

Неохлаждаемые фотодиоды для регистрации импульсного инфракрасного излучения в спектральном диапазоне 0.9–1.8 мкм

© Е.В. Куницына, А.А. Пивоварова, И.А. Андреев, Г.Г. Коновалов, Э.В. Иванов,
Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев

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

E-mail: kunits@iropt9.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 24 февраля 2021 г.

В окончательной редакции 15 марта 2021 г.

Принята к публикации 15 марта 2021 г.

Созданы и исследованы неохлаждаемые фотодиоды на основе гетероструктур GaSb/GaAlAsSb для регистрации импульсного инфракрасного излучения в спектральном диапазоне 0.9–1.8 мкм. Активная область GaSb была получена с использованием свинца в качестве нейтрального растворителя с целью снижения концентрации природных акцепторов. Емкость фотодиодов при диаметре чувствительной площадки 300 мкм составляла 115–135 пФ без смещения и 62–70 пФ при обратном смещении 1.5 В. Быстродействие фотодиода, измеренное в фотовольтаическом режиме с помощью InGaAsP/InP-лазера с длиной волны излучения 1.55 мкм, достигало $\tau_{0.1-0.9} = 42-60$ нс. Экспериментально продемонстрировано, что созданные фотодиоды могут использоваться без охлаждения для регистрации импульсного излучения лазеров и светодиодов в ближней ИК-области спектра.

Ключевые слова: фотодиоды, GaSb/GaAlAsSb-гетероструктуры, быстродействие, лазеры, светодиоды.

DOI: 10.21883/FTP.2021.07.51027.9637

1. Введение

В настоящее время длины волн 1.3 и 1.55 мкм, вблизи которых располагаются второе и третье окна прозрачности оптического волокна, используются прежде всего в современных волоконно-оптических линиях связи и волоконных телекоммуникационных системах. Технология производства оптических волокон постоянно совершенствуется, и в ближайшем будущем можно ожидать перехода к системам на основе высокочистых флюоридных и халькогенидных световодов для средней ИК-области спектра, где существенное снижение рэлеевских потерь позволит увеличить дальность передачи. Следует отметить, что спектральный диапазон 0.9–1.8 мкм используется также для задач экологии, медицины, для фармацевтического и химического анализа.

Для длин волн 1.3 и 1.55 мкм существуют источники когерентного и спонтанного излучения — лазеры и светодиоды. Разработаны твердотельные лазеры с полупроводниковой накачкой [1] и полупроводниковые лазеры на основе AlGaInAs/InP [2,3], а также InGaAsP/InP MQW структур [4]. Для создания лазеров с длиной волны излучения в диапазоне 1.25–1.65 мкм перспективные результаты были достигнуты при использовании нитридов III группы и их твердых растворов GaInNAs, GaInNAsSb, AlGaIn [5–8]. Светодиоды для ближнего ИК-диапазона традиционно выпускаются на основе InGaAs и InGaAsP, однако в литературе сообщалось и о других типах таких приборов, в частности, об источниках с GaInNAs/GaAs QW резонатором [9], гибридных кремнийорганических светодиодах [10] и т.д.

Известно, что наработка до отказа и срок службы прибора определяются, в том числе, условиями и режимом его эксплуатации. Лазеры, работающие в непрерывном режиме с мощностью от нескольких мВт до нескольких Вт, могут выходить из строя вследствие тепловой перегрузки, в то время как в импульсном режиме допускается значительное перенапряжение на короткие промежутки времени без угрозы повреждения [11]. Работа светодиодов в импульсном режиме также позволяет значительно увеличить их мощность по сравнению с мощностью в квазинепрерывном режиме. Кроме того, переход ИК-лазеров и светодиодов на импульсный режим работы дает возможность повысить быстродействие оптоэлектронных систем.

Регистрация импульсного инфракрасного излучения остается одной из важных проблем лазерной физики и импульсной фотометрии, для решения которой требуется разработка быстродействующих фотоприемников. Для длин волн 1.3 и 1.55 мкм созданы Ge/Si-фотоприемники с квантовыми точками (КТ) [12–14]. В работе [13] было достигнуто увеличение квантовой эффективности Ge/Si-фотоприемника со слоями Ge-нанокластеров в качестве активного элемента от 3% при нормальном падении света до 21% (1.3 мкм) и 16% (1.55 мкм) за счет его волноводной структуры.

В настоящее время в ближней ИК-области спектра широко применяются фотоприемники на основе гетероструктур InGaAs/InP, в активной области которых используется прямозонный твердый раствор $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, имеющий, по сравнению с непрямозонным германием, больший коэффициент поглощения на длине волны 1.55 мкм и более низкую собственную концентрацию

Параметры GaSb/GaAlAsSb-гетероструктур, выращенных на подложке GaSb(100)

| | Подложка | Эпитаксиальные слои | |
|--|---------------------|------------------------|---|
| | GaSb(100) | GaSb | Ga _{0.66} Al _{0.34} As _{0.025} Sb _{0.075} |
| Толщина, мкм | 300 | 5.0–5.5 | 1.5–2.0 |
| Легирующая примесь | Te | Te | Ge |
| Тип проводимости | <i>n</i> | <i>n</i> | <i>p</i> |
| Концентрация носителей заряда (типичная) при $T = 300$ К, см ⁻³ | $1.9 \cdot 10^{17}$ | $(4-20) \cdot 10^{16}$ | $(6-8) \cdot 10^{18}$ |
| Ширина запрещенной зоны E_g при $T = 300$ К, эВ | 0.72 | 0.72 | 1.1 |

