

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ,
СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ ИМ. ПРОФ. М.А. БОНЧ-БРУЕВИЧА»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.ф.-м.н., профессор В.В. Давыдов

Санкт-Петербург – 2022

Оглавление

Введение	5
ГЛАВА 1. Фотоприемные устройства коротковолнового инфракрасного спектрального диапазона.....	13
1.1 Обоснование выбора спектрального диапазона разрабатываемого фотодетектора.....	13
1.2 Полупроводниковые материалы для коротковолнового инфракрасного диапазона	17
1.3 Методы реализации фотоприемных устройств для коротковолнового инфракрасного спектрального диапазона.....	19
1.3.1 Гибридные сборки для коротковолнового инфракрасного диапазона .	19
1.3.2 Электронно-оптический преобразователь	20
1.3.3 Гибридный фотоэлектронный прибор	23
1.4 Аналоги гибридных фотоприемных устройств для коротковолнового инфракрасного диапазона и их характеристики	26
1.4.1 Пороговая облученность гибридного прибора.....	27
1.4.2 Перспективы гибридных приборов для коротковолнового инфракрасного диапазона.....	29
1.5 Применение гибридного прибора в системах ночного видения в активном режиме.....	33
ГЛАВА 2. Фотокатод для коротковолнового инфракрасного спектрального диапазона	37
2.1 Фотокатоды для диапазона длин волн 0,95-1,7 мкм.....	38
2.1.1 Устройство фотокатода с переносом электронов	40
2.2 Влияние свойств подложки на чувствительность фотокатода в режиме работы на пропускание	44
2.3 Экспериментальная установка для исследования фотокатодов	49
2.4 Химическое травление InP/InGaAs/InP гетероструктуры	53
2.5 Формирование оксида и пероксида цезия на поверхности фотокатода	57

2.5.1	Спектральные характеристики InP	63
2.6	Исследование спектральных характеристик гетероструктур InP/InGaAs/InP	66
2.7	Исследование влияния температуры среды на характеристики InP/InGaAs/InP фотокатода	71
ГЛАВА 3. Линейный массив электронно-чувствительных pin-диодов для регистрации фотоэлектронов		
3.1	Механизм рекомбинации высокоэнергетичных фотоэлектронов твердотельными детекторами на основе кремния	78
3.1.1	Особенности регистрации электронов твердотельными детекторами на основе диодной топологии	80
3.2	Планируемый подход к изготовлению кремниевого детектора электронов.....	83
3.3	Конструкция и основные этапы изготовления линейки электронно-чувствительных кремниевых диодов	85
3.3.1	Тип конструкции и его практическая реализация.....	85
3.3.2	Технологический цикл	86
3.4	Экспериментальные результаты исследования линеек электронно-чувствительных диодов	88
3.4.1	Исследование быстродействия диодов	88
3.4.2	Исследование электронного усиления в области подложки диодов	91
ГЛАВА 4. Макетирование и результаты исследований гибридных сенсоров коротковолнового инфракрасного диапазона		
4.1	Конструкция корпуса прибора и макетирование	95
4.2	Результаты измерений прибора с линейным массивом pin-диодов.....	98
4.2.1	Равномерность чувствительности по диодам приборов.....	103

Заключение	106
Список сокращений и условных обозначений	108
Список литературы	110
Приложение А	126
Приложение Б	128
Приложение В.....	129

ВВЕДЕНИЕ

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 Si_3N_4 и 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 фо-

токадной 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. Опубликовано 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 pin-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 p-n-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, включаю-

щих 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 3st, 4st, 5st, 7st 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^я международная конференция IEEE EExPolytech-2018: Electrical Engineering and Photonics (Санкт-Петербург, Россия, 22 – 23 октября 2018); 11^я международная конференция "Аморфные и микрокристаллические полупроводники" (Санкт-Петербург, Россия, 19 – 21 ноября 2019); 25^я международная научно-техническая конференция по "Фотоэлектронике и приборам ночного видения" (Москва, Россия, 24 – 26 мая 2019); 7^я, 8^я, 9^я 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^я международная конференция IEEE EEPolytech-2018: Electrical Engineering and Photonics.; (Санкт-Петербург, Россия, 17 – 18 октября 2019); 2^я международная конференция по астрофизике для молодых ученых (Бюракан, Армения, 17 – 21 сентября 2019); 5^я 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 и в 20 тезисах докладов на международных конференциях, форумах и семинарах.

Структура диссертации.

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

ГЛАВА 1. ФОТОПРИЕМНЫЕ УСТРОЙСТВА КОРОТКОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

1.1 Обоснование выбора спектрального диапазона разрабатываемого фотодетектора

Фотоприемные устройства активно применяются в различных сферах деятельности человека, а их использование зависит от регистрируемого спектра светового излучения. Данный спектр излучения может быть разделен на подклассы, в широком смысле это видимый человеческому глазу спектральный состав, ультрафиолетовый спектр (УФ) и инфракрасный спектр (ИК). Последний может быть разделен на подгруппы: NIR – ближний инфракрасный диапазон, SWIR – коротковолновый инфракрасный диапазон, MWIR – средневолновый инфракрасный диапазон, LWIR – длинноволновый инфракрасный диапазон. В различной литературе границы спектральных диапазонов могут быть классифицированы по-разному [1-3]. На рисунке 1.1 для примера представлено распределение диапазонов излучения по длинам волн λ с учетом разбиения ИК диапазона на поддиапазоны.

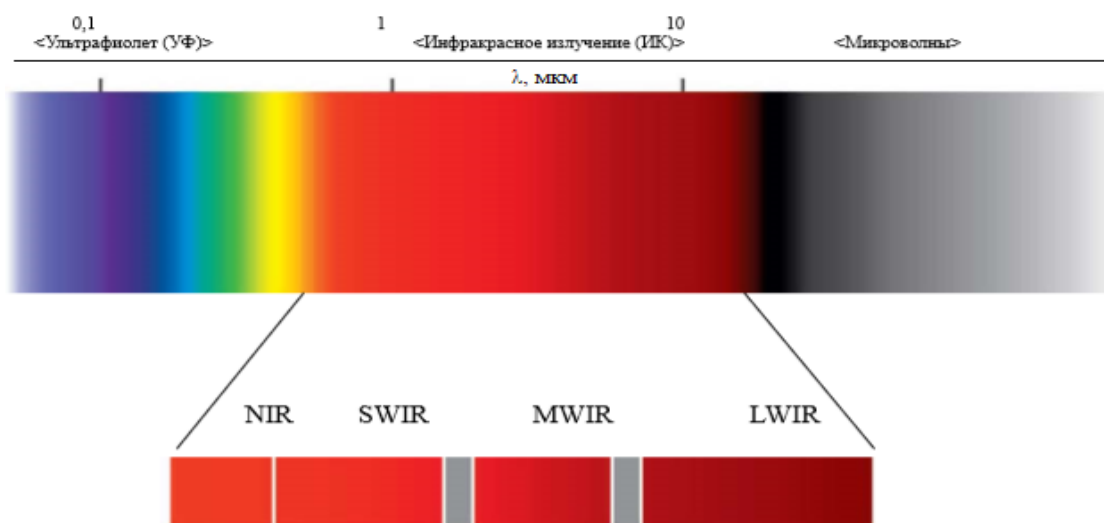


Рисунок 1.1 – Инфракрасная область электромагнитного излучения

Большинство ученых и разработчиков фотоприемных устройств сходятся во мнении, что SWIR спектр соответствует диапазону длин волн 1,0-3,0 мкм [2]. Необходимо также отметить, что использование ИК излучения в системах приема-передачи обусловлено рядом его физических свойств, а также материалами, входящими в элементную базу ИК приборов [4,5].

Электромагнитное излучение, в ходе распространения сквозь атмосферу Земли может быть значительно ослаблено. Главной причиной этого является молекулярное поглощение, которое и определяет вид спектрального коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$. Основными поглотителями инфракрасного излучения являются пары воды (H_2O), углекислый газ (CO_2) и озон (O_3). Таким образом, для проектирования приборов наблюдения, целесообразно обеспечить их спектральную рабочую полосу в диапазоне длин волн с высоким коэффициентом прозрачности атмосферы. На рисунке 1.2 представлена зависимость коэффициента пропускания $\tau(\lambda)$ атмосферы Земли, относительно длины волны электромагнитного излучения.

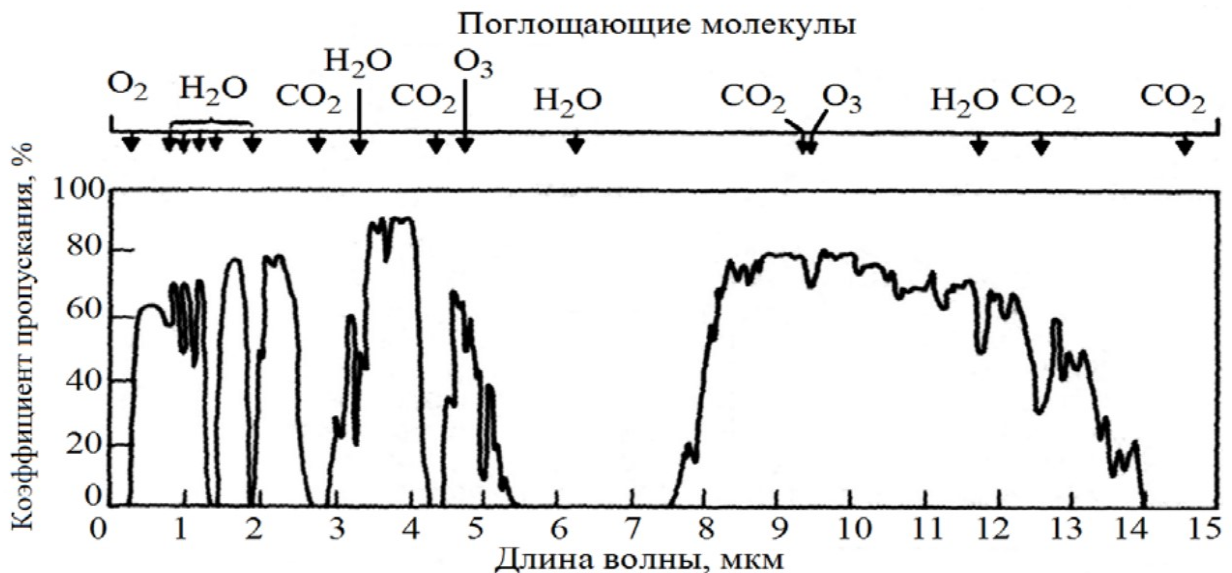


Рисунок 1.2 – Пропускание атмосферы

В SWIR, а именно, в диапазоне длин волн 1,4-1,6 мкм, находится атмосферное окно прозрачности. Так, влияние тумана, дыма и других атмосферных явле-

ний сведено к минимуму в заданном спектральном диапазоне. Для сравнения, другие атмосферные окна с высоким пропусканием существуют в средне- и длинноволновой инфракрасной области спектра (MWIR (3-5 мкм); LWIR (8-14 мкм)). Приборы, работающие в этих спектральных диапазонах, используются, преимущественно, для регистрации тепловой радиации как естественных, так и искусственных объектов. Атмосферное окно прозрачности, находящееся в диапазоне LWIR, долго использовалось в разведке для регистрации, опознавания и идентификации объектов. Наиболее значительным недостатком термального зондирования является, в первую очередь, сложность расшифровки и интерпретации объектов в изображениях, полученных термальными детекторами, а также значительное снижение работоспособности приборов в условиях высокотемпературных погодных условий и высокой влажности.

Спектр излучения атмосферы Земли, фоновое и звездное излучение несут в себе ИК спектральный состав, что позволяет реализовывать приборы, не имеющие активной подсветки, а также работающие в условиях низкой освещенности, а также в ночное время при отсутствии излучения со стороны Луны. Так, естественная спектральная освещенность в отсутствие лунного освещения в диапазоне 1,4-1,8 мкм составляет $(1,5-2) \cdot 10^{-7}$ Вт/см²·мкм, что на два порядка выше освещенности в области чувствительности многощелочного катода для видимого диапазона, составляющей $(1,5-3) \cdot 10^{-9}$ Вт/см²·мкм.

Прозрачность атмосферы также растет при переходе в коротковолновую ИК-область спектра. При необходимой метеорологической дальности видимости объекта $S_m=10$ км, стоит отметить, что пропускание атмосферы в 1 км на длине волны 0,6 мкм составляет 0,72, а диапазоне 1,4-1,8 мкм – 0,93. Важным фактором при обнаружении объекта является атмосферная дымка. Яркость атмосферной дымки снижается более чем на порядок в области 1,4-1,8 мкм по сравнению с видимой областью спектра [6]. Помимо естественных эффектов, значительным пре-

пятствием при наблюдении объекта могут являться пыледымовые образования (ПДО) антропогенного происхождения, например, маскирующая дымовая завеса.

Эти обстоятельства позволяют эффективно применять приборы ночного видения (ПНВ), работающие в области спектра 1,4-1,8 мкм, для обнаружения замаскированных объектов. Например, отношение между коэффициентом отражения камуфляжной одежды и земной растительности в диапазоне 0,4-0,7 мкм практически равно 1 [7-8]. При использовании излучения с $\lambda = 1,0$ мкм коэффициент отражения изменяется и становится равным 0,9 для камуфляжа российского образца и 0,7 - для американского [8], а для излучения с $\lambda = 1,6$ мкм - 1,75 и 0,75 соответственно, по данным работы [9]. Это позволяет, используя излучение в диапазоне 1,4-1,8 мкм, не только обнаруживать замаскированные объекты, но и по величине контраста «объект наблюдения – фон» определять принадлежность объекта по признаку «свой-чужой» [10].

Материалы, используемые для создания SWIR приборов, позволяют обеспечить низкие значения форм-фактора, низкое энергопотребление, а также не требуют глубокого криогенного охлаждения, что характерно для приборов LWIR диапазона. На выходе подавляющего числа таких приборов формируется электрический сигнал, соответствующий преобразованному фотонному излучению. Это делает возможным реализовывать схемы накопления и передачи сигналов в цифровом виде. Элементы электронной оптики для детекторов коротковолнового ИК диапазона и видимого диапазона идентичны, что значительно удешевляет процесс их производства [2].

На данном этапе развития науки и техники SWIR детекторы находятся в стадии постоянного развития, основным направлением которого является улучшение их характеристик. Это особенно важно в областях, связанных со специфическими научными исследованиями (спектральный анализ) и поиск объектов в сложных условиях (МЧС и т.д.) [11-14]. В условиях ухудшения состояния атмосферы и появления большого числа неблагоприятных факторов критически важно обеспечить наилучшие показатели чувствительности, разрешения, скорости обра-

ботки и формирования выходного сигнала. Это особенно актуально для следующих задач: Обнаружение лазерных целеуказателей, использующих излучатели со спектром невидимым для человеческого глаза [15]; Съемка с лазерной подсветкой, в том числе, с использованием в качестве подсветки SWIR лазеров на основе Nd:YAG [16]; Воздушная разведка, дистанционное зондирование и обзорное наблюдение, обусловленное различным спектром пропускания коротковолнового инфракрасного излучения наблюдаемых объектов; Событийная осведомленность, в частности, фиксация пуска ракет по наблюдения факела ракетного двигателя [17-21]; Детектирование негативных факторов, в особенности, задач по контролю состава жидких сред, где возможно использовать поглощение молекулами воды коротковолнового инфракрасного излучения, в то время как использование лазеров и детекторов видимого излучения неэффективно [22-28]; Ночное видение и обнаружение объектов, в том числе, обеспечение видимости в тумане и дыму (рассматривается в параграфе 1.5).

Использование излучения в диапазоне SWIR обеспечивает более широкие возможности по сравнению с другими диапазонами при решении этих актуальных задач, что обосновывает выбор этого диапазона для создания многофункциональных фотоприемных устройств.

1.2 Полупроводниковые материалы для коротковолнового инфракрасного диапазона

В настоящее время известно большое количество технологических решений и методов по созданию инфракрасных детекторов. В целом все детекторы можно разделить на два больших класса: термальные [29-30] (термопарные, пироэлектрические, болометры) и фотонные. Фотонные детекторы представлены широким многообразием реализаций. Это приборы на основе полупроводниковых соединений групп III–V ($\text{InAs}_{1-x}\text{Sb}_x$, InAs, InSb, InGaAs), IV–VI ($\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}$, PbS, PbSe), II–VI ($\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$); слоев (Si:Ga, Si:As, Ge:Cu, Ge:Hg); на свободных носителях (PtSi,

Pt₂Si, IrSi); квантовых точках и ямах (GaAs/AlGaAs, InGaAs/AlGaAs, InGaAs/InGaP) и другие [1-4, 31-35]. Приборы каждого типа находят свое применение для разных специальных задач и имеют ряд как достоинств, так и недостатков. Для детектирования коротковолнового ИК диапазона с большим пространственным и временным разрешением выбор доступных реализаций фоточувствительных приборов значительно сужается. Данные приборы в настоящее время изготавливаются на основе полупроводниковых материалов групп III-V, II-VI, IV-VI, которые при различном соотношении концентраций примесей могут обеспечивать чувствительность в широком спектральном диапазоне.

Опыт эксплуатации современных фотоприемных устройств, а также результаты различных исследований показали, что для создания фотонных неохлаждаемых детекторов для спектрального диапазона 0,9-1,7 мкм, необходимо использовать полупроводниковый материал на основе твердого раствора арсенида галлия индия (InGaAs) [36]. В качестве альтернативы InGaAs могут быть использованы такие материалы, как теллурид ртути и кадмия (HgCdTe) или антимонид индия (InSb), которые могут быть очень чувствительными в диапазоне SWIR. Однако, для того чтобы увеличить отношение сигнал / шум до приемлемых уровней, датчики на их основе должны быть криогенно охлаждены, что неотвратимо влечет за собой ряд существенных недостатков и ограничений, таких как увеличение веса и размера, а также энергопотребления. В противоположность этому уже на данный момент существует большое количество серийно производимых сенсоров на основе InGaAs с внутренним фотоэффектом, которые отличаются долговечностью, компактностью и малым энергопотреблением на уровне нескольких Ватт [37]. Поэтому более целесообразно проводить исследования для улучшения характеристик устройств с этим материалом.

1.3 Методы реализации фотоприемных устройств для коротковолнового инфракрасного спектрального диапазона

1.3.1 Гибридные сборки для коротковолнового инфракрасного диапазона

На рисунке 1.3 представлена классическая конструкция фотодетектора [4,38]. Она состоит из фоточувствительного слоя InGaAs, выращенного эпитаксиальными методами на подложке InP, на которую также нанесено антиотражающее покрытие. Фотоны поглощаются в слое InGaAs, и в результате внутреннего фотоэффекта генерируются фотоэлектроны, которые далее с помощью индиевых столбиков передаются на чувствительную зону кремниевого детектора – интегральную схему считывания (ИСС), организованную по принципу ПЗС или КМОП логики.

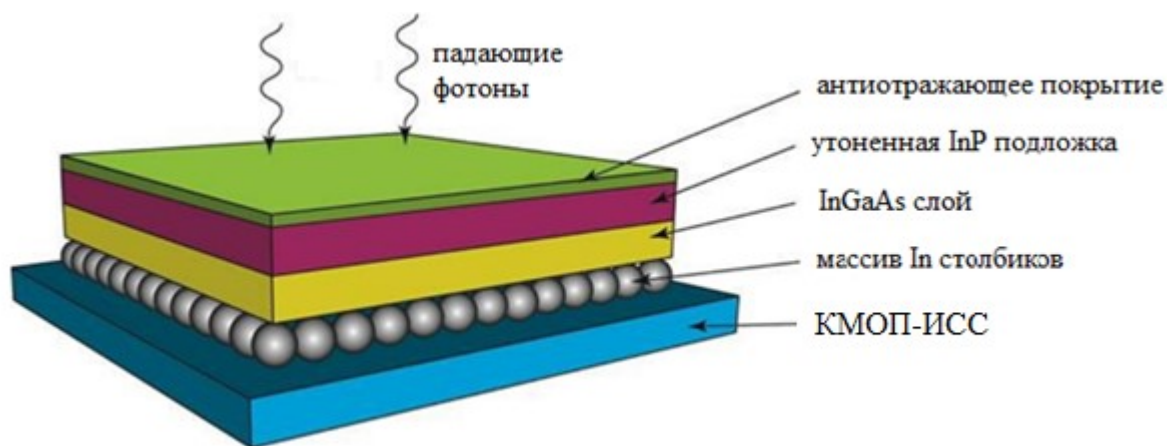


Рисунок 1.3 – Конструкция твердотельного детектора на основе InGaAs слоя

Несмотря на широкое использование данной конструкции (рисунок 1.3) в серийных приборах, она обладает рядом существенных недостатков [39]:

1. Высокая стоимость производства полупроводниковых структур;

2. Технологическая сложность совмещения фоточувствительной части сенсора (фотовосприимчивый полупроводниковый слой) с устройством считывания (CCD, CMOS, ROIC);
3. Наличие дефектных пикселей, неоднородность чувствительности. Высокий уровень зашумленности выходного изображения без применения схем дополнительной постобработки.

При рассмотрении случаев использования приборов в сложных погодных условиях возникает еще один существенный недостаток. В технологии гибридных сборок не предусмотрена возможность организации схем дополнительного внутреннего усиления, что крайне ограничивает уровень их чувствительности. Фактически, допуская идеальную модель совмещения и технологическое исполнение устройства считывания, чувствительность гибридной сборки упирается в величину квантовой эффективности InGaAs материала и не может превышать 1 А/Вт. Таким образом, для создания приборов с чувствительностью значительно превышающей единицы ампер на Ватт в области коротковолнового инфракрасного спектра, целесообразно применить технологию, предполагающую «низкошумящий» механизм усиления. Этой технологией может выступать механизм электронного усиления, используемый в электронно-оптических преобразователях (ЭОП) или в гибридных фотоприемных приборах (ГФП), которые содержат в себе фоточувствительный элемент на основе InGaAs и прибор регистрации фотоэлектронов (Electron-bombarded CCD, CMOS).

1.3.2 Электронно-оптический преобразователь

Как правило, ЭОПы применяются для работы с объектами, изображение которых лежит вне сферы восприятия человеческого глаза, то есть в рентгеновской, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, также они работают как «усилители яркости», что необходимо для наблюдения событий при низких освещенностях.

ценностях. С их использованием решаются задачи преобразования спектрального диапазона излучения, усиления яркости или сверхбыстрой регистрации путем встраивания их в оптическое звено систем передачи изображения [1,3]. По преобразованию спектрального диапазона ЭОП охватывают ближнее ИК, видимое, УФ, жесткое и мягкое рентгеновское, нейтронное и гамма-излучение. ЭОПы позволяют значительно увеличить яркость изображения в видимом диапазоне, а также отличаются высоким быстродействием. На их основе могут быть созданы фоторегистрирующие устройства с временным разрешением лучше, чем 10^{-12} с. В случае классического ЭОПа, его основными элементами являются фотокатод с внешним фотоэффектом, фокусирующая и ускоряющая электроны электронно-оптическая система и катодолуминесцентный экран (рисунок 1.4).

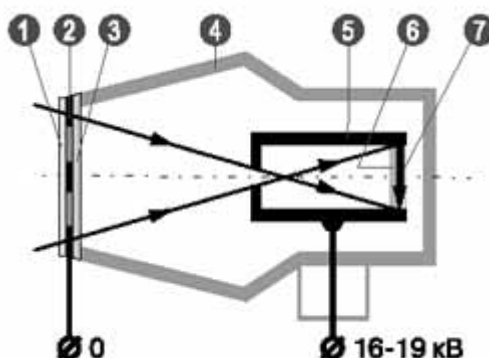


Рисунок 1.4 – Схема ЭОПа первого поколения, где 1 – фотокатодное стекло, 2 – контакт фотокатода, 3 – фотокатод, 4 – стеклянный корпус, 5 – анодный электрод, 6 – люминофор, 7 – экранное стекло

Результатом применения ЭОП является возможность восприятия через окуляр картины, спектральный состав которой находится за чертой полосы спектральной чувствительности человеческого глаза. Это осуществляется путем преобразования электромагнитного излучения в поток электронного газа в плоскости фотокатода. Дальнейшее преобразование подразумевает фокусировку и бомбардировку фотоэлектронами люминофорного экрана под действием высокого

напряжения. В плоскости люминофора происходит обратное преобразование фотоэлектронов в электромагнитное излучение.

1.3.2.1. Сочленение ЭОП с ПЗС

В настоящее время в большинстве высокочувствительных телевизионных систем военного и гражданского применения используются сочлененные фоточувствительные приборы, включающие усилитель яркости (ЭОП) и матричный фотоприемник (КМОП или ФПЗС). Данные изделия сочетают преимущества вакуумных и твердотельных фотоприемников и являются незаменимыми в применениях, требующих сочетания высокой чувствительности с максимальным быстродействием телевизионной системы (системы реального времени). Сочленение ФПЗС/ППЗ и ЭОПа через волоконно-оптические пластины позволяет конструировать фоточувствительные модули различной конфигурации, спектральная чувствительность и рабочий спектральный диапазон которых определяется выбором материала фотокатода ЭОПа [40,41]. Принципиальная схема сочлененного телевизионного прибора представлена на рисунке 1.5.

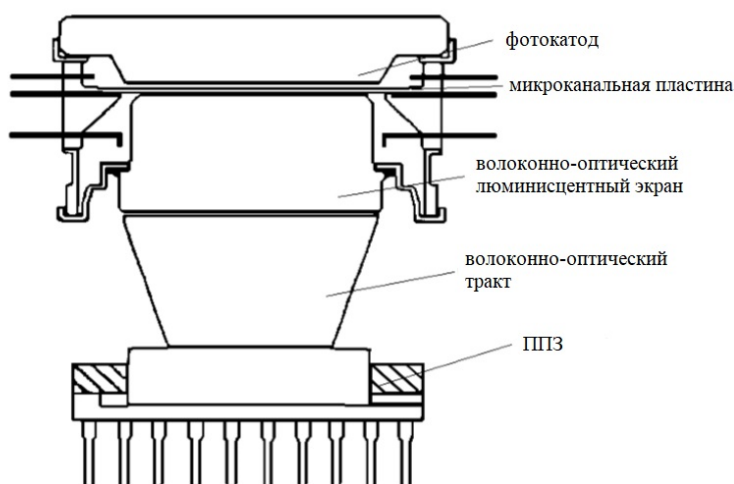


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема ЭОП сочлененного с ППЗ

Использование такой конструкции имеет ряд значительных преимуществ по сравнению с классическими ФПЗС (для видимого спектрального диапазона) и гибридными сборками (для диапазонов отличных от видимого) из-за наличия микроканальной пластины (МКП), которая позволяет обеспечить внутреннее усиление в приборе более 10^4 раз. Однако, сочлененному прибору присущ ряд недостатков, связанных в первую очередь с необходимостью нескольких «электронно-фотонных» преобразований, которые неизбежно ведут к потере эффективного сигнала и появлению паразитных локальных дефектов изображения; наличием волоконной оптики, которая влияет на радиационную стойкость изделия, и другими, связанными с форм-фактором устройства, высоким шумом считывания, необходимостью внедрения нескольких поэтапных технологических циклов изготовления. Преодолеть вышеперечисленные недостатки и значительно повысить характеристики производимых ЭОП позволяет переход к конструкции гибридного фотоприемного устройства или ЭОПа пятого поколения.

1.3.3 Гибридный фотоэлектронный прибор

Гибридный фотоэлектронный прибор (ГФП) относится к классу вакуумных фоточувствительных устройств. Его основной особенностью является конструкция, предполагающая расположение в одном вакуумном объеме (корпусе прибора) фоточувствительного элемента – фотокатода и преобразователя фотоэлектронов в электрический сигнал [42,43]. При этом на вакуумном промежутке между фотокатодом и детектором фотоэлектронов подается внешнее электрическое поле, «ускоряющее» вышедшие в вакуум электроны до энергий в несколько кэВ. На рисунке 1.6 представлена структурная схема ГФП.

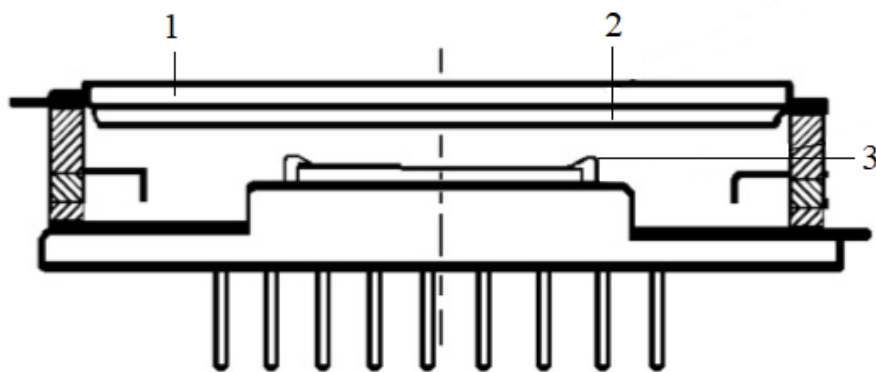


Рисунок 1.6 – Схема ГФП, где 1 – входное окно, 2 – полупрозрачный фотокатод, 3 – преобразователь фотоэлектронов

Принцип работы представленного фотодетектора состоит в следующем: в результате внешнего фотоэлектрического эффекта электроны с энергией достаточной для выхода в вакуум с поверхности фотокатода могут быть «ускорены» посредством приложения внешнего электрического поля и преобразованы в сигнальный заряд в плоскости прибора, обладающего электронной чувствительностью. Необходимо отметить, что фотоэлектроны с высокой энергией могут инициировать в плоскости такого прибора процесс ударной ионизации, что приводит к возникновению большого количества электронно-дырочных пар, формирующих сигнальный заряд, который может в конечном счете быть интерпретирован как мера излучения, воспринятого фотокатодом ГФП.

В качестве преобразователя фотоэлектронов в ГФП традиционно применяются специальные ПЗС, а именно, электронно-чувствительные (ЭЧПЗС) – Electron-Bombardment Back-Side CCD. В этом случае изображение объекта воспринимается не фоточувствительной областью ЭЧПЗС, а фотокатодом. Под воздействием падающего света эмитируемые фотокатодом электроны ускоряются до энергии 3-10 кВ и попадают на тыльную сторону детектора. При попадании в кремниевую подложку ускоренные фотоэлектроны генерируют электронно-дырочные пары. В случае подложки р-типа электроны (неосновные носители), попадая в потенциальные ямы под электродами ЭЧПЗС, образуют сигнальный за-

ряд. При этом в идеальных условиях коэффициент преобразования при энергии бомбардирующих электронов свыше 6кВ превышает 10^3 [44]. Однако, на практике коэффициент преобразования существенно меньше по двум причинам. Первая – обратное рассеяние электронов, которые возвращаются в вакуум после взаимодействия с кремниевой структурой. Вторая – потеря энергии электронами в поверхностном нечувствительном (мертвом) слое. Также коэффициент усиления электронной бомбардировки зависит от толщины поверхностного нечувствительного слоя, например, коэффициенты усиления 1840, 1680 и 910 соответствуют толщинам 50, 100 и 300 нм, при энергиях электронов 8 кэВ [44].

По сравнению с вариантом сочлененного (составного) прибора из отдельно изготовленных ЭОПа с микроканальной пластиной и фронтальной ФПЗС, вариант прибора с фотокатодом и ЭЧПЗС в одном вакуумном объеме имеет ряд преимуществ. Например, размещение ЭЧ матрицы внутри вакуумного объема фотоэлектронного прибора улучшает отношение сигнал-шум данного прибора, так как матрица (утоненная с обратной стороны, обращенной к фотокатоду), в отличие от микроканальной пластины, полностью принимает сигнальный поток электронов.

В ГФП отсутствуют эффект затягивания сигнала за счет послесвечения экрана ЭОПа. Вследствие сокращения числа преобразований изображение ГФП имеет более высокий контраст и разрешающую способность. Кроме того, ГФП обладает меньшим весом, более компактен по сравнению с сочлененным прибором [43].

Несмотря на меньшее усиление, в гибридном приборе (по сравнению с усилением в ЭОПе, содержащим МКП) следует ожидать довольно высокую чувствительность вследствие более полного использования регистрируемого излучения. Такие фотоприемники могут быть разработаны для разных спектральных диапазонов (УФ, видимый, ИК) и иметь унифицированную конструкцию: одинаковые корпус и узел ЭЧПЗС и различаться только узлом фотокатода. Учитывая, что в гибридном приборе отсутствует люминофор, он может быть рекомендован для высокоскоростных систем, а отсутствие стекловолокна также делает его радиаци-

онно-стойким (по крайней мере, в такой же степени, как используемая ЭЧПЗС). В качестве примера ГФП может быть представлен прибор для УФ диапазона с Cs_2Te фотокатодом, созданный в АО ЦНИИ «Электрон» [45-48]. Светотехнические параметры макетного образца гибридного прибора с ЭЧПЗС и Cs_2Te фотокатодом показаны в таблице 1.1 (приложение А). Результаты полученные в ходе разработки ГФП, чувствительного в УФ диапазоне, подтверждают обоснованность применения гибридной конструкции для построения приборов с различными типами фотокатодов, в частности, с фотокатодом для коротковолнового инфракрасного диапазона. Важно отметить, что вышеописанная конструкция также позволяет использовать различные преобразователи фотоэлектронов, например, устройства на основе КМОП-логики, электронно-чувствительные диоды различной конфигурации. Их использование при решении специальных задач может значительно улучшить параметры ГФП, относительно прибора с ЭЧПЗС.

1.4 Аналоги гибридных фотоприемных устройств для коротковолнового инфракрасного диапазона и их характеристики

В качестве аналогов разрабатываемого ГФП могут выступать цифровые фотонные детекторы чувствительные в коротковолновом спектральном диапазоне с пиком чувствительности в районе 1500-1600 нм. Наиболее широко распространены твердотельные устройства на основе технологии гибридных сборок с твердым раствором InGaAs в качестве активного слоя. Такие камеры выпускаются рядом зарубежных компаний, таких как, Sensors Unlimited, RVS, Teledyne Imaging Sensors, Sofradir, FLIR Systems и других [49-54]. В качестве отечественных аналогов могут быть приведены камеры производства АО НПО «Орион» двух модификаций, различающиеся типом интегральной схемы считывания [53]. В настоящее время единственным серийно производимым прибором, использующим гибридную технологию и соответственно SWIR фотокатод, является камера производ-

ства компании Intevac Photonics (США), не имеющая серийно-производимых аналогов. Камера LIVAR M506 [55] находится на вооружении армии США и на его поставки наложено эмбарго. Характеристики этого прибора приведены в таблице 1.2 (приложение А).

