

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
«ЦИКЛОН»

КУЛИКОВ ВЛАДИМИР БОРИСОВИЧ

На правах рукописи



**РАЗРАБОТКА МНОГОЭЛЕМЕНТНЫХ ФОТОПРИЕМНЫХ УСТРОЙСТВ
НА ОСНОВЕ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ**

Специальность: 05.27.01. « Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах»

Диссертация на соискание
ученой степени доктора
технических наук

Москва
2018г.

Содержание:

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1.	
СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ИК ФПУ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ.....	15
1.1. ФПУ СКЯ среди аналогов на основе других материалов.....	15
1.2. Состояние исследований и разработок фотоприемников и ФПУ на основе СКЯ	19
1.2.1. Принцип работы ФП на основе СКЯ	19
1.2.2. ФПУ на основе СКЯ и их применения	24
1.3. Физико-технологические проблемы ФПУ СКЯ	29
1.4. Задачи исследований	32
ГЛАВА 2	
РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКЯ	
2.1. Особенности технологий выращивания СКЯ	34
2.2. Исследования фоточувствительных СКЯ, выращенных методом МОСГЭ на проводящих подложках	38
2.3. Спектры фоточувствительности	46
2.4. Вольт-амперные характеристики СКЯ	51
2.4.1. Определение механизма тепловой генерации	52
2.4.2. Влияние непрямоугольности квантовых ям	56
2.4.3. Следствия из модели непрямоугольных квантовых ям	65
2.5. Абсолютная чувствительность	66
2.5.1. Методика измерения АЧ	67
2.5.2. Экспериментальные результаты и их обсуждение	68
2.5.3. Чувствительность при нормальном падении излучения	74

2.5.3.1. Экспериментальные образцы и особенности измерений	77
2.5.3.2. Результаты измерений и их обсуждение	78
2.6. Коротковолновые и двухспектральные ФП СКЯ	84
2.7. Чувствительность длинноволновых ФП СКЯ при комнатной температуре	88
2.8. Возможность повышения рабочей температуры ФП СКЯ	93

ГЛАВА 3

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ГИБРИДНЫХ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ СКЯ

3.1. Технологические особенности создания многоэлементных фотоприемников на основе СКЯ	105
3.1.1. Технология травления СКЯ	107
3.1.2. Формирование контактов	110
3.1.3. Напыление диэлектриков	111
3.1.4. Формирование индиевых столбиков	111
3.1.5. Сборка ГФС методом перевернутого кристалла (flip-chip assembly)	115
3.2. Конструкции ГФС	120
3.2.1. Линейные ГФС	120
3.2.2. Матричные ГФС	122
3.2.2.1. ГФС с XY-адресацией	122
3.2.2.2. Расчет конструкций фазовых дифракционных решеток как устройств ввода излучения в ФП СКЯ	132
3.2.2.3. Устройство ввода без спектральной селекции	142
3.2.2.4. Матричные ГФС с кадровым накоплением	146
3.3. ГФС форматов 384x288 и 640x512 элементов с шагом 20 мкм	157
3.3.1 Основные технические требования к ГФС с малым шагом	157

3.3.2 Конструктивные и технологические особенности ГФС с малым шагом	159
--	-----

ГЛАВА 4 .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГФС НА ОСНОВЕ СКЯ	168
4.1. Измерительное оборудование и методики измерений	168
4.2. Результаты измерений ГФС	176
4.3. Получение изображений с помощью одно - и двухспектральных ГФС	181
4.4. Результаты измерений характеристик ГФС форматов 384x288 и 640x512 элементов с шагом 20 мкм	185
4.5. Исследования ГФС на основе ФП СКЯ в условиях интенсивного лазерного облучения	194
4.5.1. Облучение в непрерывном режиме	194
4.5.2. Облучение в импульсном режиме	199
4.5.3. Моделирование процесса разогрева ГФС и интерпретация результатов	204

ГЛАВА 5.

РАЗРАБОТКА ФПУ НА ОСНОВЕ СКЯ ГФС И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СОСТАВЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ	210
5.1 Особенности ФПУ на основе СКЯ	210
5.2 Результаты исследований по созданию экспериментальных образцов СКЯ ФПУ	211
5.2.1. Микрокриогенная система (МКС)	212
5.2.2 Вакуумируемый корпус-криостат (ВКК)	213
5.2.3 Сборка ФПУ	216
5.3. Измерение характеристик ФПУ	218

5.4. Результаты разработки ФПУ форматов 384x288 и 640x512 элементов с шагом 20 мкм	225
5.4.1. Конструкция ВКК	227
5.4.2 Конструкция микрокриогенной системы	229
5.4.3 Особенности электронного блока управления и предварительной обработки сигналов (ЭБУ)	233
5.4.4. Особенности технологии сборки ФПУ	235
5.4.5. Результаты испытаний ФПУ на соответствие требованиям ТЗ	241
5.5. Результаты использования СКЯ ФПУ в составе тепловизионных приборов.....	247
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	257
ЛИТЕРАТУРА	260

1. ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Достигнутые в конце прошлого века успехи в области эпитаксиального выращивания сложных многослойных полупроводниковых структур в системе материалов типа A_3B_5 позволили приступить к созданию электронных приборов, работа которых основана на ранее не использовавшихся физических принципах. Возможность в процессе роста контролировать толщину эпитаксиальных пленок с точностью до одного атомного слоя позволила создавать квантово-размерные структуры различной конфигурации, в том числе фоточувствительные структуры с квантовыми ямами (СКЯ). Современные методы эпитаксии – молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и МОС-гидридная эпитаксия (МОСГЭ), – обеспечивают разброс состава слоев по основному веществу и легирующей примеси не более нескольких процентов на пластинах диаметром свыше 4 дюймов и позволяют создавать СКЯ с практически любой допустимой в данной системе материалов зонной структурой и высокой однородностью приборных параметров. Такая возможность послужила стимулом для разработки на основе СКЯ многоэлементных фотоприемников, чувствительных в инфракрасном (ИК) диапазоне с длинноволновой границей от 3 до 20 мкм. [1]. В зарубежной литературе такие фотоприемники называют QWIP (quantum well infrared photodetector).

Разработка ИК фотоприемников (ФП) на основе СКЯ ведется уже около 30 лет. За достаточно короткий промежуток времени проделан путь от физического эффекта до сложнейших фоточувствительных микросхем и ИК систем на их основе. Сегодня разработаны матричные моно- и многоспектральные фотоприемники формата свыше 1000x1000 элементов, а тепловизионные камеры на их основе обеспечивают температурное разрешение в тысячные доли градуса. Столь впечатляющие результаты позволили рассматривать матричные фотоприемники на основе СКЯ в качестве альтернативы традиционным

приборам на основе узкозонных твердых растворов (УТР) типа HgCdTe (русская аббревиатура КРТ) или, по крайней мере, как класс приборов, имеющих свою нишу в семействе многоэлементных ИК фотоприемников. Вместе с тем, наряду с очевидными достоинствами: высокой однородностью параметров на большой площади материала, технологичностью, стойкостью к внешним воздействующим факторами др., - в ходе разработки ФП СКЯ были выявлены и проблемные характеристики, по которыми они уступают аналогам на основе УТР. К таким характеристикам, как правило, относят более низкие рабочую температуру и квантовую эффективность. За рубежом работы по преодолению указанных проблем продолжаются до сих пор как в университетских (академических) исследовательских центрах, так и в компаниях, занимающихся разработкой аппаратуры на основе ФП СКЯ. Работы ведутся в направлении изучения фундаментальных процессов, влияющих на генерацию, рекомбинацию, перенос носителей заряда в ФП СКЯ, возможностей управления зонной структурой СКЯ и т.д. Результаты таких исследований позволяют вносить усовершенствования в конструкцию СКЯ и ФП на их основе, что в свою очередь вызывает необходимость совершенствования технологии изготовления ФП СКЯ.

Конечной целью разработки ИК ФП любой конфигурации является создание на его основе устройства, позволяющего формировать изображение в той или иной области ИК спектра. Одной из наиболее распространенных его разновидностей является тепловизионная камера (по аналогии с видеокамерой), называемая также тепловизионный прибор (ТВП) или тепловизор. Ключевым элементом ТВП является фотоприемное устройство (ФПУ), осуществляющее преобразование входного ИК изображения в электрические сигналы, передаваемые на устройство их обработки и далее на средство отображения (монитор). ФПУ представляет собой гибридную фоточувствительную схему (ГФС), в которой фотоприемная секция в виде линейного или матричного ФП, в том числе и на основе СКЯ, тем или иным способом соединяется с микросхемой

считывания сигналов – мультиплексором. ГФС при этом, как правило, размещается в вакуумируемом корпусе – криостате (ВКК), состыкованном с микрокриогенной системой (МКС). Из описания состава ФПУ следует, что на его фотоэлектрические характеристики могут в значительной степени влиять и свойства мультиплексора. Поэтому сегодня при разработке ФПУ наряду с исследованиями ФП СКЯ ведутся поиски конструкций мультиплексоров, обеспечивающих максимальную реализацию возможностей ФП. Кроме того, важнейшим этапом создания ФПУ является разработка технологии его сборки: размещения в нем ГФС, вакуумирование, стыковка с МКС и т.д. Таким образом ФПУ является важнейшим элементом любого ТВП, определяющим его основные характеристики.

Появление ФП СКЯ новых конструкций и ФПУ на их основе расширяет прежние и рождает новые области их применений, что в свою очередь увеличивает их объемы выпуска и снижает цену приборов на их основе. В России разработки по созданию ФПУ на основе СКЯ в силу известных причин до недавнего времени не велись так масштабно, как в наиболее развитых странах мира, что сказалось на отечественном научно-технологическом заделе в этой области и на уровне качества военной и гражданской техники, в которой они могли быть использованы. Таким образом, разработка многоэлементных ФП СКЯ и ФПУ на их основе, включающая в себя как фундаментальные исследования, так и совершенствование их конструкций и технологий изготовления, является актуальной задачей.

Целью работы являлись исследование и разработка многоэлементных ФП СКЯ, изготовленных в системе материалов InGaAs/AlGaAs, чувствительных в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8-12 мкм, и многоэлементных ФПУ на их основе, предназначенных для использования в тепловизионных приборах различного назначения.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести теоретические и экспериментальные исследования основных фотоэлектрических характеристик ФП СКЯ с целью определения возможностей создания на их основе многоэлементных ГФС с заданными характеристиками.

2. На основе проведенных исследований ФП СКЯ разработать конструкции ГФС, в которых обеспечивались бы оптимальное согласование фотоприемной секции со схемой считывания (мультиплексором), а также теплофизическая и весогабаритная совместимость с ВКК и МКС, входящих в состав ФПУ.

3. Разработать базовые технологические маршруты изготовления ФП СКЯ, ГФС и ФПУ на их основе.

4. Провести исследования разработанных ФПУ с целью определения их эксплуатационных возможностей.

Научная новизна

1. Экспериментально установлено нарушение селективности ФП СКЯ по отношению к поляризации сигнального излучения, проявляющееся в наличии значительной фоточувствительности при его нормальном падении без использования специальных устройств ввода. Указанное нарушение селективности чувствительности в большей степени проявляется в образцах, полученных методом МОСГЭ и в меньшей степени в образцах, полученных методом МЛЭ. Обнаруженный эффект предположительно связан с наличием встроенного электрического поля на границе яма-барьер, возникающего из-за диффузии кремния из ямы в барьер.

2. Получены экспериментальные результаты, дающие основания полагать, что статистика электронов в СКЯ описывается моделью, согласно которой генерация носителей происходит из основного состояния в яме в свободную зону с двумерной плотностью состояний.

3. Разработана теоретическая модель вольт-амперной характеристики (ВАХ) ФП СКЯ, учитывающая механизм тепловой генерации носителей, непрямоугольность барьеров и полевую зависимость их высоты. Расчетные ВАХ удовлетворительно совпадают с экспериментальными в рабочей области напряжений 1-6 В.

4. Показано, что резкость границ яма-барьер существенным образом влияет на фотоэлектрические характеристики ФП СКЯ. Чем резче границы, тем ниже темновые токи, выше пороговые характеристики.

5. Экспериментально показана возможность эксплуатации ФП СКЯ при комнатных температурах, проведены оценки достижимых характеристик.

6. Проведены экспериментальные исследования стойкости ГФС с ФП СКЯ по отношению к лазерному излучению высокой мощности. Подтверждена значительно более высокая стойкость ФП СКЯ к лазерному воздействию по сравнению с узкозонными аналогами. Установлены потенциально наиболее уязвимые по отношению к лазерному воздействию узлы в конструкции ГФС и предложены способы повышения их стойкости.

7. Разработаны конструкции и базовые технологические маршруты изготовления ГФС различного назначения. Благодаря использованию указанных разработок впервые в России были созданы опытные образцы одно – и двухспектральных ГФС с ФП СКЯ и ФПУ на их основе.

Положения, выносимые на защиту

1. ФП СКЯ при равномерном легировании квантовой ямы донорной примесью обладают пониженной селективностью фоточувствительности по отношению к поляризации сигнального излучения, проявляющейся в наличии значительной фоточувствительности при его нормальном падении без использования специальных устройств ввода. Указанное снижение селективности чувствительности в большей степени проявляется в образцах,

полученных методом МОСГЭ и в меньшей степени в образцах, полученных методом МЛЭ.

2. Экспериментальные вольт-амперные характеристики ФП СКЯ имеют линейную зависимость от температуры в предэкспоненциальном выражении, что характерно для модели статистики электронов в СКЯ, согласно которой генерация носителей происходит из основного состояния в яме в свободную зону с двумерной плотностью состояний.

3. Темновой ток в ФП СКЯ имеет тем большую величину, чем менее резкой является граница барьер-яма, в направлении которой над квантовой ямой при заданной полярности напряжения смещения движутся электроны.

4. ФП СКЯ имеет тем большую величину абсолютной чувствительности, чем менее резкой является граница барьер-яма, в направлении которой над квантовой ямой при заданной полярности напряжения смещения движутся электроны, однако пороговая чувствительность в этом случае оказывается меньше, чем при противоположном направлении движения электронов.

5. Базовые конструкции и технологии изготовления многоэлементных ФПУ СКЯ обеспечивают возможность создания на их основе тепловизионных приборов различного назначения с характеристиками, отвечающими современным требованиям.

Практическая значимость работы

Результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленные в настоящей работе, были использованы в ряде НИР и ОКР, выполненных по заказу различных ведомств РФ с участием автора в качестве научного руководителя, главного конструктора и ведущего исполнителя. Проведенные исследования позволили достигнуть следующих практических результатов.

1. Исследования СКЯ позволили определить степень влияния непрямоугольности границ барьер-яма на их фотоэлектрические

характеристики. Построенная на основе проведенных исследований модель ВАХ позволила уточнить требования к технологическому процессу выращивания СКЯ с точки зрения обеспечения необходимой резкости границ.

2. На основе проведенных исследований были разработаны конструкции и базовые технологии создания линейных и матричных ГФС на основе СКЯ. С помощью указанных технологий созданы опытные образцы ГФС различных форматов, чувствительных в различных спектральных диапазонах. Среди них к наиболее значимым результатам следует отнести ГФС формата 640x512 элементов с шагом 20 мкм, а также двухспектральную ГФС, чувствительную в диапазонах 3-5 мкм и 8-12 мкм.

3. Предложены технические решения, направленные на повышение рабочей температуры и квантовой эффективности фотоприемников на основе СКЯ.

4. Разработаны конструкции и базовые технологии создания одно – и двухспектральных ФПУ, включающих ГФС на основе СКЯ, корпус - криостат с вакуумной изоляцией и микрокриогенную систему замкнутого типа. Созданные с использованием указанных технологий опытные образцы ФПУ с ГФС формата 640x512 элементов с шагом 20 мкм сопоставимы по своим фотоэлектрическим характеристикам с зарубежными аналогами.

5. На основе матричных ФПУ с кадровым накоплением изготовлены опытные образцы тепловизионных приборов и проведены испытания, показавшие их возможности при регистрации различных объектов.

Апробация работы

Основные результаты настоящей работы были представлены на следующих конференциях:

First International Conference on narrow gap semiconductors, Univ.of Southampton, UK.July 1992;

Международная конференция по ПЗС, Геленджик, сентябрь 1992г.;

Международная конференция “ПЗС-95”, Крым, п.Новый свет, октябрь 1995г.;

Международная конференция SPIE “Photonics West”, San-Jose, Jan. 1996.;

Международная конференция «Лазеры-99», Сочи, сентябрь 1999г.

2-я научно-техническая конференция «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли», Адлер, сентябрь 2005г.

XVII, XIX, XX, XXI, XXII, XXV Международные научно – технические конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2002 - 2018г.г.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 47 работ в отечественных и зарубежных источниках научно-технической информации.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения , 5 глав, заключения, списка литературы.

В первой главе представлен обзор состояния разработок в области создания ФПУ на основе СКЯ. Освещены наиболее важные проблемы, стоящие сегодня на пути указанных разработок.

Во второй главе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований отдельных фотоэлектрических характеристик ФП СКЯ, их зависимости от различных конструктивных параметров. В частности, рассмотрены особенности вольт-амперных характеристик ФП СКЯ. Проведены экспериментальные исследования механизмов тепловой генерации носителей в СКЯ. Теоретически исследовано влияние резкости границ КЯ на ВАХ. На основании полученных результатов разработана теоретическая модель ВАХ. Экспериментально исследована фоточувствительность СКЯ при нормальном падении излучения. На основе результатов исследований предложено объяснение наблюдаемых эффектов.

В третьей главе рассмотрены различные варианты конструкций многоэлементных ФП СКЯ и особенности технологии их изготовления. Представлены конструкции ГФС на основе ФП СКЯ, включая линейные ГФС, матричные приборы с ХУ адресацией и с кадровым накоплением, рассмотрены особенности сборки последних.

В четвертой главе представлены результаты экспериментального исследования ГФС различных конструкций. Рассмотрено измерительное оборудование и методики измерений. Проведены эксперименты по получению ИК изображений с помощью одно- и двухспектральных ГФС. Представлены результаты исследований ГФС в условиях интенсивного лазерного облучения.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований ФПУ на основе СКЯ, в том числе в составе ТВП.

Общий объем работы составляет 263 страницы, включая 132 рисунка и 8 таблиц. Список использованной литературы состоит из 95 наименований.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК В ОБЛАСТИ СОЗДАНИЯ ИК ФПУ НА ОСНОВЕ СТРУКТУР С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ.

1.1. ФПУ СКЯ среди аналогов на основе других материалов

Рассматриваемые в настоящей работе проблемы непосредственно связаны с созданием ИК систем различного назначения, разработки которых в настоящее время испытывают небывалый подъем. Одной из главных причин такого подъема стал прогресс в области разработки многоэлементных ФПУ, в состав которых, как правило, входит ГФС с тем или иным набором обеспечивающих ее работоспособность элементов (например, ВКК, МКС, предварительную электронику и др.). Современные ФПУ часто относят к третьему поколению приборов данного типа [1]. И хотя строгого общепризнанного определения нового поколения ФПУ нет, все же можно выделить ряд его характерных признаков: большой формат разложения изображения в фотоприемной матрице с характерным масштабом 1000x1000 элементов, что исключает необходимость использования узла оптико-механического сканирования; высокая частота кадров – свыше 100 Гц; высокие пороговые характеристики чувствительности; многоспектральность; наличие элементов предварительной обработки сигналов в мультиплексоре. Современные ФПУ можно условно разделить на два класса: охлаждаемые и неохлаждаемые. Первые обладают более высокими значениями характеристик чувствительности и разрешающей способности и используются в ИК системах, предназначенных для решения задач обнаружения и распознавания на больших расстояниях. К данному классу относятся и ФПУ на основе СКЯ, являющиеся предметом исследований, проводившихся в рамках настоящей работы. Кратко рассмотрим сегодняшнее состояние разработок в области охлаждаемых ФПУ и положение ФПУ на основе СКЯ в этом классе приборов.

Еще в конце 90-х годов прошлого века различные обзоры состояния и перспектив разработок охлаждаемых ИК фотоприемников включали в себя упоминания довольно обширного перечня приборов на основе различных фоточувствительных материалов, таких как примесный кремний, силициды платины, халькогениды свинца-олова, узкозонные твердые растворы InAsSb, HgCdTe, ФП СКЯ и др. Сегодня аналогичный перечень сократился фактически до трех основных технологий: 1) технологии твердых растворов HgCdTe; 2) технологии квантоворазмерных структур – СКЯ (QWIP) и ее более поздних производных – технологии структур с квантовыми точками (СКТ или QDIP) и 3) технологии сверхрешеток 2-го рода (CP2P или T2SL) в системе InAs/GaSb [1].

Твердые растворы HgCdTe (в русской аббревиатуре КРТ) считаются одними из наиболее перспективных фоточувствительных материалов, с помощью которых, как ожидалось, можно решить почти все задачи тепловидения. Однако эти ожидания пока оправдываются лишь отчасти. Если при создании ФПУ на диапазон 3-5 мкм на основе КРТ достигнуты показатели, характерные для приборов 3-го поколения, то для диапазона 8-12 мкм и более длинноволнового с приемлемыми характеристиками удастся пока производить только линейные и матричные фотоприемники относительно небольшого формата. Причиной этого явились высокая неоднородность характеристик КРТ для длинноволнового диапазона по площади кристалла, а также высокая чувствительность по отношению к различным внешним воздействующим факторам (температура, радиация и др.). В результате техническая возможность использования длинноволнового КРТ для ФПУ 3-го поколения находится под сильнейшим давлением экономических проблем, связанных с решением этой задачи: такие фотоприемники оказываются чрезвычайно дорогими даже для специальных применений. Возможность появления указанной проблемы была осознана разработчиками ИК систем более 20 лет

назад. Тогда же начались поиски альтернативных фоточувствительных материалов, позволяющих преодолеть отмеченные недостатки КРТ и максимально сохранить его достоинства. В ходе поисков были опробованы многочисленные материалы, содержащие в том или ином сочетании значительную часть элементов таблицы Менделеева. Проведенные поиски привели к появлению нового класса фоточувствительных материалов – квантоворазмерных гетероструктур или структур с квантовыми ямами – СКЯ. Эффект размерного квантования лежит в основе работы не только ФП СКЯ, но и более сложных в конструктивном и технологическом отношении приборов на квантовых точках – QDIP - и свёрхрешётках 2-го рода - T2SL. Однако приборы двух последних типов пока находятся в стадии создания экспериментальных образцов, и технологические проблемы, стоящие сегодня на пути их совершенствования, не дают пока возможности однозначно определить их перспективы. Так в приборах на основе QDIP, которым теоретические оценки предсказывают значительные преимущества по сравнению с QWIP по основным фотоэлектрическим характеристикам, сегодня удастся реализовать, главным образом, лишь одно из них, заключающееся в отсутствии селективности по отношению к поляризации сигнального излучения. Главной причиной такого положения является отсутствие технологической возможности надёжно контролировать размеры и однородность распределения квантовых точек в структуре. Приборы на основе T2SL показывают более убедительные результаты: они, подобно узкозонным аналогам, имеют большую квантовую эффективность, большее время жизни и, как следствие, большую рабочую температуру, чем QWIP, могут работать в фотовольтаическом режиме. Однако T2SL структуры по сравнению с КРТ имеют пока в несколько раз большую остаточную концентрацию примесей в активной области, что вызывает избыточные туннельные токи. Не решённой пока остаётся проблема надёжной пассивации боковой поверхности меза-диодов, что вызывает поверхностные

утечки и, в совокупности с туннельными утечками, приводит к ухудшению пороговых характеристик ФП. В результате ФП на основе T2SL сегодня приближаются по своим характеристикам к аналогам на основе КРТ, но еще далеки до приборной реализации в промышленных масштабах.

По своим физическим свойствам ФП СКЯ очень сходны с аналогами на основе примесных ФП (и по существу являются фотосопротивлениями), однако имеют по сравнению с ними ряд существенных преимуществ. Отметим следующие из них:

- более высокая рабочая температура (в диапазоне 8-12 мкм эта разница может достигать 20^0 - 30^0 K);
- как правило, более высокие квантовая эффективность и пространственное разрешение в случае матричных ФП;
- более высокая радиационная стойкость;
- возможность управлять спектром фоточувствительности.

При сравнении ФП СКЯ с аналогами на основе КРТ следует разделять одиночные (малоформатные) ФП и многоэлементные. При сравнении одиночных ФП приборы на основе КРТ имеют ряд преимуществ: более высокую рабочую температуру, более высокую квантовую эффективность и, как следствие последнего, более высокую пороговую чувствительность. При сравнении же многоэлементных ФП становятся более весомыми преимущества ФП СКЯ. Отметим следующие из них:

- высокая однородность параметров по площади кристаллов (разброс может быть не более 5%);
- высокая технологичность (при выращивании СКЯ и при изготовлении из них фотоприемников используются, в основном, те же технологии, что и при создании транзисторов на основе арсенида галлия);
- как следствие предыдущего преимущества относительно низкая стоимость;

- высокая стойкость по отношению к внешним воздействующим факторам, включая спецвоздействия;

- низкие поверхностные токи утечки, что исключает проблему пассивации поверхности чувствительных элементов и существенно упрощает электрическое согласование таких фотоприемников со схемами считывания сигналов;

- более простая технология создания многоспектральных матриц;

- возможность выращивания СКЯ на подложках большой площади (по крайней мере, на пластинах диаметром 100 мм), а значит изготавливать с меньшими затратами фотоприемники формата свыше 1000x1000 элементов.

Описанные выше преимущества ФП СКЯ по сравнению с аналогами на основе других материалов и технологий определили интерес к ним со стороны исследователей и разработчиков, не иссякающий уже на протяжении почти 30 лет.

1.2. Состояние исследований и разработок фотоприемников и ФПУ на основе СКЯ

1.2.1. Принцип работы ФП на основе СКЯ

В основе работы большинства фотонных ФП лежит одно общее явление: носитель тока (электрон, дырка, ион), находящийся в связанном (нейтральном) состоянии и не принимающий участия в создании электрического тока, при поглощении фотона переходит в свободное состояние, т.е. может перемещаться под действием электрического поля и создавать электрический ток. Такой ФП можно рассматривать как среду, содержащую множество потенциальных ям, в которых имеется, по крайней мере, по одному связанному энергетическому состоянию, занятому носителями заряда. Принцип формирования фоточувствительной среды из набора квантовых ям известен довольно давно (классические квантовые ямы теоретически исследовались еще на заре появления квантовой механики). Одними из первых аналогов такой среды стали ФП на основе примесной фотопроводимости. Однако примесные атомы в кремнии (германии, арсениде галлия и т.п.) задают строго фиксированные

энергетические характеристики квантовой ямы, что ограничивает возможности подстройки материала ФП к требованиям той или иной задачи. Поэтому у разработчиков ФП всегда был интерес к материалам, в которых можно, управляя «геометрическими» параметрами ямы - толщиной, высотой барьеров - изменять энергетическое положение уровней в ней. И благодаря прецизионным методам эпитаксии - МОСГЭ и в большей степени МЛЭ такие материалы появились. Наиболее успешной реализация указанной идеи оказалась в системе материалов GaAs/AlGaAs. Рис.1.1 поясняет принцип работы ФП СКЯ. В структурном отношении СКЯ представляет собой многослойную эпитаксиальную структуру, в которой чередуются слои GaAs – ямы и AlGaAs – барьеры (рис.1.2). Указанные материалы имеют различные значения ширины запрещенной зоны,

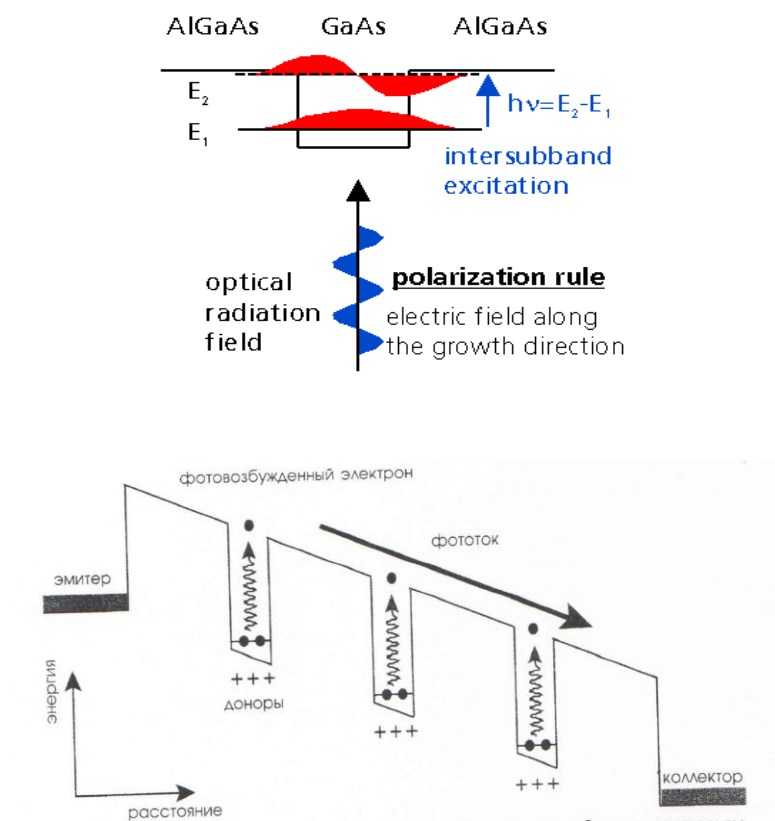


Рис.1.1. Принцип работы ФП СКЯ

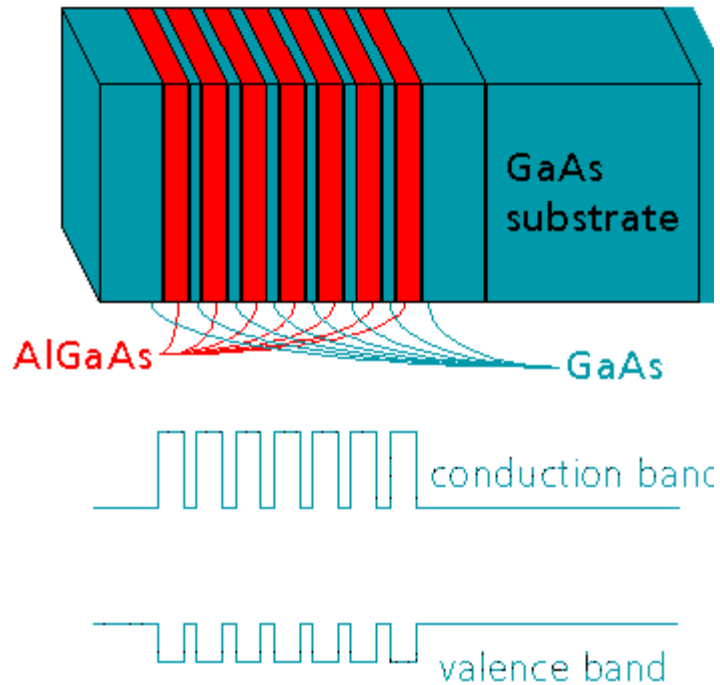


Рис.1.2. Зонная структура ФП СКЯ.

поэтому на границах слоев происходит так называемый разрыв зон, т.е. и в зоне проводимости и в валентной зоне формируются потенциальные ямы, соответственно для электронов и дырок. ФП СКЯ являются приборами на основных носителях заряда, т.е. такими, в которых носители, определяющие тип проводимости материала, определяют и его фоточувствительность. Таким образом, в электронных СКЯ квантовые ямы легируют донорной примесью, в дырочных СКЯ - акцепторной, а фоточувствительность возникает благодаря оптическому возбуждению электронов или дырок из связанного состояния в зону проводимости или валентную зону соответственно. Типичные толщины слоев GaAs, при которых в яме располагается 1-2 уровня, имеют величину 40-50 Å. Толщины барьеров из AlGaAs – 400-500 Å. Для заполнения ям электронами (дырками) слои GaAs легируют кремнием (бериллием) до концентраций около 10^{18} см^{-3} . При достаточном охлаждении электроны в основном заполняют нижний энергетический уровень в ямах. Подвижных носителей в зоне проводимости над барьерами относительно мало и их концентрация

определяется термогенерацией. Поэтому «темновая» проводимость СКЯ определяется в основном этими носителями. При облучении СКЯ фотонами, энергия которых превышает энергетическое расстояние между нижним уровнем в яме и верхним или верхушкой барьера, может происходить переход электрона между этими уровнями или между нижним уровнем и дном зоны проводимости барьера. Далее электрон становится свободным и может двигаться под действием электрического поля, создавая, таким образом, фототок (рис.1.1.).