носителей заряда [15]. На основе данных материалов недавно были разработаны быстродействующие фотоприемники с полосой пропускания до 20 ГГц при диаметре чувствительной площадки 18 мкм [16]. Полоса пропускания фотоприемников с активной областью, состоящей из нескольких эпитаксиальных слоев InGaAs с различной концентрацией, при уменьшении площади чувствительной площадки до 24 мкм² может достигать более 100 ГГц [17]. Однако для ряда применений, где уменьшение размера чувствительной площадки фотодиода нежелательно из-за потерь в чувствительности, необходимо искать альтернативные методы повышения быстродействия.

Промышленно InGaAs/InP-фотодиоды выпускают компании Hamamatsu (Япония) и Jenoptik (Германия) [18,19]. Компания ООО „Лазерском“ (Беларусь) [20] разрабатывает pin-фотодиодные модули, предназначенные для применения в аппаратуре ВОСПИ. Российская компания ООО „АИБИ“ [21] для создания фотоприемников, работающих в спектральном диапазоне 1.1–2.4 мкм, использует систему материалов GaSb–InAs.

Недавно нами были созданы первые образцы неохлаждаемых GaSb/GaAlAsSb-фотодиодов для спектрального диапазона 1.10–1.85 мкм [22]. Одной из отличительных особенностей таких фотодиодов является низкая концентрация носителей заряда в активной области GaSb, достигнутая за счет использования свинца в качестве нейтрального растворителя. В лучших образцах концентрация носителей заряда была снижена почти на 2 порядка величины: от $n = (2-3) \cdot 10^{17}$ см⁻³ до $n = 2 \cdot 10^{15}$ см⁻³. В данной работе экспериментально исследуется быстродействие таких фотодиодов и рассматривается возможность их применения для регистрации импульсного излучения с длиной волны 1.55 мкм.

2. Получение экспериментальных образцов и методики исследования

Быстродействие полупроводниковых фотоприемников определяется тремя основными факторами: временем диффузии электронно-дырочных пар t_{diff} к области пространственного заряда (ОПЗ), временем дрейфа носи-

телей через обедненную область t_{dr} и временем разрядки/зарядки собственной емкости $p-n$ -перехода t_{RC} . Снижение остаточной концентрации носителей заряда в активном слое приводит к расширению ОПЗ. В результате в $p-i-n$ -фотодиодах практически отсутствует медленная диффузионная составляющая скорости фототовета, так как генерация электронно-дырочных пар происходит непосредственно в ОПЗ. Скорость дрейфа носителей можно оценить, зная их подвижность в данном материале при комнатной температуре и значение напряженности электрического поля в ОПЗ. Так, подвижность электронов в GaSb n -типа проводимости с различным уровнем легирования теллуром, по данным проведенного нами исследования гальваномагнитных свойств, составляет $\mu_e \sim 3200-6900$ см²/Вс. Тогда при напряженности электрического поля $E \sim 10^4$ В/см минимальная скорость дрейфа $V_{dr} = \mu_e E \sim 3 \cdot 10^7$ см/с [23]. В результате для активного слоя GaSb толщиной 5 мкм максимальное значение t_{dr} составит ~ 17 пс, и данной величиной также можно пренебречь. Таким образом, скорость фототовета $p-i-n$ -фотодиода будет определяться временем t_{RC} , а именно произведением значений сопротивления нагрузки R и емкости $p-n$ -перехода C_{p-n} . Тогда для повышения быстродействия фотоприемника прежде всего необходимо снижать емкость $p-n$ -перехода.

Гетероструктуры GaSb/GaAlAsSb для создания $p-i-n$ -фотодиода выращивались методом жидкофазной эпитаксии на подложках n -GaSb(100), легированных Te до концентрации носителей $1.9 \cdot 10^{17}$ см⁻³ (см. таблицу). Для снижения концентрации носителей активная область GaSb была получена с использованием свинца в качестве нейтрального растворителя. Данный метод позволяет уменьшить концентрацию природных структурных дефектов в GaSb и в твердых растворах на его основе за счет изменения соотношения атомных долей сурьмы и галлия в растворе-расплаве. С другой стороны, получение материала активной области с низкой концентрацией дефектов, в котором эффективное время жизни носителей τ_{eff} достаточно высоко, приводит к снижению объемной составляющей обратного темнового тока фотодиода и, соответственно, уровня шумов.

Толщина активной области n -GaSb для разных образцов гетероструктур составляла 5.0–5.5 мкм, широкозонного „окна“ p -GaAlAsSb — 1.5–2.0 мкм. При увеличении толщины эпитаксиального слоя GaSb до 25 мкм и более наблюдалось нарушение процесса роста слоя GaAlAsSb: на поверхности гетероструктуры наблюдались пирамиды с X -образным основанием. Данное явление связано с нарушением стехиометрии поверхности эпитаксиального слоя GaSb, выращенного из свинцовых растворов-расплавов, при больших толщинах данного слоя.

