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 $125-500\,\mathrm{K}$. Обсуждаются конструктивные особенности эпитаксиальной структуры и чипа фотоприемника, которые обеспечили значения токовой чувствительности и обнаружительной способности $S_i=1.6\,\mathrm{A/BT}$ и $D^*=1.5\cdot10^{10}\,\mathrm{cm}\cdot\Gamma\mathrm{u}^{1/2}\cdot\mathrm{BT}^{-1}$ при комнатной температуре и $S_i>0.1\,\mathrm{A/BT}$ при $T=500\,\mathrm{K}$.

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 $T \ge 150 \, {\rm K}$.

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 жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ), фоточувствительных в спектральной области $\lambda = 2-4$ мкм и работающих в интервале температур $200-500\,\mathrm{K}$ [3,4]. В данных работах было показано достижение значения обнаружительной способности $D^* = 1.5 \cdot 10^{10}\,\mathrm{cm} \cdot \Gamma \mathrm{n}^{1/2} \cdot \mathrm{Br}^{-1}(300\,\mathrm{K})$, что является одним из наилучших результатов среди опубликованных

данных. Однако полученные фотодиоды демонстрировали резкое падение токовой чувствительности при температурах выше $300\,\mathrm{K}$ (до $S_i=0.01\,\mathrm{A/Bt},\ T=500\,\mathrm{K}$), 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 $\lambda=2-4\,\mathrm{mkm}$, в которых предложенные решения по конструкции чипа фотоприемника обеспечили более слабую, чем ранее, температурную зависимость параметров ФД, что дало возможность для работы ФД при $T=500\,\mathrm{K}$ при достижении значения $S_i>0.1\,\mathrm{A/Bt}$.

2. Экспериментальные результаты

Эпитаксиальные гетероструктуры *p*-InAsSbP были получены методом ЖФЭ на подложках n^+ -InAs(100) и были аналогичны описанным в работах [3,4]. Постростовая обработка проводилась методами стандартной фотолитографии для получения одиночных элементов (чипов) фотодиодов с вводом излучения через широкозонный слой *p*-InAsSbP (конструкция "FSI" 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 слою *p*-InAsSbP. Чипы монтировались подкристальную плату и далее на корпус ТО-18.

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

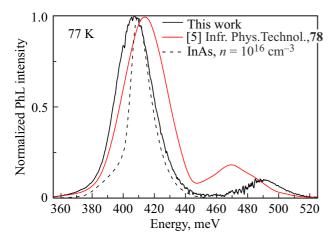


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции гетероструктуры n-InAsSbP/InAs/p-InAsSbP из данной работы; работы [5], подложки чистого n-InAs ($n^0 = 1 \cdot 10^{16} \, \mathrm{cm}^{-3}$) при 77 К.

 $(n=1\cdot 10^{16}~{\rm cm}^{-3})$ 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 $\Phi \Pi$ 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 $\Phi \Pi$ и максимума $\Phi \Pi$ 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 $125-300\,\mathrm{K}$ (a), $300-500\,\mathrm{K}$ и данные из работы [4] при $T=500\,\mathrm{K}$ (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 Φ Д на основе идентичной структуры с точечным анодным контактом, приведенная на рис. 2, b и 3, a [3,4].

На рис. 3, а 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-

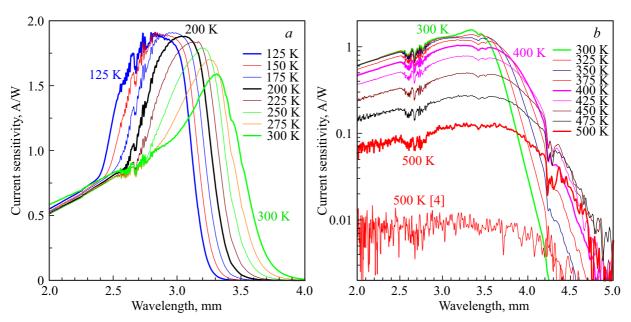


Рис. 2. Спектры токовой чувствительности Φ Д в интервале температур $125-300\,\mathrm{K}$ (a), $300-500\,\mathrm{K}$ и образца [4] при $T=500\,\mathrm{K}$ (b).