Согласно теоретическим расчетам, основанным на модели симметричной прямоугольной квантовой ямы чувствительность ФП СКЯ сильно зависит от поляризации поглощаемых фотонов, т.е. для эффективного поглощения электрический вектор поляризации фотона должен быть перпендикулярен слоям СКЯ [2]. Указанная особенность ФП СКЯ подтверждена экспериментально и наиболее ярко проявляется в ФП, изготовленных из СКЯ, которые выращены методом МЛЭ. Для управления ориентацией вектора поляризации относительно слоев СКЯ на поверхности фоточувствительных элементов стали формировать устройства ввода излучения в виде дифракционных решеток (как правило, фазовых), которые позволяют обеспечить требуемое направление распространения излучения. Однако, по мере изучения свойств СКЯ выяснилось, что селективность ФП СКЯ по отношению к поляризации не является строгой, т.е. весьма заметная чувствительность наблюдается при нормальном падении излучения и в отсутствие устройств ввода [3]. Тем не менее, и в этом случае использование дифракционных решеток оказывается полезным для повышения квантовой эффективности ФП. Принцип действия дифракционной решетки показан на рис.1.3. При создании многоэлементных ФП возникает необходимость считывания сигналов с чувствительных элементов. Обычно в охлаждаемых многоэлементных ФП, включая ФП СКЯ, считывание сигналов осуществляется с помощью мультиплексоров - кремниевых микросхем (линейных или

матричных), соединяемых с фотоприемной секцией посредством индиевых столбиков (рис.1.4). Изображенное на данном рисунке устройство представляет собой гибридную фоточувствительную схему (ГФС), являющуюся ключевым элементом ФПУ.

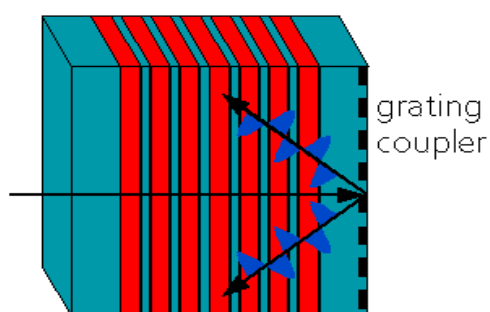


Рис.1.3. Принцип действия дифракционной решетки в ФП СКЯ

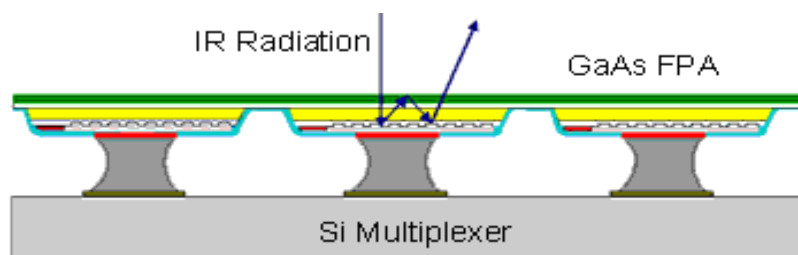


Рис.1.4. Гибридная фоточувствительная схема на основе ФП СКЯ

1.2.2. ФПУ на основе СКЯ и их применения.

Первые сообщения о получении изображений с помощью фотоприемников на основе СКЯ появились в 1991г [4]. Группа исследователей из Bell Laboratories (США) (B.F.Levine at all), продемонстрировала тепловое изображение, полученное с помощью линейного фотоприемника на основе СКЯ (диапазон 8-12 мкм) с использованием оптико-механического сканирования. Заметим, что к этому времени с момента первого экспериментального наблюдения эффекта фотопроводимости в СКЯ прошло всего 4 года. В 1997г. была продемонстрирована тепловизионная камера с ФПУ, в котором использовался матричный фотоприемник на основе СКЯ формата 256x256 элементов [5]. Пожалуй, этот результат оказался одним из решающих для оценки большинством специалистов перспектив СКЯ для ИК техники. К настоящему времени на основе ФП СКЯ уже создано немало разнообразных ИК систем, применяемых в Швеции, Франции, Германии, Бельгии, Польше и др. [6,7]. Сегодня уже являются обыденными сообщения о промышленно выпускаемых тепловизионных приборах с фотоприемной матрицей формата 640 x 480 элементов на основе СКЯ на спектральные диапазоны как 3-5 мкм, так и 8 -12 мкм. Имеются сообщения и о создании фотоприемных матриц формата свыше 1000x1000 элементов, многоспектральных ФПУ [8]. При этом наиболее убедительно преимущества СКЯ проявляются в спектральном диапазоне 8-12 мкм и более длинноволновом. Таким образом, сегодня технология СКЯ представляет одну из основных технологий, благодаря которым происходит оснащение охлаждаемыми ФПУ ИК систем различного назначения. При этом наибольшая востребованность ФПУ СКЯ отмечается в ИК системах, в которых необходимы ФПУ длинноволнового диапазона большого формата, а также многоспектральные приборы [1]. Образцы тепловизионной техники, в которых используются ФПУ на основе СКЯ, представлены на рис.1.5 [7].



Ручной
прибор FTI



Визир
BORC



Прибор наблюдения
ThermoVision™ 2000



Переносной комп-лекс
наблюдения FOI 2000



Прибор
Manop



Прибор наблюдения
ThermoVision™ 3000

Рис.1.5 – Образцы зарубежной тепловизионной техники на основе матричных
ФП СКЯ диапазона 8-9 мкм

Для демонстрации перспективности технологии СКЯ, ее адаптивности к аппаратным вызовам, полезно, с нашей точки зрения, более подробно остановиться на истории проведения разработок в области данной технологии компанией FLIR Systems AB (шведский филиал FLIR Systems, в прошлом Agema). Перед указанной компанией была поставлена задача создания новой тепловизионной системы, обладающей повышенной способностью к идентификации целей [9]. Перед компанией стоял выбор: либо использовать проверенные технические решения на основе длинных линеек фотоприемников со сканированием (240x4 элементов), типа тех, что выпускал Sofradir, либо пойти по пути создания фотоприемников нового поколения, т.е. матричных ФПУ смотрящего типа. Первый путь приводил к очевидному отставанию от мировых тенденций и конкурентов. Поэтому предпочтение было отдано второму пути. При этом потребовалось решить еще один вопрос: из какого материала делать фотоприемники? Поскольку предполагалось создание тепловизоров прежде всего на диапазон 8-12мкм (для работы в условиях пониженной температуры до -40^0 С, где приемники на диапазон 3-5 мкм менее эффективны) выбор ограничивался по существу тремя технологиями – микроболометрами, КРТ и СКЯ. Микроболометры не обеспечивали необходимой чувствительности, КРТ представлялась чрезвычайно дорогой технологией особенно при создании приборов большого формата. Поэтому выбор был остановлен на СКЯ. Такой выбор был обусловлен еще и тем обстоятельством, что в Швеции (Acreo) с начала 90-х годов велись исследования по созданию матричных фотоприемников на основе СКЯ. В 1998г. были продемонстрированы хорошие результаты по созданию фотоприемных модулей на основе СКЯ, которые были успешно встроены в коммерческую термографическую систему SC3000. Поэтому использование шведских фотоприемников на основе СКЯ в системах различного назначения в принципе было логичным.

К настоящему времени компанией FLIR Systems AB разработано несколько модификаций тепловизионных систем на основе СКЯ. Одной из первых была разработана система BIRC на основе носимого тепловизора системы BIL с использованием ФПУ на основе СКЯ фирмы FLIR Systems. Этот прибор показал хорошие результаты при испытаниях тепловизионных систем в арктических условиях при температуре -35°C . В нем использовался матричный фотоприемник на основе СКЯ формата 320x240 элементов, чувствительный в диапазоне 7.5-9.3 мкм. Вес системы не превышал 8.5 кг, энергопотребление не более 25 Вт. Начиная с 2000г. система BIRC стала закупаться правительством Швеции. Опыт создания системы BIRC получил развитие: благодаря использованию ФПУ на основе СКЯ, видеопроцессоров с высоким разрешением, блоков контроля электропитания и модернизированной оптики FLIR Systems AB разработала и заключила контракты на несколько других типов тепловизоров для специальных применений таких как FTI Forward Observer, используемых в новых тепловизионных системах в Швеции и Норвегии, и тепловизионный прибор BORC для систем, производимых в настоящее время по контрактам для Финляндии и Австралии. Оба прибора имеют тот же формат и спектр фоточувствительности, что и BIRC. Следует отметить при этом, что FTI имеет вес всего 3,5 Кг. Одновременно FLIR Systems проводила разработку приборов типа Triple QWIP OEM Module для использования в системах наблюдения и безопасности и в бортовых и наземных (как мобильных, так и стационарных) обзорных системах.

Использование Triple QWIP OEM Module обеспечивает дальность обнаружения характерных объектов свыше 15 Км.

Если упомянутые выше приборы имеют формат 320x240 элементов и допускают модернизацию в части увеличения формата до 640x480 элементов, то одна из последних разработок система LIRC изначально проектировалась под формат 640x480 элементов, допуская использование модуля формата 320x240

элементов. Этот прибор предназначен для замены сканирующего ФПУ предыдущего поколения, стоящего в различных современных системах. По сравнению со своими предшественниками предыдущего поколения LIRC имеет примерно на 50% меньшие вес, объем и электропотребление. Все упомянутые приборы обеспечивают температурное разрешение в сотые доли градуса.

Опыт создания многоспектральных ФПУ на основе СКЯ на сегодняшний день значительно скромнее. Это обусловлено и более сложной технологией создания таких приборов, и недостаточной проработанностью вопросов их применения. Кажется очевидным, что получение изображений одновременно в двух и более различных спектральных диапазонах оказывается более полезным для идентификации объектов. Однако более или менее определенные системные требования к аппаратуре на основе таких ФПУ нам пока не известны. Согласно имеющимся данным из зарубежных источников научно-технической информации в настоящее время создаются экспериментальные образцы пока что двухспектральных ИК камер с той или иной архитектурой фоточувствительной матрицы и проводятся эксперименты по исследованию различных областей их применения. В таких камерах ФПУ имеют чувствительность не только в диапазонах 3-5 мкм и 8-12 мкм [10], но и в близких полосах в пределах одного из указанных диапазонов [11], например, 8-9 мкм и 10-12 мкм. В части организации фоточувствительной матрицы на сегодня разрабатываются два основных подхода: формирование областей чувствительности в разных спектральных диапазонах в пределах одного ФЧЭ [10] и создание чересстрочной топологии, когда области чувствительности в матрице чередуются по строкам, т.е. когда, например, четные строки обеспечивают чувствительность в одном диапазоне, а нечетные – в другом [12]. И хотя в каждой из указанных конструкций имеются свои достоинства и недостатки, возможность получать полезную информацию, недоступную при

использовании односпектральных приборов, была продемонстрирована с помощью обоих подходов.

В завершение данного раздела отметим относительно недавние сообщения о запуске компанией “Sofradir” (Франция) производственной линии по выпуску СКЯ ФПУ “SIRIUS-LW” формата 640x512 элементов с шагом 20 мкм [13].

Данный результат убедительно показывает перспективность технологии СКЯ ФПУ для использования в промышленных масштабах.

1.3. Физико-технологические проблемы ФПУ СКЯ

Несмотря на впечатляющие успехи в области разработки ФПУ с ФП СКЯ и ИК систем на их основе, сегодня остается ряд проблем, которые ограничивают круг применений данной технологии. Разработка охлаждаемого ФПУ 3-го поколения преследует цель получить в результате прибор большого формата с пороговой чувствительностью (в одном или нескольких спектральных диапазонах), близкой к предельной, при максимально возможной рабочей температуре. Именно по пороговой чувствительности и рабочей температуре ФП СКЯ уступают сегодня аналогам на основе КРТ. Для улучшения указанных характеристик ФП СКЯ необходимо проведение исследований фундаментального характера с целью уточнения физических механизмов, лежащих в основе работы ФП СКЯ, а также поиска конструктивных и технологических решений, учитывающих новые результаты исследований.

Важнейшим фактором, определяющим пороговую чувствительность любого ФП, является квантовая эффективность. По данному показателю ФП СКЯ пока уступают узкозонным аналогам. Однако, как показано в ряде публикаций, такое отставание не является безнадежным и может быть сведено к минимуму за счет усовершенствования конструкций как СКЯ, так и чувствительных элементов ФП [14].

Рабочая температура кроме квантовой эффективности зависит также от времени жизни носителей в активной области и от конструкции СКЯ. Как уже

отмечалось, СКЯ по своей природе во многом аналогичны примесным фотосопrotivлениям. Указанное сходство позволяет использовать для увеличения времени жизни в СКЯ те же методы, что и в примесных фотосопrotivлениях, в которых вероятность захвата носителя на примесный центр может быть уменьшена на несколько порядков путем преобразования этого центра из нейтрального в заряженный [15]. Аналогичный прием может быть применен и в СКЯ посредством легирования не квантовой ямы, а барьера, в результате чего яма будет заряжена отрицательно, и свободные носители будут отталкиваться от нее, т.е. вероятность захвата в яму уменьшится, а время жизни возрастет. Для реализации указанного метода увеличения времени жизни необходимы как конструктивные, так и технологические усовершенствования при создании ФП СКЯ. Более подробно этот вопрос будет рассмотрен в Гл.2.

Немаловажным при конструировании ФП СКЯ является установление максимально точного описания вольт-амперной характеристики ФП СКЯ и ее зависимости от конструктивных параметров. Так резкость границ барьер – яма весьма существенным образом может влиять на время жизни, темновой ток и, как следствие, на пороговую чувствительность [16].

Создание ФПУ 3-го поколения на основе любого типа фотоприемников включает в себя разработку технологий выращивания фоточувствительных структур, изготовления из них матричных ФП заданной конструкции и их стыковки с кремниевой микросхемой считывания – мультиплексором. Полученная в результате ГФС должна быть размещена в корпусе-криостате с вакуумной изоляцией, который в свою очередь должен быть состыкован с микрокриогенной системой и предварительной электроникой. Каждый из указанных этапов создания ФПУ представляет собой комбинацию операций, определяемую технологическим заданием, которым обладает или к которой имеет доступ конкретная компания - разработчик. Поэтому формирование

последовательности операций в каждой из указанных технологий является предметом специальных исследований и должно рассматриваться в качестве одной из важнейших задач по созданию приборов нового поколения. В виду того, что ФПУ СКЯ являются относительно новым объектом разработок, формирование технологических маршрутов их создания предполагает содержание значительной доли поисковых работ.

В связи с появлением нового поколения ФПУ, в которых отсутствует оптико-механическое сканирование изображения, возникла необходимость изменить подходы к системе параметров, которыми они характеризуются, и методикам их измерений. Так, в отличие от сканируемых аналогов в смотрящих ФПУ особую актуальность приобрели однородность чувствительности по матрице, количество дефектных элементов. Появление у ФПУ 3-го поколения новых функциональных возможностей привело к необходимости создания новых средств их контроля. Применительно к ФПУ СКЯ методы измерений характеристик также нуждаются в совершенствовании, начиная с этапа создания фоточувствительного материала, и являются предметом теоретических и экспериментальных исследований.

Одним из достоинств ФП СКЯ, отмечаемых во многих публикациях с момента появления первых экспериментальных образцов, является их потенциально высокая стойкость по отношению к разного рода внешним воздействующим факторам (ВВФ). В первую очередь внимание уделяется стойкости по отношению к ионизирующим излучениям и лазерному воздействию большой энергии. Однако сообщения о проведении исследований в указанных областях в зарубежной периодике практически отсутствуют. В виду особой важности указанных свойств ФП для различных специальных применений проведение исследований стойкости ФП СКЯ по отношению к различным ВВФ является весьма актуальным.

Отмеченные выше физико-технологические проблемы создания ФПУ на основе СКЯ характеризуют данное направление в целом, однако, в силу известных причин они имеют особое значение для России, где наметилось серьезное отставание отечественной прикладной науки в данной области. Настоящая работа направлена на сокращение указанного отставания и на создание научно - технологической базы для производства отечественных тепловизионных приборов нового поколения.

1.4. Задачи исследований

Целью работы являлись исследование и разработка многоэлементных ФП СКЯ, изготовленных в системе материалов InGaAs/AlGaAs, чувствительных в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8-12 мкм и многоэлементных ФПУ на их основе, предназначенных для использования в составе тепловизионных приборов различного назначения.

Для достижения указанной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Провести теоретические и экспериментальные исследования основных фотоэлектрических характеристик ФП СКЯ с целью определения возможностей создания на их основе многоэлементных ГФС с заданными характеристиками.

2. На основе проведенных исследований ФП СКЯ разработать конструкции ГФС, в которых обеспечивались бы:

- достижение фотоэлектрических характеристик, требуемых для перспективной оптико-электронной аппаратуры;
- теплофизическая и весогабаритная совместимость с ВКК и МКС.

3. Разработать базовые технологические маршруты изготовления ФП СКЯ, ГФС и ФПУ на их основе.

4. Провести исследования разработанных ГФС и ФПУ с целью определения их эксплуатационных возможностей, в том числе в составе тепловизионных приборов.

ГЛАВА 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СКЯ

2.1. Особенности технологий выращивания СКЯ

Исследования технологий выращивания СКЯ не являются предметом настоящей работы. Однако, учитывая важность данного вопроса для понимания особенностей фотоэлектрических характеристик ФП СКЯ, остановимся на нем, чтобы выделить наиболее важные параметры ростовых процессов, применявшихся при выращивании СКЯ, исследованных в настоящей работе.

Для выращивания СКЯ в системе материалов InGaAs/AlGaAs в рамках настоящей работы использовались два вида эпитаксии: традиционная для выращивания СКЯ молекулярно-лучевая эпитаксия (МЛЭ) и значительно менее распространенная для этого рода задач эпитаксия из метало-органических соединений, так называемая МОС-гидридная эпитаксия (МОСГЭ). Основным преимуществом последней перед МЛЭ является более высокая производительность при сопоставимом качестве структур, что дает существенное снижение их стоимости. В настоящей работе значительное количество результатов получено с использованием СКЯ, выращенных методом МОСГЭ. Главной причиной, определившей такой выбор объекта исследований, было наличие в нашем распоряжении доступа к зрелой МОСГЭ материалов InGaAs/AlGaAs, которой в момент начала наших работ по разработке ФП СКЯ (1991г.) в России обладало ООО «Сигм-Плюс».

Отметим наиболее характерные параметры процесса МОСГЭ [17, 18]. СКЯ выращивались на установке МОС-гидридной эпитаксии “СИГМОС-130” с горизонтальным кварцевым реактором и вращающимся графитовым подложкодержателем. Температура роста варьировалась в диапазоне 720-770 °С, давление в реакторе поддерживалось на уровне 60 мбар, скорость роста

изменялась от 200 Å/мин до 700 Å/мин, отношение V/III варьировалась от 50 до 250. В качестве подложек использовались пластины проводящего или полуизолирующего GaAs диаметром 50 мм с ориентацией (100) $\pm 0,5^\circ$; плотностью дислокаций $< 10000 \text{ см}^{-2}$ и толщиной $450 \pm 50 \text{ мкм}$. Обращаем внимание на важное отличие МОСГЭ от МЛЭ, связанное с более высокой температурой роста – свыше 700°C . Такой температурный режим делает существенной диффузию примеси, которой легируют КЯ, и приводит к ее значительному проникновению в барьеры. Кроме того, в МОСГЭ выращивание слоев СКЯ происходит в результате химических реакций в газовой среде, что приводит к некоторой инерционности процессов роста и, как следствие, к большей, чем при МЛЭ, пологости границ в СКЯ. Заметное влияние на резкость границ в МОСГЭ оказывает и скорость переключения газовых потоков. Все это в совокупности может, с одной стороны, существенно влиять на характеристики СКЯ, с другой стороны, не позволяет при проектировании ростового процесса использовать относительно простую модель СКЯ в виде набора прямоугольных симметричных квантовых ям. Тем не менее, исследования СКЯ, полученных МОСГЭ, оказали важное влияние на развитие данного направления, в особенности в России, и позволили получить ряд интересных научных результатов.

МЛЭ в значительной степени избавлена от указанных недостатков и, несмотря на свою более низкую производительность, позволяет воспроизводимо выращивать СКЯ с более тонкими конструктивными особенностями. Образцы МЛЭ СКЯ, исследовавшиеся в настоящей работе, выращивались ЗАО «Светлана-Рост» (С.Петербург, www.svetlana-rost.ru) на установке STE-3532 («SemiTEq», С.Петербург), предназначенной для роста соединений типа A_3B_5 на подложках диаметром до 4 дюймов включительно. Для повышения однородности выращиваемых слоев установка снабжена источниками повышенной «конусности», позволяющими формировать в

плоскости образца однородные потоки компонентов. Благодаря такой конструкции источников на структуре диаметром 4 дюйма получена неоднородность толщины слоев порядка $\pm 1\%$. СКЯ выращиваются при температуре 610^0 С и скорости роста один моноатомный слой в секунду.

СКЯ и приборы на их основе, исследованные в рамках настоящей работы, условно можно разделить на три группы: односпектральные на диапазон 8-12 мкм; односпектральные на диапазон 3-5 мкм и двухспектральные на диапазоны 3-5 мкм и 8-12 мкм.

В таблицах 2.1, 2.2 и 2.3 приведены типичные значения (наиболее часто встречающиеся в различных источниках научно-технической информации) основных параметров конструкций СКЯ для фотоприемников на диапазон длин волн 3-5 мкм, 8-12 мкм и двухспектральных. Значительный разброс составов и толщин слоев говорит об отсутствии строгого соответствия между номинальными и реальными конструктивными параметрами СКЯ, значения которых в свою очередь зависят от технологических режимов роста. О степени влиянии технологий выращивания СКЯ на их фотоэлектрические характеристики более подробно будет сказано ниже.

Таблица 2.1. Конструкция СКЯ для фотоприемников, обеспечивающих чувствительность в диапазоне длин волн 3-5 мкм.

Наименование эпитаксиального слоя	Состав	Толщина слоя, нм	Уровень легирования, см^{-3}
Контактный	GaAs:Si	500-800	$8 \times 10^{17} \div 30 \times 10^{17}$
Барьер	$\text{Al}_{(0.2-0.4)}\text{Ga}_{(0.8-0.6)}\text{As}$	30-60	нелегированный
Квантовая яма Барьер (от 20 до 30 периодов)	GaAs	0,5	нелегированный
	$\text{In}_{(0.1-0.4)}\text{Ga}_{(0.9-0.6)}\text{As:Si}$	2-5	$5 \times 10^{17} \div 20 \times 10^{17}$
	GaAs	0,5	нелегированный
	$\text{Al}_{(0.2-0.4)}\text{Ga}_{(0.8-0.6)}\text{As}$	30-50	нелегированный
Контактный	GaAs:Si	800-1200	$8 \times 10^{17} \div 30 \times 10^{17}$
Стоп-слой	$\text{Al}_{(0.2-0.6)}\text{Ga}_{(0.8-0.4)}\text{As}$	1500	нелегированный
Подложка	i-GaAs		-

Таблица 2.2. Конструкция СКЯ для фотоприемников, обеспечивающих чувствительность в диапазоне длин волн 8-12 мкм.

Наименование эпитаксиального слоя	Состав	Толщина слоя, нм	Уровень легирования, см^{-3}
Контактный	GaAs:Si	700-800	$8 \times 10^{17} \div 30 \times 10^{17}$
Барьер	$\text{Al}_{(0.2-0.3)}\text{Ga}_{(0.8-0.7)}\text{As}$	45	нелегированный
Квантовая яма Барьер (до 70 периодов)	GaAs:Si	4-5	$5 \times 10^{17} \div 20 \times 10^{17}$
	$\text{Al}_{(0.2-0.3)}\text{Ga}_{(0.8-0.7)}\text{As}$	45	нелегированный
Контактный	GaAs:Si	800-1200	$8 \times 10^{17} \div 30 \times 10^{17}$
Стоп-слой	$\text{Al}_{(0.2-0.6)}\text{Ga}_{(0.8-0.4)}\text{As}$	1500	нелегированный
Подложка	i-GaAs; (n^+GaAs)		-

Таблица 2.3. Конструкция СКЯ для двухспектральных фотоприемников.

Наименование эпитаксиального слоя	Состав	Толщина слоя, нм	Уровень легирования, см^{-3}
Контактный	GaAs:Si	500 -800	$8 \times 10^{17} \div 30 \times 10^{17}$
Барьер	$\text{Al}_{(0.2-0.4)}\text{Ga}_{(0.8-0.6)}\text{As}$	30-50	нелегированный
Квантовая яма Барьер (от 20 до 30 периодов)	GaAs	0,5	нелегированный
	$\text{In}_{(0.1-0.4)}\text{Ga}_{(0.9-0.6)}\text{As:Si}$	2-5	$5 \times 10^{17} \div 20 \times 10^{17}$
	GaAs	0,5	нелегированный
	$\text{Al}_{(0.2-0.4)}\text{Ga}_{(0.8-0.6)}\text{As}$	30-50	Нелегированный
Контактный	GaAs:Si	800-1200	$8 \times 10^{17} \div 30 \times 10^{17}$
Барьер	$\text{Al}_{(0.2-0.3)}\text{Ga}_{(0.8-0.7)}\text{As}$	45	нелегированный
Квантовая яма Барьер (от 20 до 30 периодов)	GaAs:Si	4-5	$5 \times 10^{17} \div 20 \times 10^{17}$
	$\text{Al}_{(0.2-0.3)}\text{Ga}_{(0.8-0.7)}\text{As}$	45	нелегированный
Контактный	GaAs:Si	800-1200	$8 \times 10^{17} \div 30 \times 10^{17}$
Стоп-слой	$\text{Al}_{(0.2-0.6)}\text{Ga}_{(0.8-0.4)}\text{As}$	1500	нелегированный
Подложка	i-GaAs		-

Следует отметить, что большинство исследований электрофизических параметров СКЯ было проведено на длинноволновых образцах, что объясняется относительно более простыми технологиями выращивания таких СКЯ и изготовления из них фотоприемников. Тем не менее, полученные результаты значительно облегчили понимание ряда особенностей, выявленных при исследовании коротковолновых и двухспектральных образцов.

Необходимо указать на ряд особенностей выращивания коротковолновых (КВ) и двухспектральных (ДС) СКЯ. Дело в том, что в КВ СКЯ квантовая яма имеет состав $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и является неизопериодической по отношению к барьеру. В результате КВ СКЯ оказывается напряженной и обладает повышенной плотностью структурных дефектов по площади пластины. Для снижения негативного влияния указанных напряжений на границах между ямами и барьерами вводился слой GaAs толщиной 5Å (спейсер). Тем не менее, было установлено, что при увеличении количества периодов в КВ СКЯ и КВ секции ДС СКЯ свыше 25-30 плотность структурных дефектов резко возрастает, а создание матричного фотоприемника из такой структуры с приемлемым числом дефектных элементов становится практически невозможным. В связи с этим использованные при создании матричных ФП КВ и ДС СКЯ имели не более 25 периодов, что, естественно, сказывалось на их квантовой эффективности.

2.2. Исследования фоточувствительных СКЯ, выращенных методом МОСГЭ на проводящих подложках

Начало исследований по теме настоящей работы и получение первых обнадеживающих экспериментальных результатов можно отнести к концу 1991г., когда автором совместно с сотрудниками НИИ «Пульсар» и ООО «Сигм-Плюс» были получены первые образцы одноэлементных ФП СКЯ и проведены измерения их фотоэлектрических характеристик [19-22]. Одной из

основных целей исследований одноэлементных тестовых ФП СКЯ, которые проводятся и сегодня, является изучение связи конструктивных особенностей и технологических условий изготовления СКЯ с фотоэлектрическими характеристиками ФП. В ходе исследований было установлено, что наиболее информативными для этой цели являются: вольт - амперные характеристики, измеренные при различных температурах, зависимости ампер-ваттной чувствительности от напряжения, зависимости шума от напряжения и спектры фоточувствительности. С помощью указанных характеристик рассчитывалась обнаружительная способность, приведенная к длине волны максимума спектра фоточувствительности ФП СКЯ. Представленный набор измеряемых характеристик во многом был идентичен тому, что обычно содержался в публикациях зарубежных исследователей. Первые образцы СКЯ выращивались на проводящих подложках n^+ -GaAs с ориентацией $\langle 100 \rangle$ [19-22]. СКЯ содержали до 70 периодов барьер-яма. Барьеры имели состав $Al_xGa_{1-x}As$ с $x = 0,26-0,31$, толщину 350-450 Å и специально не легировались. Ямы выращивались из GaAs, имели толщину 40-50 Å и легировались кремнием до концентраций $(0,5-1) \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Варьирование в довольно широких пределах значений состава барьеров и толщины ям было вызвано необходимостью подбора их соотношений, при которых спектры фоточувствительности СКЯ располагались бы в окне прозрачности 8-12 мкм. Дело в том, что расчеты спектров фоточувствительности, как правило, были основаны на предположении о прямоугольности и симметричности квантовых ям и не учитывали особенности технологий выращивания СКЯ, которые приводили к отклонениям от указанной модели. И, как оказалось, в наибольшей степени такие отклонения проявлялись при МОСГЭ и оказывали существенное влияние на отдельные фотоэлектрические характеристики СКЯ, о чем будет сказано

подробнее. Тем не менее, уже первые результаты показали перспективы МОСГЭ в области создания ФП СКЯ.

На рис.2.1. представлены спектры фоточувствительности одного из первых ФП СКЯ. Образец был изготовлен в виде мезы [21]. Сигнальное излучение направлялось на него со стороны боковой поверхности. Нетипично большая для СКЯ ширина спектра на полувывсоте связана в значительной степени с тем, что для регистрации спектра использовались узкополосные оптические фильтры, имеющие относительно широкую полосу пропускания.

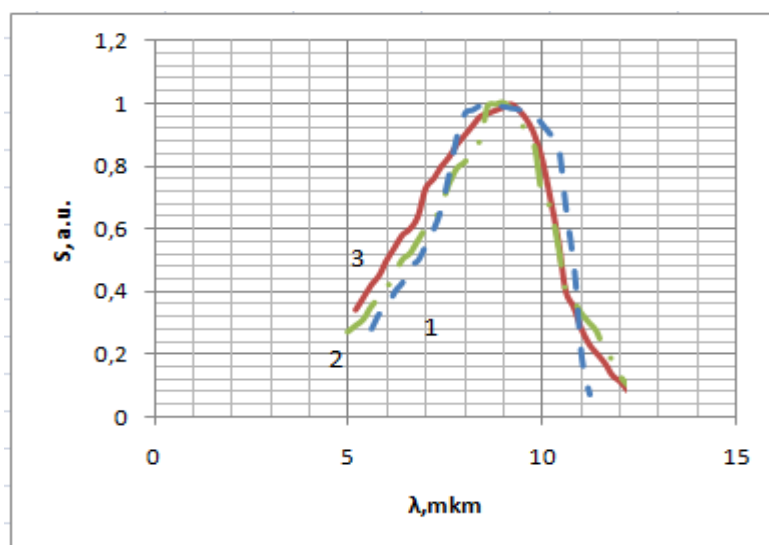
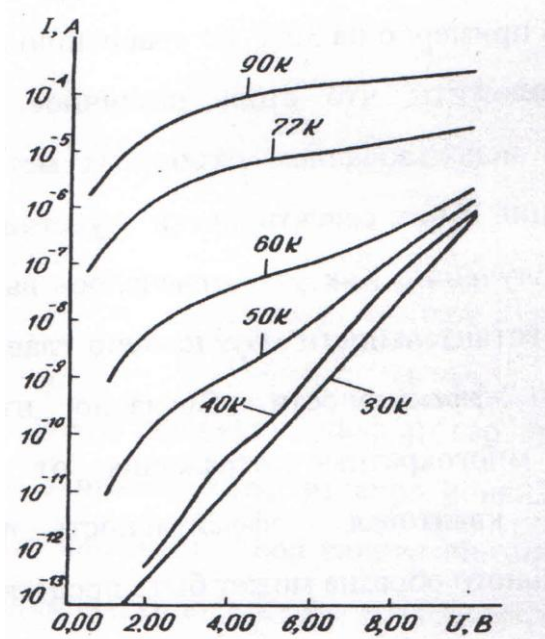


Рис.2.1. Спектры фоточувствительности ФП СКЯ при напряжениях смещения: 1-0,2 В; 2 - 0,5 В; 3 – 1В.

На рис.2.2 представлены вольт-амперные характеристики того же образца ФП СКЯ



Ри.2.2. Вольт-амперные характеристики образца ФП СКЯ при различных температурах.

Исследование температурных зависимостей темнового тока образцов ФП при различных фиксированных значениях напряжения смещения позволило выявить полевую зависимость термической энергии активации носителей в квантовой яме: при увеличении напряжения смещения от 1 до 4 В энергия активации уменьшалась от 0,136 эВ до 0,106 эВ. Обнаруженный эффект наблюдался в работах других исследователей и был связан с полевой деформацией границ барьер-яма. С аналогичным механизмом влияния поля связано изменение спектров фоточувствительности от напряжения смещения. В диапазоне смещений от 0,2В до 1В максимум спектра фоточувствительности смещался от 8,5 мкм до 9,25 мкм, при этом ширина спектра, измеренная на полувысоте возрастала от 4 мкм до 4,5 мкм. Оценка абсолютной чувствительности по отношению к излучению от абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой 300К дала величину около 0,1 А/Вт.

Полученные результаты оказались сопоставимыми с теми, что были получены за рубежом на образцах, изготовленных с использованием МЛЭ.

Таким образом, было получено экспериментальное подтверждение возможности получения ФП СКЯ на основе структур, выращенных МОСГЭ, которые по своим характеристикам не уступают аналогам, полученным с помощью МЛЭ.