С целью получения материала n -типа проводимости активная область GaSb, выращенная с использованием свинца, легировалась теллуридом для изменения концентрации основных носителей в широком диапазоне $n = (4–20) \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (см. таблицу). Это позволило нам провести исследования электролюминесцентных характеристик образцов с различным уровнем легирования и оценить влияние теллура на данные характеристики. Широкозонное „окно“ $\text{Ga}_{0.66}\text{Al}_{0.34}\text{As}_{0.025}\text{Sb}_{0.97}$ легировалось германием до концентрации $p = (6–8) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$.

На основе выращенных гетероструктур GaSb/GaAlAsSb методами контактной фотолитографии и жидкостного химического травления были созданы чипы размером 500×500 мкм. Фоточувствительная площадка (меза) имела форму образующейся капли (несферической) с диаметром основной части 300 мкм (см. рис. 1, *a*). Омический контакт в форме треугольника для материала p -типа создавался методом взрывной фотолитографии и термического напыления системы Cr/Au/Ni/Au в высоковакуумной установке. Далее проводилось усиление напыленного контакта методом электрохимического осаждения Au до толщины 2.0 мкм. Для материала n -типа со стороны подложки GaSb проводилось напыление сплошного слоя системы Cr/Au/Ni/Au с последующим напылением Cr/Au до толщины 0.6 мкм. Фотодиодные чипы монтировались на стандартные корпуса ТО-18, для проведения температурных измерений — на корпуса ТО-5 с термоэлектрическим модулем.

Боковая поверхность мезы с выходом на p – n -переход (см. рис. 1, *b*) защищалась анодным окислом. Процесс проводился при постоянном напряжении $U = 60 \text{ В}$, в состав электролита входили винная кислота (0.3%) и этиленгликоль в соотношении 1:2. Известно, что толщина анодного окисла зависит от типа проводимости полупроводника и концентрации носителей заряда. В результате исследования скола гетероструктур GaSb/GaSb/GaAlAsSb с помощью микроскопа MikroZoom II было обнаружено, что эпитаксиальные слои окисляются однородно, и возможно получение равномерного окисла достаточной толщины $\sim 1000 \text{ \AA}$. Удельное сопротивление такого окисла, по нашим оценкам, составляло $200 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Таким образом, снижение концентрации носителей в активной области GaSb при высокой концентрации в Al-содержащем слое не влияет существенно на толщину получаемого окисла, и этот метод был использован для пассивации p – n -перехода.

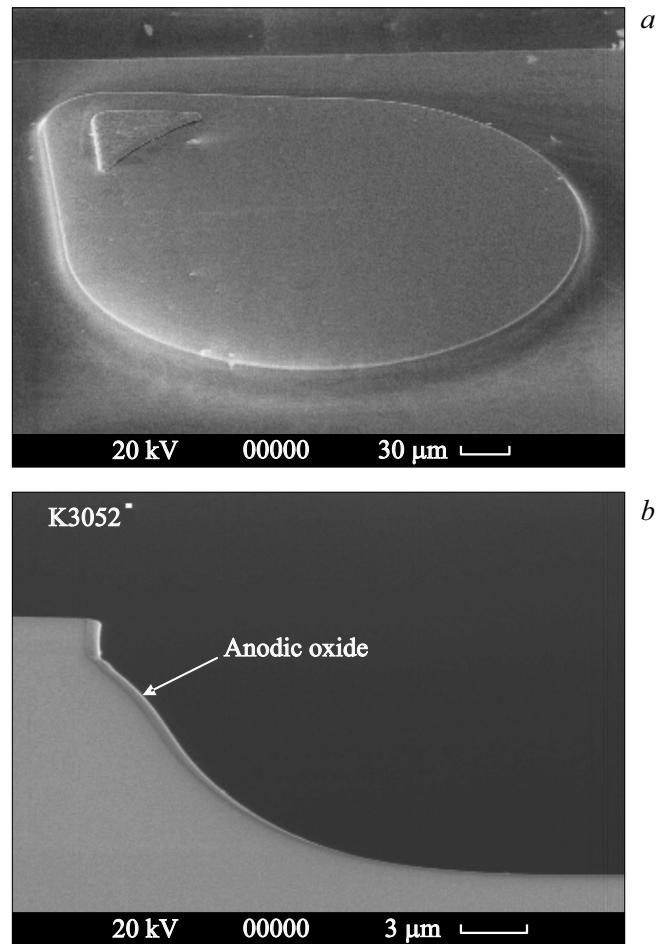


Рис. 1. РЭМ-изображение мезы фотодиода на основе гетероструктуры GaSb/GaAlAsSb: *a* — лицевая фоточувствительная поверхность с напыленным омическим контактом; *b* — профиль боковой поверхности мезы.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) фотодиодов исследовались с помощью автоматизированного измерителя. Напряжение источника питания изменялось дискретно с шагом 0.05 В. Графики ВАХ и значения напряжения и тока выводились на монитор компьютера в режиме реального времени.

