

Фотоэлектрические свойства фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP с диаметрами фоточувствительной площадки 0.1–2.0 мм

© И.А. Андреев[†], О.Ю. Серебренникова, Н.Д. Ильинская, А.А. Пивоварова, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, В.В. Шерстнев, Ю.П. Яковлев

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

(Получена 12 мая 2015 г. Принята к печати 18 мая 2015 г.)

Сообщаются результаты исследований, направленных на создание высокоэффективных фотодиодов для спектрального диапазона 1.5–3.8 мкм с различными диаметрами фоточувствительных площадок в интервале 0.1–2.0 мм. Разработаны эпитаксиальные технологии выращивания фотодиодных InAs/InAsSbP гетероструктур. Отличительными особенностями фотодиодов являются высокая токовая монохроматическая чувствительность до $S_\lambda = 1.6$ А/Вт в максимуме спектра $\lambda = 3.0$ – 3.4 мкм, обнаружительная способность фотодиодов, оцененная по измеренной величине уровня шумов и токовой монохроматической чувствительности, в максимуме спектра достигает величины $D^*(\lambda_{\max}, 1000, 1) = (0.6$ – $1.2) \cdot 10^{10}$ см \cdot Гц $^{1/2} \cdot$ Вт $^{-1}$ при $T = 300$ К. Объемная составляющая обратного темнового тока исследуемых фотодиодов состоит из двух компонент: диффузионной и туннельной, при этом достигнуто низкое значение плотности обратных темновых токов $j = (0.3$ – $6) \cdot 10^{-1}$ А/см 2 при смещении $U = -(0.2$ – $0.4)$ В. Фотодиоды характеризуются произведением $R_0A = 0.4$ – 3.2 Ом \cdot см 2 . С увеличением диаметра фоточувствительной площадки в интервале 0.1–2.0 мм наблюдается возрастание удельной обнаружительной способности фотодиодов почти в 2 раза, что обусловлено уменьшением влияния поверхностных токов утечки с увеличением его диаметра. Быстродействие таких фотодиодов варьируется в диапазоне 1–300 нс и дает возможность при низком значении емкости применять их в системах оптической связи в открытом пространстве в окне прозрачности атмосферы. Фотодиоды с большой чувствительной площадкой (до 2.0 мм), с высокой удельной обнаружительной способностью и высокой фоточувствительностью могут использоваться для обнаружения полос поглощения и регистрации концентрации таких веществ, как метан, эфир, N $_2$ O и phthorothanium.

1. Введение

Спектральный диапазон 1.5–4.0 мкм представляет значительный интерес для разработчиков аппаратуры, применяемой в диодно-лазерной 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 фотovoltaическом 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 InAs/InAsSbP как методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), так и методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОГФЭ) были созданы эффективные светодиоды, лазеры и согласованные с ними по спектральной чувствительности фотодиоды [5–7]. Фотодиоды на основе InAs/InAsSbP гетероструктур в вышеупомянутых работах обладают достаточно хорошими фотоэлектрическими характеристиками, но при этом фоточувствительные площадки составляют всего 0.2–0.3 мм. Фотодиоды продемонстрировали следующие характеристики при комнатной температуре: обратные темновые токи 200–300 мкА ($U = -0.2$ В) и обнаружительная способность $(4$ – $7) \cdot 10^9$ см \cdot Гц $^{1/2}$ Вт $^{-1}$ [5,6]. Быстродействие фотодиодов при диаметре чувствительной площадки 300 мкм составило 10–20 нс. В работе [7] обнаружительная способность фотодиодов на основе двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs/InAsSbP достигает величины $(1$ – $2) \cdot 10^{11}$ см \cdot Гц $^{1/2}$ Вт $^{-1}$, но это обусловлено использованием иммерсионных линз с диаметром до 3.3 мм. Темновые токи таких фотодиодов с габаритными размерами 150 \times 150 мкм составили 20–50 мкА ($U = -0.2$ В).

Цель данной работы заключается в создании и исследовании фотоэлектрических характеристик гетерофотодиодов на основе InAs/InAsSbP с диапазоном спектральной чувствительности 2.0–3.8 мкм, полученных как

[†] E-mail: igor@iropt9.ioffe.ru

методом ЖФЭ, так и методом МОГФЭ, с различными диаметрами фоточувствительной площадки 0.1–2.0 мм.

2. Создание изопериодных гетероструктур InAs/InAsSbP

При выращивании изопериодных фотодиодных гетероструктур InAs/InAsSbP использовались два технологических процесса: метод газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) и метод жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ). Вначале рассмотрим метод газовой эпитаксии для выращивания InAs/InAsSbP гетерофотодиодов с широкозонным „окном“ слоем InAsSbP с высоким содержанием фосфора $P = 0.50$.