Дальнейшие исследования ФП СКЯ позволили обнаружить и эффекты, о которых ранее не сообщалось в зарубежных публикациях. Это, прежде всего, волноводный эффект, обнаруженный в ФП СКЯ, по конструкции аналогичном тому, что описан выше [23]. СКЯ была выращена на n^+ -GaAs подложке с $n =$ до $3 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ посредством МОСГЭ в горизонтальном реакторе при низком давлении и содержала 50 периодов барьер-яма. Ширина ям из GaAs составляла $40 \text{ \AA}$ и легировалась кремнием до $7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Барьеры из $A_x\text{In}_{1-x}\text{As}$ с $X = 0,31$ имели толщину $450 \text{ \AA}$ и специально не легировались. Верхний контактный слой имел толщину $0,5 \text{ мкм}$ и легировался кремнием до $1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Тестовые ФП КЯ изготавливались в виде меза - структур размером $150 \times 150 \text{ мкм}$. Контакты к проводящей подложке и верхнему контактному слою изготавливались путем вжигания сплава Au:Ge. На рис. 2.3. представлен спектр фоточувствительности тестового ФП СКЯ, снятый при 80 К при засветке со стороны верхнего контакта.

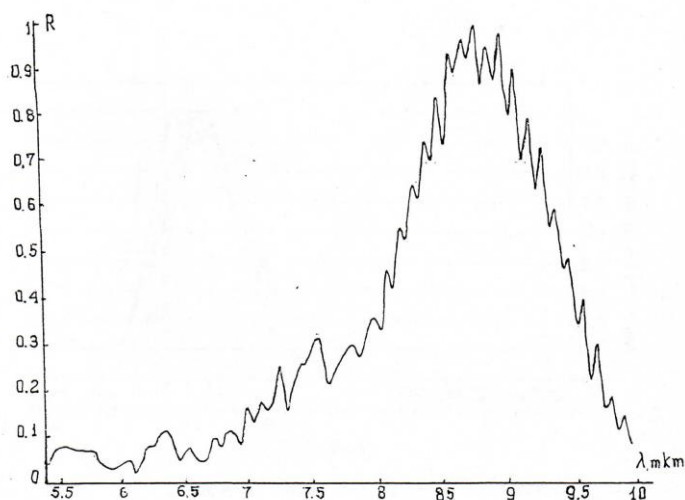


Рис.2.3. Спектр фоточувствительности ФП СКЯ

На спектре отчетливо видны пики небольшой амплитуды, расположенные на примерно равных интервалах $\Delta\lambda$. Среди причин, которые могли бы вызвать появление таких пиков, наиболее вероятными, по нашему мнению, могли быть следующие: 1) влияние управляемых электрическим полем квантовых эффектов, приводящих к появлению в каждой квантовой яме тонкой структуры энергетических уровней; 2) влияние интерференционных оптических эффектов, приводящих к появлению стоячих волн в резонаторе, образованном поверхностями ФП СКЯ. Степень влияния первой группы эффектов, на наш взгляд, весьма мала, поскольку энергетические интервалы, соответствующие $\Delta\lambda$, равны примерно 2×10^{-3} эВ, тогда как $kT \approx 7 \times 10^{-3}$ эВ при 80К. Это означает, что из-за теплового уширения энергетические уровни с энергиями, различающимися меньше, чем на kT , не могут быть разрешены. Кроме того, как было установлено, положение пиков не менялось с изменением напряжения смещения на ФП СКЯ.

Более вероятной причиной наличия тонкой структуры в спектрах фоточувствительности представляется возникновение интерференции световых пучков, распространяющихся в СКЯ как в плоском волноводе. Возможность волноводного распространения излучения в слабо проводящей пленке, расположенной на поверхности хорошо проводящей подложки определяется условием [24]:

$$N > \frac{(2M - 1)^2 \pi^2 \epsilon_0 m^* c^2}{4e^2 h^2}$$

где N - концентрация свободных носителей в подложке, h - толщина пленки, m^* - эффективная масса электрона; e - заряд электрона; c - скорость света; ϵ_0 - диэлектрическая постоянная; M - число распространяющихся мод. При толщине пленки нелегированного GaAs, (т.е. типичной толщине СКЯ) $h = 2,5$ мкм, она будет волноводом хотя бы для одной моды, если подложка легирована до концентрации $7,5 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Заметим, что M не зависит от длины

волны распространяющегося излучения. Таким образом, мы можем ожидать, что излучение, каким-либо образом введенное в СКЯ, выращенную на проводящей подложке с $n > 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, будет распространяться в ней, как в волноводе. Следует заметить, что большую часть СКЯ составляет $\text{AlGa}_{1-x}\text{As}$, показатель преломления которого меньше, чем у нелегированного GaAs : $\Delta n \approx 0,1$. Однако уменьшение показателя преломления, связанное с легированием оказывается значительно больше, особенно для $\lambda \sim 10 \text{ мкм}$. Согласно [24] уменьшение показателя преломления в подложке

$$\Delta n_s = - \frac{N \lambda_0^2 e^2}{\epsilon_0 n_s 8 \pi^2 m^* c^2}$$

И для $N = 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $n_s = 3,3$ – показатель преломления GaAs ; $\lambda = 9 \text{ мкм}$ $\Delta n_s \approx 0,2$. Если такой волновод ограничен в направлении распространения волны хорошо отражающими поверхностями, можно ожидать появления интерференционных эффектов в виде особенностей на спектрах фоточувствительности. Сходные эффекты наблюдались в ФП СКЯ с тонкими подложками [2]. В нашем случае излучение поступает в СКЯ как через фронтальную поверхность, так и через боковую. В последнем случае после преломления на боковых стенках излучение входит в СКЯ под некоторым углом по отношению к слоям и распространяется вдоль них как в волноводе. При этом боковые стенки могут служить своеобразным резонатором, в котором возможно существование стоячих волн. Излучение с резонансными длинами волн будет поглощаться в СКЯ более эффективно и, в свою очередь, будет вызывать образование локальных максимумов на спектрах фоточувствительности. Расстояние между такими локальными пиками может быть вычислено по формуле:

$$\Delta \lambda \approx \lambda^2 / 2Ln$$

где λ – длина волны, соответствующая пику, n – показатель преломления

СКЯ, L – длина резонатора. При $\lambda = 9$ мкм; $n = 3,2$; $L = 150$ мкм получаем величину $\Delta\lambda = 0,086$ мкм, которая находится в удовлетворительном соответствии с экспериментальным значением $\Delta\lambda = 0,090$ мкм.

Другим аргументом в пользу сделанной нами гипотезы является результат сравнения амплитуд максимума спектра фоточувствительности и пиков на нем. Отношение частей оптической мощности, поступающей на СКЯ через боковую и фронтальную поверхность приблизительно составляет $7,2 d/L$, где d – проекция образующей боковой поверхности на плоскость, параллельную слоям СКЯ. Для $d = 1$ мкм и $L = 150$ мкм получим величину указанного отношения, равную 0,048. Отношение амплитуд пиков и максимума спектра фоточувствительности значительно больше. Такое различие можно объяснить, исходя из следующих соображений. Излучение, попадающее в СКЯ через боковую поверхность, распространяется в СКЯ, как в волноводе, и поэтому имеет значительно больший оптический путь, т.е. большую длину поглощения. Расчет, учитывающий данное обстоятельство, а также конструктивные особенности СКЯ, проведенный в [23], дает величину отношения амплитуд пиков и максимума спектра фоточувствительности 0,28, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями.

Таким образом, обнаруженные особенности спектров фоточувствительности ФП СКЯ на проводящей подложке находят удовлетворительное объяснение в рамках модели волноводного распространения излучения параллельно плоскости слоев СКЯ. Сам эффект волноводного распространения расширяет возможности проектирования ФП СКЯ различных конструкций.

В связи с тем, что практической целью настоящих исследований было создание матричных фотоприемников, дальнейшие работы проводились с использованием СКЯ, выращенных на полуизолирующих подложках GaAs.

Ниже представлены основные результаты исследований СКЯ, систематизированные по фотоэлектрическим характеристикам.

2.3. Спектры фоточувствительности

Замечательной особенностью СКЯ в системе InGaAs/AlGaAs является возможность управления их спектром фоточувствительности в пределах от 3 до 20 мкм. В рамках настоящих исследований были проведены многочисленные эксперименты по созданию ФП СКЯ с различными спектрами фоточувствительности. На рис.2.4. представлены типичные спектры фоточувствительности различных ФП СКЯ, изготовленных в ходе настоящей работы, охватывающие ИК область спектра от 4 до 16 мкм. Огромное количество разнообразных спектров не позволяет разместить их на одном рисунке. Поэтому в дальнейшем мы ограничимся обсуждением лишь тех из них, которые попадают в окна прозрачности атмосферы 3-5 мкм и 8-12 мкм.

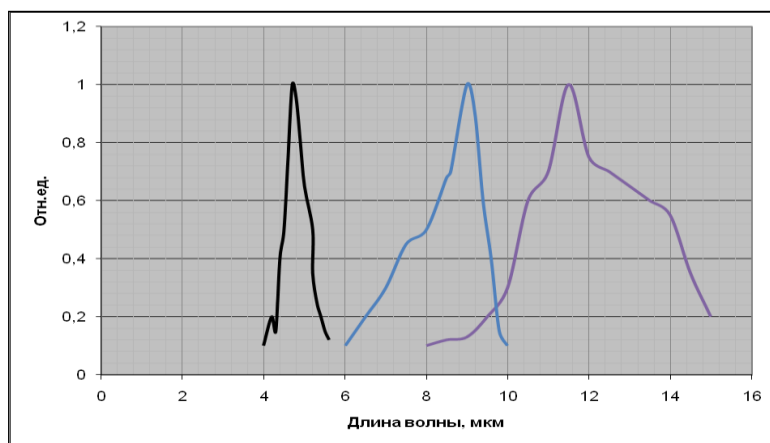


Рис.2.4 Спектры фоточувствительности ФП СКЯ

Как уже отмечалось, первоначально исследования проводились в направлении создания ФП СКЯ, чувствительных в диапазоне 8-12 мкм. Для этого использовалась система твердых растворов GaAs/AlGaAs, которая позволяла получать структуры с положением максимума спектра фоточувствительности от примерно 7 мкм до 12 мкм и более. Проводился поиск комбинаций параметров

СКЯ – толщины квантовой ямы, состава барьера, - позволявших получить фоточувствительность СКЯ в заданном диапазоне. Следует отметить, что указанный поиск в значительной степени имел эмпирический характер. Дело в том, что выращивание СКЯ с ориентацией на исходные конструктивные параметры, рассчитанные на основе модели прямоугольной квантовой ямы, не давало однозначно воспроизводимых результатов. На свойства СКЯ оказывали существенное влияние параметры самого процесса МОСГЭ, часть из которых сложно контролировать в режиме *in situ*. Стоит отметить, что и, судя по зарубежным публикациям, при МЛЭ СКЯ, имеющие номинально одинаковые или достаточно близкие конструктивные параметры, обладают в ряде случаев различными спектрами фоточувствительности. Для примера сравним результаты из опубликованных работ. В качестве параметра сравнения используем значение длины волны в максимуме спектра фоточувствительности λ_p , а в качестве переменных L_w - толщину КЯ и состав барьера X . В работах [2, 25, 26], исследовались СКЯ с $L_w = 40 \text{ \AA}$ и $X = 0,26$. Были получены значения $\lambda_p = 8,95 \text{ мкм}$; $8,5 \text{ мкм}$; $8,75 \text{ мкм}$, причем первые два результата получены одним авторским коллективом. В работах [2, 26- 28], исследовались СКЯ с $L_w = 50 \text{ \AA}$ и $X = 0,26-0,27$. Были получены значения $\lambda_p = 8,1 \text{ мкм}$ и $8,8$ для $X = 0,26$; и $\lambda_p = 8,8 \text{ мкм}$ и $8,4 \text{ мкм}$ для $X = 0,27$. И примеры такого разброса λ_p не исчерпываются представленными. Как видно из приведенных примеров, разброс λ_p СКЯ может составлять до $0,5 \text{ мкм}$ при номинально одинаковых конструктивных характеристиках, определяющих ее величину. Согласно расчетам, результаты которых представлены на рис.2.5 [26], зависимость λ_p от L_w и X является относительно слабой, особенно в диапазоне $L_w = 40-50 \text{ \AA}$. Так при толщине КЯ $50 \text{ \AA}$ изменением состава по X на $0,01$ или при составе $X = 0,26$ изменением толщины КЯ на $10 \text{ \AA}$ сдвиг λ_p может составить примерно $0,25 \text{ мкм}$.

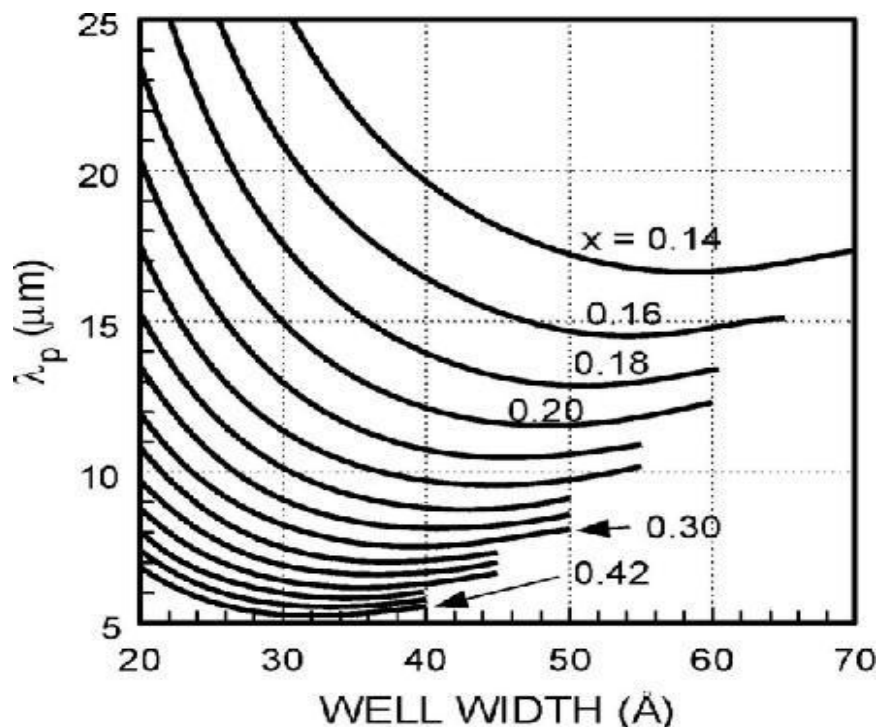


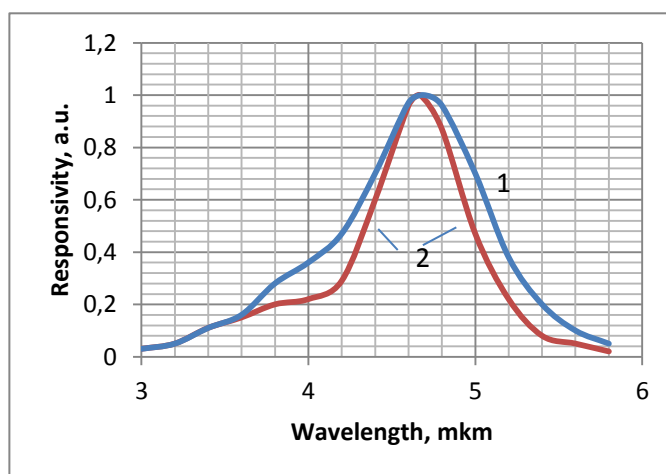
Рис.2.5. Зависимость λ_p от состава барьера и толщины КЯ.

Приведенные выше экспериментальные результаты показывают, что СКЯ с номинально одинаковыми конструктивными параметрами имеют в реальности довольно ощутимый их разброс, достигающий по составу $\Delta X = 0,01-0,02$ и /или по толщине КЯ $5-10\text{\AA}$. Заметим, что приведенные результаты относятся к СКЯ, полученным МЛЭ, которая позволяет осуществлять более точный контроль составов и толщин слоев. В случае же МОСГЭ ситуация заметно хуже. В наших экспериментах, например, в одной из ростовых серий номинальное изменение состава барьера с 0,26 до 0,27 не вызывало смещение λ_p в ту или иную сторону. В то же время номинальное изменение толщины КЯ на $3\text{\AA}$ могло приводить к изменению λ_p на 0,5 мкм. В виду выявленных неопределенностей в получении требуемого результата при выращивании СКЯ после многочисленных экспериментов стал использоваться следующий подход: в качестве номинальных базовых параметров СКЯ на диапазон 8-12 мкм были выбраны толщина квантовой ямы - $45-50\text{\AA}$, барьер $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $X = 0,26-0,28$ и

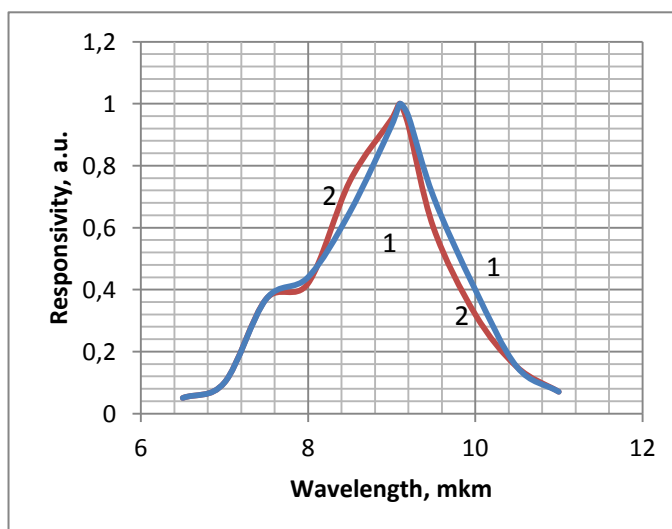
толщиной $450\text{\AA}$. Далее проводилась серия ростовых процессов, позволявшая вариацией технологических режимов «подгонять» СКЯ под требования к спектру фоточувствительности. При выращивании СКЯ на диапазон 3-5 мкм применялась уже более сложная комбинация твердых растворов InGaAs/AlGaAs. При этом номинальные базовые параметры были такими: яма – $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$, $y = 0,23-0,25$ толщиной $27\text{\AA}$, барьер – $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ с $x = 0,39$ толщиной $400\text{\AA}$. Кроме того, между ямой и барьерами выращивались промежуточные слои GaAs толщиной $5\text{\AA}$ (спейсеры) для уменьшения механического напряжения между материалами с различными постоянными кристаллической решетки. Далее проводились те же процедуры, что и с длинноволновыми СКЯ.

Измерения спектров фоточувствительности СКЯ проводились на тестовых фотоприемниках, изготовленных из них. Как правило, они изготавливались в виде меза- структур квадратной формы со стороной 400 мкм. Модулированное излучение от монохроматора МДР-41 поступало на тестовый фотоприемник, размещенный в криостате и охлажденный до температуры около 80К жидким азотом. Сигнал с фотоприемника через малошумящий усилитель SR570 поступал в блок обработки и далее в РС, где производилось построение спектров фоточувствительности. Измерения спектров фоточувствительности СКЯ позволили установить ряд интересных особенностей. Прежде всего, это относится к неожиданно значительной фоточувствительности у тестовых образцов, не имевших специальных устройств ввода, при нормальном падении излучения, что позволяет говорить о нарушении селективности чувствительности по отношению к поляризации излучения, предсказываемой классической теорией. Также было установлено, что в температурном диапазоне 60-80К спектры фоточувствительности СКЯ не испытывают заметных изменений при фиксированном напряжении смещения. В то же время

наблюдалась заметная чувствительность формы и положения максимумов спектров к полярности и величине напряжения смещения. На рис.2.6 представлены спектры коротковолнового и длинноволнового ФП СКЯ при обеих полярностях напряжения смещения.



а)



б)

Рис.2.6.а),б). Спектры фоточувствительности ФП на основе а) КВ СКЯ и б) ДВ СКЯ при различных полярностях напряжения смещения: 1 – «+» на верхнем контакте; 2 – « - » на верхнем контакте.

Как было установлено в многочисленных публикациях, чувствительность спектров по отношению к напряжению связана с полевой деформацией границ барьер-яма, при этом указанная чувствительность тем выше, чем более пологими являются границы. На начальном этапе работ, когда при выращивании СКЯ резкости границ еще не придавалось необходимого значения, часто получались образцы ФП СКЯ, имевшие широкие спектры фоточувствительности с довольно сложной тонкой структурой. После принятия необходимых мер для повышения резкости границ спектры стали более гладкими и узкими.

2.4. Вольт-амперные характеристики СКЯ

Представленные в предыдущем разделе результаты экспериментальных исследований ФП СКЯ показывают, что реальные СКЯ в большей или меньшей степени отличаются от модели, в основу которой положена прямоугольная симметричная квантовая яма. Отклонения СКЯ от указанной модели могут приводить к появлению у них специфических свойств, не характерных для выбранной модели. Здесь следует отметить, прежде всего, нарушение строгой селективности фоточувствительности ФП СКЯ по отношению к поляризации сигнального излучения, наличие асимметрии вольт-амперных характеристик и зависимостей фоточувствительности и шума от напряжения. Рассмотрим теперь более подробно вольт-амперные характеристики реальных СКЯ.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) ФП СКЯ являются, пожалуй, наиболее доступными для экспериментальных исследований и вместе с тем весьма информативными для определения особенностей генерации, рекомбинации и переноса носителей заряда в ФП СКЯ и построения теоретических моделей указанных процессов. До настоящего времени исследования ФП СКЯ не привели к созданию достаточно полной теоретической модели ВАХ ФП СКЯ, удовлетворительно описывающей

основные их особенности. В ранних работах, посвященных исследованиям ФП СКЯ, моделирование ВАХ строилось на основе предположения, что протекание тока определяется скоростью и концентрацией носителей заряда в свободной зоне, которые генерируются в локальных областях (над квантовыми ямами) с двумерной плотностью состояний [2, 29 - 31] или трехмерной, как в объемном полупроводнике [32]. Наряду с указанными подходами предлагалось использовать для описания ВАХ формулу Бете [33], выведенную для контактов металл-полупроводник [34,35]. Экспериментальная проверка предлагавшихся теоретических моделей имела ограниченный характер и не давала исчерпывающего ответа на вопрос: какая из моделей и в каких условиях дает адекватное описание ВАХ ФП СКЯ. Поэтому исследования ВАХ как теоретические, так и экспериментальные продолжаются до сих пор. В настоящей работе были проведены экспериментальные исследования с целью установления механизма тепловой генерации носителей из КЯ, а также была построена модель ВАХ, учитывающая указанный механизм и влияние отклонений формы квантовых ям от прямоугольной.

2.4.1. Определение механизма тепловой генерации

Определение механизма термогенерации носителей включало в себя экспериментальное исследование зависимостей темнового тока ФП СКЯ от температуры и сопоставление их с аналогичными зависимостями, полученными из известных теоретических моделей ВАХ ФП СКЯ. На основе анализа полученных результатов была предложена уточненная модель ВАХ ФП СКЯ. Для проведения экспериментов использовались образцы ФП СКЯ, изготовленные из структур, выращенных с помощью МОС – гидридной эпитаксии (МОСГЭ) и молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ).

Кратко рассмотрим обсуждаемые модели ВАХ. Двумерная модель ВАХ для плотности тока, предполагающая генерацию свободных носителей в

локальные зоны с двумерной плотностью состояний, выражается зависимостью:

$$J_{2d} = e \cdot N_{th} \cdot V_d \quad (2.1)$$

где e – заряд электрона, N_{th} – равновесная концентрация носителей заряда в зоне проводимости, усредненная, по периоду СКЯ V_d – дрейфовая скорость электронов. Выражение для N_{th} представляется в виде [2]:

$$N_{th} = m^* kT (\pi \hbar^2 L_p)^{-1} \cdot \exp(-\phi(v)/kT) \quad (2.2)$$

где m^* – эффективная масса электрона в материале КЯ, k – постоянная Больцмана, T – температура, $\hbar$ – постоянная Планка, L_p – длина периода СКЯ, $\phi(v)$ – термическая энергия активации основного состояния в квантовой яме, которая зависит от внешнего напряжения. Если объединить (2.1) и (2.2), то в полученном выражении предэкспоненциальный множитель будет линейно зависеть от температуры. Трехмерная модель имеет сходный вид, однако в предэкспоненциальном множителе температура имеет показатель степени 3/2 [32]. В термоэмиссионной модели зависимость от температуры в аналогичном множителе будет квадратичной [34]:

$$J_{te} = A^* \cdot T^2 \cdot \exp(-\phi(v)/kT) \cdot [1 - \exp(-V_p/kT)] \quad (2.3)$$

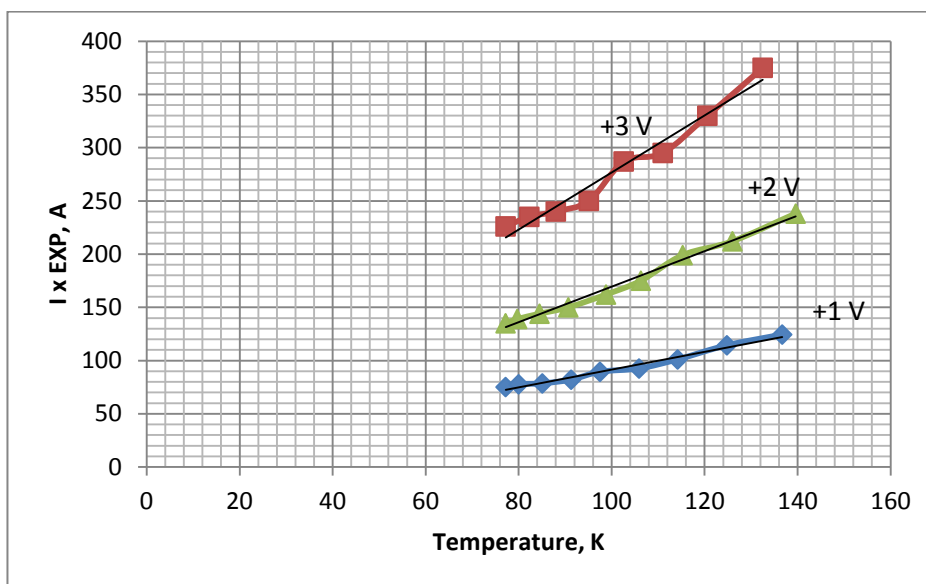
где A^* – некоторая постоянная, V_p – падение напряжения на периоде СКЯ. Если в выражениях (2.1) и (2.3) сомножители, содержащие экспоненты, перенести в левую часть, то, зная экспериментальные значения J и $\exp(-\phi(v)/kT)$, измеренные при различных температурах и постоянном напряжении, можно построить зависимости $J \cdot \exp(\phi(v)/kT) = F(T)$, в которых $F(T)$ будет иметь степенную зависимость от T . По виду полученных зависимостей, точнее, по величине показателя степени можно будет сделать предположение о наиболее вероятной модели термогенерации носителей и соответствующей ей ВАХ.

Для проведения экспериментов были использованы образцы ФП СКЯ, изготовленные в виде одиночных меза-диодов размером 400x400 мкм из GaAs/AlGaAs СКЯ двух типов: выращенных методом МОСГЭ и МЛЭ. СКЯ обоих типов имели по 50 периодов барьер-яма. Ямы в МОСГЭ СКЯ имели номинальную толщину 5 нм, в МЛЭ СКЯ – 4,5 нм. В обоих случаях ямы однородно легировались кремнием до концентраций около $9 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Барьеры имели толщину 45 нм, специально не легировались и имели в барьерах 27% Al. Верхний и нижний контактные слои из GaAs легировались кремнием до $2 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ и граничили с крайними барьерными n^0 – AlGaAs слоями СКЯ. Для проведения экспериментов образцы ФПСКЯ крепились на поликоровых платах в непосредственной близости от кремниевых диодных датчиков температуры. Поликоровая плата размещалась в стеклянном криостате, защищалась охлаждаемым экраном от фонового излучения и охлаждалась жидким азотом.

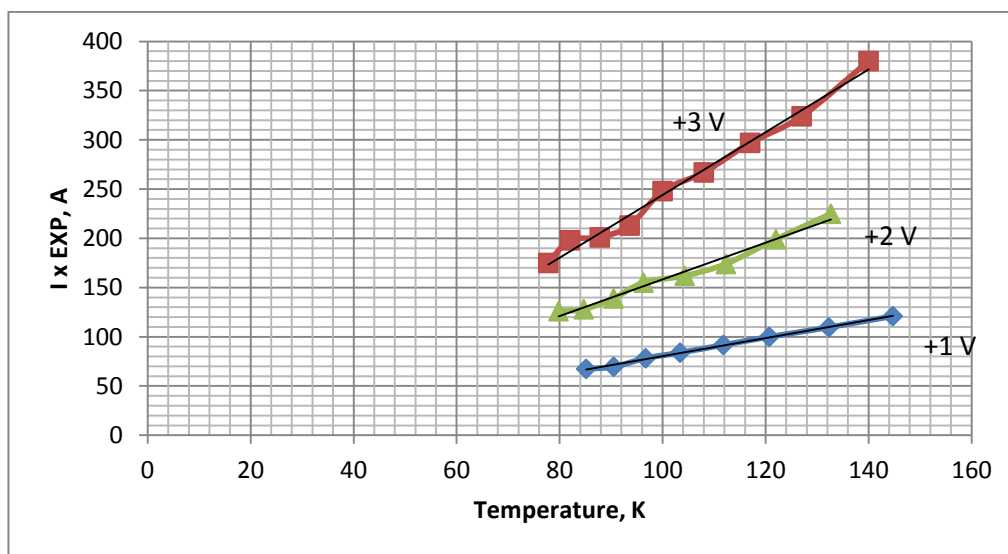
Температурные зависимости темнового тока I_d ФП СКЯ, снятые при различных фиксированных напряжениях, строились в виде $\ln(I_d/T^\beta) = F(1/T)$ и использовались для расчета термической энергии активации основного состояния в яме $\phi(v)$, которая в свою очередь использовалась для построения зависимостей $J \cdot \exp(\phi(v)/kT) = F(T)$. Для расчета $\phi(v)$ необходимо было определить β – показатель степени температуры в выражениях (2.1) и (2.3). Первоначально расчет $\phi(v)$ был произведен для значений $\beta = 1$ и 2. Различие в значениях $\phi(v)$ составляло не более 10%, при этом характер зависимостей $J \cdot \exp(\phi(v)/kT) = F(T)$, построенных для обоих значений $\phi(v)$, был практически одинаковый – линейный по T . Поэтому в дальнейшем расчеты $\phi(v)$ проводились с использованием $\beta = 1$.

На рис.2.7.1 а), б) представлены зависимости $J \cdot \exp(\phi(v)/kT) = F(T)$ для детекторов на основе СКЯ обоих типов. В диапазоне температур от 80 до 140 К зависимости практически линейны для обоих типов ФПСКЯ.

Полученные экспериментальные результаты дают основания предполагать, что температурная зависимость темнового тока в ФПСКЯ определяется механизмом термогенерации, лежащим в основе двумерной модели ВАХ.



а)



б)

Рис.2.7 а),б) Температурные зависимости $J \cdot \exp(\phi(v)/kT) = F(T)$ при различных фиксированных напряжениях на ФПСКЯ: *a* — образец на основе МОСТЭ СКЯ, *b* — образец на основе МЛЭ СКЯ.

С учетом полученного результата можно записать формулу для ВАХ СКЯ в виде

$$J_d = e \cdot m^* \cdot kT (\pi \hbar^2 L_p)^{-1} \cdot \exp(-\phi(v)/kT) \cdot V_d(v) \quad (2.4.)$$

В формуле (2.4) два последних сомножителя зависят от внешнего напряжения и существенным образом влияют на ВАХ СКЯ, особенно в случае, когда стенки квантовых ям являются непрямоугольными.

2.4.2. Влияние непрямоугольности квантовых ям.

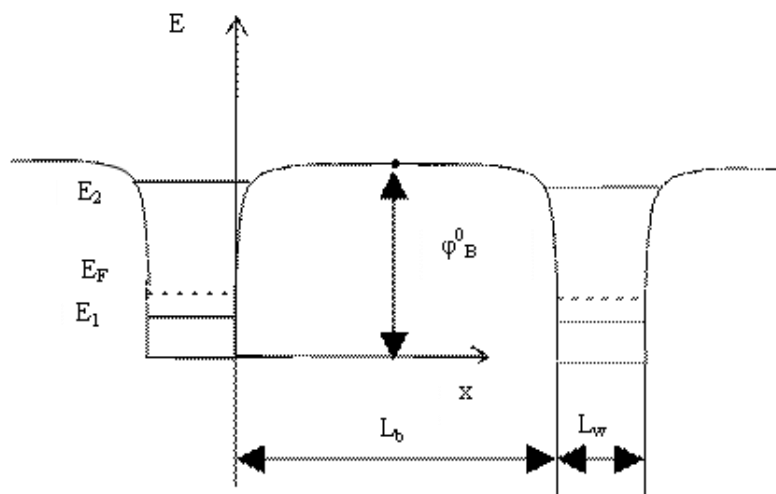
В основе развитой ниже теоретической модели ВАХ содержится предположение об отклонениях зонных диаграмм реальных СКЯ от расчетных, которые проявляются как в структурах, выращенных наиболее распространенным методом МЛЭ, так и, в большей степени, в структурах, выращенных методом МОСГЭ.