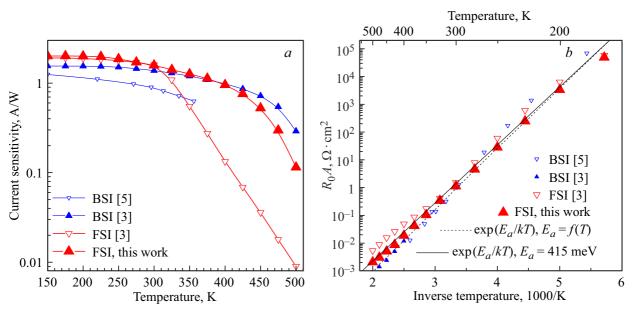


Рис. 3. Температурные зависимости токовой чувствительности в максимуме S_i (a) и произведения $R_0 \cdot A$ (b) фотодиодов с фоточувствительной областью InAs с вводом излучения через подложку (BSI) и через эпитаксиальный слой (FSI).

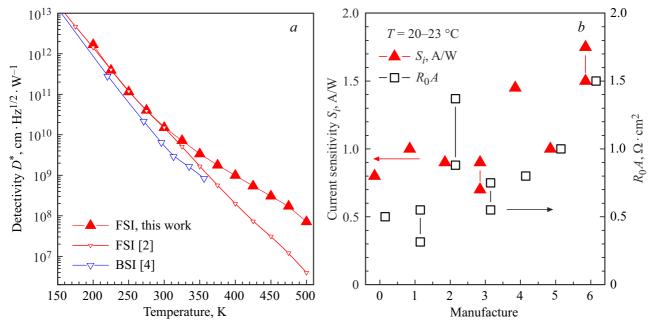


Рис. 4. Температурные зависимости обнаружительной способности в сравнении с результатами предыдущих работ (a); сравнение полученных значений токовой чувствительности и произведения $R_0 \cdot A$ с аналогами (b), номера на оси X соответствуют номерам разработчиков из таблицы.

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 К.

На рис. 3, b 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 $175-500 \, \text{K}$. 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

Разработчик	S_i , токовая чувствительность, А/Вт	Произведение $R_0 \cdot A$, $\Omega \cdot \text{cm}^2$	Обнаружительная способность D^* , см · Γ п $^{1/2}$ · Br^{-1}
0. Vigo System SA (Польша)	0.8	0.5	7 · 10 ⁹
1. Hamamatsu (Япония)	1	0.31-0.55	$(3-4.5) \cdot 10^9$
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	$(5-7)\cdot 10^9$
 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 · 10 ⁹
6. Данная работа (ФТИ Иоффе)	1.5-1.75	1.5	$1.5 \cdot 10^{10}$

Сравнение с аналогами

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 Φ Д 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-InAsSbP с разветвленным анодным контактом в интервале температур $125-500\,\mathrm{K}$. Предложены решения по свойствам эпитаксиальной структуры и конструкции чипа, которые обеспечили значения токовой чувствительности и обнаружительной способности $S_i=1.6\,\mathrm{A/BT}$

и $D^*=1.5\cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}\cdot \Gamma\mathrm{u}^{1/2}\cdot\mathrm{Br}^{-1}$ при комнатной температуре и $S_i>0.1\,\mathrm{A/BT}$ при $T=500\,\mathrm{K}.$

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Piotrowski, A. Rogalski. *High-Operating-Temperature Infra*red 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. Стусь, 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

loffe 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 $125-500\,\mathrm{K}$ are presented. The design features of the epitaxial structure and photodetector chip are discussed, which provided values of current sensitivity and detectability of $S_i = 1.6\,\mathrm{A/W}$ and $D^* = 1.5\cdot 10^{10}\,\mathrm{cm}\cdot\mathrm{Hz}^{1/2}\cdot W^{-1}$ at room temperature and $S_i > 0.1\,\mathrm{A/W}$ at $T = 500\,\mathrm{K}$.