

Высокотемпературные фотодиоды на основе гетероструктур n -InAsSbP/InAs/ p -InAsSbP

© А.А. Климов, Р.Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный

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

E-mail: a.klimov@mail.ioffe.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 24 июня 2025 г.

Принята к публикации 18 сентября 2025 г.

Представлены результаты разработки и исследования фотодиодов на основе гетероструктуры n -InAs/ n -InAsSbP/InAs/ p -InAsSbP в интервале температур 125–500 К. Обсуждаются конструктивные особенности эпитаксиальной структуры и чипа фотоприемника, которые обеспечили значения токовой чувствительности и обнаружительной способности $S_i = 1.6 \text{ A/Bt}$ и $D^* = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ при комнатной температуре и $S_i > 0.1 \text{ A/Bt}$ при $T = 500 \text{ K}$.

Ключевые слова: средневолновый фотодиод, фотодиод InAs, фотодиоды InAsSb, высокотемпературные фотодиоды, гетероструктура InAsSbP/InAs, FSI фотодиод.

DOI: 10.61011/FTP.2025.06.61568.8070

1. Введение

Фотонные фотоприемники, работающие в средневолновом ИК диапазоне длин волн ($\lambda = 2.5$ –6 мкм), используются во многих приборах газового анализа и низкотемпературной пирометрии, таких как инфракрасные датчики метана и природного газа, алкотестеры, алкозамки и алкорамки, датчики пожарной безопасности и быстродействующие низкотемпературные пирометры. Продолжающееся развитие данных приборов сопровождается трендом на уменьшение размеров, веса и энергопотребления используемых фотоприемных устройств (минимизация SWaP — Scale, Weight and Power). Это формирует запрос на фотоприемники с достаточно высокими характеристиками, которые бы позволили отказаться от систем для их охлаждения или термостабилизации. Ответ на данный запрос нашел отражение в термине „высокотемпературные фотоприемники“ (англ. High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors (HOT Photodetectors)) [1], используемом для обозначения фотоприемников, работающих при температурах, близких или выше комнатной [2], а также для фотоприемников, в которых достигается режим ограничения фоном (BLIP режим) при $T \geq 150 \text{ K}$.

Ранее мы сообщали о разработке и исследовании фотодиодов (ФД) на основе двойной гетероструктуры (ДГС) n -InAsSbP/InAs/ p -InAsSbP с вводом излучения со стороны верхнего слоя p -InAsSbP (геометрия „FSI“ — front side illuminated), выращенных на подложках n^+ -InAs(100) методом жидкокристаллической эпитаксии (ЖКЭ), фоточувствительных в спектральной области $\lambda = 2$ –4 мкм и работающих в интервале температур 200–500 К [3,4]. В данных работах было показано достижение значения обнаружительной способности $D^* = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ (300 К), что является одним из наилучших результатов среди опубликованных

данных. Однако полученные фотодиоды демонстрировали резкое падение токовой чувствительности при температурах выше 300 К (до $S_i = 0.01 \text{ A/Bt}$, $T = 500 \text{ K}$), что ограничивало перспективы их использования в инфракрасных датчиках, работающих без принудительного охлаждения при повышенных температурах.

Данная работа посвящена разработке фотоприемников на основе двойной гетероструктуры (ДГС) n -InAsSbP/InAs/ p -InAsSbP с вводом излучения через слой p -InAsSbP, работающих в диапазоне длин волн $\lambda = 2$ –4 мкм, в которых предложенные решения по конструкции чипа фотоприемника обеспечили более слабую, чем ранее, температурную зависимость параметров ФД, что дало возможность для работы ФД при $T = 500 \text{ K}$ при достижении значения $S_i > 0.1 \text{ A/Bt}$.

2. Экспериментальные результаты

Эпитаксиальные гетероструктуры n -InAsSb/InAs/ p -InAsSbP были получены методом ЖКЭ на подложках n^+ -InAs(100) и были аналогичны описанным в работах [3,4]. Построчная обработка проводилась методами стандартной фотолитографии для получения одиночных элементов (чипов) фотодиодов с вводом излучения через широкозонный слой p -InAsSbP (конструкция „FSI“ — front-side illuminated). Размер фоточувствительной области чипа составлял 390×390 мкм; толщина — около 40 мкм; были сформированы сплошной контакт к подложке n^+ -InAs и разветвленный контакт сложной формы с большим отношением периметр/площадь к слою p -InAsSbP. Чипы монтировались на подкристалльную плату и далее на корпус ТО-18.

