

На правах рукописи



Смирнов Константин Яковлевич

**ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА КОРОТКОВОЛНОВОГО  
ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА С ФОТОКАТОДОМ НА  
ОСНОВЕ ГЕТЕРОСТРУКТУР InP/InGaAs/InP**

1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

**Научный руководитель:** Давыдов Вадим Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

**Официальные оппоненты:**

1. Жуков Алексей Евгеньевич, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, НИУ ВШЭ в Санкт-Петербурге: Санкт-Петербургская школа физико-математических и компьютерных наук, департамент физики (руководитель департамента, профессор)
2. Шарофидинов Шукрилло Шамсидинович, кандидат технических наук, научный сотрудник ФГБУ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН), отделение твердотельной электроники, лаборатория физики полупроводниковых приборов.

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный технологический институт» (Технический университет)

Защита состоится «01» июля 2022 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.029.01 (Д002.034.01) на базе Института аналитического приборостроения РАН (ИАП РАН) по адресу: 198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, д. 31-33, лит. А.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ИАП РАН по тому же адресу или на сайте [www.iairas.ru](http://www.iairas.ru). Отзывы на диссертацию и автореферат направлять по адресу: 190103, Санкт-Петербург, Институт аналитического приборостроения РАН, а/я 207.

Автореферат разослан «   » мая 2022 года.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
Доктор физико-математических наук



А.Л. Буляница

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

В настоящее время приборы, обеспечивающие регистрацию инфракрасного излучения, находят широкое применение в решении различных задач. Это связано с тем, что собственное излучение от большинства объектов естественного и искусственного происхождения, окружающих человека, содержит в себе инфракрасную электромагнитную составляющую (0,76-100 мкм).

Одна из наиболее перспективных областей применения ИК приборов – это работа по детектированию объектов в условиях слабой и нулевой видимости, а также задачи высокоскоростной локации и позиционирования. Непрерывное совершенствование характеристик этих устройств, например, приборов ночного видения (ПНВ), является определяющим в условиях жесткой конкуренции при проведении новых исследований и разработок. Повышение характеристик ПНВ может быть достигнуто путем внедрения новых технологий и материалов в процесс их производства. В настоящее время основную массу серийно выпускаемых приборов, осуществляющих ночное наблюдение и определение локации объектов в ночное время, составляют детекторы, чувствительные в ближнем инфракрасном диапазоне (Near Infrared Range – NIR –  $\lambda = 0,76-1,0$  мкм). К ним относятся в первую очередь устройства на основе кремния со смещенной красной границей, спроектированные на основе ПЗС- и КМОП- логики, а также системы с электронно-оптическими преобразователями на основе мультищелочных и GaAs фотокатодов. Альтернативу NIR-фотоприемным системам составляют термальные детекторы на основе микроболометров из  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{VO}_x$ , чувствительные в средне- (Medium Wavelength Infrared Range – MWIR –  $\lambda = 3-6$  мкм) и длинноволновом ИК-диапазоне (Long Wavelength Infrared Range – LWIR –  $\lambda = 6-15$  мкм). В настоящее время научным мировым сообществом ведется активная разработка приборов, чувствительных в коротковолновом ИК-диапазоне (Short Wavelength Infrared Range – SWIR –  $\lambda = 1-3$  мкм), который в силу ряда физических свойств является крайне привлекательным для построения систем детектирования. В первую очередь это связано с тем, что граница технического зрения, определяющая преобладающую составляющую электромагнитного излучения, лежит в интервале 2,2–3,5 мкм. в зависимости от фонового излучения звездного неба. Так, слева от границы преобладает фоновое излучение небесной полусферы, а справа тепловое излучение атмосферы и поверхности Земли. Пик спектральной плотности излучения ночного неба лежит в диапазоне 1,6–1,8 мкм при нормальных условиях. Он в 7 раз превышает спектральную плотность в ближнем инфракрасном диапазоне. Интерпретация данных, полученных с помощью SWIR фотоприемников схожа с устройствами видимого и NIR диапазона, что обусловлено наличием у полученного изображения тени и контраста, а, следовательно, объектной идентификации, что невозможно в условиях приема термального излучения. При этом наличие атмосферного окна прозрачности на длине волны 1,5 мкм, а также уменьшенное рэлеевское рассеяние относительно NIR диапазона делают эти приборы более чувствительными по сравнению с устройствами ближнего ИК и видимого диапазона.

Изготовление SWIR фотоприемных устройств является крайне сложной технологической задачей и было освоено лишь в последнее время. На данный момент подавляющее число серийно производимых приборов представляют собой гибридные сборки на основе внутреннего фотоэффекта. Так, чувствительный к коротковолновому инфракрасному излучению элемент сочленяется (процесс бондинга) с интегральной схемой

считывания на основе КМОП-логики. Несмотря на высокие значения квантовой эффективности, низкий уровень шума и энергопотребления, приборы такого типа имеют ряд недостатков. В первую очередь это высокая стоимость технологического производства, ограничение форм-фактора, связанное с технологическим пределом процесса бондинга, неоднородность чувствительности и дефектность пикселей, а также невозможность реализации активно-импульсного режима с малой длительностью строба (менее 200 мкс).

Вышеперечисленные недостатки отсутствуют в случае построения фотоприемных систем на основе гибридного фотоэлектронного прибора (ГФП) с фотокатодной гетероструктурой InP/InGaAs/InP и электронно-чувствительным элементом, которые находятся в одном вакуумном объеме. На выходе такого устройства формируется электрический сигнал, соответствующий преобразованному фотонному излучению. Это делает возможным реализовывать схемы накопления и передачи сигналов в цифровом виде. В этом случае используемые элементы электронной оптики для регистрации ИК диапазона и видимого диапазона идентичны, что значительно удешевляет процесс их производства. Благодаря наличию, так называемого, усиления электронной бомбардировки (electron-bombarded gain) в процессе преобразования фотоэлектронов возможно получение высокой чувствительности в ИК диапазоне при низком уровне шума по сравнению с используемыми в настоящее время приборами. Сам прибор не требует глубокого охлаждения благодаря физическим свойствам гетероструктуры InP/InGaAs/InP. Наличие в конструкции прибора фотокатода позволяет использовать его в режиме стробирования с длительностью импульса менее 100 нс.

Наибольших успехов в проектировании и реализации ГФП добились такие ученые как Verle W. Aebi, Derek F. Sykora, Michael J. Jurkovic, Kenneth A. Costello (компания Intevac Photonics, Inc., США) и Toru Hirohata, Minoru Niigaki, Tomoko Mochizuki, Masami Yamada (компания Hamamatsu Photonics, Япония). Еще в конце двадцатого века было налажено серийное производство ГФП с GaAs фотокатодом для ближнего ИК диапазона. В 2005 году компанией Intevac был создан прибор с InP/InGaAs/InP фотокатодом. Он является единственным в своем роде, находится на вооружении армии США, на него наложено эмбарго. Несмотря на большое количество научных трудов в области создания фотокатода, чувствительного в коротковолновом ИК диапазоне, серийно производимых приборов с ним более не существует, а результаты квантовой эффективности структуры не превышают 1%. Что касается отечественных ученых, наибольших успехов в разработке фотоприемных устройств с фотокатодами добились сотрудники компаний АО «Катод» (Новосибирск), ОАО «Геофизика-НВ» (Москва), АО ЦНИИ «Электрон» (Санкт-Петербург). Серийно выпускаются приборы на основе ЭОП, сочлененного с ПЗС-матрицей, для различных спектральных диапазонов. Опубликован ряд работ по исследованию возможностей внедрения в производство электронно-чувствительных ПЗС.