При измерении спектров фоточувствительности фотодиодов использовалась схема синхронного детектирования, включающая призмный монохроматор SPM2 (Carl Zeiss), механический модулятор и селективный усилитель SR830 (Stanford Research). Частота модуляции излучения составляла 500 Гц. Для измерения величины фототока исследуемые фотодиоды подключались в фотогальваническом режиме с нагрузочным сопротивлением 100 Ом, так как исследуемые приборы имеют дифференциальное сопротивление $> 10 \text{ кОм}$ в нуле смещения. Для определения токовой монохроматической чувствительности $S_I(\lambda_{\text{max}})$ использовался метод сравнения с калиброванным приемником излучения.

Вольт-фарадные характеристики (ВФХ) фотодиодов исследовались с помощью цифрового измерителя иммитанса (RLC) E7-12 (Agilent Technology). Измерение емкости проводилось мостовым методом по ГОСТ 18986.4-73 (75) на частоте $f = 1$ МГц при сопротивлении нагрузки $R_L = 51$ Ом и напряжении обратного смещения до $U_{rev} = -1.5$ В.

Времена нарастания τ_{rise} и спада τ_{fall} импульса фототовета, определяющие быстродействие фотодиодов, измерялись при помощи InGaAsP/InP-лазера с длиной волны излучения $\lambda = 1.55$ мкм.

3. Экспериментальные результаты и обсуждение

Для качественной оценки наличия структурных дефектов в активной области фотодиодных гетероструктур GaSb/GaAlAsSb были проведены исследования электролюминесцентных характеристик. Как видно из рис. 2, при $T = 300$ К спектры излучения состоят из двух полос, для основной из которых максимум интенсивности соответствует длине волны $\lambda = 1.72$ мкм ($h\nu = 0.72$ эВ) при токе $I = 100$ мА. С увеличением тока до $I = 200$ мА основной максимум смещается в длинноволновую область на $\Delta\lambda = 0.02$ мкм. При этом ширина полосы излучения на половине высоты ($FWHM$) изменяется от 0.20 до 0.22 мкм, что говорит о незначительном влиянии разогрева на электролюминесцентные характеристики при протекании питающего тока. Основная полоса излучения соответствует межзонной излучательной рекомбинации в активной области GaSb ($E_g = 0.72$ эВ).

Интенсивность второго пика $\lambda = 1.94$ мкм (энергия фотона 0.64 эВ), как наблюдалось нами для образцов с различным уровнем легирования, не зависит от концентрации Те и, предположительно, определяется участием в генерации излучения двухзарядных акцепторов, образующихся при размещении Ga в узлах Sb кристаллической решетки. Так как интенсивность данного пика

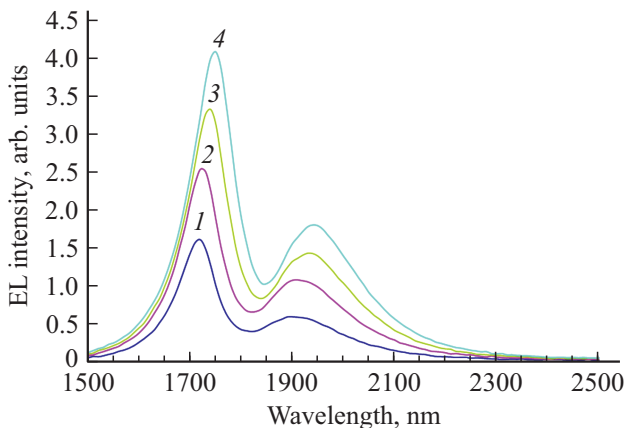


Рис. 2. Спектр электролюминесценции гетероструктуры GaSb/GaAlAsSb при различных токах накачки I , мА: 1 — 50, 2 — 100, 3 — 150, 4 — 200.

