

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЕ МОСТИКОВЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ ДЛЯ СРЕДНЕЙ ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

А. А. Пивоварова^{1*}, Е. В. Куницына¹, Г. Г. Коновалов¹, С. О. Слипченко¹, А. А. Подоскин¹,
И. А. Андреев¹, Н. А. Пихтин¹, Н. Д. Ильинская¹, А. Е. Черняков², Ю. П. Яковлев¹

УДК 621.378.35

<https://doi.org/10.47612/0514-7506-2023-90-1-102-108>

¹ Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

² Научно-технологический центр микроэлектроники и субмикронных гетероструктур РАН, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: pivovarova.antonina@gmail.com

(Поступила 1 ноября 2022)

Представлены неохлаждаемые мостиковые фотоприемники на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для средней ИК-области спектра. Мостиковая конструкция отличается тем, что контактная площадка вынесена за пределы фоточувствительной мезы и связана с ней только воздушным мостиковым контактом. Данная конструкция позволяет уменьшить площадь р–п-перехода и емкость прибора, что приводит к увеличению его быстродействия без потерь в обнаружительной способности. Гетероструктуры InAs/InAsSbP выращены методом газовой фазной эпитаксии на подложках InAs с ориентацией (111). Разработанные фотоприемники обладают максимальной спектральной чувствительностью в диапазоне 2.8–3.1 мкм и дифференциальным сопротивлением в нуле смещения $R_0 = 1.0$ –5.6 кОм. Емкость лучших приборов $C = 3.4$ –3.6 пФ при $U_{rev} = 0$ В. Быстродействие фотоприемников исследовано с помощью лазера InGaAsP/InP с длиной волны излучения 1.55 мкм. Определенное по фронту нарастания фотоотклика быстродействие составляет 200 пс. Созданные мостиковые фотоприемники могут использоваться для регистрации лазерных импульсов в диапазоне 1.1–3.8 мкм.

Ключевые слова: гетероструктуры InAs/InAsSbP, средняя ИК-область, фотоприемник, быстродействие.

The uncooled air-bridge photodetectors based on InAs/InAsSbP heterostructures are presented for the mid-IR spectral region. The main difference in the air-bridge design is that a contact pad is outside the photosensitive mesa and is connected with it only by an air-bridge contact. This design makes it possible to reduce the area of the p-n junction, and, accordingly, the capacity of the device. This leads to an increase in the speed without loss in detectivity. The InAs/InAsSbP heterostructures were grown on InAs substrates with the orientation of (111) by MOCVD. The developed photodetectors had a maximum spectral sensitivity in the range of 2.8–3.1 μm and a differential resistance in zero offset of $R_0 = 1.0$ –5.6 kOhm. The capacity of the best devices was $C = 3.4$ –3.6 pF at $U_{rev} = 0$ V. The speed of the photodetector using an InGaAsP/InP laser with a wavelength of 1.55 μm was carried out. Determined by the front growth of the photoresponse, the speed is 200 ps. The developed air-bridge photodetectors can be applied to register laser pulses in the range of 1.1–3.8 μm .

Keywords: InAs/InAsSbP heterostructures, mid-IR spectral region, photodetector, speed.

HIGH-SPEED AIR-BRIDGE PHOTODETECTORS FOR THE MID-IR SPECTRAL REGION

A. A. Pivovarova^{1*}, E. V. Kunitsyna¹, G. G. Konovalov¹, S. O. Slipchenko¹, A. A. Podoskin¹,
I. A. Andreev¹, N. A. Pikhin¹, N. D. Il'inskaya¹, A. E. Chernyakov², Yu. P. Yakovlev¹ (¹ Ioffe Institute, St. Petersburg, Russia; ² Submicron Heterostructures for Microelectronics, Research and Engineering Center, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia; e-mail: pivovarova.antonina@gmail.com)

^{*}Доложено на 1-й международной конференции “Лазеры, полупроводниковые излучатели и системы на их основе”, Минск, Беларусь, 23–27 мая 2022 г.