Таким образом, на данном этапе задача проектирования и изготовления гибридных приборов с InP/InGaAs/InP фотокатодами требует обширной фундаментальной и практической проработки. В первую очередь это связано с требованием получения высокой квантовой эффективности и равномерности чувствительности на фотокатодных гетероструктурах, оптимизации процесса преобразования фотоэлектронов в электрический сигнал, обеспечения высокого уровня стабильности и повторяемости результата.

## **Цель работы.**

Разработка на основе исследований элементной базы и практическая реализация с её использованием гибридного фотоприемного прибора, чувствительного в коротковолновом ИК-диапазоне (0,9–1,7 мкм) с отображением сигнала в цифровом виде для активных и пассивных обзорных систем различного назначения.

Достижение поставленной цели обусловлено решением следующих задач в ходе выполнения диссертационной работы:

1. Анализ существующих систем наблюдения, чувствительных в коротковолновом инфракрасном диапазоне и поиск методов улучшения их характеристик.
2. Разработка конструктивных методов построения вакуумного гибридного фотодетектора на основе фотокатода и твердотельного кремниевого преобразователя фотоэлектронов.
3. Разработка и изготовление опытного образца электронно-чувствительного прибора на основе линейного массива рпн-диодов, для использования его в качестве преобразователя фотоэлектронов и элемента, обеспечивающего внутреннее усиление в корпусе фотоприемного устройства с помощью механизма электронной бомбардировки. Исследование его характеристик.
4. Изготовление фотокатода с переносом электронов на основе эпитаксиальных гетероструктур InP/InGaAs на подложке InP. Исследование его свойств и характеристик.
5. Проведение макетирования образцов фотодетекторов для коротковолнового инфракрасного диапазона. Измерение их параметров в соответствии с разработанными методиками и определение по результатам исследований направлений для совершенствования технологий и обновления существующей элементной базы с целью улучшения характеристик разрабатываемых приборов.

## **Научная значимость.**

Научная значимость диссертационной работы определяется тем, что полученные результаты в ходе выполнения исследований позволили сформировать эффективную фотокатодную структуру, чувствительную в коротковолновом инфракрасном диапазоне. В ходе проведенных исследований отработан процесс формирования отрицательного электронного сродства на поверхности фотокатода. Предложена методика очистки поверхности фотокатодной структуры посредством совмещения методов химического травления и вакуумного отжига. Приведена конструкция и методы оценки параметров электронно-чувствительного кремниевого детектора на основе линейного массива рпн-диодов, с высокими показателями быстродействия. Обоснована перспективность использования фотокатодной гетероструктуры InP/InGaAs/InP в качестве основной части неохлаждаемых фотоприемных систем инфракрасного диапазона.

## **Практическая значимость.**

Практическая значимость диссертации заключается в том, что её результаты использованы в работах по оптимизации конструкции фотоприемных устройств на основе гетероструктуры InP/InGaAs/InP и разработке их элементов, включающих в себя поиск новых технологий по практической реализации и измерение параметров с помощью новых предложенных методов. Разработана и реализована конструкция фотоэлектронного прибора, где все его элементы (фотокатод на гетероструктурах для коротковолнового инфракрасного диапазона и твердотельный электронно-чувствительный элемент) объединены в одном вакуумном объеме. Данная схема кардинально отличается от

существующих отечественных инфракрасных приборов в составе ЭОП и сочлененной посредством волоконной оптики. Разработана и реализована конструкция фотодетектора для коротковолнового ИК диапазона с линейным массивом pin-диодов. Такая конструкция отличается беспрецедентным для неохлаждаемых ИК приборов быстродействием в совокупности с высокой чувствительностью. Предложенная конструкция прибора не требует освоения технологий бондинга и производства интегральных схем считывания на основе КМОП-логики, что существенно упрощает и удешевляет технологический процесс создания фоточувствительного сенсора для заданного спектрального диапазона, при этом обеспечивая высокий уровень чувствительности (обнаружительной способности детектора), быстродействия и возможность цифровой обработки полученной информации. Разработанная технология реализации кремниевых электронно-чувствительных материалов может быть перенесена на проектирование детекторов для широкого спектрального диапазона, включая УФ, видимый и ИК.

#### **На защиту выносятся следующие положения:**

1. Методика получения высокой степени атомарной чистоты поверхности полупроводниковых структур на основе InP, включающая в себя химическое травление и низкотемпературный вакуумный отжиг.
2. Метод оценки быстродействия и коэффициента усиления первичных фотоэлектронов в области подложки линейного массива pin-диодов.
3. Метод параллельной оценки чувствительности гибридного фотоэлектронного прибора с InP/InGaAs/InP фотокатодом и линейным массивом pin-диодов в качестве преобразователя фотоэлектронов.

#### **Апробация работы.**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях, конгрессах, симпозиумах и других научных встречах, всего было сделано 34 доклада. Наиболее важные из них: The 3<sup>st</sup>, 4<sup>st</sup>, 5<sup>st</sup>, 7<sup>st</sup> International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures «Saint-Petersburg OPEN 2016, 2017, 2018, 2020» (Санкт-Петербург, Россия, 28–30 марта 2016, 3–6 апреля 2017, 2–5 апреля 2018, 26–30 апреля 2020); The International Youth Scientific Environmental Forum «Ecobaltica – 2017». (Republic of Belarus, Grodno 24–27 August 2017); XV Международная Конференция «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии – 2017». (Новороссийск, Россия, 4–9 сентября 2017); Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов – 2017, 2018, 2019» (Москва, Россия, 10–14 апреля 2017, 9–13 апреля 2018, 8–12 апреля 2019); The XIX International Environmental Forum «Baltic Sea Day – 2018» (Санкт-Петербург, Россия, 21–23 марта 2018); Международная конференция «ФизикаА/Спб 2018» (Санкт-Петербург, Россия, 23–25 октября 2018); 1<sup>я</sup> международная конференция «IEEE EExPolytech-2018: Electrical Engineering and Photonics» (Санкт-Петербург, Россия, 22–23 октября 2018); 11<sup>я</sup> международная конференция «Аморфные и микрокристаллические полупроводники» (Санкт-Петербург, Россия, 19–21 ноября 2019); 25<sup>я</sup> международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, Россия, 24–26 мая 2019); 7<sup>я</sup>, 8<sup>я</sup>, 9<sup>я</sup> Международная научно-техническая и научно-методическая конференция «Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании» (Санкт-Петербург, Россия, 28 февраля – 1 марта 2018, 27–28 февраля 2019, 26–27 февраля 2020); 2<sup>я</sup> международная конференция «IEEE EExPolytech-2018: Electrical Engineering and Photonics» (Санкт-Петербург, Россия, 17–18 октября 2019); 2<sup>я</sup> международная конференция по астрофизике для молодых ученых (Бюракан, Армения,

17–21 сентября 2019); 5<sup>я</sup> международная конференция «Информационные технологии и нанотехнологии» (Самара, Россия, 21–24 мая 2019).