2.1. Выращивание InAs/InAsSbP фотодиодных структур методом газовой эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ)

Рост InAs/InAsSbP гетероструктур осуществлялся в стандартном типе МОГФЭ (MOVPE) реактора с горизонтальным газовым потоком, работающего при атмосферном давлении. Эпитаксиальные слои выращивали на подложках InAs, размещенных на молибденовых держателях (susceptor). Использовались подложки n -InAs (111), легированные серой (S), с концентрацией носителей $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, поверхность подложки находилась автоэпитаксиальный нелегированный слой InAs n -типа толщиной 7–8 мкм с концентрацией $1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Для выращивания $\text{InAs}_{0.27}\text{Sb}_{0.23}\text{P}_{0.50}$ использовались следующие прекурсоры: триметил индия (TMIn), триметил сурьмы (TMSb), диэтил цинка (DeZn) и гидрид фосфина (PH_3), гидрид арсина (AsH_3), которые были разбавлены водородом H_2 до 20%. Водород используется в качестве газа-носителя при скорости потока 18 л/мин. $\text{InAs}_{0.27}\text{Sb}_{0.23}\text{P}_{0.50}$: температура роста составила 520°C , скорость роста слоя InAsSbP — 2 мкм/ч. Были получены слои p -типа проводимости порядка $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ при легировании Zn, которое осуществлялось с помощью потока водорода H_2 через DeZn барботер со скоростью 25 мл/мин. Широкозонный слой выращивался толщиной порядка 1 мкм. Методика измерения тока, наведенного электронным зондом (EBIC), показала, что цинк диффундирует из верхнего широкозонного слоя $\text{InAs}_{0.27}\text{Sb}_{0.23}\text{P}_{0.50}$ в нелегированный слой n -InAs, делая проводимость части слоя InAs p -типа. Таким образом, p - n -переход образован в „буферном“ слое на расстоянии 1.5–2.0 мкм от гетерограницы $\text{InAs}_{0.27}\text{Sb}_{0.23}\text{P}_{0.50}/\text{InAs}$. Достоинством такой структуры было выращивание широкозонного $\text{InAs}_{0.27}\text{Sb}_{0.23}\text{P}_{0.50}$ слоя с шириной запрещенной зоны порядка 0.6 эВ, что существенно расширило до 2.0 мкм диапазон спектральной чувствительности в коротковолновой области. Схематически вид структуры представлен на рис. 1.

Расогласование постоянных решеток между слоями $\text{InAs}_{0.27}\text{Sb}_{0.23}\text{P}_{0.50}$ и InAs было определено с помощью метода рентгеноструктурного анализа и составляло величину $\Delta a/a < 6 \cdot 10^{-4}$.

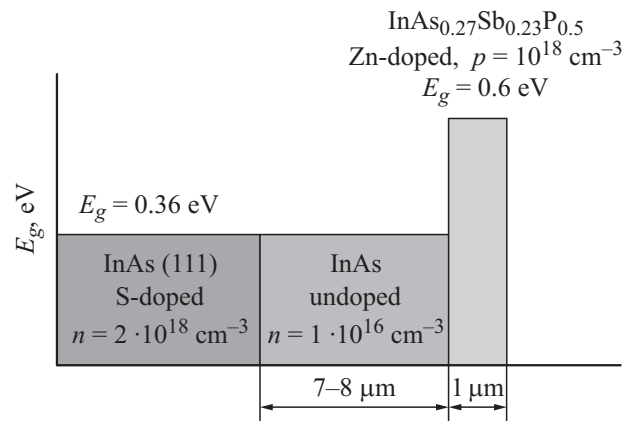


Рис. 1. Схематическая энергетическая диаграмма гетерофотодиода $n^+ \text{InAs} - n^0 \text{-AnAs} - P^+ \text{-InAs}_{0.27}\text{Sb}_{0.23}\text{P}_{0.5}$, выращенного методом МОГФЭ.

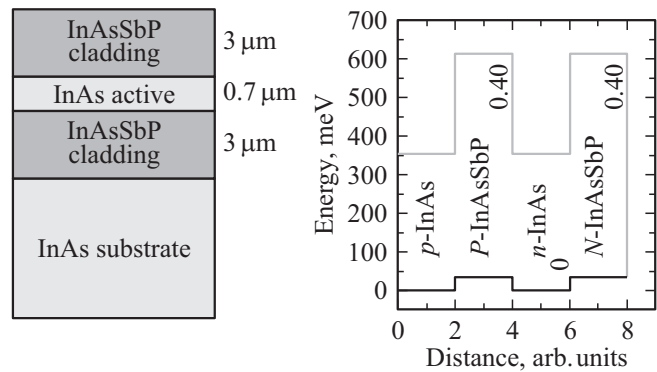


Рис. 2. Структура и энергетическая диаграмма двойной гетероструктуры InAsSbP/InAs/InAsSbP, выращенной методом ЖФЭ.