Введение. Развитие полупроводниковых лазеров [1, 2] и лазерных систем в средней ИК-области спектра приводит к необходимости разработки фотоприемников, способных регистрировать когерентное излучение с микросекундной и пикосекундной длительностью импульса. Приборы должны обладать прежде всего высоким быстродействием и низким уровнем шумов. Данные параметры являются определяющими при выборе фотоприемника для таких направлений современной науки и техники, как лазерная диодная дальнометрия и локация, лазерная спектроскопия газов и молекул, а также для волоконно-оптических линий связи и систем оптической связи в свободном пространстве.

При достаточно развитой технологии создания фотоприемников на основе InAs вопрос их быстродействия (инерционности) поднимался крайне редко. Даже критерии отнесения фотоприемника к классу быстродействующих не являются устоявшимися, поскольку в источниках указываются различные параметры с большим разбросом значений [3]. Тем не менее для многих конструкций динамическая характеристика фотоприемника (время нарастания/спада импульса фотоответа) определяет полосу пропускания, что позволяет провести сравнение. В работе [4] сообщалось о p -InAsSbP/ n -InAs-фотодиодах, быстродействие которых, исследованное с помощью GaAs-лазера, не превышало длительности лазерного импульса $\tau = 15$ нс. Быстродействие фотодиода с активной областью InAs оценивалось как $\tau \leq 1$ нс при диаметре чувствительной площадки 1 мм [5]. В [6] на основе InAs разработан быстродействующий лавинный фотодиод с полосой пропускания 3.5 ГГц по уровню -3 дБ, соответствующей времени нарастания импульса фотоответа $\tau = 0.045$ пс. Последние достижения в создании быстродействующих фотоприемников для диапазона 2—10 мкм рассмотрены в [7]. Авторы отмечают успешные работы по межзонным каскадным фотоприемникам на основе сверхрешеток InAs/GaAsSb II типа с $(-3$ дБ)-полосой пропускания 2.4 [8] и 7.04 ГГц [9]. В этом году продемонстрированы быстродействующие фотоприемники на основе сверхрешеток InAs/GaAsSb с полосой пропускания 12.8 ГГц по уровню -3 дБ при диаметре площадки 20 мкм и обратном смещении $U_{rev} = 4$ В [10]. Экспериментальное определение быстродействия InAs/InAsSbP фотоприемников — сложная задача с точки зрения как подбора источника излучения, так и согласования измерительного тракта.

Цель настоящей работы — создание быстродействующих неохлаждаемых InAs/InAsSbP-фотоприемников диапазона 1.1—3.8 мкм для регистрации коротких лазерных импульсов. Представлены первые результаты измерений быстродействия мостиковых фотодиодов на основе гетероструктур InAs/InAsSbP.

Эксперимент. Известно [11], что быстродействие фотоприемника определяется тремя факторами: временем пролета носителями области пространственного заряда (ОПЗ), временем диффузии созданных излучением электронно-дырочных пар до ОПЗ p - n -перехода и временем зарядки/разрядки собственной емкости p - n -перехода. Для p - i - n -фотодиодов самым длительным является время зарядки/разрядки собственной емкости p - n -перехода, остальные величины очень малы и ими можно пренебречь. Таким образом, быстродействие фотодиода определяется произведением нагрузочного сопротивления R и емкости p - n -перехода C . Следовательно, для увеличения быстродействия прибора необходимо снижать его емкость. Существует два пути уменьшения емкости фотодиода: снижение концентрации носителей заряда в активной области прибора и уменьшение площади p - n -перехода. Снижение концентрации в материале ограничено собственной концентрацией носителей в полупроводнике. В данной работе рассмотрено уменьшение емкости прибора за счет уменьшения площади p - n -перехода.

В [12] исследованы фотоэлектрические характеристики фотоприемников с различными диаметрами чувствительной площадки. Уменьшение площади данной площадки вызывает уменьшение площади p - n -перехода и, следовательно, снижение емкости прибора и увеличение его быстродействия. При диаметре площадки 100—300 мкм переходят к конструкции фотоприемника с мезоструктурой в виде капли с точечным контактом. Это необходимо для уменьшения затенения фронтальным металлическим контактом фоточувствительной поверхности. Однако реализация данной конструкции при диаметре площадки <100 мкм неэффективна: область затенения контактом сопоставима с рабочей площадью, что снижает обнаружительную способность и вносит большой вклад в общую емкость прибора.

