

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук
Центр физики наногетероструктур
Лаборатория инфракрасной оптоэлектроники

Кунков Роман Эдуардович
«Свето- и фотодиоды на основе материалов $\text{InAs}_{(1-x)}\text{Sb}_x$ ($x \geq 0.15$)»

Специальность – 1.03.11 физика полупроводников
Научный доклад

Санкт-Петербург
2025

Научный руководитель:

Ременный Максим Анатольевич, ведущий научный сотрудник лаборатории инфракрасной оптоэлектроники ФТИ им. Иоффе, кандидат физико-математических наук.

Рецензент:

Пихтин Никита Александрович, ведущий научный сотрудник ФТИ им. А.Ф. Иоффе, кандидат физико-математических наук

Рецензент:

Журихина Валентина Владимировна, доцент Высшей школы фундаментальных физических исследований ФГАОУ ВО «СПбПУ», доктор физико-математических наук

Содержание

Введение	4
Цель и задачи работы	6
Апробация работы	7
Объекты и методы исследования	9
Экспериментальные образцы	9
Методы исследования фотоэлектрических и люминесцентных свойств в интервале температур 80 – 500 К	11
Спектральная селективность пироэлектрического приемника в Фурье-спектрометрии.	16
Программируемый драйвер светодиода.....	20
Результаты и их обсуждение	25
Длинноволновые ИК свето- и фотодиоды с активной областью на основе InAsSb_x ($x \geq 0.15$).....	25
Применение иммерсионных фотодиодов на основе InAsSb(P) в миниатюрных фотоприемных модулях с термоэлектрическим охладителем.	32
Применение иммерсионных свето- и фотодиодов на основе InAsSb(P) в недисперсионном инфракрасном газовом датчике	34
Заключение	40
Список литературы	42

ВВЕДЕНИЕ

Фотоприемники, работающие в длинноволновой ИК области спектра (LWIR: 8 – 14 мкм), являются ключевыми компонентами многих систем и приборов, таких как: системы тепловидения, тепlopеленгации и пирометрии, поскольку в данной спектральной области находится максимум излучения тел, разогретых до невысоких температур; газоаналитического оборудования, работающего на принципах инфракрасной спектроскопии для детектирования газов, имеющих полосы поглощения в данной области спектра (например, непредельные углеводороды и сложные органические соединения, такие как галогенсодержащие анестетики). При этом, возрастающие требования разработчиков устройств на основе данных компонентов, направленные на уменьшение размеров, веса и энергопотребления (тренд на минимизацию SWaP – Scale, Weight and Power) приводят к необходимости разработки свето- и фотодиодов, способных работать при комнатной или повышенных температурах.

Существующая элементная база длинноволновых фотонных фотоприемников представлена фотоэлектронными модулями на основе материалов КРТ (кадмий-ртуть-теллур) отечественного производства, работающими при криогенном охлаждении, и фотоприемниками зарубежного производства на основе материалов КРТ, работающими при термоэлектрическом охлаждении или комнатной температуре [1]. Фотоприемники на основе диодных гетероструктур с фоточувствительным слоем из твердого раствора $\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$ являются перспективной альтернативой как наиболее распространенным фотоприемникам на основе полупроводников КРТ [1, 2], так и фотоприемникам из полупроводников $\text{A}^{\text{III}}\text{B}^{\text{V}}$ на основе сверхрешеток [3, 4]. В зависимости от состава фоточувствительного слоя, фотоприемники из InAsSb могут работать

как в средневолновой (3 – 5 мкм) [5], так и длинноволновой (8 – 14 мкм) инфракрасной областях спектра [6].

В связи с вышесказанным, одной из задач работы является разработка и исследование семейства источников (светодиодов) и приемников (фотодиодов) ИК излучения на основе гетероструктур N-InAsSb/InAsSb_x/P-InAsSb ($0.3 \leq x \leq 0.45$), в конструкции чипа с вводом/выводом излучения через подложку («флип-чип») сочлененного с иммерсионными линзами - с «красными» границами фотоответа от 9.5 до 12.5 мкм, работающими как при термоэлектрическом охлаждении, так и при повышенных температурах.

Внедрение разработанных длинноволновых источников и приемников излучения требует их интеграции с сопутствующими электронными решениями, что приводит к задаче разработки усилителей для длинноволновых фотоприемников, микроконтроллеров обеспечивающих «интеллектуальную» обработку сигналов, быстродействующих драйверов для светодиодов, решений по термостабилизации компонентов – объединенных в рамках одного корпуса или одной платы. Более того, успешное внедрение разрабатываемых свето- и фотодиодов, в ряде случаев, оказывается наиболее вероятным в составе оптических датчиков, например, недисперсионных газовых датчиков, что требует интеграции свето- и фотодиодов, не только с электронными компонентами, но и пассивными оптическими элементами, такими как интерференционные фильтры и фокусирующие излучение элементы. Поэтому, в рамках данной работы, осуществлялась разработка электронных и конструктивных решений для пирометрических и оптических газовых датчиков.

Среди различных оптических газовых датчиков, на сегодняшний день, наибольшее распространение получили датчики на основе тепловых источников и приемников ИК излучения [8], характеризующиеся высоким энергопотреблением, низким быстродействием и относительно невысокой

чувствительностью. Также, используются инфракрасные (средневолновые) сенсоры, в которых используются фотодиоды и оптически возбуждаемые светодиоды на основе солей свинца [9], недостатком которых считается отсутствие долговременной стабильности. Использование свето- и фотодиодов на основе гетероструктур N-InAsSb/InAsSb_x/P-InAsSb, открыло новые возможности для создания недисперсионных газовых сенсоров, обеспечив их высокую селективность к газу, большой срок службы и чувствительность вплоть до единиц ppm [7]. Принимая во внимание имеющийся научно-технический задел ФТИ им. А.Ф. Иоффе по разработке оптических датчиков [10, 11, 12, 13] в задачи работы была включена работа по созданию малогабаритного недисперсионного датчика углекислого газа с высоким уровнем интегрированности оптических, оптоэлектронных и электронных компонентов.

Цель и задачи работы

Цель работы – разработка и исследование фотоэлектрических и люминесцентных свойств эпитаксиальных гетероструктур N-InAsSb(P)/n-InAsSb_x/P-InAsSb(P) и создание на их основе источников и приемников длинноволнового ИК излучения (LWIR: 8 – 12 мкм), работающих при комнатной температуре и термоэлектрическом охлаждении.

Для успешного достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- Разработка и получение гетероструктур с активной областью из InAsSb_x в области составов $0.3 \leq x \leq 0.45$;
- Разработка конструкции чипов и длинноволновых свето- и фотодиодов и изготовление их экспериментальных образцов;
- Разработка и создание установок для измерений: спектральных характеристик электролюминесценции и фоточувствительности; вольт-амперных и ватт-амперных зависимостей - в интервале температур 80 –

500 К; диаграмм направленности дальнего поля иммерсионных светодиодов;

- Исследование фотоэлектрических и люминесцентных свойств образцов эпитаксиальных структур и свето- и фотодиодов на их основе в интервале температур 80 – 500 К;
- Разработка конструктивных, электронных и программных решений и создание на их основе оптических датчиков для пирометрии и газового анализа.

Апробация работы

[1] Кунков Р. Э., Климов А. А., Матвеев Б. А., «Фотодиоды на основе $\text{InAs}_{0.6}\text{Sb}_{0.4}$ $\lambda_{0.1} = 11$ мкм (296 К)» 22я Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников опто- и наноэлектронике, 23 – 27 ноября 2020.

Расширенные тезисы: A A Klimov, R E Kunkov, A A Lavrov, N M Lebedeva, T S Lukhmyrina, B A Matveev, M A Remennyi, «Long-wave infrared $\text{InAs}_{0.6}\text{Sb}_{0.4}$ photodiodes grown on InAs substrates», Journal of Physics: Conference Series, **1851** (1), 012019 (2021).

[2] Kunkov R. E., Karandashev, S.A., Klimov A.A., Lebedeva N. M., Lukhmyrina T. S., Matveev B. A., Remennyi, M.A., Usikova A. A., «Long Wave Infrared ($\lambda_{0.5} \geq 12 \mu\text{m}$) photodetectors based on InAsSb_x ($x \geq 0.4$) solid solution», 10th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures 23 – 26 мая 2023 года

[3] С.А. Карандашев, А.А. Климов, Р.Э. Кунков, Н.М. Лебедева, Т.С. Лухмырина, Б.А. Матвеев, М.А. Ременный, «Длинноволновые ИК фотоприемники ($\lambda_{0.5} \geq 12 \mu\text{m}$) на основе твердых растворов InAsSb_x ($x \geq 0.4$) », Международная конференция ФизикА.СПб 2023, 23-27 октября 2023 года.

Расширенные тезисы: Кунков Р.Э., Климов А.А., Лебедева Н.М., Лухмырина Т.С., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Усикова А.А., «Длинноволновые ($\lambda_{0.1} = 10 \text{ мкм}$, 296 К) инфракрасные фотоприемники на основе твердого раствора $\text{InAsSb}_{0.38}$ », Оптика и спектроскопия, 2023, том 131, вып. 11.

[4] С.А. Карандашев, А.А. Климов, Р.Э. Кунков, Т.С. Лухмырина, М.А. Ременный, «Оптический сенсор углекислого газа на основе гетеродиодов из твердых растворов InAsSb(P) », Международная конференция Физика.СПб 2025, 20-24 октября 2025 года.

Расширенные тезисы: Кунков Р.Э., Климов А.А., Лухмырина Т.С., Ременный М.А., «Инфракрасный сенсор углекислого газа на основе свето- и фотодиодов из твердых растворов InAsSb(P) », Оптика и спектроскопия, в печати

[5] Kunkov R. E., Karandashev, S.A., Klimov A.A., Lukhmyrina T. S., Remennyu, M.A., « InAsSb solid solution optocouple for carbon dioxide analysis», 12th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures 20 – 23 мая 2025 года

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные образцы

Для получения длинноволновых ИК свето- и фотодиодов методом ЖФЭ на подложках нелегированного n^0 -InAs ориентации (100) были получены эпитаксиальные гетероструктуры, содержавшие: буферный градиентный слой N-InAsSb; фоточувствительную область InAsSb_x ($0.35 \leq x \leq 0.45$) толщиной 3.0 – 3.2 μm ; контактный слой P-InAsSb, легированный Zn. Подробно составы и толщины слоев гетероструктур описаны в таблице 1.

Таблица 1. Составы и параметры слоев гетероструктур

Слой	Назначение слоя	Состав слоя	Толщина, μm	Легирование
Структура №2052				
1	Буферный слой	InAsSb _{0.28}	2.8÷3.0	
2	Широкозонный п-слой	InAsSb _{0.32}	1.5÷1.7	
3	Активная область	InAsSb _{0.38}	2.3÷2.5	
4	Активная область, контактный р-слой	InAsSb _{0.32}	2.0÷2.5	Zn, $p = (1\div 2) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
Структура №2059				
1	Буферный слой	InAsSb _{0.28}	2.8÷3.0	
2	Широкозонный п-слой	InAsSb _{0.35}	1.5÷1.7	
3	Активная область	InAsSb _{0.43}	2.3÷2.5	
4	Активная область, контактный р-слой	InAsSb _{0.38}	2.0÷2.5	Zn, $p = (1\div 2) \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

Структура №2104				
1	Буферный слой	InAsSb _{0.28}	2.8÷3.0	
2	Широкозонный п-слой	InAsSb _{0.32}	1.5÷1.7	
3	Активная область	InAsSb _{0.41}	2.3÷2.5	Zn, $p = (3\div5)\times E17 \text{ cm}^{-3}$
4	Активная область, контактный р-слой	InAsSb _{0.38}	2.0÷2.5	Zn, $p = (1\div2)\times E18 \text{ cm}^{-3}$
Структура №2135				
1	Буферный слой	InAsSb _{0.28}	2.8÷3.0	
2	Широкозонный п-слой	InAsSb _{0.35}	1.5÷1.7	
3	Активная область	InAsSb _{0.43}	2.3÷2.5	Zn, $p = (3\div5)\times E17 \text{ cm}^{-3}$
4	Активная область, контактный р-слой	InAsSb _{0.38}	2.0÷2.5	Zn, $p = (1\div2)\times E18 \text{ cm}^{-3}$

Экспериментальные образцы чипов были получены методами многостадийной химической фотолитографии. Образцы «флип-чип» конструкции имели квадратную форму размером 250x250 μm и круглую мезу диаметром 100 или 140 μm , ограничивающую площадь фоточувствительной области и ввод/вывод излучения через подложку толщиной 20 – 40 мкм. Фотографии чипов представлены на рис. 1. Для получения экспериментальных образцов свето- и фотодиодов производилась иммерсионная стыковка полученных чипов с линзами из германия с просветляющим покрытием диаметром 3.5 мм.