Что касается прибора, сочлененного с ЭОП по средствам волоконной оптики, серийно для КВИК они не выпускаются, информация о них в открытом доступе отсутствует. Предположительно, это связано с невозможностью обеспечения работы фоточувствительного в КВИК фотокатода совместно с МКП.

1.4.1 Пороговая облученность гибридного прибора

Для работы телевизионных систем при низких облученностях в настоящее время в основном используются твердотельные фотоприемники (ПЗС/КМОП) и сочлененные приборы, в которых перед твердотельным фотоприемником устанавливается ЭОП (в некоторых случаях устанавливаются последовательно два ЭОПа) для первичного преобразования («усиления») сигнала. Основными характеристиками, по которым определяют качество работы прибора является отношение сигнал/шум и пороговая облученность. При низких облученностях для определения этих параметров с использованием ранее проведенных исследований [56] предлагается использовать следующие соотношения. Сигнал на выходе детектора (в электронах) определяется следующим соотношением (1.1):

$$U = G \times E \quad (1.1)$$

Облученность определяется формулой (1.2), где Q – квантовый выход фоточувствительного элемента, S – площадь светового потока, P – мощность светового потока, t – единица времени, h – постоянная Планка, c – скорость света, λ – длина волны излучения

$$E = Q \times S \times \frac{P \times t}{h \times \frac{c}{\lambda}} \quad (1.2)$$

Полный шум сигнала на выходе детектора вычисляется как корень квадратный из суммы всех шумов в детекторе (1.3).

$$N_{\text{полн}} = \sqrt{N_{\text{дроб}}^2 + N_{\text{темнППЗ}}^2 + N_{\text{счит.ППЗ}}^2 + N_{\text{темнФК}}^2} \quad (1.3)$$

где:

$N_{\text{дроб}} = \sqrt{E} \times G \times F$ – дробовый шум. Как видно из формулы, дробовый шум напрямую зависит от фактора шума.

$N_{\text{темн ППЗ}}$ – шум темнового сигнала в приборе с переносом заряда (ППЗ). Он пропорционален площади ячейки и времени накопления. Для ППЗ с усилением он пропорционален коэффициенту усиления и фактору шума.

$N_{\text{темн ФК}}$ – шум темнового тока фотокатода. Так же, как и шум ППЗ, он прямо пропорционален площади ячейки и времени накопления и, как и дробовый шум, усиливается в приборе и зависит от фактора шума. Для прибора, состоящего только из ППЗ, он равен нулю.

$N_{\text{счит ППЗ}}$ – шум считывания в выходном узле ППЗ. Он не зависит от площади ячейки и времени накопления. Но электроника (измерительный канал, электронное обрамление ФПУ и т.п.), обрабатывающая сигнал с прибора, вносит в него собственные шумы, которые необходимо учитывать. Поэтому необходимо ввести некий эквивалент шумов электроники в электронах $N_{\text{счит.ППЗ}}$. В этом случае формула полного шума сигнала будет выглядеть так (1.4):

$$N_{\text{полн}} = \sqrt{N_{\text{дроб}}^2 + N_{\text{темнППЗ}}^2 + N_{\text{счит.ППЗ}}^2 + N_{\text{темнФК}}^2 + N_{\text{схемы}}^2} \quad (1.4)$$

С учетом (1.1) формула для расчета соотношения сигнал/шум готового изображения выглядит следующим образом (1.5):

$$\psi = \frac{G \times E}{\sqrt{(\sqrt{E} \times G \times F)^2 + N_{\text{темнППЗ}}^2 + N_{\text{счит.ППЗ}}^2 + N_{\text{темнФК}}^2 + N_{\text{схемы}}^2}} \quad (1.5)$$

После подстановки в (1.5) соотношения (1.2) можно получить следующее выражение для расчета значения сигнал/шум (1.6):

$$\psi = \frac{G \times Q \times s \times \frac{P \times t}{h \times \frac{c}{\lambda}}}{\sqrt{\left(\sqrt{Q \times s \times \frac{P \times t}{h \times \frac{c}{\lambda}}} \times G \times F \right)^2 + N_{\text{темнППЗ}}^2 + N_{\text{чит.ППЗ}}^2 + N_{\text{темнФК}}^2 + N_{\text{схемы}}^2}} \quad (1.6)$$

Полученное значение ψ зависит от следующих параметров: квантового выхода, площади ячейки и времени накопления. Все эти зависимости не являются линейными. Также крайне важно, при работе прибора как соотносятся составляющие шума между собой.

1.4.2 Перспективы гибридных приборов для коротковолнового инфракрасного диапазона

Для того, чтобы оценить предполагаемые параметры пороговой облученности и отношения сигнал/шум гибридного прибора относительно твердотельной гибридной сборки на основе InGaAs и ЭОП, сочлененного с ПЗС матрицей, были проведены расчеты зависимостей отношения сигнал/шум от облученности для твердотельного, гибридного и сочлененного приборов на длине волны 1540 нм (рисунок 1.7).

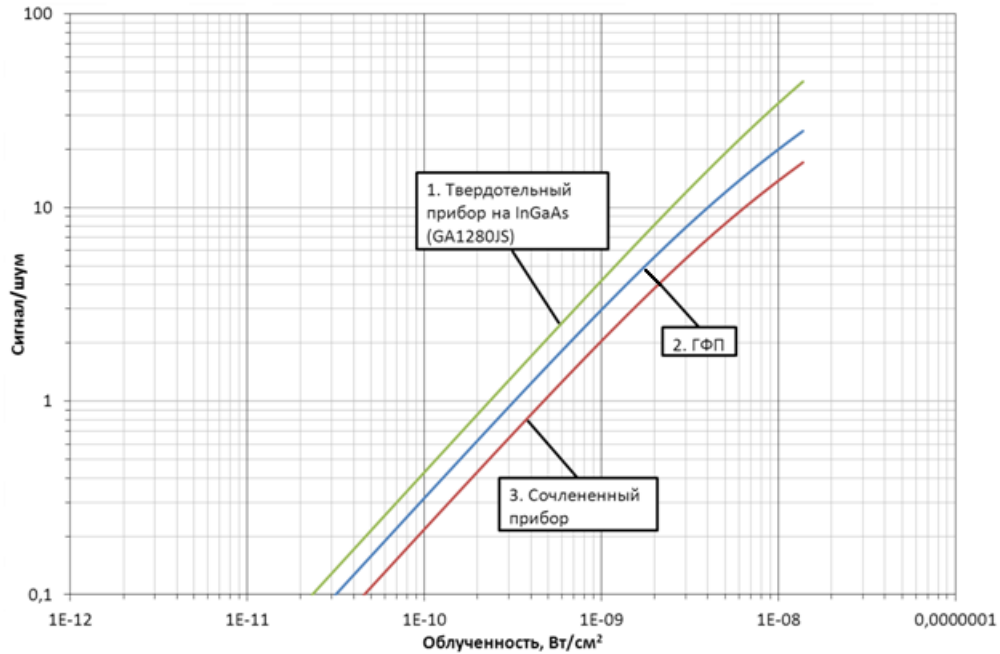


Рисунок 1.7 – Зависимость соотношения сигнал/шум от облученности для разных приборов на длине волны 1540 нм.

Все кривые построены для времени накопления 33 мс и площади ячейки 12,5x12,5 мкм, так как эти параметры соответствуют конструкции действующего твердотельного прибора [37]. Его данные используются мной для проведения дальнейших расчетов. Для расчета по гибриднему и сочлененному прибору (кривые 2 и 3) необходимо знать темновой ток фотокатода. В отличие от Cs₂Te фотокатода, фотокатод на основе InP/InGaAs/InP имеет очень большой темновой ток, что становится главным ограничением для получения лучшего соотношения сигнал/шум и лучшей пороговой облученности. Для расчета использовались значения, приводимые фирмой Intevac [55]. Квантовый выход фотокатода задан равным 20%. Темновой ток фотокатода на структуре InP/InGaAs/InP с учетом площади ячеек ППЗ (12,5x2,5 мкм) и времени накопления (33 мс) составил около 516 е на пиксел за время накопления. Для расчета отношения сигнал/шум твердотельного прибора (кривая 1) были использованы данные по матрице GA1280JS фирмы Sensors Unlimited [37] (лидер по разработке и выпуску камер для КВИК). Темновой ток ячеек структуры за время накопления равен 5625 е. В

информации по прибору указан квантовый выход более 65 % в широком спектре (1-1,6 мкм). Однако квантовый выход таких приборов сильно зависит от длины волны и на длине волны 1540 нм может достигать более 85%. Такой вывод сделан на основе информации по прибору GA640C [54], где также указывается квантовый выход в широком спектре более 65 %, и дополнительно приведен график квантового выхода ИК приборов для разных длин волн, из которого видно, что на длине волны 1540 нм квантовый выход может достигать почти 90 %. Поэтому для твердотельного прибора в расчете задан квантовый выход равный 85 %. При этом были заданы очень низкие шумы считывания (15 е) и шумы электроники (20 е). Только при таких низких значениях удалось добиться совпадения значения пороговой облученности, полученной путем расчета (кривая 1 на рисунке 1.7) с той, которая указана производителем в информации по твердотельному прибору GA1280JS.

Выигрыш гибридного прибора, относительно сочлененного, по пороговой облученности меньше, чем в УФ диапазоне, но создание для сочлененного прибора ЭОПа с фотокатодом на основе структур InP/InGaAs/InP в ИК диапазоне представляет критически сложную задачу (в РФ и иностранных источниках о таких ЭОПах нет информации). Это связано с тем, что такой фотокатод имеет очень высокие требования к степени вакуума внутри прибора, а наличие МКП в вакуумном объеме ЭОПа сочлененного прибора делает выполнение этой задачи почти невозможным. Кроме того, большой ток термоэлектронной эмиссии с InP/InGaAs/InP фотокатода, будучи умножен в МКП, выведет ее в нерабочий режим. На рисунке 1.8 представлена зависимость соотношения сигнал/шум от облученности гибридного прибора, сочлененного прибора и ФПЗС при параметре шума $N_{\text{схемы}} = 2000 \text{ е}$.

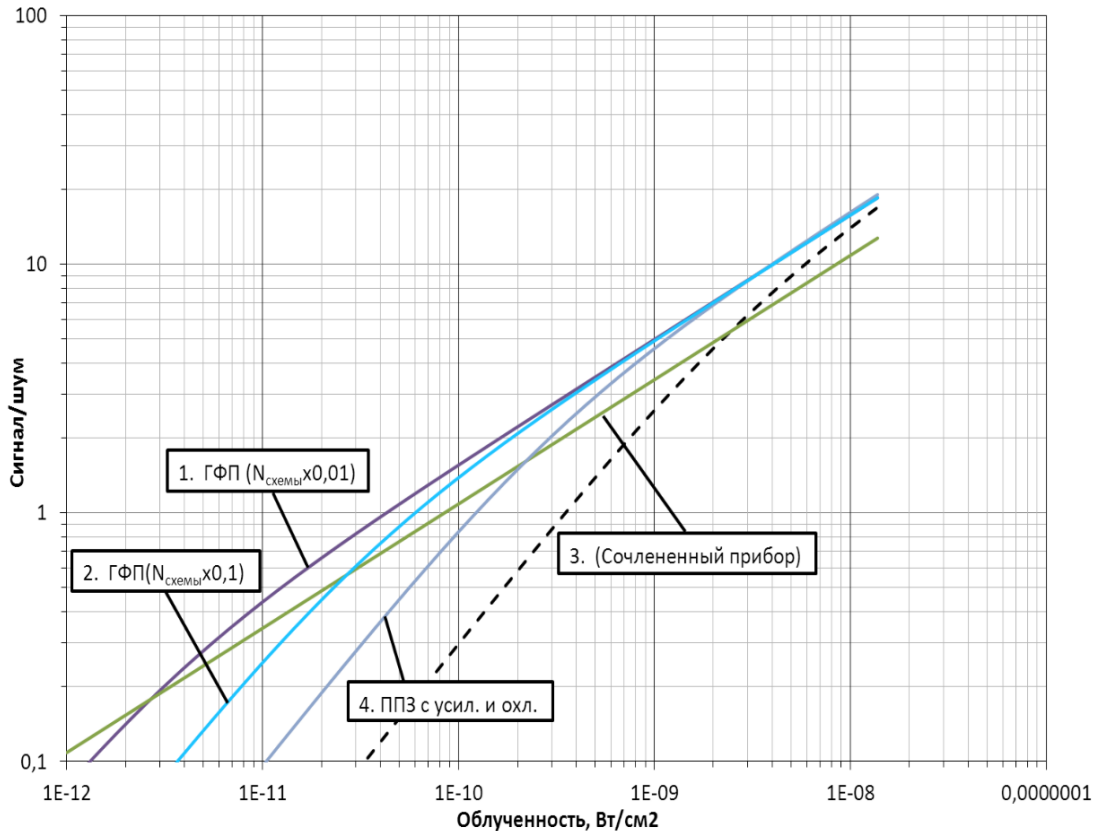


Рисунок 1.8 – Зависимость соотношения сигнал/шум от облученности гибридного прибора, сочлененного прибора и ППЗ. $N_{\text{схемы}} = 2000 \text{ e}$.

Современные твердотельные приборы позволяют работать при облученностях немного меньших, чем гибридные приборы, имея при этом возможность улучшения порога за счет охлаждения и уменьшения темновых токов ячейки. В то время как, охлаждение ГФП является технически намного более сложной задачей. В свою очередь, к его плюсам могут быть отнесены меньшие требования к шумам электроники, т.к. прибор имеет усиление, и возможность работать в режиме стробирования с временами строба на порядки меньшими, чем позволяют современные твердотельные приборы. Стробируемый режим обеспечивается в гибридном приборе за счет конструкции фотокатода и позволяет иметь длительность строба, по крайней мере, на уровне десятков нс, что может использоваться в различных системах с подсветкой (ЛИДАР и т.п.) [57-60]. Например, фирма Intevac использует гибридные приборы собственного

производства в камерах LIVAR (Laser Illuminated Viewing and Ranging System) [57]. Использование твердотельных детекторов в таких системах невозможно из-за малого быстродействия стробирования.

Гибридный фотоэлектронный прибор состоит из двух основных элементов: фотокатода, выбранного в зависимости от предполагаемого спектрального диапазона чувствительности устройства и преобразователя фотоэлектронов. Глава 2 диссертационной работы посвящена вопросам формирования и применения фотокатодной гетероструктуры InP/InGaAs/InP, а в главе 3 особенностям изготовления и методам оценки параметров детектора фотоэлектронов.

1.5 Применение гибридного прибора в системах ночного видения в активном режиме

Приборы ночного видения с активной подсветкой (АИПНВ) имеют ряд преимуществ перед классическими пассивными ПНВ, прежде всего это выражено в повышенной разрешающей способности, что позволяет идентифицировать цель на расстоянии до 20 км [59]. Использование коротковолнового ИК диапазона позволяет использовать в качестве излучателя недорогой полупроводниковый лазер на кристалле иттрий-алюминиевого граната с неодимом (Nd:YAG-лазер с рамановской ячейкой) с хорошими характеристиками, который также безопасен для человеческого глаза. Работа в режиме стробирования, где работа ФПУ привязана к длительности импульса излучения лазера позволяет не только получать телевизионное изображение цели, но и информацию о расстоянии до объекта. К дополнительным преимуществам данного режима работы можно отнести более высокую контрастность изображения за счет отсутствия атмосферных явлений, возможность устранения фона и сканирования объекта с малым шагом для получения структурных деталей, возможность обеспечения высококонтрастного силуэта цели на фоне, отсутствие необходимости в точной

стабилизации при работе в режиме "моментальной съемки". По данным [58] обнаружительная способность АИПНВ с гибридным прибором превышает в 7 раз показатели военных тепловизоров (FLIR), работающих в спектральном диапазоне 10 мкм. и в 3 раза устройства, использующие средневолновый ИК диапазон 3-5 мкм [61,62]. На рисунке 1.9 представлена структурная схема организации АИПНВ с гибридным ФПУ.

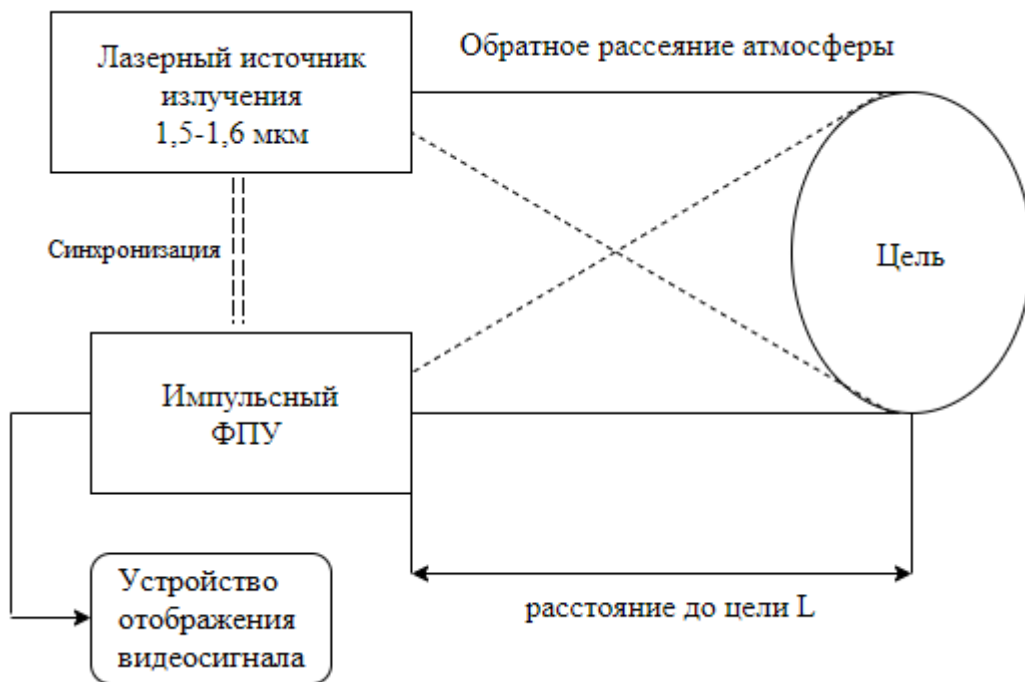


Рисунок 1.9 – Структурная схема наблюдения объекта с помощью АИПНВ

Структурная схема ФПУ для систем наблюдения представлена на рисунке 1.10.

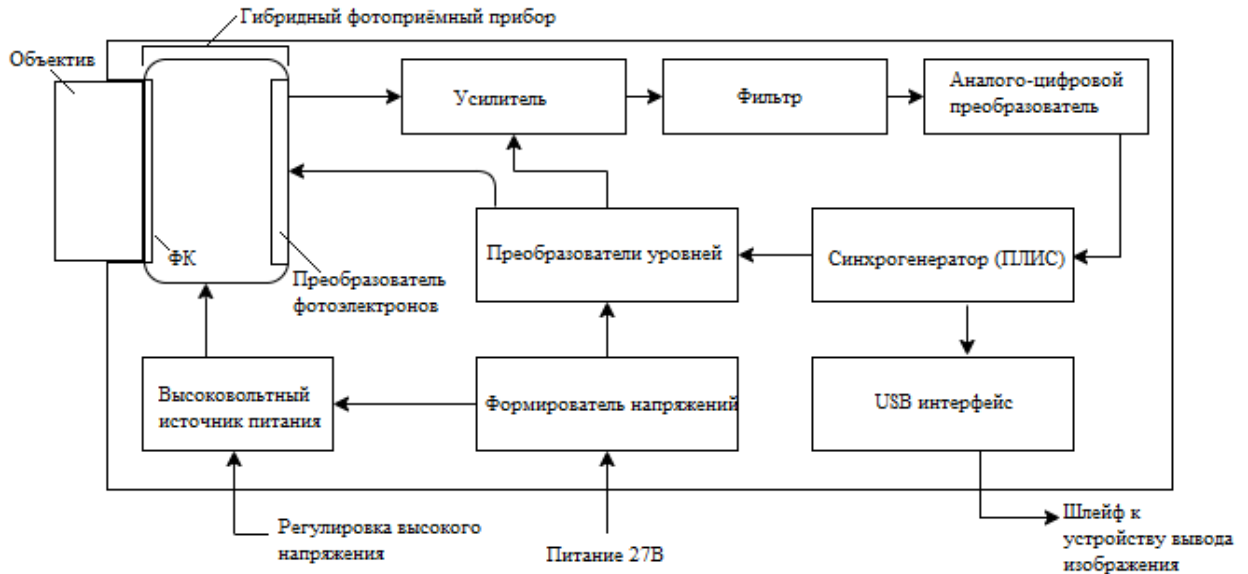


Рисунок 1.10 – Структурная схема ФПУ с гибридным КВ-ИК прибором

Основным элементом ФПУ является гибридный фотоприемный прибор, осуществляющий фотон-электронное преобразование отраженного излучения источника, высоковольтный источник питания, необходимый для ускорения электронов, вышедших в вакуум с поверхности фотокатода, и блок управления, обеспечивающий вывод цифрового изображения с выхода преобразователя фотоэлектронов ГФП. Схема блока управления является стандартной для камер на основе ПЗС приборов и не требует специальных схемотехнических решений. Питание камеры может осуществляться с помощью стандартного источника постоянного напряжения в 27 В характерного для военной техники производства РФ.

Блок схема, представленная на рисунке 1.10, описывает устройство, способное работать в пассивном и активном режиме, когда наблюдаемое пространство освещается источником коротковолнового инфракрасного излучения. В случае реализации активно-импульсного режима работы (рисунок 1.09) необходима дополнительная синхронизация ФПУ и излучающей системы. При этом стробирование ФПУ осуществляется с помощью высоковольтного источника напряжения, осуществляющего питание ГФП. Время его работы

должно соответствовать длительности импульса излучения. В результате реализации такого режима возможно не только интерпретировать объекты, но и получать информацию о расстоянии L между ФПУ и целью.

Конструкция ГФП, входящего в состав ФПУ позволяет реализовывать активно-импульсные ПНВ с длительностью строба менее 100 нс, что на данном этапе развития твердотельных детекторов на основе гибридных сборок невозможно [63,64]. Это связано с наличием фотокатода и необходимостью подачи на него высокого электрического потенциала для функционирования устройства. Возможность реализации сверхскоростного оптического затвора делает приборы на основе фотокатов крайне привлекательными для систем LIDAR (Light Detection and Ranging) [65-69], подклассом которых может считаться и АИПНВ. Эти факты еще раз подтверждают перспективность исследований, проводимых в диссертационной работе.

ГЛАВА 2. ФОТОКАТОД ДЛЯ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА

Основной задачей фотокатодов (ФК) является эмиссия электронов в вакуум под действием оптического излучения в результате внешнего фотоэлектрического эффекта, что обеспечивает превращение оптического изображения в электронное. ФК изготавливают из материалов, являющихся эффективными эмиттерами фотоэлектронов в заданной спектральной области [42,65,66].

Основными характеристиками ФК являются чувствительность и спектральная чувствительность. Чувствительностью фотокатода, в общем случае, это отношение его фототока в амперах к световому потоку от источника «А», в люменах, падающему на ФК или установленное на нем оптическое устройство. Это определение справедливо для ФК чувствительность которых, находится в области кривой восприятия электромагнитного излучения человеческим глазом. Для УФ и ИК ФК источник излучения характеризуется мощностью излучения в Ваттах и длиной волны излучения, при этом важнейшим параметром является спектральная чувствительность. Спектральной чувствительностью фотокатода $S(\lambda)$ называют отношение фототока к монохроматическому лучистому потоку $\Phi(\lambda)$. Область спектральной чувствительности фотокатода определяют по результатам измерения относительной спектральной чувствительности. Поскольку края спектральной характеристики (особенно в длинноволновой области) могут приближаться к оси абсцисс асимптотически, то за граничные ее значения принимают длины волн, на которых относительная спектральная чувствительность составляет 0,01 от максимального значения [42].

Фотокатоды, применяемые в производстве приборов, могут быть классифицированы по областям их спектральной чувствительности – ФК для ультрафиоле-

товой области спектра (УФ ФК); ФК для видимой области спектра; ФК для инфракрасной области спектра (ИК ФК).

В отличие от видимой и ультрафиолетовой области спектра, где практически во всем спектральном диапазоне известны ФК с высоким квантовым выходом (более 30%), в коротковолновой ИК области таких фотокатодов не было до последнего момента.

2.1 Фотокатоды для диапазона длин волн 0,95-1,7 мкм

Длительное время единственным ФК, чувствительным в области коротковолнового инфракрасного излучения оставался кислородно-серебряно-цезиевый (Ag-O-Cs) ФК, длинноволновая граница чувствительности которого составляет 1,2–1,4 мкм, а максимальные значения его квантового выхода на длине волны 1,1 мкм не превышает 0,1 % [33,60]. Более того, кислородно-серебряно-цезиевые фотокатоды имеют высокий уровень термоэмиссии, ограничивающий пороговую чувствительность построенных на его основе приборов. Поэтому их спектральная чувствительность падает со временем.

Перспективным направлением на получение высокоэффективных ФК в ИК области являются ФК с отрицательным электронным средством (ОЭС-ФК) на основе полупроводниковых соединений A_3B_5 . Отличительными особенностями таких структур являются – чрезвычайно высокая чувствительность; улучшенная форма спектральной характеристики (более равномерное распределение чувствительности по спектральному диапазону); смещение области спектральной чувствительности в длинноволновую область, что весьма важно для многих применений; меньшие начальные энергии фотоэлектронов и более узкое их энергетическое распределение. Эти свойства ОЭС-ФК способны радикально улучшить характеристики электровакуумных приборов на их основе.

Одной из главных особенностей изготовления ОЭС-ФК является необходимость тщательнейшего удаления с поверхности всех загрязнений. Для получения атомарно чистой поверхности производится обезгаживающий прогрев «заготовки» фотокатода в условиях сверхвысокого вакуума до температур, близких к точке разложения материала. Иногда поверхность дополнительно очищается ионной бомбардировкой или тлеющим разрядом в кислороде. Следующим этапом является процесс активации, заключающийся в формировании на поверхности слоя электроположительных атомов, чаще всего Cs, благодаря которому значительно снижается работа выхода за счет образования диполей. Дальнейшего снижения работы выхода до реализации состояния отрицательного электронного сродства добиваются добавкой электроотрицательных атомов, обычно кислорода.

Один из широко распространенных ОЭС-ФК – структура на основе GaAs, однако, порог ее чувствительности ограничен длиной волны около 1,06-1,1 мкм. Это связано с тем, что вероятность выхода фотоэлектронов резко падает для полупроводников с шириной запрещенной зоны (E_g) меньше, чем 1,25 эВ из-за существования промежуточного барьера на границе полупроводника и слоя активирующего покрытия Cs-O. Высота этого барьера остается приблизительно постоянной по мере уменьшения величины E_g материала фотокатода и равна 1,1 эВ. Для того чтобы преодолеть поверхностный барьер в длинноволновой части спектра, изучались различные ФК с приложением внешнего (авто-фотоэмиссия) и внутреннего поля.

Попытки получения ФК с высоким квантовым выходом на многоострийных автоэлектронных ФК в виде мозаик на пластинах кремния и германия не привели к созданию приборов по причине больших темновых токов (10^{-6} А/см² при 300 К) и недостаточной равномерности и однородности острий [1,4].

Идея ФК с барьером Шоттки (Ш-б), лежащая в основе ФК с переносом электронов (ФКПЭ), называемых также ФК с внутренним тянущим полем (transferred electron photocathode – ТЕР) была выдвинута Беллом и запатентована в 1974 году [1,5]. Использование ФКПЭ позволяет сдвигать длинноволновый порог фо-

тоэмиссии за счет увеличения энергии внутренних фотоэлектронов. Структура такого ФК была впервые реализована на основе гетеропары фосфид индия – твердый раствор индий – галлий арсенид (InP–InGaAs). Шоттки барьер был сформирован с помощью тонкой пленки из серебра [71-73].

За прошедшие с этого времени годы зарубежные исследователи и фирмы достигли впечатляющих успехов в разработке ФКПЭ [74-77]. Это позволило фирме Intevac разработать систему LIVAR (Laser Illuminated Viewing and Ranging), работающую с лазерной подсветкой в активном режиме. Система построена на основе вакуумного прибора с ФКПЭ и электронно-бомбардируемой ПЗС-матрицы. Идентификация целей может быть произведена на расстоянии от 3-5 км до 20 км. Конструктивно камера LIVAR M506 представляет собой ФПУ на основе гибридного прибора, который содержит в едином вакуумном объеме ИК фотокаатод и чувствительный к электронам матричный элемент, расположенные параллельно друг к другу с зазором около 1мм. Прибор чувствительный в спектральном диапазоне 0,95-1,65 мкм и имеющий квантовый выход длине волны 1,55 мкм ≥ 20 % [78-80]. Прибор работает с активной лазерной подсветкой на $\lambda=1,54$ мкм.

В настоящее время технология производства фотокаатодных соединений для SWIR спектрального диапазона находится на начальном этапе освоения мировым научным сообществом, однако, в свете применения фотокаатодов в рамках ГФП, исследования по данному направлению могут в конечном счете привести к значительному повышению характеристик SWIR-фотоприемных систем [81,82].

2.1.1 Устройство фотокаатода с переносом электронов

Фотоэмиссия с переносом электронов основывается на том, что для определенных полупроводников A_3B_5 , таких как InP, твердые растворы InGaAsP, GaAs, электроны могут быть переведены в верхние долины зоны проводимости (L и X) или просто подогреться внутри G долины за счет приложения очень небольшо-

го электрического поля. Преимущество использования гетеропары InP (р-типа) – InGaAs – InP для создания ФКПЭ состоит в следующем:

Ширина запрещенной зоны InP – 1,35 эВ, расстояние между верхним L и нижним G минимумом зоны проводимости – наименьшее из всех полупроводников A_3B_5 и составляет 0,4-0,6 эВ; Различие постоянных кристаллических решеток "a" гетерослоев InGaAs и InP, не превосходит 0,03% (рисунок 2.1) [63,83]. Это качество при высоком уровне технологии эпитаксии должно обеспечить идеальную границу раздела с низкой скоростью поверхностной рекомбинации [84,85].

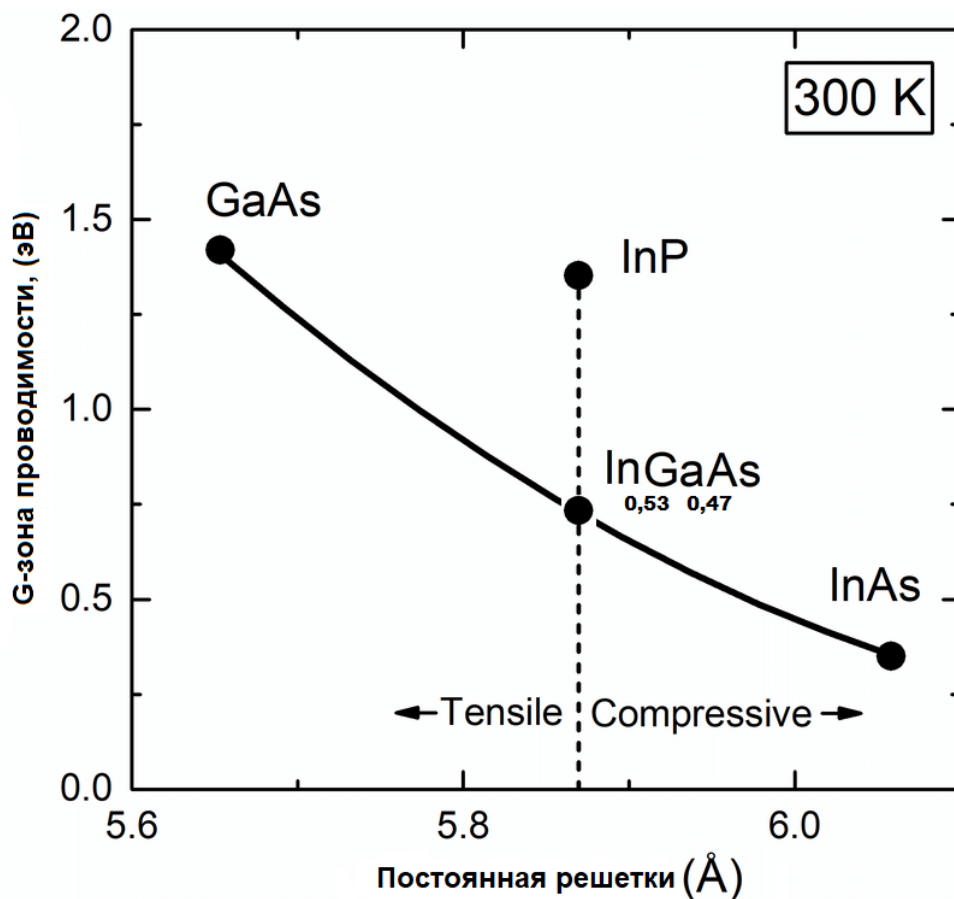


Рисунок 2.1 – Соответствие постоянных решеток InP и In_{0,53}Ga_{0,47}As

Зонная схема ФКПЭ фотокатода без приложения поля изображена на рисунке 2.2. Активный слой (поглощающий фотоны и генерирующий электроны) при отсутствии освещения должен иметь небольшое количество свободных электронов,

чтобы минимизировать темновой ток. Следовательно, это должен быть полупроводник p – типа. Слой, который, в конечном счете, будет эмитировать электроны в вакуум, тоже должен иметь p-тип проводимости. Для того, чтобы приложить тянущее поле между двумя слоями, необходимо между ними создать барьер для дырок. Для ФКПЭ используется Ш-б металл-полупроводник. Этот барьер достаточно высок для того, чтобы иметь приемлемо низкую величину тока дырок при приложении запирающего дырки напряжения. На рисунке 2.2 активным слоем, поглощающим фотоны, является слой InGaAs p-типа, согласованный по решетке с InP. Четверное соединение InGaAsP с постоянной решетки, равной постоянной решетки InP, может иметь ш.з.з. в диапазоне от 1,35 эВ (InP – 920 нм) до 0,75 эВ ($\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ – 1.65 мкм), соединение InGaAlAs может иметь ш.з.з. от 1,47 эВ ($\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$) до 0,75 эВ для ($\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$). На рисунке 2.3 показана зонная схема ФКПЭ с приложением тянущего поля.