### **Публикации.**

Основное содержание диссертации изложено в 18 оригинальных статьях, четыре из которых – в изданиях из перечня рецензируемых научных журналов ВАК, 14 – в международных изданиях, индексируемых в базе данных Scopus, одном патенте на изобретение и в 20 тезисах докладов на международных конференциях, форумах и семинарах. Список основных работ приведен в конце диссертации.

### **Личный вклад автора.**

Настоящая диссертация обобщает результаты научной деятельности автора в лабораториях ФБГОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» и АО ЦНИИ «Электрон» за шестилетний период его работы, посвященные проведению исследований, разработке и реализации новых принципов построения фотоприемных устройств для УФ, видимого и ближнего ИК диапазона. Анализ многих результатов экспериментальных исследований и теоретических расчетов выполнен совместно с доктором физико-математических наук, профессором В.В. Давыдовым, который оказал большую помощь в подготовке диссертации. Но во всех случаях автору диссертации принадлежит решающая роль в определении направления исследований, формулировании задач и выборе подхода к их решению. В получение результатов исследований, а также в их обобщении, вклад автора диссертации был определяющим.

### **Структура диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, общего списка литературы, списка публикаций автора по теме диссертации и 3 приложений. Работа содержит 59 рисунков, 6 таблиц и список литературы из 145 наименований. Её полный объем – 129 страниц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснованы актуальность темы диссертационной работы, выбор направлений исследований, сформулирована цель работы. В введении также определена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, изложены защищаемые положения.

**Глава 1.** Обоснован выбор коротковолнового инфракрасного диапазона (0,9-1,7 мкм) в качестве полосы спектральной чувствительности для разрабатываемого фотодетектора и его основного фоточувствительного элемента – фотокатодной гетероструктуры на основе твердого раствора  $\text{In}_{0,47}\text{Ga}_{0,53}\text{As}$ .

Установлен ряд преимуществ коротковолновых ИК (КВ-ИК) приборов перед фотоприёмниками УФ, видимого, а также среднего и дальнего ИК излучения. Основными из которых являются: возможность работы в спектральном диапазоне безопасном для человеческого глаза, простота интерпретации полученного с помощью фотодетектора электрического сигнала, возможность работы как с активной подсветкой, так и в полностью пассивном режиме, наличие атмосферного окна прозрачности Земли в диапазоне спектральной чувствительности, отсутствие необходимости криогенного охлаждения фотоэлементов, низкие значения форм-фактора, энергопотребления и сравнительно низкая стоимость элементной базы КВ-ИК приборов. Структурная схема пассивного ФПУ для

систем наблюдения в заданном спектральном диапазоне представлена на рис. 1. Для реализации активно-импульсного режима в данную систему должен быть добавлен источник излучения, обеспечивающий засветку объекта на длине волны соответствующей спектральной чувствительности ГФП. Блок накачки источника излучения должен быть засинхронизирован с высоковольтным источником питания, входящим в состав ФПУ.

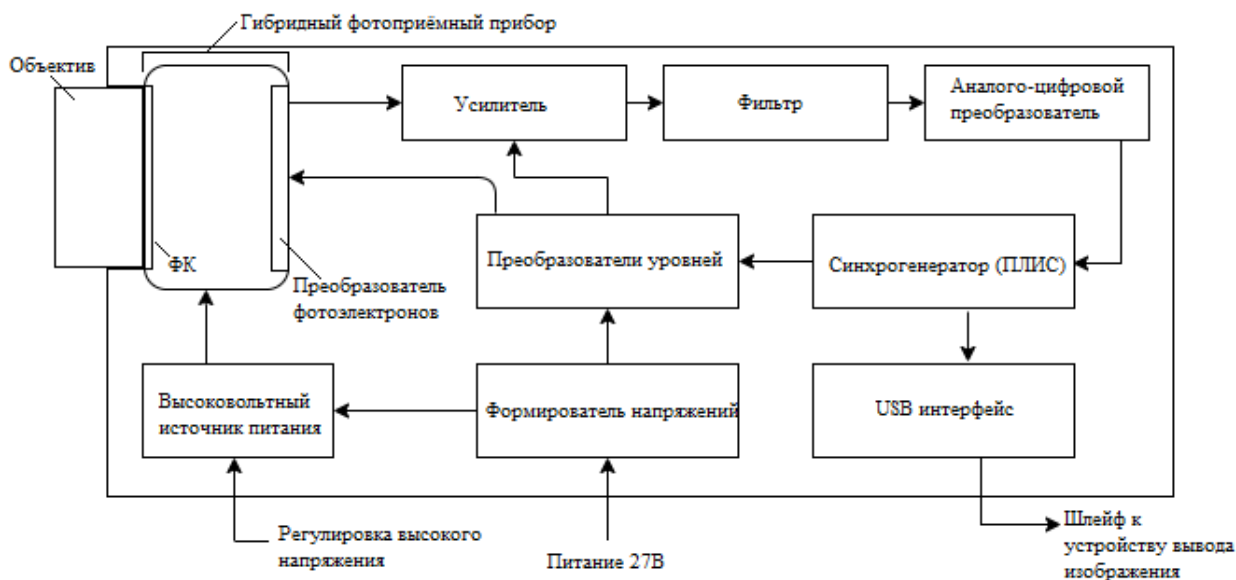


Рисунок 1 – Структурная схема ФПУ для КВ-ИК.

Основными элементами ФПУ являются фотодетектор, осуществляющий фотон-электронное преобразование, отраженного от наблюдаемого объекта, излучения, высоковольтный источник питания, необходимый для ускорения электронов, вышедших в вакуум с поверхности фотокатода, и блок управления, обеспечивающий вывод цифрового сигнала с выхода преобразователя фотоэлектронов ГФП.

Проведен анализ практических реализаций фотодетекторов для КВ-ИК с получением пространственного распределения сигнала в цифровом виде. Выполнен расчет параметров гибридного фотоприемного прибора на основе фотокатодной гетероструктуры InP/InGaAs/InP. В качестве аналогов такого прибора указаны устройства на основе гибридных сборок и электронно-оптических преобразователей. В качестве преимуществ реализации фотоэлектронного прибора по гибридной технологии, где все составные элементы находятся в одном вакуумном объеме указаны следующие пункты: реализация низкошумящего процесса усиления в приборе с помощью метода электронной бомбардировки, низкие требования к шумам электроники, возможность работы устройства в режиме стробирования с длительностью импульса менее 100 нс, обусловленное наличием фотокатода, отсутствие необходимости глубокого криогенного охлаждения, низкие предельные массогабаритные параметры, возможность производства без привлечения зарубежных комплектующих. Проведены оценочные расчеты параметров пороговой облученности и шумовых характеристик ГФП относительно приведенных аналогов (рис. 2) с использованием эквивалентной формулы полного шума на выходе ГФП (1).

$$N_{\text{полн}} = \sqrt{N_{\text{дроб}}^2 + N_{\text{темнППЗ}}^2 + N_{\text{счит.ППЗ}}^2 + N_{\text{темнФК}}^2} \quad (1)$$