2.2. Фотодиодные структуры InAs/InAsSbP, выращенные методом ЖФЭ

Гетерофотодиодные структуры были выращены на подложках p -типа InAs(100) методом жидкофазной эпитаксии и имели двойную гетероструктуру (см. рис. 2). Для проведения ЖФЭ структур использовались обычные горизонтальные, многоруночные графитовые кассеты слайдерного типа. Эпитаксии проводились в реакторе с кварцевой трубой в потоке водорода, очищенного палладиевым фильтром. В результате выращены двойные гетероструктуры, содержащие нелегированный n -InAs активный слой, заключенный между широкозонными слоями InAsSbP P - и N -типа с содержанием фосфора на уровне 0.40 и шириной запрещенной зоны $E_g = 570 \text{ мэВ}$, $T = 300 \text{ К}$. Ширина активной области InAs составила величину до 0.7–1.0 мкм. Слои AsSbP имели толщину 3.0 мкм и были изопериодны как с подложкой, так и активным слоем InAs. С помощью геттерирования раствора-расплава редкоземельным элементом иттербий Yb остаточная концентрация носителей тока в активном слое была уменьшена до величины

$5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ($T = 300 \text{ К}$). Широкозонные InAsSbP слои *N*- и *P*-типа были легированы оловом (Sn) до концентрации $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и цинком (Zn) до $1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ соответственно.

Из полученных гетероструктур были изготовлены методом стандартной фотолитографии мезафотодиоды с диаметром чувствительной площадки в диапазоне 0.1–2.0 мм. Затем подробно исследованы основные фотоэлектрические характеристики гетерофотодиодов InAs/InAsSbP, выращенных методами ЖФЭ и МОГФЭ. Полученные результаты представлены в последующих разделах статьи. Наиболее подробно будут представлены результаты, полученные на фотодиодах с диаметрами чувствительных площадок 0.2 и 0.5 мм, а в конце будут приведены данные для фотодиодов с другими диаметрами чувствительных площадок 0.1, 0.3, 1.0, 2.0 мм.

3. Спектральные характеристики гетерофотодиодов на основе InAs/InAsSbP

Как видно из распределения спектральной чувствительности типичного фотодиода (см. рис. 3), длина волны отсечки (на уровне 10% от максимума) равна 3.8 мкм при комнатной температуре. Токовая монохроматическая чувствительность в максимуме чувствительности ($\lambda = 3.1\text{--}3.4 \text{ мкм}$) составила величину 1.4–1.6 А/Вт, что соответствует квантовой эффективности 0.5–0.6 без какого-либо антиотражающего покрытия. Для фотодиодов с двойной гетероструктурой, выращенных методом ЖФЭ, токовая монохроматическая чувствительность в максимуме чувствительности составила величину 1.0–1.2 А/Вт, что соответствует квантовой эффективности 0.35–0.45. Одной из причин возможного снижения чувствительности является то обстоятельство, что активная область имеет ширину всего 0.7–1.0 мкм, а расчет говорит о том, что область поглощения при

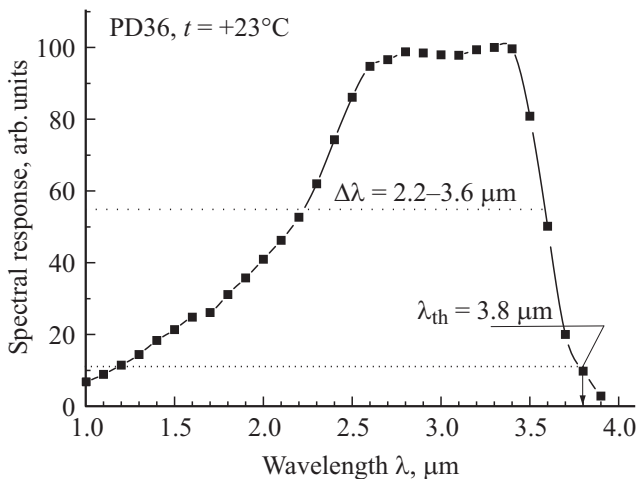


Рис. 3. Спектральное распределение fotocувствительности гетерофотодиода на основе InAs/InAsSbP.