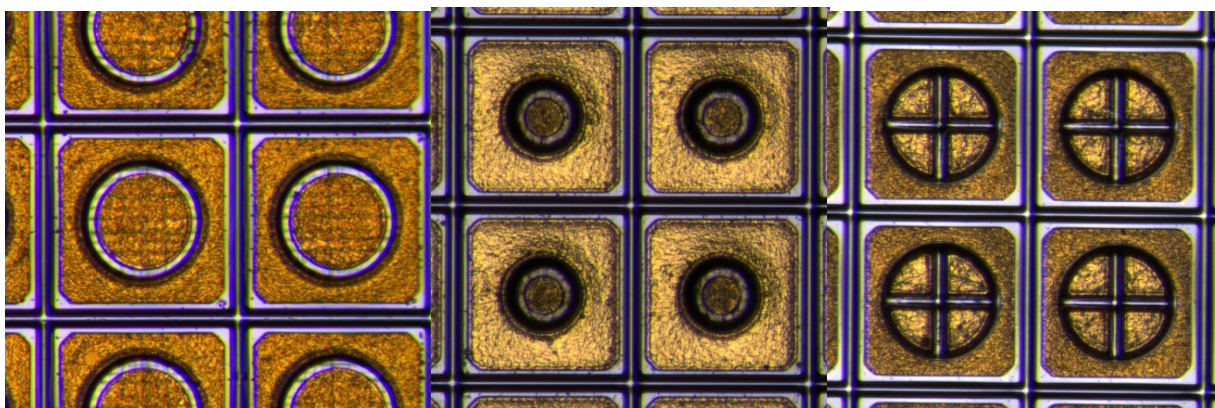


Рис. 1. Фотографии полученных чипов размерами 250х250 мкм с фоточувствительными площадками Ø140, Ø100 мкм и разделенными на 4 сектора с общим Ø140 мкм.

Для прототипа газового датчика использовались свето- и фотодиоды на основе гетероструктуры $N\text{-InAsSbP}/\text{InAsSb}_x/\text{P-InAsSbP}$, с активной/фоточувствительной областью InAsSb_x ($x = 0.05 - 0.08$) толщиной 3 – 4 мкм, выращенной методом ЖФЭ на подложках легированного $p^+\text{-InAs}$ (100). Экспериментальные образцы чипов были получены методами многостадийной химической фотолитографии. Образцы «флип-чип» конструкции имели квадратную форму размером 250х250 μm и круглую мезу диаметром 140 μm , ограничивающую площадь фоточувствительной области и ввод/вывод излучения через подложку толщиной 20 – 40 мкм. Для получения экспериментальных образцов свето- и фотодиодов производилась иммерсионная стыковка полученных чипов с линзами из кремния с просветляющим покрытием диаметром 3.5 мм.

Методы исследования фотоэлектрических и люминесцентных свойств в интервале температур 80 – 500 К

Целью экспериментальной работы являлись исследования электрических, фотоэлектрических и люминесцентных свойств в широком диапазоне температур 80 – 500 К.

Для измерения температурных зависимостей вольт-амперных и ватт-амперных характеристик, спектров фотоответа и электролюминесценции, была разработана установка для измерения фотоэлектрических и люминесцентных свойств экспериментальных образцов. Для проведения измерений образец помещается в откачиваемый криостат LN-120. Все вышеописанные измерения выполняются за один заход без извлечения образца из криостата. В ходе выполнения комплекса измерений образец претерпевает циклические охлаждение до температуры жидкого азота и нагрев до температур до 500 К. Данный подход позволяет оперативно получить большой объем экспериментальных данных для дальнейшей обработки. Блок-схемы установок для измерения электрических, фотоэлектрических и люминесцентных свойств представлены на рис.2, 3.

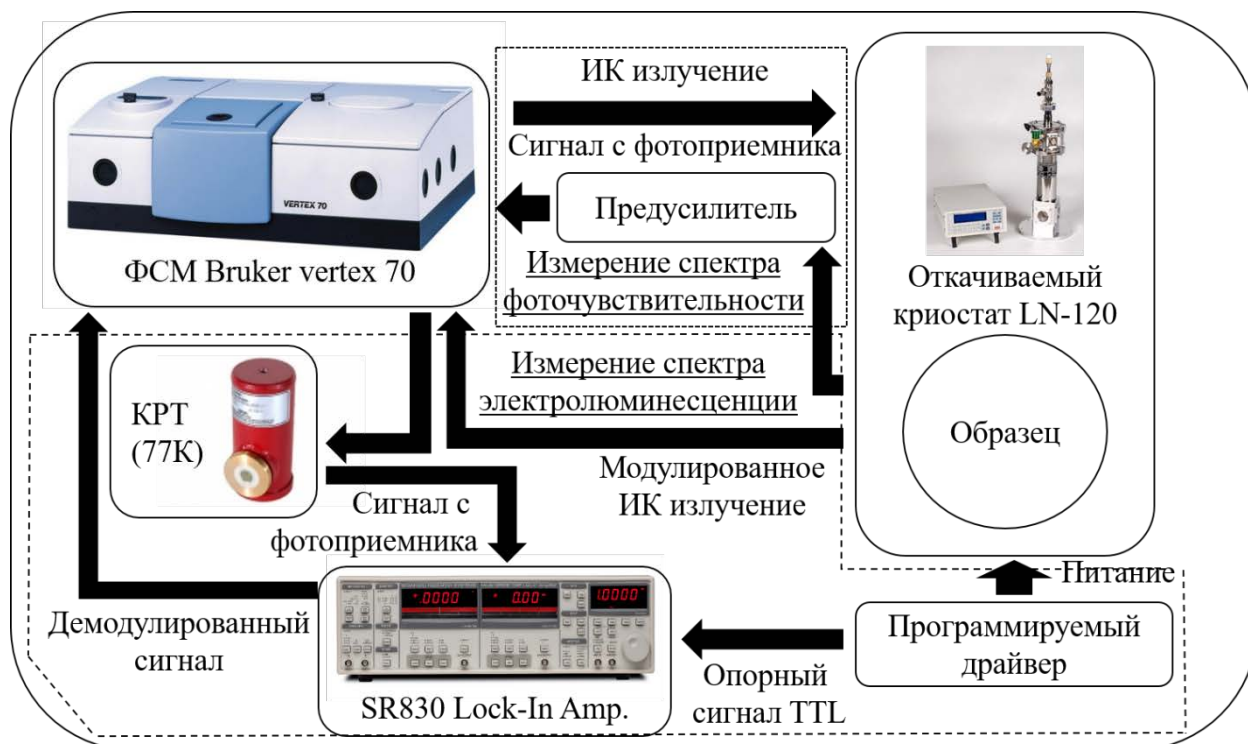


Рис. 2. Блок-схема установки температурных исследований фотоэлектрических и люминесцентных свойств экспериментальных образцов.

Исследование фотоэлектрических и люминесцентных свойств включает в себя измерение спектров фотоответа и электролюминесценции образца в интервале температур 80 – 500 К и последующую калибровку.

Для исследования спектральных свойств фотоприемника использовалась установка, в основе которой находится Фурье-спектрометр Bruker Vertex 70, позволяющий выводить/вводить излучение через специальные окна для использования совместно со внешними оптическими схемами.

Для измерений спектров фотоответа, параллельный пучок выходящего из спектрометра излучения фокусируется на образце при помощи сферического зеркала. Полученный токовый сигнал усиливается при помощи специализированного разработанного предусилителя и оцифровывается спектрометром. Результатом данного измерения является Фурье-образ спектральной зависимости фотоответа экспериментального образца. Спектр фотоответа вычисляется при помощи обратного преобразования Фурье и калибровки на спектр излучателя Фурье-спектрометра. Результатом данного эксперимента является серия спектральных зависимостей фоточувствительности образца при различных температурах в относительных единицах.

Для перевода полученных спектров фотоответа в единицы измерения токовой чувствительности (А/Вт) производится калибровка на абсолютно черное тело при температуре 300 К. Излучение АЧТ модулируется при помощи оптического прерывателя и поступает на исследуемый образец. Модулированный фототок усиливается при помощи трансимпедансного усилителя с известным коэффициентом преобразования и, вместе с опорным сигналом прерывателя, поступает в синхронный усилитель Stanford SR830. Данный подход позволяет прямо измерить интегральное значение по всему спектру фотоприемника его

ампер-ваттной чувствительности и, соответственно, рассчитать спектральную зависимость ампер-ваттной чувствительности при различных температурах.

Для измерения спектров электролюминесценции образца излучение источника фокусируется на входное окно спектрометра. В качестве источника питания используется программируемый драйвер собственной разработки (см. следующую главу). Сигнал с фотоприемника на основе КРТ и опорный сигнал с драйвера отправляются в синхронный усилитель Stanford SR830. Демодулированная и усиленная интерферограмма оцифровывается спектрометром и преобразуется в спектр. Результатом данного эксперимента является серия спектральных зависимостей электролюминесценции образца при различных температурах в относительных единицах.

Для перевода полученных спектров в единицы спектральной плотности мощности (мкВт/мкм) проводится прямое измерение интегральной мощности излучения образца при помощи сертифицированного измерителя мощности. В качестве источника питания используется программируемый драйвер собственной разработки.

Исследование электрических свойств основывается на измерении температурных зависимостей вольт-амперных, ватт-амперных характеристик экспериментальных образцов.

Для измерений вольт-амперных характеристик в диапазоне токов до ± 10 мА используется источник-измеритель с фемптоамперной чувствительностью Keithley SourceMeter 6430, связанный с персональным компьютером. При помощи программного обеспечения задаются предельное значение тока, диапазон измерений по напряжению и количество точек измерения. Результатом эксперимента является серия вольт-амперных характеристик при различных температурах.

Для измерений вольт-амперных и ватт-амперных характеристик в широком диапазоне токов до более чем 1 А используется установка, состоящая связанных источника-измерителя Keithley 2601B-Pulse и цифрового мультиметра Keithley DMM7510, который измеряет выходное напряжение приемника на основе КРТ.

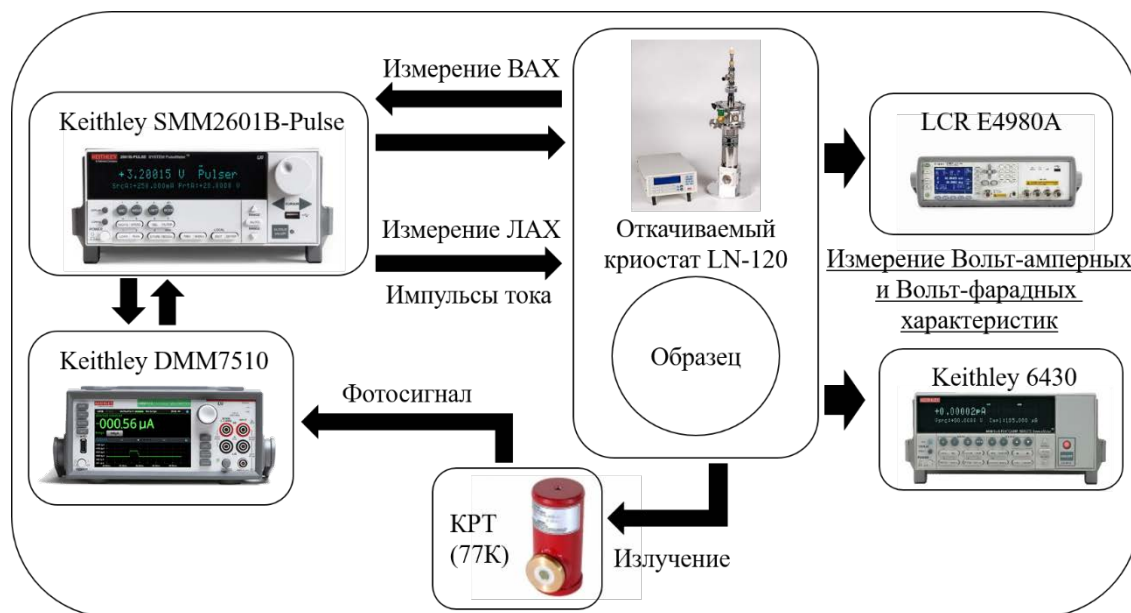


Рис. 3. Блок-схема установки температурных исследований электрических и люминесцентных свойств экспериментальных образцов.