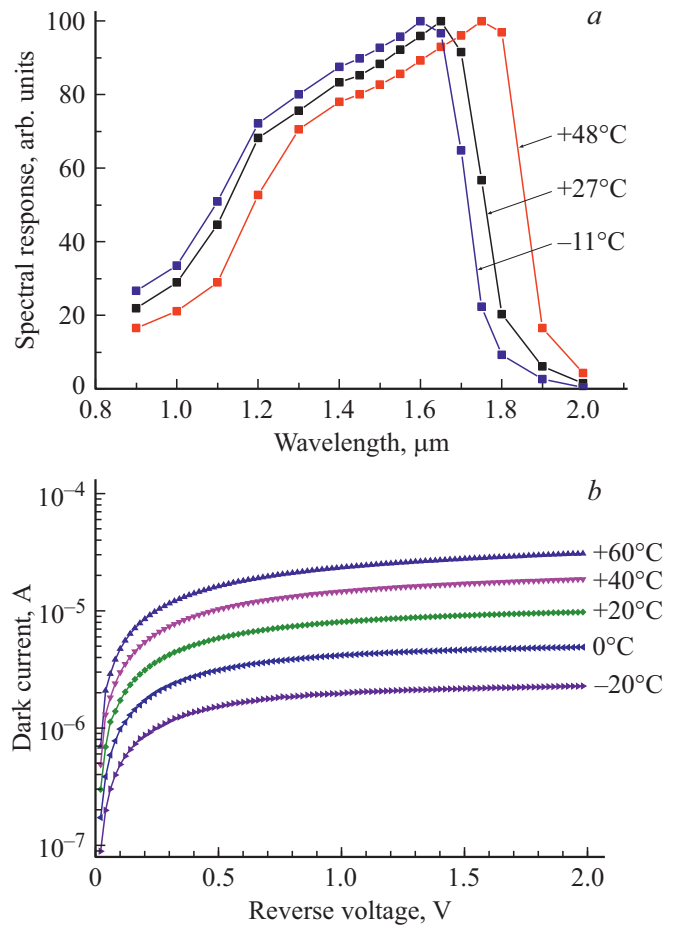


Рис. 3. Спектральные и электрические характеристики GaSb/GaAlAsSb-фотодиода с диаметром фоточувствительной площадки 300 мкм при различных температурах: *a* — распределение спектральной чувствительности; *b* — вольт-амперные характеристики (обратная ветвь).

достаточно велика (0.42 от интенсивности основного пика при $I = 200$ мА), можно сделать вывод о том, что несмотря на снижение концентрации носителей в GaSb за счет использования свинца в качестве нейтрального растворителя, влияние природных акцепторов все еще остается существенным фактором.

Зависимость спектральной чувствительности фотодиодов на основе гетероструктур GaSb/GaAlAsSb от длины волны при $T = -11$ — $+48$ °С представлена на рис. 3, *a*. При комнатной температуре фотодиоды имеют спектральную чувствительность (не менее 10% от максимума) в диапазоне от 0.9 до 1.85 мкм, при этом максимальная чувствительность (более 80%) наблюдается в области 1.33–1.72 мкм.

На рис. 3, *b* приведены вольт-амперные характеристики исследуемых GaSb/GaAlAsSb-фотодиодов при различных температурах ($T = -20$ — $+60$ °С). Как видно из рисунка, при комнатной температуре типичная величина обратного темнового тока составляет $I_D = 5 \cdot 10^{-6}$ А вблизи $U = 0$ В.

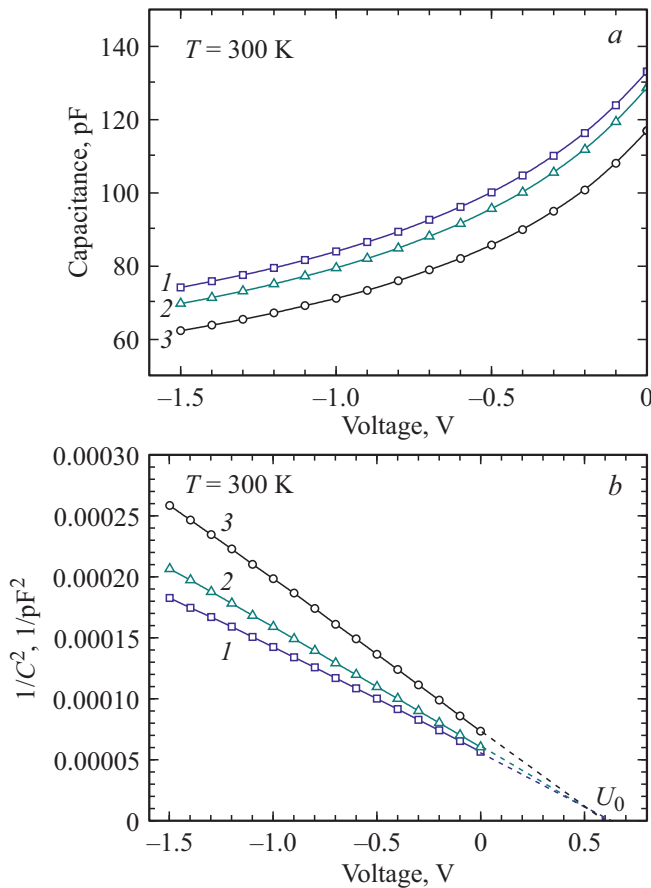


Рис. 4. Вольт-фарадные характеристики GaSb/GaAlAsSb-фотодиодов (образцы 1–3) с диаметром фоточувствительной площадки 300 мкм (а) и зависимость $C^{-2} = f(U)$ (b) при комнатной температуре.

Исследование вольт-фарадных характеристик (ВФХ) показало, что при диаметре фоточувствительной площадки 300 мкм типичная емкость фотодиода составляет $C = 115–135$ пФ без смещения и $C = 62–75$ пФ при обратном смещении $U_{rev} = -1.5$ В (см. рис. 4, а). Для данных фотодиодов наблюдалась обратная квадратичная зависимость емкости от приложенного напряжения $C^{-2} = f(U)$, что говорит о резком распределении примесей в гетероструктуре (см. рис. 4, б). Контактная разность потенциалов на $p-n$ -переходе (в вольтах), экспериментально определенная из данных графиков, составляет $U_0 = 0.6$ В.