Нами предлагается мостиковая (air-bridge) конструкция InAs/InAsSbP-фотоприемника, которая представляет собой две отдельные мезоструктуры с перекинутым между ними воздушным металлическим контактом. Ранее аналогичная конструкция была реализована на гетероструктурах на основе GaSb и его твердых растворов [13]. Отличительной особенностью данной конструкции является то, что контактная площадка для сборки выведена на отдельно стоящую, электрически изолированную

диэлектриком опорную мезу. Это обеспечивает минимальное затенение фоточувствительной области. Для уменьшения емкости прибора и, соответственно, увеличения его быстродействия формируется фоточувствительная площадка диаметром ≤ 100 мкм. Воздушный тоннель (протрав) под металлической балкой обеспечивает электрическую изоляцию слоев структуры. Использование такой конструкции позволяет изготавливать контактную площадку для сборки большого размера $\sim 200 \times 200$ мкм.

В настоящей работе фотоприемники созданы на основе гетероструктур InAs/InAsSbP, выращенных методом газовой фазной эпитаксии (MOCVD). Преимущество данных гетероструктур — наличие “широкозонного” окна InAsSbP с шириной запрещенной зоны $E_g \sim 0.6$ эВ, что существенно расширяет диапазон спектральной чувствительности в коротковолновой области. Гетероструктуры InAs/InAsSbP сформированы на подложках *n*-InAs (111): выращивался автоэпитаксиальный нелегированный слой *n*-InAs толщиной 7—8 мкм с концентрацией носителей 1×10^{16} см⁻³, затем получали широкозонный слой InAs_{0.27}Sb_{0.23}P_{0.50} *p*-типа проводимости с концентрацией $\sim 1 \times 10^{18}$ см⁻³ толщиной ~ 1 мкм. В представленной гетероструктуре *p*-*n*-переход располагается в активной области *n*-InAs на расстоянии 1.5—2.0 мкм от гетерограницы InAsSbP/InAs. Сдвиг *p*-*n*-перехода в активную область происходит за счет диффузии цинка из широкозонного слоя в нелегированный слой InAs и изменения проводимости части слоя с *n*- на *p*-тип, что подтверждается измерением тока, наведенного электронным зондом (EBIC).

Фотоприемники мостиковой конструкции (рис. 1) изготовлены на основе полученных гетероструктур InAs/InAsSbP с помощью методов стандартной оптической литографии. При получении диэлектрических и металлических слоев использован метод взрывной литографии. Для изоляции контактной площадки от опорной мезы создавалась диэлектрическая подкладка из двухкомпонентной системы материалов TiO₂-SiO₂ нанесенной методом магнетронного распыления. Формирование омического контакта к слою InAsSbP проводилось напылением системы Cr-Au-Ni-Au методом высоковакуумного термического испарения. Вывод омического контакта на опорную мезу также осуществлялся методом термического испарения системы Cr-Au. Полученная металлическая балка утолщалась с помощью селективного гальванического осаждения золота до 2—3 мкм. Следует отметить, что за счет краевого эффекта, наблюдаемого при электрохимическом осаждении, образуется “швеллер”, т. е. балка имеет ребра жесткости, что увеличивает ее механическую прочность.

Метод жидкостного химического травления использован для создания мезоструктур и разделительных канавок. Для травления InAs/InAsSbP-гетероструктур применялся травитель (HBr:H₂O₂) на основе известной системы Br:HBr, который позволяет получать зеркальную гладкую поверхность и минимальные токи утечки. Сплошной тыльный контакт формировался после утонения подложки путем послойного напыления системы Cr-Au-Ni-Au и системы Cr-Au методом высоковакуумного термического испарения.

Чип фотоприемника монтировался на корпус ТО-18 из никелевого сплава с золочением. Монтаж осуществлялся по технологии “чип на плате” [14] с помощью токопроводящего клея, что обеспечивало электрический контакт со стороны подложки *n*-InAs и теплоотвод. К контактной площадке методом контактной сварки приваривалась золотая проволока диаметром 20 мкм.