Для управления с ПК вышеуказанными приборами было разработано ПО на основе LabView, которое управляет измерениями:

вольт-амперных характеристик в непрерывном режиме в диапазоне токов до ± 500 мА с точностью около 0.1 мкА (Keithley 2601B-Pulse) или менее 1 нА (Keithley SourceMeter 6430);

вольт-амперных и ватт-амперных характеристик в импульсном режиме с длительностью импульса 10 мкс и частотой 2 кГц в диапазоне токов до более чем 1 А (Keithley 2601B-Pulse);

временной эволюции падения напряжения на светодиоде и его оптической мощности при подаче длительного импульса заданного тока с временным разрешением не менее 1 мкс в диапазоне импульсов от 10 до 1000 мкс.

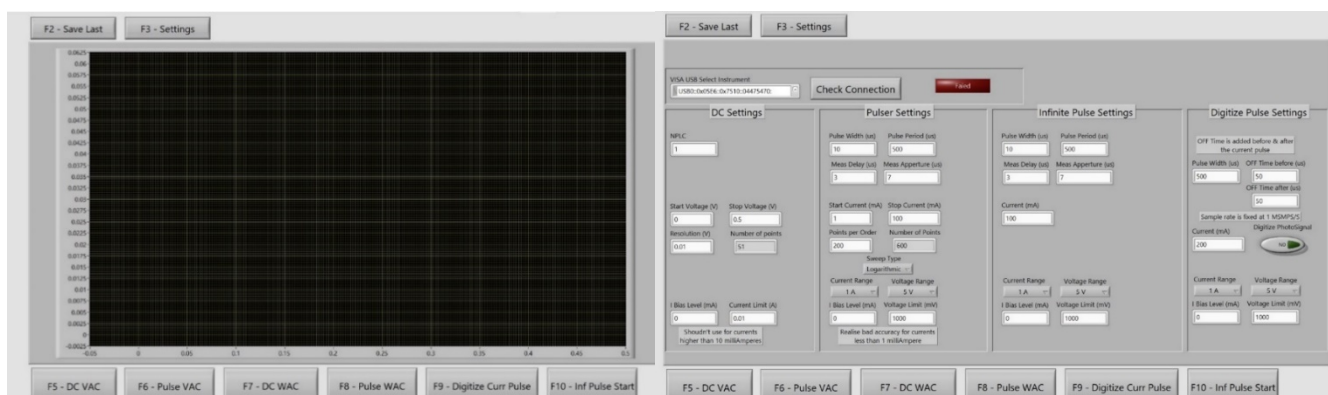


Рис. 4. Изображения графического интерфейса разработанного программного обеспечения.

Спектральная селективность пироэлектрического приемника в Фурье-спектрометрии.

В Фурье-спектрометрах общепринятым является использование в качестве детекторов пироэлектрических приемников dLaTGS, которые характеризуются обнаружительной способностью около $10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ и спектральной неселективностью. Однако, на практике оба этих пункта не выполняются.

Ответ кроется в способе измерения спектральной зависимости Фурье-спектрометром. В основе любого Фурье-спектрометра находится интерферометр Мейкельсона, у которого одно из зеркал является подвижным и, во время измерения, движется с постоянной скоростью к светоделителю или от него. Принципиальная схема Фурье-спектрометра представлена на рис. 5 где: 1 — Источник белого света или исследуемый источник; 2 — Линза коллиматора; 3 — Кювета с исследуемым веществом; 4 — Опорный (эталонный) лазер; 5 — Вспомогательные зеркала опорного пучка от лазера; 6 — Фотоприёмник опорного пучка; 7 — Неподвижное зеркало; 8 — Подвижное зеркало; 9 — Механический привод подвижного зеркала; 10 — Объектив фотоприёмника; 11 — Фотоприёмник; 12 — Управляющий и обрабатывающий интерферограмму компьютер; 13 — Светоделительная пластина.

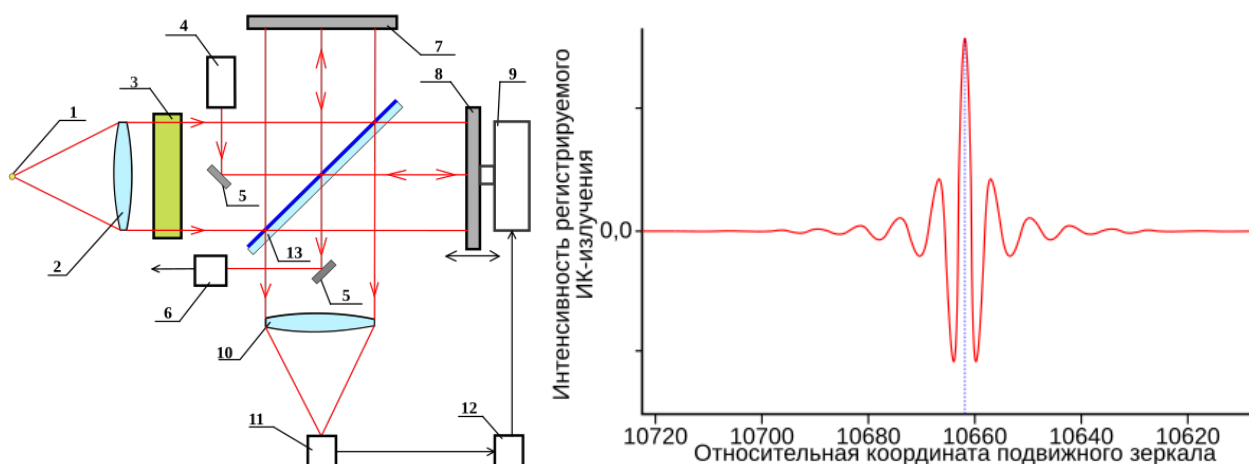


Рис. 5. Принципиальная схема Фурье-спектрометра и пример интерферограммы.

На рисунке также представлен пример интерферограммы, являющейся результатом прямых измерений Фурье-спектрометра. Под цифрами 4,5 и 6 представлен опорный канал Фурье-спектрометра, состоящий из лазера с известным волновым числом генерации, его оптики и отдельного детектора. Интерферограмма лазера представляет собой синусоидальное колебание определенной частоты (частота опорной интерферограммы) и служит для перевода полученного после обратного преобразования Фурье спектра в единицы волновых чисел (см^{-1}). Соответственно и для любой измеренной точки на спектре существует эквивалентное синусоидальное колебание определенной частоты, зависящее от длины волны света и от скорости движения подвижного зеркала интерферометра. В таких условиях тепловой приемник, имеющий сильную амплитудно-частотную характеристику (АЧХ), перестает быть спектрально неселективным. Пример зависимостей чувствительности и обнаружительной способности dLaTGS приемников представлен на рис. 6. Также стоит учесть и тот факт, что при работе на частотах в единицы и десятки кГц данный приемник уже не обеспечивает обнаружительной способности $10^8 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$.

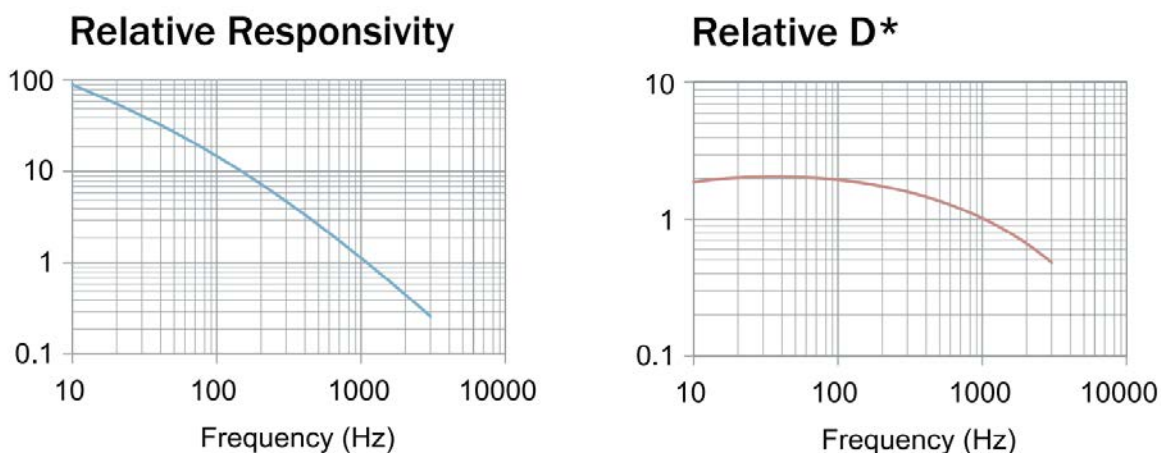


Рис. 6. Пример относительной чувствительности и обнаружительной способности теплового приемника dLaTGS.

В таком случае, при измерении спектра теплового источника для измерений фотоответа экспериментальных образцов силами самого Фурье-спектрометра, необходимо учитывать данную наведенную спектральную неселективность. В Фурье-спектрометре Bruker Vertex 70 существует возможность менять в широких пределах от сотен Герц до десятков кГц частоту опорной интерферограммы, соответственно выполняя пропорциональный перенос спектра теплового источника в различные частотные окна. Пример спектров теплового источника при трех различных частотах опорной интерферограммы представлен на рис. 7а. Из рисунка отчетливо видно сильное изменения амплитуды спектра, которое сопровождается менее наглядным изменением положения максимума и формы самого спектра. При этом все три спектра являются некорректными, поскольку хранят в себе АЧХ теплового приемника, которая приводит к искажению измеряемых спектров фотоответа. Наиболее наглядно это видно на рис. 7б, на который нанесены множество спектров теплового приемника, уже пересчитанные в единицы частоты синусоидальных колебаний, отличающиеся только частотами опорной интерферограммы в диапазоне 0.5 – 40 кГц.

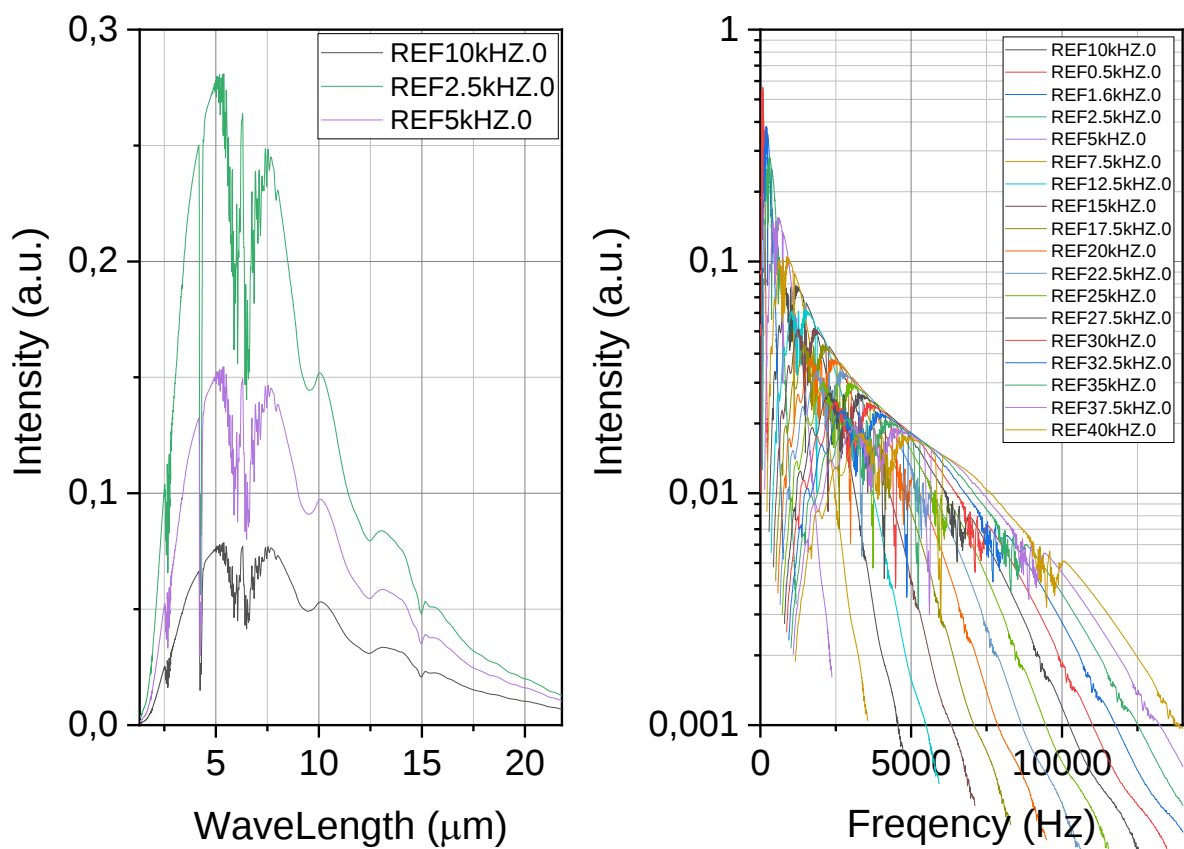


Рис. 7. Спектры теплового приемника при различных частотах опорной интерферограммы.