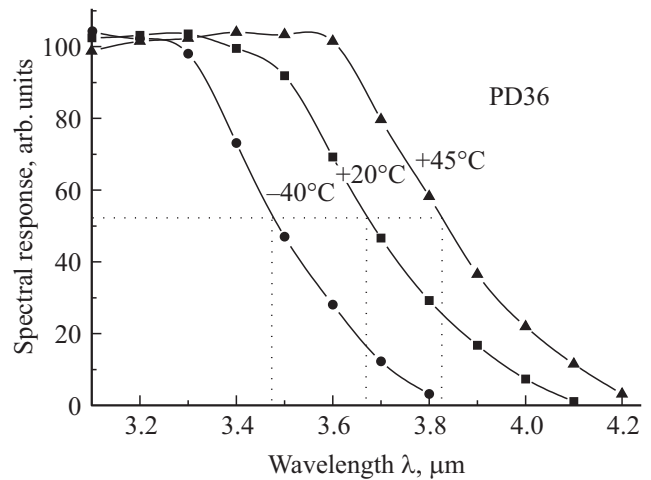


Рис. 4. Температурные изменения длинноволновой границы спектральной чувствительности фотодиодов на основе InAs/InAsSbP гетероструктуры.

коэффициенте поглощения в $3 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$ на длине волны порядка 3 мкм должна быть не менее 2.5–3.0 мкм.

Были исследованы также изменения длинноволновой области спектра распределения fotocувствительности от температуры (см. рис. 4). Сдвиг длины волны края поглощения от температуры в длинноволновой области на половине от максимальной чувствительности имеет линейную зависимость с коэффициентом 3 нм/К, которая указывает на то, что изменение ширины запрещенной зоны с температурой составляет $\Delta E_g / \Delta T = 2.85 \cdot 10^{-4} \text{ эВ/К}$ ($E_g = 0.44 - 2.85 \cdot 10^{-4} \Delta T$).

4. Вольт-амперные и вольт-фарадные характеристики гетерофотодиодов на основе InAs/InAsSbP

Существуют требования к величине обратного темнового тока фотодиода, поскольку обнаружительная способность определяется величиной темнового тока I_d (фотодиодный режим) или шунтирующим сопротивлением $R_0 = (dU/dI)_{U=0\text{В}}$ (фотовольтаический режим). И темновой ток, и шунтирующее сопротивление сильно зависят от значения ширины запрещенной зоны твердого раствора и механизма протекания темнового тока:

$$I_d \propto \exp(-E_g/nkT), \tag{1}$$

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 фотодиодных гетероструктурах на основе InAs/InAsSbP. Мы исследовали вольт-амперные характеристики гетерофотодиодов в широком интервале температур от 77 до 330 К (–196°C... +60°C). Зависимости обратного темнового

тока от обратного смещения и температуры для ФД с диаметрами чувствительной площадки 0.2 и 0.5 мм представлены на рис. 5, а и 6. На рис. 5, I показана температурная зависимость обратного тока фотодиодов с диаметром чувствительной площадки 0.2 мм при смещении $U = -0.1$ В. Там же показан расчетный ход температурных зависимостей для генерационно-рекомбинационного (Г-Р) и диффузионного механизмов прохождения тока:

$$I_{G-R} \propto T^{3/2} \exp(-E_g/2kT), \quad (2)$$

$$I_{diff} \propto \exp(-E_g/kT). \quad (3)$$

Очевидно, что экспериментальные данные наилучшим образом согласуются с диффузионной природой обратного темного тока в диапазоне температур 313–233 К. Дальнейший анализ обратного тока гетерофотодиодов на основе InAs/InAsSbP с диаметром чувствительной площадки 0.2 мм показал, что темновой ток состоит из двух компонент: диффузионной и туннельной составляющих. При температуре ниже 233 К наблюдается отклонение от теоретической зависимости из-за роста туннельной компоненты темного тока, обусловленной тем обстоятельством, что материалы узкозонные и имеют прямозонную структуру, что способствует проявлению туннельной компоненты темного тока. Эта же составляющая также проявляется и при больших обратных смещениях ввиду увеличения напряженности электрического поля в гетероструктуре, что также приводит к увеличению туннельной составляющей обратного темного тока.

При комнатной температуре для обратных напряжений свыше 0.1–0.2 В зависимость $I(U)$ слабая ($I \propto W \propto U^{1/2}$) и описывается соотношением

$$I = qn_iAW/\tau_{eff}, \quad (4)$$

где q — заряд электрона, A — площадь p - n -перехода, W — ширина слоя области пространственного заряда, n_i — собственная концентрация носителей заряда, τ_{eff} — эффективное время жизни неосновных носителей заряда. Используя данное соотношение и значение тока при комнатной температуре, мы вычислили τ_{eff} , которое составило величину $(6-7) \cdot 10^{-6}$ с, что согласуется с постоянной времени излучательной рекомбинации в p -InAs [8]. Для вычислений мы использовали значение ширины запрещенной зоны $E_g = 0.36$ эВ и величину собственной концентрации в InAs $n_i = 2.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Энергия активации для такой температурной зависимости составила 0.2 эВ, что близко к половине значения ширины запрещенной зоны материала InAs. Мы также оценили плотности обратного темного тока, типичные для ФД $j = (0.3-6) \cdot 10^{-1} \text{ А/см}^2$. Анализ прямых ветвей ВАХ показал, что ток представлен зависимостью

$$I = I_0 \exp(qU/\beta kT), \quad (5)$$

где β — коэффициент идеальности, увеличивается с понижением температуры от $\beta = 1.03$ в температурном диапазоне 340–230 К до значения $\beta = 4.2$. Это