Изучение динамики фотоотклика InAs/InAsSbP-фотоприемников проводилось в два этапа. На первом (подготовительном) измерялись характеристики импульсного источника лазерного излучения на основе одномодового лазерного диода мезополосковой конструкции с шириной излучающей апертуры 5 мкм, длиной волны излучения 1550 нм. Полупроводниковый лазер накачивался импульсами тока длительностью ≤ 500 пс на уровне половины амплитуды (FWHM) и частотами следования от 100 до 700 кГц. Излучение полупроводникового лазера с помощью пары асферических линз вводилось в приемное оптическое волокно быстродействующего *p-i-n* InGaAs-фотоприемника New Focus 1444-50 с частотной полосой > 20 ГГц. Форма сигнала фотоприемника регистрировалась с помощью стробоскопического модуля Agilent 86117A с частотной полосой 50 ГГц. Средняя оптическая мощность последовательности оптических импульсов измерялась с помощью датчика Ophir 3A-P-FS-12, обеспечивающего разрешение 1 мкВт. Из измеренных формы оптического сигнала и средней мощности определялась зависимость оптической мощности от времени полупроводникового лазера. На втором этапе проводились измерения фотоответа экспериментальных образцов InAs/InAsSbP-фотоприемников. Для этого образцы фотоприемников в корпусе ТО-18 монтировались на высокочастотную линию (ВЧ) с SMA-выходом. ВЧ-линия обеспечивала подачу напряжения смещения на фотоприемник в диапазоне $U_{rev} = 0—0.3$ В и служила согласованной (50 Ом) нагрузкой. Сигнал с ВЧ-линии регистрировался с помощью осциллографа. Ожидаемая частотная полоса исследуемых

фотоприемников ≤ 3 ГГц, поэтому для измерений использован осциллограф Agilent 54855A с частотной полосой 6 ГГц. Излучение полупроводникового лазера с помощью пары асферических линз фокусировалось на излучающую площадку фотоприемников. Используемая схема обеспечивала увеличение 1:1, размер пятна засветки в фокальной плоскости $\sim 5\text{--}7$ мкм. Для юстировки положения площадки фотоприемника относительно сфокусированного пятна засветки от полупроводникового лазера использован трехкоординатный механический линейный транслятор, обеспечивающий точность позиционирования 1 мкм.

Результаты и их обсуждение. Ключевой этап создания фотоприемников мостиковой конструкции — получение воздушного тоннеля под металлическим мостиком, обеспечивающего электрическую изоляцию слоев гетероструктуры между фоточувствительной и опорной мезами. Для формирования тоннеля необходимо провести травление мезоструктуры на достаточную глубину, от которой напрямую зависит механическая прочность конструкции.

При жидкостном химическом травлении происходит травление мезоструктуры в глубину и латеральное травление под металлической балкой. При этом на получение протрава под балкой оказывает влияние как ширина самой балки, так и физико-химические процессы, протекающие в травителе. Экспериментально установлено, что наличие открытых участков золота в травителе $\text{HBr}:\text{H}_2\text{O}_2$ оказывает негативное влияние на ход процесса и затрудняет латеральное травление под балкой. Поэтому при создании фотоприемников мостиковой конструкции на основе гетероструктур $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$ использовалась топология прибора, позволяющая полностью исключить контакт металла как с травителем, так и с полупроводником. В результате получены фотоприемники механически прочной мостиковой конструкции (рис. 1).

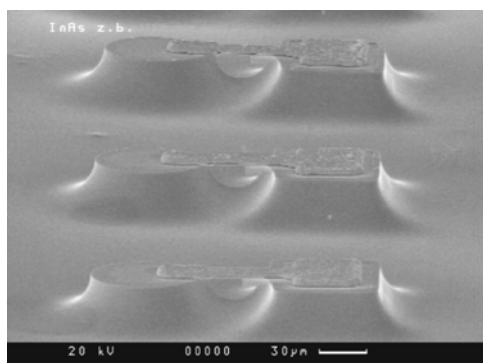


Рис. 1. СЭМ-изображение мостиковых фотоприемников на основе гетероструктуры $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$