На основе данных из рис. 3b была восстановлена амплитудно-частотная характеристика, корректная для данного измерения, представленная на рис.8а. Ее характерные особенности: падение чувствительности более чем на порядок при увеличении частоты сигнала в 10 раз; наличие фильтра верхних частот с частотой среза около 100 Гц – скорее всего внешнего для приемника и находящегося в цепи усилителя. При помощи данной зависимости был восстановлен спектр теплового источника Фурье-спектрометра, который и использовался в дальнейшем при измерениях фотоответа экспериментальных образцов. Представлен на рис. 8b.

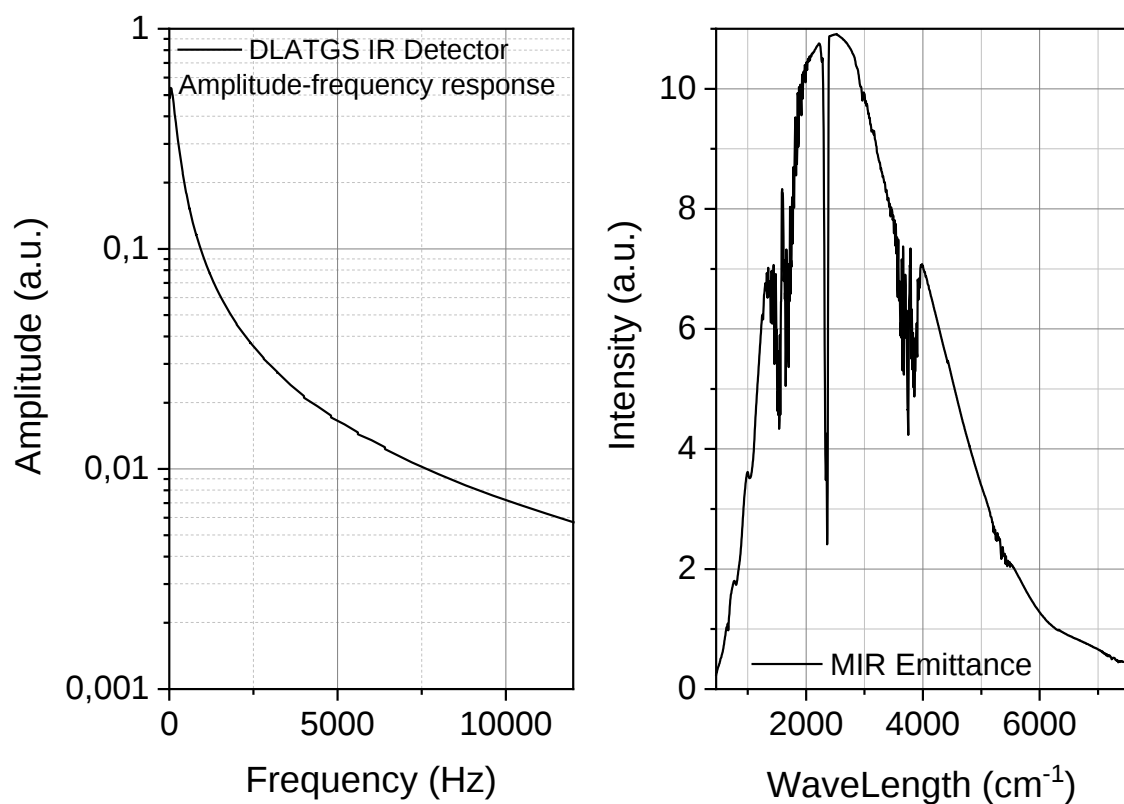


Рис. 8. АЧХ приемника dLaTGS и восстановленный спектр теплового

Программируемый драйвер светодиода

Для выполнения экспериментальных работ по исследованию светодиодов существует необходимость в электронном устройстве, способном генерировать прямоугольные импульсы тока заданных амплитуды, длительности и периода в широких диапазонах каждого из этих параметров. При этом, лабораторное оборудование от крупных производителей, например, Keithley, либо имеет излишний функционал и, как следствие, чрезмерно высокую стоимость, либо не удовлетворяет ряду сформулированных требований. В связи с этим была поставлена задача по разработке программируемого драйвера светодиодов, который бы удовлетворил поставленным требованиям:

- Возможность питания светодиода как в непрерывном режиме, так и в режиме генерации токовых импульсов;

- Дискретность установки длительности и периода импульсов не более 1 мкс, минимальная длительность импульса – 1 мкс, минимальный период – 2 мкс, время нарастания/спада импульса не более 250 нс (10% – 90%);
- Дискретность установки тока не более 1 мА, погрешность установки не более 5%, максимальный ток при работе в непрерывном режиме не менее 500 мА, в квазинепрерывном режиме (d.c. $\sim$ 50%) – 1 А, в импульсном режиме (d.c. $<$ 25%) – 1.5 А, минимальный ток для всех режимов – 1 мА;
- Возможность внешней синхронизации: в качестве ведущего (источника синхроимпульса); в качестве ведомого, как в режиме повторения синхроимпульса, так и запуска по нарастанию/спаду. Блок синхронизации совместим с TTL;
- Возможность измерения напряжения, падающего на светодиоде, в том числе с реализацией ограничения тока при превышении заданного значения;
- Реализация защиты от скачков тока и напряжения на выводах питания светодиода, реализация защиты от пробоя светодиода недопустимым обратным током;
- Управление как через функционал лицевой панели, так и через подключение к персональному компьютеру;
- Питание от сети 230 В 50 Гц;

На рис. 9 представлена принципиальная схема разработанного устройства. Основные блоки включают в себя:

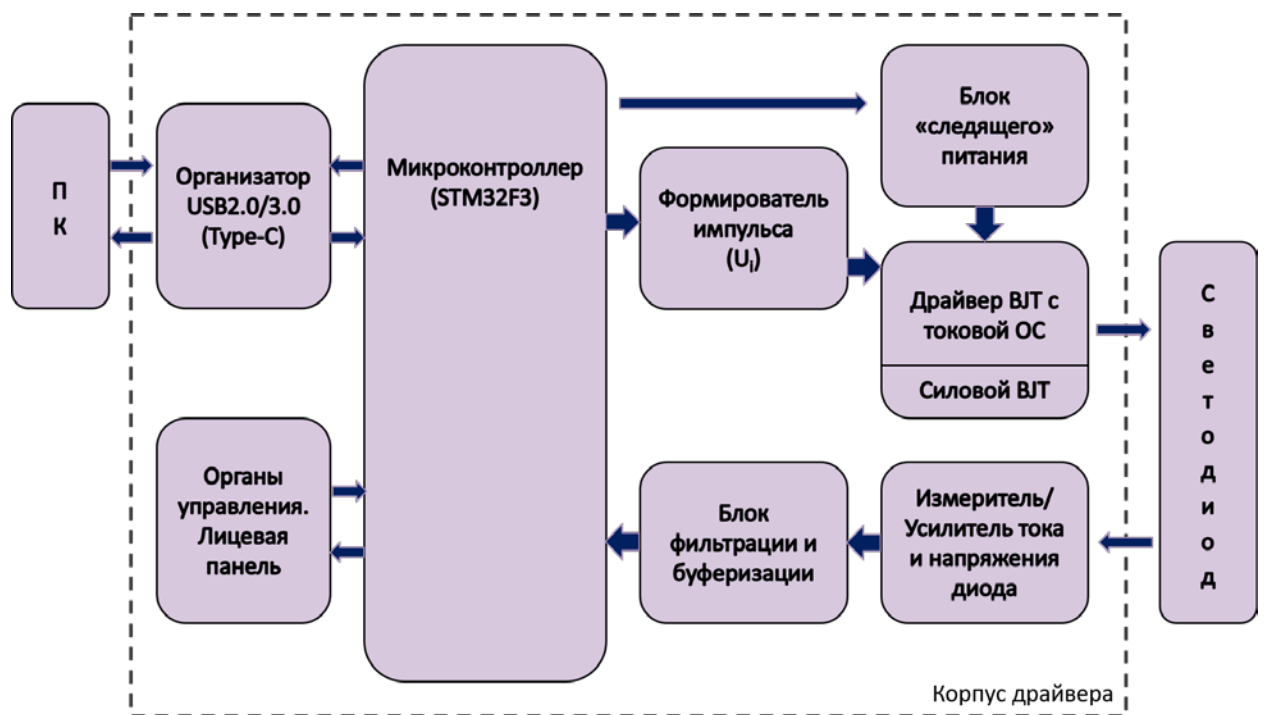


Рис. 9. Принципиальная блок-схема разработанного драйвера.

- Формирователь импульса. Формирует прямоугольный импульс напряжения, пропорционального выходному току. В режиме альтернативной функции способен формировать сигнал произвольной формы с частотой дискретизации 1 МГц.
- Драйвер ВJT с токовой обратной связью. Служит для формирования токового эквивалента входному напряжению, получаемому от формирователя импульсов.
- Измеритель/Усилитель тока и напряжения диода. Формируют сигнал обратной связи для микроконтроллера.
- Блок фильтрации и буферизации. Фильтрует входной сигнал с предыдущего блока от наведенных высокочастотных помех и выполняет функцию драйвера и антиалиасингового фильтра АЦП микроконтроллера.
- Блок «слеящего» питания. Поддерживает напряжение питания на уровне, немного большем, чем падение напряжения на нагрузке (силовой

транзистор+светодиод+токовый шунт). Служит для повышения выходной мощности драйвера, уменьшая тепловые потери на силовом транзисторе.

- Микроконтроллер. Выполняет функции управления и цифровой обработки сигнала.

На рисунке 10 для иллюстрации работы разработанного драйвера приведены осциллограммы токового импульса и импульса фотоответа полученные для больших (сотни микросекунд) и малых (единицы микросекунд) длительностей импульсов. Как видно из рисунка, получен фронт импульса тока около 100 нс и возможность работы на длинных импульсах.

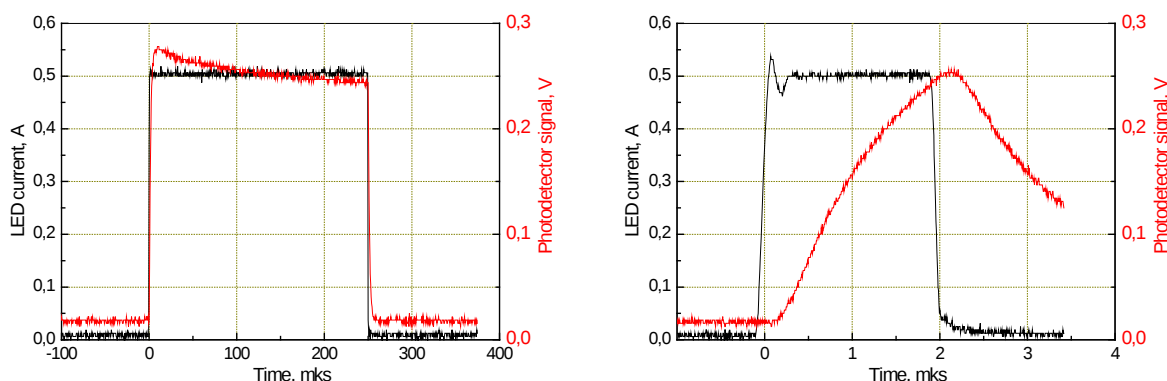


Рис. 10. Осциллограммы токового импульса и импульса фотоответа, полученные с помощью разработанного драйвера.