На рис. 1 приведены спектры фотолюминесценции (ФЛ) эпитаксиальных структур из данной работы и работы [5], а также нелегированной подложки n -InAs

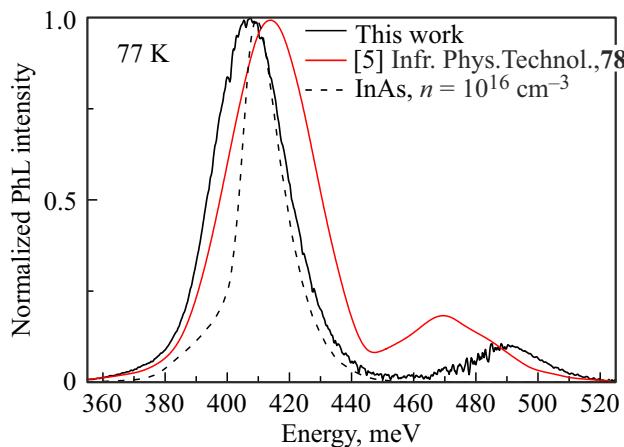


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции гетероструктуры n -InAsSbP/InAs/ p -InAsSbP из данной работы; работы [5], подложки чистого n -InAs ($n^0 = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) при 77 К.

($n = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) при 77 К. Спектры ФЛ гетероструктур состоят из двух полос, ответственных за рекомбинацию в фоточувствительной области InAs (с максимумом около 410 мэВ) и широкозонном слое p -InAsSbP (с максимумом 470–490 мэВ).

Спектры ФЛ в данной работе и в работе [5] имеют ряд отличий, которые позволяют сделать следующие предположения о свойствах полученных гетероструктур: фоточувствительная область характеризуется меньшим, чем в работе [5], уровнем легирования донорной примесью, о чем свидетельствует близость максимума ее ФЛ и максимума ФЛ нелегированного n -InAs; слой p -InAsSbP характеризуется большим значением ширины запрещенной зоны. Указанные свойства гетероструктуры

позволяют ожидать уменьшения значений темновых токов, что будет подтверждено данными, представленными далее (рис. 4).

На рис. 2 представлены спектры токовой чувствительности в интервале температур 125–300 К (a), 300–500 К и данные из работы [4] при $T = 500$ К (b). Спектры фоточувствительности в области низких температур (рис. 2, a) имеют форму с ярко выраженным максимумом, который мы связываем с многопроходным поглощением излучения в фоточувствительной области при его отражении от зеркального контакта к подложке (катода). Данный эффект приводит к увеличению токовой чувствительности в области оптической прозрачности подложки, причем его влияние уменьшается с ростом температуры из-за уменьшения оптического пропускания подложки.

При повышении температуры (рис. 2, b) происходит уменьшение токовой чувствительности, которое отчасти связано с уменьшением эффективности сбора фотогенерированных носителей в условиях, когда темновое сопротивление p – n -перехода приближается к значениям последовательного сопротивления между областью разделения электронно-дырочных пар и анодным контактом [6]. Этим же объясняется и относительно низкая токовая чувствительность ФД на основе идентичной структуры с точечным анодным контактом, приведенная на рис. 2, b и 3, a [3,4].

На рис. 3, a приведены температурные зависимости токовой чувствительности ФД с фоточувствительной областью InAs как в геометрии „FSI“, так и с вводом излучения через подложку (BSI — back side illuminated) [3,5]. Наиболее „слабая“ температурная зависимость наблюдается в образцах BSI геометрии, которые имеют наименьшую толщину чипа и, как следствие, наименьшее погло-