Известно, что емкость фотодиода C состоит из емкости $p-n$ -перехода C_{p-n} и паразитной емкости C_p . Величина C_{p-n} также является суммой двух компонент — барьерной C_b , связанной с изменением потенциального барьера, и диффузионной C_{diff} , определяемой прямым током через $p-n$ -переход и имеющую частотную зависимость. При обратных напряжениях C_b значительно превышает C_{diff} . Тогда при работе фотодиода в фотовольтагическом либо фотодиодном режиме, т.е. без смещения либо с приложением обратного смещения,

можно считать, что $C_{p-n} = C_b$. При этом C_b фотодиода, определяемая конструктивными особенностями корпуса прибора и выводов, составляет величину < 0.5 пФ, и ею можно пренебречь.

Барьерная емкость $p-n$ -перехода C_b определяется в соответствии с формулой для плоского конденсатора, в которой за расстояние между обкладками конденсатора принимается ширина ОПЗ: $C_b = \epsilon_0 \epsilon A / W$, где A — площадь $p-n$ -перехода, W — ширина ОПЗ, ϵ_0 — диэлектрическая постоянная, ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника. Основное отличие состоит в том, что W не является постоянной величиной и по своему значению приближается к толщине i -слоя (активной области фотодиода) только в случае полного обеднения последнего при приложении напряжения смещения. Для асимметричного $p-n$ -перехода, p -область которого легирована значительно сильнее n -области ($N_D \ll N_A$, см. таблицу), ширина ОПЗ описывается выражением: $W = [2\epsilon_0 \epsilon (\phi_{p-n} + eU_{rev}) / e^2 N_D]^{1/2}$, где U_{rev} — напряжение обратного смещения, ϕ_{p-n} — разность потенциалов на $p-n$ -переходе (высота потенциального барьера $p-n$ -перехода без смещения, эВ), N_D — концентрация остаточных доноров в активной области (при комнатной температуре $N_D = n_0$, где n_0 — концентрация основных носителей). Следует отметить, что для гетероперехода, в отличие от гомоперехода, значения диэлектрических проницаемости для n - и p -областей будет несколько различаться.

Как упоминалось в разд. 2, для $p-i-n$ -GaSb/GaAlAsSb-фотодиодов скорость фотоответа определяется RC -компонентой, а именно временем зарядки/разрядки собственной емкости $p-n$ -перехода t_{RC} . При малых токах дифференциальное сопротивление фотодиода R_{diff} оказывается существенным. Так, величина дифференциального сопротивления, оцененная по ВАХ, для различных образцов фотодиодов составляет $R_0 = 30–50$ кОм при $U = 0$ В и $T = 300$ К. Однако в области больших токов дифференциальное сопротивление фотодиода R_{diff} относительно мало, и в классическом случае его значением можно пренебречь. Тогда при работе на нагрузку $R_L = 51$ Ом и обратном смещении 1.5 В ширина полосы пропускания Δf , рассчитанная по формуле $\Delta f = 1 / (2\pi R_L C)$, имеет значение 42–51 МГц. Время нарастания импульса оценивается как $t_{rise} = 0.35 / \Delta f = 7–8$ нс. Данная расчетная величина согласуется с нашими первыми оценками времени отклика GaSb/GaAlAsSb-фотодиодов, приведенными в работе [22]. Таким образом, расчетное значение быстродействия фотодиода составляет $\tau_{0.1–0.9} = t_{rise} = 7–8$ нс.

Быстродействие фотодиода исследовалось экспериментально на длине волны $\lambda = 1.55$ мкм с помощью InGaAsP/InP-лазера (исходный импульс длительностью $\tau = 300$ нс, время нарастания импульса $\tau_{rise} = 30$ нс). Для различных образцов фотодиодов измеренное время нарастания импульса фотоответа t_{rise} лежало в пределах 54–62 нс и время спада импульса составляло

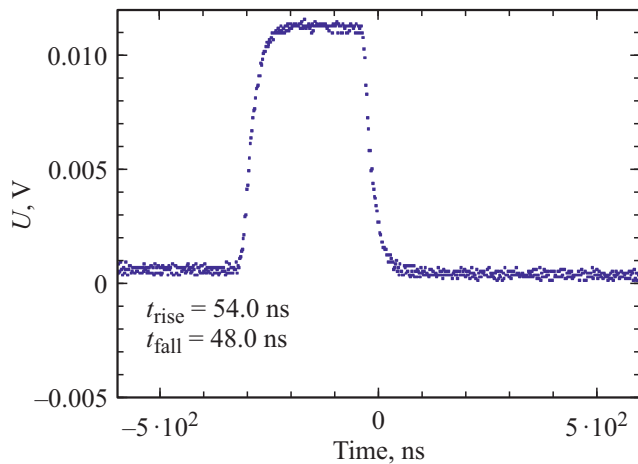


Рис. 5. Импульс фототовета GaSb/GaAlAsSb-фотодиода при детектировании импульсного излучения лазера с длиной волны $\lambda = 1.55$ мкм, длительностью импульса $\tau = 300$ нс, временем нарастания импульса $\tau_{\text{rise}} = 30$ нс.