Рассмотрим гипотетическую модель реальной СКЯ [16]. На рис.2.8 а) представлена квантовая яма в отсутствие внешнего электрического поля, образованная двумя полупроводниковыми гетеропереходами в зоне проводимости, например, в системе GaAs/AlGaAs. Будем считать, что в яме содержатся два дискретных уровня, верхний из которых близок (с точностью до kT , где k -постоянная Больцмана, T -абсолютная температура) или совпадает с дном зоны проводимости барьера. Максимальный разрыв зон на гетерогранице составляет величину ϕ_B^0 . Полагаем также, что яма равномерно по толщине легирована донорной примесью (Si в GaAs), и уровень Ферми E_F находится несколько выше основного уровня с энергией E_1 , что характерно для большинства СКЯ, используемых для создания фотодетекторов.

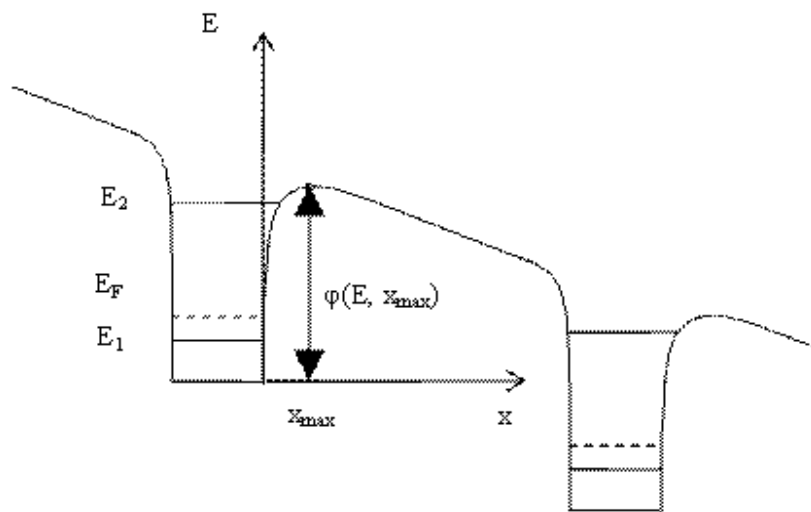
При приложении к СКЯ внешнего напряжения энергетическая диаграмма квантовой ямы деформируется (рис.2.8.б). Вследствие эффекта Шоттки величина $\phi_B(V, x)_{\max}$ (см.(1)) уменьшается и располагается на расстоянии $x_{\max}$ от гетерограницы. Зависимость $\phi(V, x)$ можно представить как:

$$\varphi(V, x) = \varphi_B(x) - E_F - x \cdot E = \varphi(E, x) \quad (2.5)$$

где E – электрическое поле в барьере; $\varphi_B(x)$ – координатная зависимость высоты барьера в отсутствие поля.



а)



б)

Рис.2.8. а),б). Зонная диаграмма СКЯ: а — без напряжения; б — при подаче напряжения

Чтобы оценить зависимость $\varphi(E, x)$, представим зонную диаграмму барьера в некотором обобщенном аналитическом виде:

$$\varphi_B(x) = \varphi_B^0 \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot x)] \cdot \{1 - \exp[\alpha \cdot (x - L_b)]\} \quad (2.6.)$$

где α – некоторый параметр, характеризующий резкость гетерограницы, L_b – толщина барьера (см. рис. 2.8 а). В дальнейшем мы будем считать $\alpha \ll L_b$, т.е. протяженность областей резкого изменения высоты барьеров существенно меньше толщины последнего. При этом условии правая часть (2.6) будет лишь на несколько процентов отличаться от φ_B^0 на большей части интервала $(0, L_b)$.

Используя (2.6.), запишем выражение для зонной диаграммы при наличии внешнего поля, направленного как показано на рис. 2,8 б) :

$$\varphi_B(E, x) = \varphi_B^0 \cdot [1 - \exp(-\alpha \cdot x)] \cdot \{1 - \exp[\alpha \cdot (x - L_b)]\} - x \cdot E \quad (2.7)$$

Дифференцируя (2.7) и приравнявая производную 0, находим значение $x_{\max}$, при котором $\varphi_B(E, x)$ имеет максимальное значение:

$$x_{\max} = \alpha^{-1} \cdot \ln \{ [E / (2\varphi_B^0 \cdot \alpha)] \cdot [1 + (1 + 4(\varphi_B^0 \cdot \alpha)^2 \cdot E^{-2} \cdot \exp(-\alpha L_b))]^{1/2} \} \quad (2.8)$$

При $E \rightarrow 0$ это выражение стремится к $L_b/2$, как и должно быть в отсутствии внешнего поля. На практике E обычно имеет порядок 10^4 В/см, поэтому (с учетом того, что $1 \ll \alpha \cdot L_b$) произведение $(\varphi_B^0 \cdot \alpha)^2 \cdot E^{-2} \cdot \exp(-\alpha \cdot L_b) \ll 1$, и:

$$x_{\max} = \alpha^{-1} \cdot \ln(\varphi_B^0 \cdot \alpha / E) \quad (2.9)$$

Подставляя (2.9) в (2.7), получим:

$$\varphi(E, x_{\max}) = \varphi_B^0 - E_F - (E/\alpha) \cdot [1 + \ln(\varphi_B^0 \cdot \alpha / E)] \quad (2.10)$$

(При выводе (2.10) мы пренебрегли членами, содержащими $\exp(-\alpha \cdot L_b)$). Это выражение должно стоять в (2.4) вместо $\varphi(V)$.

На основе полученных результатов была предложена уточненная ВАХ, учитывающая особенности термогенерации носителей в зону с двумерной плотностью состояний [2], полевую зависимость термической энергии активации $\phi(v)$ основного состояния в квантовой яме и дрейфовой скорости носителей в зоне проводимости в барьере [16]:

$$J = e \cdot m^* \cdot kT (\pi \hbar^2 L_p)^{-1} \cdot \exp\{-e \cdot (\phi_B^0 - E_F)/kT\} \cdot \exp\{[e \cdot E/(\alpha \cdot k \cdot T)] \cdot [1 + \ln(\phi_B^0 \cdot \alpha/E)]\} \times \mu \cdot E \cdot (1 + (\mu \cdot E/v_s)^2)^{-1/2} \quad (2.11)$$

где ϕ_B^0 – энергия разрыва зон проводимости ямы и барьера, E_F – энергия Ферми, отсчитанная от дна зоны проводимости ямы, α – параметр, характеризующий непрямоугольность квантовой ямы, μ – подвижность электронов в зоне проводимости барьера, E – напряженность поля в СКЯ, v_s – скорость насыщения электронов. В (2.11) подставлено также выражение для полевой зависимости дрейфовой скорости $v_d = \mu \cdot E \cdot (1 + (\mu \cdot E/v_s)^2)^{-1/2}$, v_s – скорость насыщения, μ – подвижность. Заметим, что полученное выражение справедливо лишь в диапазоне напряжений, при которых туннельные токи пренебрежимо малы по сравнению с токами термоэлектронной эмиссии. На рис.2.9 представлены ВАХ, рассчитанные по формуле (2.11) со следующими значениями входящих в нее параметров: $\phi_B^0 - E_F = 0,128$ эВ; $\phi_B^0 = 0,23$ эВ; $\mu = 2 \times 10^3$ см² В⁻¹с⁻¹; $m^* = 0,067m_0$, m_0 – масса покоя электрона; $L_p = 5 \times 10^{-6}$ см; $v_s = 2 \times 10^7$ см с⁻¹. Как видно из графиков, форма ВАХ в значительной степени зависит от резкости границ барьер – яма, т.е. от α : с уменьшением резкости границ, т.е. с уменьшением α , ВАХ становится круче. На рис.2.10 а), б) представлены ВАХ тестовых образцов ФП СКЯ, изготовленных из структур, полученных МОСГЭ и МЛЭ, измеренные при 77 К. Там же для сравнения представлены ВАХ, рассчитанные по формуле (2.11) с использованием экспериментально полученных значений $\phi_B^0 - E_F$ и с подбором подходящих значений α . В диапазоне напряжений смещения 2-5В, в котором

обычно работают ФПСКЯ рассматриваемой конструкции, образцы обоих типов имеют ВАХ близкие к расчетным.

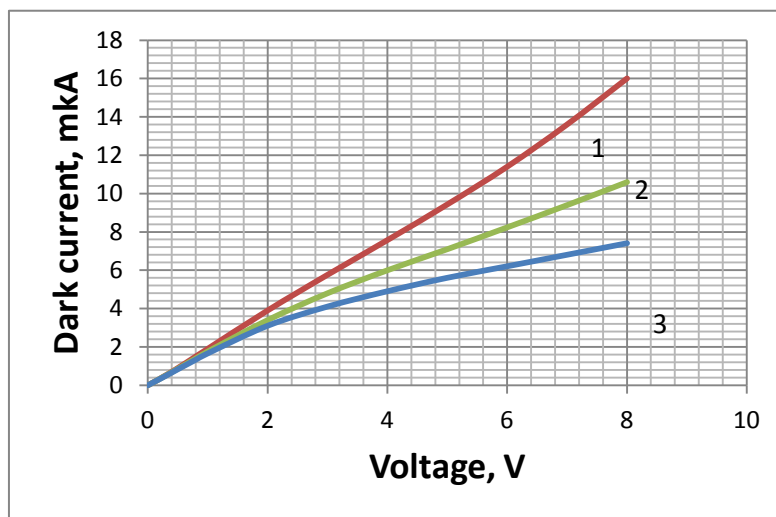
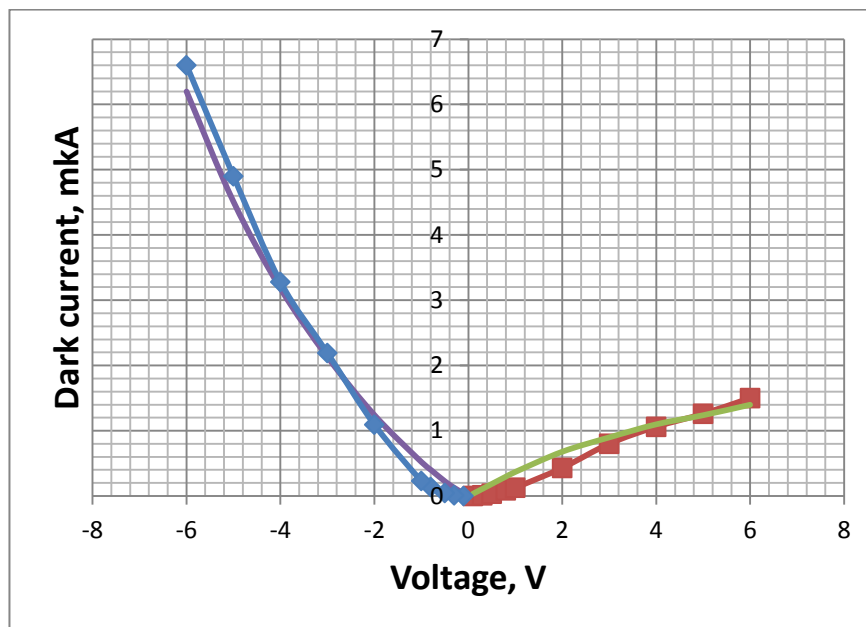
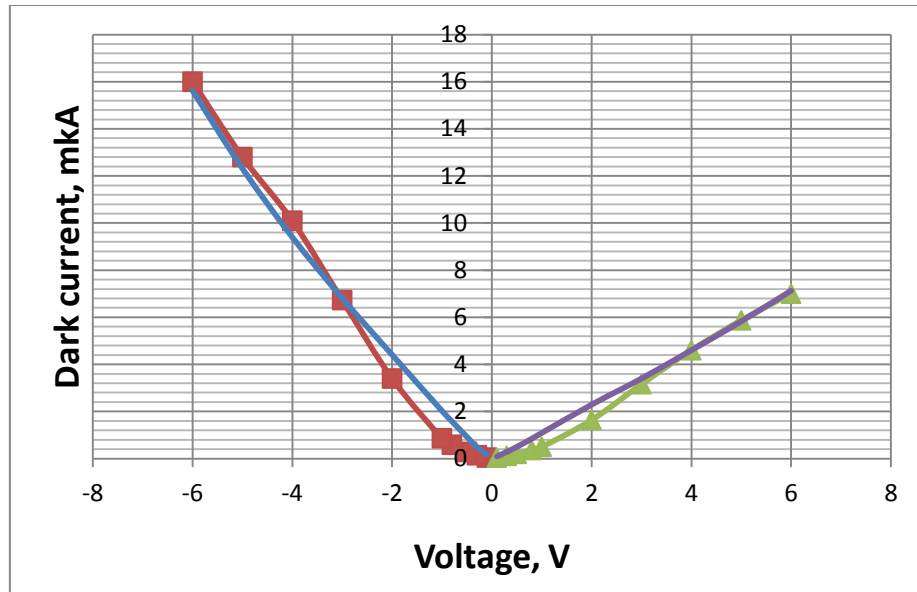


Рис. 2.9. ВАХ, рассчитанные на основе уточненной модели, для различных значений α : 1 — $2 \times 10^7 \text{ см}^{-1}$, 2 — $3 \times 10^7 \text{ см}^{-1}$, 3 — $5 \times 10^7 \text{ см}^{-1}$.



a)



б)

Рис.2.10 а),б). Экспериментальные (с точками) и расчетные ВАХ ФПСКЯ при 77К: а) — образец на основе МЛЭ СКЯ, б) - образец на основе МОСГЭ СКЯ.

В диапазоне напряжений 0-2 В экспериментальные ВАХ образцов обоих типов заметно отличаются от расчетных. Одной из наиболее вероятных причин, приводящих к такой форме ВАХ, может быть влияние контактов. В самом деле, контактные области образцов ФПСКЯ обоих типов представляют собой изотипный гетеропереход, в котором отсутствуют эффекты размерного квантования, подобные тем, что имеются в СКЯ. В этом случае разрыв зон проводимости на границе n^+ - GaAs- n -AlGaAs в контактной области ФП СКЯ может быть значительно больше термической энергии активации в квантовых ямах СКЯ. Данное обстоятельство может быть причиной более высокого контактного сопротивления ФП СКЯ при малых напряжениях, чем сопротивление СКЯ. Для установления справедливости указанного предположения, были построены зависимости термической энергии активации $\phi(v)$ темнового тока I_d ФП СКЯ обоих типов (рис.2.11), полученные из экспериментальных зависимостей $I_d/T = F(1/T)$, измеренных при различных напряжениях смещения <1 В.

В образце, полученном из МОСГЭ СКЯ, $\phi(v)$

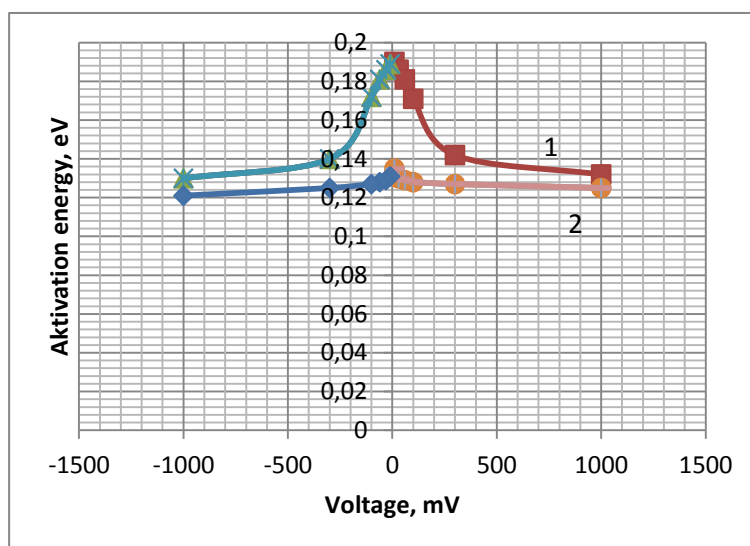


Рис.2.11. Зависимость термической энергии активации темнового тока ФП СКЯ от напряжения смещения: 1 — образец на основе МЛЭ СКЯ, 2 - образец на основе МОСГЭ СКЯ.

относительно слабо меняется с напряжением в диапазоне 0-1В, тогда как в образце из МЛЭ СКЯ изменение $\phi(v)$ весьма значительно, особенно в диапазоне 0-0,3В. При этом термическая энергия активации в области 0-0,01 В примерно в полтора раза (0,19 эВ против 0,13 эВ) больше той, которая по оценкам должна соответствовать положению уровня Ферми в квантовой яме относительно дна зоны проводимости в барьере. Уменьшение $\phi(v)$ оказывается очень чувствительным по отношению к внешнему полю и не может быть объяснено деформацией барьеров в СКЯ, как это предполагалось в [36]. В самом деле, для снижения высоты барьера на 0,06 эВ на каждом периоде СКЯ должна падать примерно такая же величина напряжения, т.е. внешнее напряжение должно быть не менее 3В, тогда как наблюдаемые изменения происходят при напряжениях на порядок меньше. Отметим также, что столь большая энергия активации наблюдается только в образце, полученном из МЛЭ СКЯ.

Учитывая, что конструктивно обе СКЯ очень близки, объяснение наличия отмеченного выше эффекта следует, по-видимому, искать в различии технологий их получения. Основным различием технологий МЛЭ и МОСГЭ, которое в данном случае играет определяющую роль, на наш взгляд является температура процесса роста СКЯ. Так, если МЛЭ описываемых СКЯ проводят при температурах не выше 600°C , то МОСГЭ- при температурах свыше 700°C . При таких температурах влияние диффузии на распределение кремния в барьерах на границах с ямами и контактными слоями может быть весьма заметным [37]: кремний может проникать в барьеры на десятки ангстрем, при этом диффузия кремния стимулирует взаимную диффузию основных элементов СКЯ, что может приводить к сглаживанию соответствующих границ и образованию плавного изотипного гетероперехода. В более низкотемпературном процессе МЛЭ диффузия кремния не столь существенна, границы GaAs-AlGaAs более резкие, а переходы контактный слой-барьер представляют собой гетеропереходы, в которых процессы термогенерации носителей определяются разницей между уровнем Ферми в контактном слое и дном зоны проводимости барьера. В нашем случае указанная разность должна примерно быть равной 0,2 эВ, что близко к измеренному значению энергии активации. При малых напряжениях на ФП СКЯ его сопротивление определяется контактными гетеропереходами, для описания ВАХ которых можно использовать модель одиночного изотипного гетероперехода [33] с учетом полевой зависимости высоты барьера на границе n^+ - GaAs- n -AlGaAs. По мере увеличения напряжения высота барьера уменьшается, сопротивление контактного гетероперехода падает, и ВАХ начинает определяться свойствами СКЯ и при напряжении свыше 2В удовлетворительно совпадает с расчетной зависимостью, построенной с помощью выражения (2.11). В образце, изготовленном из МОСГЭ СКЯ, по причинам, обсуждавшимся выше,

контактные гетеропереходы имеют, по-видимому, более размытые границы, и полевая зависимость термической энергии активации выражена слабее. Однако при малых напряжениях смещения они также имеют более высокое сопротивление, чем СКЯ, и определяют форму ВАХ в этой области напряжений.

Полученная модель ВАХ позволяет оценить ряд практически полезных параметров, например, степень пологости стенок КЯ. При выводе соотношений, описывающих полевую зависимость положения потенциального барьера, предполагалось, что стенки КЯ симметричны. Однако наиболее существенное влияние на форму ВАХ оказывают полевые эффекты лишь вблизи одной из стенок – той, в направлении которой в области над ямой движутся электроны (рис.2.8,б). Поэтому в случае неодинаковых стенок степень их отклонения от вертикальности можно оценить отдельно, анализируя ВАХ, снятые при соответствующих полярностях.

Покажем, как с помощью (2.11) можно оценить величину параметра α . При больших полях, когда $[e \cdot E \cdot L_b / (k \cdot T)] \gg 1$, и дрейфовая скорость достигает насыщения формула (2.11) может быть упрощена:

$$I = A \cdot \exp\{-e \cdot (\phi_B^0 - E_F) / (k \cdot T)\} \cdot \exp\{[e \cdot E / (\alpha \cdot k \cdot T)] \cdot [1 + \ln(\phi_B^0 \cdot \alpha / E)]\} \cdot v_s \quad (2.12)$$

Выбрав на экспериментальной ВАХ точки, соответствующие двум значениям E , можно вычислить α по формуле:

$$\alpha = e \cdot (E_1 - E_2) \cdot \{k \cdot T \cdot \ln(I_1 / I_2)\}^{-1} \quad (2.13)$$

где I_1 и I_2 значения токов, соответствующие E_1 и E_2 . Формула (2.13) была получена при условии, что $(E_1 - E_2) \ll E_1, E_2$, а также $(E_1 - E_2) \ll \alpha \cdot k \cdot T / e$.

Расчеты α с помощью формулы (2.13) для обоих рассмотренных выше образцов ФП СКЯ дали следующие результаты: при положительной полярности напряжения величина α составляет в обоих случаях около $3,3 \times 10^6 \text{ см}^{-1}$ что соответствует ширине переходной области границы барьер-яма около $30 \text{ \AA}$;

при противоположной полярности ширина переходной области в обоих случаях оказывается больше, причем для МЛЭ образца она составляет $33\text{\AA}$, а для МОСГЭ образца - $37\text{\AA}$. Полученные результаты согласуются с оценками, сделанными путем моделирования кинетики роста квантоворазмерных структур [17].

2.4.3. Следствия из модели непрямоугольных квантовых ям.

Проведенный анализ ВАХ позволяет сделать ряд выводов, касающихся других важнейших характеристик ФП СКЯ: шумов и фоточувствительности. Согласно многочисленным экспериментальным данным доминирующим шумом в СКЯ является генерационно-рекомбинационный, который описывается формулой : $I_n = (4 \cdot e \cdot I_d \cdot g \cdot \Delta f)^{1/2}$, где I_n – шумовой ток, I_d – темновой ток, g – коэффициент фотоэлектрического усиления, Δf – частотная полоса в которой регистрируется шум. Согласно [38], коэффициент g может быть выражен через вероятность захвата носителя в яму γ : $g = (N \cdot \gamma)^{-1}$, где N – число ям в СКЯ. Величина γ может быть оценена следующим образом. Согласно [35], вероятность прохождения электрона над областью захвата в яме : $P_w = (1-R) \cdot \exp(-\tau_d/\tau_l)$, где R – коэффициент квантово-механического отражения электрона на границах яма-барьер; $1 - \exp(-\tau_d/\tau_l)$ – вероятность захвата носителя в яму. Тогда $\gamma = 1 - P_w = 1 - (1-R) \cdot \exp(-\tau_d/\tau_l)$, τ_d – время нахождения электрона над областью, где он может рекомбинировать в яму, τ_l – время жизни электрона в этой области. Коэффициент отражения R быстро уменьшается с ростом внешнего поля и стремится к 0. Далее мы ограничимся рассмотрением случая, когда $R \ll 1$. Кроме того, будем полагать, что $\tau_d/\tau_l < 1$. Тогда $\gamma \approx \tau_d/\tau_l$. В достаточно грубом, но не искажающем сути картины приближении можно считать, что $\tau_d \approx (L_w + \alpha_1^{-1} + \alpha_2^{-1})/v_s$, где L_w – номинальная толщина ямы, α_1 и α_2 – показатели резкости границ ямы.

Используя (2.12) с учетом сделанных уточнений I_n можно представить в виде:

$$I_n \sim (\exp\{[e \cdot E / (\alpha_1 \cdot k \cdot T)] \cdot [1 + \ln(\varphi_B^0 \cdot \alpha_1 / E)]\} \cdot (v_s)^2 \tau_l / [N(L_w + \alpha_1^{-1} + \alpha_2^{-1})])^{1/2} \quad (2.14)$$

В (2.14) α_1 соответствует границе, в направлении которой происходит дрейф электронов. Из (2.14) видно, что величина шума будет тем больше, чем меньше α , т.е. чем более пологими являются стенки ям, причем за счет первого сомножителя рост шумового тока будет экспоненциальным.

Фоточувствительность ФП СКЯ также будет зависеть от непрямоугольности квантовых ям и прежде всего из-за ее зависимости от коэффициента фотоэлектрического усиления. Как было показано выше, $g \approx v_s \tau_l / [N(L_w + \alpha_1^{-1} + \alpha_2^{-1})]$ и, таким образом, уменьшается обратно пропорционально α^{-1} , т.е. с ростом протяженности участков изменения высоты границ барьер-яма. В результате мы можем ожидать уменьшения соотношения сигнал/шум (а значит и пороговых характеристик чувствительности : D^* , $NE\Delta T$, NEP) при возрастании пологости границ квантовых ям. Однако, как оказалось, зависимость чувствительности от геометрии квантовой ямы имеет более сложный характер.

2.5. Абсолютная чувствительность

Наряду с ВАХ абсолютная чувствительность (АЧ) ФП СКЯ является важнейшей характеристикой, определяющей потребительские качества фотоприемника. Экспериментальные исследования АЧ, проведенные на большом количестве ФП СКЯ, выявили ряд особенностей, характерных для большинства структур. Среди них необходимо выделить следующие:

- ФП СКЯ с асимметричными ВАХ, как правило, имеют асимметричные зависимости абсолютной чувствительности от напряжения $R(v)$, при этом ветви ВАХ и $R(v)$ с большими значениями токов (фототоков) соответствуют одной и той же полярности напряжения смещения;

- зависимости $R(v)$ линейны в диапазоне напряжений от 0 до примерно 3 В, а при больших напряжениях либо переходят в насыщение, либо, достигнув максимума, испытывают спад, при этом в одном и том же образце ФП СКЯ $R(v)$ могут иметь различный вид в зависимости от полярности напряжения смещения;

- $R(v)$ может достигать весьма значительных величин при нормальном падении излучения в образцах ФП СКЯ без специальных устройств ввода типа дифракционной решетки или 45° скола подложки.

О наблюдении указанных особенностей в том или ином виде сообщалось и в ряде зарубежных публикаций, однако подробного анализа возможных причин их возникновения не проводилось. В настоящей работе представлены результаты экспериментальных исследований АЧ в ФП СКЯ и дано описание наиболее вероятных процессов, приводящих к появлению указанных особенностей в ней.

2.5.1. Методика измерения АЧ

При измерениях АЧ использована методика, изложенная в ГОСТ 17772-89. Согласно ей в качестве излучателя использован макет абсолютно черного тела (АЧТ) с модулятором. Температура АЧТ – 573К, частота модуляции 1200Гц. Одноэлементные образцы ФП СКЯ размещались в вакуумируемом криостате с входным германиевым окном. Охлаждение образца ФП осуществлялось жидким азотом, а при необходимости достижения более низких температур использовалась откачка паров азота. Сигналы с ФП регистрировались с помощью малошумящего усилителя тока SR 570, из которого он направлялся в

селективный усилитель У2-8. С помощью указанной комбинации приборов (кроме АЧТ) проводились и измерения шумов ФП СКЯ.

В следующем разделе на примере одного из типичных образцов ФП, изготовленного из СКЯ, выращенной методом МОСГЭ, представлены экспериментальные результаты измерений характеристик чувствительности [3]. Вместе с ними приведен набор характеристик ФП, обычно используемых для оценки качества СКЯ и позволяющих судить о сегодняшних возможностях такого рода структур.

2.5.2. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Использованная для изготовления ФП СКЯ имела номинальные конструктивные параметры, определяемые таблицей 2.2. Из выращенных структур с использованием химического травления изготавливались экспериментальные образцы одиночных фотоприемников ФП в виде мезы размером 400x400 мкм. Специальные устройства ввода излучения в ФП, типа дифракционной решетки или 45^0 скола края подложки отсутствовали. Омические контакты формировались посредством напыления через маску из фоторезиста сплава Au:Ge, взрыва напыленного слоя и последующего его вжигания.

На рис.2.12 представлены ВАХ образца ФП, защищенного от фоновой засветки холодным экраном. Правые ветви ВАХ соответствуют “–” напряжения питания на верхнем контакте ФП, т.е. направление поля совпадает с направлением роста СКЯ. ВАХ исследованных образцов были отчетливо асимметричны. Отметим, что для полярности напряжения питания, когда на верхнем контакте “+”, характерна более высокая чувствительность ФП при одном и том же значении напряжения.

На рис.2.13 представлен спектр fotocувствительности, полученный при одной полярности напряжения (“+” на верхнем контакте ФП).

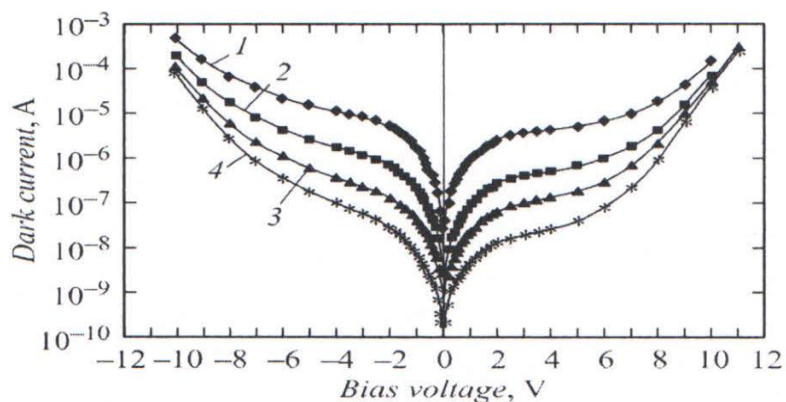


Рис.2.12. Вольт-амперные характеристики ФП СКЯ при температурах К: 1-78; 2 – 70; 3-65; 4-60.

Форма спектра и положение его максимума не испытывают существенных изменений с изменением температуры в интервале 60-77К или напряжения на образце в интервале 1-4 В.

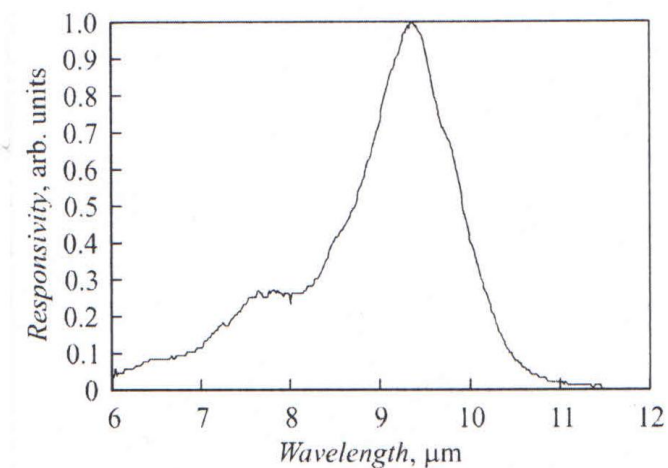


Рис.2.13. Спектр фоточувствительности ФП СКЯ

На рис.2.14 представлены зависимости абсолютной чувствительности образца ФП в максимуме спектра от напряжения смещения при обеих его полярностях и различных температурах. Указанные зависимости получены с учетом коэффициента использования излучения от АЧТ, который рассчитывался посредством численного интегрирования спектра фоточувствительности (см.рис.2.13). На зависимостях при обеих полярностях отчетливо присутствуют максимумы, происхождение которых мы обсудим ниже.

Как и ВАХ зависимости чувствительности обладают некоторой асимметрией по отношению к полярности напряжения. Кроме того, обращает на себя внимание величина чувствительности, достигающая долей А/Вт и полученная без специальных устройств ввода излучения при нормальном его падении по отношению к фронтальной поверхности ФП. Возможные причины такого эффекта будут обсуждаться ниже.

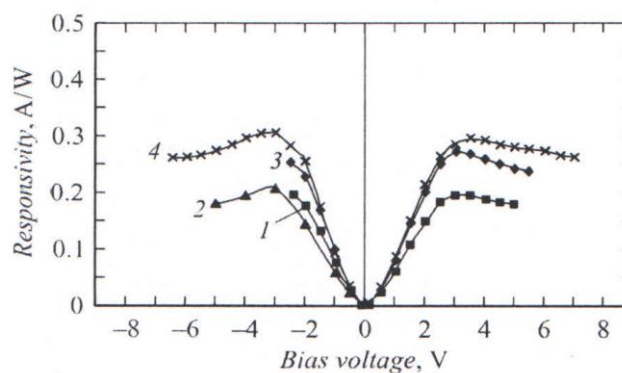


Рис.2.14. Зависимости абсолютной чувствительности ФП СКЯ в максимуме спектра от напряжения при температурах, К: 1 – 78; 2 – 70; 3 – 65; 4 – 60.

На рис.2.15 представлены зависимости шумового тока ФП от напряжения при двух его полярностях и различных температурах. На основе полученных зависимостей по известной формуле $I_{ш} = (4e \cdot I_T \cdot g \cdot \Delta f)^{1/2}$ (где e – заряд электрона; I_T – темновой ток; g – коэффициент фотоэлектрического усиления; Δf – полоса частот, в которой регистрируется шум) определялись зависимости коэффициента фотоэлектрического усиления ФП от напряжения, представленные на рис.2.16. Значение g находится в пределах 0,5 - 0,6, что является типичным для ФП, полученных из аналогичных структур, выращенных МЛЭ, и говорит о достаточном совершенстве барьеров в исследуемых образцах.