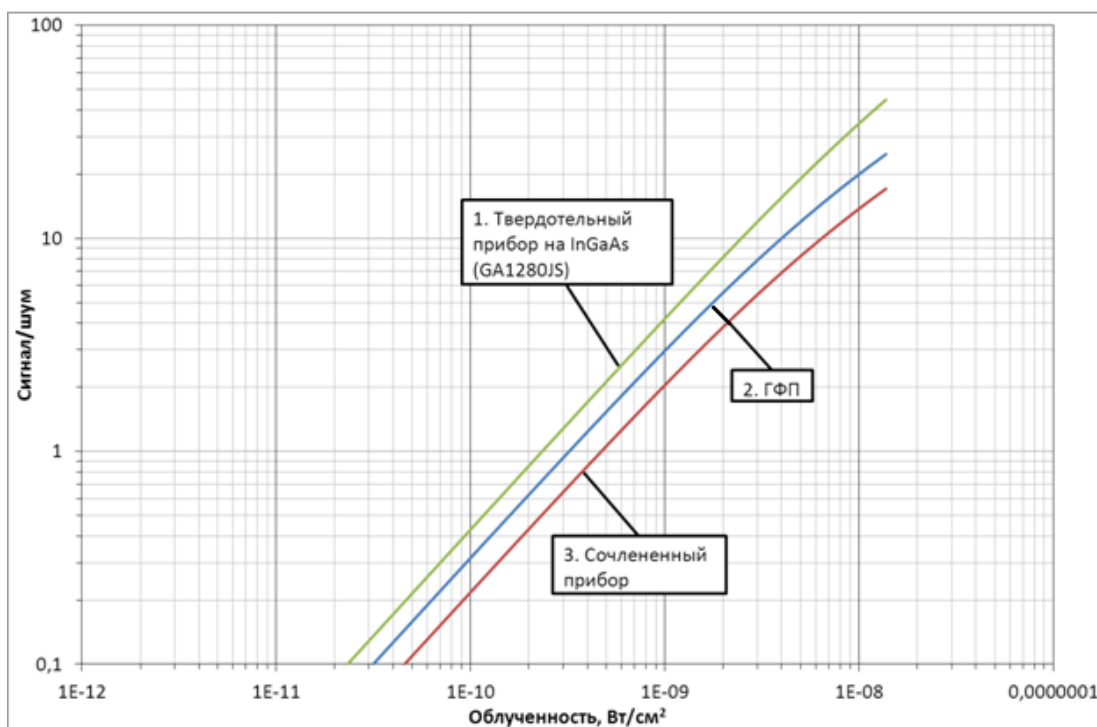


Рисунок 2 – Зависимость соотношения сигнал/шум от облученности для разных приборов на длине волны 1540 нм.

Установлено, что ФПУ на основе ГФП для коротковолнового ИК диапазона имеют ряд преимуществ относительно приборов с другой конструкцией, в частности, превосходят сочлененные приборы по таким параметрам, как предельное разрешение, темновой ток, динамический диапазон, форм-фактор. Также применение ГФП позволяет реализовывать высокочастотный стробируемый режим с длительностью импульса менее 100 нс, что не могут обеспечить ФПУ на основе гибридных сборок.

**Глава 2** посвящена теоретическому описанию физических процессов и практической реализации фотокатода для спектрального диапазона 0,9-1,7 мкм. Рассмотрены физические принципы построения фотокатода с междолинным переносом электронов на основе гетероструктуры InP/InGaAs/InP. Зонная схема такого фотокатода представлена на рис. 3.

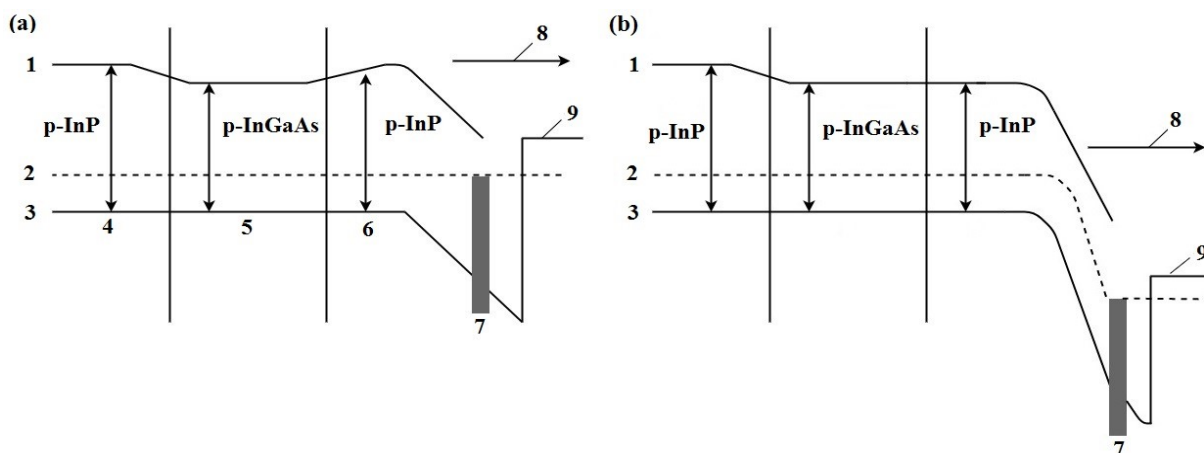


Рисунок 3 – Зонная схема ФКПЭ фотокатода: (а) без приложения внешнего электрического поля, (б) при применении внешнего электрического поля, где 1 – зона проводимости, 2 – уровень Ферми, 3 – валентная зона, 4 – подложка, 5 – активный слой, 6 – эмиттер, 7 – металлический электрод, 8 – направление фотоэмиссии, 9 – уровень вакуума.

Оценено влияние подложки фотокатода на эффективный транспорт падающих фотонов до поглощающего слоя InGaAs, рассчитаны параметры антиотражающего покрытия для снижения фотонного поглощения InP.

Для получения эффективных фотокатодов критически важно достижение чистой атомарной поверхности структуры, которая может быть достигнута реализацией различных технологических операций. В случае гетероструктуры InP/InGaAs/InP, где поверхностным слоем является тонкая структура фосфида индия с нанесенным на нее поверхностным электродом из титана, эта задача осложняется из-за физических свойств InP. Низкая температура деградации ( $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) не позволяет производить вакуумный отжиг на температурах  $500\text{--}600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что характерно для других полупроводниковых фотокатодов, относящихся к группе  $\text{A}_3\text{B}_5$ . На основе проведенных экспериментальных исследований был разработан новый метод очистки полупроводниковых структур с использованием трехстадийного травления в водных растворах кислот и последующим вакуумным низкотемпературным отжигом, который позволил значительно превзойти предыдущие результаты чистоты поверхности образцов. Выполнено сравнение результатов фотоэмиссии с образцов, протравленных классическими методами для очистки  $\text{A}_3\text{B}_5$  полупроводников и с использованием разработанного в диссертации метода (кривая 4 на рис 4).