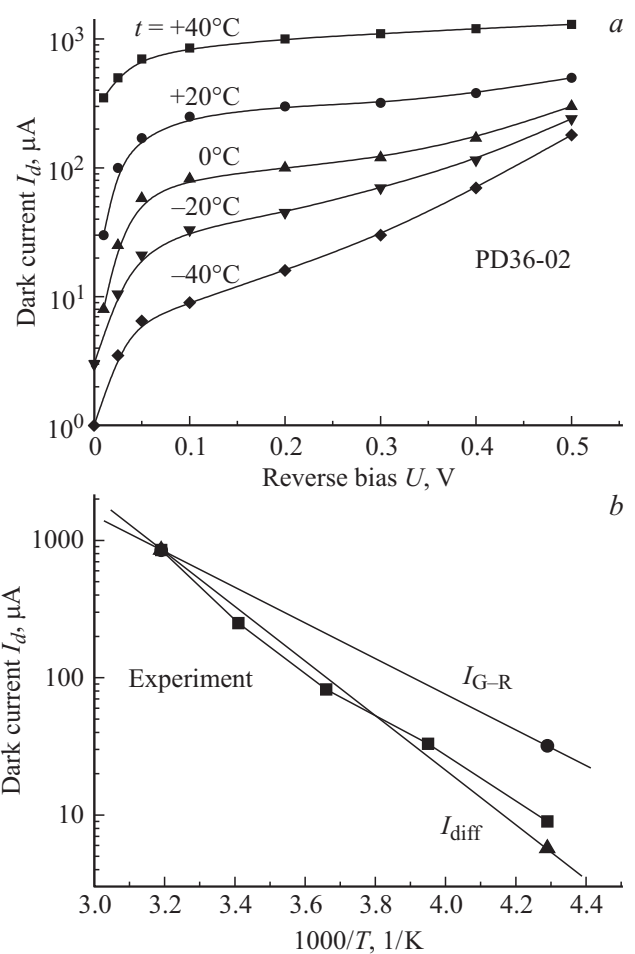


Рис. 5. а — зависимость обратного темного тока фотодиода на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP (диаметр 0.2 мм) от смещения при различных температурах. б — зависимость обратного темного тока фотодиодов от температуры при фиксированном смещении $U = -0.1$ В.

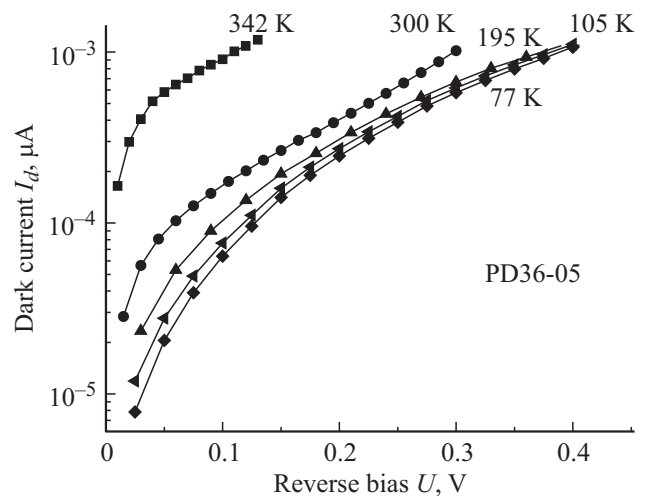


Рис. 6. Зависимость обратного темного тока фотодиода ($D = 0.5$ мм) на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP от смещения при различных температурах.

свидетельствует также о смене механизма прохождения темнового тока от диффузионного к туннельному.

Как нам удалось установить, во всех гетерофотодиодах на основе InAs/InAsSbP и диаметрах от 0.1 до 2.0 мм природа обратного темнового тока схожа — при малых обратных смещениях темновой ток имеет диффузионную природу. При более высоких обратных смещениях обратный темновой ток определяется туннельным механизмом, что демонстрирует сильное увеличение темнового тока и слабую температурную зависимость.