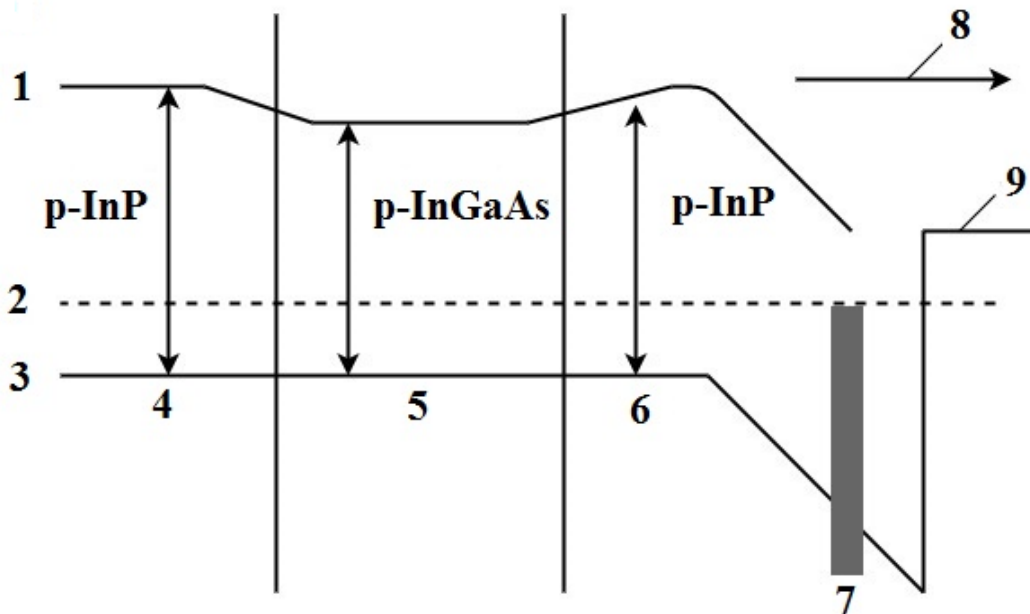


Рисунок 2.2 – Зонная схема ФКПЭ фото катода без приложения внешнего электрического поля, где 1 – зона проводимости, 2 – уровень Ферми, 3 – валентная зона, 4 – подложка, 5 – активный слой, 6 – эмиттер, 7 – металлический электрод, 8 – направление фотоэмиссии, 9 – уровень вакуума

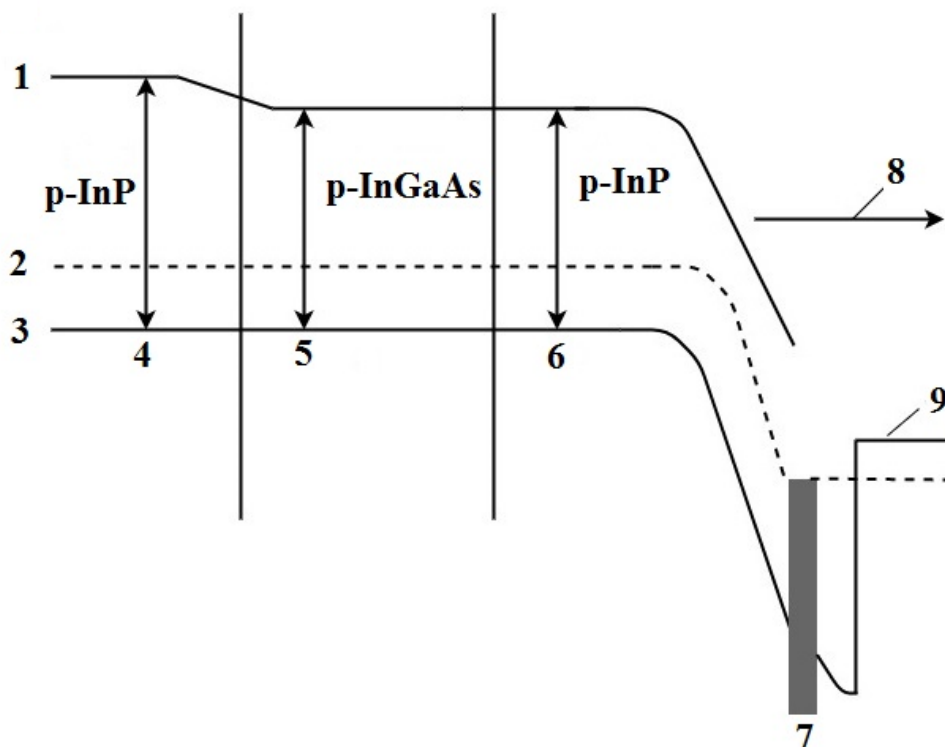


Рисунок 2.3 – Зонная схема ФКПЭ фотокатода при приложении внешнего электрического поля, где 1 – зона проводимости, 2 – уровень Ферми, 3 – валентная зона, 4 – подложка, 5 – активный слой, 6 – эмиттер, 7 – металлический электрод, 8 – направление фотоэмиссии, 9 – уровень вакуума

Напряжение смещения прикладывается к металлической пленке Ш-б. Фотокатод освещается со стороны подложки, которая прозрачна в диапазоне длин волн, начиная с 950 нм. Свет поглощается в активном слое с малой ш.з.з., осуществляется перенос носителей заряда из валентной зоны в зону проводимости, где они быстро термализуются в G минимуме зоны проводимости. Эти электроны диффундируют в эмиттер, который находится под положительным полем Ш-б. Обратное напряжение смещения устанавливает в эмиттере поле порядка 10^4 В/см. Эта величина ниже напряжений пробоя (10^5 - 10^6 В/см) Напряжение смещения расширяет тянущее поле до границы поглощающий слой – эмиттер, осуществляя перенос электронов через существующий там гетеропереход. Электроны зоны проводимости эмиттерного слоя за счет этого поля могут переходить в верхние

долины зоны проводимости. Электроны, с верхних долин, преодолевая барьер работы выхода на поверхности, могут эмитировать в вакуум [86,87].

Так как исследуемый фотокатод представляет собой крайне сложную гетероструктуру, то на этапе научного поиска ее оптимальных параметров, целесообразно исследовать каждый составной слой фотокатода по отдельности. Важнейшим в структуре фотокатода является эмиттер – слой InP, на который нанесен поверхностный электрод для приложения внешнего напряжения, то есть создания фотокатода с тянущим полем. Электрод имеет структуру сетки-решётки в виде параллельных проводящих полосок, и изготавливается методом фотолитографии, обеспечивая равномерное распределение напряжения смещения по рабочей поверхности фотокатода. В диссертационной работе проведены исследования структур InP/InGaAs/InP и эпитаксиального InP со сформированными на их поверхности барьером Шоттки путем нанесения титанового сетчатого электрода. Результаты исследований позволили определить оптимальные геометрические и физические параметры рассматриваемых элементов, а также отработать технологию фотолитографии и химического травления образцов.

2.2 Влияние свойств подложки на чувствительность фотокатода в режиме работы на пропускание

В гибридном приборе фотокатод работает на пропускание света, а значит большое значение имеют параметры подложки, на которой располагаются слои эпитаксиальной структуры. Обратная засветка обусловлена конструкцией ГФП, которая исключает возможность работы фотокатода на отражение. Образцы подложек, имеющие высокую концентрацию акцепторной примеси, $p=4 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$, обладают большим поглощением света в диапазоне 1-1,7 мкм, что в первую очередь связано с поглощением на свободных носителях (дырках). На рисунке 2.4 в качестве примера представлены результаты исследований зависимостей коэффициен-

та пропускания подложек InP с различной концентрацией основных носителей заряда [88].

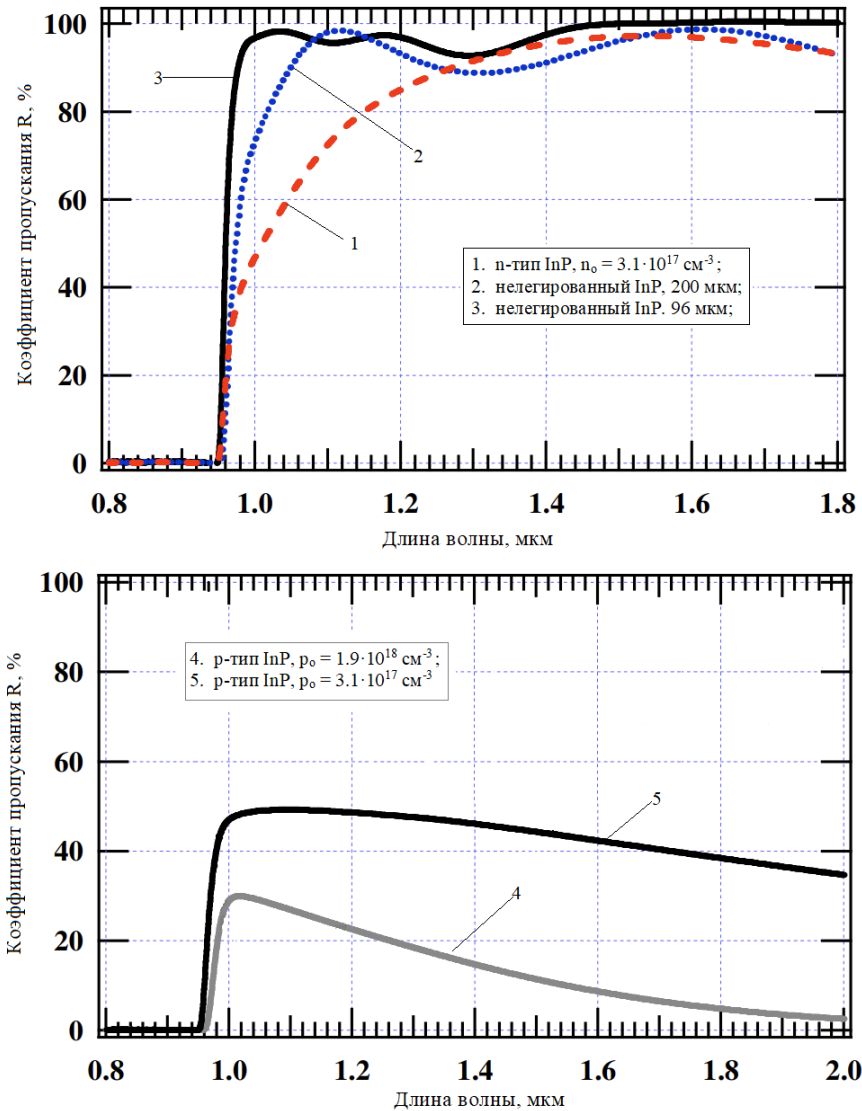


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента пропускания подложек InP различных толщин и концентраций от длины волны излучения

Световой поток, проходящий в слой фотокатода $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ через подложку, уменьшается из-за отражения на фронтальной и тыльной сторонах подложки, поглощения в ней и рассеяния. Исходя из экспериментальных и литературных данных [88-90] по полупроводникам A_3B_5 , InP подложки с высокой концентрацией донорной примеси (n-тип) обладают меньшим поглощением в требуемом спек-

тральном диапазоне при том же уровне легирования относительно подложек р-типа, и таким образом должны обеспечивать лучшее пропускание коротковолнового инфракрасного излучения. Однако, применение n-InP в качестве подложки реального InP/InGaAs/InP фотокатода крайне затруднительно, поскольку это создаст р-n переход на границе подложка-поглотитель, что неизбежно приведет к большим токам утечки на границе гетероперехода и в следствие этого неработоспособности структуры [89]. Снижение концентрации акцепторной примеси в подложках р-типа (на уровень 10^{16} см^{-3}) позволяет увеличить оптическое пропускание слоя относительно образцов с концентрацией 10^{17} - 10^{18} см^{-3} , но влечет за собой проблему создания эквипотенциальных электрических контактов с тыльной стороны [90].

Выполненный анализ представленных результатов исследований различных ученых показал, что в качестве базы для эпитаксиального роста исследуемых структур наиболее целесообразно выбрать подложку Zn:InP со следующими параметрами: концентрация $p=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ и толщина 350 мкм. При этом, в режиме работы на просвет (освещение фотокатода со стороны подложки) суммарная чувствительность структуры может быть снижена до 2 раз на $\lambda=1,06 \text{ мкм}$ и до 3 раз на $\lambda=1,54 \text{ мкм}$ соответственно из-за процессов поглощения и отражения в плоскости InP. Таким образом, на исследуемых структурах крайне целесообразно нанести антиотражающее покрытие.

В диссертационной работе было исследовано отражение света фосфидом индия. Перед проведением экспериментов был выполнен расчет антиотражающего покрытия на основе Al_2O_3 с оптимизацией для $\lambda=1,54 \text{ мкм}$. в соответствии с формулой (2.1), где n_1 – коэффициент преломления среды, n_2 – коэффициент преломления Al_2O_3 , n_3 – коэффициент преломления InP.

$$R = \frac{a^2(1-n_2)^2 + b^2(1+n_2)^2 + 2(n_2^2 - n_3^2) * (1-n_2^2) * \cos \gamma}{a^2(1+n_2)^2 + b^2(1+n_2)^2 + 2(n_2^2 - n_3^2) * (1-n_2^2) * \cos \gamma}$$

$$a = n_2 + n_3$$

$$b = n_2 - n_3$$

$$\gamma = 4\pi n_2 d_2 / \lambda$$
(2.1)

Расчетная толщина покрытия d_2 составила 0,22 мкм. На рисунке 2.5 представлены полученные спектральные зависимости коэффициента отражения (R) от поверхности InP с антиотражающим покрытием и без него.

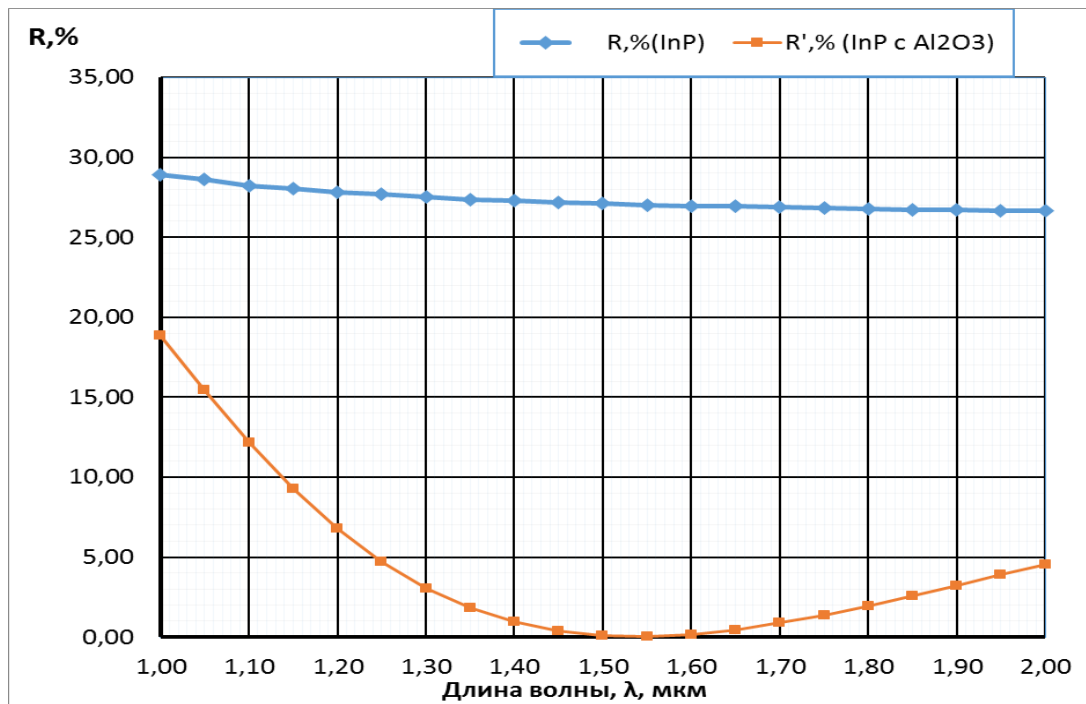


Рисунок 2.5 – Спектральные коэффициенты отражения R

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод, что использование покрытия, нанесенного на подложку, позволяет минимум на 25 % увеличить эффективное количество регистрируемых фотонов на $\lambda=1,54$ мкм. Также для подложки InP $\rho=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ был выполнен расчет коэффициента поглощения в процентах (рисунок 2.6). Для оценки поглощения подложек с $\rho=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ использова-

лись экспериментальные данные (рисунок 2.4). Значение поглощения подложки с $p=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ для $\lambda=1,06 \text{ мкм}$ составило 13% и 25% для $\lambda=1,54 \text{ мкм}$ соответственно. В случае, если минимизировать потери на отражение и поглощение, разница между чувствительностями фотокатода при его освещении с разных сторон может составить менее 25%.

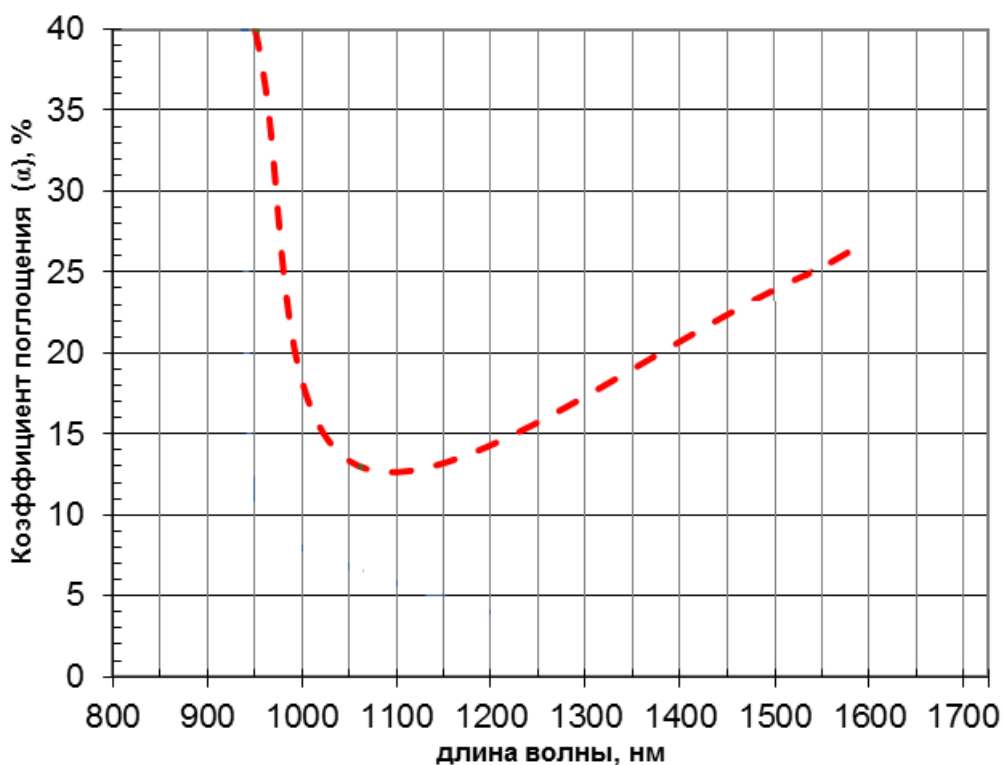


Рисунок 2.6 – Спектральные коэффициенты поглощения α для подложек InP с концентрацией $p=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что использование в качестве фотокатодов гетероструктур на подложках с более низкими концентрациями позволит получить квантовый выход конечной гетероструктуры на просвет (за счет их лучшего пропускания), увеличенный более чем на 1,5-2 % в диапазоне 1,0-1,6 мкм. Кроме того, целесообразно дополнительно применить антиотражающее покрытие, оптимизированное под требуемую операционную длину волны.

2.3 Экспериментальная установка для исследования фотокатодов

Для проведения экспериментальных исследований в вакууме были проведены работы по модернизации сверхвысоковакуумной установки "Riber-M". Структурная схема экспериментальной установки представлена на рисунке 2.7.

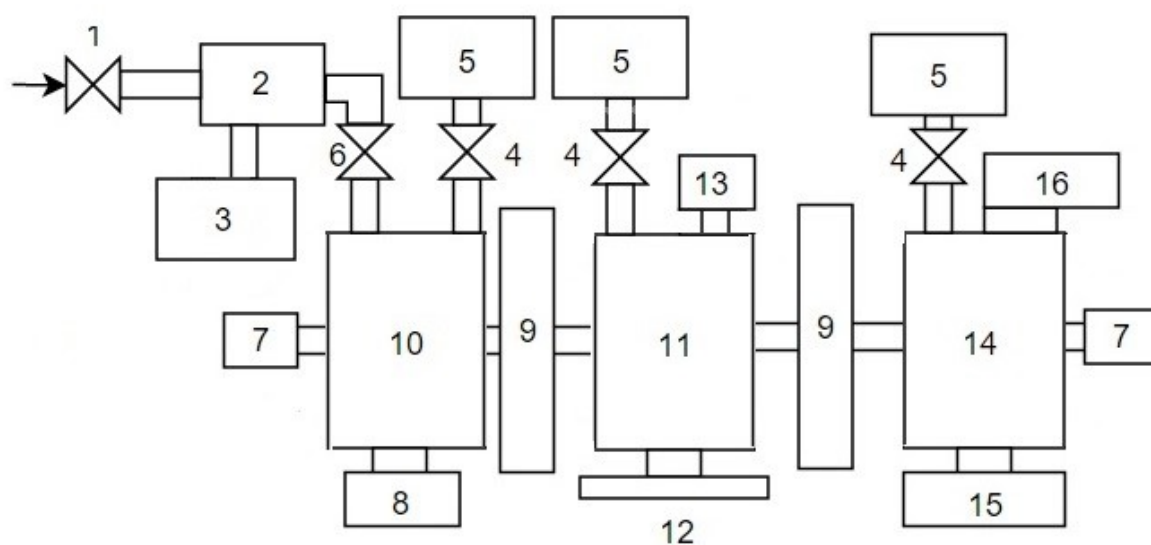


Рисунок 2.7 – Блок-схема установки Riber-M, где 1 – кран напуска, 2 – магистраль, 3 – форвакуумная система откачки, 4 – кран магнитоэридного насоса, 5 – насос магнитоэридный, 6 – кран магистрали, 7 – манипулятор, 8 – входное окно 9 – шиберный затвор, 10 – загрузочная камера, 11 – камера обработки корпуса и запрессовки, 12 – смотровое окно, 13 – запрессовщик, 14 – камера изготовления ФК, 15 – смотровое окно, 16 – фланец источников

Данная экспериментальная установка предназначена для изготовления макетов приборов с фотокатодами на структурах A_3B_5 . Для этого она оснащена загрузочной камерой, шиберными затворами с диаметром 160 мм, манипуляторами,

смотровыми окнами, оснасткой, источниками цезия, кислорода и др. Внешний вид установки представлен на рисунке 2.8.

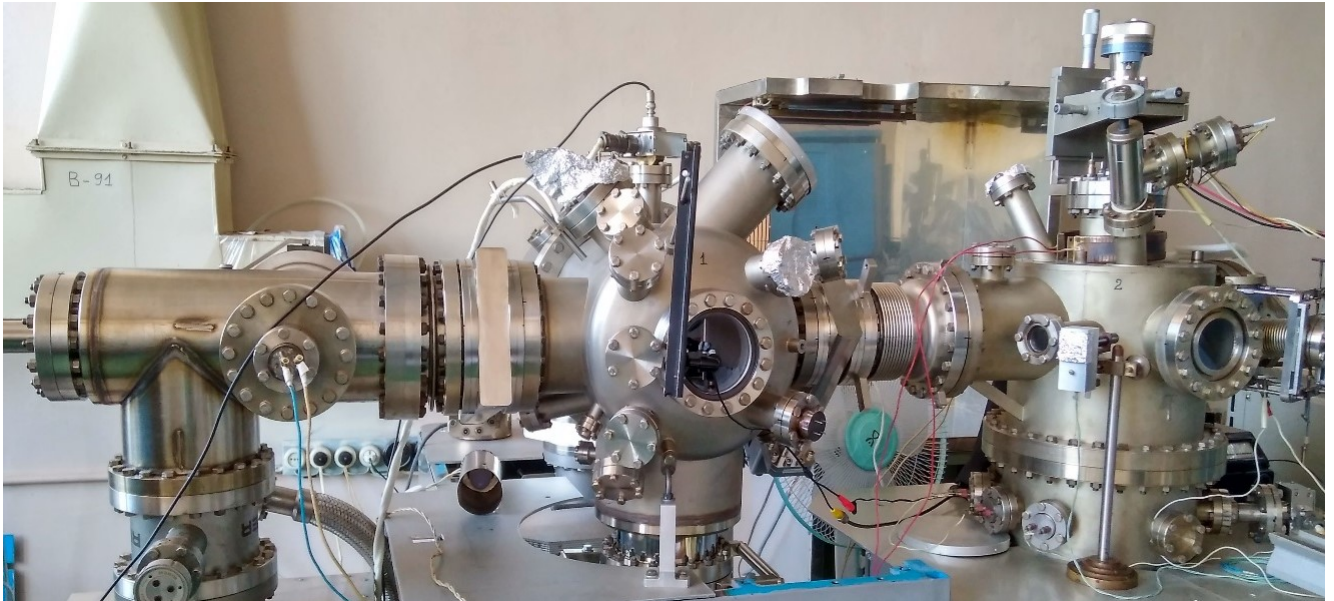


Рисунок 2.8 – Внешний вид установки переноса Ribet-M

Загрузка и выгрузка фотокатодных узлов (ФУ), корпуса прибора и готового прибора осуществляется через окно быстрой загрузки, которым снабжена загрузочная камера. Все камеры разделены шибберными затворами, что позволяет при загрузке и выгрузке сохранять вакуум в камере запрессовки и камере подготовки ФУ. Для обеспечения возможности герметизации, изготовленных ФК в корпус, был разработан и изготовлен вакуумный пресс с дополнительной оснасткой для прогрева корпуса.

Использование различных конструкторских решений позволило в камере обработки ФУ, которая является основной в процессе изучения полупроводниковых структур и создания фото-эмиттеров, достигнуть вакуума на уровне $1 \cdot 10^{-9}$ Па. Для примера, на рисунке 2.9 изображен экспериментальный ФУ внутри вакуумной камеры.

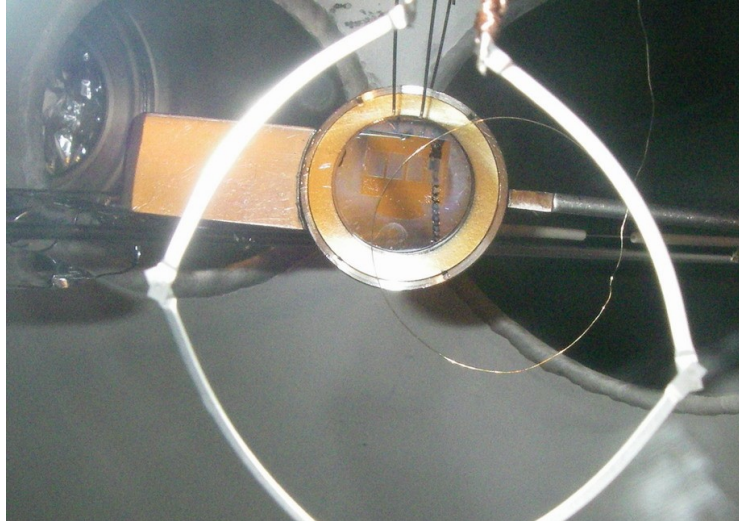


Рисунок 2.9 – Фотокатодный узел в камере активировки экспериментальной установки

Для повышения уровня вакуума в камерах экспериментальной установке были использованы нераспыляемые геттерные насосы (НГН) [91-93]. Для камеры активировки было изготовлено пять НГН с расчетной суммарной быстротой откачки 1000 л/с [92,93]. Каждый насос состоит из 8 пластин на основе TiV, активация которых производится пропуском через них электрического тока. Насос смонтирован на фланце CF35. На рисунке 2.10 изображен один из НГН перед установкой на камеру.



Рисунок 2.10 – Внешний вид сборки нераспыляемого геттерного насоса (НГН) на фланце CF35

Нижняя часть камеры активировки имеет восемь фланцев CF35, часть из которых не использовалась. На пять из них установлены геттерные насосы. Так как насосы встроены прямо в камеру, их эффективная скорость откачки близка к расчетной.

Для камеры запрессовки разработана и изготовлена другая конструкция НГН. Насос смонтирован на фланце CF63. Нагрев геттеров производится излучением галогенной лампы мощностью 2 КВт. Расчетная скорость откачки насоса около 1000 л/с. На рисунке 2.11 изображен насос до наполнения его сеточной оболочки геттерными элементами. Процесс установки геттерных элементов проходит после предварительного вакуумного отжига конструкции.

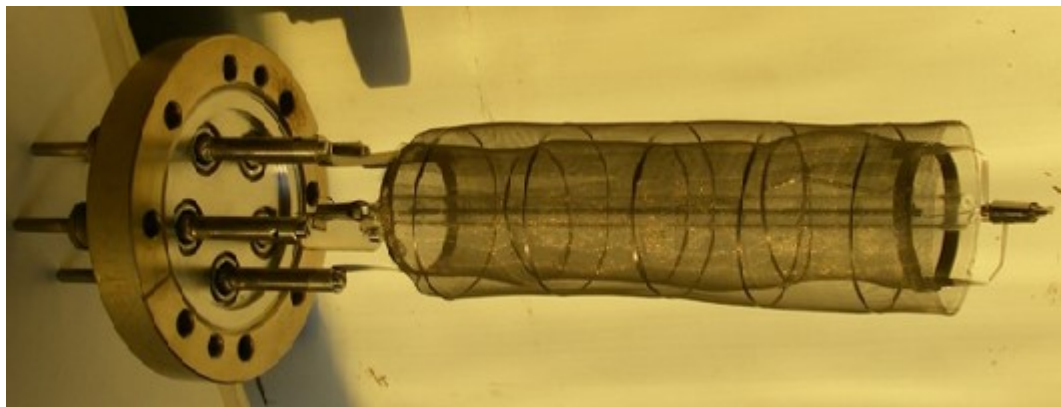


Рисунок 2.11 – Внешний вид насоса (НГН) на фланце CF63 до наполнения его сеточной оболочки геттерными элементами

Для приведения НГН в рабочее состояние геттера необходимо активировать, так как после пребывания на атмосфере поверхность геттеров покрыта тонким, в несколько нм, слоем оксидов, который препятствует проникновению откачиваемых газов внутрь геттеров в вакууме, и в тоже время защищает геттеры по всей их толщине при пребывании на атмосфере. Активация геттеров заключается в нагреве их до температур 350-400 °С в вакууме $p < 10^{-4}$ Па в течение нескольких часов, в результате чего поверхность геттеров преобразуется и становится адсорбционно активной и диффузно прозрачной для адсорбированных газов. НГН

откачивают только активные газы (водород, оксиды углерода, пары воды и др) и не откачивают инертные. Сорбционная емкость НГН по водороду обратимая, остальные газы насосы откачивают необратимо, т.е. при нагреве геттеров адсорбированный водород десорбируется, а другие газы в виде химических соединений растворяются в объеме геттеров, накапливаясь в них необратимо. Как известно, магниторазрядные насосы (МН) обладают другой селективностью в процессе откачки. Быстрота действия МН при откачке водорода в 3 раза выше, чем азота. При откачке инертных газов МН имеет быстроту действия для гелия 10%, неона 4%, аргона, криптона и ксенона 1-2% от быстроты откачки азота. Таким образом, для получения сверхвысокого вакуума необходима одновременная работа магниторазрядного и геттерного насосов.

2.4 Химическое травление InP/InGaAs/InP гетероструктуры

Процесс химического травления играет две роли в общем процессе очистки полупроводниковых структур: во-первых, оно удаляет загрязнения поверхности, во-вторых, подготавливает соответствующую исходную поверхность для последующей стадии очистки, как правило, вакуумному отжигу [94,95]. Качественный химический процесс травления должен удовлетворять обоим критериям, чтобы обеспечить чистоту окончательной поверхности. Вторым критерий особенно важен для материалов, которые имеют низкие температуры разложения. Именно к таким материалам относится InP – эмиттер рассматриваемой в диссертационной работе гетероструктуры InP/InGaAs/InP.

Структуры на основе фосфида индия отличаются слабой термостойкостью и прогревы с температурой более 320°C приводят к деградации структур, таким образом классические методы очистки для металлов и термостойких материалов, такие как ионное распыление и отжиг, не могут быть использованы. Поэтому процесс получения чистой поверхности является сложной задачей. При работе с

InP следует уделить большое внимание довакуумной подготовке структуры. Также нужно отметить, что методы очистки, применяемые для другой полупроводниковой структуры группы A_3B_5 – арсенида галлия [96-98], являются неэффективными в случае фосфида индия. Все это обусловило необходимость разработки новых методов очистки, ориентируемых на структуру InP.

В рамках экспериментального поиска образцы InP были протравлены с помощью растворов на основе C_3H_8O+Cl , C_3H_8O+Br , а также двух стадийного метода химического травления, объединенного с термической очисткой в вакууме, которые описаны в работах [99-101]. В результате, на исследованных структурах были получены значения фотоэмиссионного тока (кривые 1,2 на рисунке 2.12), соответствующие квантовому выходу, не превышающему 0,5%, что является неудовлетворительным результатом.

В результате экспериментального поиска был определен оптимальный режим травления. Время нахождения в активных средах было увеличено, по сравнению с [100], а режим скорректирован в сторону увеличения скорости снятия толстого естественного окисла. Для этого используется ультразвук (УЗ) в процессе травления. В таблице 2.1 (приложение Б) приведенные данные по растворам травления, их составу и концентрациям, а также времени травления.

Кроме того, в процесс был добавлен промежуточный этап травления с использованием слабого раствора серной кислоты. Было изучено влияние травителей на титановую сетку, и возможность их применения без деградации её структуры, что показало необходимость использования H_2SO_4 в качестве основного травителя. Ранее использовалась HCl , что приводило к существенной деградации сетчатого поверхностного электрода, выполненного из титана, на использованных образцах, хотя на чистой поверхности фосфида индия оба кислотных раствора показывали идентичные результаты. На конечном этапе довакуумной очистки была получена гидрофобная поверхность структуры InP. На рисунке 2.12 представлена зависимость фотоэмиссионного тока от времени для образцов, прошедших химическое травление в различных средах.