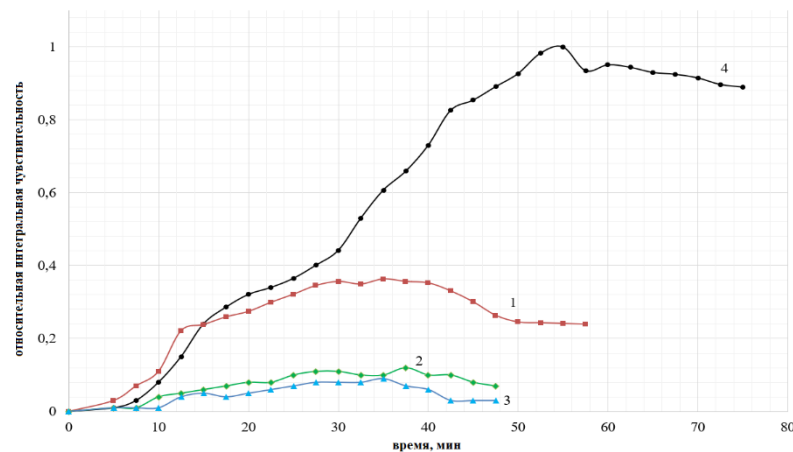


Рисунок 4 – Зависимость относительной интегральной чувствительности фотокатода InP/InGaAs/InP от времени, очищенного с помощью 1 –  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}+\text{Cl}$ , 2 –  $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}+\text{Br}$ , 3 –  $\text{HCl}$ , 4 – травления в растворах  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и низкотемпературного вакуумного отжига.

В результате на исследованных фотокатодных структурах InP/InGaAs/InP различной конфигурации были получены воспроизводимые значения квантовой эффективности при непрерывной освещенности со стороны эмиттера в условиях комнатной температуры более 5 % (рис. 5), более 10 % при температуре 278 К и более 3% при освещении образца со стороны подложки. Расчет квантовой эффективности осуществлялся по следующей формуле (2):

$$\gamma = \frac{N_e}{N_{ph}} = \frac{I \Delta T / q_e}{P \Delta T / \frac{hc}{\lambda}} = \frac{I}{P} \cdot \frac{hc}{q_e \lambda} \quad (2)$$

Полученные значения не уступают результатам мировых исследований по данной тематике.

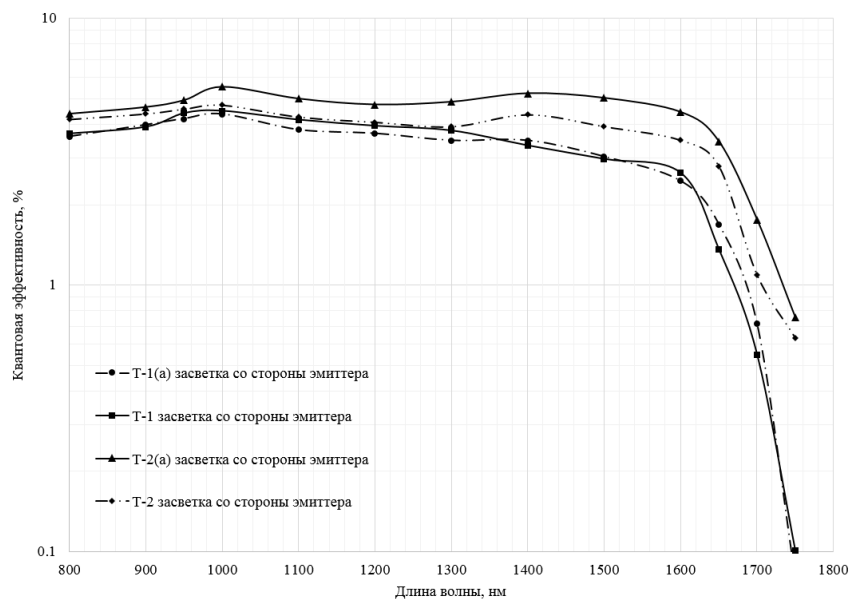


Рисунок 5 – Квантовая эффективность структур InP/InGaAs/InP в режиме засветки со стороны эмиттера (режим работы на отражение).

**Глава 3** посвящена теоретическому и практическому рассмотрению твердотельного элемента, который в гибридном фотоэлектронном приборе обеспечивает регистрацию и преобразование в электрический сигнал электронов, испускаемых в вакуум с поверхности фотокатода. При этом сигнал на выходе сенсора формируется за одно фотон-электронное преобразование, что невозможно в случае другой организации прибора на основе внешнего фотоэффекта. С учетом рекомбинации в области подложки твердотельного элемента высокоэнергичных электронов, в приборе реализуется механизм электронного усиления (EBS), обеспечивающий в идеальных условиях коэффициент преобразования 2200 при энергии бомбардирующих электронов 8кэВ. Коэффициент шума процесса электронного усиления NFC не превышает 1,09, для примера, этот коэффициент для ЭОПов третьего поколения приблизительно равен двум.

Практическая реализация преобразователя фотоэлектронов представлена в виде линейного массива pin-диодов с обратной засветкой, который позволяет получать распределение отраженного лазерного излучения по координате с высоким временным разрешением. Диоды формируются на основе чистого высокоомного кремния методом зонной плавки с концентрацией примеси на уровне  $10^{12}$  ат/см<sup>3</sup>. С двух противоположных сторон структуры формируются области p<sup>+</sup> и n<sup>+</sup> с повышенной концентрацией (порядка  $10^{20}$  ат/см<sup>3</sup>) примеси для формирования p-n перехода и изотипного перехода, которые обеспечивают функционирование структуры pin-диода в режиме обратного смещения. В этом случае происходит полное обеднение высокоомной базы, что обеспечивает дрейфовый перенос носителей заряда и как следствие – времена регистрации сигнала на уровне десятков и единиц нс. Диод засвечивается с обратной стороны, таким образом, регистрируемые частицы поглощаются в области изотипного перехода высокоомной базы p-типа и движутся к n<sup>+</sup>-p переходу в дрейфовом режиме, обеспечиваемом обратным смещением 200–300 вольт при толщине базы ~150–350 мкм и удельном сопротивлении базы 1000–5000 Ом\*см. Время нарастания/спада электронно-чувствительных кремниевых диодов ~ 10 нс обеспечивается за счет дрейфового переноса неравновесных носителей заряда в утоненной высокоомной базе.

В ходе представленного технологического цикла были изготовлены различные типы линеек pin-диодов и оценены их параметры. В соответствии с предложенной методикой были определены параметры фронта (времени нарастания) импульсной характеристики. На

рис. 6 представлена импульсная характеристика одного из элементов диодного массива. На основе полученных экспериментальных результатов сделан вывод о высоком уровне быстродействия преобразователя фотоэлектронов. Также была разработана методика оценки чувствительности линейных массивов диодов к фотоэлектронам. Для этого применялась разработанная схема измерения с установленным в условиях вакуумной камеры излучающим фотокатодом и исследуемым элементом, закрепленном на специальной оснастке. На основе экспериментальных данных были получены зависимости усиления потока первичных фотоэлектронов в результате рекомбинации в области базы на элементах диодного массива от напряжения, приложенного на участке фотокатод-анод (рис. 7).