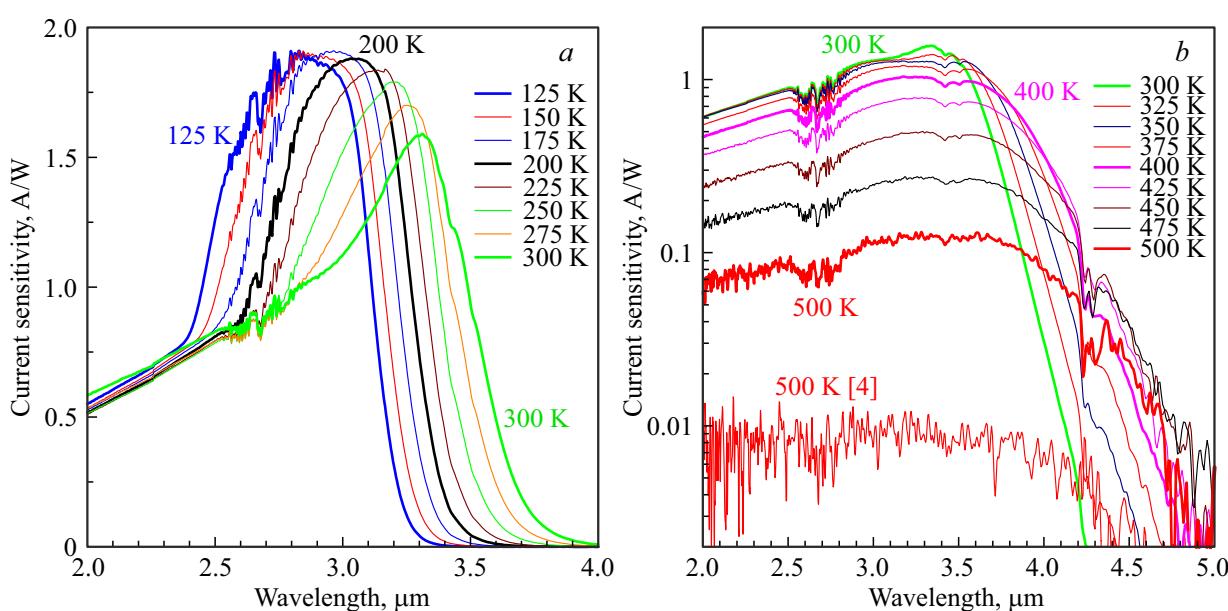


Рис. 2. Спектры токовой чувствительности ФД в интервале температур 125–300 К (a), 300–500 К и образца [4] при $T = 500$ К (b).

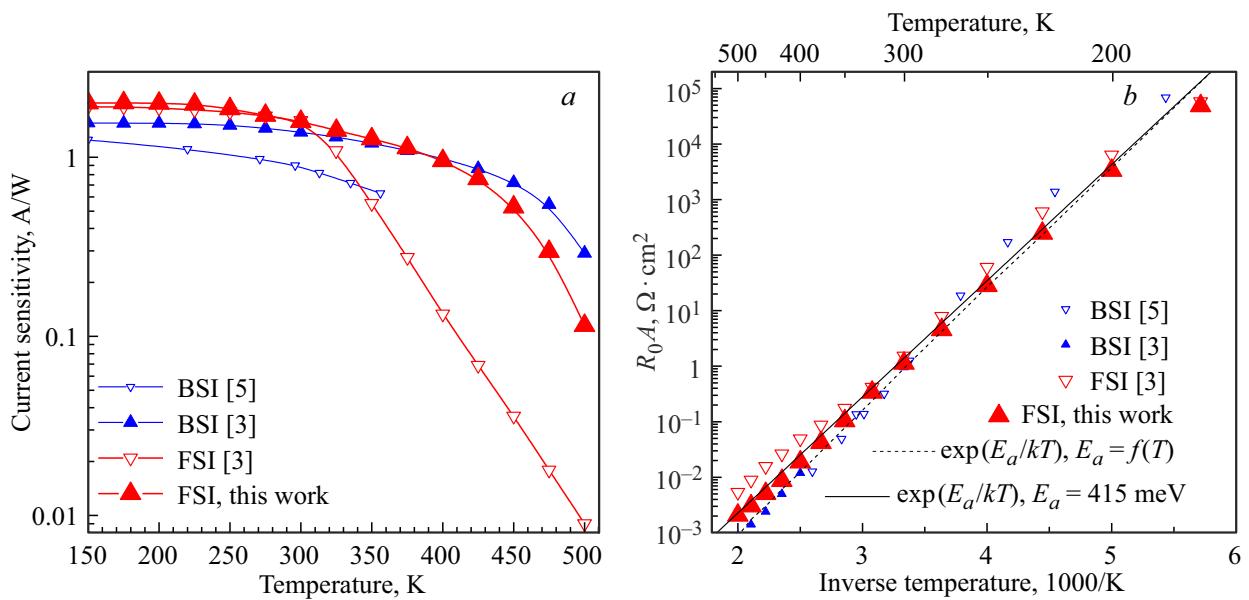


Рис. 3. Температурные зависимости токовой чувствительности в максимуме S_i (а) и произведения $R_0 \cdot A$ (б) фотодиодов с фоточувствительной областью InAs с вводом излучения через подложку (BSI) и через эпитаксиальный слой (FSI).