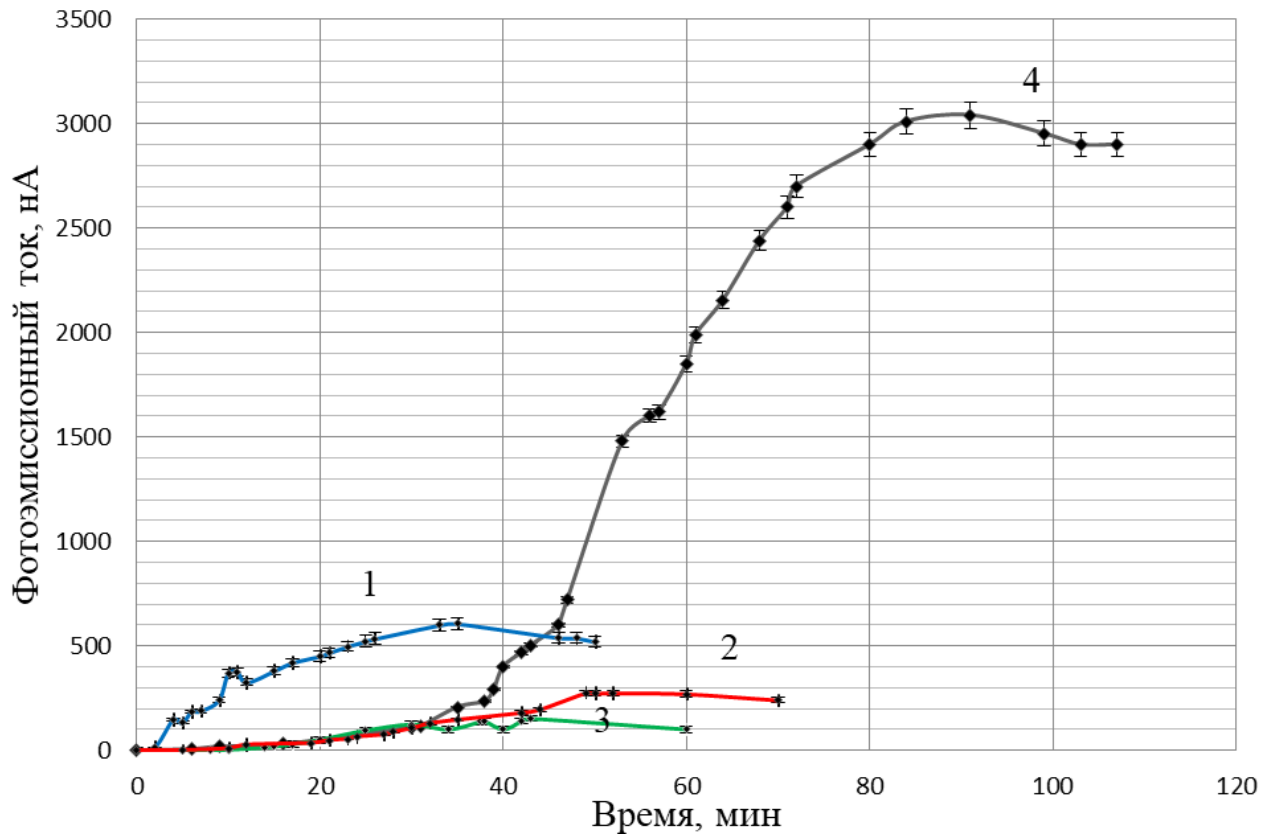


Рисунок 2.12 – Зависимость фотоэмиссионного тока от времени активировки в вакуумной камере структуры: 1 – очищенной с помощью C_3H_8O+Cl , 2 – очищенной с помощью C_3H_8O+Br , 3 – очищенной 2-растворным методом с HCl , 4 – очищенной новым методом с H_2SO_4

Анализ полученных результатов показывает, что очищенная поверхность InP обладает низкой степенью окисления остаточными молекулами воды или загрязнениями (особенно углерода) из раствора. Кроме того, была устранена необходимость в стадии сушки поверхности, которая также может ввести дополнительное загрязнение. Полученные результаты свидетельствуют о создании защитного гидрофобного слоя, препятствующего образованию окисла на образце [101], который в то же время может быть легко удален при вакуумном прогреве. Гидрофобность поверхности значительно зависит от концентрации кислоты в финишном растворе, так для отношения $H_2SO_4:H_2O$ 1 к 5, поверхность структуры остава-

лась гидрофильной. Это связано с реакцией гидролиза в кислотных растворах (2.2):



На образце формируется поверхностное состояние из соединения фосфора и водорода, однако, при малых концентрациях кислоты, а, следовательно, и H^+ , фосфор вступает в реакцию с гидроксильной группой OH^- , что влечет за собой гидрофильную поверхность и быстрое окисление в условиях атмосферы. Формирование защитного слоя позволило осуществлять перенос образца и его загрузку в сверхвысоковакуумную камеру.

Разработанный метод очистки поверхности полупроводниковых структур был применен на образцах $\text{InP}/\text{InGaAs}/\text{InP}$. Эти структуры также прошли очистку и с применением классических методов, используемых для очувствления A_3B_5 полупроводников. На рисунке 2.13 представлены результаты исследований, относительной интегральной чувствительности поверхностей, полученных с использованием различных методов очистки.

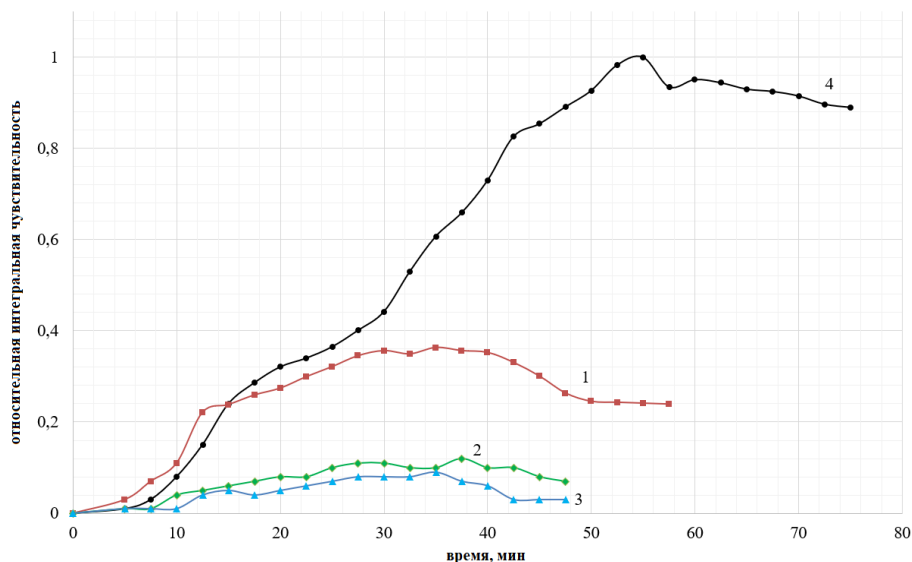


Рисунок 2.13 – Зависимость относительной интегральной чувствительности образцов $\text{InP}/\text{InGaAs}/\text{InP}$ от времени при активировке в вакуумной камере, очищенных с помощью: 1 – $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}+\text{Cl}$, 2 – $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}+\text{Br}$, 3 – HCl , 4 – H_2SO_4

Полученные результаты показали, что разработанный метод химического травления в растворах H_2SO_4 с последующим низкотемпературным вакуумным отжигом является эффективным и превосходит на 180 % (по значению относительной интегральной чувствительности) наилучший результат, полученный другими методами.

Протравленные образцы гетероструктур помещались в переносной бокс и доставлялись к вакуумной камере в кратчайшие сроки. В результате исследований было выяснено, что экспозиция в атмосфере воздуха и азота в интервале от 2 до 8 минут мало влияла на чувствительность фотокатодов. Однако, это влияние может быть более значительным в интервале времени до 2 минут [102]. Образцы помещались в загрузочной камере установки, начиналась работа форвакуумной откачной системы. При выходе на приемлемый уровень вакуума производился запуск магниторазрядного насоса. В течение 45 минут в загрузочной камере достигался вакуум $5 \cdot 10^{-6}$ Па. Далее начинался последовательный прогрев-перенос образца из загрузочной камеры в камеру активировки фотокатода. На каждом этапе после прогрева структуры перед переносом достигался предельный уровень вакуума в каждой из камер сверхвысоковакуумной установки. В таблице 2.2 (приложение Б) представлен цикл прогрева фотокатодной структуры.

В результате полупроводниковая структура, находящаяся в камере активировки фотокатодного узла, была готова к процессу активации, при этом вакуум в камере находился на уровне $1 \cdot 10^{-9}$ Па.

2.5 Формирование оксида и пероксида цезия на поверхности фотокатода

Возможность эмиссии электрона из полупроводника в вакуум определяется потенциальным барьером высотой X называемым электронным сродством твердого тела. Для таких полупроводников как GaAs, InP его величина составляет менее 1эВ [103-107]. Однако даже столь невысокий барьер все же служит препят-

ствием для выхода электронов в вакуум при обычных температурах. Получение еще более низких значений электронного сродства или достижение такого состояния, когда эффективное электронное сродство становится меньше нуля, возможно при наличии вблизи поверхности изгиба зон, обусловленного электрическим зарядом на поверхности. Положительно заряженная поверхность полупроводника р-типа отталкивает положительно заряженные дырки из приповерхностной области, что приводит к образованию обедненной области в непосредственной близости от поверхности с некоторым распределением фиксированных отрицательных зарядов (заряженных акцепторных центров) в объеме полупроводника. Наличие распределенного заряда обуславливает изменение электрического потенциала в приповерхностной обедненной области, что эквивалентно изгибу краев зон, опусканию их при приближении к поверхности (рисунок 2.14). Отрицательное электронное сродство достигнуто изгибом зон в приповерхностной области полупроводника р-типа. Обедненная область образована положительным зарядом на поверхности (уходом электронов с поверхностных состояний), отталкивающим подвижные дырки в объеме. Эффективное электронное сродство в объеме (слева от S') равно разности электронного сродства на поверхности и величины изгиба зон $V_{ВВ}$:

$$X_{\text{eff}} = X - V_{ВВ}, \quad (2.3)$$

Если величина, на которую изгибаются зоны $V_{ВВ}$ больше первоначального электронного сродства, то X_{eff} относительно, и барьер, препятствующий выходу электронов из зоны проводимости в объеме полупроводника в вакуум, отсутствует.

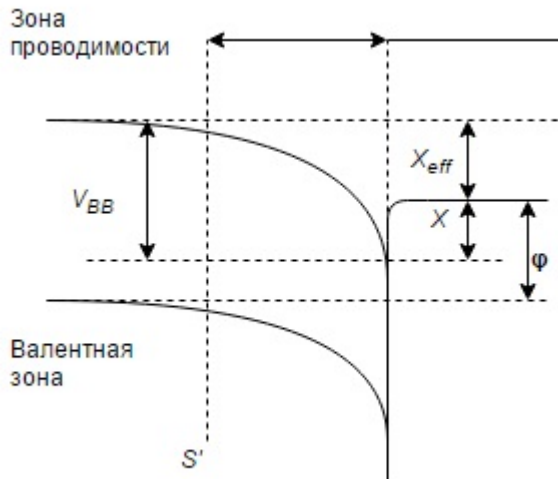


Рисунок 2.14 – Приповерхностная область

Активировка с образованием на поверхности слоя соединений с Cs и O₂ еще сильнее понижает X , так что X_{eff} становится отрицательным. Свободный выход возбужденных электронов из зоны проводимости в вакуум становится энергетически возможным. Дрейфующие через обедненную область электроны могут рассеиваться на фононах решетки, терять энергию, захватываться поверхностными ловушками и рекомбинировать с дырками в объеме. Это рассеяние можно уменьшить, сужая обедненную область путем создания высокой плотности акцепторов в объеме (легирование до вырожденной p-проводимости), при ионизации которых образуется крутой изгиб зон.

В этих условиях поверхностные состояния находятся в пределах расстояния туннелирования дырок из объема, и зарядение приповерхностной области захваченными электронами должно быть незначительным вплоть до весьма больших эмиссионных токов. Низкое сопротивление сильно легированных p-материалов (0,01 Ом у p-GaAs с концентрацией легирующей примеси примерно 10^{19} см^{-3}) облегчает также возможность отбора больших токов с катода. Равновесная плотность электронов в зоне проводимости сильнолегированных полупроводников p-типа весьма незначительна (10^{-6} см^{-3} у p-GaAs, легированного до 10^{19} см^{-3} при 300 К). Заселенность зоны проводимости может быть обеспечена путем внешнего

возбуждения: бомбардировкой электронами высоких энергий или другими частицами (вторичная эмиссия), светом (фотоэмиссия), смещением в прямом направлении n-контакта (холодная эмиссия) или повышением температуры (термоэлектронная эмиссия).

В первых двух случаях возбуждение создает в зоне проводимости электроны с высокими кинетическими энергиями (1-100 эВ) на значительных расстояниях от поверхности. Такие «горячие» электроны имеют короткие средние пути свободного пробега и малую вероятность достижения поверхности с нерастраченной кинетической энергией. Поэтому в случае положительного электронного сродства подавляющее большинство возбужденных электронов захватывается твердым телом и не выходит в вакуум. В случае отрицательного электронного сродства в эмиссии могут участвовать электроны с энергией, сниженной до равновесного состояния. Энергия возбужденных электронов быстро снижается в результате взаимодействий с фононами решетки. Это происходит за время около 10^{-12} с. Термализованные электроны могут диффундировать через твердое тело в виде неосновных носителей заряда, находящихся в зоне проводимости в течение значительно более длительного времени (около 10^{-9} - 10^{-7} с), прежде чем они попадут на незанятые состояния в валентной зоне (в результате рекомбинации с дырками). Если время жизни неосновных носителей достаточно велико, они почти наверняка достигнут края обедненной области и смогут выйти в вакуум. Количественное выражение этого условия состоит в том, что диффузионная длина неосновных носителей должна быть больше, чем глубина, на которой происходит первоначальное возбуждение электронов. Большое время жизни неосновных носителей требует совершенства кристалла, и поэтому для изготовления высокоэффективных эмиттеров с отрицательным электронным сродством обычно используются (за исключением вторичных эмиттеров GaP [108]) монокристаллы высшего качества. Достигнутое повышение эффективности обусловлено главным образом увеличением в несколько сотен раз глубины выхода электронов (то есть средней глубины, с которой электрон имеет вероятность 37% достичь поверхности с энер-

гией, достаточной для выхода): от 100 А или менее в устройствах с положительным средством до 5 мкм ($50\,000\text{ А}^0$) и более в устройствах с отрицательным средством (увеличение времени жизни приблизительно пропорционально квадрату этой величины).

Для формирования состояния ОЭС на поверхность гетероструктуры InP/InGaAs/InP осаждаются стандартными методами [101,105,107,109] несколько монослоев цезия и сильного окислителя – фтора или кислорода. Наиболее хорошо на данный момент изучена и описана в литературе система Cs+O₂/GaAs [107]. По физическим свойствам InP и GaAs схожи и относятся к полупроводникам группы A₃B₅, что делает обоснованным применение аналогичной схемы формирования ОЭС на их поверхности. Существует два метода подачи Cs+O₂ на поверхность структуры: непрерывная подача одновременно Cs и O₂, попеременное включение источников [109]. Оба этих метода приводят к формированию на поверхности InP/InGaAs ОЭС и схожих значений квантовой эффективности по результатам активировки. Первый метод позволяет обеспечить плавный рост фотоэмиссии от времени. При этом регулировка источников осуществляется вручную для достижения оптимальных концентраций молекул Cs и O₂. Метод попеременной подачи (в зарубежной литературе «yo-yo») заключается в поэтапном переключении источников до достижения максимума квантовой эффективности. Его главным преимуществом является возможность автоматизации процесса с помощью программируемых источников напряжения. На рисунке 2.15 представлен типичный график изменения фотоэмиссионного тока от времени.

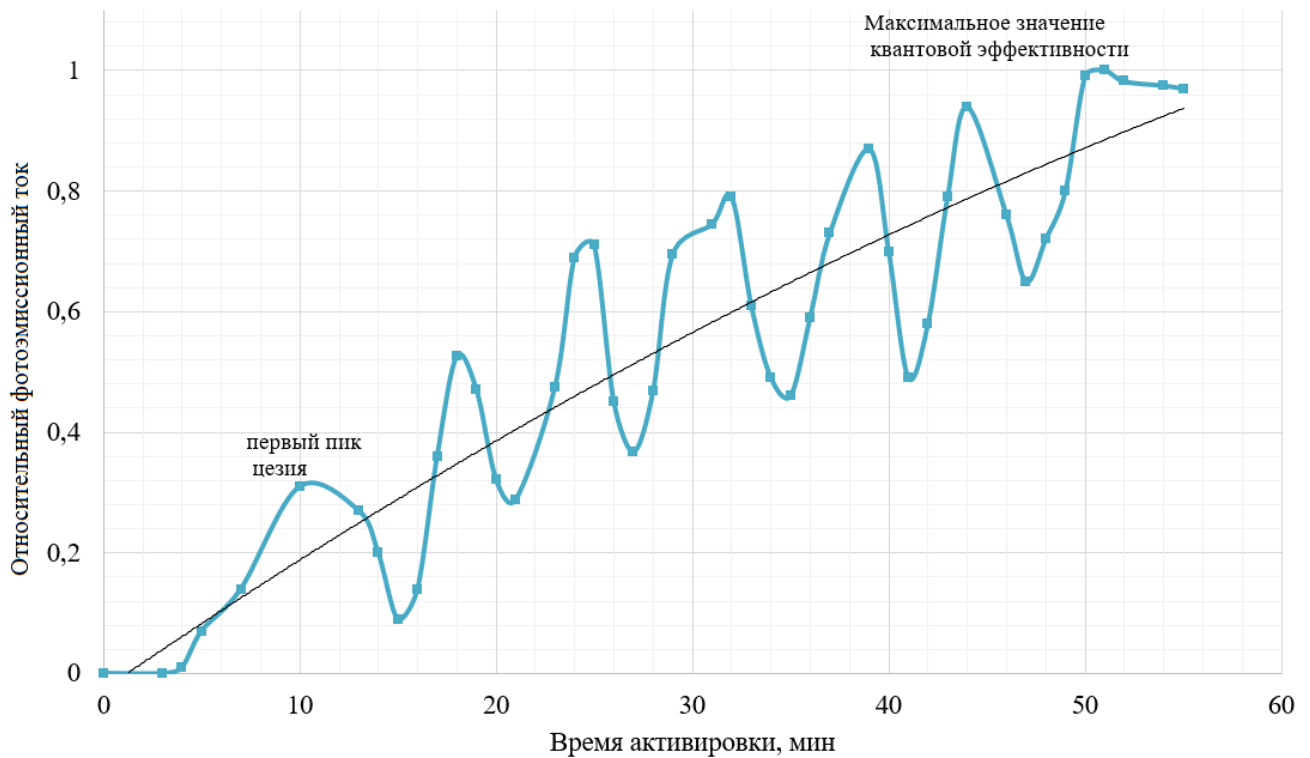


Рисунок 2.15 – Зависимость фотоэмиссии рассмотренного образца от времени

Процесс заключается в следующем: образец располагается в камере обработки фотокатодного узла и непрерывно освещается с помощью сфокусированного пучка излучения через смотровое окно, выполненное из оптического сапфира. Система освещения защищена от паразитного излучения с помощью специального кожуха. При этом образец может быть повернут к источнику света как со стороны подложки, так и со стороны эмиттера. К сетчатому электроду прикладывается постоянное напряжение в 1,5-2,0 В. Для контроля фотоэмиссионного тока используется амперметр, подключенный к расположенному в вакуумной камере аноду, который осуществляет регистрацию фотоэлектронов. Активировка фотокатода начинается с включения источника Cs, его прогрева и выхода на рабочий режим. При подаче молекул цезия и осаждения их на поверхности эмиттера наблюдается первичный рост фотоэмиссионного тока с образца до достижения первого пика цезия спустя в среднем 8-10 минут после начала активировки. Далее источник цезия закрывается и включается подача O_2 , наблюдается значительное снижение то-

ка фотоэмиссии. По достижении минимального значения тока с образца, кислород выключается и вновь открывается вентиль подачи цезия. Этот процесс происходит несколько раз до достижения максимального значения фотоэмиссионного тока с образца. Далее идет прекращение подачи цезия и кислорода. Наблюдается понижение значений фотоэмиссии относительно пикового значения из-за отрыва с поверхности эмиттера структуры молекул Cs и O₂, не образовавших в приповерхностном слое молекулярных связей. Далее значение незначительно флуктуирует, что говорит о стабилизации поверхности структуры и готовности ее для исследования.

2.5.1 Спектральные характеристики InP

Для отработки метода очувствления поверхности, разработанный процесс химической обработки с последующей активировкой в вакууме был проведен мной на эпитаксиальных структурах InP с различной кристаллографической ориентацией. Были исследованы образцы: InP:Zn(111), $p=1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$; InP:Zn(111), $p=1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$; InP:Zn(100), $p=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$.

На основе значений фотоэмиссионного тока, полученного при освещении монохроматором образцов с лицевой стороны, была установлена квантовая эффективность InP – фотокатодов, с помощью следующего соотношения, определяющего квантовую эффективность образца, как отношение вышедших в вакуум фотоэлектронов к количеству фотонов, попадающих на поверхность фотокатода за время t (2.4):

$$\gamma = \frac{Ne}{Nph} = \frac{I \Delta T / q_e}{P \Delta T / \frac{hc}{\lambda}} = \frac{I}{P} \cdot \frac{hc}{q_e \lambda} \quad (2.4)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света, q_e – заряд электрона, I – фототок с анода, расположенного в вакуумной камере, P – мощность светового потока на длине волны λ .

На рисунке 2.16 представлена спектральная характеристика образца InP:Zn(111), $p=1 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$, прошедшего трехэтапную химическую очистку и процесс активировки. Кроме чистых образцов также была исследована фотоэмиссия структур InP с нанесенным поверхностным сетчатым электродом, который необходим для создания ФКПЭ. Для InP:Zn(100), $p=5 \cdot 10^{17} \text{см}^{-3}$ спектральные характеристики представлены на рисунке 2.17. Зависимость фотоэмиссионного тока от напряжения смещения для InP:Zn(111), $p=1 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ представлена на рисунке 2.18.

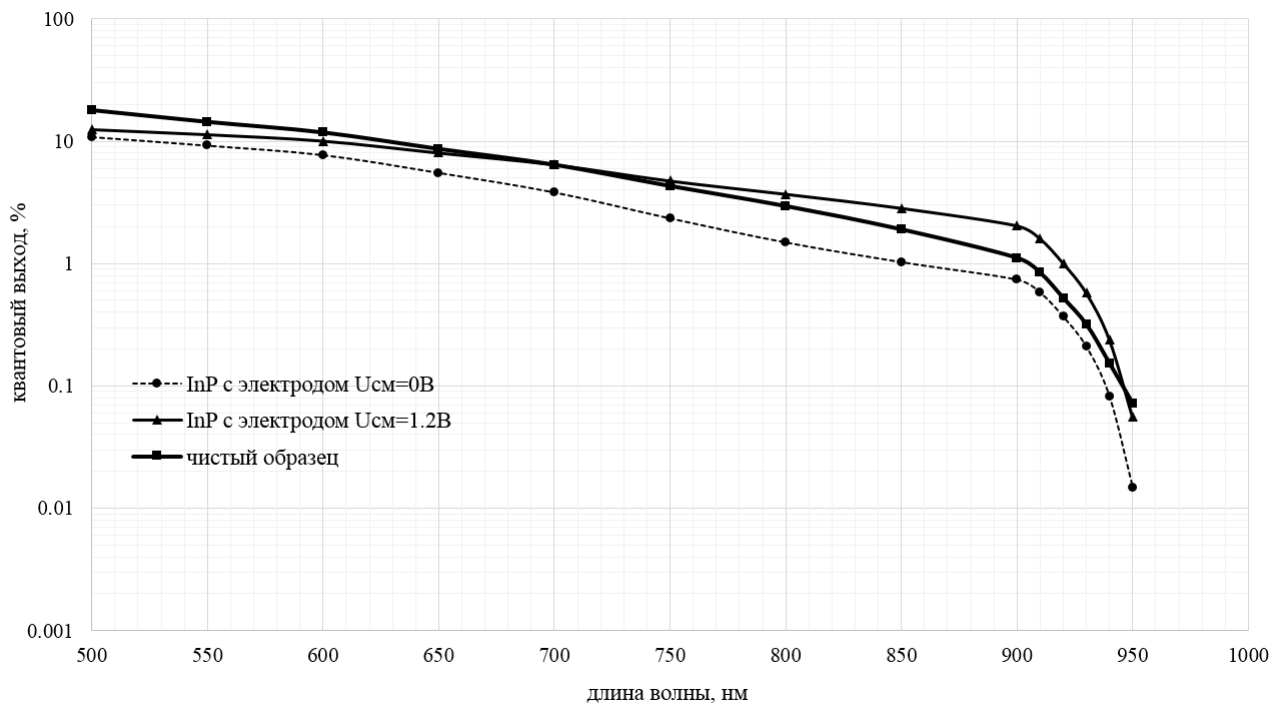


Рисунок 2.16 – Спектральные характеристики InP:Zn(111), $p=1 \cdot 10^{18} \text{см}^{-3}$ без нанесения электрода и с электродом при напряжении смещения 0 В, 1,2 В.

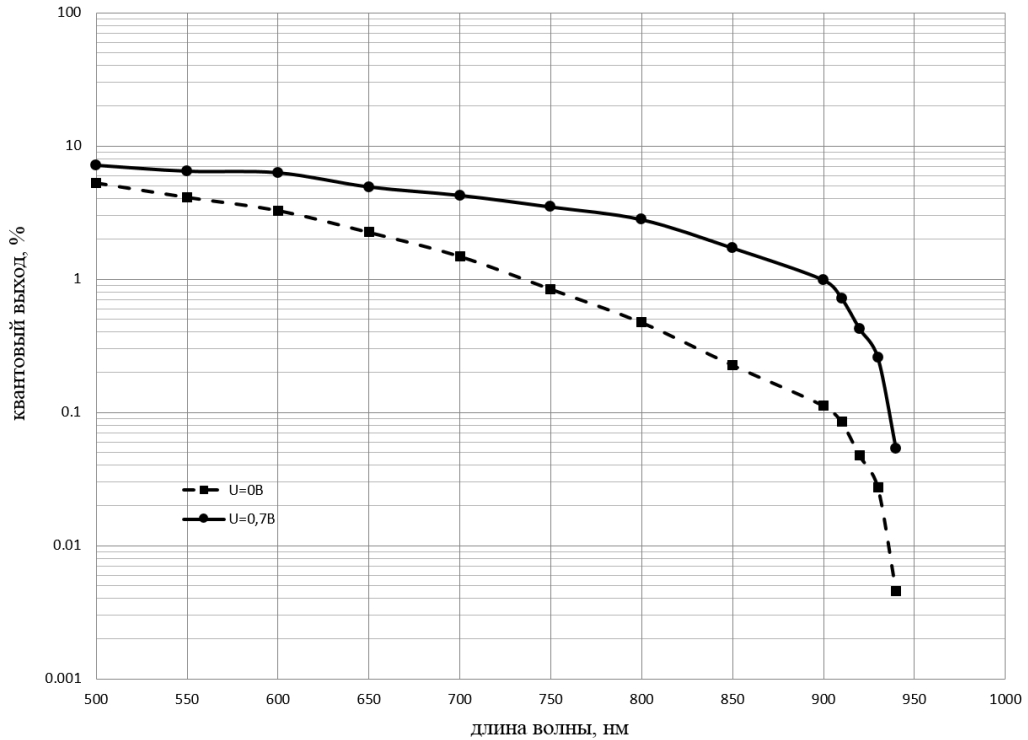


Рисунок 2.17 – Спектральные характеристики InP:Zn (100), $p=5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ при напряжении смещения 0 В, 0,7 В.

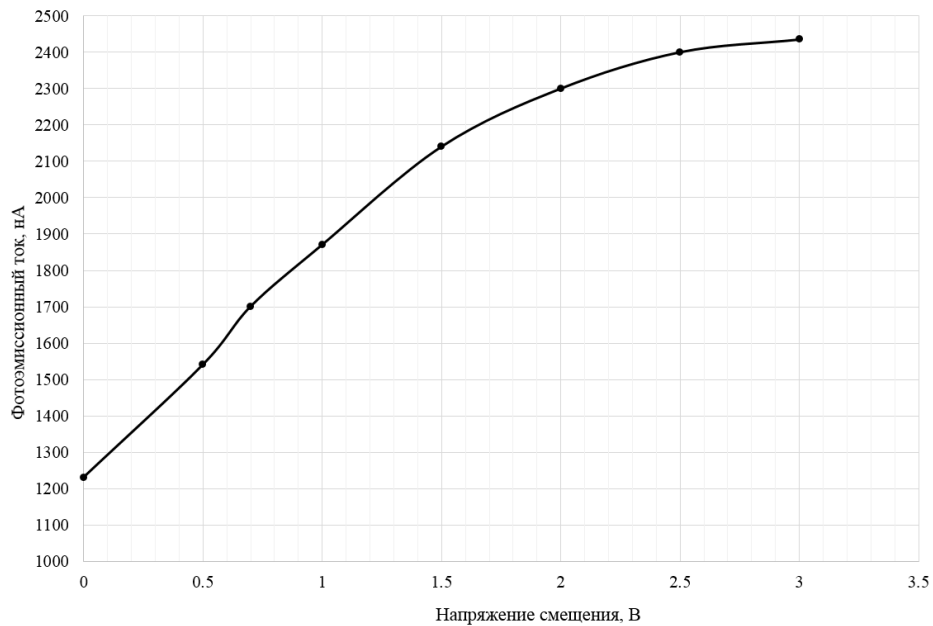


Рисунок 2.18 – Зависимости фотоэмиссионного тока от напряжения смещения, полученные на структуре InP:Zn(111), $p=1 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$

Меньший квантовый выход на образцах InP с сетками при нулевом напряжении смещения по сравнению с поверхностью InP без сетки связан с тем, что

металл электрода занимает определённую площадь активной области фотокатода. В результате на чистом фосфиде удалось получить квантовый выход более 10 % на длине волны 630 нм и более 1% на 900 нм. В работе [101] квантовый выход находится в пределах 9-12 %, а спектральные характеристики не представлены. Фотолитографическая титановая сетка, нанесенная на InP, продемонстрировала не только общее усиление фотоэмиссии, но и обеспечила лучшие показатели чувствительности в ближней ИК области. Так на длине волны 650 нм. Увеличение квантового выхода составило 46 %, а на 900 нм. – 177 %. При подаче напряжения на сетку с помощью прижимного контакта, возникающий темновой ток оказался крайне мал (во всем измеренном диапазоне менее 0,05 нА), что позволяет подавать напряжение в 3 В и более, однако, при подаче напряжения более 2 В увеличение фотоэмиссионного тока незначительно, что делает подачу больших напряжений малоэффективным.

Предложенные методы обработки и активировки полупроводниковой структуры InP подтвердили свою обоснованность и могут быть применены в случае гетероструктуры InP/InGaAs/InP. Экспериментальные результаты пиковой квантовой эффективности на образцах p-InP превышают на 10 % полученные ранее результаты и соответствуют мировым результатам, полученным на данных структурах [110,111].

2.6 Исследование спектральных характеристик гетероструктур InP/InGaAs/InP

Для создания эффективного ФКПЭ исследовались различные типы эпитаксиальных структур InP/InGaAs/InP, выращенные методами металлоорганического осаждения из газовой фазы (МОСГЭ, МОСVD) [112-117]. Структуры, выращенные с помощью МОСГЭ, значительно превосходят по параметрам соединения, полученные с помощью стандартной жидкофазной эпитаксии. В качестве альтер-

нативы МОСГЭ, может применяться также молекулярно-пучковая эпитаксия (МПЭ, МВЕ). Однако, в силу необходимости эпитаксиального роста слоев с толщинами на уровне 0,1-1 мкм, и исторически сложившегося процесса роста гетероструктур на основе InGaAs и фотокатодов группы A_3B_5 (GaAs) с помощью осаждения из газовой фазы, было принято решение в пользу именно этого метода [117].

В работе исследованы четыре варианта гетероструктур InP/InGaAs/InP, построенные согласно принципам ФКПЭ. Структуры Т-1 и Т1-(а) идентичны за исключением сниженной на порядок концентрации подложки p-InP:Zn до $2,0 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$ у структуры Т-1(а). Структура Т-2, отличается от Т-1, оптимизированными параметрами эмиттера и общего снижения его толщины. Т-2(а) отличается от Т-2 наличием дополнительного переходного слоя между поглотителем и эмиттером p-(Al $_{0 \rightarrow 0,44}$ Ga $_{1 \rightarrow 0,56}$) $_{0,47}$ In $_{0,53}$ As:Zn в несколько сотен ангстрем, который позволил снизить потенциальный барьер на границе слоев, и тем самым оптимизировать дрейф носителей заряда в область эмиттера.

Для формирования ФКПЭ на полученные гетероструктуры методом фотолитографии наносился титановый электрод толщиной 0,15 мкм, представляющий собой последовательность секций, представленных на рисунке 2.19.

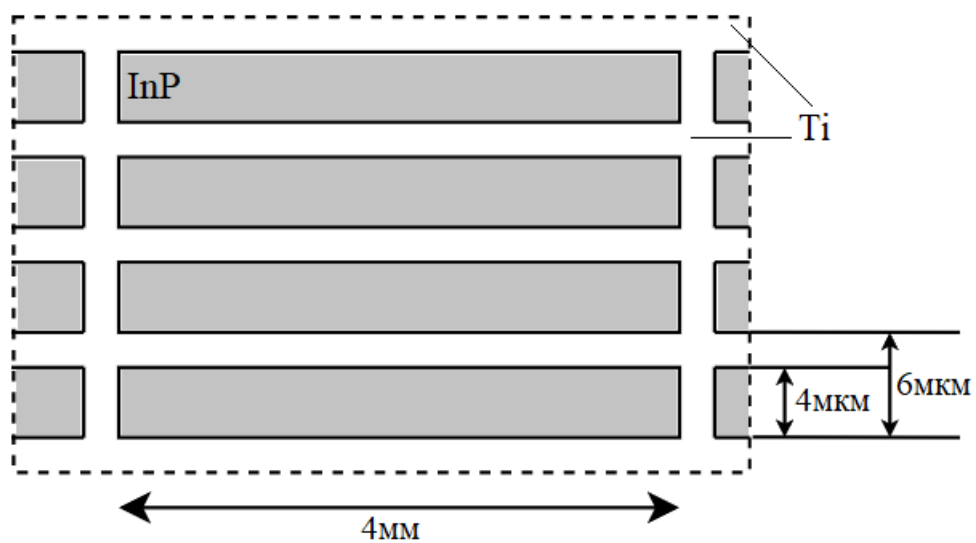


Рисунок 2.19 – Фрагмент секции электрода. Цветом обозначена поверхность структуры без нанесения титана

В результате проведения цикла формирования Шоттки барьера, химической очистки и активации в вакуумной камере были получены фотокатодные структуры, на которых были проведены измерения спектральной квантовой эффективности в разных режимах облучения (рисунок 2.20; 2.21), получены зависимости фотоэмиссионного и темнового тока от напряжения смещения (рисунок 2.22).