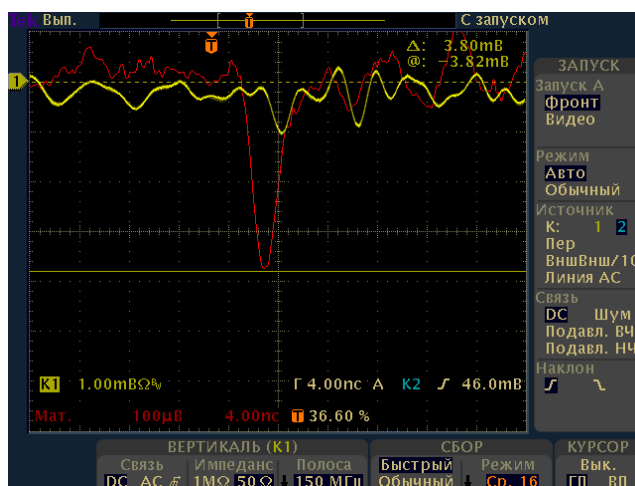


Рисунок 6 – Импульсная характеристика элемента диодного массива при  $U_{см} = -180V$ , развертка 4нс/дел, полоса 150 МГц М-разностный сигнал. Масштаб для изображения помехи выделенного сигнала увеличен на порядок. Длительность на уровне 0,5 около 2,5нс, фронт – 1,6нс.

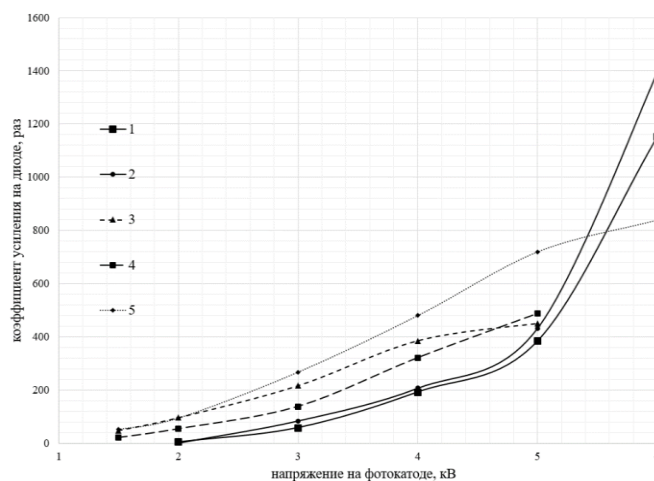


Рисунок 7 – Коэффициент усиления первичных фотоэлектронов от напряжения, поданного на фотокатод, для пяти диодов двух типов линеек.

Полученные результаты показали, что применение разработанных массивов рпн-диодов позволяет получить быстродействие преобразования фотоэлектронов в электрический сигнал на уровне менее 10 нс. При этом коэффициент усиления первичных фотоэлектронов, попавших в активную область диодов составляет более 500 при напряжении на участке фотокатод – массив рпн-диодов 4кВ, и более 1000 при 6 кВ.

**Глава 4** посвящена изготовлению опытных образцов ГФП, с учетом особенностей корпусирования элементов прибора в вакуумной камере, и измерению их параметров. Необходимость достижения в корпусе прибора сверхвысокого вакуума, а также подачи на участке катод-анод высокого напряжения на уровне нескольких киловольт, значительно сужает перечень доступных для использования материалов. В качестве основы корпуса было выбрано стекло марки С52. Методом формирования изделия является спекание в графитовой форме стеклянной массы и коваровых вводов с последующей шлифовкой и полировкой необходимых поверхностей. Конструкция фотодетектора и его внешний вид представлен на рис. 8. Для обеспечения необходимого разрешения в приборе используется проксимити фокусировка (proximity-focusing).

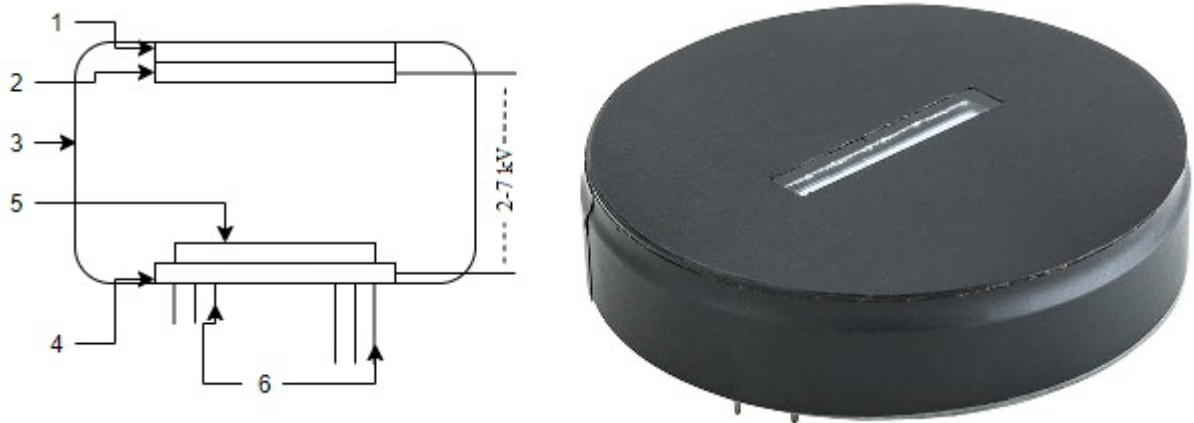


Рисунок 8 – Структура и внешний вид макета гибридного фотодетектора: 1 – входное окно, 2 – InP/InGaAs/InP фотокатодная структура, 3 – корпус прибора, 4 – плата крепления линейки диодов, 5 – 12 элементная линейка pin-диодов, 6 – высоковольтные вводы и выводы для подключения прибора.

Использование этой технологии позволило отказаться от каких-либо элементов электронной оптики, что значительно упрощает конструкцию прибора, при этом позволяя рассчитывать на эффективный сбор фотоэлектронов с помощью твердотельного преобразователя.

Для исследований было изготовлено несколько опытных образцов гибридных приборов с InP/InGaAs/InP фотокатодом и линейным двенадцатиэлементным массивом pin-диодов в качестве преобразователя фотоэлектронов. Исследования их характеристик (спектральной чувствительности фотокатода внутри корпуса прибора после вакуумной запрессовки и спектральной чувствительности на выходе прибора) проводились в соответствии с представленными методами на разработанных измерительных стендах. На рис. 9 представлены спектральные зависимости чувствительности фотокатодов в приборах, а на рис. 10 параметры спектральной чувствительности  $S$  в амперах на ватт для всех элементов преобразователя фотоэлектронов, полученные согласно методу параллельной оценки чувствительности ГФП.