Для обеспечения минимального уровня шума необходимо, чтобы фотодиод имел низкий обратный темновой ток или соответственно высокое темновое сопротивление в нуле смещения при работе в фотовольтаическом режиме. Задача снижения величин

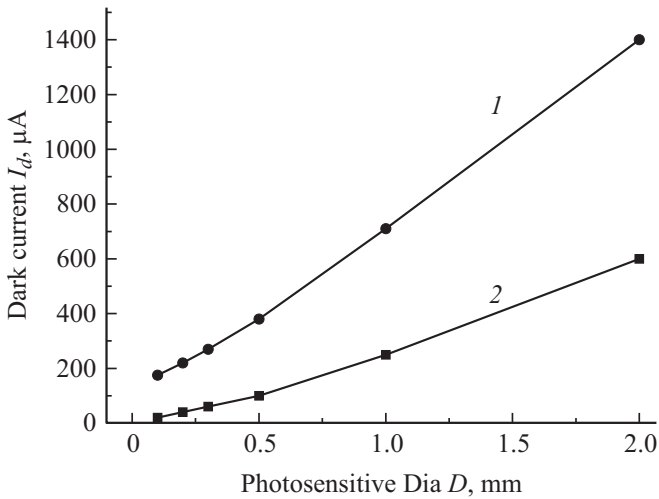


Рис. 7. Зависимость обратного темнового тока фотодиодов от диаметра фоточувствительной площадки при обратном смещении $U = -0.2$ В. 1 — максимальные токи, 2 — минимальные токи для каждого диаметра.

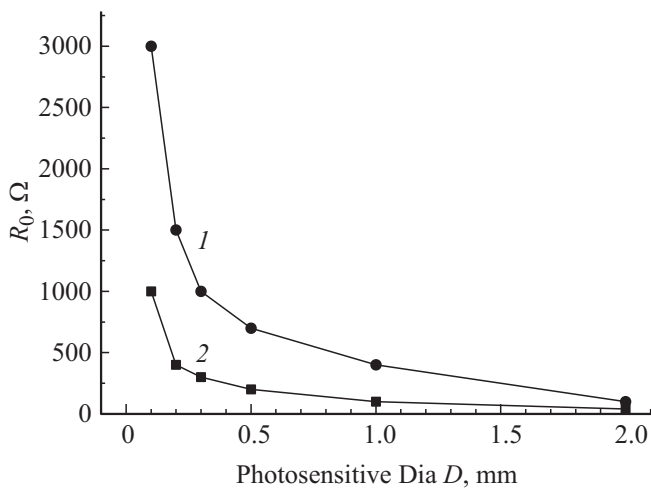


Рис. 8. Зависимость дифференциального сопротивления в нуле смещения R_0 от диаметра фоточувствительной площадки. 1 — максимальные значения сопротивлений, 2 — минимальные значения сопротивлений для каждого диаметра.

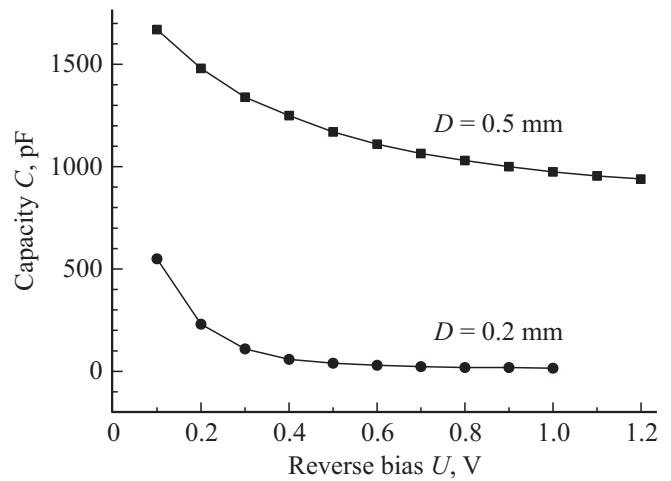


Рис. 9. Зависимость емкости фотодиода на основе гетероструктуры InAs/InAsSbP от обратного смещения при диаметре фоточувствительной площадки 0.2 и 0.5 мм.

ны обратного темнового тока взаимосвязана с повышением величины R_0 . Произведение значения дифференциального сопротивления в нуле смещения R_0 и площади фотодиода A , т.е. R_0A — должна быть максимально высокой, при работе фотоприемника в фотовольтаическом режиме, где $R_0 = (dI/dU)^{-1}$ при $U = +10$ мВ... -10 мВ. Мы определяем для типичных ФД произведение $R_0A = 0.4-3.2$ Ом \cdot см². Величины R_0 и обратного темнового тока для гетерофотодиодов различного диаметра представлены в таблице. На рис. 7 представлена зависимость обратного темнового тока от величины диаметра фоточувствительной площадки гетерофотодиода при заданном обратном смещении $U = -0.2$ В. Зависимость R_0 от диаметра для гетероструктуры InAs/InAsSbP с диаметром 0.1–2.0 мм представлена на рис. 8. Максимальное значение дифференциального сопротивления в нуле смещения R_0 , как и минимальное значение обратного темнового тока, имеют фотодиоды с площадкой 0.1 мм. Такие фотодиоды делаются с малым диаметром с целью понижения емкости, поскольку именно емкость является определяющей величиной в достижении максимального быстродействия или увеличения частотной полосы пропускания фотодиодов.