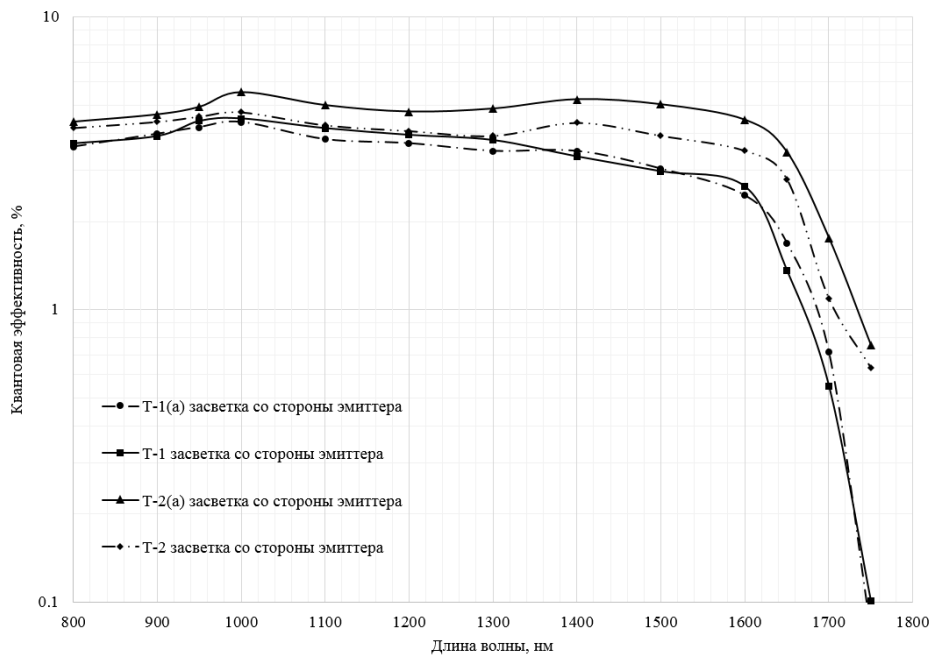


Рисунок 2.20 – Квантовая эффективность структур InP/InGaAs/InP в режиме засветки со стороны эмиттера (режим работы на отражение)

Так как фотокатод освещается со стороны эмиттера (рисунок 2.20), параметры InP подложки не влияют на чувствительность структур. В связи с этим структуры T-1 и T-1(a) демонстрируют схожие результаты. Их квантовая эффективность в диапазоне 1000-1500 нм. превышает 3%. Структура T-2 демонстрирует квантовую эффективность около 4% в исследуемом диапазоне Лучший результат достигнут на структуре T-2(a). Так максимальная квантовая эффективность достигается на длине волны 1400 нм. и составляет 5,23 %. Все структуры демонстрируют резкое падение квантовой эффективности после 1600 нм.

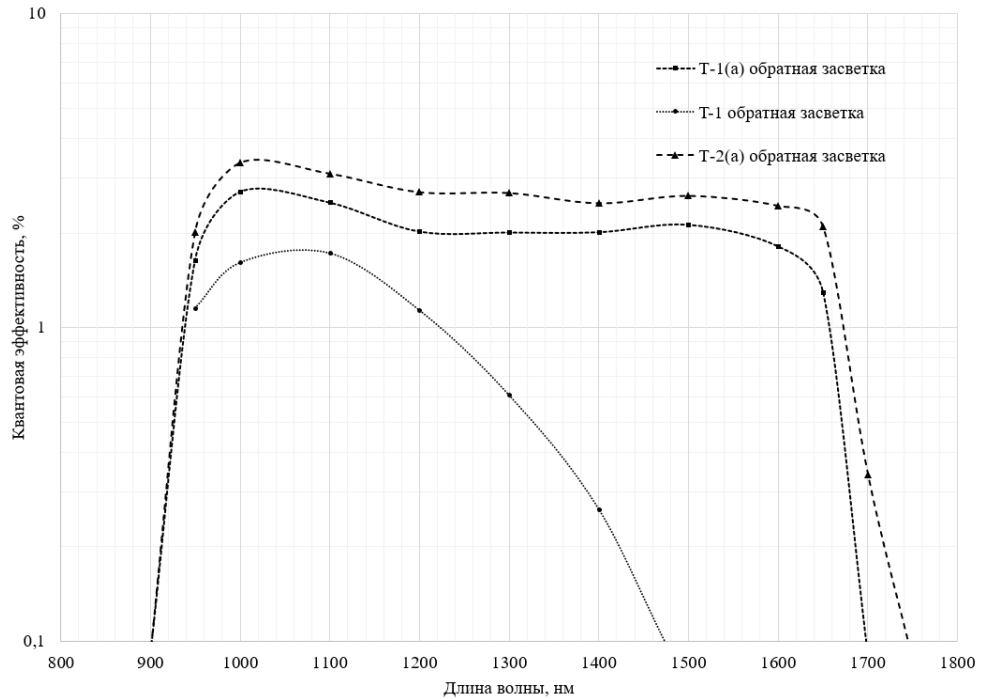


Рисунок 2.21 – Квантовая эффективность структур InP/InGaAs/InP в режиме засветки со стороны подложки (режим работы на пропускание)

При засветке образцов со стороны подложки (режим работы на пропускание, используемый в ГФП), большое влияние на результаты спектральной чувствительности оказывает подложка гетероструктуры. Структура T-1, выращенная на подложке p-InP:Zn (100) с заданной концентрацией и толщиной, показывает значительное падение квантовой эффективности после 1100 нм, а на 1500 нм она не превышает 0,1 %. Структуры T-1 и T-2(a) также демонстрируют снижение чувствительности. На структуре T-2(a) достигнута максимальная квантовая эффективность на длине волны 950 нм – 3,51 %, на 1500 нм – 2,63%. Это связано с большим количеством фотонов, не достигших поглотителя InGaAs фотокатодной гетероструктуры в результате взаимодействия с подложкой. Это еще раз подтверждает необходимость нанесения на фотокатоды антиотражающего покрытия.

Определяющим в значении квантовой эффективности является напряжение смещения $U_{см}$, поданное на электрод ФКПЭ. Оно напрямую влияет на величину потенциального барьера фотокатода и вследствие этого количество фотоэлектронов, вышедших в вакуум с его поверхности. При повышении потенциала смеще-

ния растет не только эффективный фотоэмиссионный ток, но и темновой ток, определяющийся суммой нескольких компонент, самые значимые из которых это ток ударной ионизации дырок и тепловая генерация электронов в $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. Наибольший вклад при увеличении напряжения смещения вносит первая компонента. Наибольшее отношение фототока к темновому току достигается при напряжении смещения 2-3 В. и подбирается индивидуально для каждой структуры [118-121].

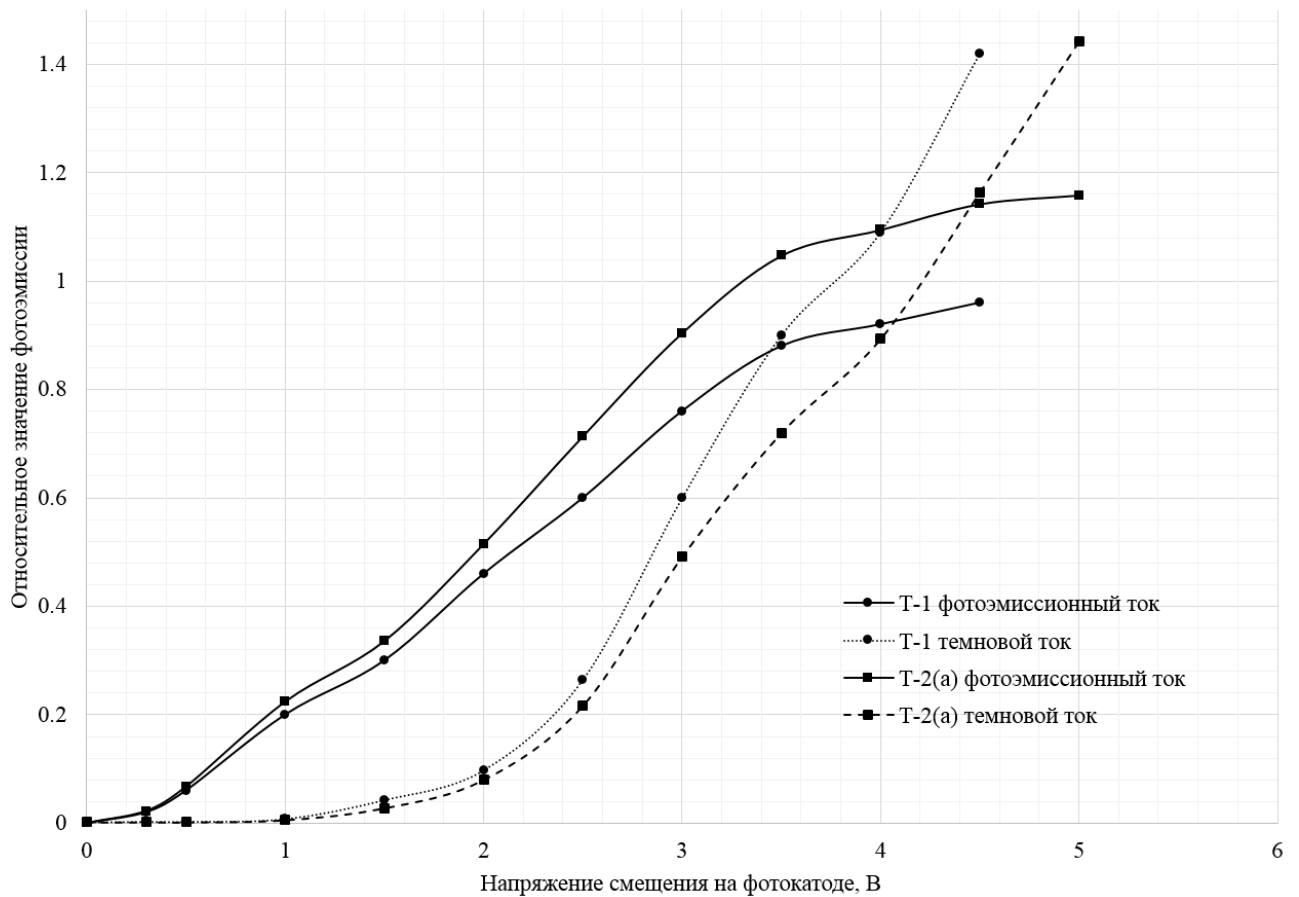


Рисунок 2.22 – Зависимости фотоэмиссионного и темнового тока от напряжения смещения на фотокатоде

Результаты квантовой эффективности, полученные в настоящей диссертационной работе на образцах при комнатной температуре в условиях непрерывной облученности, превосходят ряд результатов, опубликованных в работах [12,66,73,76,77], что позволяет сделать вывод о работоспособности разработанных гетероструктур и возможности их использования в ГФП. При этом характер полу-

ченных кривых соответствует теоретическим зависимостям, полученным в результате исследований полупроводниковых структур $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$. Необходимо отметить, что дополнительное увеличение чувствительности может быть достигнуто путем охлаждения исследуемых образцов.

2.7 Исследование влияния температуры среды на характеристики InP/InGaAs/InP фотокатода

Эксплуатационная температура фотодетектора является критически важным параметром, поскольку необходимость введения дополнительных модулей, обеспечивающих охлаждение и стабилизацию фотоприемного устройства, влечет за собой ряд значительных ограничений по имплементации детектора в фотоприемную систему. Использование полупроводниковых структур на основе InGaAs в качестве фоточувствительного элемента позволяет рассчитывать на возможность эксплуатации прибора в условиях комнатных температур. Это является значительным преимуществом перед приборами, требующими криогенного охлаждения для работы в коротковолновом ИК диапазоне, например, на основе фоточувствительного слоя HgCdTe [4]. Для оценки изменения параметров приборов с InP/InGaAs/InP фотокатодов в зависимости от температуры были проведены различные исследования.

Для их реализации была создана герметичная для паров воды теплоизоляционная оболочка, в которую были помещены макеты фотокатодного узла InP/InGaAs запрессованные в вакуумный корпус. Температурное взаимодействие на прибор происходило с помощью медного стержня, закрепленного на алюминиевом держателе в оболочке испытательной оснастки. Температура контролировалась с помощью термопары. Излучение попадало на фотокатод прибора через вакуумированное, двухслойное стеклянное окно. Внешний вид испытательной оболочки изображен на рисунке 2.23.

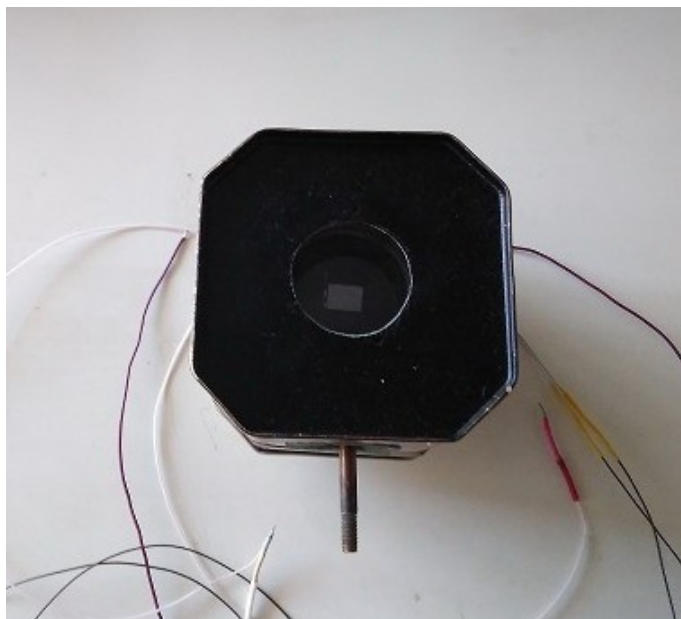


Рисунок 2.23 – Внешний вид теплоизоляционной оболочки

Для проведения исследований в вакуумный корпус был запрессован фотокатод на основе структуры InP/InGaAs/InP T-2(a). Измерения происходили с помощью стенда, структурная схема которого представлена на рисунке 2.24.

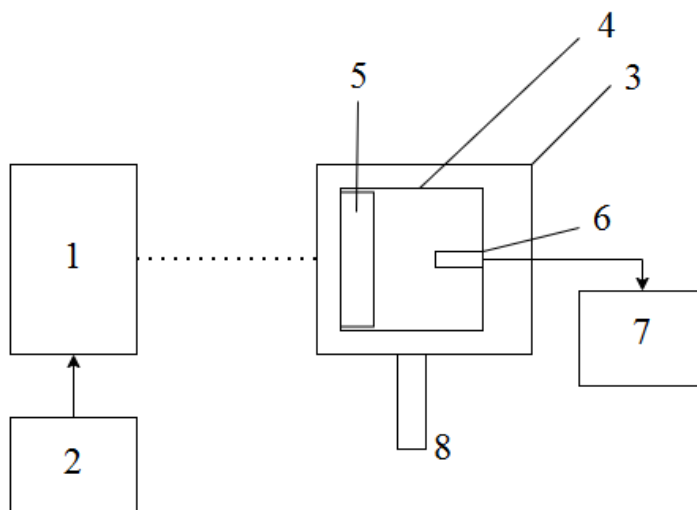


Рисунок 2.24 – Блок схема стенда температурных испытаний, где 1 – устройство равномерной засветки, 2 – блок питания, 3 – термоизоляционная оболочка, 4 – вакуумный корпус макета, 5 – фотокатод, 6 – анод, 7 – цифровой мультиметр, 8 – медный стержень

Облучение осуществлялось непрерывным или импульсным освещением на длинах волн $\lambda=1500$ нм или 1610 нм. Непрерывное освещение создавалось монохроматором. В импульсных измерениях использовался светодиод с $\lambda=1610$ нм питаемый от генератора Г5-75. Уменьшение времён нарастания и спада наблюдаемого на осциллографе П-образного импульса фототока ограничивалось входным сопротивлением 100 КОм. Уменьшение входного сопротивления и соответственно уменьшение длительностей фронтов импульса и самого импульса, было ограничено необходимостью получения сигнала достаточной амплитуды для его измерения на фоне шумов на экране осциллографа. Вследствие этого удалось достичь длительностей импульса освещения для прибора 60мкс, с периодом их следования 10 мс. Температурные зависимости $I_{\Phi}(T)$, $I_T(T)$ и их отношения $I_{\Phi}/I_T(T)$, снятые при разных напряжениях смещения на сетчатом электроде фотокатода ($U_{см}$), изображены на рисунках 2.25 – 2.27. Зависимости, снятые при импульсном освещении, изображены пунктиром.

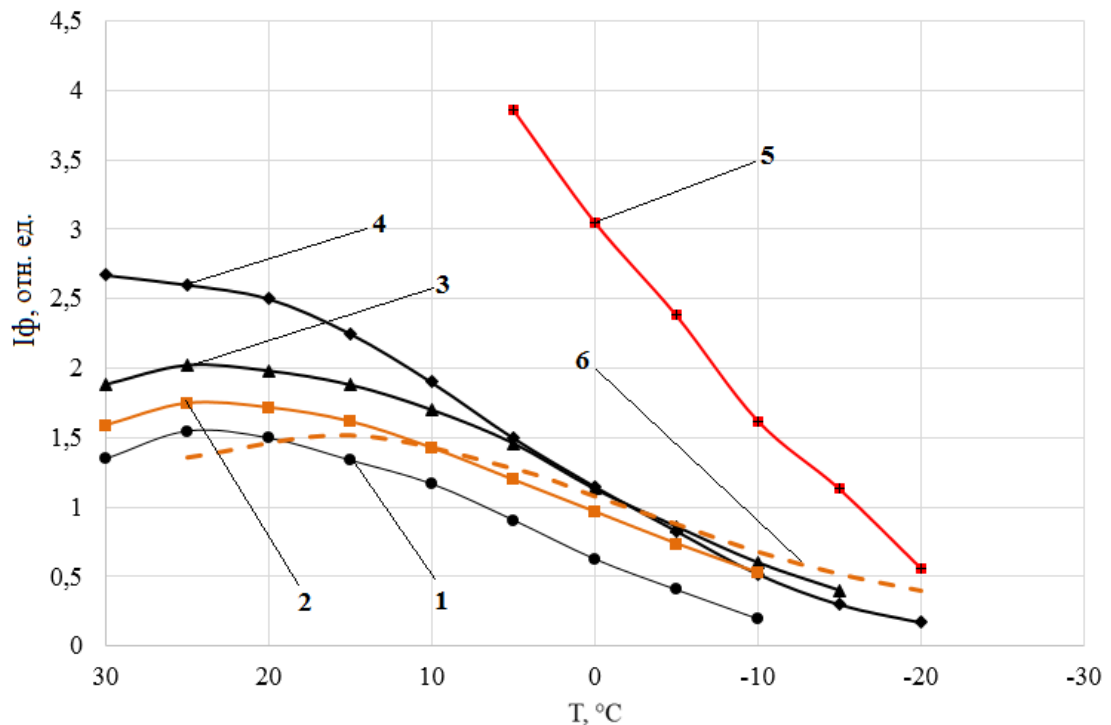


Рисунок 2.25 – Температурные зависимости фототока при различных напряжениях смещения, где 1 – $U_{см}=1.7$ В; 2 – $U_{см}=1.75$ В; 3 – $U_{см}=1.8$ В; 4 – $U_{см}=1.9$ В; 5 – $U_{см}=2.4$ В; 6 – $U_{см}=1.75$ В. (импульсный режим, в отн. ед.)

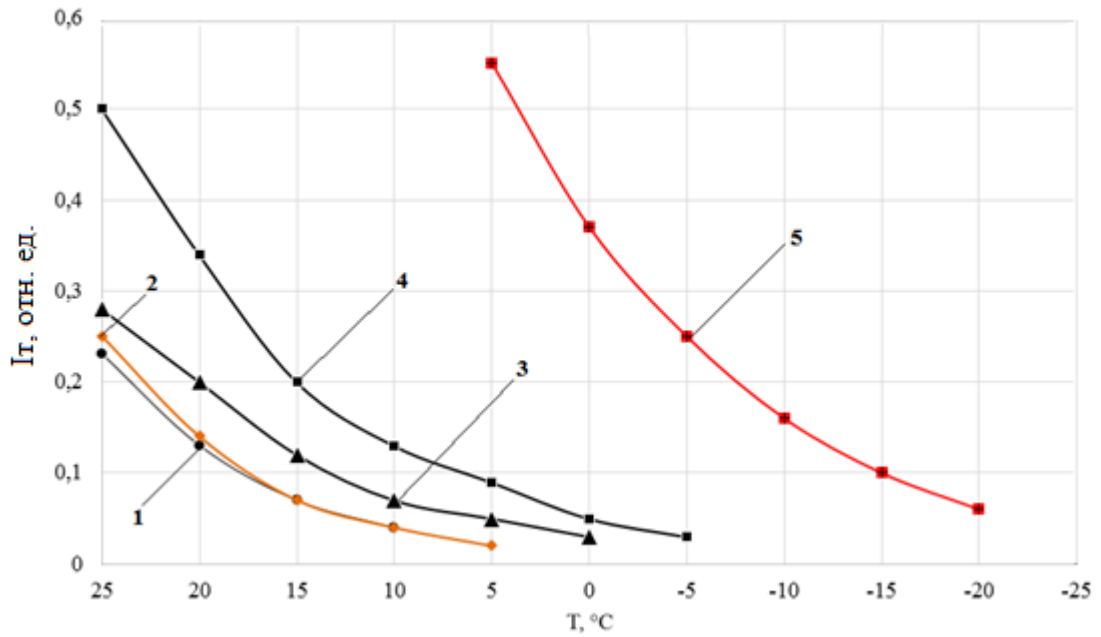


Рисунок 2.26 – Температурные зависимости темнового тока при различных напряжениях смещения, где 1 – $U_{см}=1.7$ В; 2 – $U_{см}=1.75$ В; 3 – $U_{см}=1.8$ В; 4 – $U_{см}=1.9$ В; 5 – $U_{см}=2.4$ В.

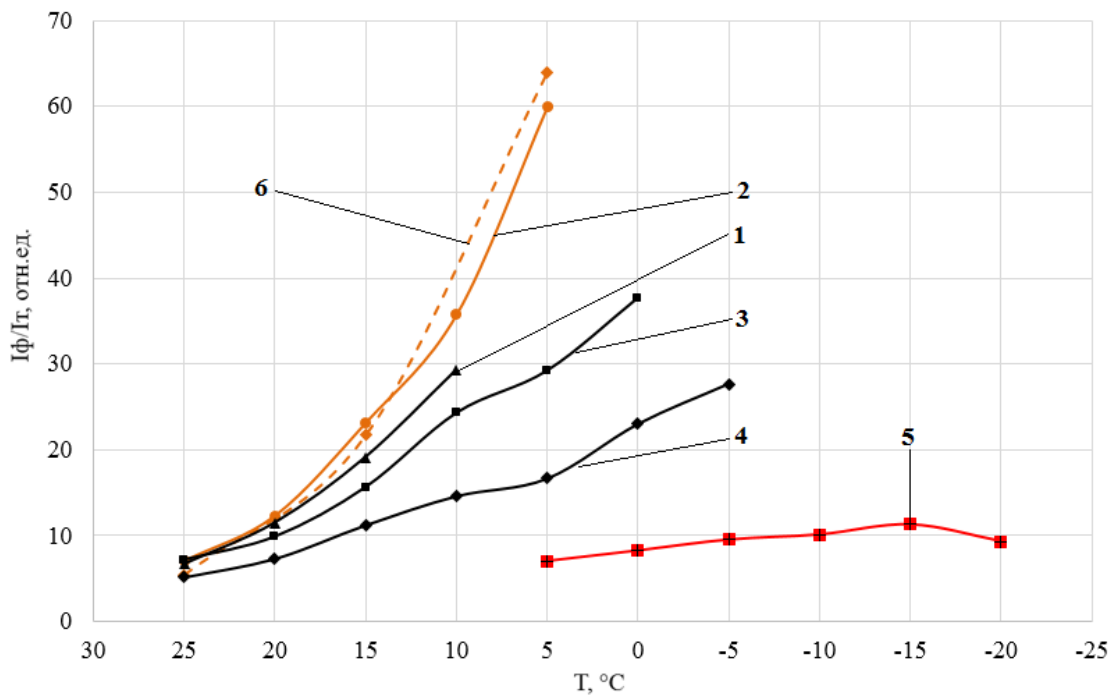


Рисунок 2.27 – Температурные зависимости $I_{Ф}/I_T$ при различных напряжениях смещения, где 1 – $U_{см}=1.7$ В; 2 – $U_{см}=1.75$ В; 3 – $U_{см}=1.8$ В; 4 – $U_{см}=1.9$ В; 5 – $U_{см}=2.4$ В; 6 – $U_{см}=1.75$ В. (импульсный режим)

Результаты экспериментальных исследований показали, что при снижении температуры наблюдается снижение как эффективного фотоэмиссионного, так и темнового тока. Отношение I_{Φ}/I_T растёт при охлаждении, так как падение I_T относительно I_{Φ} происходит быстрее. Область оптимальной температуры охлаждения, при которой достигается близкое к максимальному отношению I_{Φ}/I_T при сигнале I_{Φ} не менее 0,8 от максимума, находится в интервале $+10 \div -10$ °C. Зависимости для импульсного и непрерывного режимов освещения практически совпадают. Это, предположительно, указывает на то, что уменьшение фототока при охлаждении связано не с увеличением сопротивления тонкой металлической пленки сеточного электрода, а с увеличением сопротивления в слоях полупроводниковой гетеро-структуры из-за "эффекта вымораживания" равновесных носителей, приводящее к перераспределению падений долей $U_{см}$ в слоях и контактах. Анализ данных, представленных на рис 2.25 и 2.26 показывает, что охлаждение прибора от $+25$ °C до $+10 \div -10$ °C увеличивает отношение I_{Φ}/I_T в $5 \div 10$ раз. Предположительно тоже самое должно произойти и с предельной облученностью. Полученные данные позволяют более успешно использовать разработанную структуру, входящую в состав фотоприемной системы, в различных климатических условиях эксплуатации, по сравнению с ранее применяемыми [122].

ГЛАВА 3. ЛИНЕЙНЫЙ МАССИВ ЭЛЕКТРОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ PIN-ДИОДОВ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ФОТОЭЛЕКТРОНОВ

Для задач, связанных с получением пространственного распределения электромагнитного излучения различного спектра в реальном времени и отображения его в виде телевизионной картины, может быть использовано фотоприемное устройство на основе сочленения ЭОП и ПЗС. Такая конструкция предполагает наличие в структуре фотоприемного модуля таких элементов как микроканальная пластина (МКП, MCP – microchannel plate), люминофорный экран и волоконно-оптический соединитель. Эта схема несет в себе ряд недостатков таких как потеря пропускания волоконной оптики, неэффективный сбор волоконной оптикой выходного сигнала люминофора, несоответствие между спектральным излучением люминофора и спектральной чувствительностью ПЗС-матрицы, а также большой форм-фактор.

Все эти недостатки могут быть преодолены с помощью интеграции непосредственно в вакуумный объем фотоприемника прибора чувствительного к фотоэлектронам. В классическом понимании ГФП в качестве устройства детектирования и преобразования фотоэлектронов используется электронно-чувствительная ПЗС матрица (ЭЧПЗС). Засветка такого устройства, как правило, происходит со стороны кремниевой подложки (back-side), а внутреннее усиление в приборе достигается за счёт процесса генерации электронно-дырочных пар (EBS – electron bombarded semiconductor gain) [123,124]. Необходимо отметить, что разработка ЭЧПЗС является сложной технологической задачей, включающей в себя проработку топологии кристалла и реализацию дорогостоящего технологического цикла с использованием новых фотошаблонов. В качестве альтернативного подхода может быть рассмотрена возможность получения чувствительности к электронам на уже готовых серийных фоточувствительных ПЗС с фронтальной засветкой. Однако, для этого необходимо провести ряд технологических операций, связан-

ных со стравливанием области подложки фоточувствительной ПЗС, легированием поверхности кремния с последующим отжигом, получением соответствующего профиля распределения по глубине основных носителей заряда в области подложки, чтобы носители заряда разделить и доставить электроны в потенциальные ямы под затворами матрицы [125-128].

Помимо описанных выше технологических сложностей ЭЧПЗС имеют и ряд принципиальных недостатков, что делает более целесообразным применение в ГФП других классов полупроводниковых электронно-чувствительных устройств в зависимости от конкретных задач. Так, принцип переноса заряда, реализованный в ПЗС, имеет ряд недостатков по сравнению с комплементарными структурами металл-оксид-полупроводник (КМОП). Устройства, на основе КМОП-технологии, являются практически «идеальными фотоприемниками» и предлагают высокое быстродействие, пространственное разрешение, крайне низкий уровень шумов и малое энергопотребление [129]. Принципиально, задачи устройств на ПЗС и КМОП технологиях идентичны, однако, на данном этапе научно-технического развития разработка топологии и производство электронно-чувствительного КМОП с обратной засветкой на территории РФ невозможны.

Для задач детектирования быстродвижущихся объектов характеристик временного разрешения ПЗС устройств не всегда достаточно [130,131], так быстродействие таких приборов упирается в работу секционных электродов, выходного устройства и аналого-цифрового преобразователя. Таким образом, для решения задачи повышения быстродействия гибридных фотоэлектронных приборов с фотокатодом для возможности их встройки в активно-импульсные системы, в качестве преобразователя фотоэлектронов может быть использовано устройство на основе массивов диодов. Диодные массивы используются в качестве фотоприемников в большом разнообразии оптических систем и устройств [22,23], однако, учитывая специфику использования в ГФП, следует решить следующие задачи: обеспечить на диодных массивах чувствительность к фотоэлектронам и времен-

ной отклик менее 10 нс, предполагающий использование в конструкции диода p-i-n топологию.

В связи с этим часть моей работы, которая представлена в данной главе, была направлена на разработку технологии производства линейных массивов электронно-чувствительных диодов и методик измерения их параметров.

3.1 Механизм рекомбинации высокоэнергетичных фотоэлектронов твердотельными детекторами на основе кремния

Фотоэлектроны, испускаемые из фотокатода, фокусируются в непосредственной близости от электронно-чувствительного кремниевого элемента, где далее энергия падающего фотоэлектрона рассеивается в форме электронно-дырочных пар. Результирующее количество фотоэлектронов, поступающих в область диода или, например, скрытый канал ПЗС, значительно превышает число попавших на электронно-чувствительную часть подложки. Это происходит из-за механизма электронного усиления (EBS). Процесс EBS гораздо менее «шумящий», чем усиление электронов, полученное с помощью МКП. Так как фотоэлектроны достигшие поверхности кремния регистрируются непосредственно электронно-чувствительным прибором. При этом удастся избежать неэффективного и ухудшающего изображение процесса преобразования фотонного излучения в фотоэлектроны в области фотокатода, затем обратно в электромагнитное излучение на люминофорном экране, и, наконец, обратно в электронный зарядовый пакет (электрический сигнал) в классической ПЗС-матрице. Из-за уменьшения количества шагов преобразования изображения и значительно более высокого отношения сигнал-шум, в ГФП возможно получить гораздо более высокую контрастность и разрешение, сравнительно со стандартными ЭОП, сочлененными с ФПЗС матрицами. К преимуществам описанного выше подхода можно отнести следующие факторы:

1. Повышенная чувствительность, позволяющая добиться большего разрешения в условиях низкой освещенности;
2. Высокий контраст и спектральное разрешение, которые позволяют лучше идентифицировать цель;
3. Увеличенный динамический диапазон, обеспечивающий лучшую контрастность изображения;
4. Уменьшенный размер и вес, что особенно критично для приборов, размещенных на подвижных объектах или переносных;
5. Увеличенная механическая целостность и надежность позволяют продлить срок службы;
6. Более низкая стоимость в силу уменьшения количества дорогостоящих наукоемких элементов, входящих в состав прибора.

В конструкции этих приборов усиление электронной бомбардировки определяется с помощью коэффициента G и рассчитывается по следующей формуле (3.1):

$$G = \frac{(1-b)(Va - Vl)}{k} \quad (3.1)$$

где: Va – ускоряющее напряжение, приложенное между фотокатодом и ПЗС; Vl – напряжение, эквивалентное потерям из-за рекомбинации электронно-дырочной пары в мертвом слое подложки ПЗС; b – коэффициент энергии обратно рассеянных электронов; k – средняя энергия, необходимая для создания электронно-дырочной пары в материале. Для кремния коэффициент k составляет около 3,6 эВ. Дисперсия шума σ^2 определяется выражением (3.2), где F – фактор Фано, который для кремния составляет 0,115 [132].

$$\sigma^2 = G \times F \quad (3.2)$$

Коэффициент шума процесса электронного усиления NFC определяется следующим отношением (3.3), и с учетом обратного рассеяния падающих фотоэлектронов может не превышать 1,09. В то время как для типичных ЭОПов третьего поколения, фактор-шум может составлять 2 и более [133].

$$NFC = \sqrt{\frac{1 + \frac{F}{G}}{1 - b}} \quad (3.3)$$

На практике при ускоряющем напряжении 6 кВ, усиление G превышает тысячу. Для ускоряющих энергий менее чем 1 кэВ усиление электронной бомбардировки теряет линейный характер. При этом ненулевые значения усиления можно измерить практически на всех ускоряющих потенциалах [134]. Экспериментальные результаты работ [134,135] соответствуют коэффициенту усиления G величиной 180 при энергии электронов 2 кВ и 2100 при энергии 9 кВ. В работе [136] усиление составило 50 при бомбардировке электронами с энергией всего 600 эВ.