Распределения спектральной чувствительности исследуемых фотоприемников на основе $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$ -гетероструктур представлены на рис. 2, *а*. Как видно, длина волны длинноволновой границы чувствительности (10 % от максимума) 3.8 мкм при комнатной температуре. Разработанные фотоприемники обладают максимальной спектральной чувствительностью в диапазоне 2.8—3.1 мкм, где токовая монохроматическая чувствительность $S_I = 1.0\text{--}1.2$ А/Вт. Исследование вольт-амперных характеристик (ВАХ) показало, что темновой ток для различных образцов составляет $I_d = 2\text{--}3$ мкА при малых обратных смещениях $U_{\text{rev}} < 0.02$ В и $I_d = 0.2\text{--}0.26$ мА при $U_{\text{rev}} = 0.4$ В (рис. 2, *б*). Величина отсечки в прямой ветви ВАХ 0.4 В. Дифференциальное сопротивление фотоприемников $R_0 = 1.0\text{--}5.6$ кОм. Измерения характеристик импульсного источника лазерного излучения на основе одномодового лазерного диода мезополосковой конструкции продемонстрировали, что длительность оптического импульса полупроводникового лазера на уровне FWHM 60 пс, а пиковая мощность 100 мВт не зависит от частоты (рис. 3, кривая 4). При исследовании быстродействия получены осциллограммы фотоответа $\text{InAs}/\text{InAsSbP}$ -фотоприемников при засветке импульсным лазерным излучением с $\lambda = 1.55$ мкм различных участков фоточувствительной мезы фотоприемника (кривые 1—3). Импульс фотоответа изучен при различных вариантах фокусировки лазерного излучения — в центре фоточувствительной площадки, при смещении на 10 мкм ее от центра и на крае. Как видно, при фокусировке в центре мезы (кривая 1) либо на небольшом расстоянии от центра (кривая 2) импульсы фотоответа различаются незначительно. Однако при фокусировке на крае мезы (кривая 3) чувствительность на спаде

сигнала существенно выше. Эта закономерность, полагаем, связана с засветкой подложки InAs, когда часть носителей заряда диффундирует из подложки к p - n -переходу и вносит свой вклад в фотоответ. Кроме того, на рис. 3 наблюдается задержка нарастания импульса фотоответа около 20 пс по отношению к импульсу лазера. Данная задержка связана со временем дрейфа носителей через обедненную область, которое по нашим оценкам при толщине активной области 7–8 мкм составляет именно несколько десятков пикосекунд. Быстродействие фотоприемника $\tau_{0.1-0.9} = 200$ пс определено по фронту нарастания импульса фотоотклика. Затыжка на спаде сигнала может быть результатом несогласованности измерительного тракта.

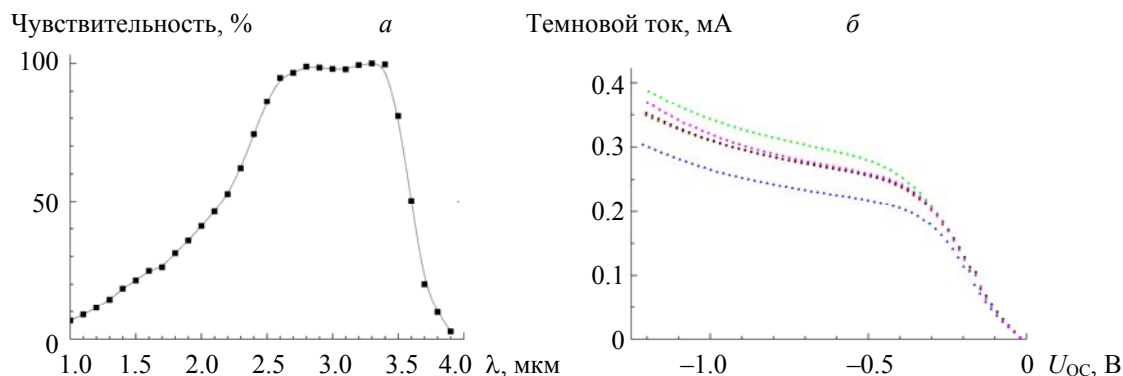


Рис. 2. Распределение спектральной чувствительности (а) и типовая зависимость темнового тока от напряжения обратного смещения (б) для пяти образцов InAs/InAsSbP-фотоприемников