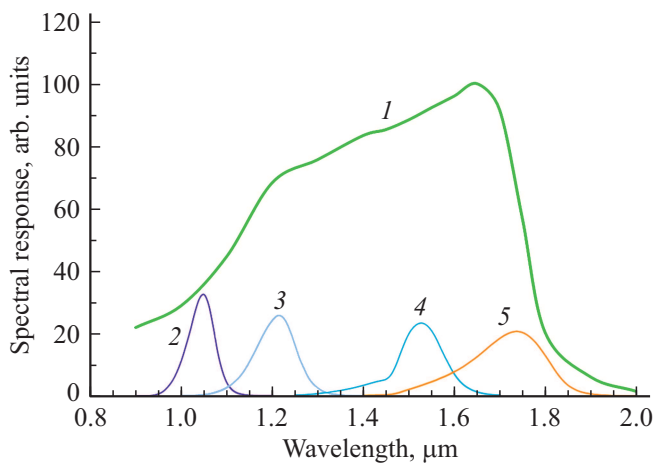


Рис. 6. Спектральная характеристика GaSb/GaAlAsSb-фотодиода (1) и спектры излучения светодиодов с максимумом интенсивности на длине волны λ , мкм: 1.05 (2), 1.21 (3), 1.53 (4), 1.74 (5).

$t_{\text{fall}} = 42\text{--}60$ нс (см. рис. 5). Так как за быстродействие фотоприемника $\tau_{0.1-0.9}$ принимается либо t_{rise} , либо t_{fall} , допустимо считать, что измеренное быстродействие GaSb/GaAlAsSb-фотоприемника составляет $\tau_{0.1-0.9} = 42\text{--}60$ нс. При уменьшении длительности и времени нарастания исходного импульса до $\tau = 110$ нс и $\tau_{\text{rise}} = 4$ нс соответственно значительного уменьшения t_{rise} и t_{fall} фотодиода не происходило. Таким образом, измеренная величина $\tau_{0.1-0.9}$ в 6–7 раз превосходит расчетное значение. Мы полагаем, что данное расхождение можно объяснить поведением двухзарядных природных акцепторов при зарядке/разрядке собственной емкости p – n -перехода. Как показали исследования электролюминесцентных характеристик (см. выше), концентрация

природных акцепторов в активной области прибора остается существенным фактором.

Наши исследования показали, что GaSb/GaAlAsSb-фотодиод может использоваться для детектирования импульсного излучения существующих светодиодов в диапазоне 0.9–1.8 мкм. На рис. 6 представлены спектры излучения светодиодов с максимумом на длинах волн λ : 1.05, 1.21, 1.53, 1.74 мкм. Как видно из рисунка, спектры данных светодиодов располагаются в пределах границ спектральной чувствительности исследуемого фотодиода не ниже уровня 20% от ее максимума.

4. Заключение

Созданы и исследованы неохлаждаемые GaSb/GaAlAsSb-фотодиоды. При комнатной температуре фотодиоды демонстрируют спектральную чувствительность (не менее 10% от максимальной) в диапазоне от 0.9 до 1.85 мкм.

Спектры электролюминесценции приборов состояли из двух полос с максимумом интенсивности на длинах волн 1.72 и 1.94 мкм. Основная полоса $\lambda = 1.72$ мкм соответствует межзонной излучательной рекомбинации в активной области GaSb ($E_g = 0.72$ эВ), вторая полоса, предположительно, определяется излучением двухзарядных акцепторов. Интенсивность второго пика достаточно велика (0.42 от интенсивности основного пика при $I = 200$ мА), что говорит о заметном влиянии структурных дефектов и необходимости дальнейшего снижения их концентрации в материале активной области фотодиода.

Исследование вольт-фарядных характеристик показало, что для исследуемых фотодиодов наблюдается обратная квадратичная зависимость емкости от приложенного напряжения $C^{-2} = f(U)$, что подтверждает резкое распределение примесей в гетероструктуре. Емкость фотодиодов при диаметре чувствительной площадки $d = 300$ мкм имеет величину $C = 115\text{--}135$ пФ без смещения и $C = 62\text{--}70$ пФ при обратном смещении $U_{\text{rev}} = 1.5$ В.

Быстродействие фотодиода исследовалось с помощью InGaAsP/InP-лазера с длиной волны излучения $\lambda = 1.55$ мкм. Измеренная величина быстродействия $\tau_{0.1-0.9} = 42\text{--}60$ нс (без смещения) превышает расчетное значение в 6–7 раз. Мы полагаем, что данное расхождение может быть связано с поведением двухзарядных природных акцепторов при зарядке/разрядке собственной емкости p – n -перехода. Продemonстрировано, что созданные неохлаждаемые фотодиоды могут использоваться для регистрации импульсного излучения лазеров и светодиодов в ближней ИК-области спектра.