Измерение вольтёмкостных характеристик показало, что распределение примесей во всех типах ФД было резким и концентрация носителей в активной области была низкой для гетероструктуры InAs/InAsSbP $n = (0.7-1.5) \cdot 10^{16}$ см⁻³. Зависимости емкости от напряжения обратного смещения фотодиодов с диаметрами площадок 0.2 и 0.5 мм представлены на рис. 9. Значения емкости фотодиодов различных диаметров 0.1–2.0 мм представлены в таблице и меняются от 15 до 3000 пФ при нулевом смещении. Емкость фотодиода важная величина, определяющая быстродействие прибора. Для структур, выращенных методом МОГФЭ, как выяснилось, время отклика фотодиода определялось также временем диффузии созданных излучением носителей до

Параметры фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP с диаметрами чувствительной площадки 0.1–2.0 мм

Параметр	PD36-01	PD36-02	PD36-03	PD36-05	PD36-10	PD36-20
Диаметр чувствительной площадки D , мм	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	2.0
Длинноволновая граница спектральной чувствительности λ_c , мкм	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8	3.8
Спектральный диапазон $\Delta\lambda$, мкм, максимальной чувствительности	2.9–3.4	2.9–3.4	2.9–3.4	2.9–3.4	2.9–3.4	2.4–3.4
Токовая монохроматическая чувствительность в максимуме S_λ , А/Вт	1.0–1.2	1.4–1.6	1.4–1.6	1.4–1.6	1.4–1.6	1.0–1.2
Темновой ток, I_D , мкА, $U_R = -0.2$ В	20–175	40–220	60–270	100–380	250–710	600–1400
Импеданс, R_0 , кОм ($U_R = 10$ мВ)	1–3	0.4–1.5	0.3–1.0	0.2–0.7	0.1–0.4	0.04–0.1
Емкость C , пФ ($U_R = 0$ В, $f = 1$ МГц)	10–20	100–200	300–400	500–1100	700–1700	1400–3000
Время нарастания и спада импульса фототока, $t_{0.1-0.9}$, нс ($U_R = 0$ В, $R_L = 50$ Ом)	1–3	10–20	30–40	50–120	70–150	150–300
Обнаружительная способность, D^* ($\lambda_p, 1000, 1$), см · Гц ^{1/2} /Вт	(0.3–0.6) × 10 ¹⁰	(0.6–0.8) × 10 ¹⁰	(0.6–1.0) × 10 ¹⁰	(0.7–1.1) × 10 ¹⁰	(0.6–1.2) × 10 ¹⁰	(0.7–1.0) × 10 ¹⁰

области $p-n$ -перехода. Это время составляет величину порядка 10–15 нс. Для гетерофотодиодов, выращенных методом ЖФЭ, время отклика определяется только RC компонентой, поскольку гетерограница совпадает с положением $p-n$ -перехода и носители сразу разделяются электрическим полем. При нагрузке в 50 Ом диапазон времен срабатывания фотодиодов при импульсном воздействии излучения изменялся в диапазоне 1–300 нс. Эти времена учитывают как емкость фотодиода (чем больше площадь фотодиода, тем выше его емкость), так и внутреннее расположение $p-n$ -перехода относительно гетерограницы.

Задача создания высокоэффективных быстродействующих ИК приемников, работающих при комнатной температуре, заставляет искать новые альтернативные подходы к принципам работы и конструкции приборов. Увеличение эффективности фотодиодов возможно за счет повышения обнаружительной способности и повышения быстродействия. Обнаружительная способность D^* фотодиода определяется по следующей формуле [9]:

$$D^* = S_i A^{1/2} / i_n, \tag{6}$$

где S_i — токовая монохроматическая чувствительность, А/Вт, A — площадь чувствительной площадки, см²; i_n — величина шумового тока, А.

Из формулы (6) следует, что для повышения обнаружительной способности фотодиода необходимо снижать величину шумового тока, который связан следующим образом с величиной обратного темнового тока:

$$i_n = (1qI_d\Delta f)^{1/2}, \tag{7}$$

или снижать величину шумового тока, который связан с повышением значения темнового сопротивления в нуле смещения:

$$i_n = (4kT\Delta f/R_0)^{1/2}, \tag{8}$$

где I_d — величина обратного темнового тока, А; q — заряд электрона, Кл; Δf — полоса пропускания фотоприемника, Гц; k — постоянная Больцмана;

T — температура, К; R_0 — темновое сопротивление в нуле смещения, Ом. С другой стороны, для повышения D^* фотодиода необходимо увеличивать площадь чувствительной площадки. Параметры фотодиодов с различными активными к излучению площадями представлены в таблице. Хотелось отметить наличие широкого диапазона фотодиодов по площадям и соответственно предназначению, а также то, что такие фотодиоды обладают великолепными параметрами по чувствительности, обнаружительной способности и быстродействию.