Анализ представленных научных результатов подтверждает обоснованность и перспективность использования в вакуумном объеме ГФП кремниевых детекторов фотоэлектронов, обеспечивающих электронное усиление. Ниже представлены особенности построения и конструкция кремниевого преобразователя фотоэлектронов на основе массива диодов.

3.1.1 Особенности регистрации электронов твердотельными детекторами на основе диодной топологии

Основной особенностью регистрации электронов твердотельными детекторами является возможность многократного упругого и не упругого рассеяний регистрируемых электронов в кристаллической решетке. Такой характер взаимодействия регистрируемых электронов с твердым телом принципиально отличает-

ся от случая регистрации фотонов, т.к. для электронов возможно рассеяние с изменением импульса, что приведёт к смене траектории движения частицы и может привести к выходу части электронов обратно из твердого тела после нескольких актов рассеяния в приповерхностной области.

Из результатов моделирования проникновения электронов в кремний, покрытый фоторезистом [137] видно, что траектории падающих электронов сложны за счёт участия двух упомянутых ранее механизмов рассеяния (рисунок 3.1). Анализ результатов, представленных на рисунке 3.1 позволяет установить приповерхностный характер поглощения падающих электронов. Электроны с энергией 10 кэВ поглощаются в слое толщиной порядка 1 мкм, из чего следует, что необходимо обеспечить эффективный сбор неосновных носителей заряда из приповерхностной области толщиной значительно меньшей, чем 1 мкм.

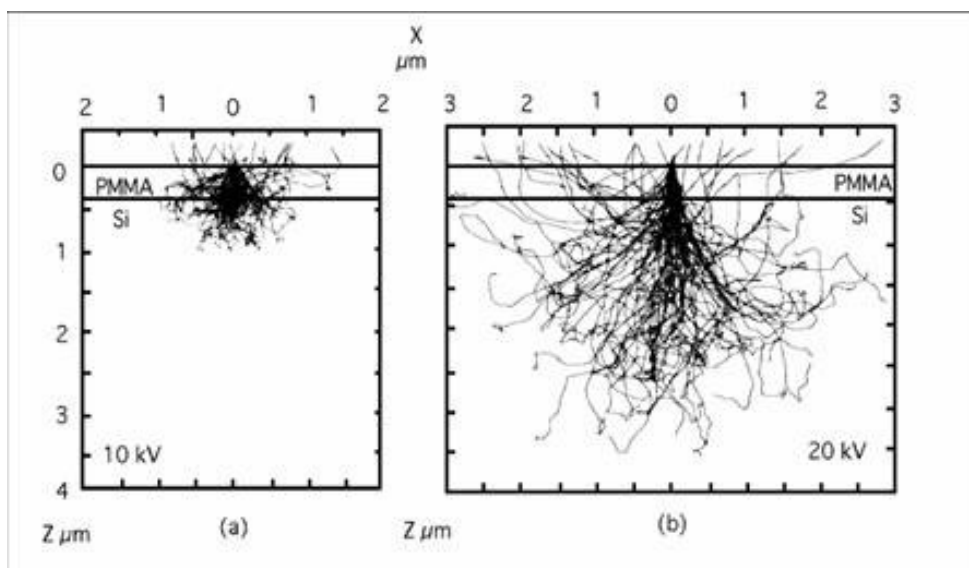


Рисунок 3.1 – Моделирование траекторий движения электронов, падающих на кремний, покрытый фоторезистом толщиной меньше 0.5 мкм.

Ранее было установлено [138,139], что кремниевые фотодиоды УФ излучения эффективно регистрируют электроны с энергиями от 100-600 эВ (рисунок 3.2 и 3.3) за счёт тонкого входного окна и мелкого залегания p-n перехода.

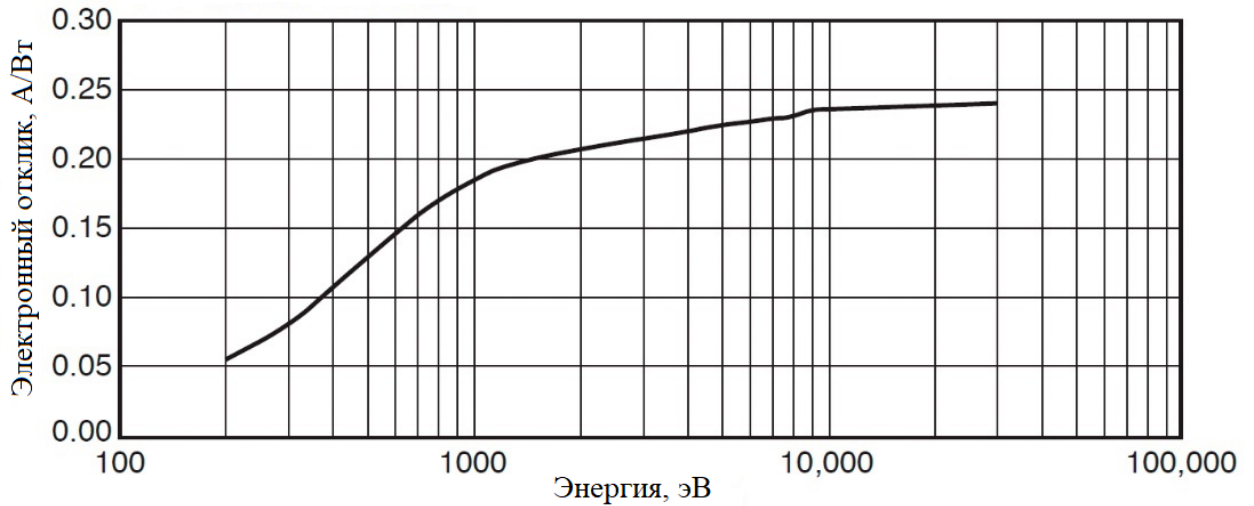


Рисунок 3.2 – Чувствительность к электронам фотодиодов AXUV

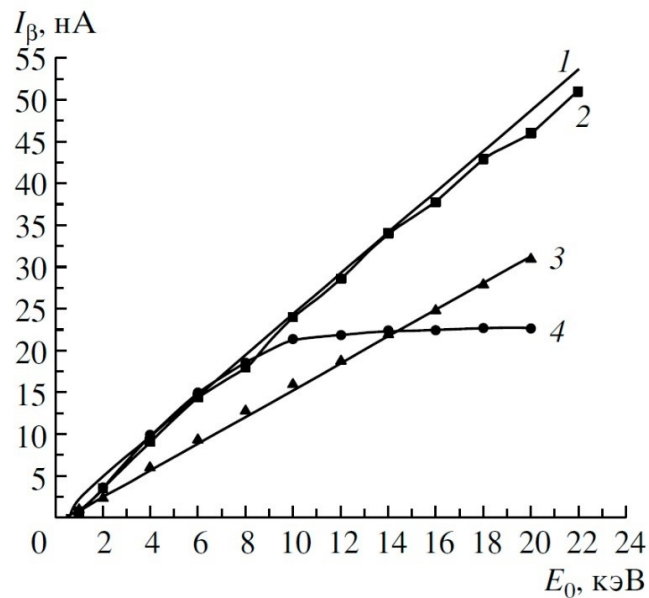


Рисунок 3.3 – Характеристики сигнального отклика SPD фотодиода при облучении монокинетическим пучком электронов

При регистрации электронов с энергией свыше 100-600 эВ существует физическая возможность получения внутреннего усиления в структуре фотодиода за счет многократного рассеяния электрона в кристаллической решетке активной области фотодиода. Это происходит за счет того, что начальная энергия электрона, падающего на поверхность активной области диода, значительно превышает

энергию необходимую для образования электронно-дырочной пары (для кремния 3,65 эВ). Для обеспечения многократного рассеяния электрона в активной области фотодиода необходимо создать такую конструкцию активной области, при которой минимизируются потери энергии электрона в “мертвом” слое (входном окне) фотодиода, что увеличит количество неравновесных носителей заряда в активной области фотодиода, необходимых для эффективной регистрации. В первую очередь необходимо минимизировать толщину пассивирующего слоя диэлектрического покрытия активной области фотодиода.

3.2 Планируемый подход к изготовлению кремниевого детектора электронов

Для решения задачи регистрации потока фотоэлектронов, в качестве регистрирующего и усилительного элемента выбрана структура кремниевого pin-диода. Такой диод представляет собой вертикальную структуру на основе чистого высокоомного кремния, полученного методом зонной плавки с концентрацией примеси на уровне 10^{12} ат/см³. С двух противоположных сторон структуры формируются области p⁺ и n⁺ с повышенной концентрацией (порядка 10^{20} ат/см³) примеси для формирования p-n перехода и изотипного перехода, которые обеспечивают функционирование структуры пин-диода в режиме обратного смещения. В режиме обратного смещения происходит полное обеднение высокоомной базы, что обеспечивает дрейфовый перенос носителей заряда и как следствие – времена регистрации сигнала на уровне десятков и единиц нс [10, 138-140].

Основными трудностями для обеспечения совокупности параметров линейки является сочетание требований: эффективная регистрация электронов с энергией в несколько кэВ, фронт нарастания не более 10 нс, минимизация площади нечувствительных областей между элементами линейки, достаточно низкий уровень темнового тока элемента в рабочем режиме.

Возможными путями решения поставленной задачи являются два варианта исполнения линейки: “front-illuminated” (регистрация со стороны p-n перехода) и “back-illuminated” (регистрация со стороны базы линейки). В обоих случаях необходимо обеспечить толщину “мертвого слоя” порядка 5-15 нм. С точки зрения минимизации площади нечувствительных областей между элементами линейки предпочтительным является следующий вариант [10,141]:

1. Базовый тип структуры – вертикальная “back-illuminated” для обеспечения стойкости к воздействию электронов и максимального коэффициента заполнения активной области;
2. Утонение активной области до 100-150 мкм, для получения рабочего напряжения смещения порядка 50-150 вольт, при котором быстродействие структуры составит ~ 10 нс;
3. Исходная подложка: монокристаллический кремний зонной плавки с кристаллографической ориентацией [100], толщина подложки 270-370 мкм, диаметр 76 мм, p-тип проводимости, удельная проводимость 1000-5000 Ом·см;
4. Пассивация периметра p-n перехода обеспечивается сухим термическим окислением (толщина окисла ~ 0.2-0.3 мкм) с дополнительным осаждением диоксида кремния толщиной 0.2-0.3 мкм;
5. Активная (облучаемая) область линейки формируется диффузией бора на глубину ~ 50 нм;
6. Формирование n⁺-p перехода – в окна маски диоксида кремния: осаждение поликристаллического кремния n-типа на подложку p-типа проводимости;
7. Формирование токосъёмного электрода – напыление алюминия толщиной 0,5-1 мкм.

3.3 Конструкция и основные этапы изготовления линейки электронно-чувствительных кремниевых диодов

3.3.1 Тип конструкции и его практическая реализация

В работе для регистрации электронов выбрана конструкция с вертикальной структурой n^+ - p перехода на основе кремния. Облучение – с обратной стороны, т.е. регистрируемые частицы поглощаются в области изотипного перехода высокоомной базы p -типа и движутся к n^+ - 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. На рисунке 3.4 приведена принципиальная конструкция одного элемента линейки электронно-чувствительных кремниевых диодов.

Время нарастания/спада электронно-чувствительных кремниевых диодов ~ 10 нс обеспечивается за счет дрейфового переноса неравновесных носителей заряда в утонённой высокоомной базе. Эффективная регистрация электронов с энергией ~ 2000 эВ обеспечивается за счет использования изотипного p^+ - p перехода, сформированного диффузией бора на глубину 40 - 50 нм, с поверхностной концентрацией бора $\sim 10^{20}$ см $^{-3}$.

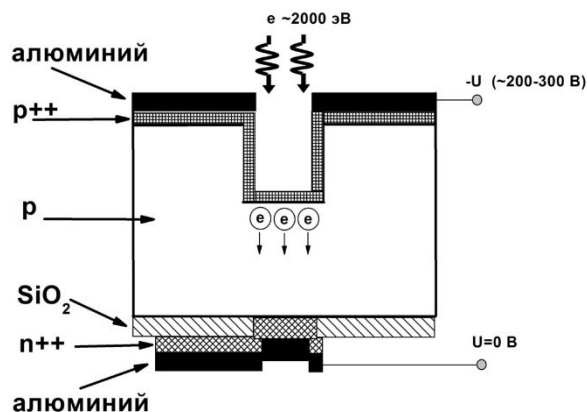


Рисунок 3.4 – Принципиальная конструкция активной области линейки

Для создания двенадцати-элементного линейного массива p⁺n-диодов должен быть проведен технологический цикл, состоящий из 6 фотолитографий. Более детальное рассмотрение технологического цикла представлено в разделе 3.3.2.

3.3.2 Технологический цикл

Технология создания линейки диодов предполагает проведение несколько фотолитографий [142], в соответствии с фотошаблонами, предполагающими: формирование меток совмещения, утонение базы, вскрытие окон в маске диоксида кремния для формирования n⁺-р перехода, травление поликристаллического кремния при формировании n⁺ областей, формирование металлических контактов со стороны n⁺-р перехода, формирование металлических контактов со стороны p⁺-р перехода. На рисунке 3.5 представлена кремниевая p⁺n-структура без утонения области базы и формирования стоп-каналов между диодами, а на рисунке 3.6 внешний вид линейки (для 3 диодов) [10].

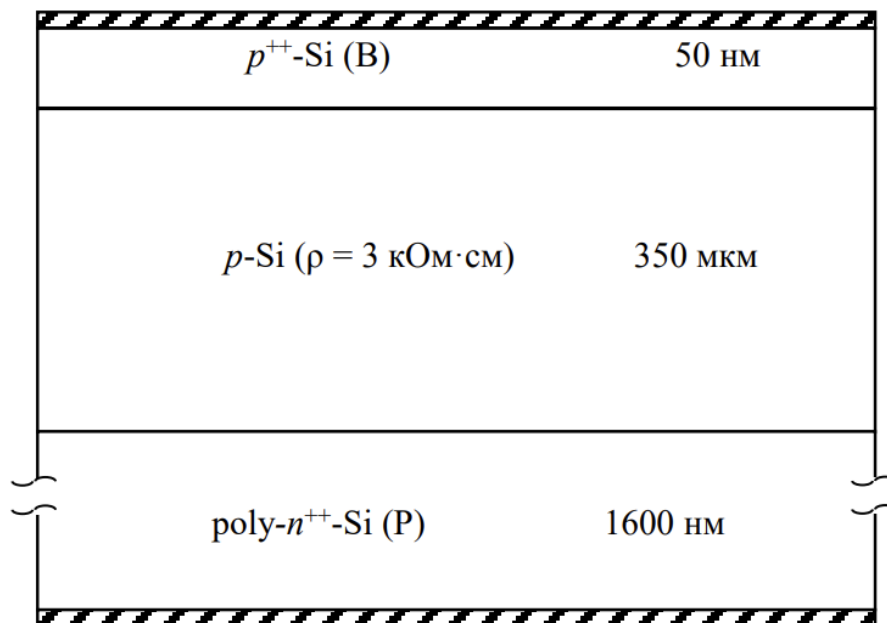


Рисунок 3.5 – Кремниевая p⁺n-структура

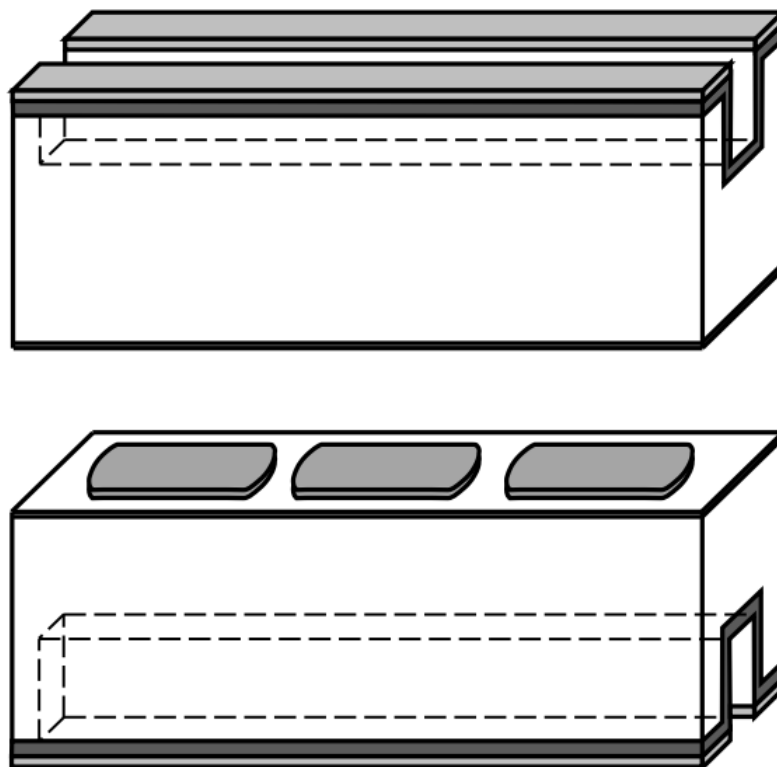


Рисунок 3.6 – Внешний вид конструкции линейки (3 диода)

В результате был изготовлен линейный массив pin-диодов из 12 элементов. С учетом размера фоточувствительной области диода, составляющей $2 \times 0,2$ мм, общей размер фоточувствительной области линейки составил $24 \times 0,2$ мм. Представленный выше технологический цикл реализован на базе Физико-технического института имени А.Ф. Иоффе (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН). В ходе выполнения работы основной задачей являлась разработка и реализация методик по оценке параметров изготовленных линейных массивов pin-диодов.

3.4 Экспериментальные результаты исследования линеек электронно-чувствительных диодов

В работе исследовались линейки диодов, разработанные в соответствии с описанным выше технологическим циклом. Они имеют практически одинаковую конфигурацию (вследствие использования одних и тех же фотошаблонов) и различаются по толщине активной области подложки – p-Si базы, со стороны которой происходит засветка.

3.4.1 Исследование быстродействия диодов

Исследования быстродействия диодов (фронта импульсной характеристики и длительности импульсной характеристики на уровне 0,5) проводилось на установке «Тайфун», структурная схема которой приведена на рисунке 3.7.

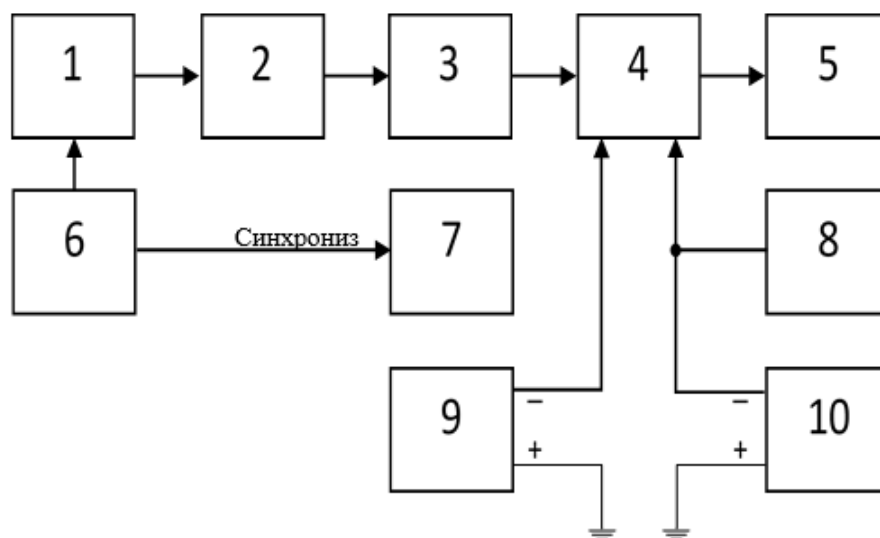


Рисунок 3.7 – Структурная схема экспериментальной установки: 1 – Генератор модулирующих импульсов №3, 2 – Оптическая головка (с лазерным светодиодом), 3 – Осветитель (обеспечивает фокусировку), 4 – Камера с эксперименталь-

ным образцом прибора, 5 – Осциллограф TDS 3052 C, 6 – Генератор импульсов Г5-56, 7 – Осциллограф С1-65А, 8 – Вольтметр цифровой постоянного тока Щ1413 с делителем вольтметра ДВ-01-76, 9 – источник постоянного тока типа Б5-10, 10 – источник постоянного тока типа Б5-24А

Для измерения времени фронта нарастания импульсной характеристики была использована следующая методика. Диод линейки облучается лазерным импульсом с $\lambda = 630$ нм, длительностью импульсов 50 пс, частотой следования импульсов 100 Гц. Диаметр освещаемой площади составлял около 0,2 – 0,3 мм и определялся визуально при работе лазера в режиме постоянного тока. Сигнал измерялся с дополнительной нагрузкой $R_{\text{осц}}=50$ Ом на сигнальном кабеле осциллографа.

В таблице 3.1 (приложение В) представлены результаты различных измерений длительности на полувысоте $\tau_{0,5}$ и фронта (времени нарастания на уровне 0,1-0,9) $\tau_{\text{нар}}$ импульсных характеристик диодов из партий линеек, давших удовлетворительные значения параметров.

На рисунках 3.8-3.9 в качестве примеров представлены полученные импульсные характеристики. Линейки партии Lp/1 прошли утонение (травление) рабочей зоны до толщины ≈ 100 мкм, что обеспечивает возможность работы при меньших значениях напряжения смещения $U_{\text{см}}$. Линейки Lp/2 дополнительное утонение активной области не проходили. При испытании линеек фотодиодов в полосе 150 МГц и более уровень помех, создаваемого генератором ГМИ, в ряде случаев, соизмерим с уровнем сигналов. Для выделения сигнала использовался режим обработки в меню осциллографа «усреднение по нескольким измерениям» и «вычитание» помех с суммарной (сигнал + помеха) осциллограммы. Это позволило регистрировать сигналы на уровне 100-300 мкВ. Результаты расчётов на осциллограммах представлены красным цветом (режим "Math.").

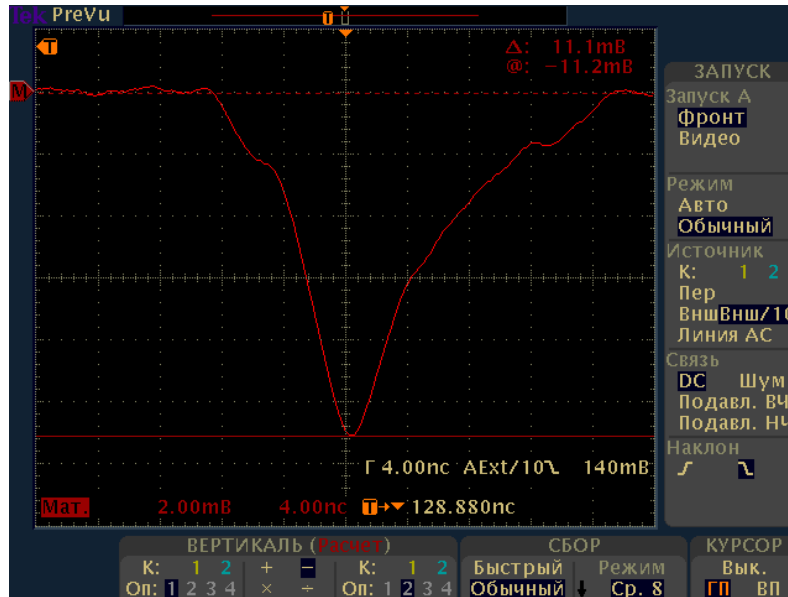


Рисунок 3.8 – Импульсная характеристика диода №4 линейки из партии Lp/2, выделенная на фоне помех с помощью осциллографа. Полоса 150 МГц. $U_{см} = -160$ В. Длительность на уровне 0,5 составляет 8 нс и время нарастания 6 нс.

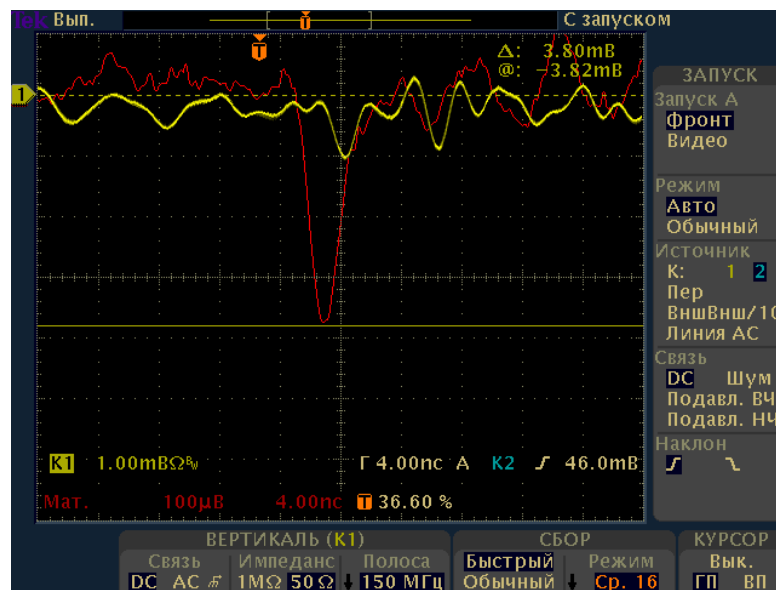


Рисунок 3.9 – Импульсная характеристика диода № 6 линейки из партии Lp/1 при $U_{см} = -160$ В, развертка 4 нс/дел, полоса 150 МГц М-разностный сигнал. Длительность на уровне 0,5 около 2,5 нс, фронт-1,6 нс. (Масштаб помехи для выделенного сигнала увеличен на порядок)

Результаты исследований показывают, что линейки Lp1, прошедшие утонение подложки до 100 мкм, демонстрируют лучшие показатели быстродействия относительно Lp2 при одинаковом управляющем напряжении, поданном на рpn-диод. В целом, на полупроводниковых массивах рpn-диодов, разработанных в соответствии с приведенным выше циклом технологических операций, удалось достигнуть ожидаемого уровня быстродействия – отклика, не превышающего 10 нс. Таким образом, такие диоды могут быть использованы в качестве детекторов фотоэлектронов в ГФП для быстродействующих систем сканирования.

Помимо быстродействия другой важнейшей характеристикой линейных массивов рpn-диодов является усиление первичных фотоэлектронов, возникающее во время бомбардировки активной области диода высокоэнергетичными электронами, испускаемыми в вакуум с поверхности фотокатода. Разработке методик измерения и количественному определению коэффициента электронного усиления посвящен следующий параграф диссертации.

3.4.2 Исследование электронного усиления в области подложки диодов

Для измерения электронной чувствительности диодных линеек была реализована схема бомбардировки исследуемой диодной линейки фотоэлектронами. Исследования проводились на разработанном измерительном стенде, основу которого представляет модернизированная вакуумная камера. Блок-схема стенда представлена на рисунке 3.10. В качестве источника фотоэлектронов был выбран стандартный фотокатод (на основе CsI) [3], поскольку его монтаж и транспортировка могут быть осуществлены в условиях атмосферного давления. Фотокатод является чувствительным в ультрафиолетовой области спектра, хотя в условиях эксперимента полоса спектральной чувствительности облучаемого ФК не имеет значения. В качестве источника излучения была выбрана УФ-лампа, располагающаяся вне объема вакуумной камеры. Исследуемые линейки помещались в кера-

мическом корпусе с диафрагмой. Наличие диафрагмы обусловлено необходимостью контроля площади пучка излучения, попадающего в чувствительную область линейки диодов. Электронное усиление диодных линеек измерялось как отношение тока, полученного на выходе исследуемого элемента линейки – диода к значению фототока, получаемому на выходе фотокатода.

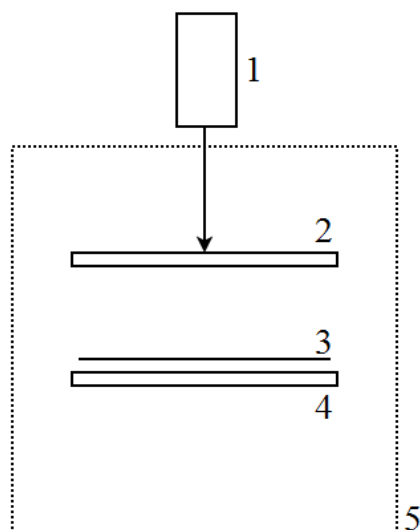


Рисунок 3.10 – Блок-схема измерения электронной чувствительности диодных линеек, 1 – источник излучения, 2 – фотокатод, 3 – диафрагма, 4 – измеряемая диодная линейка, 5 – объем вакуумной камеры

Для измерения электронного усиления линейки монтировались на керамическую плату. Внешний вид сборки с линейкой представлен на рисунке 3.11.

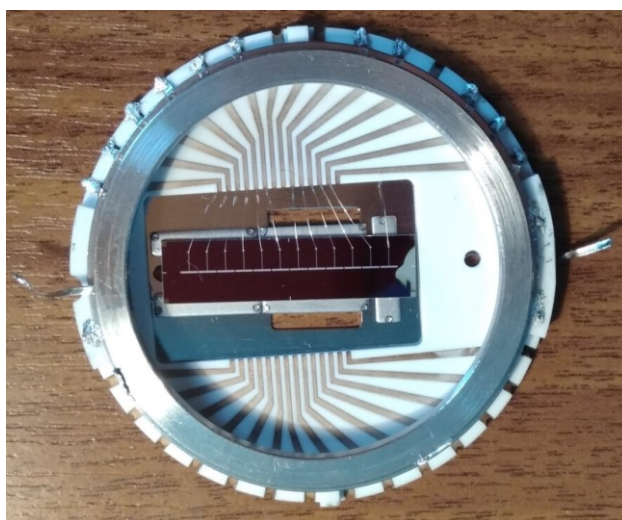


Рисунок 3.11 – Диодная линейка в керамическом корпусе

Были исследованы линейки партий Lp/1 и Lp/2. Результаты измерения коэффициента усиления первичных фотоэлектронов на элементах диодных линеек (при различных напряжениях смещения) в зависимости от энергии фотоэлектронов представлены на рисунке 3.12. Типы исследованных линеек и режимы представлены в таблице 3.2 (приложение В).

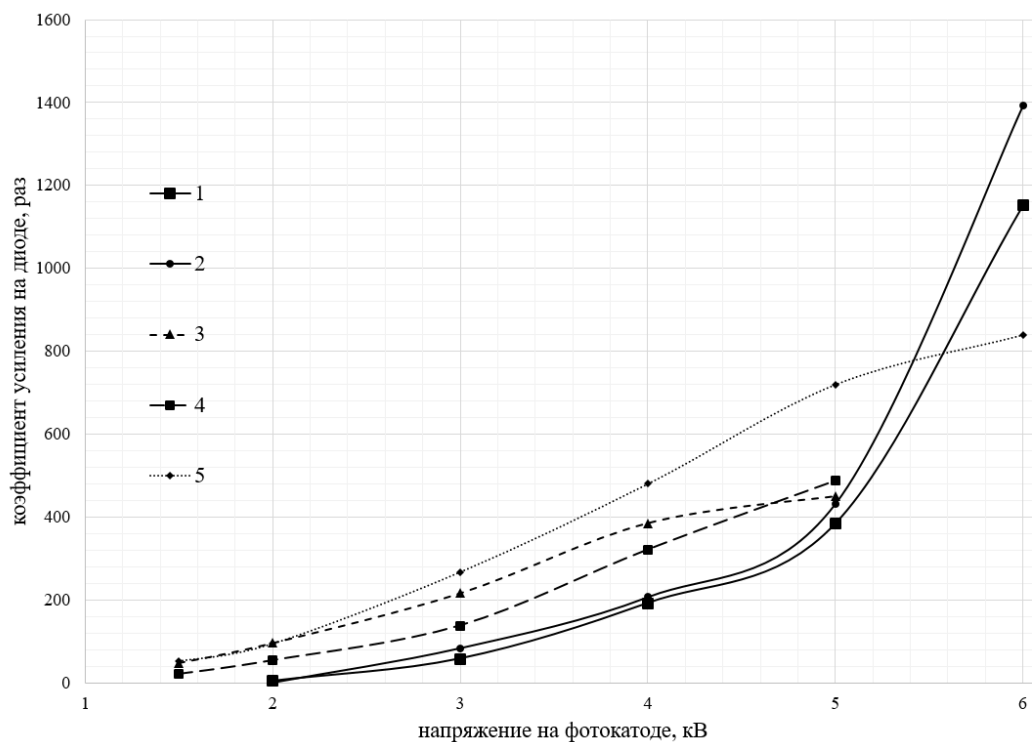


Рисунок 3.12 – Коэффициент усиления первичных фотоэлектронов от напряжения, поданного на фотокатод, для пяти диодов двух типов линеек

Анализ графика позволяет сделать вывод о том, что линейки Lp1 обеспечивают лучшие значения коэффициента усиления вплоть до 5 кВ. Что касается линеек Lp2, на них наблюдается резкое увеличение коэффициента электронного усиления на напряжениях между фотокатодом, излучающим фотоэлектроны и исследуемой линейкой рin-диодов в 5 кВ и более. Учитывая, что рабочее напряжение прибора, обеспечивающее его стабильную работу, составляет 3-4 кВ, в макетах фотодетекторов целесообразно использовать линейки типа Lp1. Их использование

при напряжении смещения на фотокатоде 4 кВ позволяет получить коэффициент усиления первичных фотоэлектронов свыше 250.

В целом, параметры измеренных линеек соответствуют ожиданиям и удовлетворяют требованиям, применяемым к быстродействующему преобразователю фотоэлектронов в ГФП. Полученные параметры быстродействия и коэффициента усиления, обосновывают использование выбранной топологии pin-диодов. Дальнейшее улучшение представленных преобразователей фотоэлектронов связано, главным образом, с разработкой новых фотошаблонов, обеспечивающих матричный характер диодных массивов, а также общее увеличение числа электронно-чувствительных элементов в одном приборе. Это позволит получать на выходе ГФП пространственное распределение чувствительности к коротковолновому инфракрасному излучению по двум координатам.

Глава 4 настоящей диссертации посвящена макетированию реальных ГФП с фотокатодной гетероструктурой InP/InGaAs/InP и линейным 12-элементным массивом pin-диодов в качестве преобразователя фотоэлектронов, а также измерению их параметров с помощью разработанных методов измерений.