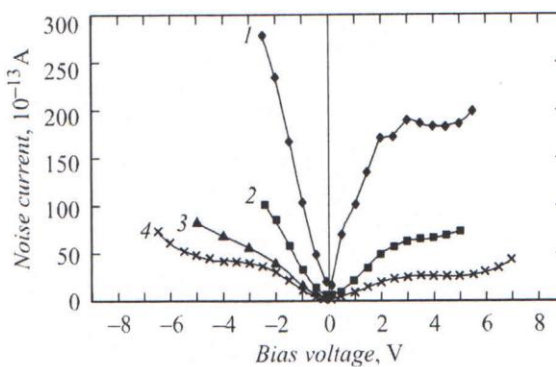


Рис.2.15. Зависимости шумового тока ФП СКЯ при температурах, К: 1 – 78; 2 – 70; 3 – 65; 4 – 60.

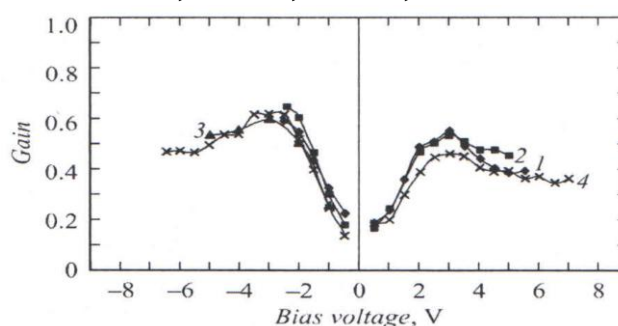


Рис.2.16. Зависимости коэффициента фотоэлектрического усиления ФП СКЯ от напряжения при температурах, К: 1 – 78; 2 – 70; 3 – 65; 4 – 60.

На рис.2.17 представлены зависимости обнаружительной способности ФП – $D_{\lambda\max}^*$, от напряжения при различных температурах. Величина $D_{\lambda\max}^*$ рассчитывалась на основе результатов измерения абсолютной чувствительности и шумового тока (рис.2.14, 2.15).

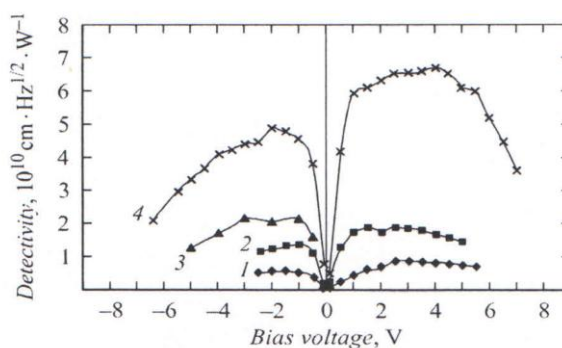


Рис.2.17. Зависимости обнаружительной способности ФП СКЯ от напряжения при температурах, К: 1 – 78; 2 – 70; 3 – 65; 4 – 60.

Полученные значения $D_{\lambda_{\max}}^*$ около $6 \times 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$ при 65K соответствуют лучшим достижениям у аналогов, выращенных МЛЭ, но имеющих при этом специальные устройства ввода излучения в виде сошлифованного под углом 45° края подложки.

Вернемся к обсуждению зависимостей абсолютной чувствительности от напряжения. При отрицательной полярности напряжения смещения на нижнем контактном слое ВАХ, $R(v)$ и $g(v)$ имеют большие значения, чем при противоположной полярности. Как отмечалось в разделе 2.4.2, в наибольшей степени на форму ВАХ влияет та граница квантовой ямы, в направлении которой движутся электроны. Это означает, что в формулах (2.11) и (2.12) должны стоять те значения α , которые соответствуют данной границе КЯ. Таким образом, анализируя асимметрию ВАХ, мы можем оценить пологость обеих границ КЯ. По аналогии с ВАХ, при анализе асимметрии $R(v)$ и $g(v)$ можно также использовать представления об асимметрии КЯ, т.е. считать, что при движении электронов в направлении более пологой границы КЯ достигаются большие значения $R(v)$ и $g(v)$, чем при их движении в противоположном направлении. Как отмечалось в разделе 2.4.3, существенное влияние на зависимости $R(v)$ и $g(v)$ оказывает не только время пребывания электрона над квантовой ямой τ_d , но и его время жизни. В работе [39] было сделано предположение, что в несимметричной КЯ движение электронов в сторону более пологой стенки характеризуется более высоким временем жизни, что приводит к увеличению $R(v)$ и $g(v)$. Наличие различий в величине $R(v)$ и $g(v)$ при противоположных полярностях напряжения смещения авторы [39] связывают с тем, что при движении электронов в сторону пологой стенки они пролетают над ямой при более высокой энергии, чем при обратной полярности. И, даже испытав рассеяние на ЛО-фононе над КЯ и потеряв при этом энергию в 36 мэВ, они могут достигать дна зоны проводимости следующего барьера. В результате вероятность захвата падает, и, следовательно, время жизни возрастает. При

обратной полярности электрон с большей вероятностью рекомбинирует в яму при рассеянии на LO-фононе, т.к. при подлете к ней он имеет меньшую энергию, чем дно зоны проводимости следующего барьера. Несмотря на более высокие значения $R(v)$ при отрицательной полярности, обнаружительная способность D^* оказывается выше при противоположной полярности. Такой результат можно объяснить тем, что сигнал и шум, входящие в D^* в виде отношения, по-разному зависят от пологости границ КЯ: если шумовой ток (т.е. темновой ток или ВАХ) растет экспоненциально с увеличением области протяженности границы, то чувствительность растет значительно медленнее. В результате соотношение сигнал/шум оказывается больше при движении электронов в направлении более резкой границы КЯ.

Обсудим теперь наличие максимумов в зависимостях $R(v)$ и $g(v)$. При 3 В указанные характеристики имеют ярко выраженный максимум и спадают при дальнейшем повышении напряжения. Указанные особенности могут быть объяснены из следующих соображений. Насыщение и спад зависимостей $R(v)$ и $g(v)$ могут быть связаны с насыщением дрейфовой скорости электронов в AlGaAs при напряженности электрического поля в барьере $\sim 10^4$ В/см [40,41]. Именно такой случай представлен на рис.2.14: зависимость $R(v)$ достигает максимума и спадает. Как показано в работе [40], появление максимума в зависимостях $R(v)$ характерно для ФП СКЯ с относительно высоким содержанием Al- около 27% и более. В этом случае значительная часть электронов имеет возможность на нескольких периодах СКЯ приобрести энергию, (около 100 мэВ), необходимую для перехода из прямой Γ -долины в непрямые L или X, где их подвижность падает. Наряду с представленной выше ситуацией возможна и такая: зависимость $R(v)$ не имеет ярко выраженного максимума, а при достижении определенного значения выходит на плато. Согласно [40] данная ситуация может быть связана высокой вероятностью захвата электрона в КЯ, приближающейся к 100% на нескольких периодах. В

результате электрон не успевает достичь указанной энергии на коротком участке СКЯ и движется с относительно постоянной скоростью насыщения, что отражается на зависимостях $R(v)$ и $g(v)$ в виде участков насыщения. Таким образом, в обоих рассмотренных вариантах зависимостей $R(v)$ и $g(v)$ определяющим фактором является наличие или отсутствие возможности у электрона приобрести необходимую для перехода в не прямые долины энергию на относительно коротком участке СКЯ. Указанная возможность в свою очередь связана с зависящей от направления дрейфующих в СКЯ электронов вероятностью их захвата в КЯ. Справедливость предположений о связи форм $R(v)$ и $g(v)$ с вероятностью захвата в КЯ, определяемой формой границ последней, подтверждает и такой результат из наших экспериментов. В некоторых случаях характеристики $R(v)$ и $g(v)$ одного и того же образца ФП СКЯ имели на одной из ветвей максимум, а другая ветвь, соответствующая противоположной полярности, после линейного роста плавно переходила в насыщение при высоких напряжениях. При этом ветвь с максимумом соответствует ветви ВАХ с большими значениями токов, т.е. полярности, при которой электроны движутся в направлении более пологой границы. Используя представленные выше соображения, можно предположить, что при полярности, обеспечивающей появление максимума на зависимостях $R(v)$ и $g(v)$, значительная часть носителей, благодаря более высокому времени жизни успевают приобрести энергию на нескольких периодах СКЯ, достаточную для перехода в не прямые долины. При противоположной полярности время жизни оказывается недостаточным для достижения такой энергии.

2.5.3. Чувствительность при нормальном падении излучения

С момента появления первых значимых работ по фоточувствительности СКЯ и по настоящее время принято считать, что селективность чувствительности СКЯ по отношению к поляризации излучения является их неотъемлемым фундаментальным свойством [2]. Указанная особенность СКЯ

предсказывалась теоретически на основе модели прямоугольной симметричной квантовой ямы. Первые же эксперименты, выполненные на СКЯ, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии, подтвердили весьма заметную селективность их фоточувствительности по отношению к поляризации излучения. Попытки преодолеть селективность чувствительности, особенно в многоэлементных фотоприемниках, сводились к созданию на поверхности чувствительных элементов устройств, изменяющих направление распространения входного излучения по отношению к плоскости слоев СКЯ. Как правило, такие устройства выполняются в виде различного рода дифракционных решеток. Между тем по мере расширения фронта исследований СКЯ стали появляться экспериментальные работы, в которых сообщалось о наблюдении заметной фоточувствительности СКЯ при нормальном падении излучения. Для объяснения причин обнаруженного эффекта использовались разнообразные модели процессов поглощения излучения в СКЯ, в основе которых лежали предположения, опирающиеся, например, на анизотропию эффективной массы электронов в СКЯ, выращенных на подложках со сложной ориентацией [42], на влияние эффектов спин – орбитального взаимодействия [8] и др. [43]. Однако оценки, сделанные на основе предложенных моделей, не дали результатов, количественно близких к экспериментальным. Следует отметить, что подавляющее большинство экспериментальных работ по исследованию СКЯ вообще и их фоточувствительности в частности было выполнено при использовании СКЯ, выращенных методом МЛЭ. К немногочисленным публикациям по исследованию СКЯ, выращенных иным, чем МЛЭ, методом, можно отнести работу, результаты которой мы обсуждали в данном разделе выше [3]. Наличие заметной фоточувствительности в наших СКЯ при нормальном падении излучения можно было бы объяснить действием боковой поверхности мезы ФП как своеобразной призмы, выполняющей функцию устройства ввода. Однако оценки, сделанные на основе сопоставления площадей

боковой и фронтальной поверхностей мезы, показывают, что для реализации полученной чувствительности в несколько десятых долей А/Вт СКЯ должна обладать временем жизни неравновесных носителей свыше 10^{-8} с либо квантовой эффективностью свыше 100%. Однако проведенные измерения не подтвердили ни одно из указанных предположений. Для объяснения полученного результата обратим внимание на следующее обстоятельство. Слабое поглощение излучения при его нормальном падении наблюдается, как правило, в СКЯ, выращенных методом МЛЭ. Такие СКЯ в наибольшей степени соответствуют модели прямоугольных и симметричных ям, положенной в основу теории, объясняющей данное явление. Однако для непрямоугольных асимметричных ям такая теория не разработана. Между тем, как показано в работе [44], отклонения формы ям от симметричной могут существенно влиять на поляризационную зависимость поглощения излучения в СКЯ. В случае СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, возможно существенное отклонение формы реальных ям от классической модели. Возникновение асимметрии в резкости границ яма – барьер может быть связано с особенностями процесса МОСГЭ. В МОСГЭ газовые реагенты имеют более высокое давление. В этом случае они имеют более высокую вязкость, что может приводить к более продолжительным переходным процессам при переключении газовых потоков и, как следствие, к более существенным, чем в случае МЛЭ, отклонениям формы ямы от прямоугольной и симметричной. Кроме того, как отмечалось выше, процессы МОСГЭ проходят при температурах свыше 700°C . При этих температурах диффузия кремния, которым обычно легируют ямы, становится весьма существенной [45], т.е., независимо от начального положения области легирования, по окончании процесса роста профиль распределения примеси не будет локализован в пределах ямы. Иначе говоря, во всех исследованных структурах, независимо от места введения примеси, она будет присутствовать и в ямах и в барьерах. Это приведет к тому, что при охлаждении до криогенных температур примесь в барьерах будет

ионизована, поскольку электроны перейдут на уровни в ямах, и на границе ям и барьеров возникнет встроенное поле. Приближенные оценки показывают, что величина поля может достигать 10^5 В/см . О возможности влияния электрического поля на механизмы поглощения излучения в СКЯ указывалось в цитированной работе [44], а также в работе [46]. Обсуждаемый эффект будет существенно слабее выражен в СКЯ, полученных МЛЭ, поскольку при температурах роста $\sim 500^\circ - 600^\circ \text{ C}$ примесь не успевает продиффундировать в барьеры, особенно когда в них легируют преимущественно середину ямы.

Для установления наиболее вероятных причин возникновения аномально высокой фоточувствительности СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, при нормальном падении излучения были проведены сравнительные исследования фоточувствительности СКЯ, полученных методами МЛЭ и МОСГЭ. Анализ результатов дает основания в пользу предположения, что причиной повышенной чувствительности СКЯ, полученных методом МОСГЭ, является проникновение кремния в барьеры, приводящее при охлаждении к возникновению встроенного электрического поля на границах яма барьер [47].

2.5.3.1. Экспериментальные образцы и особенности измерений.

Для проведения исследований были использованы образцы СКЯ, выращенные методом МОСГЭ и МЛЭ, имевшие номинально очень сходные конструкции. На подложке из полуизолирующего GaAs с ориентацией (100) последовательно выращивались: нижний контактный слой $n^+ \text{ GaAs}$ ($n \sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 1,5 мкм; 50 периодов барьер-яма состава: барьер- $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $x=0,27$, нелегированный толщиной $450 \text{ \AA}$; яма- GaAs , $n=9 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, толщиной $50 \text{ \AA}$; верхний контактный слой $n^+ \text{ GaAs}$ ($n \sim 1 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) толщиной 0,8 мкм. Выращивание СКЯ методом МОСГЭ проводилось при температуре выше 700° C , а при выращивании методом МЛЭ не выше 600° C . Из выращенных СКЯ изготавливались тестовые фотоприемники в виде меза- структур размером $400 \times 400 \text{ мкм}^2$. Металлические контакты из Au:Ge/Au на поверхности мезы

имели размер 100×100 мкм². Часть тестовых фотоприемников имела со стороны верхнего контакта устройство ввода излучения в виде двумерной фазовой дифракционной решетки (ДР) с периодом 4 мкм и глубиной травленных отверстий около 0,7 мкм. Глубина отверстий выбиралась так, чтобы подавить нулевой порядок дифракции на длинах волны вблизи максимума спектра фоточувствительности. В образцах с ДР верхний контакт полностью покрывался металлом. Тестовые фотоприемники наклеивались на диэлектрические платы со стороны верхнего контакта, т.е. так, чтобы излучение поступало в СКЯ со стороны подложки. Подготовленные таким образом тестовые образцы размещались в вакуумируемом криостате, охлаждаемом жидким азотом и имевшем германиевое окно для доступа сигнального излучения. Измерения спектров фоточувствительности проводились с помощью монохроматора МДР-41. Для измерений абсолютной фоточувствительности использовался макет абсолютно черного тела (АЧТ) при температуре 300°С с модулятором. При измерении шумов, которое проводилось для определения коэффициента фотоэлектрического усиления, использовался малошумящий усилитель SR570. При проведении всех измерений образцы тестовых фотоприемников находились при температуре около 80К.

2.5.3.2. Результаты измерений и их обсуждение

На рис.2.18 представлены спектры фоточувствительности образцов ФП (без ДР), изготовленных из МОСГЭ и МЛЭ СКЯ. Сходство номинальных конструктивных параметров (толщин и состава слоев) СКЯ обеспечило и сходство спектральных характеристик чувствительности. Отметим также, что вольт-амперные характеристики (ВАХ) образцов (не показаны) имели удовлетворительное совпадение как по количественным показателям, так и по характеру асимметрии - при отрицательной полярности напряжения смещения на нижнем контактном слое токи существенно выше, чем при обратной полярности. Сходство указанных характеристик позволяет сделать

предположение о реальном конструктивном сходстве исследуемых СКЯ и использовать при дальнейшем анализе наблюдаемых эффектов ограниченное количество конструктивных параметров.

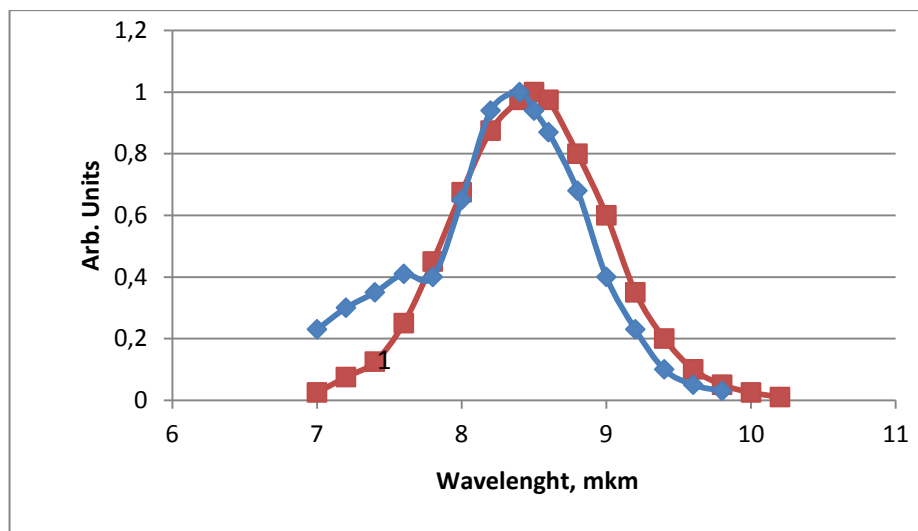


Рис.2.18. Спектры фоточувствительности тестовых образцов ФП на основе СКЯ, выращенных методом : 1-МЛЭ, 2- МОСГЭ

На рис.2.19 представлены зависимости абсолютной чувствительности тестовых образцов фотоприемников (ФП) на основе СКЯ, выращенных методами МОСГЭ и МЛЭ. Чувствительность измерялась при нормальном падении излучения, а ФП не имели ДР.

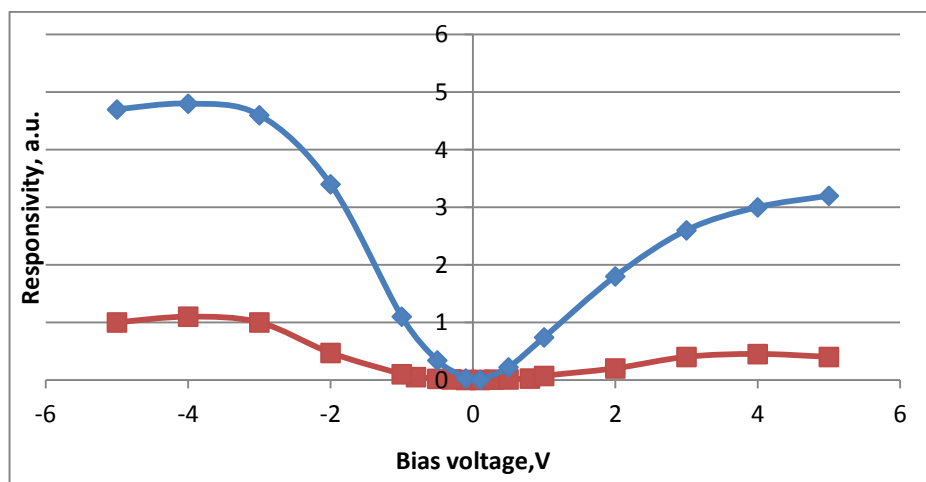


Рис.2.19. Зависимости фоточувствительности от напряжения смещения образцов МЛЭ и МОСГЭ СКЯ .

При обеих полярностях напряжения смещения на ФП чувствительность МОСГЭ ФП примерно в 5 раз выше, чем ФП, изготовленного из МЛЭ СКЯ. Поскольку конструктивно тестовые ФП были идентичны, т.е. имели форму мезы одинакового размера, а боковая поверхность имела одинаковый наклон, то едва ли есть основания объяснять различие значений чувствительности геометрическими особенностями образцов, например, разным вкладом боковой поверхности в эффективность ввода излучения. Из известного определения чувствительности фотопроводника: $R = (e\lambda/hc)\eta g$, где η – квантовая эффективность, g – коэффициент фотоэлектрического усиления, h – постоянная Планка, λ – длина волны излучения, c – скорость света в вакууме, e – заряд электрона, – следует, что при прочих равных условиях на ее значение оказывают решающее влияние лишь два фактора – η и g . Измерения шумов обоих образцов ФП и расчет на их основе коэффициентов фотоэлектрического усиления показал, что значения g в обоих случаях имеют довольно близкие значения, лежащие в интервале 0,15 – 0,25 при напряжениях смещения 2–4 В. Таким образом, единственным фактором, определяющим столь значительное различие в чувствительности, остается квантовая эффективность. Рассчитанные с использованием формулы для R , приведенной к максимуму спектра фоточувствительности, значения квантовой эффективности составили 1,5% и 8% для МЛЭ СКЯ и МОСГЭ СК соответственно.

Для определения зависимости фоточувствительности СКЯ, выращенных разными методами, от поляризации сигнального излучения проводились ее исследования в образцах ФП СКЯ с ДР. На рис.2.20 и 2.21 представлены зависимости абсолютной чувствительности от напряжения смещения для МЛЭ СКЯ и МОСГЭ СКЯ с ДР в качестве устройств ввода излучения. Для сравнения представлены также аналогичные зависимости для образцов без ДР.

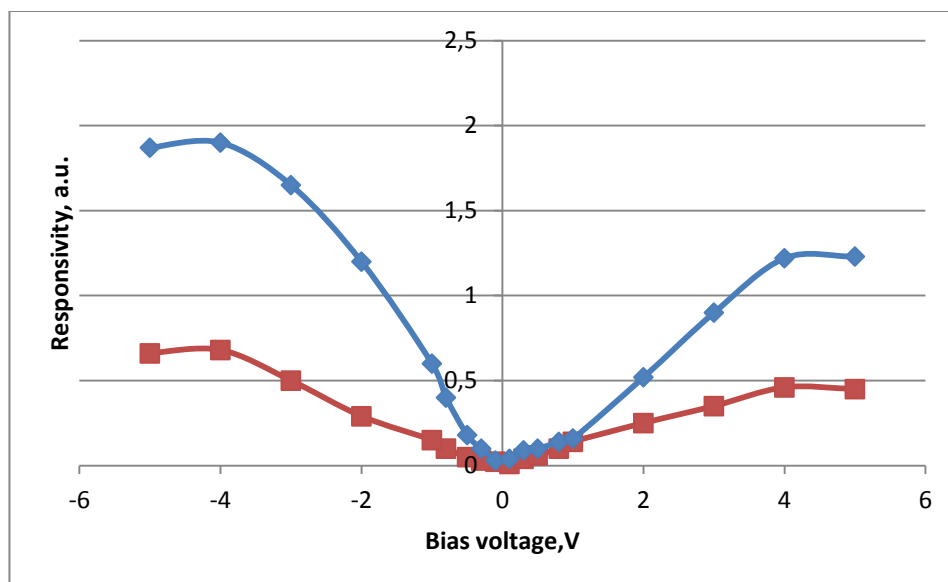


Рис.2.20. Зависимости фоточувствительности от напряжения смещения образцов МЛЭ СКЯ с ДР и без нее.

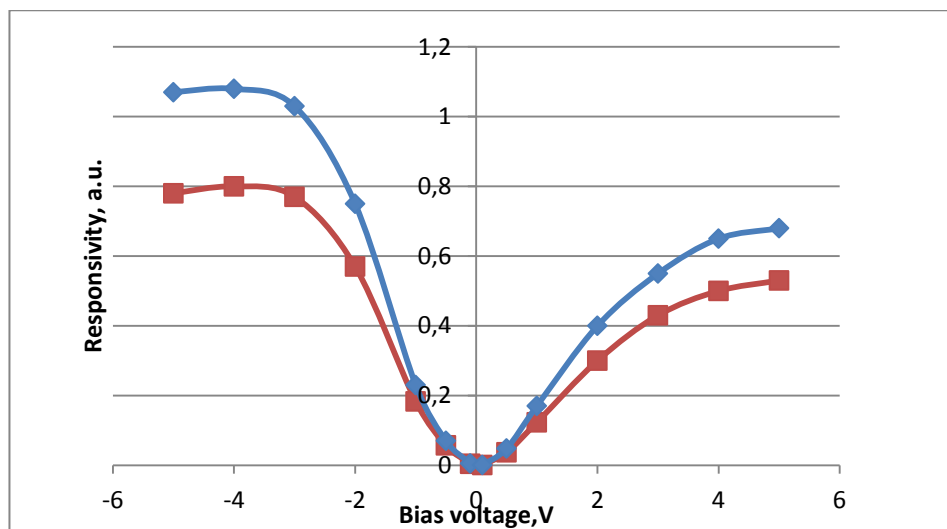


Рис.2.21. Зависимости фоточувствительности от напряжения смещения образцов МОСГЭ СКЯ с ДР и без нее.

Как видно из рис. 2.20, образец МЛЭ СКЯ с ДР ожидаемо обладает значительно более высокой чувствительностью – почти в 3 раза, – чем такой же образец без ДР. Чувствительность же образца МОСГЭ СКЯ с ДР (рис.2.21) возросла лишь примерно на 30% по сравнению с таким же образцом без ДР. Можно предположить, что столь различное поведение образцов СКЯ,

выращенных с использованием различных методов, связано с различной степенью влияния в них селективности чувствительности по отношению к поляризации излучения. Как уже отмечалось выше, различие исследуемых образцов по чувствительности обусловлено главным образом их различием по квантовой эффективности. Согласно известной формуле [48], учитывающей многократные отражения от фронтальной и тыловой поверхностей, квантовая эффективность η фотоприемника в виде плоскопараллельного образца может быть представлена как:

$$\eta = (1 - R_1)(1 - e^{-\alpha l})(1 + R_2 e^{-\alpha l})(1 - R_1 R_2 e^{-2\alpha l})^{-1}$$

где R_1 и R_2 – коэффициенты отражения излучения от фронтальной и тыловой поверхностей фотоприемника соответственно, α – коэффициент поглощения излучения в активной области фотоприемника, l – толщина поглощающей области. В случае без ДР формула для η при $R_1 = R_2 = 0,5$ для образцов обоих типов может быть представлена в виде : $\eta \approx \alpha l$ (при условии, что $\alpha l \ll 1$). Если считать, что $l = 50 L_w$ – суммарной толщине квантовых ям в СКЯ, то $\alpha = 3200 \text{ см}^{-1}$ и 640 см^{-1} для МОСГЭ СКЯ и МЛЭ СКЯ соответственно. Причем первое из указанных значений совпадает по порядку величины со значением коэффициента поглощения в СКЯ, когда вектор электрического поля подающего излучения поляризован перпендикулярно слоям СКЯ. Таким образом, можно предположить, что в МОСГЭ СКЯ даже при неблагоприятной поляризации излучение испытывает сильное поглощение, т.е. селективность по отношению к поляризации подавляется.

В случае образцов с ДР выражение для квантовой эффективности можно приближенно записать как : $\eta \approx (1 - R_1)(\alpha l + \alpha_1 l_1)$. Первый множитель в скобках учитывает отражение от фронтальной поверхности фотоприемника. Во втором множителе в скобках первое слагаемое учитывает поглощение излучения за один проход через активную область (т.е. при нормальном падении), а второе слагаемое – поглощение излучения в активной области

после рассеяния на ДР. Для образца МОСГЭ СКЯ на основании сделанного предположения о подавлении в нем селективности чувствительности по отношению к поляризации можно считать, что $\alpha \approx \alpha_1$. Величина $l_1 \approx l/\cos\varphi$, где φ – угол первого порядка дифракции на ДР, равный примерно 40° для длины волны 8,5 мкм. В виду узости спектра фоточувствительности СКЯ можно приближенно считать, что значительная часть рассеянного на ДР излучения будет распространяться под этим углом. Тогда для квантовой эффективности образца МОСГЭ СКЯ получим: $\eta \approx 0,5(\alpha l + \alpha l/0,77) = 1,15 \alpha l$. Т.е. в условиях сделанных предположений увеличение квантовой эффективности в данном образце не должно быть значительным, что и подтверждено экспериментально. Несколько большее значение экспериментальной величины связано, по-видимому, с вкладом длинноволновой части спектра сигнального излучения, которая рассеивается под большими углами и поглощается после дифракции на больших расстояниях l_1 . Для образца МЛЭ СКЯ с ДР можно использовать то же выражение для η , что и в случае образца МОСГЭ СКЯ с некоторым уточнением: $\eta \approx 0,5(\alpha l + \alpha_1 l/0,77)$, где α_1 может значительно (в зависимости от угла дифракции) превышать $\alpha = 640\text{см}^{-1}$, которое наблюдается при нормальном падении излучения (см формулу (3) в [2]). В нашем случае увеличение α составило 3,8 раза и достигло 2433см^{-1} . Учитывая, что период решетки не оптимизирован, можно ожидать увеличения α вплоть до значений, полученных в случае с образцом МОСГЭ СКЯ, за счет подбора параметров ДР.

На основании полученных экспериментальных результатов и их анализа можно сделать следующие выводы:

1. Образцы ФП СКЯ, имеющие номинально одинаковую конструкцию, но отличающиеся способами выращивания – МЛЭ и МОСГЭ, - имеют различную чувствительность по отношению к нормально падающему излучению: в образцах, выращенных МОСГЭ она значительно выше.

2. На основе полученных результатов можно сделать предположение, что селективность фоточувствительности по отношению к поляризации излучения в образцах, выращенных МОСГЭ, заметно подавляется.

3. Одной из наиболее вероятных причин указанного эффекта, которая указывалась ранее [46], может быть возникновение на границах барьер-яма встроенного электрического поля, связанного с проникновением в барьеры примеси (кремния) в процессе выращивания СКЯ (в большей степени в случае МОСГЭ) и ее ионизации при охлаждении СКЯ. Для подтверждения сделанных предположений необходимы дальнейшие исследования.

2.6. Коротковолновые и двухспектральные ФП СКЯ

Основные результаты по ФП на основе КВ СКЯ и ДВ СКЯ, а также их использованию при создании многоэлементных формирователей ИК изображений изложены в работах [49-59]. Как уже отмечалось в разделе 2.1., КВ СКЯ (на диапазон 3-5 мкм) и ДС СКЯ оказались сложнее в изготовлении, чем длинноволновые (ДВ) СКЯ. Разброс характеристик таких СКЯ от процесса к процессу оказался значительно выше, чем в случае ДВ СКЯ. Поэтому мы приводим данные по образцам, оказавшимся лучшими по набору характеристик. На рис.2.22. представлены спектры фоточувствительности тестового образца ФП на основе КВ СКЯ, снятые при разных полярностях напряжения смещения 5 В и при температуре 78К.

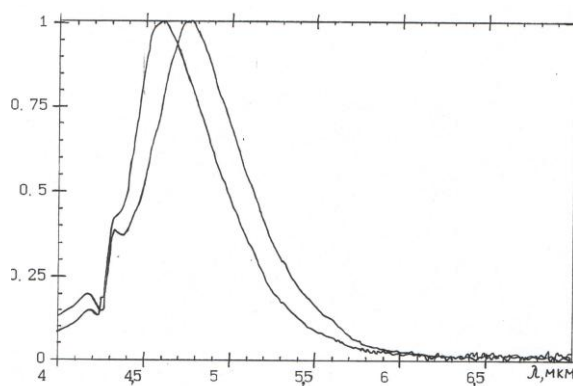


Рис.2.22. Спектры фоточувствительности КВ СКЯ при разных полярностях напряжения смещения

На рис.2.23. представлены ВАХ ФП КВ СКЯ, снятые при 78К. Отметим, что в отличие от ДВ СКЯ, представленные ВАХ имеют заметно больший наклон на пологих участках при обеих полярностях, что может быть связано с более значительной пологостью границ яма – барьер, о

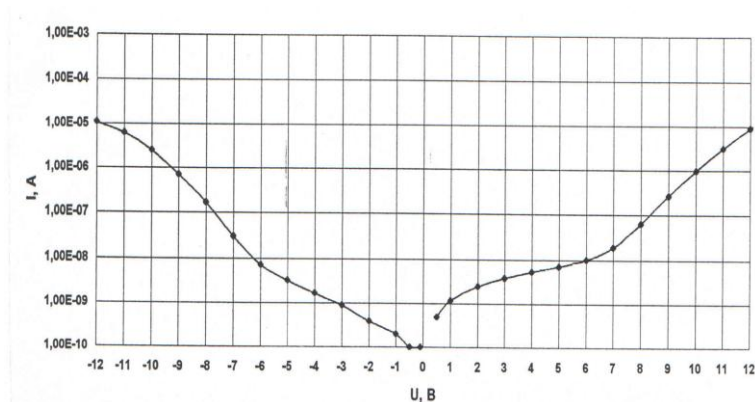


Рис.2.23. ВАХ образца ФП на основе КВ СКЯ при 78К.