5. Заключение

1. Методами выращивания жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) и газофазной эпитаксии из металлоорганических соединений (МОГФЭ) созданы эпитаксиальные фотодиодные гетероструктуры InAs/InAsSbP, на основе которых изготовлены фотодиоды с различными диаметрами фоточувствительных площадок в интервале 0.1–2.0 мм.

2. Область спектральной чувствительности гетерофотодиодов InAs/InAsSbP составляет 1.5–3.8 мкм на уровне 10% от максимума при комнатной температуре. Фоточувствительность фотодиодов в максимуме спектра $\lambda = 3.0–3.4$ мкм достигала величины $S_\lambda = 1.6$ А/Вт. Обнаружительная способность фотодиодов достигает в максимуме спектральной чувствительности значения $D^*(\lambda_{max}, 1000, 1) = (0.6–1.2) \cdot 10^{10}$ см · Гц^{1/2}Вт⁻¹ при $T = 300$ К. С увеличением диаметра фоточувствительной площадки в интервале 0.1–2.0 мм наблюдается возрастание удельной обнаружительной способности фотодиодов почти в 2 раза, что обусловлено уменьшением влияния поверхностных токов утечки с увеличением его диаметра.

3. Изучение природы темнового тока от обратного смещения и температуры показало, что объемная составляющая обратного темнового тока исследуемых фотодиодов состоит из двух компонент: диффузионной и туннельной. При температуре ниже 233 К, а также при об-

ратном смещении более 0.4 В наблюдается рост туннельной компоненты темнового тока. Плотность обратного темнового тока при смещении $U = -(0.2-0.4)$ В для лучших фотодиодов достигает $j = (0.3-6) \cdot 10^{-1}$ А/см² и произведение $R_0A = 0.4-3.2$ Ом · см².

4. С увеличением диаметра фоточувствительной площадки в интервале 0.1–2.0 мм также наблюдается возрастание значения обратного темнового тока от 20 до 600 мкА при $U = -(0.2-0.4)$ В. Также возрастает и значение емкости фотодиода от 15 до 3000 пФ, что приводит к резкому снижению (в 30–50 раз) быстродействия фотодиода, которое определяется компонентой RC. Быстродействие таких фотодиодов варьируется в диапазоне 5–300 нс и дает возможность при низком значении емкости применять их в системах оптической связи в открытом пространстве в окне прозрачности атмосферы.

5. Фотодиоды с большой чувствительной площадкой (до 2.0 мм), с высокой удельной обнаружительной способностью могут использоваться для обнаружения полос поглощения и регистрации концентрации таких веществ, как метан (3.25, 3.31, 3.54 мкм) [8], эфир ($\lambda = 1.72, 2.28, 2.9$ мкм), N₂O ($\lambda = 2.85, 2.96$ мкм) и phthorothanium, который используется в медицине для наркоза ($\lambda = 3.32$ мкм).

Список литературы

- [1] Е.В. Степанов. *Диодная лазерная спектроскопия и анализ молекул-биомаркеров* (ISBN: 978-5-9221-1152-2, М., Физматлит, 2009).
- [2] K. Kincade. *Laser Focus World*, **12**, 69 (2003).
- [3] M.P. Mikhailova, N.D. Stoyanov, I.A. Andreev, B. Zhurtanov, S.S. Kizhaev, E.V. Kunitsyna, K. Salikhov, Yu.P. Yakovlev. *Proc. SPIE*, **6585**, 658526-1 (2007).
- [4] T.L. Troy, S.N. Thennadil. *J. Biomedical Optics*, **6** (2), 167 (2001).
- [5] I.A. Andreev, S.S. Kizhaev, S.S. Molchanov, N.D. Stoyanov, Yu.P. Yakovlev. *Book of abstracts 6th Int. Conf. MIOMD*, 70 (2004).
- [6] M. Ahmetoglu (Afrailov), I.A. Andreev, E.V. Kunitsyna, K.D. Moiseev, M.P. Mikhailova, Yu.P. Yakovlev. *Infr. Phys. Technol.*, **55**, 15 (2012).
- [7] P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', A.A. Usikova. *Infr. Phys. Technol.*, **64**, 62 (2014).
- [8] M. Levinshtein, S. Rumyantsev, M. Shur. In: *Handbook Series on Semiconductor Parameters, Ternary and Quaternary A³B⁵ Semiconductors* (World Scientific Publishing, London, 1999) v. 2.
- [9] R.C. Jones. *Advances in Electronics* (N.Y., Academic, 1953) v. 5. p. 1.

Редактор Т.А. Полянская