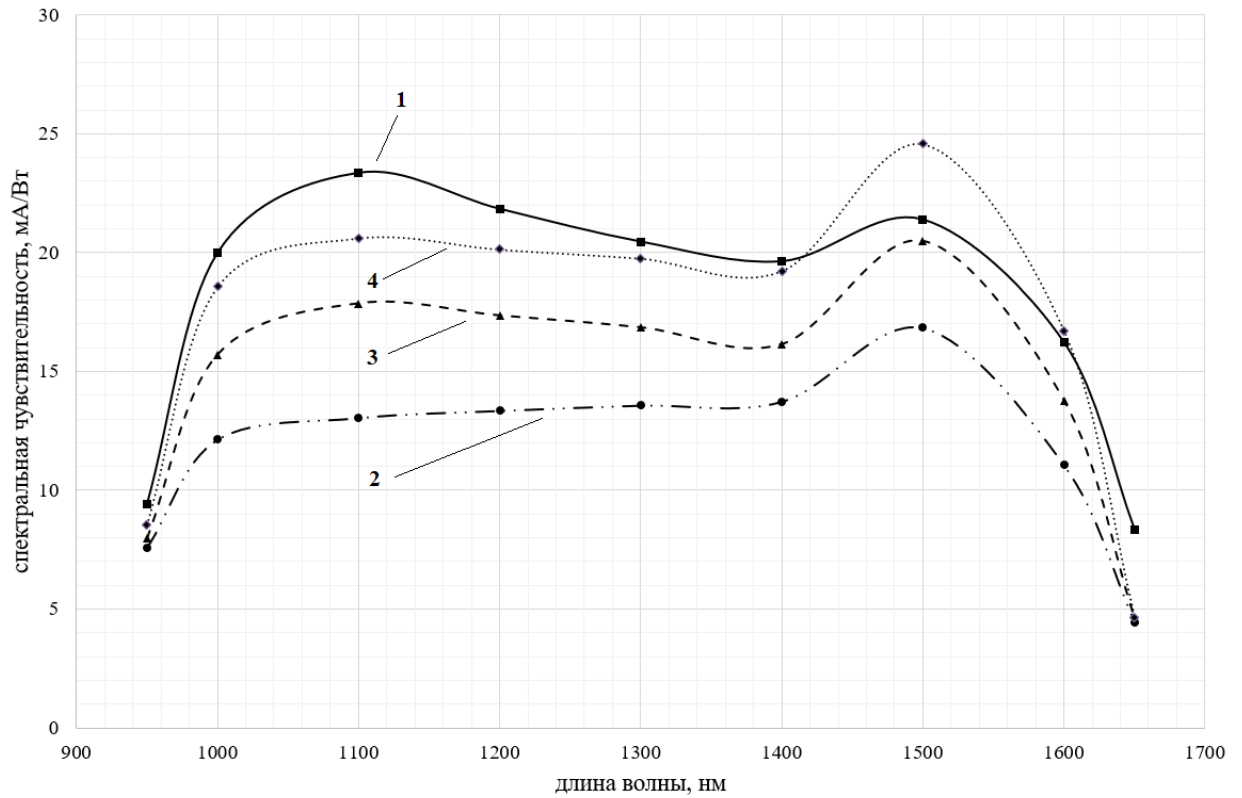


Рисунок 9 – Спектральные зависимости чувствительности фотокатодов в приборах (при напряжении фотокатод-диод  $U_{фк}=300В$ )

1 – Макет №1 ( $U_{см}=3,6В$ ); 2 – Макет №2 ( $U_{см}=2,4В$ );  
3 – Макет №2 ( $U_{см}=2,6В$ ); 4 – Макет №2 ( $U_{см}=2,8В$ ).

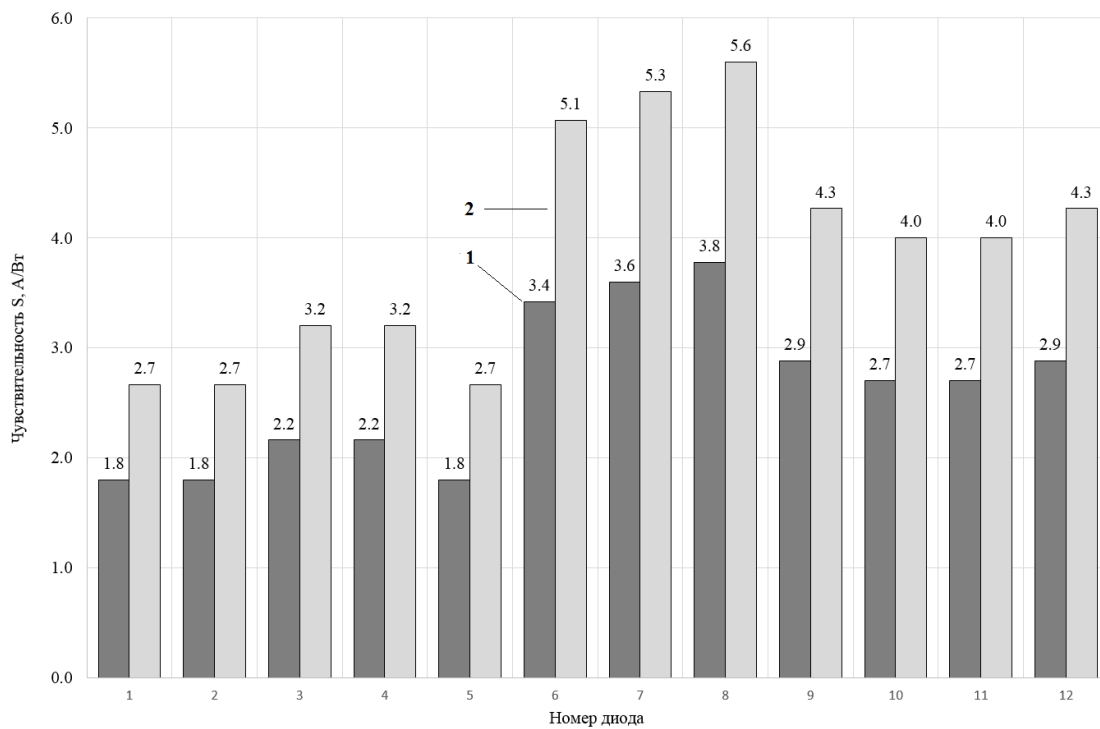


Рисунок – 10 Чувствительность  $S$ , на длине волны  $\lambda=1100$  нм диодов Макета №2 ( $U_{фк}=-2кВ$ ,  $U_{диод11}=-105В$ ) при 1- напряжении смещения на сетке фотокатода  $U_{см}=2,4В$ ; 2 – напряжении смещения на сетке фотокатода  $U_{см}=2,8В$ .

Результаты измерений приборов демонстрируют получение высокой чувствительности в несколько А/Вт на всех диодных элементах, при этом фотокатод находится в линейном режиме работы с учетом поданного напряжения смещения, а темновой ток структуры минимален. Неравномерность полученных результатов связана с технологической сложностью реализации идентичных электронно-чувствительных элементов в условиях имеющегося технологического процесса и оборудования. При этом необходимо отметить, что существующая неравномерность чувствительности при равномерной засветке может быть скомпенсирована программными методами на этапе интеграции прибора в фотоприемную систему.