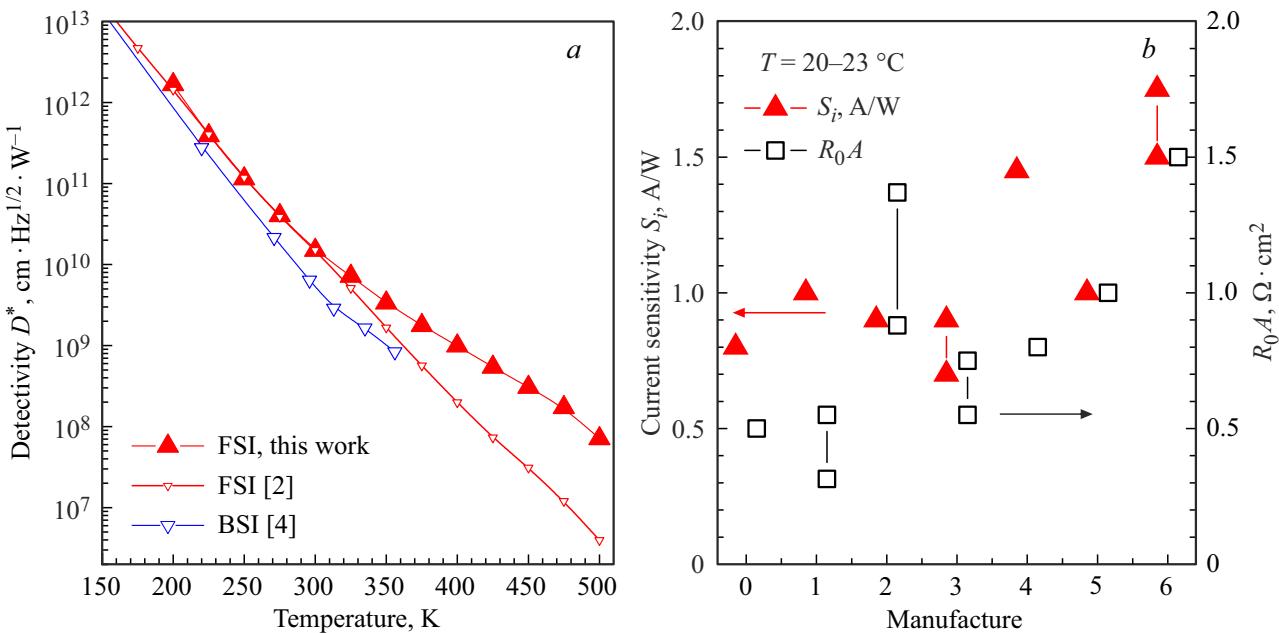


Рис. 4. Температурные зависимости обнаружительной способности в сравнении с результатами предыдущих работ (а); сравнение полученных значений токовой чувствительности и произведения $R_0 \cdot A$ с аналогами (б), номера на оси X соответствуют номерам разработчиков из таблицы.

щение в подложке, а также сплошной анодный контакт, что минимизирует уменьшение эффективности сбора фотогенерированных носителей. Сравнение с данными работы [3] позволяет предположить, что уменьшение токовой чувствительности из-за данного эффекта в настоящей работе имеет место при температурах $> 400 \text{ K}$.

На рис. 3, б приведены температурные зависимости произведения темнового сопротивления на площадь активной области ($R_0 \cdot A$) вышеуказанных ФД. Все они ха-

рактеризуются экспоненциальной зависимостью произведения $R_0 \cdot A$ с энергией активации, близкой к значению ширины запрещенной зоны фоточувствительной области (n -InAs), что свидетельствует о диффузионном механизме токопротекания в диапазоне 175–500 K. Отличия, которые возникают в области повышенных температур, могут быть объяснены эффектами сгущения линий тока в ФД к области под контактом с точечным и разветвленным (но не сплошным) контактами. Это подтверждает

Сравнение с аналогами

Разработчик	S_i , токовая чувствительность, А/Вт	Произведение $R_0 \cdot A$, $\Omega \cdot \text{см}^2$	Обнаружительная способность D^* , $\text{см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$
0. Vigo System SA (Польша)	0.8	0.5	$7 \cdot 10^9$
1. Hamamatsu (Япония)	1	0.31–0.55	$(3\text{--}4.5) \cdot 10^9$
2. Laser Components (Германия)	0.9	0.88–1.37	$1 \cdot 10^{10}$
3. Vigo System SA (Польша)	0.7–0.9	0.55–0.75	$(5\text{--}7) \cdot 10^9$
4. Образец из работы [7] (Китай)	1.45	0.8	$1.6 \cdot 10^{10}$ $1 \cdot 10^{10}$ (из указанных S_i и $R_0 \cdot A$)
5. Образец из работы [8] (ФТИ Иоффе)	1	1	$8 \cdot 10^9$
6. Данная работа (ФТИ Иоффе)	1.5–1.75	1.5	$1.5 \cdot 10^{10}$

ранее сделанное предположение о причине уменьшения токовой чувствительности FSI фотодиодов с ростом температуры.