чем говорилось в разделе 2.4.2. По – видимому, наличие большей пологости границ яма-барьер связано как со встроенными спейсерами из GaAs, так и со значительно большим разрывом зоны проводимости при изменении состава от InGaAs до AlGaAs с большим (свыше 35%) содержанием Al. Вместе с тем образец ФП из КВ СКЯ имеет значительно более низкие темновые токи, чем ДВ аналоги при одних и тех же напряжениях, что создает определенные удобства при их интеграции в двухспектральных матрицах. Об этом свойстве более подробно написано в следующей главе.

На рис.2.24. представлены зависимости абсолютной чувствительности для максимума спектра того же образца ФП от напряжения при 78К. Достигнутые значения чувствительности – около 0,05 А/Вт,- заметно уступают ДВ СКЯ, что может быть связано с малым числом периодов СКЯ (не более 25), приводящим к потере квантовой эффективности, и более низкой подвижностью носителей в зоне проводимости барьеров из-за большего содержания Al.

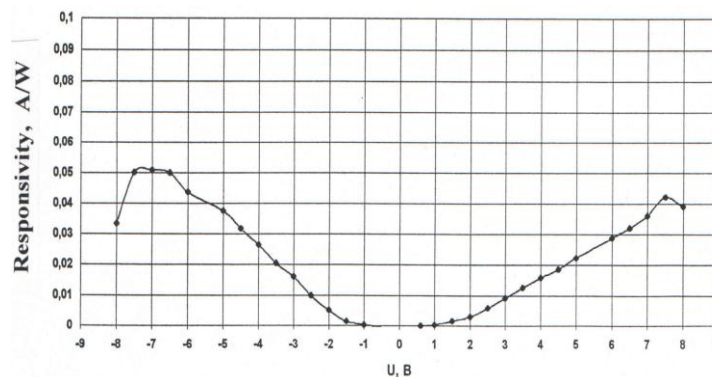


Рис.2.24. Зависимости абсолютной чувствительности в максимуме спектра образца ФП на основе КВ СКЯ при 78К

К потере квантовой эффективности может приводить и более высокое содержание кислорода в барьерах с большей концентрацией алюминия. Дело в том, что кислород образует глубокие уровни в запрещенной зоне барьеров, которые являются ловушками для электронов и могут захватывать их из квантовых ям, снижая коэффициент поглощения ИК излучения в последних [60]. Добавим также, что специальных устройств ввода излучения в данном образце не применялось.

На рис.2.25. представлены зависимости обнаружительной способности образца ФП на основе КВ СКЯ от напряжения смещения при 78К.

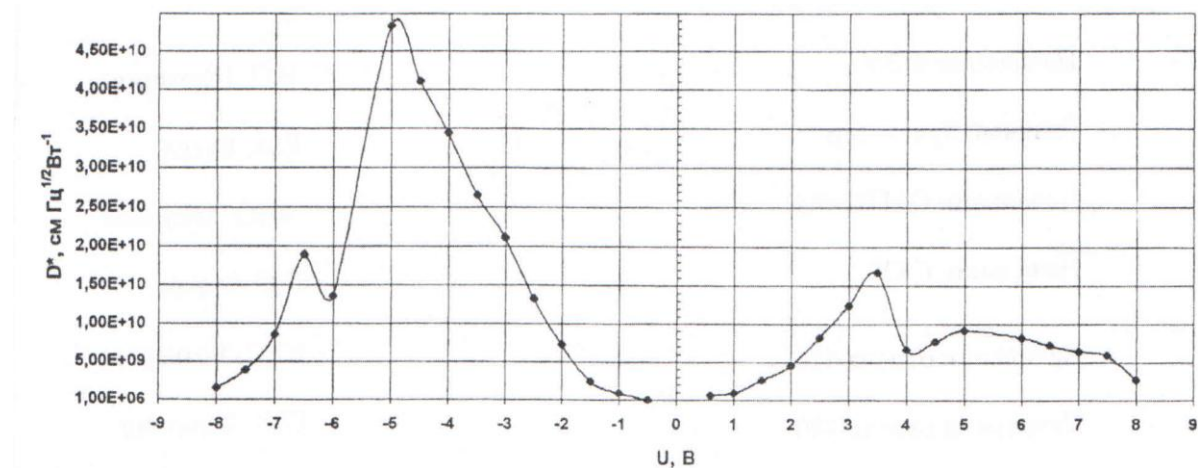


Рис.2.25. Зависимости обнаружительной способности образца ФП от напряжения смещения при 78К.

Сравнительно невысокие для диапазона 3-5 мкм значения обнаружительной способности на уровне $5 \times 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$ обусловлены главным образом относительно низкой абсолютной фоточувствительностью, о чем говорилось выше. Тем не менее, как показывает опыт зарубежных исследований, повышение качества СКЯ, в том числе за счет перехода к выращиванию их с помощью МЛЭ, а также применение устройств ввода излучения позволят достигнуть значений обнаружительной способности в диапазоне свыше $2 \times 10^{11} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$ [8].

Экспериментальные результаты по двухспектральным СКЯ в значительной степени повторяли результаты по односпектральным образцам и не выявили сколько-нибудь существенных особенностей двухспектральных СКЯ по сравнению с односпектральными аналогами. На рис.2.26 представлены спектры фоточувствительности одного из двухспектральных образцов ФП.

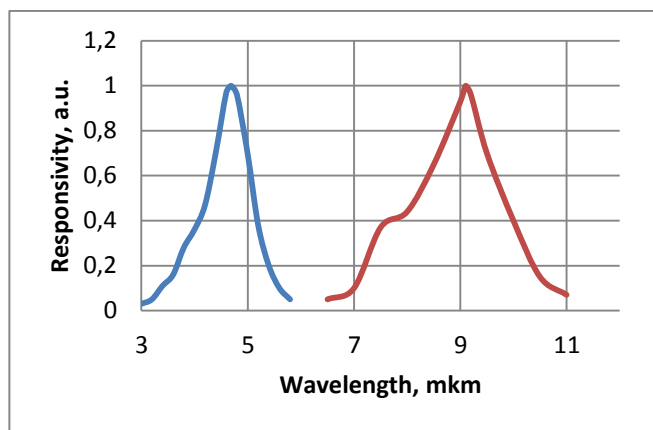


Рис.2.26. Спектры фоточувствительности двухспектрального образца ФП.

Полученные спектры весьма сходны по форме с аналогичными характеристиками односпектральных СКЯ. Обнаружительная способность длинноволновой секции оказалась ниже, чем в односпектральной СКЯ, что связано с вдвое меньшим количеством периодов в активной области. Коротковолновая секция, имеющая, как и ее односпектральный аналог, 25 периодов, обладает и сопоставимой с ним обнаружительной способностью.

Таким образом, экспериментальные исследования КВ и ДС СКЯ показали, что сегодняшний уровень технологии их выращивания методом МОСГЭ дает обнадеживающие результаты и, при дальнейшем усовершенствовании, позволяет рассчитывать на получение материалов приборного качества. В наибольшей степени в усовершенствовании нуждается технология выращивания КВ СКЯ. В ряду направлений усовершенствования технологии важнейшее значение имеют обеспечение точности требуемых составов барьеров и ям и резкости границ между ними, а также обеспечение чистоты исходных материалов и самого процесса роста. Повышение качества КВ и ДС СКЯ должно предусматривать также и изменение конструкции СКЯ, включающее как изменение количества и состава слоев, входящих в СКЯ, так и изменение комбинации материалов A_3B_5 , используемых для формирования СКЯ.

2.7.Чувствительность длинноволновых ФП СКЯ при комнатной температуре

В данном разделе представлены результаты исследований длинноволновых ФП СКЯ в несколько необычных для них условиях – при рабочей температуре вблизи комнатной. Наиболее привычное применение длинноволновых ФП СКЯ связано с той областью тепловидения, в которой от ФП требуется очень высокая чувствительность и большое количество чувствительных элементов в матрице ($\sim 10^6$). Для достижения высокой чувствительности длинноволновые ФП СКЯ, как правило, необходимо охлаждать до температур ниже 77К. Необходимость глубокого охлаждения ИК ФП значительно увеличивает их стоимость и ограничивает число областей применения. Между тем существуют области применения, где не требуются матрицы большого формата с пороговой чувствительностью, близкой к предельно возможной, а значительно более важной является возможность работы ФП при повышенных температурах, вплоть до комнатной. В этом случае ФП может иметь весьма экономичные

весогабаритные, энергетические и ценовые показатели и использоваться в портативной аппаратуре как гражданского, так и военного применения, например, в составе лазерных целеуказателей. Исследования чувствительности ФП СКЯ при температурах, существенно более высоких, чем 77К, до недавнего времени имели крайне ограниченный характер. За последнее время весьма интересные результаты получены в работе [61].

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования чувствительности длинноволнового ФП СКЯ к излучению CO₂ лазера при комнатной температуре, а также проведена оценка чувствительности такого ФП в случае оптимизации его спектральной характеристики.

СКЯ, использованные для изготовления одноэлементных ФП, были выращены методом МОС-гидридной эпитаксии. Они имели 50 периодов барьер-яма Ga_{1-x}Al_xAs/GaAs ($x = 0,27$), а также верхний и нижний контактные слои. Ямы имели толщину 5нм, барьеры - 45нм. Яма легировалась кремнием до концентрации $9 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Из указанных СКЯ методом ионно-химического травления изготавливались одноэлементные ФП, имевшие форму мезы размером 400х400 мкм. Омические контакты к верхнему и нижнему контактному слоям изготавливались из вожженного сплава Au:Ge и сверху покрывались Au. Специальных устройств ввода излучения в ФП СКЯ – дифракционной решетки или сошлифованного под углом 45° торца, - изготовлено не было, поскольку, как было показано ранее [3], ФП СКЯ, выращенные методом МОС-гидридной эпитаксии, обладают весьма заметной чувствительностью к излучению, падающему нормально к поверхности ФП СКЯ. У изготовленных указанным образом одноэлементных ФП СКЯ проводилось измерение спектров фоточувствительности с помощью спектрофотометра на базе монохроматора МДР-41. Спектр фоточувствительности ФП СКЯ при температуре 77К, представлен на рис.2.27.

Отметим, что приведенная к максимуму спектра обнаружительная способность указанного ФП, рассчитанная на основе измерений при 65K, составила $1,2 \times 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$.

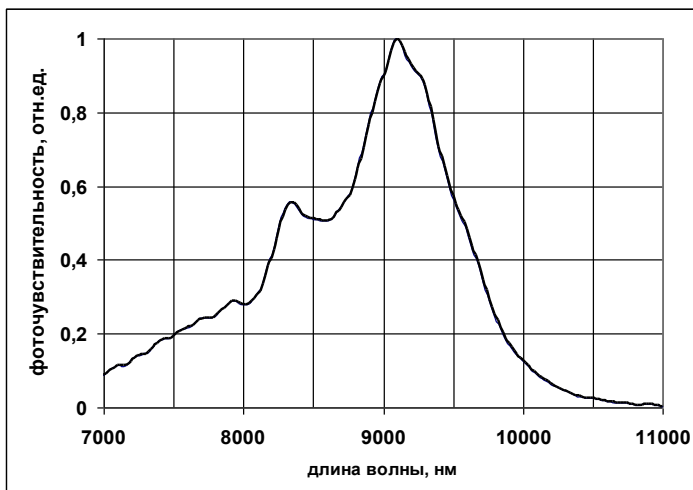


Рис.2.27. Спектр фоточувствительности ФП СКЯ.

В качестве источника излучения в экспериментах по измерению абсолютной чувствительности ФП при комнатной температуре использовался CO_2 лазер типа LCD-15, работающий в непрерывном режиме, с максимальной мощностью излучения 15Вт в пучке диаметром около 2 мм. С помощью аттенюатора мощность в несфокусированном пучке уменьшалась до такого уровня, что на входную поверхность ФП СКЯ попадало лишь около 16 мВт. Излучение от лазера модулировалось механическим модулятором с частотой 1160 Гц. Напряжение смещения подавалось на ФП через нагрузочное сопротивление величиной 9,8 Ом, с которого переменная составляющая напряжения поступала на вход селективного вольтметра У2-8.

На рис. 2.28 и рис. 2.29 представлены вольт-амперные характеристики (ВАХ) и зависимости чувствительности ФП СКЯ от напряжения смещения при различных его полярностях. Характеристики обоих типов обладают заметной асимметрией, что, возможно, связано с асимметрией и непрямоугольностью границ яма-барьер [62].

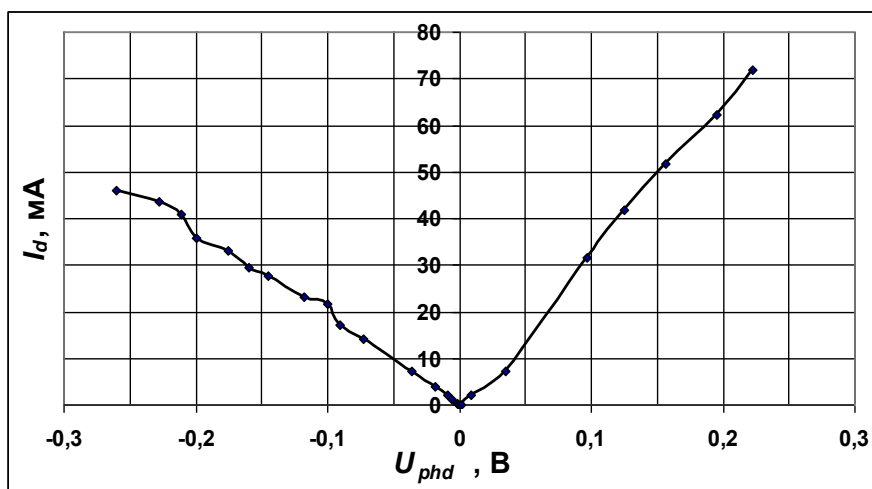


Рис.2.28. Вольт-амперные характеристики ФП СКЯ при разных полярностях.

Очень низкие значения абсолютной чувствительности ФП связаны, прежде всего, с тем, что его чувствительность вблизи длины волны излучения лазера 10,6 мкм составляет около 3% от чувствительности в максимуме спектра.

Это означает, что за счет подстройки максимума спектра фоточувствительности на длину волны 10,6 мкм можно повысить

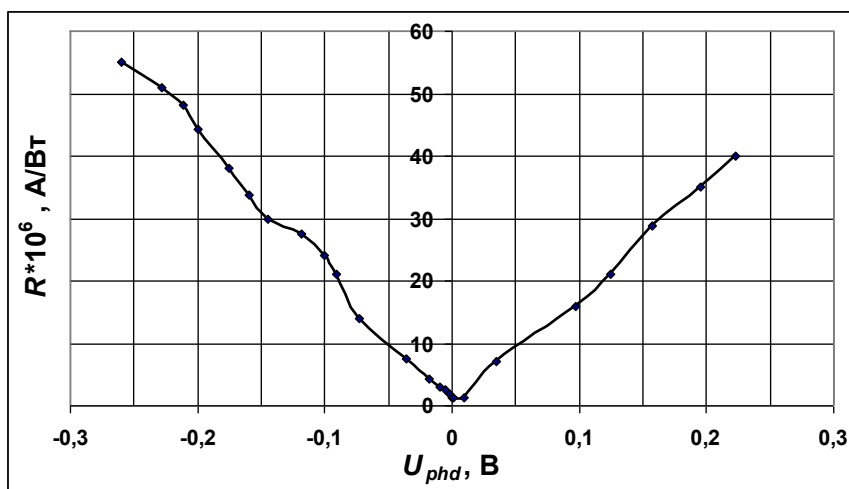


Рис.2.29. Зависимости абсолютной чувствительности ФП СКЯ от напряжения смещения

чувствительность, по крайней мере, в 30 раз. Кроме того, ширина спектра фоточувствительности по уровню 0,5 исследованного ФП СКЯ составляет около 2 мкм (оптические переходы, скорее всего, осуществляются между

нижним связанным уровнем и квазисвязанным состоянием, расположенным вблизи верхнего края ямы), тогда как спектр излучения лазера на несколько порядков уже. Это приводит к тому, что в генерации свободных носителей участвует лишь малая доля оптических переходов. Сужение спектра чувствительности путем перевода верхнего состояния из квазисвязанного в связанное, чего можно добиться, например, увеличением высоты барьеров, позволит в несколько раз увеличить число оптических переходов, возбуждаемых излучением с длиной волны 10,6 мкм. Возможность такого способа увеличения чувствительности обусловлена действием эмпирического закона сохранения суммы осцилляторов, суть которого отражает соотношение $\alpha_p \cdot (\Delta \lambda / \lambda_p) / N_d \sim \text{const}$, где α_p - коэффициент поглощения в максимуме спектра, $\Delta \lambda$ - ширина спектра на полувысоте, λ_p - длина волны максимума спектра, N_d - концентрация активной легирующей примеси в яме [2]. Наконец, использование устройства ввода излучения в ФП СКЯ в виде, например, дифракционной решетки, удаление подложки, увеличение числа периодов барьер - яма и уровня легирования ямы позволит еще в 10-15 раз поднять чувствительность ФП. Таким образом, чувствительность может быть увеличена более чем в 1000 раз и достигнуть $\sim 0,1$ А/Вт.

Оценим обнаружительную способность такого гипотетического ФП на длине волны 10,6 мкм в предположении, что доминирующими шумами в нем будут джонсоновский (ДШ) и генерационно-рекомбинационный (ГРШ):

$$D^* = (R \cdot A^{1/2} \cdot \Delta f^{1/2}) \cdot (I_j^2 + I_{gr}^2)^{-1/2}, \quad (2.15)$$

где R - абсолютная чувствительность ФП в А/Вт, I_j и I_{gr} - шумовые токи, связанные с ДШ и ГРШ соответственно, A - площадь ФП, Δf - полоса частот, в которой регистрируется шум. После несложных преобразований (2.15) выражение для обнаружительной способности можно представить как:

$$D^* = [(R/2) \cdot A^{1/2}] \cdot [(kT/U_f + e \cdot g) \cdot I_d]^{-1/2} \quad (2.16)$$

где k - постоянная Больцмана, T - температура, U_{phd} - напряжение на ФП, e - заряд электрона, g - коэффициент фотоэлектрического усиления ФП, I_d - его темновой ток.

Из зависимости, приведенной на рис. 2.28, например, для величины напряжения $U_{phd} = 0,26В$ имеем $I_d = 4,6 \cdot 10^{-2}А$. С учетом реализации указанных выше мер повышения чувствительности ФП СКЯ используем значение $R = 0,1А/Вт$. Подставляя эти величины в (2.16) и учитывая, что в нашем случае $A = 1,6 \cdot 10^{-3} см^2$, а $g = 0,1$ (типичное значение величины g для ФП СКЯ), получаем $D^* \approx 0,5 \cdot 10^8 Вт^{-1}см Гц^{1/2}$. Такое значение D^* сравнимо с аналогичным показателем для микроболометрических ФП. Это означает, что при создании подходящего матричного мультиплексора для такого ФП СКЯ можно получить относительно дешевый неохлаждаемый матричный ФП, который по сравнению с тепловыми матричными ФП будет обладать рядом преимуществ, например, значительно меньшей инерционностью, более высокой механической стойкостью.

2.8. Возможность повышения рабочей температуры ФП СКЯ.

Одной из наиболее важных характеристик ФП СКЯ, по которым они уступают аналогам на основе узкозонных материалов, является рабочая температура, которая определяет требования к системе охлаждения и, в конечном счете, весогабаритные и энергетические характеристики, а также надежность тепловизионной системы. Типичное значение рабочей температуры у современных длинноволновых ФП СКЯ составляют 62-65К. Рассмотрим более подробно физические процессы, определяющие рабочую температуру ФП СКЯ.

Известно, что одним из важнейших факторов, определяющих рабочую температуру ФП, является время жизни неравновесных носителей в нем (см. например, [63]). В упрощенном виде рабочую температуру ФП можно оценить с помощью неравенства:

$$N_d \leq Q_b \cdot \alpha \cdot \tau \quad (2.17)$$

где N_d – концентрация свободных носителей в активной области ФП в см^{-3} ; Q_b – фоновая облученность ФП в $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}$; α – коэффициент поглощения излучения в см^{-1} ; τ – время жизни генерированных светом носителей тока. Учитывая, что в СКЯ $N_d = A(T) \cdot \exp[-E_A/kT]$, где E_A – термическая энергия активации квантовой ямы, k – постоянная Больцмана, T – температура ФП, $A(T)$ – коэффициент пропорциональности, медленно меняющийся с T , после несложных преобразований можно получить:

$$T \leq E_A \cdot \{k \cdot \ln[A(T)/(Q_b \cdot \alpha \cdot \tau)]\}^{-1} \quad (2.18)$$

Из (2.18) следует, что конструктивными параметрами ФП СКЯ, влияющими на его рабочую температуру, являются α и τ . И если увеличение α , точнее, определяемой им квантовой эффективности, в современных ФП СКЯ возможно лишь в весьма ограниченных пределах, то возможности по увеличению τ оказываются гораздо шире и могут быть реализованы путем изменения конструкции СКЯ. В ФП СКЯ обычной конструкции свободные носители тока движутся поперек слоев СКЯ и неизбежно пересекают области над квантовыми ямами, в которых они с той или иной вероятностью рекомбинируют, причем доминирующий механизм рекомбинации (с испусканием продольных оптических фононов) является неизбежным. Одним из возможных способов исключения указанного механизма рекомбинации может быть изменение траектории движения свободных носителей тока таким образом, чтобы они огибали зоны возможной рекомбинации. Для этого в ФП СКЯ необходимо сформировать между контактами каналы, по которым указанные носители могли бы перемещаться, не пересекая области над

квантовыми ямами. Одно из технических решений, позволяющих реализовать указанные выше условия, состоит в том, чтобы в известных СКЯ, имеющих на границах барьер-яма области подъема энергии дна зоны проводимости барьера, сформировать области того же состава, что и в основной части барьеров, проникающие сквозь всю СКЯ между верхним и нижним контактными слоями и образующие при этом металлургические контакты с пересекаемыми ими слоями СКЯ. Указанные области при рабочей температуре ФП СКЯ должны иметь минимально возможную равновесную концентрацию свободных носителей. Данное условие может быть обеспечено, если указанные области имеют характерную толщину в плоскости слоев СКЯ и концентрацию легирующей примеси такие, что область пространственного заряда на границах с квантовыми ямами распространяется на всю толщину указанных областей. В известных конструкциях ФП СКЯ свободные носители, дрейфующие под действием электрического поля поперек слоев СКЯ, находясь над ямами, имеют заметную вероятность рекомбинировать в них. В ФП СКЯ, в которых на границах ям и барьеров имеются препятствия в виде областей подъема энергии дна зоны проводимости барьеров, вероятность рекомбинации снижается из-за увеличения энергии пересекающих ямы носителей. Однако снижение вероятности рекомбинации не становится значительным, поскольку носители заряда и в данном случае вынуждены пересекать пространство над ямами в отсутствие иных траекторий движения, не связанных с пересечением ям. Дополнительные области с описанными характеристиками как раз и представляют собой альтернативные пути движения свободных носителей. Двигаясь по такому пути, носитель тока избегает необходимости пересечения квантовой ямы, где он может рекомбинировать, поскольку на границах дополнительных областей и квантовых ям в первых будет возникать положительный пространственный заряд, искривляющий зону проводимости

дополнительной области и создающий препятствие для проникновения находящихся в ней носителей в квантовую яму. Для подавления поверхностной рекомбинации носителей на внешней границе дополнительной области может быть сформирован слой $\text{Al}_y \text{Ga}_{1-y} \text{As}$ с $y > x$ и меньшей концентрацией доноров в нем, препятствующий проникновению свободных носителей из дополнительной области к указанной границе.

Описанная выше конструкция ФП СКЯ отчасти является реализацией одного из подходов к задаче повышения времени жизни неравновесных носителей в примесных (extrinsic) фотопроводниках [15]. Идея, лежащая в основе указанного подхода состоит в том, что превратить центры захвата свободных носителей из притягивающих или нейтральных в отталкивающие, что достигается частичной компенсацией ловушек соответствующим образом подобранных примесей. Указанный подход позволил увеличить время жизни свободных носителей в примесном германии на несколько порядков. В случае обычного ФП СКЯ квантовую яму можно рассматривать как нейтральный центр захвата свободных электронов. Превратить его в отталкивающий центр можно путем легирования барьеров, вследствие чего свободные носители из последних перетекают в яму и заряжают ее отрицательно. Введение дополнительных областей создает канал для протекания свободных носителей, отделенный от центра захвата потенциальным барьером и обеспечивающий таким образом значительное увеличение их времени жизни.

Сущность предложенного технического решения поясняется с помощью чертежей. На рис.2.30 представлен фрагмент одного периода ФП СКЯ, в котором 1- квантовая яма из GaAs, ограниченная с двух сторон в направлении роста СКЯ барьерами 2 из $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$. В плоскости, перпендикулярной слоям 1 и 2, расположена дополнительная область 3 в виде слоя $\text{Al}_x \text{Ga}_{1-x} \text{As}$, граничащего с ними, а также 4- внешний барьерный слой $\text{Al}_y \text{Ga}_{1-y} \text{As}$, обеспечивающий пассивацию внешней границы слоя 3.

На рис.2.31 представлен аналогичный фрагмент периода ФП СКЯ, в котором в отличие от конструкции на рис.2.30 между барьерами 2 и квантовой ямой 1 введены слои $5 \text{ Al}_z \text{ Ga}_{1-z} \text{ As}$, ($z > x$) обеспечивающие подъем энергии дна зоны проводимости на границах барьер-яма.

На рис.2.32 представлен фрагмент ФП СКЯ, в котором сформирована дополнительная область 6 в виде слоя $\text{Al}_x \text{ Ga}_{1-x} \text{ As}$, покрывающего стенки углубления, проникающего сквозь СКЯ.

На рис.2.33 представлен фоточувствительный элемент (ФЧЭ) на основе СКЯ, выполненный в виде мезы. В пределах площади ФЧЭ сформирован массив углублений в СКЯ, проникающих сквозь нее до нижнего контактного слоя 7. Внутри указанных углублений сформированы дополнительные области 6, показанные на рис.2.32.

Предлагаемая конструкция ФП может быть реализована следующими способами. СКЯ с областями подъема энергии дна зоны проводимости барьеров на границе барьер-яма может быть сформирована, например, выращиванием более широкозонных прослоек 5 (рис.2.31) на границах барьер-яма, как это сделано в прототипе, либо путем принудительного легирования барьеров (равномерно или только вблизи границ) донорной примесью, что при охлаждении ФП СКЯ приведет к возникновению у границ барьер-яма областей пространственного заряда, приводящих к подъему энергии дна зоны проводимости барьеров вблизи ям (рис.2.30). В изготовленной таким образом СКЯ посредством травления формируют ФЧЭ, а в пределах площади ФЧЭ вытравливают углубления до нижнего контактного слоя 7 (рис.2.32, 2.33), после чего СКЯ подвергается процессу зарастивания: на поверхности с ФЧЭ методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) производится наращивание слоя $\text{Al}_x \text{ Ga}_{1-x} \text{ As}$ того же состава, что и барьеры в СКЯ. В этом же процессе может быть выращен и слой $\text{Al}_y \text{ Ga}_{1-y} \text{ As}$ с $y > x$, пассивирующий внешнюю поверхность дополнительной области. Со стороны верхнего контактного слоя

ФЧЭ закрывают диэлектриком, например, Si_3N_4 . Так что слой дополнительной области растет только в углублениях и на боковой поверхности ФЧЭ. Толщина наращиваемого слоя определяется из условия: $d \leq (2\epsilon\epsilon_0 U_c / eN_d)^{1/2}$, где $\epsilon\epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, U_c – контактная разность потенциалов между барьером и ямой, e – заряд электронов, N_d – концентрация легирующей примеси в барьере. При концентрации фоновой донорной примеси в барьере около $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$ толщина области обеднения в наращиваемом слое будет около 0,1-0,2 мкм, т.е. металлургическая толщина слоя не должна превышать указанную величину. Благодаря данному условию на границах ямы с дополнительной областью и барьерами образуется треугольный барьер со стороны широкозонных слоев, препятствующий проникновению свободных носителей в яму. В результате часть из них вынуждены будут дрейфовать по дополнительной области в направлении положительного контакта. В качестве углублений, в которых формируются дополнительные области, можно использовать элементы дифракционной решетки, изготавливаемой обычно в ФП СКЯ для ввода излучения в ФЧЭ (см. рис.2.33). В этом случае элементы дифракционной решетки – углубления, – должны проникать сквозь СКЯ до нижнего контактного слоя и иметь глубину не $\lambda/4n$ (в случае длинноволнового ФП это соответствует примерно 0,8 мкм), как обычно в ФП СКЯ, а $3\lambda/4n$, что больше подходит для предлагаемой конструкции (λ – длина волны максимума спектра фоточувствительности ФП СКЯ, n – показатель преломления GaAs). Для примера рассмотрим длинноволновый ФП СКЯ с максимумом спектра фоточувствительности 9 мкм. Для GaAs на указанной длине волны $n = 3,3$, а требуемая глубина рельефа дифракционной решетки будет около 2,1 мкм. При периоде СКЯ 50 нм и количестве периодов 50 углубления будут проникать вглубь СКЯ практически на всю ее толщину. При этом период дифракционной решетки должен выбираться из условия: $D \approx \lambda_{\text{max}}/n$ и в рассматриваемом случае

будет около 2.7 мкм. Следует отметить, что рассмотренные методы формирования ФЧЭ с дополнительными областями – травление углублений в СКЯ и их заращивание методом МЛЭ,- относятся к хорошо отработанным технологиям применительно к системе AlGaAs-GaAs.

Представленное выше техническое решение защищено патентом [64].

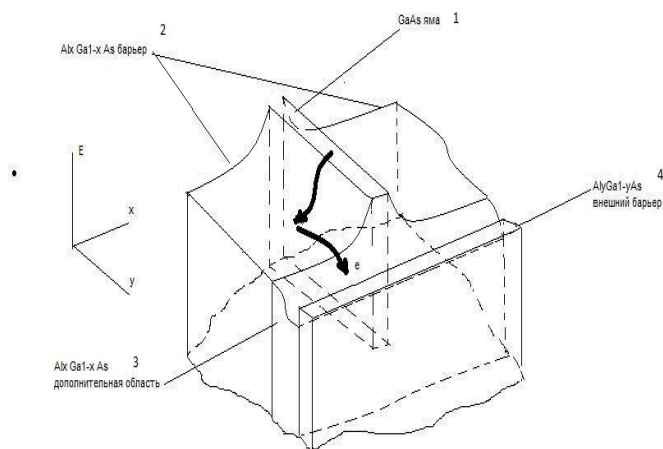


Рис.2.30. Фрагмент одного периода ФП СКЯ

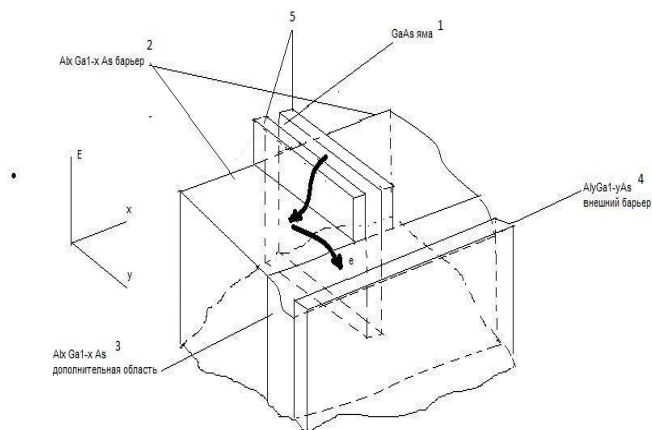


Рис.2.31. Фрагмент периода ФП СКЯ со слоями $\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}$, обеспечивающими подъем энергии дна зоны проводимости на границах барьера.

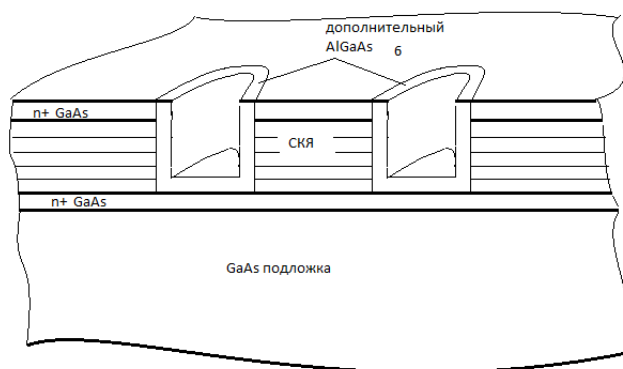


Рис.2.32. Фрагмент ФП СКЯ с дополнительной областью в виде слоя $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, покрывающего стенки углубления, проникающего сквозь СКЯ.