Помимо электроники и программного обеспечения был разработан корпус, который изготавливается при помощи методик 3D печати, как наиболее удобных для прототипного производства. Внутри корпуса, помимо основной платы драйвера, размещен бескорпусной импульсный блок питания, предназначенный для преобразования сетевого напряжения 220 В в постоянное напряжение питания драйвера. Фотографии разработанного устройства представлены на рис. 11.



Рис. 11. Фотографии внешнего вида драйвера светодиодов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Длинноволновые ИК свето- и фотодиоды с активной областью на основе InAsSb_x ($x \geq 0.15$)

На рисунке 12 представлены вольт-амперные характеристики (а) и плотности темновых токов (b) в интервале температур 200 – 425 К, измеренные для экспериментальных образцов из гетероструктуры №2052. Также на рисунок 1b нанесены результаты работы 2021 года, по разработке и исследованию фотоприемников с близким составом фоточувствительной области [14].

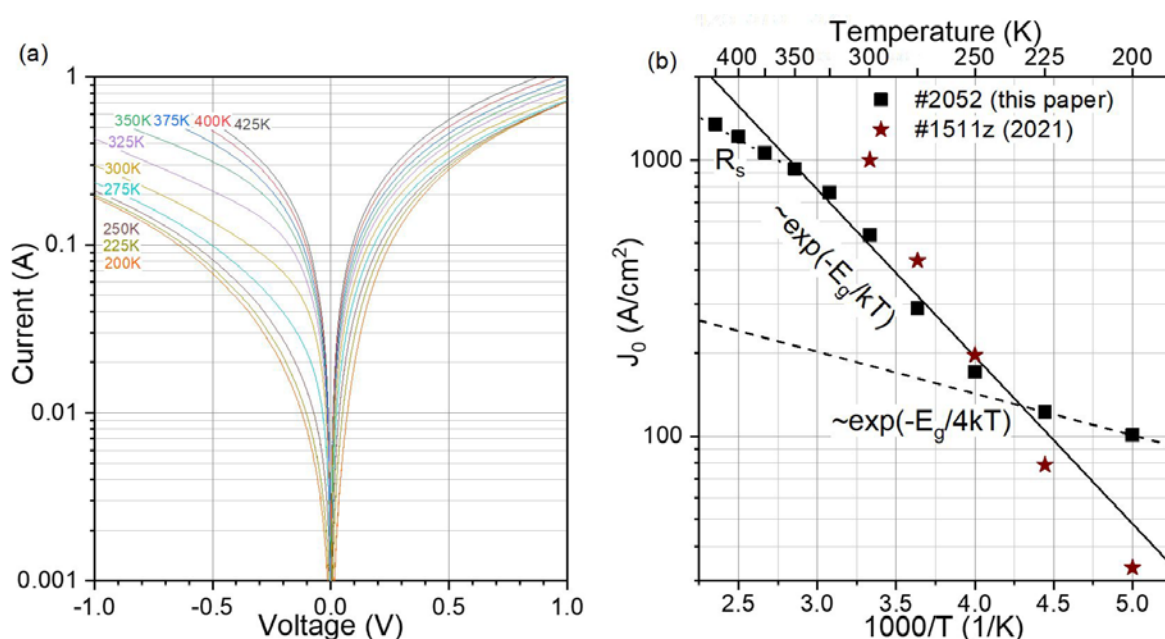


Рис. 12. Вольт-амперные зависимости в интервале температур 200 – 425 К (а) и зависимость плотности темновых токов от температуры (b).

Как видно из рисунка, полученные в ходе данной работы гетероструктуры характеризуются меньшими значениями плотности темновых токов при комнатной температуре и менее резкой температурной зависимостью по сравнению с предыдущими результатами, полученными в [14]. В дополнение к этому, температурная зависимость плотности темновых токов хорошо аппроксимируется в интервале температур 200 – 350 К при помощи формулы 1, что свидетельствует о доминировании диффузионного механизма

токопротекания. В данной формуле $h\nu_{0.1}$ – энергия длинноволновой границы фоточувствительности по уровню 0.1 от максимума, значение которой близко к ширине запрещенной зоны фоточувствительной области (E_g).

$$J_0(T) \propto e^{\left(\frac{-h\nu_{0.1}}{kT}\right)} \quad (1)$$

При дальнейшем понижении температуры наиболее вероятен переход к туннельному механизму токопротекания, о чем может свидетельствовать аппроксимация при помощи формулы 2.

$$J_0(T) \propto e^{\left(\frac{-h\nu_{0.1}}{4kT}\right)} \quad (2)$$

На рисунке 13 представлены спектры обнаружительной способности (a) и величин $h\nu_{\max}$, $h\nu_{0.5}$ и $h\nu_{0.1}$ (b) в интервале температур 200 – 425 К

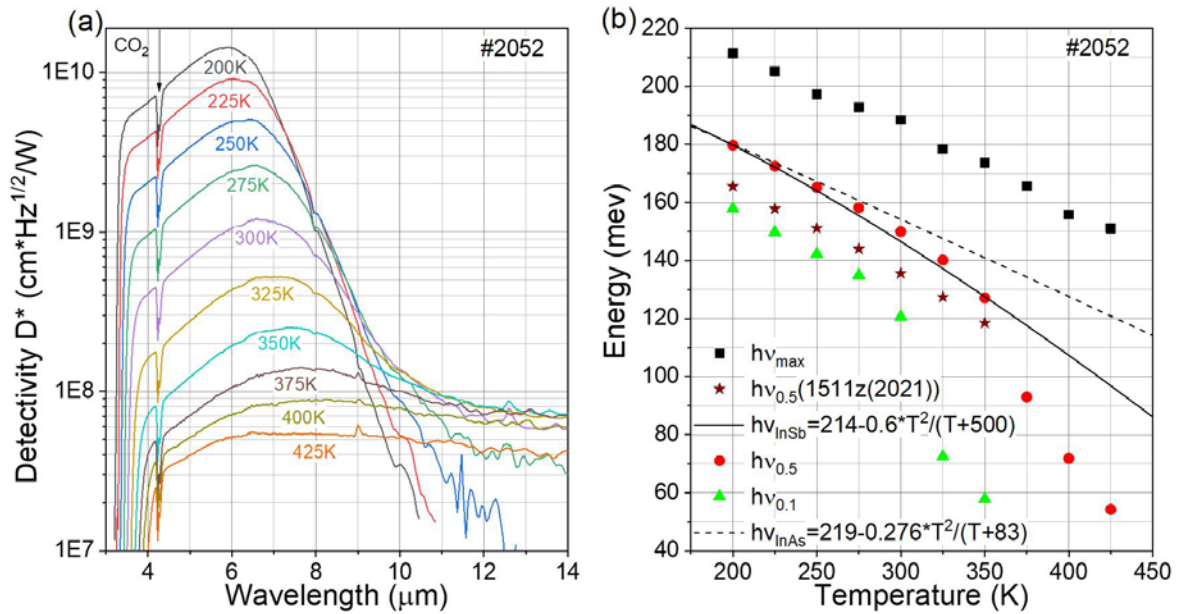


Рис. 13. Спектральная зависимость обнаружительной способности в интервале температур 200 – 425 К (a) и температурная зависимость энергии $h\nu$ длинноволновой границы фоточувствительности по уровням 0.5 и 0.1 от максимума (b).

Как видно из рисунка, экспериментальные образцы характеризуются значениями обнаружительной способности около $1.2 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ при комнатной температуре и $5 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ при 250 К, достижимых при помощи термоэлектрического охлаждения.

При повышении температуры выше 325 – 350 К наблюдается поведение длинноволновой границы, отличающееся от такового, как у более коротковолновых фотодиодов, так и близких по составу фотоприемников, опубликованных ранее [14]. Наиболее наглядно данное отличие иллюстрирует температурная зависимость энергии по уровню 0.5 и 0.1 от максимума фоточувствительности (рисунок 13b). Из рисунка видно значительное отклонение экспериментальных данных при повышенных температурах от аппроксимации при помощи зависимости ширины запрещенной зоны InSb от температуры [15].

На рис. 14 приведены спектры фоточувствительности и обнаружительной способности образца из гетероструктуры №2135 в интервале температур 200 – 438 К, рассчитанные аналогично, как для образцов из гетероструктуры №2052. Поведение спектров полученных фотоприемников – аналогично поведению спектров фоточувствительности ранее обсуждаемых фотоприемников и характеризуется: сильной зависимостью токовой чувствительности от температуры; наличием длинноволнового «крыла» имеющего слабую зависимость от длины волны; диапазоном значений токовой чувствительности – от 0.2 А/Вт при комнатной температуре до 1 А/Вт при температуре, достигаемой с помощью 3-х каскадного элемента Пельтье. А на рис. 15 представлены температурные зависимости основных параметров фотоприемников: токовой чувствительности (Photoresponse), темнового сопротивления (R_0), квантовой эффективности (QE), обнаружительной

способности (Detectivity) – полученные в ходе данной работы и в 2021 году, что позволяет сравнить и обобщить полученные результаты.

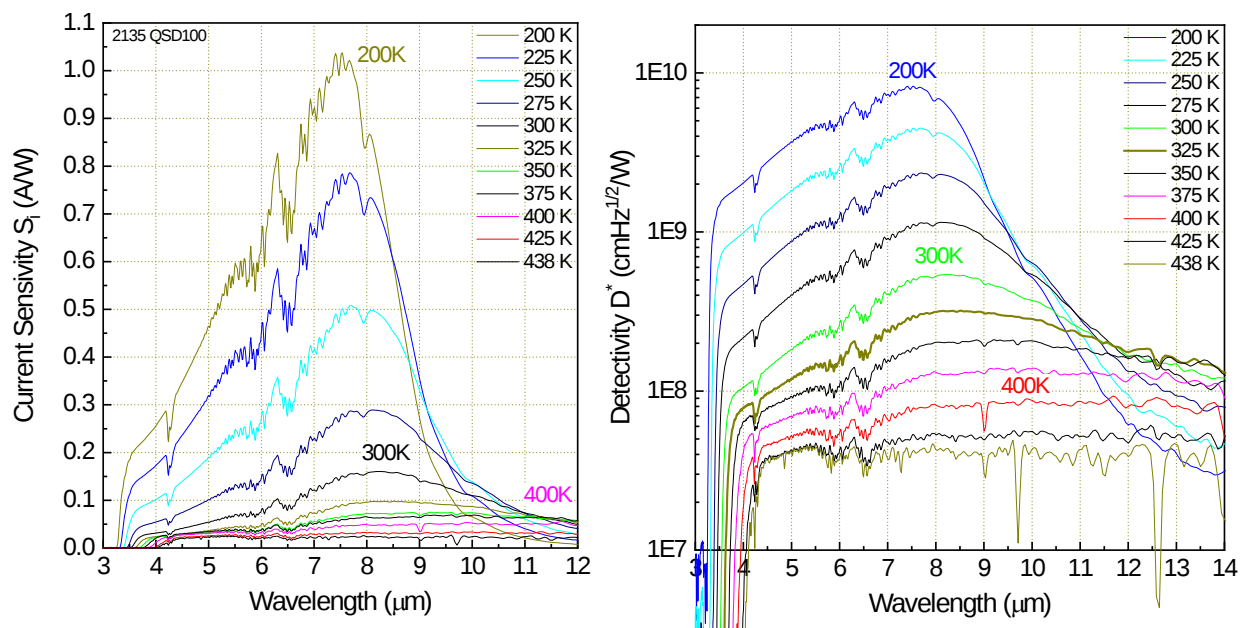


Рис. 14. Спектры токовой чувствительности и обнаружительной способности в интервале температур 200-438 K.