### **Заключение и выводы.**

В результате выполнения диссертационной работы были получены следующие результаты:

1. Выполнен литературный обзор на тему возможных подходов к реализации фотоприемных устройств специального назначения с высокими характеристиками, чувствительных в коротковолновом инфракрасном диапазоне. На основе литературного анализа и численных расчетов, в качестве конструкции фотодетектора выбран следующий вариант: гибридный фотоэлектронный прибор с фотокатодом и преобразователем фотоэлектронов, располагающимися в одном вакуумном объеме. Выделены преимущества указанной конструкции перед существующими аналогами для заданного спектрального диапазона;
2. Разработана методика получения высокой степени атомарной чистоты поверхности полупроводниковых структур на основе InP, включающая в себя химическое травление и низкотемпературный вакуумный отжиг;
3. С использованием предложенных в диссертации методов получен фотокатод на основе гетероструктур InP/InGaAs/InP, работающий в режиме непрерывной облученности и обладающий пиковой квантовой эффективностью более 5% в коротковолновом инфракрасном диапазоне. Для исследуемых гетероструктур выполнен расчет влияния подложки на оптическое пропускание коротковолнового ИК излучения, определены оптимальные параметры просветляющего покрытия;
4. Рассмотрена возможность использования двенадцати-элементного массива pin-диодов в качестве преобразователя фотоэлектронов в гибридном фотоэлектронном приборе. С помощью представленных в диссертации методов получены импульсные характеристики и результаты электронного усиления фотоэлектронов при рекомбинации в области подложки линейных массивов pin-диодов. С учетом результатов, полученных в ходе выполнения диссертации, сделан вывод о целесообразности использования указанной конструкции электронно-чувствительных диодов в качестве элемента гибридного фотоэлектронного прибора.

Представленные в диссертации результаты обеспечивают теоретическую и практическую базу для создания современного типа фотоприемных приборов с высокими характеристиками для регистрации электромагнитного излучения широкого спектра. Разработанные методы измерения могут быть использованы для проведения исследований параметров различных фотонных детекторов, в том числе с применением различных типов фотокатодов.

### Основные публикации по теме диссертации:

#### Статьи в журналах из перечня ВАК РФ:

1. Давыдов В.В., Гребеникова Н.М., **Смирнов К.Я.** Оптический метод контроля состояния текущих сред с низкой прозрачностью и крупными вкраплениями. Измерительная техника. 2019. № 6. С. 37-43.
2. Давыдов В.В., Кружалов С.В., Гребеникова Н.М., **Смирнов К.Я.** Метод определения дефектов на внутренних стенках трубопровода по распределению скорости текущей жидкости. Измерительная техника. 2018. № 4. С. 33-39.
3. Айнбунд М.Р., Глебов Д.Л., Забродский В.В., Левина Е.Е., Миронов Д.Е., Николаев А.В., Пашук А.В., **Смирнов К.Я.**, Фролов В.М. Гибридный многоканальный фотоприемник для спектрального диапазона 1-1,6 мкм. Прикладная физика. 2018. №6. С. 54-59.
4. Айнбунд М.Р., Гарбуз А.В., Дементьев А.А., Левина Е.Е., Миронов Д.Е., Пашук А.В., **Смирнов К.Я.**, Чернова О.В. Гибридные высокочувствительные цифровые телевизионные приборы для УФ и ИК спектральных диапазонов. Успехи прикладной физики. 2018. №6(6). С. 514-517.

#### Статьи в иностранных журналах, включенных в базу цитирования SCOPUS и Web of Science:

1. **Smirnov K.J.**, Medzakovskiy V.I., Davydov V.V., Vysoczky M.G., Glagolev S.F. High sensitive InP emitter for InP/InGaAs heterostructures. Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 917(6). P. 062019.
2. Myazin N.S., **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Logunov S.E. Spectral characteristics of InP photocathode with a surface grid electrode. Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 929(1). P. 012080.
3. Grebenikova N.M., **Smirnov K.J.**, Artemiev V.V., Davydov V.V. and Kruzhalov S.V. The universal optical method for condition control of flowing medium. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1038(1). P. 012089.
4. Rukin E. V., Moroz A. V., **Smirnov K. J.**, Davydov V. V., Yushkova V. V. The development of a new method for making justified decisions by municipal authorities in the management of territories on the basis of the results of the environmental express-control of the state of various media. MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 245. P. 12002.
5. Grebenikova N.M., **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Rud V.Yu., Artemiev V.V. Features of monitoring the state of the liquid medium by refractometer. Journal Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1135(1). P. 012055.
6. Grevtseva A.S., **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Rud' V.Yu. Development of methods for results reliability raise during the diagnosis of a person's condition by pulse oximeter. Journal Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1135(1). P. 012056.
7. **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Glagolev S.F., Rodygina N.S., Ivanova N.V. Photocathodes for near infrared range devices based on InP/InGaAs heterostructures. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1038(1). P. 012102.
8. **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Tushavin G.V., Glagolev S.F. Temperature investigations of InP/InGaAs based photocathodes. Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech 2018). 2018. Vol. 209. P. 11.
9. **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Tushavin G.V., Glagolev S.F. High speed near-infrared range sensor based on InP/InGaAs heterostructures. Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1124(2). P. 022014.



10. Grebenikova N.M., **Smirnov K.J.**, Davydov V.V., Rud' V.Yu. The optical method for condition control of flowing medium. *Journal Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1124(1). P. 041011.
11. Grebenikova, N.M., Davydov, V.V., **Smirnov, K.J.** Features of optical signals processing for monitoring the state of the flowing liquid medium with a refractometer. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1368(2). P. 022057.
12. Grevtseva, A.S., **Smirnov, K.J.**, Greshnevikov, K.V., Davydov V.V., Rud, V.Yu., Glinushkin, A.P. Method of assessment the degree of reliability of the pulse wave image in the rapid diagnosis of the human condition. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1368(2). P. 022072.
13. **Smirnov, K.J.**, Davydov, V.V., Batov, Y.V. InP/InGaAs photocathode for hybrid SWIR photodetectors. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1368(2). P. 022073.
14. Dyumin, V., **Smirnov, K.**, Davydov, V., Myazin, N. Charge-coupled Device with Integrated Electron Multiplication for Low Light Level Imaging 2019 Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics. 2019. № 8906868. P. 308-310.

#### **Материалы наиболее значимых конференций:**

1. High sensitive InP emitter for InP/InGaAs heterostructures. Smirnov K.J., Medzakovskiy V.I. 4th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures "Saint Petersburg OPEN 2017" 3 – 6 April 2017. Russia P. 382.
2. Гибридные высокочувствительные цифровые телевизионные приборы для УФ и ИК спектральных диапазонов. Айнбунд М.Р., Гарбуз А.В., Дементьев А.А., Левина Е.Е., Миронов Д.Е., Пашук А.В., Смирнов К.Я., Чернова О.В. XXV международная научно-техническая конференция и школа по фотоэлектронике и приборам ночного видения. Москва. Россия. 24 – 26 Мая 2018 года. С. 132-135.
3. InP/InGaAs фотокатод для гибридных фотоприемников ближнего ИК диапазона. Смирнов К.Я., Давыдов В.В., Батов Ю.В. V международная конференция и молодежная школа «информационные технологии и нанотехнологии. Самара. Россия. 21–24 мая 2019 года. С. 95-99.
4. Long-range night vision camera based on SWIR photocathode. Smirnov K.J. 7th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures "Saint Petersburg OPEN 2020" 27 – 30 April 2020. Russia P. 251-253.

#### **Патенты РФ:**

1. Айнбунд М.Р., Пашук А.В., Андреева Е.Б., **Смирнов К.Я.**, Чернова О.В. Фотокатод повышенной чувствительности и способ его изготовления. // патент РФ № 268541 МПК H01J 9/12, заявлено 23.04.2018, опубликовано 22.04.2019, бюл. № 12 – 7 с.