ГЛАВА 4. МАКЕТИРОВАНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИБРИДНЫХ СЕНСОРОВ КОРОТКОВОЛНОВОГО ИНФРАКРАСНОГО ДИАПАЗОНА

На основе проведенных исследований по фотокатодной структуре и преобразователям фотоэлектронов, была разработана конструкция и осуществлено макетирование гибридного прибора с линейным массивом рпн-диодов и фотокатодом для коротковолнового инфракрасного спектрального диапазона.

4.1 Конструкция корпуса прибора и макетирование

Необходимость достижения в корпусе прибора сверхвысокого вакуума, а также подачи на участке катод-анод высокого напряжения на уровне нескольких киловольт, значительно сужает перечень материалов, которые могут быть использованы. Основным материалом корпуса прибора является стекло марки С52. Формирование изделия осуществляется с помощью спекания в графитовой форме стеклянной массы и коваровых вводов с последующей шлифовкой и полировкой необходимых поверхностей. Это объясняется следующими причинами:

1. Стекло обладает достаточным удельным электрическим сопротивлением;
2. Является одним из лучших вакуумных материалов для фотокатодов по многолетнему опыту конструирования ФЭУ и ЭОП;
3. Стекло марки С52 обладает высоким коэффициентом пропускания и не имеет окон поглощения в рабочей области (0,9 – 1,7 мкм);
4. Все вводы прибора находятся с одной стороны корпуса, что позволяет использовать удобный разъем для работы с прибором.

При рассмотрении гибридного прибора целесообразно выделить три основных его элемента: непосредственно сам корпус с высоковольтными вводами-выводами, входное окно с закрепленной фотокатодной структурой и плата держателя преобразователя фотоэлектронов с закрепленным на ней кремниевым элементом. Для обеспечения необходимого разрешения в гибридном модуле используется, так называемая, проксимити фокусировка (proximity-focusing) [141,143,144]. Ее использование позволяет отказаться от каких-либо элементов электронной оптики, что значительно упрощает конструкцию прибора, при этом позволяя рассчитывать на эффективный сбор фотоэлектронов с помощью твердотельного преобразователя. На рисунке 4.1 представлена принципиальная конструкция прибора, а на рисунке 4.2 – его внешний вид со схемой расположения фоточувствительного поля [145].

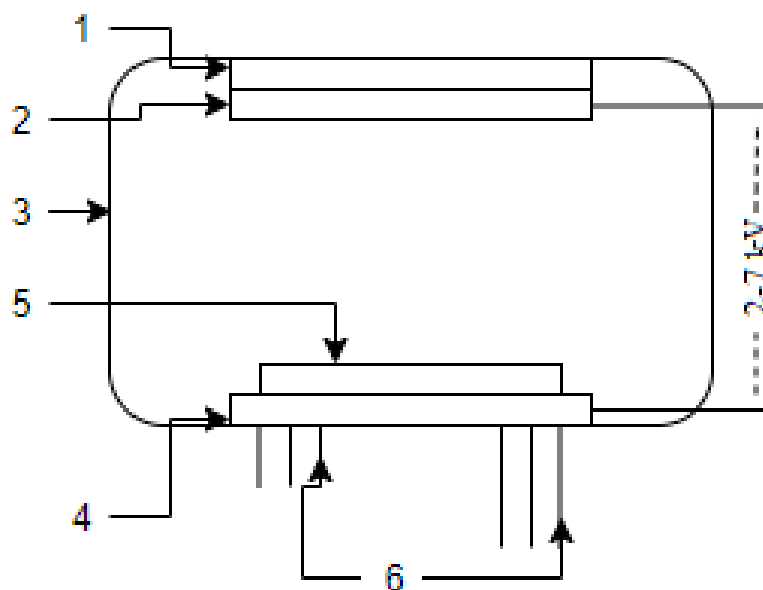


Рисунок 4.1 – Конструкция прибора, где: 1 – входное окно, 2 —InP/InGaAs/InP фотокатодная структура, 3 – корпус прибора, 4 – плата крепления линейки диодов, 5 – 12 элементная линейка pin-диодов, 6 – высоковольтные вводы и выводы для подключения прибора



Рисунок 4.2 – Внешний вид прибора, вариант исполнения с электронно-чувствительной линейкой рin-диодов

Необходимо отметить, что технологический цикл изготовления гибридов с различными твердотельными детекторами является идентичным, несмотря на геометрические параметры фотокатода, тип преобразователя фотоэлектронов и контактной платы для его крепления. Это позволяет, главным образом, изготавливать различные типа приборов в одной вакуумной установке с одним набором технологической оснастки. В частности, нет необходимости проводить работы по вскрытию камер обработки фотокатодного узла и запрессовки корпуса прибора, что могло бы повлечь за собой потребность в длительном обезгаживании камер для выхода на рабочий вакуум.

4.2 Результаты измерений прибора с линейным массивом pin-диодов

Для измерения чувствительности опытных образцов приборов был разработан и собран лабораторный стенд измерения спектральных характеристик фотоэлектрических приборов, имеющий следующее назначение:

1. Измерение диапазона спектральной чувствительности фотокатода;
2. Измерение спектральной чувствительности фотокатода (квантовый выход);
3. Измерение спектральной чувствительности на выходе прибора.

На рисунке 4.3 представлена его структурная схема.

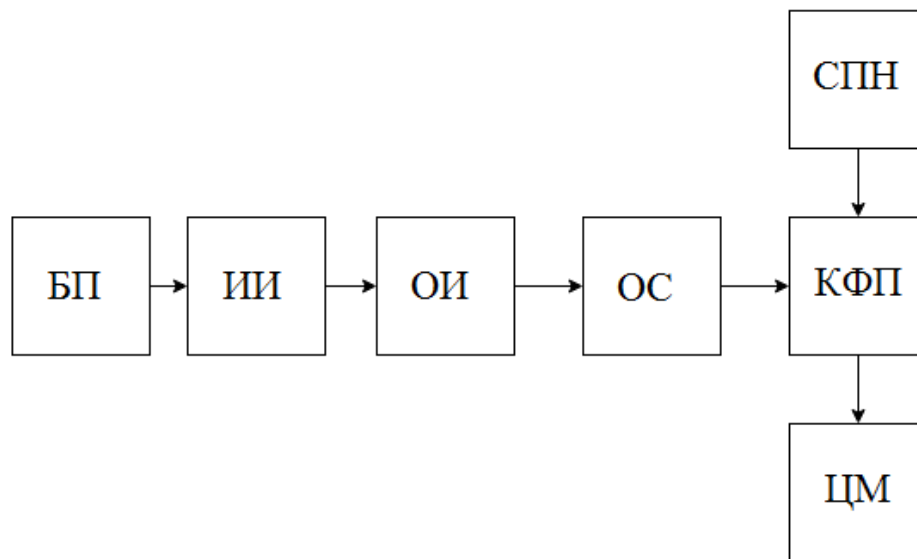


Рисунок 4.3 – Структурная схема стенда измерения фоточувствительных параметров, где: БП – Блок питания и измерения режима источника излучения, ИИ – Источник излучения, ОИ – Ослабитель излучения, ОС – Отражающее стекло, КФП – Камера для фоточувствительного прибора с выводами, СПН – Система подачи напряжения на элементы прибора, ЦМ – Цифровой мультиметр

С использованием лабораторного стенда можно проводить измерения и контроль следующих параметров:

1. Фототок с фотокатода, находящегося в исследуемом приборе; диапазон измеряемых значений $0.1 \div 5$ мкА;

2. Фототок с измеряемого диода; диапазон измеряемых значений $0.1 \text{ нА} \div 5 \text{ мкА}$.

Диапазон спектральной чувствительности фотокатода, спектральная чувствительность фотокатода, спектральная чувствительность на выходе прибора определяются путем обработки данных, полученных в результате прямых измерений на стенде.

Спектральная чувствительность (в мА/Вт) фотокатодов изготовленных опытных макетов №1 и №2 представлена на рисунке 4.4, при этом для прибора №2 приведены характеристики при различных значениях ускоряющего напряжения $U_{см}$. Макет №1 состоит из гетероструктуры InP/InGaAs/InP типа T2 (а) с линейкой Lp1, а макет №2 – типа T2 с линейкой Lp1.

Чувствительность фотокатода на измеренных макетах превышает 20 мА/Вт, что позволяет рассчитывать на высокие параметры обнаружительной способности ГФП с учетом усиления сигнала в результате электронно-дырочной рекомбинации в подложке рiп-диода. При этом чувствительность линейно изменяется линейно относительно увеличения напряжения смещения на электроде, расположенном на поверхности гетероструктуры. Это подтверждает, что фотокатод работает в линейном режиме. Некоторое отклонение вида кривой спектральной чувствительности от теоретической и, в частности, всплеск на длине волны 1500 нм объясняется тем, что при проведении экспериментальных исследований было необходимо использовать фильтры, имеющие собственную кривую спектральной восприимчивости. Это могло негативно сказаться на погрешности оптических измерений.

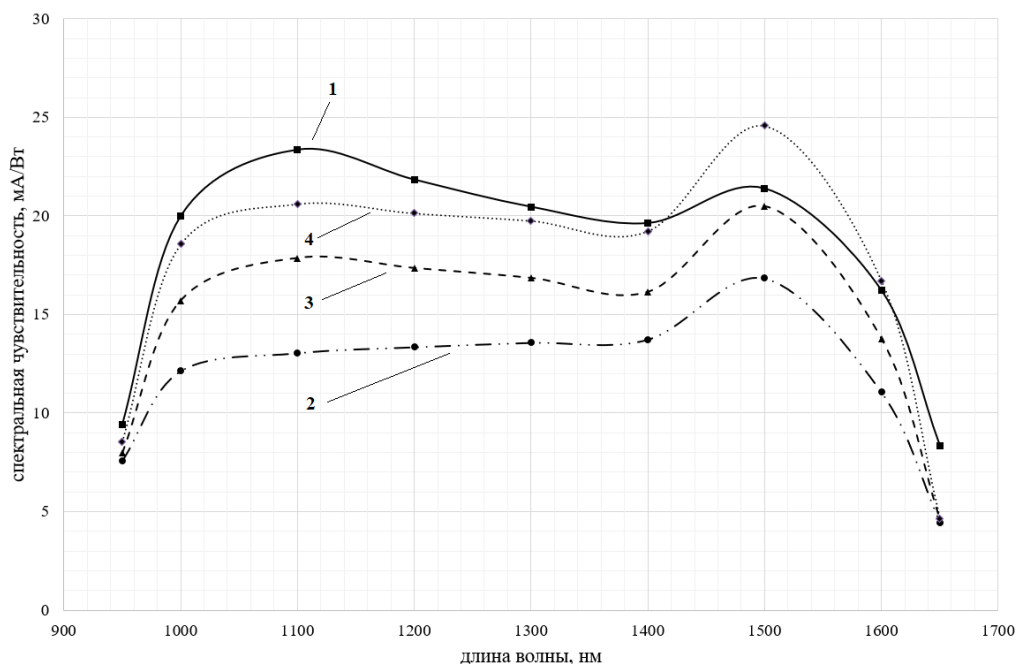


Рисунок 4.4 – Спектральные зависимости чувствительности фотокатодов в приборах (при напряжении фотокатод-диод $U_{фк}=300$ В)

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

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

На рисунке 4.5 приведены спектральные характеристики приборов №1 и №2, а на рисунке 4.6 – зависимости чувствительности приборов от высокого напряжения $U_{фк}$, поданного на фотокатод. Для макета №2 измерена зависимость чувствительности от напряжения смещения $U_{см}$, поданного на сетчатый электрод фотокатода (рисунок 4.7). Эти измерения были проведены на диоде № 11 прибора №2. Образцы облучались потоком от монохроматора ДМР-4 в диапазоне мощности $(1-7) \cdot 10^{-7}$ Вт.

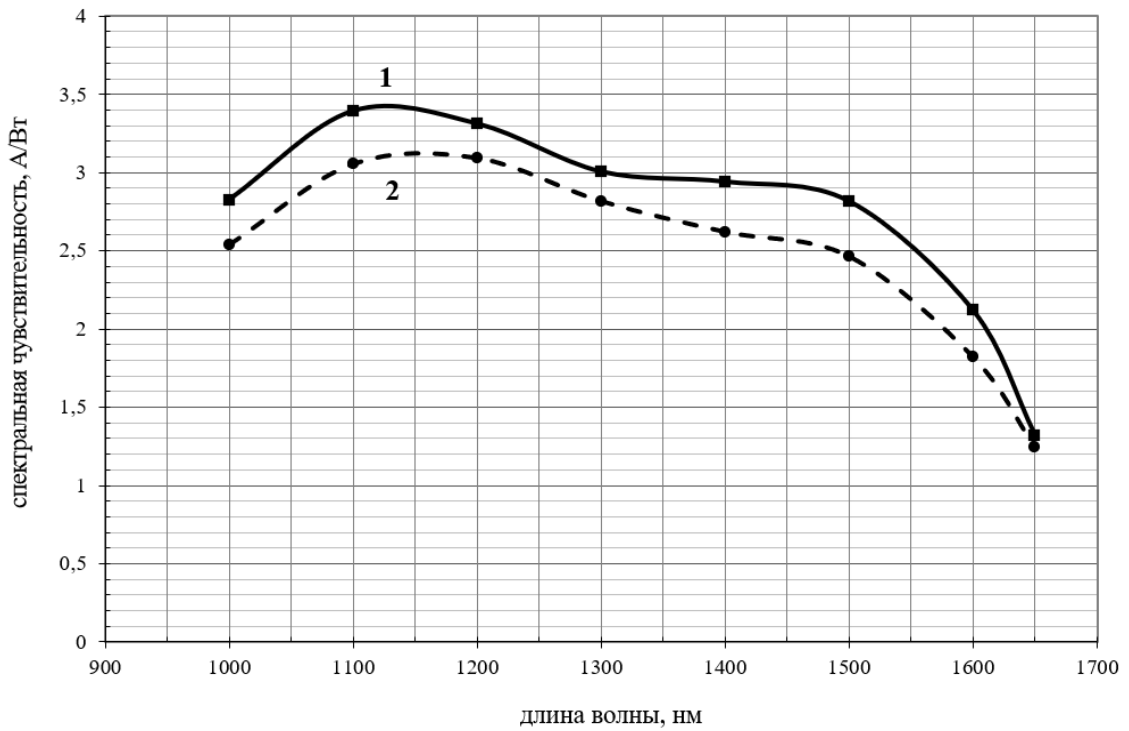


Рисунок 4.5 – Спектральные зависимости приборов: 1 – Макет №1 ($U_{\text{фк}}=-4$ кВ, $U_{\text{диод3}}=-60$ В, $U_{\text{см}}=3,5$ В); 2 – Макет №2 ($U_{\text{фк}}=-2$ кВ, $U_{\text{диод11}}=-105$ В, $U_{\text{см}}=2,4$ В)

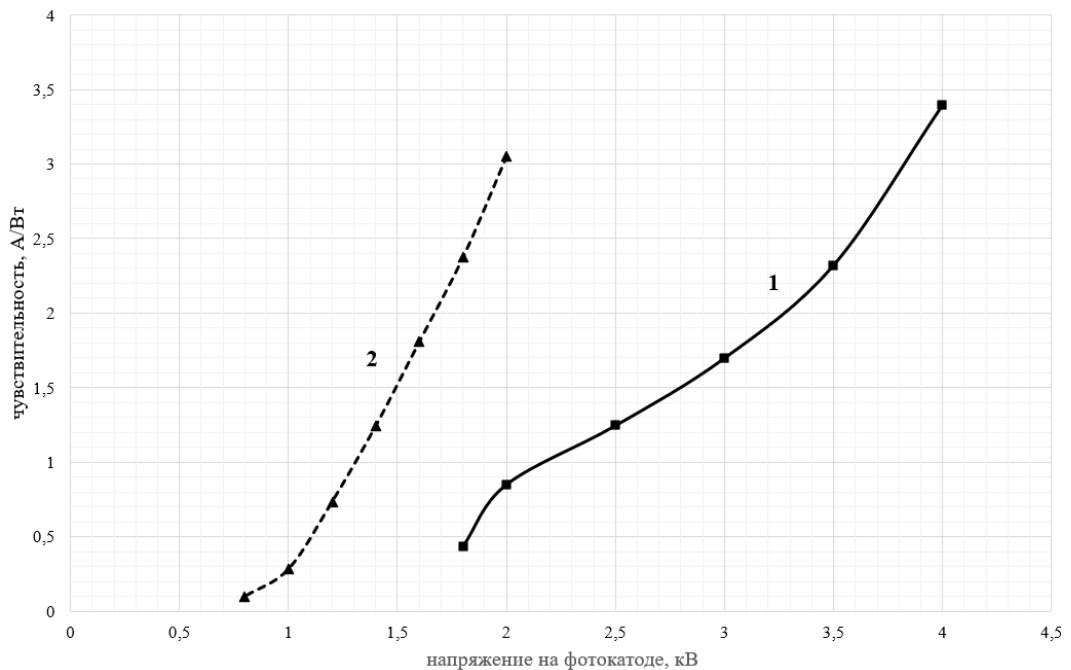


Рисунок 4.6 – Зависимость чувствительности приборов на $\lambda=1100$ нм от напряжения на фотокатоде $U_{\text{фк}}$, 1 – Макет №1 ($U_{\text{диод3}}=-60$ В, $U_{\text{см}}=3,5$ В), 2 – Макет №2 ($U_{\text{диод11}}=-105$ В, $U_{\text{см}}=2,4$ В)

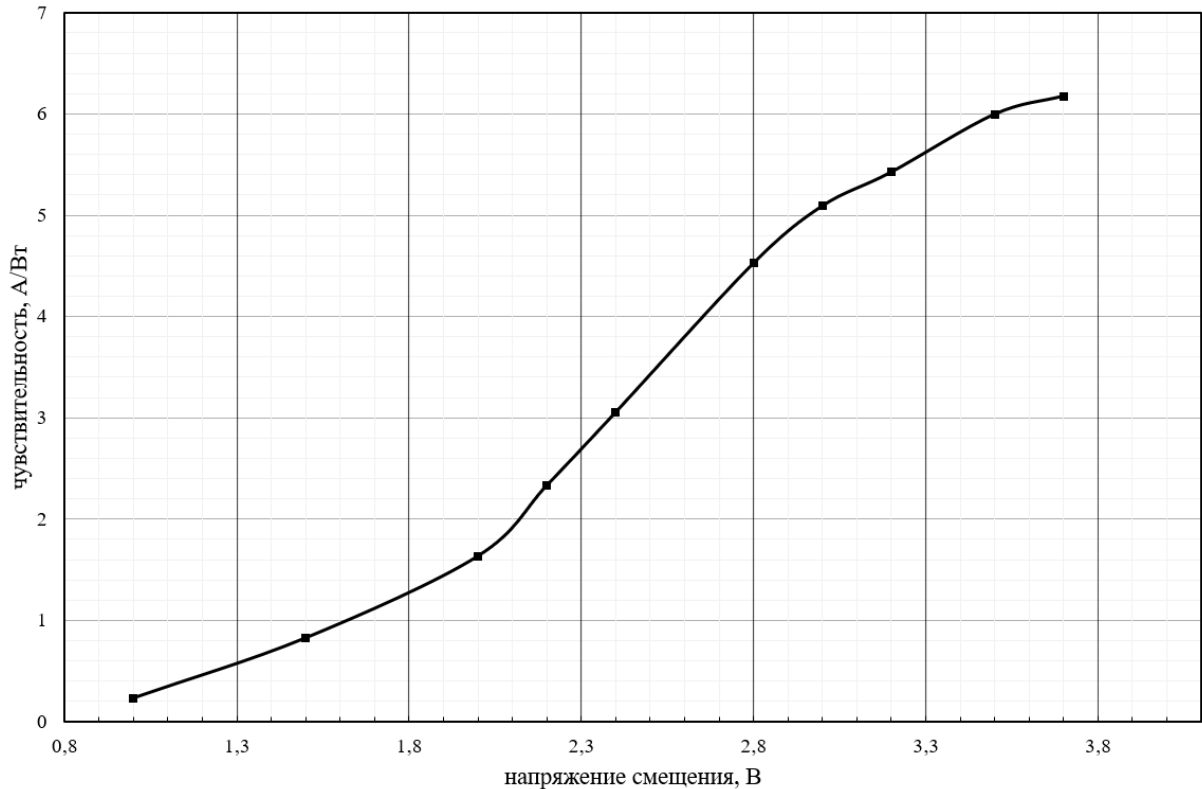


Рисунок 4.7 – Зависимость чувствительности от напряжения смещения $U_{см}$ для Макета №2 ($U_{фк}=-2$ кВ, $U_{диод11}=-105$ В), $\lambda=1100$ нм.

Анализ рисунка 4.5 позволяет установить, что чувствительность исследуемых макетов в спектральном диапазоне 1000–1500 нм. составляет 2,5-3,5 А/Вт. При этом пик чувствительности наблюдается на длине волны 1100 нм, а падение относительно максимума составляет для Макета №1 – 17%, №2 – 19,3 %. Рисунок 4.6 показывает значительное влияние напряжения $U_{фк}$ на чувствительность исследованных макетов. Диапазоны подаваемых напряжений определяются линейной областью работы прибора и величиной темнового тока, снятого с исследуемых диодов. На линейном участке увеличение $U_{фк}$ на 2 кВ позволяет получить прирост чувствительности в 10,8 раз на Макете №1 и 3,99 раз на Макете №2. Напряжение смещения $U_{см}$, поданное на электрод фотокатодной структуры, также оказывает значительное влияние на чувствительность прибора. В макете №2 линейный участок работы фотокатода лежит в диапазоне $U_{см}=2-3$ В. При этом при подаче на электрод 3,7 В чувствительность на длине волны 1100 нм. превышает 6 А/Вт.

4.2.1 Равномерность чувствительности по диодам приборов

Исследования равномерности чувствительности диодов при равномерной облученности проводились на разработанном лабораторном стенде, который позволяет проводить многоканальные, иными словами, параллельные измерения. Его структурная схема представлена на рисунке 4.8. В качестве источника излучения была использована лампа накаливания, излучение от которой проходило через кремниевую пластину, используемую в качестве оптического фильтра, обеспечивающего прохождение излучения в диапазоне более 1,1 мкм. В результате, в рамках измерительного тракта, для каждого диода линейки был создан одинаковый уровень облученности и, таким образом, были получены значения чувствительностей относительно друг друга. Ток накала лампы накаливания выбирался так, чтобы ток с фотокатода не превышал уровня 100 нА.

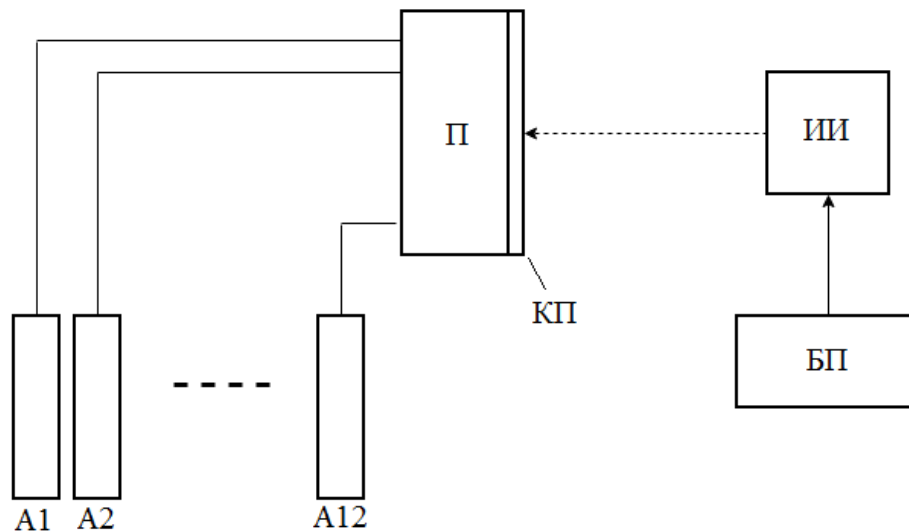


Рисунок 4.8 – Структурная схема стенда многоканальных измерений, где: ИИ – источник излучения, БП – блок питания источника излучения, КП – кремниевая пластина, П – исследуемый прибор в затемняющей оболочке, А1-12 – амперметры, подключенные к каждому элементу диодной линейки

Полученные результаты могут быть использованы для разработки программной компенсации неоднородности структуры рpn-диодов, а также для получения значений абсолютной интегральной чувствительности всего прибора на основе измерений одного элемента (выходных характеристик с диода). Таким образом, используя измеренные ранее значения абсолютной чувствительности диода №3 для макета №1 и диода №11 для макета №2, были рассчитаны значения спектральной чувствительности, всех диодов приборов 1 и 2 (рисунок 4.9 и 4.10). На рисунке 4.10 для прибора № 2 были также рассчитаны значения сигналов при различных напряжениях.

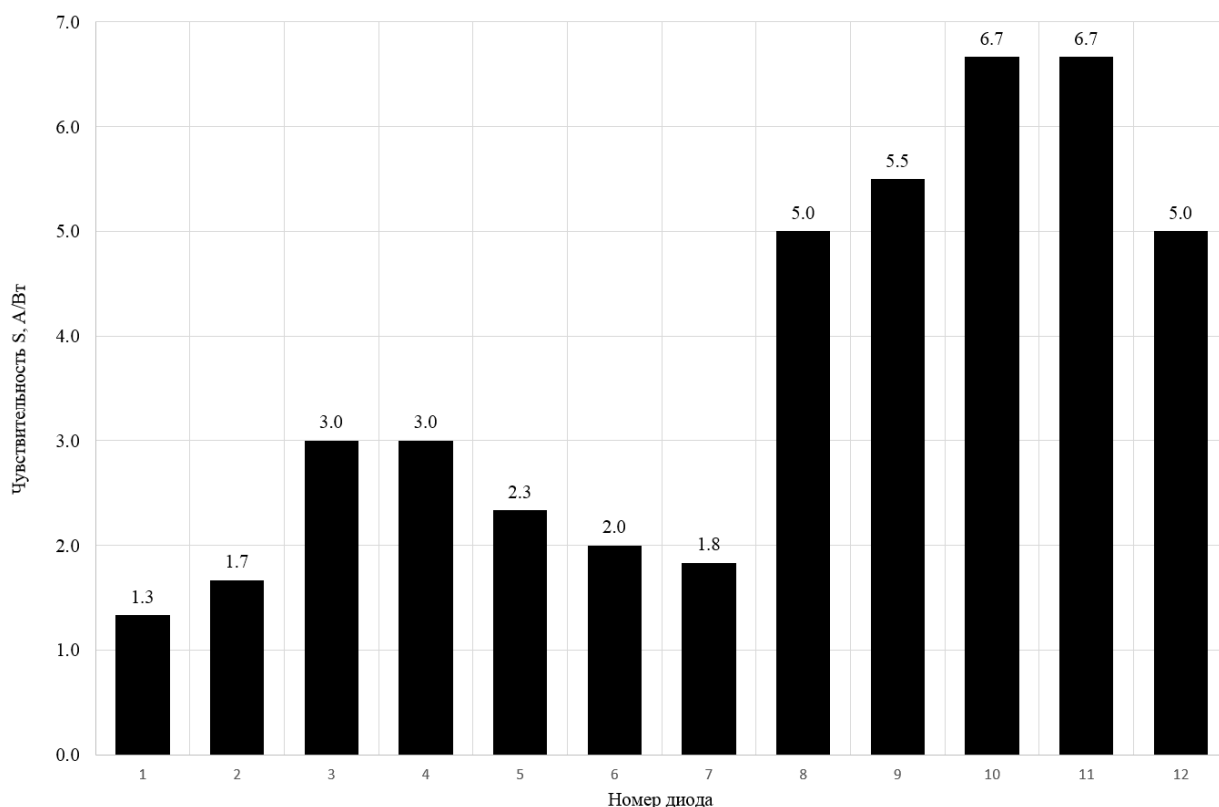


Рисунок 4.9 – Чувствительность S на длине волны $\lambda=1100$ нм диодов макета №1

$$(U_{\text{фк}}=-4 \text{ кВ}, U_{\text{диод3}}=-60 \text{ В}, U_{\text{см}}=3,5 \text{ В})$$

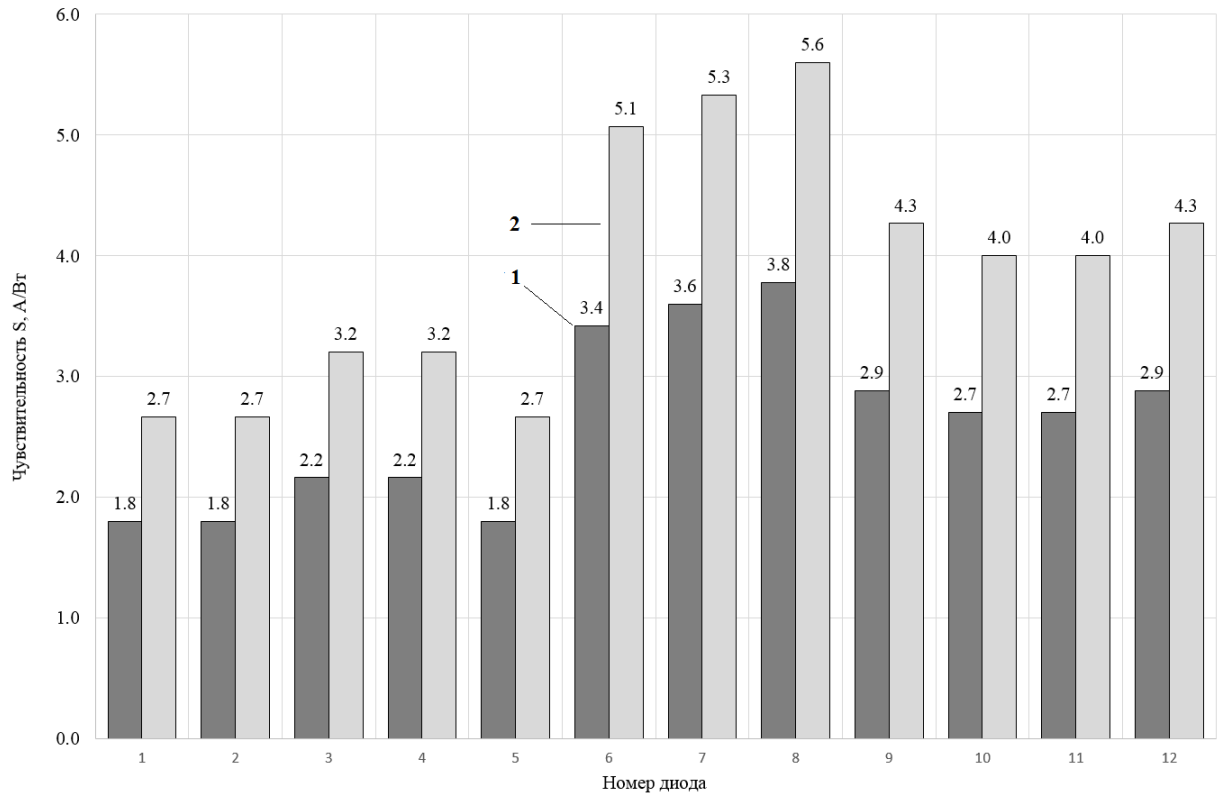


Рисунок 4.10 – Чувствительность S , на длине волны $\lambda=1100$ нм диодов прибора макета №2 ($U_{\text{фк}}=-2$ кВ, $U_{\text{диод11}}=-105$ В) при 1- напряжении смещения на сетке фотокатода $U_{\text{см}}=2,4$ В; 2 – напряжении смещения на сетке фотокатода $U_{\text{см}}=2,8$ В.

Результаты измерений подтверждают возможность получения чувствительности в несколько А/Вт на каждом элементе диодной линейки. Высокая неоднородность результатов чувствительности от диода к диоду, объясняется корреляцией неравномерности чувствительности фотокатода и неравномерности чувствительности диодных линеек. Большая разница в оптимальных режимах включения исследуемых макетов связана с наличием внутри прибора нескольких наукоемких технологически сложно воспроизводимых элементов (InP/InGaAs/InP:Ti фотокатодная гетероструктура, электронно-чувствительная линейка pin-диодов), что на данном этапе исследований не позволяет обеспечить высокую степень повторяемости результата и большую выборку исследуемых макетов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 целесо-

образности 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.

В завершении диссертации автор хотел бы поблагодарить всех, кто помогал ему в работе.

Хотел бы выразить глубокую благодарность сотрудникам кафедры «Фотоники и линий связи», аспирантом которой я являюсь, за искренний интерес к работе, обсуждение результатов, ценные замечания и рекомендации.

Автор очень признателен сотрудникам АО "ЦНИИ "Электрон" за помощь в проведении исследований, обсуждении результатов и рекомендации.