На рис. 4, *a* приведены температурные зависимости обнаружительной способности D^* вместе с результатами наших предыдущих работ.

Полученное в работе увеличение обнаружительной способности связано с увеличением темнового сопротивления из-за отмеченных выше свойств эпитаксиальной структуры (по сравнению с результатами работы [5]) и увеличением токовой чувствительности в чипе с разветвленным анодным контактом (по сравнению с результатами работы [3]).

На рис. 4, *b* и в таблице представлено сравнение полученных в работе значений токовой чувствительности и произведения $R_0 \cdot A$ с ближайшими аналогами: фотодиодами с фоточувствительной областью из InAs (разработчики „1–6“) и фоточувствительной областью на основе HgCdTe для той же области спектра (разработчик „0“). Проведенное сравнение показывает перспективность использования гетероструктуры *n*-InAsSb/InAs/*p*-InAsSbP для создания ФД с разветвленным анодом для спектральной области 2–4 мкм.

3. Заключение

Были получены и исследованы фотоэлектрические свойства экспериментальных образцов фотодиодов FSI конструкции на основе двойной гетероструктуры *n*-InAs/*n*-InAsSbP/*n*-InAs/*p*-InAsSbP с разветвленным анодным контактом в интервале температур 125–500 К. Предложены решения по свойствам эпитаксиальной структуры и конструкции чипа, которые обеспечили значения токовой чувствительности и обнаружительной способности $S_i = 1.6 \text{ А/Вт}$

и $D^* = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ при комнатной температуре и $S_i > 0.1 \text{ А/Вт}$ при $T = 500 \text{ К}$.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Piotrowski, A. Rogalski. *High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors* (SPIE Press, Bellingham, WA, USA, 2007).
- [2] Г.Ю. Сотникова, С.А. Александров, Г.А. Гаврилов. Успехи прикл. физики, **10** (4), 389 (2022). DOI: 10.51368/2307-4469-2022-10-4-389-403
- [3] М.А. Ременный, А.А. Климов, Р.Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, А.А. Усикова. Тез. докл. XXVII Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения (М., 2024) с. 76.
- [4] А.А. Климов, Р.Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный. Тез. докл. конф. ФизикА СПб (Санкт-Петербург, 2024) с. 188.
- [5] 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., **78**, 249 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.08.013>
- [6] Н.Д. Ильинская, А.Л. Закгейм, С.А. Карандашев, Б.А. Матвеев, В.И. Ратушный, М.А. Ременный, А.Ю. Рыбальченко, Н.М. Стус', А.Е. Черняков. ФТП, **46** (5), 708 (2012).
- [7] Hongyu Lin, Hao Xie, Yan Sun, Shuhong Hu, Ning Dai. J. Cryst. Growth, **617**, 127293 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2023.127293>
- [8] P.N. Brunkov, N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, N.M. Latnikova, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, A.S. Petrov, M.A. Remennyi, E.N. Sevostyanov, N.M. Stus. Semiconductors, **48** (10), 1359 (2014). DOI: 10.1134/S1063782614100066

Редактор Г.А. Оганесян

High operating temperature photodiodes based on n -InAsSbP/InAs/ p -InAsSbP heterostructures

A.A. Klimov, R.E. Kunkov, T.S. Lukhmyrina,
B.A. Matveev, M.A. Remennyy

Ioffe institute,
194021 St. Petersburg, Russia

Abstract The results of development and research of photodiodes based on n -InAs/ n -InAsSbP/InAs/ p -InAsSbP heterostructure in the temperature range of 125–500 K are presented. The design features of the epitaxial structure and photodetector chip are discussed, which provided values of current sensitivity and detectability of $S_i = 1.6 \text{ A/W}$ and $D^* = 1.5 \cdot 10^{10} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2} \cdot \text{W}^{-1}$ at room temperature and $S_i > 0.1 \text{ A/W}$ at $T = 500 \text{ K}$.