.А. Андреев, А.Н. Баранов, М.В. Возницкий, Б.А. Ермаков, М.П. Михайлова, Т.Н. Сиренко, Ю.П. Яковлев. *Опт.-мех. пром-сть*, № 7, 19 (1991).
- [9] А.М. Лигвак, Н.А. Чарыков. *ЖФХ*, **64**, 2331 (1990).
- [10] F. Karota, H. Mani, J. Bhan, Fen Jia Hua, A. Joullie. *Rev. Phys. Appl.*, **22** (11), 1459 (1987).
- [11] J.L. Moll. In: *Physics of Semiconductors* (N. Y., McGraw Hill, 1964).
- [12] A.T. Gorelenok, A.V. Kamanin, N.M. Shmidt. *Microelectronics J.*, **26**, 705 (1995).
- [13] E.V. Kunitsyna, I.A. Andreev, N.A. Charykov, Yu.V. Solov'ev, Yu.P. Yakovlev. *Appl. Surf. Sci.*, **1–4**, 371 (1999).
- [14] E.V. Kunitsyna, I.A. Andreev, M.P. Mikhailova, Ya.A. Parkhomenko, Yu.P. Yakovlev. *Proc. Int. Conf. Photoelectronics and Night Vision Devices*. Proc. SPIE, **4340**, 244 (2000).
- [15] И.А. Андреев, Е.В. Куницына, В.М. Лантратов, Т.В. Львова, М.П. Михайлова, Ю.П. Яковлев. *ФТП*, **31** (6), 653 (1997).

Редактор Т.А. Полянская

Large area GaInAsSb/GaAlAsSb photodiodes for the 0.9–2.4 μm spectral range

I.A. Andreev, N.D. Il'inskaya, E.V. Kunitsyna,
M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev

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

Abstract In this paper, we report the results of our investigation, which aims to create the high-performance photodiodes for the 0.9–2.55 μm spectral range with the active diameter as large as 1.0–3.0 mm. The photodiodes based on GaSb/GaInAsSb/GaAlAsSb heterostructures with the long-wavelength photosensitivity threshold $\lambda = 2.4 \mu\text{m}$ and $\lambda = 2.55 \mu\text{m}$ were developed. The main advantages are a high monochromatic current sensitivity at the λ_{max} , a high speed response as well as a low reverse dark current density. Measurements of the noise currents and the monochromatic current sensitivity for these photodiodes yield the peak detectivity of $D^*(\lambda_{\text{max}}, 1000, 1) = (0.8–1.0) \cdot 10^{11} \text{ Hz}^{1/2} \text{ cm}^2/\text{W}$ at room temperature.