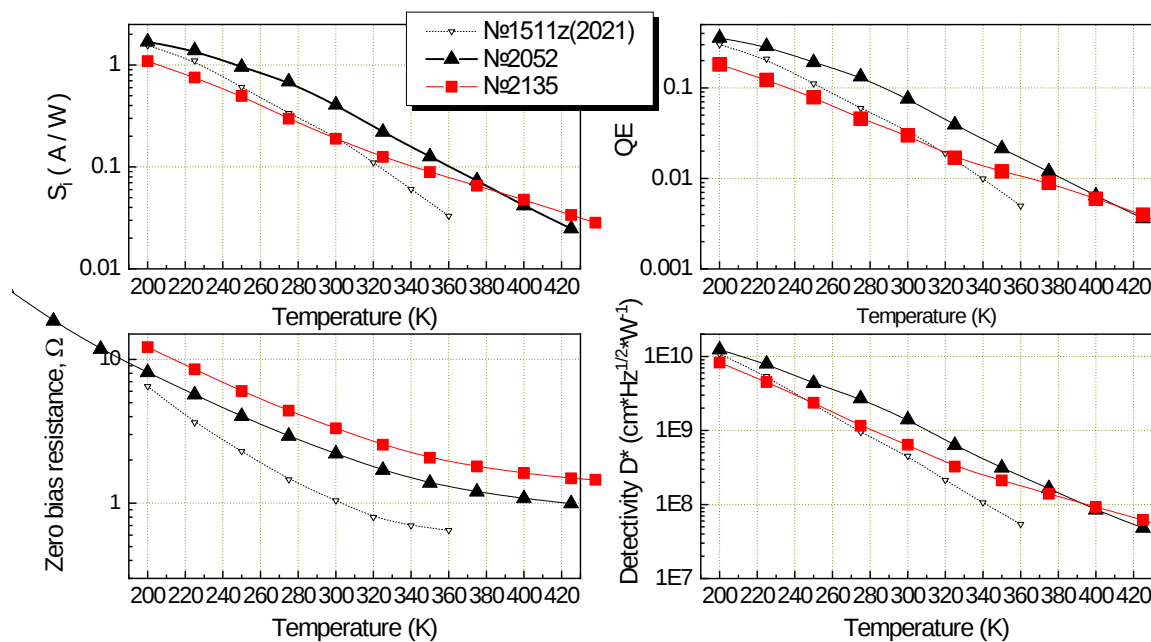


Рис. 15. Температурные зависимости основных параметров фотоприемника в сравнении с результатами предыдущих работ.

На рисунках 16a и 16b показано сравнение результатов данной работы с зависимостями ширины запрещенной зоны от состава и плотностей темновых токов от длинноволновой границы фоточувствительности, взятыми из литературных источников, в том числе из наших предыдущих работ [5,6,14].

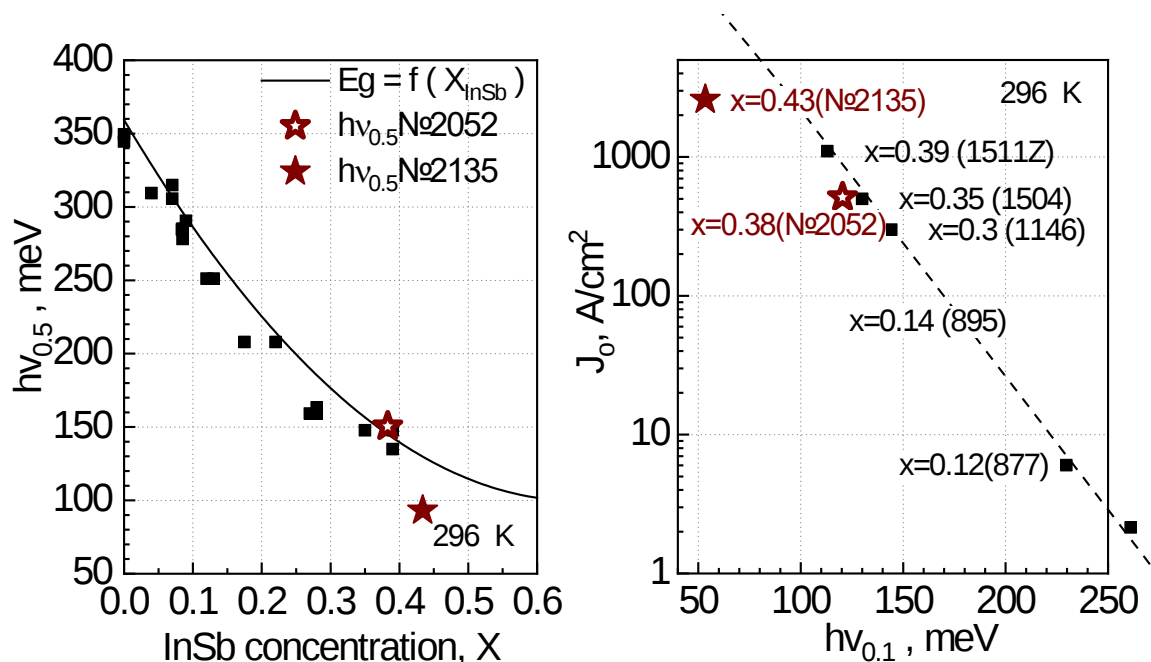


Рис. 16. Зависимости ширины запрещенной зоны от состава (а) и плотности темновых токов от длинноволновой границы $h\nu_{0.1}$ (b), в сравнении с данными из литературы.

Полученные значения ширины запрещенной зоны при комнатной температуре согласуются с результатами прошлых работ, однако в настоящей работе было получено уменьшение плотности темнового тока до 2-х раз [14]. Одной из вероятных причин уменьшения плотности тока, является улучшение кристаллографического качества полученных слоев, в частности уменьшение количества дислокаций несоответствия и их концентрацию на границе между подложкой и широкозонным «буферным» слоем, что приводит к уменьшению их влияния на оптические и электрические характеристики фотоприемников на основе таких структур.

Также из проведенных исследований видно, что длинноволновая граница фоточувствительности определяется не только составом узкозонной области но и ее уровнем легирования. На рис. 17, представлены значения ширины запрещенной зоны активной области, полученные в ходе данной работы (синие и красные точки) в сравнении с предыдущими результатами (черные точки). Как видно из рисунка, значение ширины запрещенной зоны для гетероструктур с менее легированной узкозонной областью (синие точки) значительно лучше описывается теоретической зависимостью, в то время как для гетероструктур, с сильнолегированной цинком активной областью, получены значительно меньшие значения.

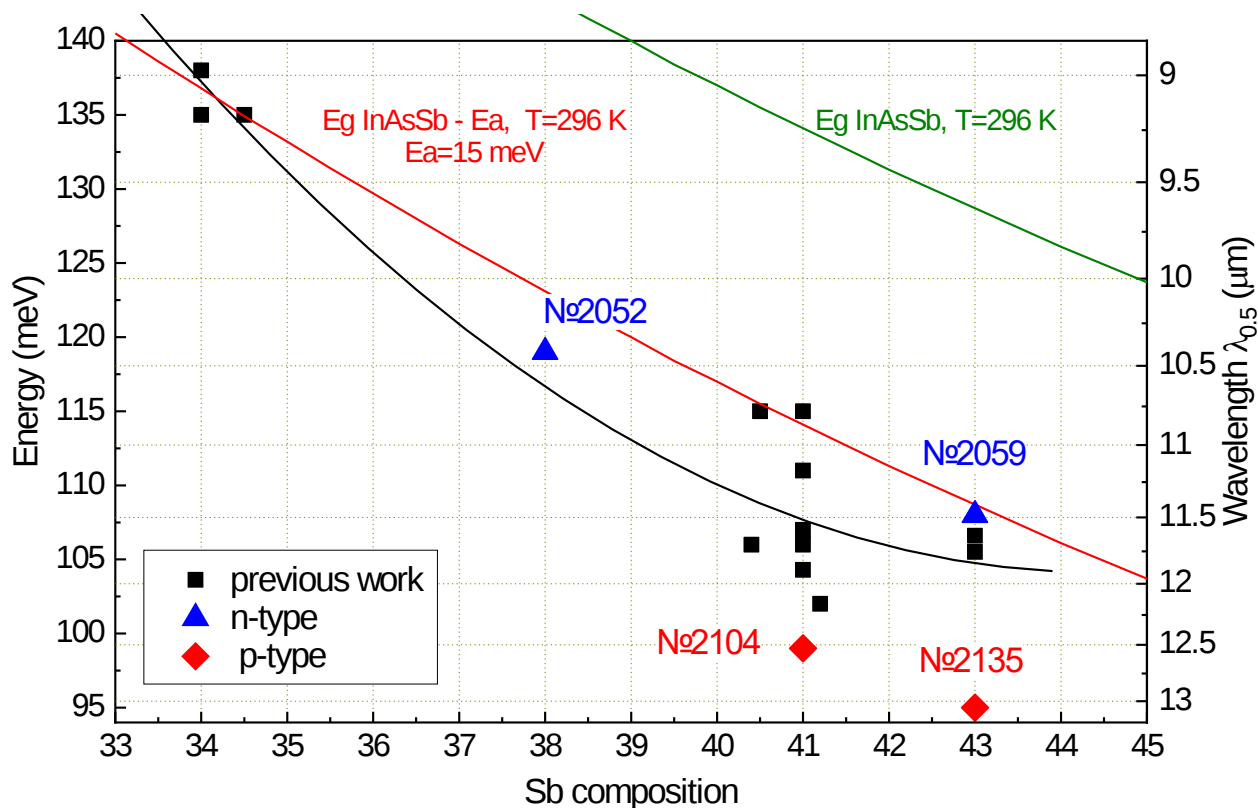


Рис. 17. Зависимость ширины запрещенной зоны активной области от состава и легирования при температуре 296 К.

Следует отметить, что разработанные ранее фотоприемники были получены на основе эпитаксиальных структур, в которых фоточувствительная область

была преимущественно n-типа (что является упрощением, поскольку внутри фоточувствительной области мог иметь место градиент концентрации). Для таких фотоприемников характерны значения токовой чувствительности при комнатной температуре $S_i = 0.2 - 0.4$ А/Вт. Для фотоприемников на основе эпитаксиальных структур, в которых фоточувствительная область была преимущественно p-типа, представленных в данной работе, характерны значения токовой чувствительности при комнатной температуре $S_i = 0.1 - 0.2$ А/Вт, затянутый в длинноволновую область край фоточувствительности и большие, по сравнению с фоточувствительной областью n-типа значения темнового сопротивления. На основе этого можно сделать вывод, что существует диапазон уровней легирования p- примесью фоточувствительной области, при которой характеристики фотоприемников достигают своего максимума, при этом: уменьшение токовой чувствительности компенсируется ростом темнового сопротивления; сдвиг в длинноволновую область края фоточувствительности обеспечивается за счет переходов через акцепторную зону, а не изменения состава фоточувствительной области.

Результаты

1. Разработана методика получения многослойных p-n гетероструктур P-InAsSb/n-InAs_{0.55}Sb_{0.45}/N-InAsSb с рассогласованием постоянных решетки подложки и эпитаксиальных слоев $\geq 2\%$;
2. Разработана конструкция и получены экспериментальные образцы фотоприемников с длинноволновой границей чувствительности $\lambda_{0.5}$ вплоть до 12.5 мкм ($T = 300$ K);
3. Исследованы оптические и фотоэлектрические свойства полученных образцов и показано, что их параметры близки к параметрам лучших образцов длинноволновых фотоприемников ($S_i \geq 1$ А/Вт при $T = 200$ K)

Применение иммерсионных фотодиодов на основе InAsSb(P) в миниатюрных фотоприемных модулях с термоэлектрическим охладителем.

Были разработаны фотоприемные устройства на основе средне- и длинноволновых иммерсионных фотодиодов из InAsSb в стандартном корпусе ТО-8 с возможностью термостабилизации при помощи элемента Пельтье. Реализованы варианты как на основе однокаскадного термоохладильника (ТЭО), так и трехкаскадного. Главными особенностями являются термостабилизация как фотодиода, так и первого каскада усиления и помещение чувствительных к наводкам среды фотодиода и соединительных проводов ФД-усилитель в металлический экранированный корпус.