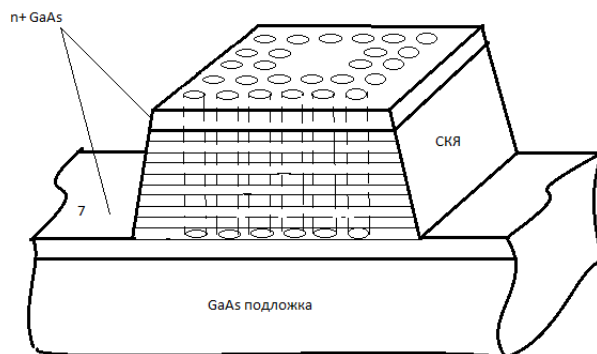


Рис. 2.33 Фоточувствительный элемент с массивом углублений

Выводы к Главе 2:

1. Наиболее востребованными технологиями для выращивания СКЯ, обладающих характеристиками, приемлемыми для создания на их основе конкурентоспособных многоэлементных ИК фотоприемников, являются МЛЭ и МОСГЭ. Вместе с тем указанные технологии обладают особенностями, не всегда позволяющими получать СКЯ заданных конструкций. Среди указанных особенностей следует выделить проблемы воспроизводимого создания барьеров и ям с требуемыми составом, резкостью границ и профилем легирования. Дальнейшее совершенствование технологий выращивания СКЯ, в котором в наибольшей степени нуждаются технологии выращивания КВ и ДС СКЯ, должно быть направлено на обеспечение точности требуемых составов барьеров и ям и резкости границ между ними, а также обеспечение чистоты

исходных материалов и самого процесса роста. Повышение качества КВ и ДС СКЯ должно предусматривать также и возможное изменение конструкции СКЯ, включающее как изменение количества и состава слоев, входящих в СКЯ, так и изменение комбинации материалов A_3B_5 , используемых для формирования СКЯ.

2. Теоретически показано и экспериментально подтверждено, что темновой ток в ФП СКЯ имеет тем большую величину, чем менее резкой является граница барьер-яма, в направлении которой над квантовой ямой при заданной полярности напряжения смещения движутся электроны.

3. Экспериментально установлено, что ФП СКЯ имеет тем большую величину абсолютной чувствительности, чем менее резкой является граница барьер-яма, в направлении которой над квантовой ямой при заданной полярности напряжения смещения движутся электроны, однако пороговая чувствительность в этом случае оказывается меньше, чем при противоположном направлении движения электронов.

4. Полученные экспериментальные результаты дают основания предполагать, что температурная зависимость темнового тока в ФП СКЯ определяется механизмом термогенерации, лежащим в основе двумерной модели ВАХ. При этом существенное влияние на ВАХ оказывает резкость границ яма-барьер: пологость границ приводит к возрастанию темнового тока, снижению пороговых характеристик чувствительности. Модель ВАХ, построенная с учетом указанных особенностей, дает удовлетворительное совпадение расчетных характеристик с экспериментальными.

5. Экспериментально показано, что ФП СКЯ могут обладать весьма значительной фоточувствительностью по отношению к нормально падающему излучению без использования специальных устройств ввода, что означает подавление в них селективности чувствительности по отношению к

поляризации излучения. Наиболее ярко указанный эффект проявляется в СКЯ, выращенных методом МОСГЭ. Анализ результатов дает основания предположить, что причиной указанного эффекта может быть встроенное электрическое поле, возникающее на границах барьер-яма вследствие диффузии донорной примеси в барьеры в процессе роста и последующей ее ионизации при охлаждении.

6. Экспериментально показано, что длинноволновые ФП СКЯ обладают заметной фоточувствительностью при рабочих температурах вблизи комнатной и при определенной оптимизации могут иметь пороговые характеристики, сравнимые с теми, что имеют тепловые фотоприемники, например, микроболметры, при значительно более высоком быстродействии.

7. Предложена конструкция ФП СКЯ, обладающего повышенной рабочей температурой. Положительный эффект достигается благодаря снижению вероятности рекомбинации неравновесных носителей тока в квантовую яму путем создания в СКЯ дополнительных областей для их дрейфа поперек слоев СКЯ. Особенность таких областей состоит в том, что на их границах с квантовыми ямами формируется потенциальный барьер, препятствующий проникновению находящихся в них носителей в квантовую яму.

ГЛАВА 3

КОНСТРУКЦИИ И ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ГИБРИДНЫХ ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ СКЯ

В проведенном в Главе 1 анализе состояния разработок многоэлементных ФП СКЯ отмечалось, что главные преимущества таких приборов по сравнению с аналогами на основе узкозонных материалов заключаются в высокой однородности параметров СКЯ на полупроводниковых пластинах большой площади. Указанное достоинство позволяет рассчитывать на создание многоэлементных фотоприемников больших форматов, недостижимых пока с помощью других технологий. Данное преимущество настолько важно, что позволило получать с помощью СКЯ пороговые характеристики чувствительности в матричных фотоприемниках не хуже, а порой даже лучше, чем у аналогов на основе КРТ, несмотря на то, что одиночные ФП СКЯ уступают КРТ и по квантовой эффективности и по рабочей температуре [1,2]. Поэтому основные усилия в настоящей работы были направлены на реализацию указанного преимущества путем создания многоэлементных ФП и устройств на их основе .

Следует отметить, что, в отличие от процесса исследования свойств СКЯ, когда на исследуемом одноэлементном ФП зачастую достаточно было иметь лишь пару контактов, при разработке конструкций многоэлементных ФП потребовалось решение таких конструктивно – технологических проблем, как выделение чувствительных элементов (ЧЭ), формирование на них устройств ввода излучения в виде дифракционной решетки, формирование средств коммутации ЧЭ. Для решения последней проблемы необходимо проектирование топологии контактов на поверхности матричного ФП с учетом конструкции микросхем считывания сигналов – мультиплексоров (МП). Проблема создания МП в начале 1990-х годов имела особую остроту, поскольку на тот момент в России не было не только матричных МП, но и

технологического оборудования, позволявшего проводить сборку ГФС уже распространенным тогда в развитых странах методом flip-chip assembly с характерными размерами ЧЭ около 30 мкм и формате матриц свыше 128x128 элементов. Наконец, отсутствовала и технология формирования индиевых столбиков на таких матрицах с требуемыми проектными нормами. Несмотря на столь удручающее положение, тем не менее, было принято решение о проведении работ по созданию многоэлементных ФП. При этом основное внимание на начальном этапе работ было уделено конструкциям, в которых не требовалась flip-chip сборка, а именно: линейным ГФС и матричным ГФС с X-Y-адресацией. Надо сказать, что такой подход сыграл свою положительную роль, поскольку позволил отработать ряд конструктивных и технологических решений, которые позже в той или иной степени были востребованы при создании конструкций матричных ГФС с кадровым накоплением, в которых уже применялась flip-chip сборка. Отметим также, что линейные ГФС и матричные ГФС с X-Y-адресацией на момент их разработки рассматривались как возможная элементная база для перспективных оптико-электронных систем, разрабатывавшихся тогда в РФ. Поэтому рассмотрение результатов исследований, направленных на создание многоэлементных ГФС мы начнем с приборов указанного типа.

3.1. Технологические особенности создания многоэлементных фотоприемников на основе СКЯ.

Конструкция матричных фотоприемников (МФП) на основе СКЯ представляет собой множество отдельных фотоприемников ("пикселей") изготовленных на единой подложке. В свою очередь, каждый пиксель - это элемент меза-конструкции, сформированный на эпитаксиальной гетероструктуре в системе материалов A_3B_5 . Конструкция отдельного элемента односпектрального МФП представлена на рис.3.1.

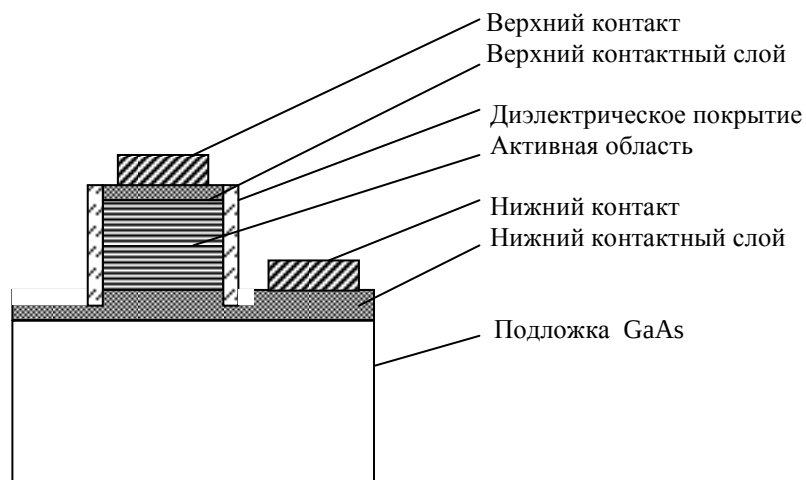


Рис.3.1. Конструкция элемента односпектрального МФП

МФП, содержащий множество пикселей, должен быть соединен с микросхемой выделения сигналов – мультиплексором либо разваркой алюминиевых или золотых проволочных выводов (в случае линейных или ХУ- конструкций) либо посредством индиевых столбиков в случае flip-chip-конструкций (см.рис.1.4). Исходя из базовой конструкции МФП, были определены и базовые технологические процессы, вносящих определенную унификацию в технологические маршруты изготовления МФП различных конструкций. К таким базовым процессам следует отнести травление СКЯ с целью формирования дифракционной решетки для ввода излучения и выделения чувствительных элементов (ЧЭ), формирование омических контактов на основе сплава Au : Ge, пассивацию боковой поверхности ЧЭ, формирование индиевых столбиков на поверхности ЧЭ для flip-chip сборки. Следует отметить, что указанные процессы в большинстве своем относятся к серийным технологиям производства полупроводниковых приборов, например, транзисторов, на основе GaAs. Благодаря этому указанные процессы после проведения

некоторой адаптации к конкретным конструкциям МФП позволили изготовить весь набор приборов, представленных в настоящей работе. Остановимся на них подробнее.

3.1.1.Технология травления СКЯ

Первые эксперименты по созданию ФП СКЯ были связаны с изготовлением тестовых фотоприемников. Тестовые фотоприемники по своей конструкции в упрощенном виде (без дифракционной решетки и пассивации ЧЭ) повторяют конструкции отдельных пикселей МФП, но имеют существенно большие размеры приемной площадки (меза-структуры) $\sim 400 \times 400$ мкм. Формирование таких меза-структур не требует использования прецизионных технологических операций фотолитографии, что сильно упрощает цикл их изготовления и позволяет в оперативном режиме получать информацию о свойствах исходных гетероструктур. Первоначально при изготовлении тестовых ФП, а также многоэлементных ФП с относительно большими чувствительными элементами применялось химическое, «мокрое» травление СКЯ с помощью травителя состава $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O}$ в соотношении 3: 1 : 5 . Указанный травитель обеспечивал изотропное травление СКЯ со скоростью 0,1 мкм/мин. при относительно небольшом боковом подтраве – не более 1, 5 мкм при глубине травления около 3 мкм. Однако уже при формировании дифракционной решетки возникли трудности, поскольку требовалось вытравливать периодический рельеф с шагом не более 4 мкм и характерными размерами особенностей рельефа около 2 мкм. Поэтому дальнейшая разработка технологии травления СКЯ была направлена на освоение ионно-химического, «сухого» травления (ИХТ). Первоначально ИХТ проводилось в смеси газов аргон-хладон 13 с использованием в качестве маски пленки титана (ФГУП «НПП «Пульсар»), что создавало определенные неудобства. Однако позже была применена отработанная технология ИХТ, позволявшая использовать в

качестве маски фоторезист (ФГУП «НИИ «Полюс») [55,59]. Поэтому МФП формата 256x256 и 320x256 элементов изготавливались уже с использованием указанного процесса.

В ходе адаптации процессов ИХТ к изготовлению МФП на основе СКЯ решалась задача получения равномерности и воспроизводимости глубины травления на максимально возможной площади пластин. Процессы проводились на установке "Луч" с использованием ионов аргона и фреонов. При работе с фреоном-22 при давлении 2×10^{-2} Па удалось добиться равномерности по глубине травления в пределах $\pm 5\%$ на 3-х пластинах $\varnothing 40$ мм или на 2-х пластинах $\varnothing 50$ мм в одном процессе. Глубина травления дифракционной решетки составляла от 0,5 до 0,8 мкм. Глубина травления меза-структур составляла от 2,0 до 4,0 мкм (в зависимости от типа гетероструктур). Фрагмент пластины с травленой боковой стенкой меза-структуры представлен на рис. 3.2.

Следует отметить важность ИХТ при изготовлении двухспектральных (ДС) МФП, которое было бы невозможно без использования столь прецизионного процесса. Одной из наиболее сложных задач при этом оказалась проблема вскрытия среднего контактного слоя в ДС СКЯ и формирование дифракционной решетки, достигающей его своими полостями. В результате был разработан процесс глубокого ИХТ, который позволил с точностью $\sim \pm 15\%$ травить дифракционную решетку на глубину залегания среднего контактного слоя ($2 \div 3$ мкм), при этом сам размер (ширина) травленых окон составлял ~ 2 мкм.

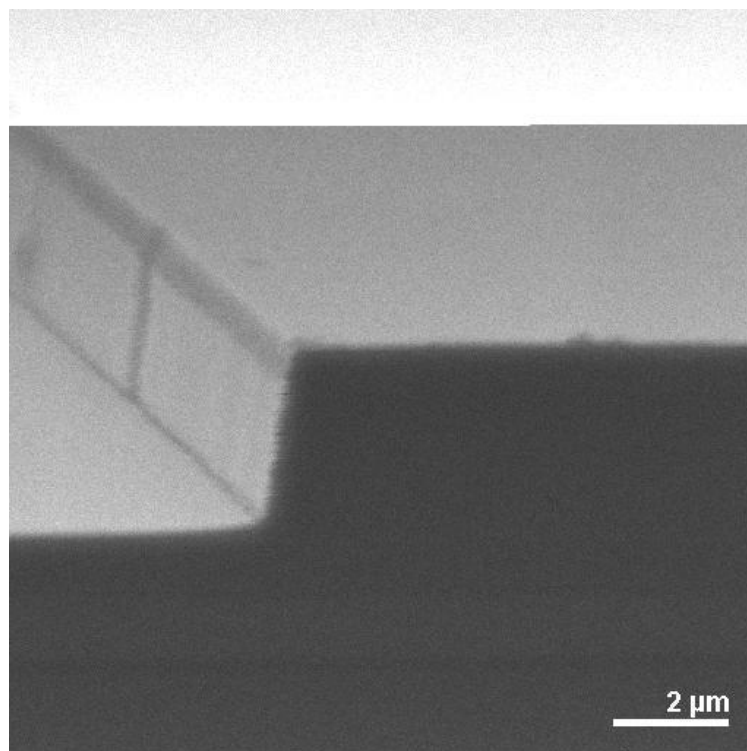


Рис.3.2.Фрагмент пластины с травленой боковой стенкой меза-структуры.

На рис.3.3. представлено фото дифракционной решетки, полученной с помощью описанного выше процесса ИХТ.

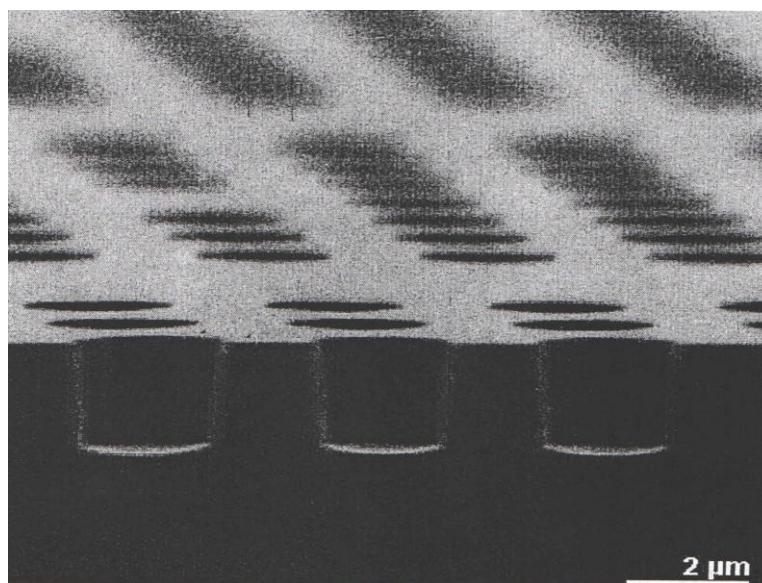


Рис.3.3. Фрагмент дифракционной решетки.

3.1.2. Формирование контактов

Как уже отмечалось, при формировании контактов к ФП СКЯ использовался сплав Au:Ge, который при вжигании в GaAs образует с ним омический контакт. Формирование омических контактов проводилось сразу после формирования дифракционной решетки, чтобы провести вжигание напыленного слоя металла до формирования ЧЭ, чтобы избежать возможной деградации их боковой поверхности при термообработке. Указанная технология формирования контактов была разработана применительно к сильноточным приборам – транзисторам, лазерам, – в которых очень важно иметь не только линейную ВАХ контакта, но и минимально возможное сопротивление. В ФП СКЯ указанные требования не столь важны, поскольку он является слаботочным прибором. Тем не менее, при формировании контактов были использованы уже хорошо отработанные процессы, в которых, кроме Au:Ge, используются дополнительные слои металлов. Так в последних приборах в качестве омических контактов к ФП СКЯ использовались последовательно напыленные слои Ni, Au:Ge, Au. Следует отметить, что формирование топологии контактов осуществлялось двумя способами: взрывом напыленной на маску из фоторезиста металлизации или ее травлением через резистивную маску. Первый способ применялся в ФГУП НПП «Пульсар» и в ЗАО «Светлана-Рост», второй – в ФГУП «НИИ «Полюс». В последнем случае использовалось трехстадийное химическое травление. В качестве травильных растворов были выбраны: травитель для золота на основе тиомочевины, тиосульфата натрия и красной кровяной соли; травитель для золота : германия - соляная кислота; травитель для никеля - на основе персульфата аммония и серной кислоты. Наряду с омическими контактами для создания ГФС на ФП необходимо было создать дополнительную металлизацию. В случае линейных ФП и ХУ-матриц формировались токоведущие дорожки из алюминия или золота с подслоем из титана, которые оканчивались площадками под разварку.

В случае flip-chip –конструкций на поверхности ЧЭ формировались площадки из индия толщиной до 3 мкм. Описания топологии токоведущих дорожек и технологии формирования индиевых столбиков представлены ниже.

3.1.3. Напыление диэлектриков

Требования к качеству диэлектрических покрытий, использованных при создании многоэлементных ФП СКЯ, были относительно мягкими. Дело в том, что пассивирующие покрытия в данном случае должны выполнять лишь две основные функции: изолировать металлические токоведущие дорожки от пролегающих под ними контактных слоев в линейных и ХУ матричных конструкциях и защищать боковую поверхность ЧЭ от возможного попадания на нее при сборке индия в flip-chip-конструкциях. Т.е. основные требования – это минимум сквозных отверстий в диэлектрике в сочетании с его механической прочностью. В связи с тем, что СКЯ состоят из широкозонных материалов, проблема поверхностных утечек в ЧЭ практически отсутствует. Поэтому для пассивации в таких приборах можно использовать практически любой из распространенных диэлектриков при условии, что температура его осаждения не превышает 300⁰С. В результате именно такой подход и был реализован: на начальном этапе работ, которые проводились в ФГУП «НПП «Пульсар», использовался плазменный SiO₂ толщиной 0,5 мкм, а позже, в ФГУП «НИИ «Полюс» использовался магнетронный Si₃N₄ той же толщины. В обоих случаях проблем с диэлектрическими покрытиями не возникало.

3.1.4. Формирование индиевых столбиков

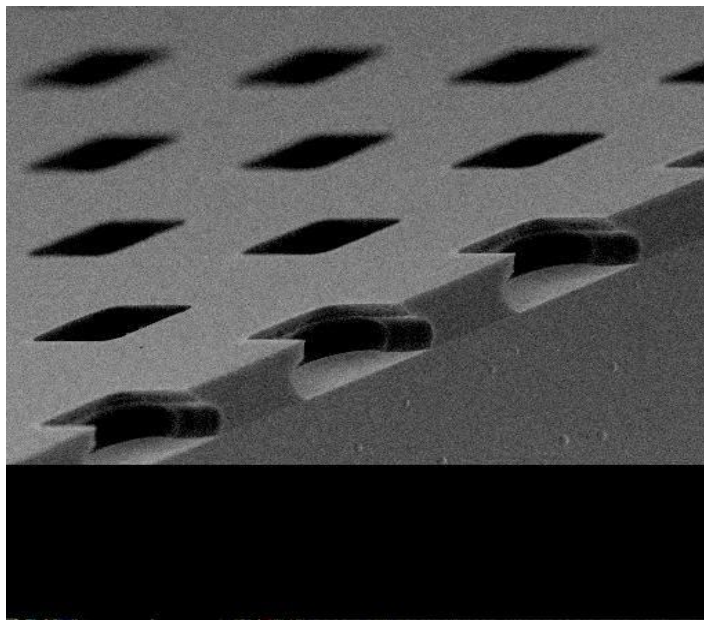
Для осуществления монтажа МФП на кремниевые мультиплексоры (МП) с целью создания ГФС, на обоих собираемых компонентах необходимо формировать индиевые столбики, при помощи которых МФП и МП становятся механически и электрически связанными. Сам процесс стыковки называют

сборкой методом перевернутого кристалла или “flip-chip” сборкой. Создание индиевых столбиков хоть и относится к обоим собираемым компонентам, в большей степени все-таки важно при их размещении на МП. Дело в том, что качество сборки зависит от высоты индиевых столбиков, суммарная величина которой (на МФП и на МП), как правило, составляет не менее 10-15 мкм в зависимости от шага и размера чувствительных элементов. При этом изготавливать высокие столбики проще на относительно гладкой поверхности, чем на имеющей рельеф, характерная глубина которого сопоставима с высотой столбиков. Поэтому на начальном этапе работ было признано целесообразным формировать более высокие столбики, высотой до 10 мкм, на МП, имеющем относительно гладкую поверхность, а на ЧЭ МФП осаждать слои индия высотой не более 3 мкм. Размер основания индиевых столбиков не должен был превышать 15-20 мкм.

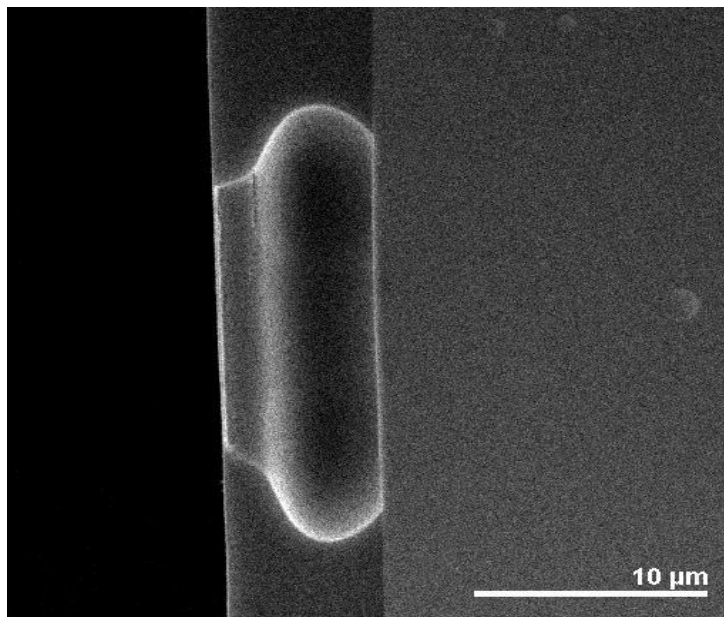
При разработке технологии формирования индиевых столбиков (ФГУП «НИИ «Полус») [55,59] с конструктивными параметрами, указанными выше, за основу был взят подход, описанный в [65] и развитый с учетом имеющихся технических возможностей. Технология включала в себя напыление адгезионного подслоя Mo-Ni и слоя индия на МП с маской из фоторезиста и “взрыв” последнего. С использованием такой технологии на МП воспроизводимо удавалось формировать индиевые столбики высотой ~ 9 мкм.

Для реализации “взрывной” фотолитографии была разработана технология двухслойной фоторезистивной маски толщиной ~ 7÷8 мкм на основе фоторезистов ФП-3515 и ФП-3550, разработанных для этих целей в НИИОПИК, г. Долгопрудный. Специальные методы обработки этих фоторезистов позволили с высокой воспроизводимостью получать фоторезистивные маски с локальными окнами размером ~14 мкм и шагом 30 мкм, имеющими отрицательный профиль (рис. 3.4 а),б)). Это чрезвычайно важно для проведения

"взрывной" фотолитографии. На сформированную на МП маску фоторезиста напылялись: адгезионный подслоя Mo-Ni , толщиной 1000-1500 Å и слой In , толщиной 6-12 мкм (рис. 3.5).



а)



б)

Рис.3.4.а),б). Двухслойная фоторезистивная маска с отрицательным профилем

После удаления фоторезиста, на пластинах оставались индиевые столбики (рис.3.6). Несмотря на то, что были получены положительные экспериментальные результаты по формированию столбиков высотой 12 мкм, на рабочих образцах МП изготавливались столбики высотой 9 мкм, которые получались с более высоким % выхода годных.

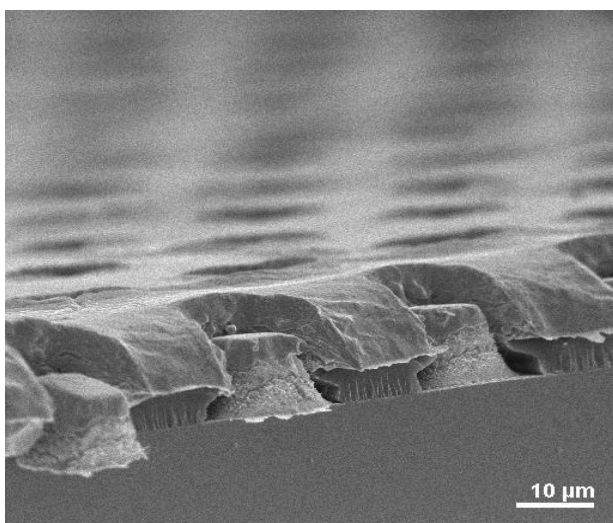


Рис .3.5. Пластина с фоторезистивной маской и напыленной металлизацией. Толщина индия 12 мкм.

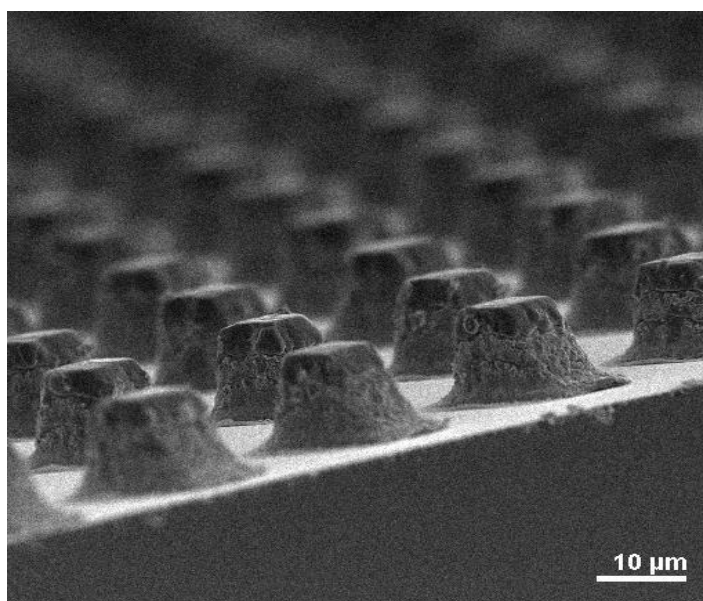


Рис.3.6. Пластина с индиевыми столбиками высотой 12 мкм

Технология формирования индиевых столбиков на МФП принципиально не отличалась от той, что была описана выше, и характеризовалась тем, что на вершинах ЧЭ МФП формировали слой индия толщиной не более 3 мкм. При попытках увеличить толщину индия возникали проблемы при проведении «взрыва» фоторезиста, связанные с тем, что ЧЭ сам имел высоту более 3 мкм. В результате фоторезист, заполнявший промежутки между ЧЭ, не достигал нужной толщины и плохо взрывал индий. Тем не менее, наличие индия на поверхности ЧЭ заметно повышало надежность соединений, образовывавшихся при flip-chip сборке.

3.1.5. Сборка ГФС методом перевернутого кристалла (flip-chip assembly).

Прежде чем перейти к рассмотрению конструкций ГФС, остановимся на технологии сборки методом перевернутого кристалла - flip-chip сборке, применявшейся в настоящей работе при создании ГФС с кадровым накоплением. Необходимо отметить, что технология сборки, о которой речь пойдет ниже, была разработана именно применительно к созданию ГФС на основе СКЯ и при непосредственном участии автора настоящей работы. Сложность работы над указанной проблемой заключалась в том, что в России работы в области flip-chip сборки фотоприемных матриц, судя по публикациям, проводились в крайне ограниченных масштабах (всего на 3-4 предприятиях). Зарубежные публикации по данной теме имеют весьма конкретный характер, т.е. привязаны к условиям формирования индиевых столбиков, их геометрии, сборочному оборудованию и т.д. Более или менее адекватное представление об общих проблемах flip-chip сборки удавалось почерпнуть из интернета (см., например, [66]) и переводного пособия по flip-chip-сборке [67]. Особо следует отметить отсутствие современного сборочного оборудования. Тем не менее, к началу работ по данной проблеме удалось систематизировать доступную

информацию и определить направления исследований.

Среди наиболее общих особенностей flip – chip сборки можно отметить следующие:

- качество соединения собираемых частей ГФС зависит от степени чистоты поверхности соединяемых материалов, а так же режимов сборки, таких как: температура собираемых частей, механическая сила, прикладываемая к ним, время, в течение которого прикладывается усилие;

- режимы сборки в значительной степени определяются геометрическими размерами индиевых столбиков: наилучшей является ситуация, когда отношение высоты индиевого столбика к его поперечному размеру приближается или превышает «1»;

- рекомендуемые в зарубежных источниках информации режимы сборки следующие: механическое давление на границе соединяемых поверхностей составляет около 0.5 кг/мм^2 и может меняться в широких пределах, например, уменьшаться до $0,3 \text{ кг/мм}^2$ при температуре соединяемых частей около 90^0 C при времени воздействия давления около 1 мин.

Описанный выше подход к формированию столбиков, состоящий в том, что они изготавливаются на каждой из собираемых частей ГФС, был направлен на то, чтобы минимизировать давление, прикладываемое к индиевым столбикам и тем самым в меньшей степени подвергать нагрузкам мультиплексор – наиболее уязвимую часть ГФС. Кроме того, в этом случае обеспечивается большая конечная площадь соприкосновения столбиков и, как следствие, более надежный контакт.

Как уже отмечалось, конкретные особенности flip-chip сборки определяются качеством индиевых столбиков - их размерами и свойствами самого индия, например, степенью его окисленности, тонкой структурой материала, т.е. в конечном счете способом получения.

В результате проведенных исследований сформировался технологический маршрут сборки, основные этапы которого описаны ниже. Цифровые данные относятся к ГФС формата 320 x 256 элементов (см. ниже). Индиевые столбики, которые формировались на МП, имели размеры: высота - 9 мкм, площадь поперечного сечения - 12x12 мкм у основания с переходом на усеченный конус у вершины. Размер активного элемента ФП = 26x26 мкм. Индиевые столбики на поверхности ФП имели высоту 3 мкм и площадь около 20x20 мкм. Известно, что наличие окисла (толщина окисной пленки составляет свыше 100Å) на поверхности индиевых столбиков препятствует созданию надежного контакта между ними. Для предотвращения влияния окисла после формирования индиевых столбиков поверхности, их содержащие, – МП и МФП, – покрывались слоем фоторезиста, который удалялся с них непосредственно перед сборкой. На начальных этапах работ по flip-chip сборке после удаления фоторезиста собираемые компоненты погружались на 5 минут в 3% раствор соляной кислоты для удаления окисной пленки с индиевых столбиков и затем тщательно промывались в деионизованной воде. Однако такой способ подготовки столбиков оказался разрушительным для контактных площадок МП – они в некоторых случаях отслаивались от кремниевого основания. Поэтому в дальнейшем для освежения поверхности индия мы использовали 0,5М водный раствор щавелевой кислоты, с последующей промывкой в деионизованной воде. При этом травление индиевых столбиков продолжалось до тех пор, пока в растворе выделялись пузырьки газа. После их исчезновения обработка заканчивалась. В случаях, когда пузырьки не выделялись, обработка заканчивалась через 20 минут.

Экспериментально было установлено, что для получения качественного соединения частей ГФС ее сборка должна проводиться в течение не более 4-5 часов после освежения столбиков, чтобы избежать окисления их поверхности

на воздухе. Сборка ГФС производилась на установке М9-А производства фирмы R&D Automation,(США). Внешний вид установки М-9А представлен на рис.3.7.



Рис.3.7. Внешний вид установки М-9А

При совмещении частей ГФС МП располагался на нижнем захвате, а ФП на противоположной поверхности прижимного устройства (крепление частей ГФС осуществляется посредством вакуума).

В результате исследований нами был отработан следующий режим сборки, приведенный к формату 320 x 256 элементов с конструкцией столбиков, описанной выше, и обеспечивающий удовлетворительное качество соединения стыкуемых частей:

- механическая нагрузка – 130-150 Н;
- температура стыкуемых частей – 130⁰ С;
- время приложения нагрузки - 5 минут.