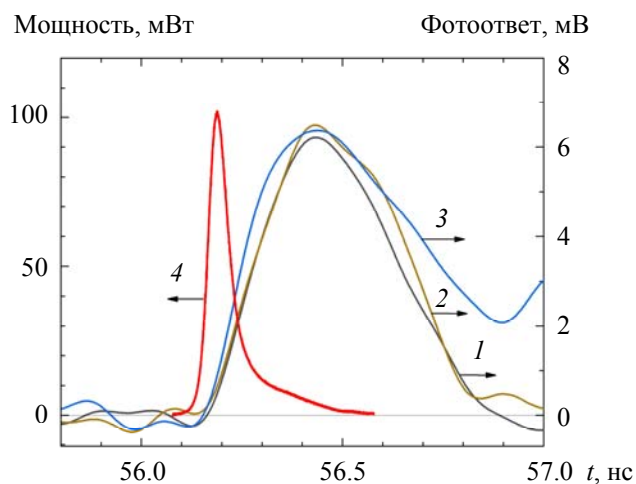


Рис. 3. Импульсы фотоответа при засветке лазером различных областей фотоприемника (1 — центр, 2 — смещение на 10 мкм от центра, 3 — край мезы) и оптический импульс используемого полупроводникового лазера (4)

На рис. 4 представлены импульсы фотоответа при различных напряжениях обратного смещения U_{rev} . Фокусировка лазерного излучения проводилась в центр чувствительной площадки фотоприемника. Как видно, амплитуда сигнала сильно зависит от U_{rev} : при изменении U_{rev} от 0 до 0.3 В максимальное значение фотоответа возрастает от 0.8 до 32 мВ. Это объясняется тем, что при приложении обратного смещения к p - n -переходу увеличивается ширина области пространственного заряда и больше падающих фотонов преобразуются в электрический ток. В то же время при изменении U_{rev} от 0 до 0.3 В время нарастания импульса $\tau_{0.1-0.9}$ увеличивается с 200 до 400 пс. Следовательно, незначительное увеличение напряжения обратного смещения до $U_{rev} = 0.3$ В ведет к некоторому снижению быстродействия фотоприемника. Это может быть связано с конечным временем дрейфа носителей

заряда из расширенной за счет приложения напряжения области объемного электрического поля p - n -перехода. В качестве ограничивающего фактора может выступать недостаточно точное высокочастотное согласование монтажа исследуемого фотоприемника с измерительным трактом на входе в осциллограф.

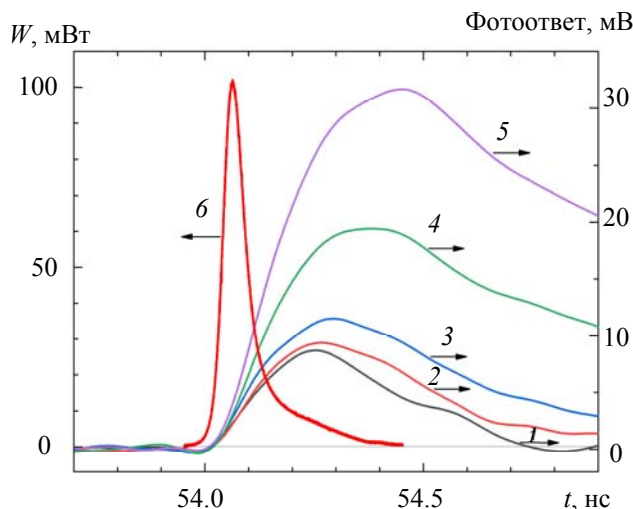


Рис. 4. Импульсы фототока при засветке центра чувствительной площадки фотоприемника для напряжений смещения $U_{\text{rev}} = 0$ (1), 0.05 (2), 0.1 (3), 0.2 (4) и 0.3 В (5) и оптический импульс используемого полупроводникового лазера (6)

Заключение. Созданы мостиковые фотоприемники на основе гетероструктур InAs/InAsSbP для спектрального диапазона 1.1—3.8 мкм. В процессе разработки постростовой технологии обнаружено, что только в случае полной электрической изоляции золотого контакта при травлении можно добиться механической прочности мостиковой конструкции фотоприемника. Разработанные фотоприемники обладают максимальной спектральной чувствительностью в диапазоне 2.8—3.1 мкм и дифференциальным сопротивлением в нуле смещения $R_0 = 1.0$ —5.6 кОм. Темновой ток составляет 2—3 мкА при малых обратных смещениях $U_{\text{rev}} < 0.02$ В, емкость лучших приборов $C = 3.4$ —3.6 пФ при $U_{\text{rev}} = 0$ В. С помощью InGaAsP/InP-лазера с длиной волны 1.55 мкм измерено быстродействие фотоприемника 200 пс. По мере подачи небольшого напряжения обратного смещения $U_{\text{rev}} \leq 0.3$ В амплитуда фототока возрастает, однако быстродействие фотоприемника снижается, что, вероятно, связано с конечным временем дрейфа носителей заряда из расширенной области объемного заряда, а также с недостаточно точным высокочастотным согласованием измерительного тракта.