Для версии на основе однокаскадного ТЭО была разработана печатная плата предусилителя, устанавливаемая на алюминиевое основание, в которое монтируется иммерсионный фотодиод. Это позволяет поддерживать одинаковую температуру фотодиода и операционного усилителя, что нивелирует температурный дрейф выходного сигнала.

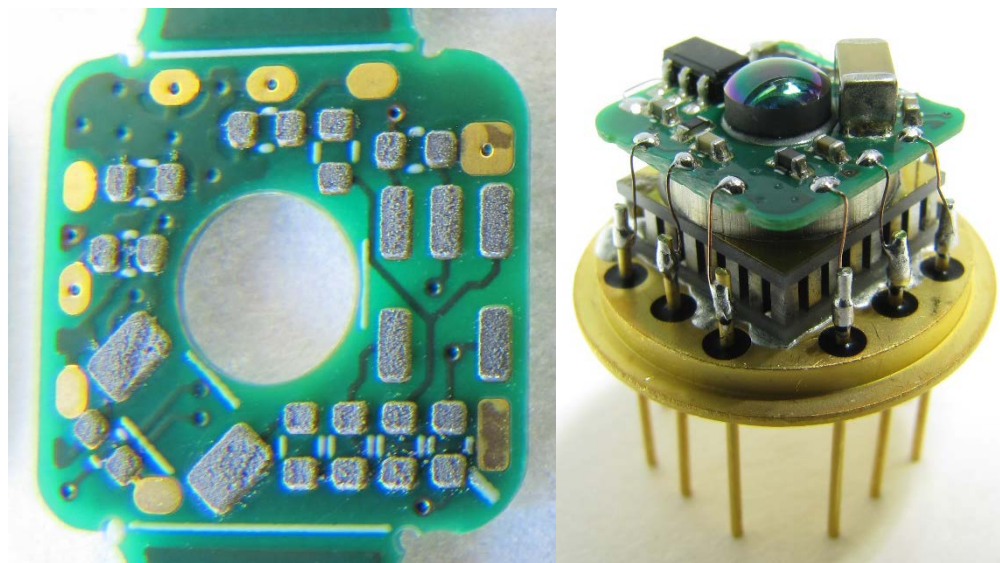


Рис. 18. Фотографии разработанного фотоприемного устройства с однокаскадным ТЭО.

Для реализации ФПУ на основе трехкаскадного ТЭО была разработана гибкая печатная плата с ужесточителями, в собранном виде образующая «колодец» и устанавливаемая на первый каскад ТЭО. Иммерсионный фотодиод в алюминиевом основании монтируется на верхний каскад. Мотивация данного решения основывается на том, что нижний каскад ТЭУ является самым холодопроизводительным в сборке. Это позволило добиться лишь небольшого уменьшения перепада температур фотодиод/корпус по сравнению с аналогичной сборкой без предусилителя.

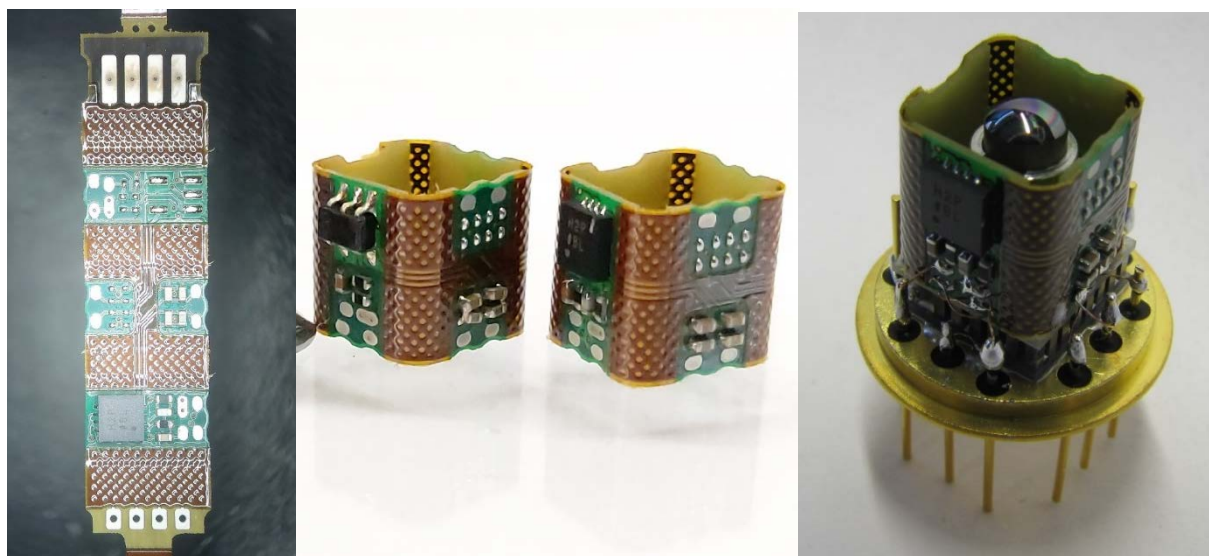


Рис. 19. Фотографии разработанного фотоприемного устройства с трехкаскадным ТЭО.

Был разработан детектирующий модуль с однополярным питанием, подходящий для лабораторного применения. В качестве фоточувствительного элемента используется средне- и длинноволновый ИК иммерсионный фотодиод на основе InAsSb в корпусе ТО-8 с ТЭО и опционально встроенным предусилителем. Модуль поддерживает термостабилизацию фотодиода на заданной пониженной температуре. Возможен вывод усиленного и отфильтрованного сигнала с фотодиода либо в виде биполярного сигнала в

коаксиальный кабель, либо в виде дифференциальной пары для достижения лучшей помехозащищенности.

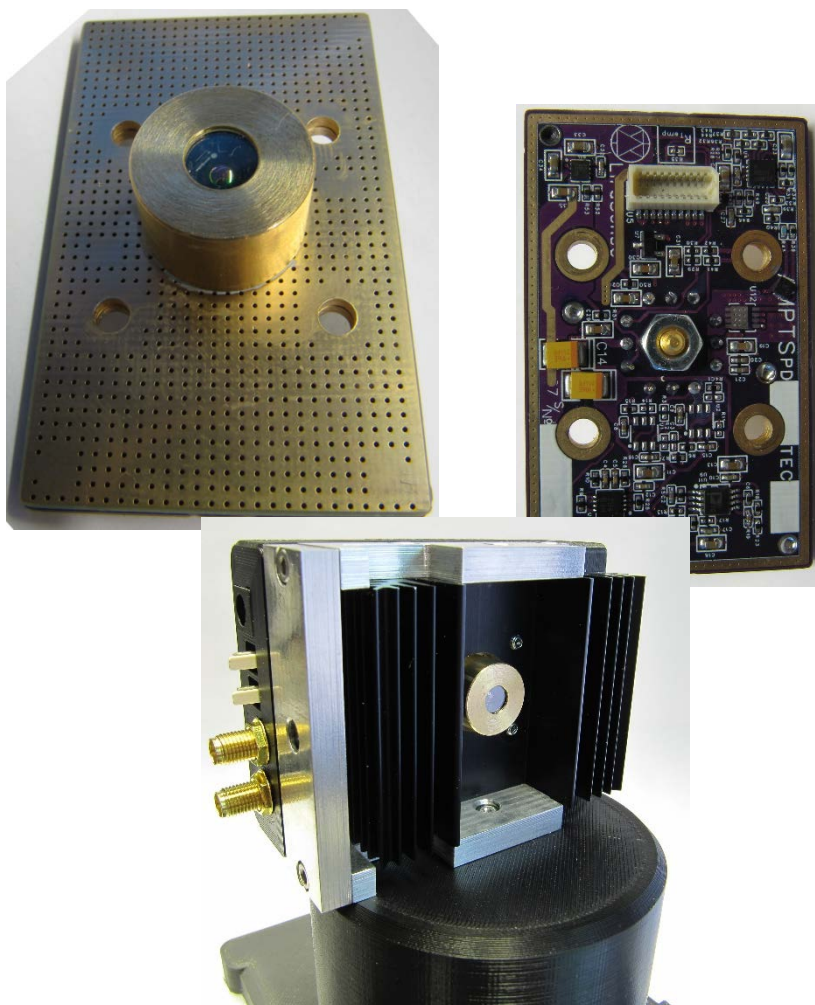


Рис. 20. Фотографии разработанного детектирующего модуля.

Применение иммерсионных свето- и фотодиодов на основе InAsSb(P) в недисперсионном инфракрасном газовом датчике

При разработке прототипа недисперсионного инфракрасного газового датчика был выбран в качестве целевого углекислый газ. Это решение мотивировано как наличием в активе разработки спектрально согласованных оптопар на требуемую длину волны 4.25 мкм, так и широким освещением газового анализа CO₂ в литературе. Для данных оптопар на рисунке 21 (a, b)

приведены спектральные характеристики электролюминесценции при токе накачки 200 мА в непрерывном режиме и фоточувствительности в интервале температур 200 – 500 К. По сравнению с ранее опубликованным результатами была впервые продемонстрирована возможность работы при температурах до 500 К, а также увеличена токовая чувствительность и выходная мощность [16]. Помимо вышеописанной оптопары (LED42 и PD42 на рисунках), в датчике использовался иммерсионный фотодиод с максимумом фоточувствительности около 3.8 мкм (PD38) при комнатной температуре, который использовался в качестве опорного канала. Оптическая схема датчика следующая: излучение от светодиода (LED42) делится и фильтруется с помощью интерференционных оптических фильтров (IF42 и IF38) и фокусируется на измерительный (PD42) и опорный каналы (PD38). На рисунке 21с представлены нормализованные спектральные характеристики указанных компонентов для комнатной температуры, а также поглощение углекислым газом в используемом диапазоне длин волн.

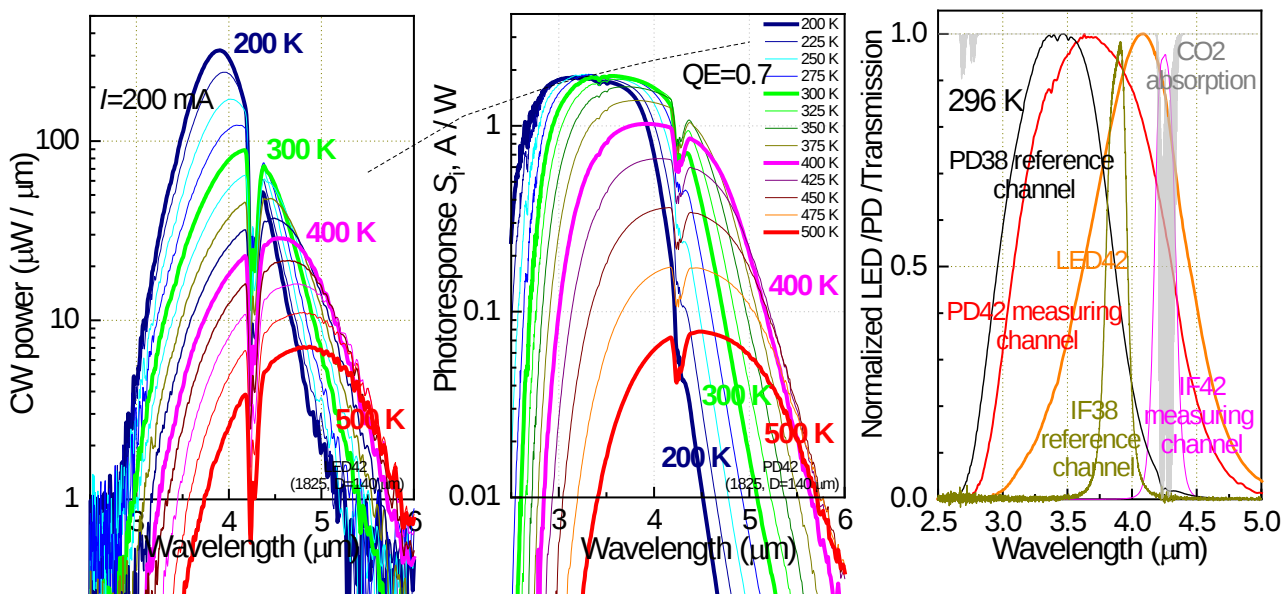


Рис. 21. Спектры электролюминесценции (а) и токовой чувствительности (б) в интервале температур 200 – 500 К ; нормализованные спектральные

характеристики используемых оптоэлектронных компонентов и поглощение CO₂ (с).