Благодарности

Авторы выражают благодарность С.И. Трошкову за создание РЭМ-изображений GaSb/GaAlAsSb-фотодиодов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] М.О. Искандаров, А.А. Никитичев, М.А. Свердлов, А.Л. Тер-Мартirosян. Науч. приборостроение, **25** (3), 124 (2015).
- [2] L. Hou, S. Tang, B. Hou, S. Liang, J.H.H. Marsh. IEEE J. Select. Top. Quant. Electron., **24** (6), 1102508 (2018).
- [3] А.А. Мармалюк, Ю.Л. Рябоштан, П.В. Горлачук, М.А. Ладугин, А.А. Падалица, С.О. Слипченко, А.В. Лютецкий, Д.А. Веселов, Н.А. Пихтин. Квант. электрон., **47** (3), 272 (2017).
- [4] G. Belenky, L. Shterengas, C.W. Trussell, C.L. Reynolds, Jr., M.S. Hybertsen, R. Menna. In: Future Trends in Microelectronics: The Nano Millennium, ed. by S. Luryi, J. Xu, A. Zaslavsky (N.Y., Wiley Interscience, 2002) p. 231.
- [5] A.Y. Egorov, D. Bernklau, B. Borchert, S. Illek, D. Livshits, A. Rucki, M. Schuster, A. Kaschner, A. Hoffmann, G. Dumitras, M.C. Amann, H. Riechert. J. Cryst. Growth, **227–228**, 545 (2001).
- [6] S.R. Bank, M.A. Wistey, H.B. Yuen, L.L. Goddard, H.P. Bae, J.S. Harris. J. Vac. Sci. Technol. B, **23** (3), 1337 (2005).
- [7] J.W. Ferguson, P. Blood, P.M. Smowton, H. Bae, T. Sarmiento, J.S. Harris, N. Tansu, L.J. Mawst. IEEE J. Quant. Electron., **47** (6), 870 (2011).
- [8] Е.В. Луценко, Н.В. Ржеуцкий, А.Г. Войнилович, И.Е. Свистенков, А.В. Нагорный, В.А. Шуленкова, Г.П. Яблонский, А.Н. Алексеев, С.И. Петров, Я.А. Соловьёв, А.Н. Петлицкий, Д.В. Жигулин, В.А. Солодуха. Квант. электрон., **49** (6), 540 (2019).
- [9] M.M. Bajo, A. Guzmán, A. Trampert, A. Hierro. Solid-State Electron., **54** (4), 492 (2010).
- [10] R.J. Curry, W.P. Gillin, M. Somerton, A.P. Knights, R. Gwilliam. In: Organic Light-Emitting Materials and Devices IV, ed. by Z.H. Kafafi [Proc. SPIE, **4105**, 265 (2001)].
- [11] W. Reeb. www.azimp.ru/articles/applications/38538/
- [12] M. Elcurdi, P. Boucaud, S. Sauvage. Appl. Phys. Lett., **80**, 509 (2002).
- [13] А.И. Якимов, А.В. Двуреченский, В.В. Кириенко, А.И. Никифоров. ФТТ, **47** (1), 37 (2005).
- [14] K.A. Lozovoy, A.V. Voytsekhovskiy, A.P. Kokhanenko, V.G. Satdarov, O.P. Pchelyakov, A.I. Nikiforov. Opto-Electron. Rev., **22** (3), 171 (2014).
- [15] И.Б. Чистохин, К.С. Журавлев. Успехи прикл. физики, **3** (1), 85 (2015).
- [16] O.A. Kozyreva, Y.V. Solov'ev, I.S. Polukhin, A.K. Mikhailov, G.A. Mikhailovskiy, M.A. Odnoblyudov, E.Z. Gareev, E.S. Kolodeznyi, I.I. Novikov, L.Ya. Karachinsky, A.Yu. Egorov, V.E. Bougrov. IOP Conf. Ser.: J. Physics: Conf. Ser., **917**, 052029 (2017).
- [17] K. Sun, A. Beling. Appl. Sci., **9** (4), 623 (2019).
- [18] www.hamamatsu.com
- [19] www.jenoptik.com
- [20] www.laserscom.com
- [21] www.ibsg.ru
- [22] Е.В. Куницына, И.А. Андреев, Г.Г. Коновалов, Э.В. Иванов, А.А. Пивоварова, Н.Д. Ильинская, Ю.П. Яковлев. ФТП, **52** (9), 116 (2018).

- [23] И.А. Андреев, О.Ю. Серебренникова, Г.С. Соколовский, В.В. Дюделев, Н.Д. Ильинская, Г.Г. Коновалов, Е.В. Куницына, Ю.П. Яковлев. ФТП, **47** (8), 1109 (2013).

Редактор А.Н. Смирнов

Uncooled photodiodes for detecting pulsed infrared radiation in the spectral range of 0.9–1.8 μm

E.V. Kunitsyna, A.A. Pivovarova, I.A. Andreev, G.G. Konovalov, E.V. Ivanov, N.D. Il'inskaya, Yu.P. Yakovlev

loffe Institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract Uncooled GaSb/GaAlAsSb photodiodes for detecting pulsed infrared radiation in the spectral range of 0.9–1.8 μm have been developed. Active GaSb layer was grown using lead as a neutral solvent in order to reduce the concentration of natural acceptors. The capacity of the photodiodes with a diameter of photosensitive area of 300 μm was $C = 115–135$ pF with no bias and $C = 62–70$ pF at $U = -1.5$ V. The photodiode speed of response measured using an InGaAsP/InP laser with a wavelength of 1.55 μm reached $\tau_{0.1–0.9} = 42–60$ ns in the photovoltaic mode. It is shown experimentally that the photodiodes can be used without cooling to detect the pulsed radiation of lasers and LEDs in the near-infrared region of the spectrum.