Особую благодарность и признательность хочу выразить научному руководителю – Давыдову Вадиму Владимировичу за неоценимую помощь и поддержку на всем этапе получения высшего образования и обучения в аспирантуре.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

ИК – инфракрасный;

УФ – ультрафиолетовый;

ПНВ – прибор ночного видения;

NIR – Near Infrared Range – ближний инфракрасный диапазон;

SWIR (КВИК) – Short Wave Infrared Range – коротковолновый инфракрасный диапазон;

MWIR – Medium Wavelength Infrared Range – средневолновый инфракрасный диапазон;

LWIR – Long Wavelength Infrared Range – длинноволновый инфракрасный диапазон;

ПЗС (CCD) – прибор с зарядовой связью;

КМОП (CMOS) – комплементарная структура металл-оксид-полупроводник;

ФПЗС – фоточувствительный прибор с зарядовой связью;

ППЗ – прибор с переносом заряда;

ЭЧПЗС – электронно-чувствительный прибор с зарядовой связью;

ГФП – гибридный фотоэлектронный прибор;

ЭОП – электронно-оптический преобразователь;

ПДО – пыледымовые образования;

МОСГЭ (MOCVD) – металлоорганическое осаждение из газовой фазы;

ИСС (ROIC) – интегральная схема считывания;

ЭЧ – электронно-чувствительный;

МКП (MCP) – микроканальная пластина;

ФПУ – фотоприемное устройство;

АИПНВ – прибор ночного видения с активной подсветкой;

ФК – фотокатод;

ОЭС – отрицательное электронное средство;

Ш-б – барьер Шоттки;

ФКПЭ (ТЕР) – фотокатод с переносом электронов;

ФУ – фотокатодный узел;

НГН – нераспыляемые геттерные насосы;

МН – магниторазрядный насос;

МПЭ (МВЕ) – молекулярно-пучковая эпитаксия;

EBS (electron bombarded semiconductor gain) – механизм электронного усиления;

ОНЗ – основные носители заряда;

ФЭУ – фотоэлектронный умножитель.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rogalski A. History of infrared detectors // *Opto–Electronics Review*. – 2002. – Vol. 20. – N. 3. – P. 279 – 308.
2. Rogalski A. Infrared detectors: an overview // *Infrared Physics & Technology*. – 2002. – Vol. 43. – P. 187 – 210.
3. Берковский А.Г., Гаванин В.А., Зайдель И.Н. Вакуумные фотоэлектронные приборы. – М.: Радио и связь, 1988. – 272 с.
4. Rogalski A. Infrared detectors: status and trends // *Progress in Quantum Electronics*. – 2003. – Vol. 27. – P. 59 – 210.
5. Соммер А. Фотоэмиссионные материалы. – М.: Энергия, 1973. – 176 с.
6. Кощавцев, Н.Ф., Кощавцев А.Н., Федорова С.Ф. Анализ перспектив развития приборов ночного видения // *Прикладная физика*. – 1999. – Т. 3. – С. 66.
7. Гейхман И.Л., Волков В.Г. Основы улучшения видимости в сложных условиях. – М.: Недра-Бизнес-центр, 1999. – 286 с.
8. Волков В.Г. Активно-импульсные ПНВ // *Специальная техника*. – 2002. – №3. – С. 2 – 11.
9. Ettenbery M.H., Cohen M.J., Olsen G.H., Kennedy J.J. InGaAs Focal Plane Arrays and Cameras for man-Portable Near Infrared Imaging // *SPIE*. – 1999. – V. 3701 – P. 225.
10. Айнбунд М.Р., Миронов Д.Е., Пашук А.В., Зубков В.И., Соломонов А.В., Забродский В.В., Николаев А.В. Кремниевая электронно-чувствительная pín-линейка, облучаемая с обратной стороны // *Известия вузов России. Радиоэлектроника*. – 2019. – Т. 22. – № 5. – С. 80 – 92.
11. Orlov D.A., Glazenborg R., Ortega R., Kernen E. High-detection efficiency MCP-PMTs with single photon counting capability for LIDAR applications // *Proceedings International Conference on Space Optics(ICSO 2018)* – 2019. – Vol. 1. – P. 1118031.

12. Polyakov S.V. Photomultiplier Tubes // *Experimental Methods in the Physical Sciences*. – 2013. – Vol. 45. – P. 69 – 82.
13. 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.
14. 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.
15. Абрамов П.И., Кузнецов Е.В., Скворцов Л.А. Перспективы применения квантово-каскадных лазеров в системах оптико-электронного противодействия. Обзор // *Оптический журнал*. – 2017. – Т. 84. – № 5. – С. 56 – 70.
16. Kaushal H., Kaddoum G. Applications of Lasers for Tactical Military Operations // *IEEE Access*. – 2017. – Vol. 5. – P. 20736-20753.
17. *Аэродинамика ракет* / Под ред. Хемша М., Нилсена Дж. М.: Мир, 1989. – 512 с.
18. Алексеев О.А., Валеев Ш.Ш., Поликарпов А.А., Тиранов А.Д., Филиппов В.Л. Методика расчета излучения факела ракетного двигателя на твердом топливе // *Оборонная техника*. – 2010. – Т.6. – № 7. – С. 13 – 18.
19. Wehr A., Lohr U. Airborne laser scanning – an introduction and overview // *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*. – 1999. – Vol. 54. – P. 68 – 82.
20. Танташев М.В., Трухина Н.Ю., Филиппов В.Л. Оптические модели атмосферы. Анализ, пути развития // *Оборонная техника*. – 2010. – № 6(7). – С. 3 – 12.
21. Groeneveld D.P., Watson R.P., Barz D.D., Silverman J.B., Baugh W.M. Assessment of Two Methods to Monitor Wetness to Control Dust Emissions, Owens Lake, California // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 31. – N. 11. – P. 3019 – 3035.

22. Давыдов В.В., Гребеникова Н.М., Смирнов К.Я. Оптический метод контроля состояния текущих сред с низкой прозрачностью и крупными включениями. // Измерительная техника. – 2019. – № 6. – С. 37 – 43.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Groeneveld D.P. Remotely-Sensed Groundwater Evapo-transpiration from Alkali Scrub Affected by Declining Water Tables // Journal of Hydrology. – 2008. – Vol. 358. – N. 2-3. P. 294–303.
29. Cuichun Hu, Lihong Niu, Qingyu Yuan, Lei Wu, Hongru Yang and Bing Yu Research on 3D Imaging Based on Streak Tube Imaging Lidar // International Conference on Electronic Information Technology and Intellectualization. – 2016. – Vol. 710065. – P. 99–106.
30. Sining Li, Yuhao Guang, Junheng Zang et al. Data processing system and design of streak tube laser radar // Chinese Journal of Lasers. – 2008. – Vol. 35 (3). – P. 943 – 946.

31. Craig A.P., Jain M., Wicks G., Golding T., Hossain K., McEwan K., Howle C., Percy B., Marshall A. Short-wave infrared barrier detectors using InGaAsSb absorption material lattice matched to GaSb // *Appl. Phys. Lett.* – 2015. – Vol. 106. – N. 20. – P. 201103.
32. Jain M., Wicks G., Marshall A., Craig A., Golding T., Hossain K., McEwan K., Howle C. Development of an ultrahigh-performance infrared detector platform for advanced spectroscopic sensing systems // *SPIE*. – 2014. – Vol. 907304 – P. 18 – 25.
33. Goodson J., Garfield B. Developments in S-1 Photocathode Image Converters for High Speed Streak /Framing/ Photography // *Advances in Electronics and Electron Physics*. – 1985. – Vol. 64. – P. 87 – 92.
34. Hadfield R. Single-photon detectors for optical quantum information applications // *Nature Photonics*. – 2009. – N. 3. – P. 696 – 705.
35. Роках А.Г., Биленко Д.И., Шишкин М.И., Скапцов А.А., Вениг С.Б., Матасов М.Д. Оптические спектры пленок CdS–PbS и возможность фотоэффекта в среднем инфракрасном диапазоне // *Физика и техника полупроводников*. – 2014. – Т.48. – № 12. – С. 1602 – 1606.
36. Sugiyama M. Selective area growth of III-V semiconductors: From fundamental aspects to device structures // *Proc. 22nd Intern. Conf. on Indium Phosphide and Related Materials (IPRM)*. – 2010. – Vol 1. – P. 1 – 6.
37. GA1280JS datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.sensorsinc.com/products/detail/mini-swirtm-jsx-snapshot-camera-30>. – Дата обращения: 14.02.2021.
38. Цыцулин А.К., Адамов Д.Ю., Манцветов А.А., Зубакин И.А. Твердотельные телекамеры: накопление качества информации СПб: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2014. – 234 с.
39. Ferreira P.M., Petraglia A., Gomes J.G.R.C. Current mode read-out circuit for InGaAs photodiode applications // *Microelectronics Journal*. – 2010. – Vol. 41. – N. 7. – P. 388 – 394.

40. Берковский А.Г., Веретенников А.И., Козлов О.В. Вакуумные фотоэлектронные приборы для измерения импульсных излучений. – М. Энергоатомиздат, 1982. – 168 с.
41. Hao G., Chang B., Shi F., Zhang J., Zhang Y., Chen X., Jin M. Influence of Al fraction on photoemission performance of AlGa_N photocathode // *Applied Optics*. – 2014. – Vol. 53. – N. 17. – P. 3637 – 3641.
42. Бухаров П. В. Фотокатоды современных ЭОП // Доклады ТУСУРа. – 2011. – Т.24. – № 2. – С. 106 – 109.
43. Константинов П.Б., Костюков Е.В., Чернокожин В.В. Электронный формирователь сигнала изображения для электронно-оптических преобразователей 5-ого поколения // *Ж. Электронная техника, серия 2, Полупроводниковые приборы* – 2009. – Т. 223. – № 2. – С. 62 – 68.
44. Williams G., Reinheimer A., Verle W., Aebi V., Costello K. Electron bombarded back-illuminated CCD sensors for low light level imaging applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://voxtel-inc.com/files/2012/07/Electron-bombarded-back-illuminated-CCD-sensors-_PV_WILLIAMS.pdf. – Дата обращения: 14.02.2021.
45. Айнбунд М. Р., Алымов О.В., Андреева Е.Б. и др. Высококочувствительный солнечно-слепой гибридный телевизионный прибор. – Тезисы. ОАО ЦНИИ «Электрон» – 2013.
46. Айнбунд М.Р., Андреева Е.Б., Пашук А.В. и др. Разработка солнечно-слепого гибридного прибора с ЭЧ ППЗ и солнечно-слепых фотокатодов. – ОАО ЦНИИ «Электрон». – 2013.
47. 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 высококочувствительные цифровые телевизионные приборы для УФ и ИК спектральных диапазонов // *Успехи прикладной физики* – 2018 – №6(6) – С. 514–517.
48. 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 – 1 с.

49. KB-3 datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://lasercomponents.ru/wp-content/uploads/2019/10/kv_3.pdf. – Дата обращения: 14.02.2021.

50. WA-1000D-CL datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.jai.com/products/wa-1000d-cl>. – Дата обращения: 14.02.2021.

51. 1501M-GE-TE datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=1501M-GE-TE> – Дата обращения: 14.02.2021.

52. Bobcat 640 CLSWIR datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.xenics.com/short-wave-infrared-imagers/bobcat-640-series> – Дата обращения: 14.02.2021.

53. SWIR камера НПО Орион. Техническая спецификация [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.cameraiq.ru/catalog/series/npo-orion-SWIR-kamera> – Дата обращения: 14.02.2021.

54. GA640C datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://sensorsinc.dev.locusinteractive.net/images/uploads/documents/GA640C_military.pdf – дата обращения: 14.02.2021.

55. LIVAR M506 datasheet [Электронный ресурс] – Режим доступа: – <http://www.intevac.com/wp-content/uploads/2012/01/LIVAR-Datasheet.pdf> – Дата обращения: 14.02.2021.

56. Dussault D., Hoess P. Noise performance comparison of ICCD with CCD and EMCCD cameras // SPIE. – 2006. – Vol. 5563. – P. 195 – 204.

57. Aebi V., Vallianos P. Laser-illuminated viewing provides long-range detail // Laser Focus World. – 2000. – N. 9. – P.147 – 150.

58. Dayton D.C., Browne S.L., Gonglewski J.D., Sandven S.C., Gallegos J., Shilko M.L. Long-range laser illuminated imaging: analysis and experimental demonstrations // SPIE. – 2001. – Vol. 40. – N. 6. – P. 9.

59. Мищенко Н.И., Пустынский И.Н. Методы и средства повышения технических характеристик активно-импульсных телевизионно-вычислительных систем наблюдения / Доклады ТУСУРа. – 2014. – Т. 3. – № 33. – С. 47 – 52.
60. Капустин В.В., Мовчан А.К., Зайцева Е.В., Курячий М.И. Активно импульсные телевизионные измерительные системы для обеспечения навигации транспортных средств в сложных метеоусловиях // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4. – № 1. – С. 68 – 82.
61. OS1 Mid-Range High-Resolution Imaging Lidar [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://data.ouster.io/downloads/datasheets/datasheet-revd-v2p0-os1.pdf>. – Дата обращения: 14.02.2020.
62. Волков В.Г., Ковалев А.В., Федчишин В.Г. Тепловизионные приборы нового поколения // Специальная техника. – 2002. – №. 1. – С.18 – 26.
63. Sweeney S., Eales T., Adams A.R. The impact of strained layers on current and emerging semiconductor laser systems // Journal of Applied Physics. – 2019. – Vol. 125. – N. 8. – P. 082538.
64. Макаров А.С., Омелаев А.И., Филиппов В.Л. Введение в технику разработки и оценки сканирующих тепловизионных систем. – К: "Унипресс", 1998. – 320 с.
65. Cui Z., Tian Z., Zhang Y., Bi Z., Yang G., Gu E. Research on streak tube imaging lidar based on photocathode range gating method // Optics Communications. – 2019. – Vol. 432. – P 79 – 83.
66. Chenning Ma, Wen Zhao, Shaokun Han, Ping Wang. Data extraction algorithm for streak tube laser radar // Chinese Journal of Lasers. – 2010. – Vol. 37. – P. 510 – 513.
67. Kim G., Eom J., Park Y. Design of pulsed scanning lidar without mutual interferences // Smart Photonic and Optoelectronic Integrated Circuits. – 2018. – Vol. 10536. – P. 1053620.
68. Tian J., Hui D., Luo D., Wang T., Zhang J., Chen S., Jia H. Small-size streak tube for imaging lidar // Proceedings of IEEE. – 2017. – V.10328.

69. Кульчицкий Н.А., Наумов А.В., Старцев В.В. Неохлаждаемые микроболометры инфракрасного диапазона – современное состояние и тенденции развития // Нано- и микросистемная техника. – 2018. – Т. 20. – № 10. – С. 613 – 624.
70. Srinivasan M., Vaidya M.D., Kulkarni D.R., Bhatia T.B. Study of ESBI and Sensitivity Characteristics of Ag-O-Cs Systems for Image Tubes // Advances in Electronics and Electron Physics. – 1985. – V. 64. – P. 403 – 409.
71. Costello K., Davis G., Weiss R., Aebi V. Transferred electron photocathode with greater than 5% quantum efficiency beyond 1 micron // SPIE. – 1991. – Vol 1449. – P. 40 – 50.
72. Chernikov A.S., Chernook S.G., Nolle E.L., Prokhorov A.M., Schelev M.Y., Sokol E.G. Properties of IR photocathodes on InGaAs/InP heterostructures with Schottky barrier intended for streak tubes // SPIE. – 1995. – Vol. 2513.
73. Грузевич Ю.К., Гордиенко Ю.Н., Балясный Л.М., Альков П.С., Иванов В.Ю., Дятлов А.Л., Ваценко П.И. Фотоприемный модуль с фотокатодом с барьером Шоттки на основе структуры InP/InGaAs/InP:Ag и с чувствительностью до 1,7 мкм // Прикладная физика. – 2015. – №4. – С. 76 – 81.
74. Патент US8421012B2 Low energy portable low-light camera with wavelength cutoff; МПК H01L27/14643 / V.W. Aebi; заявитель и патентообладатель Intevac, Inc., Santa Clara, CA (US); заявл. 31.08.2010; опубл. 03.03.2011 – 7 с.
75. Патент EP0472703B1 Improved transferred electron III-V semiconductor photocathode МПК H01J1/34 / К.А. Costello, W.E. Spicer, V.W. Aebi; заявитель и патентообладатель Intevac, Inc., Santa Clara, CA (US); заявл. 13.02.1991; опубл. 20.03.1996 – 14 с.
76. Патент JP2006202653A Semiconductor photoelectric cathode МПК H01J1/34 / М. Aragaki, Т. Hirohata, Т. Mochizuki; заявитель и патентообладатель Hamamatsu Photonics, (JAP); заявл. 21.01.2005; опубл. 03.08.2006 – 17 с.
77. Патент US6903363B2 Photocathode МПК H01L29/06 / М. Aragaki, Т. Hirohata, Т. Mochizuki, М. Yamada; заявитель и патентообладатель Hamamatsu Photonics, (JAP); заявл. 14.11.2002; опубл. 07.06.2005 – 13 с.

78. Costello K., Aebi V., Davis G., Weiss R. Transferred electron photocathode with greater than 20% quantum efficiency beyond 1 micron // SPIE. – 1995. – V 2550. – P. 177 – 188.
79. Costello K., Davis G., Weiss R., Aebi V. Transferred electron photocathode with greater than 5% quantum efficiency beyond 1 micron // SPIE. – 1991. – V 1449. – P. 40 – 50.
80. Costello K., Davis G., Weiss R. Photocathode development for a 1300 nm streak tube // SPIE. – 1993. – Vol. 2022. – P. 34 – 44.
81. Чиркунова А.А. Метод повышения качества изображений объектов, маскированных фоном, комбинированием спектральных диапазонов DSPA // Вопросы применения цифровой обработки сигналов. – 2016. – Т. 6. – № 4. – С. 927 – 930.
82. Онуфрей А.Ю., Разумов А.В., Черногубов А.В., Ваганов А.А. Обоснование требований к техническим характеристикам бортовой оптико-электронной аппаратуры малых космических аппаратов ДЗЗ // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2018. – № 2. – С. 54 – 60.
83. Mohanty S.S., Mishra S., Mohanty S, Mishra G.P. An extensive analysis of In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP surrounding gate MOSFET to enhance the electrostatic performance using delta-doped technique // Devices for Integrated Circuit (DevIC). – 2019. – P. 53-57.
84. Pearsall T.P., Eaves L., Portal J.C. Photoluminescence and impurity concentration in Ga_xIn_{1-x}As_yP_{1-y} alloys lattice-matched to InP // Journal of Applied Physics. – 1983. – Vol. 54. – N. 2. – P. 1037 – 1047.
85. Сумм Б.Д. Основы коллоидной химии. – М.: Академия, 2007. – 240с.
86. Белл М.Л. Эмиттеры с отрицательным электронным средством. – М.: Энергия, 1978. – 190 с.
87. Михайлов А.И., Кабанов В.Ф., Жуков Н.Д. Особенности автоэлектронной эмиссии из субмикронных выступов шероховатой поверхности антимонида индия // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т. 41. – № 12. – С. 13 – 14.

88. Gonzalez L.P., Murray J.M., Krishnamurthy S., Guha S. Wavelength dependence of two photon and free carrier absorptions in InP // *Optics Express*. – 2009. – Vol. 17(11). – P. 8741–8748.
89. Никонов А.В., Куляхтина Н.М., Болтарь К.О., Яковлева Н.И. Модель показателя преломления эпитаксиальных слоёв InP и InGaAsP // *Прикладная физика*. – 2015. – Т. 1. – № 1. – С. 83 – 86.
90. Бланк Т.В., Гольдберг Ю.А. Механизмы протекания тока в омических контактах металл–полупроводник // *Физика и техника полупроводников*. – 2007. – Т. 41. – № 11. – С. 1281 – 1308.
91. Terekhov A.S., Pastuzska S., Hoppe M., Orlov D.A., Scheibler H., Schwalm D., Weigel U., Wolf A. GaAs-photocathode stability in extreme high vacuum [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.jlab.org/intralab/calendar/AVS/we2.html>. – Дата обращения: 14.02.2021.
92. Вилькин Е.Г., Пашук А.В. Сверхвысоковакуумная установка для изготовления приборов с фотокатодами на основе соединений АІІВV // *Вакуумная техника и технология*. – 2009. – Т.15. – № 2. – С. 218 – 219.
93. Губанов С.В., Пустовойт Ю.М., Столяров В.Л. Разработка и изготовление насосов на основе нераспыляемых геттеров для высоковакуумной откачки // *Вакуумная техника и технология*. – 2011. – Т.11. – № 3. – С. 107 – 114.
94. Kuech T.F. Selective epitaxy of compound semiconductors: novel sources // *Semicond. Sci. Technol.* – 1993. – Vol. 8. – N. 6. – P. 967 – 978.
95. Жуховицкий А.А., Шварцман Л.А. *Физическая химия*. – М., *Металлургия*, 1987. – 688 с.
96. Danielli J., Rosenberg M., Cadenhead D. Progress in surface and membrane science // *Acad. Press*. – 2013. – P. 115.
97. Isomura N., Tsukamoto S., Iizuka K., Arakawa Y. Investigation on GaAs surface treated by As-free high temperature surface cleaning method // *Journal of Crystal Growth*. – 2007. – Vol. 302. – P. 26 – 29.

98. Tereshchenko O.E., Chikichev S.I., Terekhov A.S. Atomic structure and electronic properties of HCl–isopropanol treated and vacuum annealed GaAs (100) surface // *Applied Surface Science* – 1999. – N. 142. – P. 75 – 80.
99. Kikuchi D., Matsui Y., Adachi S. Chemically treated InP(100) surfaces in aqueous HCl solutions // *Journal of Electrochemical Society*. – 2000. – Vol. 147. – N. 5. – P. 1973 – 1978.
100. Sun Y., Liu Z., Machuca F., Pianetta P., Spicer W. Optimized cleaning method for producing device quality InP(100) surfaces // *SLAC-PUB* – 2007. – N. 97. – P. 124902 – 124909.
101. Sun Y., Liu Z., Pianetta P. Formation of Cesium Peroxide and Cesium Superoxide on InP Photocathode Activated by Cesium and Oxygen, *SLAC-PUB* – 2007. – N. 102. – P. 074908 – 074916.
102. Chanlek N., Herbert J., Jones R., Jones L., Middleman K., Militsyn B. The degradation of quantum efficiency in negative electron affinity GaAs photocathodes under gas exposure // *J. Phys. D: Appl. Phys* – 2014. – N. 47. – P. 55110 – 55116.
103. Chanlek N., Herbert J., Jones R., Jones L., Middleman K., Militsyn B. High stability of negative electron affinity gallium arsenide photocathodes activated with Cs and NF₃ // *Journal of Physics D Applied Physics*. – 2015. – Vol. 48. – N. 37. – P. 375102.
104. Liu Z., Sun Y., Peterson S., Pianetta P. Photoemission study of Cs–NF₃ activated GaAs (100) negative electron affinity photocathodes // *Appl. Phys. Lett.* – Vol. 92. – P. 241107.
105. Gatos C.H., Vaughan J.J., Lagowski J., Gatos H.C. Cathodoluminescence of InP // *Journal of Applied Physics*. – 1981. – Vol. 52. – N. 3. – P. 1464–1469.
106. Xiaohong X., Dongsheng H., Yuming L., Jucai Y. Samarium doped silicon clusters SmSi_n and their anions: Structures, thermochemistry, electron affinities, and magnetic moments // *Comp. and Theoretical Chemistry*. – 2015. – Vol. 1074. – P. 1 – 8.
107. Yijun Z., Jun N., Jijun Z., Xinlong C., Yuan X., Benkang C., Feng S. Surface activation behavior of negative-electron-affinity exponential-doping GaAs photocathodes // *Optics Communications*. – 2014. – Vol. 321. – P. 32 – 37.

108. Ziegler J., Fertig D., Kaiser B. Preparation and Characterization of GaP Semiconductor Electrodes for Photoelectrochemical Water Splitting // EMRS Symposium T. – 2012. – Vol. 22. – P. 108 – 113.
109. Yan-Qiang C., Xue-Fei L., Ai-Dong L., Hui L., Di W. The combination self-cleaning effect of trimethylaluminium and tetrakis (dimethyl-amino) hafnium pretreatments on GaAs // Applied Surface Science. – 2012. – Vol. 263. – P. 497 – 501.
110. 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.
111. 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.
112. Xu Y., Chang B., Chen L., Chen X., Qian Y. Comparison of GaAs photocathode grown by MOCVD and MBE: a first-principle and experimental research // Journal of Materials Science Materials in Electronics. – 2017. – Vol. 28 – N. 10 – P. 7429–7436.
113. Bourree E.L., Chasse D.R., Thamban S., Glosser R. Comparison of the optical characteristics of GaAs photocathodes grown using MBE and MOCVD // SPIE. – 2003. – Vol. 4796 – P. 1.
114. Amano H., Kito M., Hiramatsu K., Akasaki I. P-Type Conduction in Mg-Doped GaN Treated with Low-Energy Electron Beam Irradiation (LEEBI) // Japanese Journal of Applied Physics. – 1989. – Vol. 28 – N. 12 – P. 2112.
115. Pohl U.W. Epitaxy of Semiconductors: Introduction to Physical Principles // Springer. – 2013. – 339 с.
116. Massies J., Turco F., Contour J. Application of the technique of electron diffraction intensity oscillations at grazing incidence to the growth of III-V semiconductors by molecular beam epitaxy // Japanese Journal of Applied Physics. – 1986. – Vol. 25. – N 8. – P. 664 – 667.
117. Акчурин Р.Х., Мармалюк А.А. МОС-гидридная эпитаксия в технологии материалов фотоники и электроники. – М: ТЕХНОСФЕРА, 2020. – 488 с.

118. 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.
119. 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.
120. 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.
121. Sen P., Pickard D.S., Schneider J.E., McCord M.A., Pease R.F., Baum A.W., Costello K.A. Lifetime and reliability results for a negative electron affinity photocathode in a demountable vacuum system // *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*. – 1998. – V 16. – N. 6. – P. 3380 – 3384.
122. 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.
123. Патент US6285018B1 Electron bombarded active sensor; МПК H01L31/062 / V.W. Aebi, J.J. Boyle; заявитель и патентообладатель Intevac, Inc., Santa Clara, CA (US), Charles Stark Draper Laboratory Inc., Cambridge, MA (US); заявл. 20.08.1999; опубли. 04.09.2001 – 11 с.
124. Dyumin, V., Smirnov, K., Davydov, V., Myazin, N. Charge-coupled Device with Integrated Electron Multiplication for Low Light Level Imaging // *Proceedings of the 2019 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics, EExPolytech*. – 2019. – V. 8906868. – P. 308 – 310.
125. Khazi I., Mescheder U. Surface polishing of rough (110) silicon plane by HNA etching resulting from wet anisotropic KOH etching // *MikroSystemTechnik Kongress*. – 2015. – Vol. 1. – P. 417 – 420.

126. D'Alonzo D., Froeyen M., Schepers G., Di Fabio G., Van Aerschot A., Herdewijn P., Palumbo G., Guragna A. 1',5'-Anhydro-1-ribo-hexitol Adenine Nucleic Acids (α -1-HNA-A): Synthesis and Chiral Selection Properties in the Mirror Image World // *J. Org. Chem.* – 2015. – Vol. 80. – N. 10. – P. 5014 – 5022.
127. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация. – М.: Наука, 1983. – 360с.
128. Зорин Е.И., Павлов П.В., Тетельбаум Д.И. Ионное легирование полупроводников. – М.: Энергия, 1975. – 128с.
129. KURO Back-Illuminated Scientific CMOS Camera [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.princetoninstruments.com/wp-content/uploads/2020/07/KURO-datasheet_all_models_07292020.pdf. – Дата обращения: 10.09.2020.
130. Голицын А.А. Аппаратно-программный комплекс для исследования возможностей применения ПЗС-фотоприёмников в составе активно-импульсных систем наблюдения // *Автометрия.* – 2019. – Т. 55. – № 5. – С. 107 – 114.
131. Hamamatsu Guide to streak cameras [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/sys/SHSS0006E_STREAK.pdf. – Дата обращения: 10.09.2020.
132. Van Roosbroeck W. Theory and yield and Fano factor of electron-hole pairs generated in semiconductors by high energy particles // *Physical Review.* – 1965. – Vol. 139. – N. 5. – P. 1702 – 1716.
133. Williams Jr, George M. A high-performance LLLTV CCD camera for nighttime pilotage: in *Electron Tubes and Image Intensifiers* // *Proceedings of SPIE.* – 1992. – Vol. 1655.
134. Aebi V.W., Costello K.A., Edgecumbe J.P., Boyle J.J., Robbins W.L., Bell R., Burt D., Harris A., Palmer I., Pool P. Gallium arsenide electron bombarded CCD technology, *Image Intensifiers and Applications; and Characteristics and Consequences of Space Debris and Near Earth Objects* // *Proceedings of SPIE.* – 1998. – Vol. 3434. – P. 37 – 44.

135. Suyama M., Fukasawa A., Haba J., Iijima T., Iwata S., Sakuda M., Sumiyoshi T., Takasaki F., Tanaka M., Tsuboyama T., Yamada Y. Development of a multi-pixel hybrid photodetector with high quantum efficiency and gain // *IEEE Trans. Nucl. Sci.* – 2004. – Vol. 51. – N. 3. – P. 1056 – 1059.
136. Nikzad S., Yu Q., Smith A.L., Jones T.J., Tombrello T.A., Elliot S.T. Direct detection and imaging of low-energy electrons with delta-doped charge-coupled devices // *Appl. Phys. Lett.* – 1998. – Vol. 73. – N. 23. – P. 3417 – 3419.
137. Беднарж Б., Ельцов А.В., Заховал Я., Краличек Я., Юрре Т.А. Светочувствительные полимерные материалы. – Л.: Химия, 1985 – 296 с.
138. Hamamatsu Silicon Photodiodes Handbook cameras [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf. – Дата обращения: 10.09.2020.
139. Defay X., Mondragon E., Lanfranchi J.-C., Langenkamper A., Munster A., Potzel W., Schonert S., Wawoczny S., Willers M. Silicon PIN diodes as Neganov-Trofimov-Luke cryogenic light detectors // *Journal of Low Temperature Physics.* – 2019. – V. 194. – P. 99 – 105.
140. Lenfant S., Guerin D., Tran Van F., Chevrot C., Palacin S., Bourgoin J.P., Bouloussa O., Rondelez F., Vuillaume D. Electron transport through rectifying self-assembled monolayer diodes on silicon: Fermi level pinning at the molecule-metal interface // *J. Phys. Chem. B.* – 2006. – V. 110(28). – P. 13947 – 13958.
141. 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.
142. Гостев А.В., Дицман С.А., Забродский В.В., Забродская Н.В., Лукьянов Ф.А., Рау Э.И., Сеннов Р.А., Суханов В.Л. Характеризация полупроводниковых детекторов монокинетических и отраженных электронов с энергией 1-30 кэВ // *Известия Российской академии наук. Серия физическая.* – 2008. – Т.72. – № 11. – С. 1539.

143. Korpar S., Adachi I., Fujita K., Fukushima T., Gorisek A. Proximity focusing RICH with TOF capabilities // Nucl. Instrum. Meth. – 2007. – Vol. 572. – P. 432 – 433.
144. Smirnov K.J.; Davydov V.V.; Glinushkin A.P. Long-range night vision camera based on SWIR photocathode // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1695. – N. 1. – P. 012090.
145. Гибридные телевизионные приборы и многоканальные фотоприемники мгновенного действия [Электронный ресурс] – Режим доступа: – http://www.niielectron.ru/product-category/nasha_produkciya/gibridnye-i-sochlenennye-fotoelektronnye-pribory – Дата обращения: 14.02.2021.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица 1.1 – Светотехнические параметры гибридного прибора с УФ фотокатодом производства АО ЦНИИ «Электрон»

№	Основные характеристики	Макет №1
1.	Рабочий диапазон спектральной чувствительности фотокатода, нм	200 – 300
2.	Диапазон максимальной чувствительности, нм	250 – 280
3.	Спектральная чувствительность в максимуме, мА/Вт	16 – 30
4.	Квантовый выход, %: максимальный ($\lambda = 220$ нм), на $\lambda = 250$ нм	8 10
5.	Подавление чувствительности: на $\lambda = 320$ нм, раз на $\lambda = 350$ нм, раз	3 – 5 30 – 50
6.	Размер входного изображения, мм	9,8×13,1
7.	Число элементов ПЗС	760 × 580
8.	Облученность, Вт/элемент (Вт/см ²)	$2 \cdot 10^{-13}$ ($3,4 \cdot 10^{-8}$)
9.	Разрешающая способность, твл	400 – 450
10.	Величина выходного сигнала, мВ	≥ 300
11.	Величина темнового сигнала, мВ	≤ 10
12.	Сигнал/шум (полоса пропускания 6,3 МГц)	20 – 25

Таблица 1.2 – Характеристики прибора LIVAR M506

Тип фотокатода	Фотокатод с переносом электронов
Разрешение	640x512 пикселей (8,576 мм x 6.861 мм)
Размер пикселя	13,4 мкм x 13,4 мкм
Спектральный диапазон	950-1650 нм
Квантовая эффективность	не менее 25% на длине волны 1550 нм
Предельное разрешение	не менее 20 линий на миллиметр
Темновой ток	не более 100 нА/см ²
Динамический диапазон	не менее 48 дБ
Количество регулярных элементов	не менее 99,8 %
Кадровая частота	не менее 30 кадров в секунду в полнокадровом режиме
Режим камеры	активно-импульсный, пассивный
Строб высоковольтного источника напряжения	Минимальная длительность импульса 70 нс Время спада и нарастания 65 нс
Входное напряжение	Камера, высоковольтный ИП 12В Модуль охлаждения 6В
Мощность	Камера 3 Вт Высоковольтный ИП 1,2 Вт Модуль охлаждения 22,2 Вт
Эксплуатационная температура	-40 °С - +70 °С

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица 2.1 – Растворы, используемые в процессе травления структур

№	Состав травителя	Концентрация	Время травления, мин	Особые условия
1	H ₂ SO ₄ :H ₂ O ₂ :H ₂ O	4:1:100	4	УЗ-камера
2	H ₂ SO ₄ :H ₂ O	1:10	2	-
3	H ₂ SO ₄ :H ₂ O	1:3	0,5	-

Таблица 2.2 – Цикл прогревов фотокатодной структуры

Отсек вакуумной Установки	Вакуум на начало прогрева	Предельная T _{пред} ⁰ С	Время на T _{пред} ⁰ С, мин
Загрузочная камера	5·10 ⁻⁶ Па	150	10
Камера обработки корпуса и запрессовки	1·10 ⁻⁸ Па	200	30
Камера изготовления ФК узла	5·10 ⁻⁹ Па	300	5 + плавный набор, спад (15+10)

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица 3.1 – Импульсные параметры диодов

Партия	Кремний	R, Ом см	№ линейки	№ диода	U _{диод} , В	$\tau_{0,5}$, нс	$\tau_{нар}$, нс	№ рис
Lp/2	КДБ 350 мкм	3000	6	11	-160	7-7,2	6	
				12		8,3	6,4	
			7	4		8	6	4.1 5x
			1	4		5,5	5,5	
			10	8	-200	5	5,2-5,5	
				9	-140	3,5	1,6-1,8	
			2	5	-30	4,5	1,6	
					-140	2,5	1,4	
Lp/1	Мембрана КДБ 70 мкм 30 мкм	3000	6	5	-31,3	≈ 3	$\approx 1,6$	
					-140	≈ 2	≈ 1	
			6	5	-160	2,5	1,6	4.1 6
			3	5	-60	4	1,6	
					-160	3,5	1,6	

Таблица 3.2 – Типы линеек и режимы исследования

Номер кривой на рисунке 4.19. –	Партия	№ линейки	№ диода	U диода, В	
1	Lp/1	6	5	-120	
2				-140	
3	Lp/2	3	3	-150	
4				2	-100
5				4	-150