- [1] E. Tournie, A. N. Baranov. *Semicond. and Semimetals*, **86** (2012) 183—226
- [2] L. J. Mawst, D. Botez. *IEEE Photon. J.*, **14**, N 1 (2022) 1508025
- [3] Б. Матвеев. *Фотоника*, **51**, № 3 (2015) 152—164
- [4] А. В. Сукач, В. В. Тетеркин, С. В. Старый, Н. В. Зотова, С. А. Карандашев, Б. А. Матвеев, М. А. Ременный, Н. М. Стусь, Г. Н. Талалакин. Тез. докл. XVII междунар. науч.-тех. конф. по фотозлектронике и приборам ночного видения, 25—28 мая 2004 г., Москва, Россия (2004) 29
- [5] С. С. Кижаяев, М. П. Михайлова, С. С. Молчанов, Н. Д. Стоянов, Ю. П. Яковлев. Письма в ЖТФ, **24**, № 7 (1998) 1—7 [S. S. Kizhaev, M. P. Mikhailova, S. S. Molchanov, N. D. Stoyanov, Yu. P. Yakovlev. *Tech. Phys. Lett.*, **24** (1998) 247—249]
- [6] A. R. Marshall, P. J. Ker, A. Krysa, J. P. David, C. H. Tan. *Opt. Express*, **19**, N 23 (2011) 23341(1—9)
- [7] B. Chen, Y. Chen, Z. Deng. *Photonics*, **8**, N 14 (2021) 2—19
- [8] Y. Chen, X. Chai, Z. Xie, Z. Deng, N. Zhang, Y. Zhou, Z. Xu, J. Chen, Y. Zhou, B. Chen. *J. Light-wave Technol.*, **38** (2020) 939—945

-
- [9] Z. Xie, J. Huang, X. Chai, Z. Deng, Y. Chen, Q. Lu, Z. Xu, J. Chen, Y. Zhou, B. Chen. *Opt. Express*, **28** (2020) 36915—36923
- [10] J. Huang, Z. Shen, Z. Wang, Z. Zhou, B. Peng, W. Liu, Y. Chen, B. Chen. *IEEE Electron. Dev. Lett.*, **43**, N 5 (2022) 745—748
- [11] Е. В. Куницына, А. А. Пивоварова, И. А. Андреев, Г. Г. Коновалов, Э. В. Иванов, Н. Д. Ильинская, Ю. П. Яковлев. *ФТП*, **55**, № 7 (2021) 607—613 [E. V. Kunitsyna, A. A. Pivovarova, I. A. Andreev, G. G. Konovalov, E. V. Ivanov, N. D. P'inskaya, Yu. P. Yakovlev. *Semiconductors*, **55**, N 7 (2021) 601—607]
- [12] И. А. Андреев, О. Ю. Серебренникова, Н. Д. Ильинская, А. А. Пивоварова, Г. Г. Коновалов, Е. В. Куницына, В. В. Шерстнев, Ю. П. Яковлев. *ФТП*, **49**, № 12 (2015) 1720—1726 [I. A. Andreev, O. Y. Serebrennikova, N. D. P'inskaya, A. A. Pivovarova, G. G. Konovalov, E. V. Kunitsyna, V. V. Sherstnev, Yu. P. Yakovlev. *Semiconductors*, **49**, N 12 (2015) 1671—1677]
- [13] 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 (2013) 1109—1115 [I. A. Andreev, O. Y. Serebrennikova, G. S. Sokolovskii, V. V. Dudelev, N. D. P'inskaya, G. G. Konovalov, E. V. Kunitsyna, Yu. P. Yakovlev. *Semiconductors*, **47** (2013) 1103—1109]
- [14] *Chip on Board: Technology for Multichip Modules*, Ed. John H. Lau, New York, Springer (1994)