Соответственно, были выделены две оптопары измерительного (LED42-IF42-PD42) и опорного (LED42-IF38-PD38) каналов, для которых проводилась оценка их разрешающей способности. Основываясь на полученных зависимостях темнового сопротивления от температуры (рисунок 22(а)) были рассчитаны шумы фотоприемников PD42 и PD38 отдельно и совместно с операционным усилителем первого каскада ADA4895-1. Расчет производился для полосы частот $\Delta f = 1$ Гц за пределами влияния шумов $1/f$ по формуле 3 [17].

$$I_{n_{\Sigma}}(\Delta f) = \Delta f \cdot \sqrt{i_{n_{PD}}^2 + i_{OP}^2 + i_{fb}^2} = \Delta f \cdot \sqrt{\frac{4kT}{R_o} + i_{n_{OP}}^2 + \left(\frac{e_{n_{OP}}}{R_o}\right)^2 + \frac{4kT}{R_{fb}}} [A], \quad (3)$$

где первое слагаемое относится к шумам фотодиода; второе и третье – шумы операционного усилителя (ОУ) первого каскада; последнее слагаемое – тепловой шум сопротивления обратной связи первого каскада. Как видно из рисунка 22(а), ОУ вносит значительный вклад в шумы, особенно на границах температурного диапазона, при этом: в области повышенных температур основной вклад вносят шумы ОУ по напряжению ($e_{n_{OP}}$); при пониженных вероятнее всего происходит выход на асимптотику теплового шума сопротивления обратной связи R_{fb} . Также, на рисунке 22(б) представлены температурные зависимости интегральных сигналов оптопар измерительного (LED42-IF42-PD42) и опорного (LED42-IF38-PD38) каналов, рассчитанные по формуле 4.

$$I_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{LED}(\lambda) \cdot T_{IFx}(\lambda) \cdot S_{IPDx}(\lambda) d\lambda, \quad (4)$$

где $P_{LED}(\lambda)$ – спектральная зависимость мощности LED42, $T_{IFx}(\lambda)$ – спектр пропускания интерференционного фильтра и $S_{IPDx}(\lambda)$ – спектр токовой чувствительности фотодиода для соответствующей оптопары.

Для оценки порога обнаружения углекислого газа был проведен расчет передаточной функции датчика при комнатной температуре. Для этого в формулу 2 был добавлен множитель, отвечающий за учет спектра пропускания ИК излучения на длине оптического пути 2 см. Данные для спектральной зависимости коэффициента поглощения углекислого газа были взяты из открытой библиотеки HITRAN.

$$I_{ph} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (1 - \exp(-k(\lambda) \cdot C \cdot d)) \cdot P_{LED42}(\lambda) \cdot T_{IF42}(\lambda) \cdot S_{IPD42}(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

где $k(\lambda)$ – спектральная зависимость коэффициента поглощения углекислого газа, C – концентрация газа в % об., d – длина оптического пути.

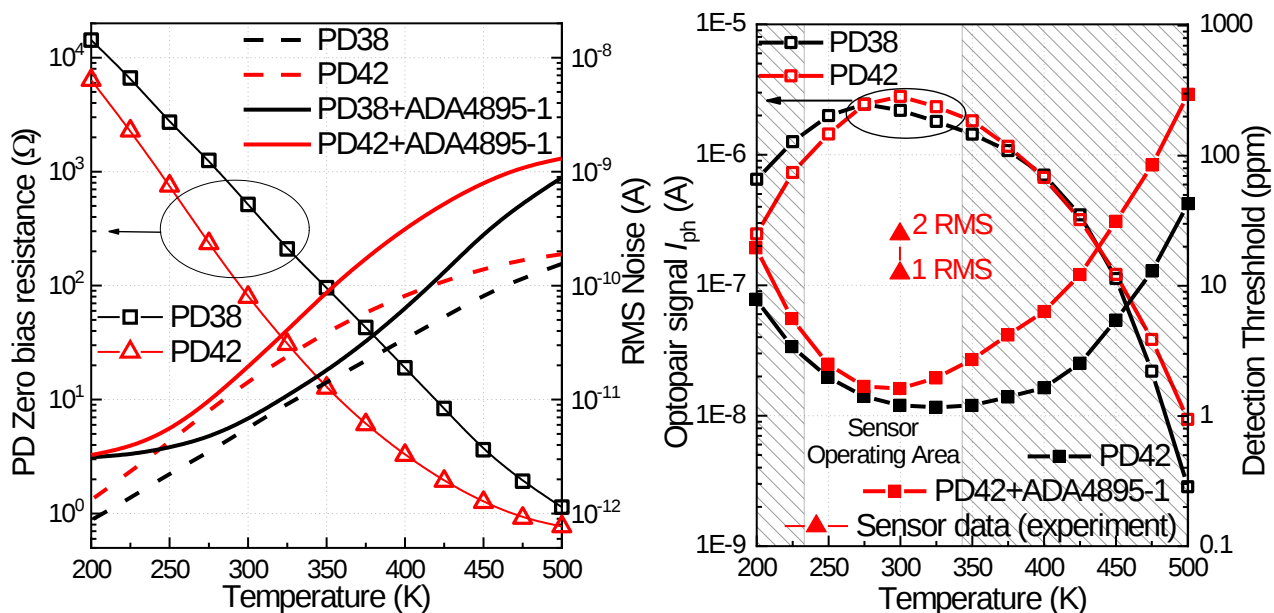


Рис. 22. Температурные зависимости темнового сопротивления и величин шумов фотодиодов отдельно и в цепи ОУ (а), интегральных сигналов оптопар при накачке СД 200 мА и порога обнаружения (б).

Из полученных зависимостей интегральных сигналов, шумов и передаточной функции датчика в приближении её малого изменения от температуры был произведен расчет порога обнаружения углекислого газа в диапазоне температур

200 – 500 К для полосы частот $\Delta f = 1$ Гц, а также нанесены экспериментальные точки, полученные в ходе тестирования прототипа газового датчика при комнатной температуре (рисунок 22b). Среднеквадратичный шум (СКО) был оценен на уровне 15 отсчетов АЦП при оценке размаха полезного сигнала от 85940 до 37127 отсчетов АЦП, при этом порог обнаружения по уровню 2СКО (95% измерений при нормальном распределении ошибок) составил ≈ 0.0025 % об. (25 ppm) Относительная погрешность измерения не превышает 0.1 % полученного значения в диапазоне концентраций до 10 % об.

Фотографии использованных иммерсионных фотодиодов и разработанного прототипа датчика углекислого газа приведены на рисунке 23. Датчик представляет собой полноценное устройство промышленного уровня под управлением микроконтроллера с цифровым выводом сигнала и высокой степенью интеграции используемых компонентов; выполнен в компактном корпусе размером $\varnothing 20 \times 16$ мм и имеет среднее энергопотребление менее 50 мВт.

Было проведено сравнение характеристик экспериментального образца датчика с коммерчески доступными аналогами, которые показали преимущества разработанного датчика по параметрам быстродействия (6 - 30 раз), порогу обнаружения (до 2-х раз) и динамическому диапазону (более 2-х раз) [8, 9].



Рис. 23. Фотография использованных иммерсионных свето- и фотодиодов и фотографии разработанного датчика: без корпуса и оптики и полностью собранного.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения работы:

- разработана методика и создана установка для измерения спектральных зависимостей электролюминесценции и фотоэлектрических характеристик в интервале длин волн $1.5 \div 25$ мкм, вольт-амперных и ватт-амперных характеристик в интервале температур $80 \div 500$ К;

- разработаны и исследованы фотоэлектрические и люминесцентные свойства эпитаксиальных гетероструктур N-InAsSb(P)/n-InAsSb_x/P-InAsSb(P) в области составов $0.3 \leq x \leq 0.45$ и созданы на их основе светодиодные источники и фотодиодные приемники ИК излучения с длинноволновыми границами $\lambda_{0.1} = 10 \div 12$ мкм, работающие при комнатной температуре и термоэлектрическом охлаждении. Выявлены основные закономерности поведения характеристик фотоэлектрического преобразования в зависимости от состава используемого твердого раствора и показано, что характеристики фотодиодов в длинноволновой области спектра определяются диффузионным механизмом токопротекания. Разработанные фотоприемники характеризуются значениями обнаружительной способности $(1 \div 5) \times 10^9$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ при комнатной температуре и термоэлектрическом охлаждении, соответственно, что соответствует лучшим значениям обнаружительной способности фотоприемников на основе материалов КРТ;

- разработаны конструктивные, электронные и программные решения обеспечившие создание на основе полученных свето- и фотодиодов - оптических датчиков для пирометрии и газового анализа, в том числе: недисперсионный малогабаритный датчик углекислого газа, характеризующийся порогом обнаружения не более 25 ppm при частоте выборки 128 мс, оптическом пути 2 см и энергопотреблении менее 50 мВт;

быстродействующий детектирующий модуль для регистрации излучения квантово-каскадных лазеров, работающих на длине волны 8.5 мкм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] A. Rogalski, , Infrared Physics & Technology, **54** (3), 136–154 (2011).
- [2] Rogalski, A.; Martyniuk, P.; Kopytko, M.; Hu, W., Appl. Sci., **501** (11), (2021).
<https://doi.org/10.3390/app11020501>
- [3] D. H. Wu, A. Dehzangi, Y. Y. Zhang, M. Razeghi, Appl. Phys. Lett., **112** (24), 241103 (2018)
- [4] Rogalsky A, Kopytko M and Martyniuk P 2017 Antimonide-based infrared detectors (Bellingham: SPIE press)
- [5] N.D. Il'inskaya, S.A. Karandashev, A.A. Lavrov, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, N.M. Stus', and A.A. Usikova, Infrared Physics & Technology **88**, 223–227 (2018)
- [6] R.E. Kunkov, A.A. Klimov, N.M. Lebedeva, T.C. Lukhmyrina, B.A. Matveev, M.A. Remennyu, Journal of Physics: Conference Series, **1695** (1), 012077 (2022).
- [7] Кочелаев Е.А., Петров В.В., Оптика и спектроскопия **131** (10), 1431 – 1440 (2023). DOI: [10.61011/OS.2023.10.56895.5312-23](https://doi.org/10.61011/OS.2023.10.56895.5312-23)
- [8] Инфракрасные недисперсионные газовые датчики компании Dynament (UK). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.dynament.ru/pdf/tds0048.pdf>
- [9] Инфракрасные недисперсионные газовые датчики компании Optosense (RU) [Электронный ресурс]. URL: <https://optosense.ru/upload/iblock/212/ESAT.100700.00%20%D0%A0%D0%AD.pdf>
- [10] Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Шустов В.В., Тараканова Н.Г., ФТП **4** (6), 717 (2006)
- [11] Закгейм А.Л., Зотова Н.В., Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Черняков А.Е., ФТП **43** (3), 412 (2009).

[12] Ильинская Н.Д., Карандашев С.А., Карпухина Н.Г., Лавров А.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Стусь Н.М., Усикова А.А., ФТП **50** (5), 657 (2016).

[13] Александров С.Е., Гаврилов Г.А., Капралов А.А., Матвеев Б.А., Ременный М.А., Сотникова Г.Ю., ЖТФ **88** (9), 1433 (2018). DOI: 10.21883/00000000000

[14] A.A. Klimov, R.E. Kunkov, A.A. Lavrov, N.M. Lebedeva, T.C. Lukhmyrina, B.A. Matveev, M.A. Remennyi, Journal of Physics: Conference Series, **1851** (1), 012019 (2021).

[15] http://www.matprop.ru/InSb_bandstr

[16] Иммерсионные свето- и фотодиоды, работающие на длине волны 4.2 мкм.

[Электронный ресурс]. URL: <http://www.ioffeled.com/Specifications/LED42.pdf>,
URL: <http://www.ioffeled.com/Specifications/PD42.pdf>

[17] Гаврилов Г. А., Матвеев Б. А., Сотникова Г. Ю., ФТП **37** (18), 50 – 57(2011).