Представленные режимы сборки были опробованы и на приборах других форматов с соответствующим масштабированием нагрузки и показали также удовлетворительные результаты. Вместе с тем были выявлены и некоторые

недостатки процесса сборки, связанные как с технологией формирования столбиков, так и со сборочной установкой. Было обнаружено, что установка М9А не обеспечивает воспроизводимой параллельности стыкуемых компонентов. В результате при сборке одна из сторон ГФС могла подвергаться более сильному сжатию, приводящему к большей деформации столбиков, а другая часть к недостаточному сжатию. В первом случае соседние столбики могли смыкаться, создавая электрические закоротки. Во втором случае столбики могли остаться несоединенными. Для преодоления указанной проблемы были сделаны следующие шаги. Была предпринята попытка увеличить высоту столбиков после их осаждения на МП посредством отжига в водородной или формиנג-газе при температуре 250°C в течение 10 минут. Оказалось, что столбики с изначальной формой в виде усеченной пирамиды (рис.3.6), после отжига по форме больше напоминают конус и увеличиваются по высоте на 2-3 мкм. При этом термообработка в восстанавливающей среде приводит к удалению окисной пленки на поверхности индия. Если оказывалось, что после сборки часть столбиков закорачивалась и/или часть не вступала в контакт, то в ряде случаев определенную пользу приносил аналогичный отжиг, но уже собранной ГФС. В результате оплавления закороченные столбики возвращались к энергетически более экономичной форме конуса и выходили из соприкосновения с соседями, а несоединенные столбики из-за подъема более деформированной стороны ГФС могли в большей или меньшей степени прийти в соприкосновение. Если указанные выше действия не приводили к получению ГФС с приемлемым количеством годных ЧЭ, проводилось дополнительное ее сжатие с предварительным разворотом на 180° по отношению к первоначальному положению.

Следует отметить, что собранные указанным способом ГФС даже без утонения подложки МФП и без заполнения промежутка между МП и МФП клеем,

выдерживали многократные циклы охлаждение-нагревание без заметного увеличения дефектных ЧЭ.

3.2. Конструкции ГФС

3.2.1. Линейные ГФС

Первый многоэлементный фотоприемник на основе СКЯ был продемонстрирован в виде линейной ГФС [4]. Представленные в настоящей работе результаты по развитию данного направления хронологически достигались в том же порядке. Первое сообщение о создании линейного многоэлементного ИК фотоприемника на основе СКЯ относится к 1992г. [20]. Линейный фотоприемник формата 1х64 элементов, обладавший фоточувствительностью в спектральном диапазоне 8-12 мкм, был состыкован с ПЗС – мультиплексором. И хотя рекордных показателей с помощью такой ГФС достигнуть не удалось, ее создание показало принципиальную возможность использования нового класса длинноволновых ФП в сочетании с охлаждаемым мультиплексором при температурах вблизи 77К, чего не удавалось добиться с помощью примесных ФП на тот же спектральный диапазон. К этому времени уже начала формироваться концепция ИК фотоприемников 3-го поколения, основу которой должны были составлять несканируемые, т.е. матричные формирователи изображений с перспективой достижения полного телевизионного формата. Таким образом, линейные ГФС с оптико-механическим сканированием вытеснялись в область специальных применений, а на смену им приходили несканируемые матричные аналоги. Следующим этапом было создание матричной ГФС [68,69], однако разработка линейных ГФС на этом не прекратилось. Как уже отмечалось, линейные ГФС еще рассматривались как возможная элементная база для перспективных оптико-электронных систем, разрабатывавшихся тогда в РФ.

Ниже представлены результаты разработок линейных ГФС на основе СКЯ, выполнявшихся по государственным контрактам РФ [54,70,71].

Линейные ГФС разрабатывались для использования в спектральных диапазонах 3-5 мкм и 8-12 мкм. СКЯ, из которых изготавливались ФП для ГФС, имели конструкции, описанные в Главе 2 (см. таблицы 2.1,2.2). Линейный фотоприемник имел формат 2 x 48 элементов. При этом ряды были сдвинуты друг относительно друга на один элемент, т.е. так, что ЧЭ одного ряда находился напротив зазора между соседними ЧЭ второго ряда. Шаг ЧЭ в одном ряду составлял 60 мкм с зазором 30 мкм. Для считывания сигналов с фотоприемника использовался кремниевый КМОП МП формата 2x64 элемента (разработка ООО «РТК Импекс», г Москва). Фотоприемник стыковался с МП посредством индиевых столбиков с использованием flip-chip сборки. На рис. 3.8. представлено изображение линейной ГФС с фотоприемником, состыкованным с МП посредством индиевых столбиков.

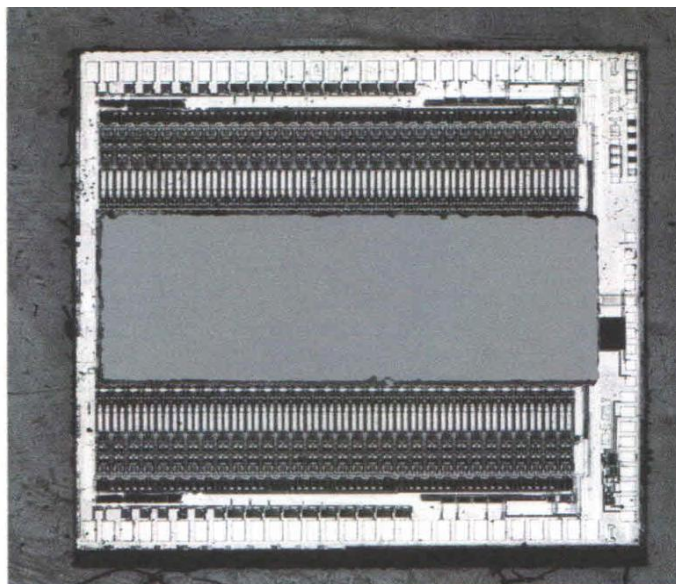


Рис.3.8. Линейная ГФС, собранная методом перевернутого кристалла.

Экспериментальные исследования изготовленных описанным выше способом линейных ГФС для обоих спектральных диапазонов подтвердили ожидаемые характеристики. На основе разработанных ГФС были созданы фотоприемные модули (ФПМ), прошедшие предусмотренные испытания. И хотя дальнейшего использования разработанных линейных ГФС и ФПМ на их основе в составе аппаратуры не состоялось, обретенный при их создании опыт оказался востребован при работах над матричными ГФС и ФПМ.

3.2.2. Матричные ГФС.

3.2.2.1. ГФС с ХУ-адресацией.

Наряду с линейными ГФС на основе СКЯ практически одновременно проводились работы по созданию матричных ГФС. В это время зарубежные разработчики матричных ГФС конструктивно строили их таким образом, чтобы каждому ЧЭ фотоприемной матрицы соответствовала своя накопительная емкость в мультиплексоре. Такая конструкция позволяла обеспечивать режим кадрового интегрирования сигнала, т.е. когда в течение времени кадра сигнал копится одновременно во всех ячейках мультиплексора. Кадровый режим накопления позволяет максимально использовать время кадра и дает больше возможностей для увеличения частоты кадров. При реализации указанной конструкции ГФС неизбежным становилось использование flip-chip сборки. В России, как уже отмечалось, в начале 1990-х такой технологии и оборудования требуемого качества не было. Тем не менее, было признано целесообразным начать работы по созданию матричных ГФС, исходя из имеющихся возможностей. При этом предполагалось, что полученные результаты будут использованы в дальнейшем в конструкциях ГФС с кадровым накоплением, для изготовления которых необходимо применение flip-chip сборки.

Выбор конструкции ГФС осуществлялся из следующих соображений. Во-первых, реализация конструкции должна обеспечиваться с помощью хорошо

отработанных технологических процессов. Во-вторых, конструкция должна сочетать простоту изготовления и обеспечение требуемых фотоэлектрических параметров. В наибольшей степени отвечающей указанным требованиям по нашему мнению оказалась ГФС с ХУ- адресацией. Принципиальная схема такой ГФС представлена на рис.3.9.

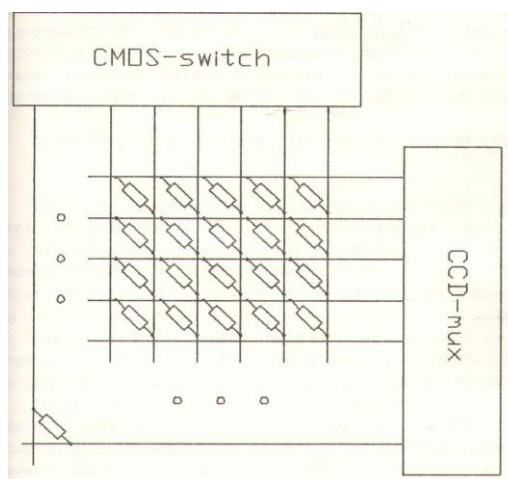


Рис.3.9. Принципиальная схема ГФС с ХУ-адресацией.

Строки фотоприемной матрицы поочередно подключаются к аналоговому линейному ПЗС (или КМОП) - мультиплексору с помощью КМОП - ключей. Накопление сигнала текущей строки идет в течение времени считывания сигналов с предыдущей строки [54,70,71].

Заметим, что в таком аналоговом ПЗС мультиплексоре площадь и, следовательно, емкость накопительной ячейки не зависит от площади ЧЭ фотоприемной матрицы и может быть чисто геометрическими методами увеличена до требуемой величины (путем увеличения длины электрода емкости при сохранении ее ширины). Представленная конструкция ГФС с точки зрения принципа формирования изображения аналогична линейному фотоприемнику с однокоординатным оптико-механическим сканированием, только в ХУ ГФС вместо механического используется электронное сканирование за счет переключения строк. В обоих случаях в текущий момент сигнал интегрируется только на одной строке. В результате при одном и том же времени кадра

(и одинаковом формате) пороговая чувствительность, например, NEΔT будет в случае ГФС со сканированием хуже, чем в ГФС с кадровым накоплением, в $N^{1/2}$ раз, где N – число строк [63]. Однако, имеется ряд соображений, согласно которым предложенная конструкция ГФС имеет определенные преимущества. Рассмотрим их. Накопительная емкость мультиплексора ГФС с кадровым накоплением в значительной степени ограничена площадью элемента разложения изображения, что в условиях повышенной фоновой облученности может налагать ограничения на время накопления и, как следствие, на пороговую чувствительность. В случае с ХУ ГФС данная проблема может быть в значительной степени устранена: емкость накопительной ячейки может быть многократно увеличена чисто геометрически, за счет увеличения длины электродов. И если в оптико-электронной системе нет жестких требований по частоте кадров (например, в медицинских тепловизорах), такой способ повышения пороговой чувствительности может быть вполне приемлемым.

Как будет показано ниже, (глава 4) для достижения высокой пороговой чувствительности важна не только величина накопленного заряда, но и время, в течение которого он накоплен.

Оценим теперь требуемое время накопления при заданной минимальной разности температур NEΔT, которую необходимо зарегистрировать с помощью ГФС. Используя результаты [72], минимальное время накопления t_{int} , необходимое для регистрации заданной NEΔT, можно записать в виде следующего неравенства:

$$t_{\text{int}} > 8 \cdot (f/D)^4 \cdot [\text{NE}\Delta T \cdot T_{\text{opt}} \cdot D_{\lambda}^* \cdot R(\lambda_1, \lambda_2, T) \cdot A^{1/2}]^{-2}$$

где f и D – фокусное расстояние и диаметр входного зрачка оптической системы, T_{opt} – коэффициент ее оптического пропускания, D_{λ}^* –

обнаружительная способности ЧЭ матрицы, приведенная к максимуму спектра фоточувствительности, A – площадь ЧЭ, $R(\lambda_1, \lambda_2, T)$ – интеграл температурной производной формулы Планка в интервале длин волн λ_1 и λ_2 , T – температура объекта наблюдения. По сравнению с оригинальной формулой мы сделали некоторые упрощения: предположили, что в спектральном интервале, в котором производится интегрирование, D^* без значительных ошибок можно заменить на D_λ^* . Согласно [72], для интервала $\lambda_1 - \lambda_2 : 8-10$ мкм величина $R(\lambda_1, \lambda_2, T) \approx 10^{-4}$ Вт/см²К при температуре объекта около 300К. Пусть $NE\Delta T = 0,03$ К; $A = 30 \times 30$ мкм², $f/D = 2$, $T_{opt} = 0,8$, $D_\lambda^* = 6 \times 10^{10}$ Вт⁻¹см Гц^{1/2} (значение взято из результатов наших измерений, представленных выше), тогда $t_{int} > 6,8 \times 10^{-4}$ с. Применительно к ГФС с ХУ адресацией формата 320 x 256 элементов при работе на один мультиплексор частота кадров составит около 6 Гц. При разбиении матрицы на 4 сектора и при использовании 4-х мультиплексоров и 4-х переключателей строк частоту кадров можно довести до 25 Гц, т.е. до стандартного телевизионного режима.

Сделанные оценки показывают, что для рассмотренных условий конструкции ГФС со строчным накоплением могут конкурировать с аналогами с кадровым накоплением при решении определенного круга задач тепловидения, будучи проще в конструктивном и технологическом отношениях. Создание экспериментального образца ГФС с ХУ адресацией стало первой серьезной проверкой накопленного опыта в области конструирования сложных многоэлементных фотоприемников и технологического обеспечения разработки. МФП имел формат 64 x 64 элемента с шагом 120 мкм и размером чувствительного элемента 100x100 мкм. Для обеспечения фоточувствительности в области 8-12 мкм использовались СКЯ, имевшие конструктивные параметры, представленные в таблице 2.2. Для обеспечения ХУ адресации токоведущие дорожки по одной координате формировались в виде изолированных полосок в нижнем n^+ контактном слое, а

по другой координате в виде металлических полосок из алюминия, имеющих контакт с верхней p^+ областью ЧЭ матрицы. Фрагмент топологии МФП представлен на рис.3.10

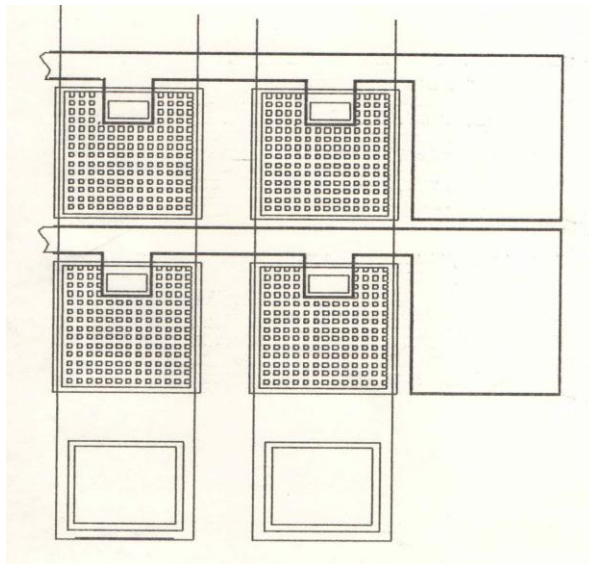
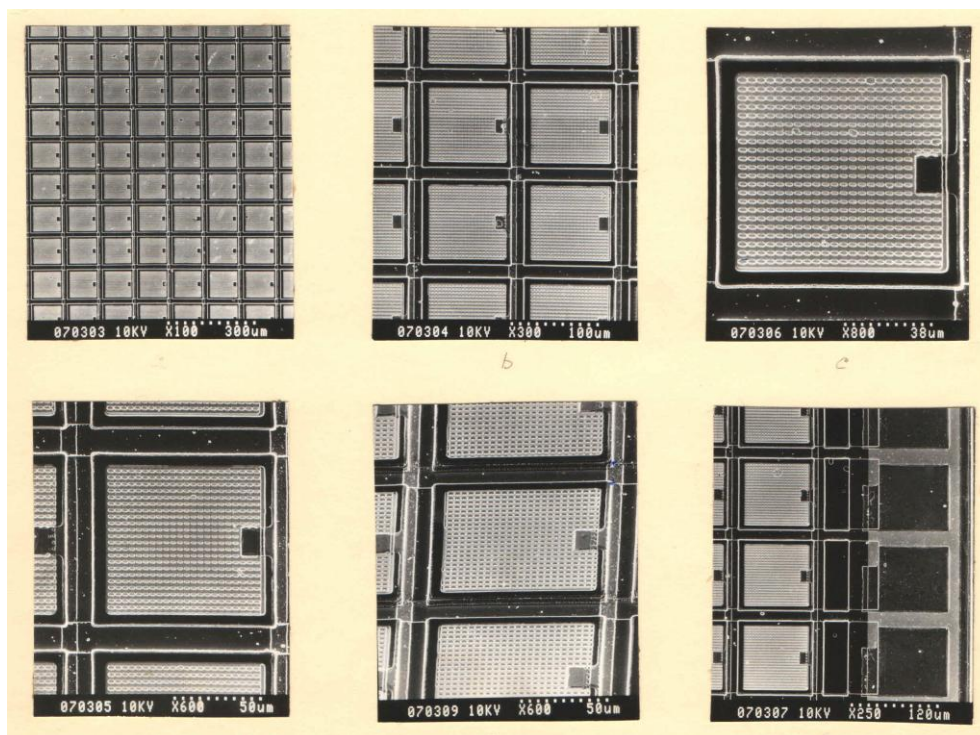


Рис.3.10. Фрагмент топологии МФП с ХУ адресацией.

Внизу рисунка показаны контактные площадки, расположенные на окончаниях нижних токоведущих дорожек, справа – контактные площадки окончаний верхних металлических дорожек. Для обеспечения эффективного ввода излучения в ЧЭ со стороны верхнего p^+ слоя вытравливалась двумерная дифракционная решетка с шагом 4 мкм и глубиной до 1 мкм. Как будет показано ниже, параметры решетки не были оптимальными, что было связано с ограниченными технологическими возможностями, имевшимися в тот момент в нашем распоряжении. Последовательность операций при изготовлении МФП была следующей. В исходной пластине с СКЯ посредством химического травления формировалась дифракционная решетка. Затем посредством ионно-химического травления СКЯ до нижнего контактного слоя с использованием маски из титана выделялись ЧЭ и далее таким же образом адресные токоведущие дорожки посредством травления нижнего контактного слоя до

полуизолирующей подложки. После травления осуществлялось формирование омических контактов к верхнему слою ЧЭ и токоведущим дорожкам посредством напыления, взрыва и вжигания пленки Au:Ge. Далее поверхность МФП покрывалась пленкой SiO_2 толщиной 0,5 мкм, в которой вскрывались окна над омическими контактами. После чего последовательно напылялись титан толщиной до $300\text{\AA}$ и алюминий толщиной до 1 мкм для формирования металлических токоведущих дорожек.

На рис. 3.11 представлены фото фрагментов МФП, полученные с помощью электронного микроскопа при различном увеличении.



Ри.с.3.11. Фото фрагментов ХУ МФП при различном увеличении.

Далее МФП поступала на сборку ГФС. Сборка ГФС осуществлялась на ситалловой плате с алюминиевыми токоведущими дорожками. В центре платы размещалась МФП, которая приклеивалась к ней криогенно стойким клеем (КСТ). В непосредственной близости от МФП располагались 128 –канальный ПЗС-мультиплексор (производства ФГУП «НПП «Пульсар»), электрически

связанный с Y-пинами (дорожки в нижнем контактном слое), и два кристалла КМОП ключей, каждый из которых коммутировал 32 X-шины (металлические дорожки на поверхности МФП). Электрические соединения контактов на кристаллах с токоведущими дорожками формировались посредством ультразвуковой сварки. На рис. 3.12 представлено фото ГФС в сборе.

Поскольку основное внимание в данной работе уделено ГФС с кадровым накоплением, результаты измерения характеристик которых подробно обсуждаются в главе 4, на измерениях ХУ ГФС остановимся кратко в данном разделе.

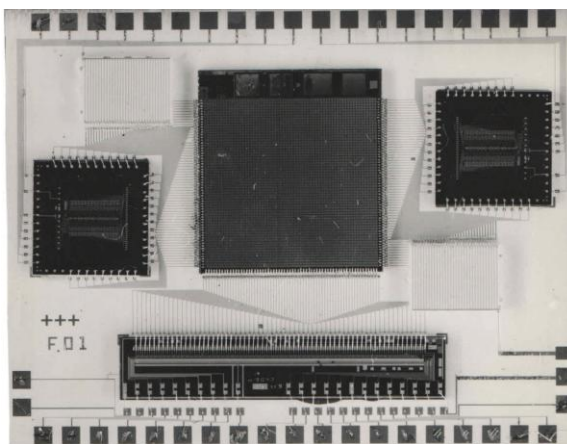


Рис. 3.12. Фото ХУ ГФС в сборе.

Измерения характеристик представленной ГФС проводились в разборном заливном криостате, обеспечивавшем возможность охлаждения ГФС до 60К посредством откачки паров жидкого азота. Основным параметром, который определялся в ходе измерений, была удельная обнаружительная способность. Измерения проводились при фоновой засветке 300К в телесном угле 2π . При температуре 70К достигнутое значение удельной обнаружительной способности D_{λ}^* составило $1,5 \times 10^{10} \text{ Вт}^{-1}\text{см Гц}^{1/2}$ при $\lambda_{\text{max}} = 8,7 \text{ мкм}$. Неоднородность чувствительности по ГФС составила 20%.

Следующим и последним на сегодняшний день результатом по созданию ХУ ГФС была разработка прибора форматом 128x128 элементов с шагом 62 мкм и размером ЧЭ 50x50 мкм. На рис. 3.13 представлено фото указанной ГФС, размещенной в корпусе-криостате, предназначенном для работы в сочетании с микрокриогенной системой Стирлинга в составе фотоприемного модуля. Опрос элементов МФП производился с помощью 128 канальных КМОП мультиплексора и коммутатора строк (разработка ООО «РТК-Импекс»). ГФС имела максимум спектра фоточувствительности около 9 мкм и при 65 К обеспечивала обнаружительную способность не хуже $2 \times 10^{10} \text{ Вт}^{-1} \text{ см Гц}^{1/2}$.

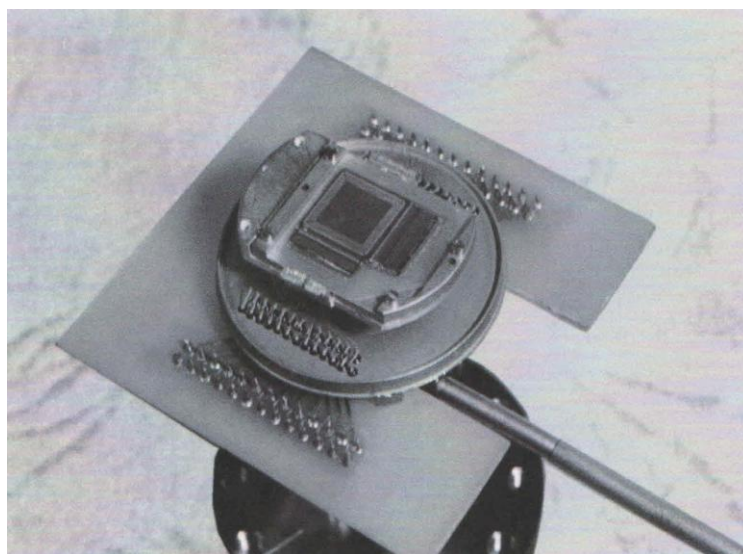


Рис.3.13. ГФС формата 128x128 элементов в корпусе-криостате.

Относительно невысокое значение обнаружительной способности обусловлено тем, что шумы ГФС определялись электроникой, управлявшей мультиплексором, а не МФП.

В завершение раздела, посвященного ГФС с ХУ адресацией, рассмотрим еще одну конструкцию, которая была запатентована [73].

Предлагаемая конструкция направлена на решение тех же задач, что и рассмотренные выше конструкции ГФС с ХУ адресацией. Принципиальным

отличием предложенного устройства является наличие дополнительного слоя, расположенного между СКЯ и нижним контактным проводящим слоем, образующего с ними р-п- переходы. По существу указанный слой является базой биполярного транзистора, коллектором и эмиттером которого являются СКЯ и нижний проводящий слой соответственно. Такой транзистор изолирует ЧЭ матрицы друг от друга и от нижнего проводящего слоя (т.е. от источника питания), когда на базу подан нулевой или запирающий потенциал, и подключает их к источнику питания, когда на базу подается отпирающее напряжение. Таким образом, каждый чувствительный элемент МФП содержит встроенный ключ, который отсутствует в описанных выше конструкциях. На рис. 3.14 представлена конструкция предлагаемой ГФС.

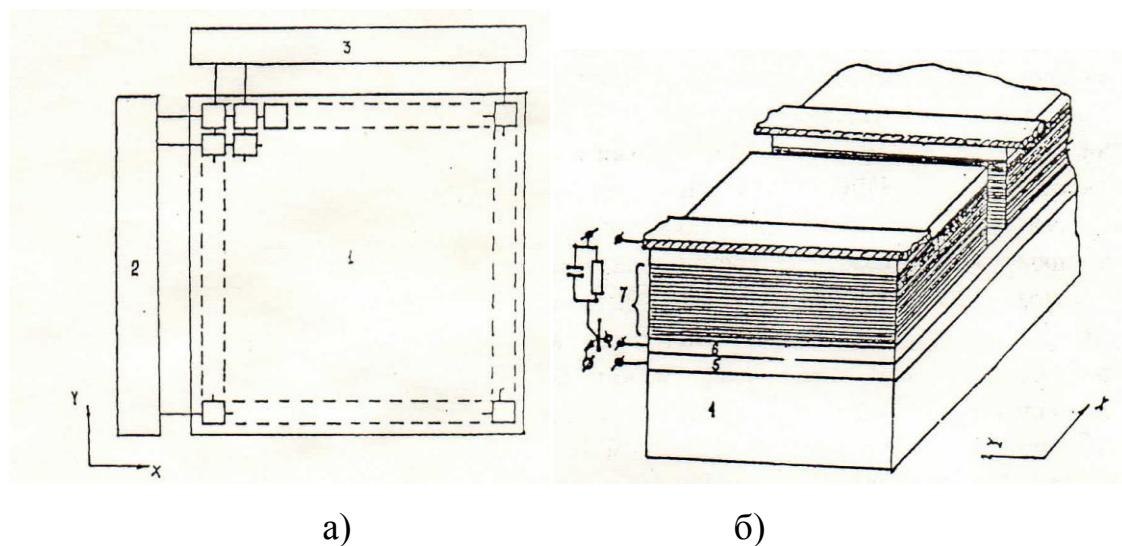


Рис. 3.14. а), б). Конструкция ХУ ГФС с р-п-переходом: а) функциональная схема; б) устройство чувствительного элемента.

Строки МФП 1 электрически связаны с коммутатором строк 2, осуществляющего поочередное подключение их к источнику питания, обеспечивающего подачу отпирающего напряжения на базы ключевых транзисторов. Столбцы матрицы электрически связаны с входами линейного мультиплексора 3, осуществляющего накопление и считывание сигналов.

Устройство чувствительного элемента представлено на рис. 3.14 б). На подложке 4 расположены последовательно нижний проводящий слой 5, дополнительный слой 6 и СКЯ 7. Слой 6 имеет тип проводимости, противоположный типу проводимости слоя 5 и СКЯ 7. Слой 6 разделен на полосы, которые непрерывны в пределах одной строки МФП. Иначе говоря, каждая строка МФП представляет собой многоколлекторный биполярный транзистор, в котором база в виде полосы дополнительного слоя является непрерывной в пределах данной строки, а коллектор разделен на элементы, являющиеся ЧЭ МФП. Устройство работает следующим образом. При подаче отпирающего напряжения на базу 6 данной строки между эмиттером 5 и коллектором СКЯ 7 потечет ток, величина которого будет определяться сопротивлением СКЯ, т.е. облученностью и рабочей температурой. Этот ток регистрируется в аналоговом мультиплексоре 3 в течение времени коммутации строки. После отключения базы от источника питания ЧЭ данной строки оказываются изолированными друг от друга и от эмиттера. В течение времени коммутации строки сигнальные заряды от предыдущей строки выводятся из мультиплексора на устройства последующей обработки сигналов. Данный способ коммутации элементов МФП реализует уже описанный режим строчного накопления. Однако, благодаря лучшей изоляции ЧЭ за счет введения дополнительного слоя в такой ГФС может быть реализован и режим кадрового накопления. Такой режим в чистом виде может быть осуществлен, когда постоянная времени RC цепочки, образованной сопротивлением СКЯ и ее контактами, будет больше времени кадра. В этом случае при подаче отпирающего напряжения на базу через RC цепочку потечет ток, заряжающий емкость до напряжения питания. Этот ток регистрируется в мультиплексоре в виде заряда. После отключения данной строки емкости ее ЧЭ будут разряжаться через внутренние сопротивления элементов, управляемые освещенностью. Через время кадра данная строка будет снова подключена к источнику питания,

и величины зарядов, на которые разрядились емкости ЧЭ данной строки, будут зарегистрированы в мультиплексоре при протекании через них токов дозарядки. Таким образом интегрирование сигналов будет происходить в течение всего времени кадра.

В заключение данного раздела отметим, что ГФС с ХУ адресацией, рассмотренные выше, не являются примерами совершенства для класса матричных фотоприемников, в которых достигнуты предельные характеристики. Причины этого заключаются не только в фундаментальных недостатках строчного накопления сигналов по сравнению с кадровым, но и в конструктивно – технологических ограничениях, возникших на данном этапе разработок. В частности, в таких приборах не удалось в силу ряда причин реализовать конструкции с утоненной подложкой, оптимизированной дифракционной решеткой для ввода излучения, позволяющих рассчитывать на повышение их чувствительности. В то же время работа над указанными приборами позволила решить ряд конструктивных и технологических задач, благодаря чему последующие разработки ГФС с кадровым накоплением были проведены с меньшими, чем можно было ожидать, временными и материальными затратами.

3.2.2.2. Расчет конструкций фазовых дифракционных решеток как устройств ввода излучения в ФП СКЯ

Прежде чем переходить к рассмотрению результатов по созданию ГФС с кадровым накоплением, остановимся на конструкциях дифракционных решеток для ввода излучения в ЧЭ МФП. Данный вопрос является весьма важным при конструировании матриц ФП СКЯ, поскольку от его правильного решения зависит квантовая эффективность прибора, определяющая ряд его других важнейших характеристик. Принцип работы дифракционной решетки

(ДР) как устройства ввода в ФП СКЯ уже был описан в главе 1, где не уточнялся тип ДР, однако для дальнейшего рассмотрения такое уточнение необходимо сделать. Изучение многочисленных публикаций по ГФС на основе СКЯ позволило установить, что наиболее распространенным типом устройств ввода оказалась фазовая ДР, т.е. такая, которая при прохождении сквозь (или отражении от) нее излучения, меняет распределение фазы в последнем. Достоинством таких ДР является то, что при определенных условиях они могут сформировать дифракционную картину, в которой отсутствует нулевой порядок дифракции. Т.е. для заданной длины волны все падающее излучение будет отклонено от первоначального направления распространения. Кроме того, фазовые решетки технологически и конструктивно совместимы с ФП СКЯ, поскольку могут быть сформированы на поверхности ФП посредством травления (химического или ионного) части верхнего слоя эпитаксиальной структуры, из которой изготавливают ФП.

Ниже представлены результаты расчетов в виде упрощенных аналитических выражений, позволяющих оптимизировать конструкцию ФП СКЯ с фазовой ДР в качестве устройства ввода излучения с точки зрения повышения его квантовой эффективности. В качестве примера рассмотрены ДР двух типов: пропускающие и отражающие. В качестве объекта исследования рассмотрим ФП, схематическое изображение которого представлено на рис.3.1. В общем случае он представляет собой полупроводниковую меза-структуру, содержащую СКЯ (обычно около 50 периодов), на верхней и нижней поверхностях которой сформированы контактные n^+ -слои. Для определенности будем считать, что в СКЯ ямы изготовлены из GaAs, а барьеры из $Al_x Ga_{1-x} As$, контактные n^+ -слои из GaAs толщиной около 1 мкм. Пусть на поверхности одного из прозрачных контактов сформирована фазовая ДР (вообще говоря, двумерная) в виде периодически чередующихся участков n^+ -GaAs разной толщины. Излучение в объем ФП может поступать как через верхний контакт, так и через нижний. В обоих

случаях излучение будет испытывать дифракцию на ДР и рассеиваться в объем ФП под различными углами по отношению к направлению распространения падающего излучения. После рассеяния излучение будет распространяться в ФП вдоль слоев СКЯ, испытывая отражения от его внешних границ. Эффективность поглощения излучения, а значит и чувствительность ФП, будут тем выше, чем под большим углом оно будет рассеиваться. При этом важно, чтобы максимальная доля падающего излучения дифрагировала в 1-й и более высокие порядки. Оба указанных условия определяются периодом, скважностью и глубиной рельефа ДР. Таким образом, нашей задачей является определение конструктивных параметров ДР, обеспечивающих наибольшую эффективность ввода излучения в ФП СКЯ. Для простоты расчетов будем рассматривать одномерные решетки, т.е. такие, у которых периодическая неоднородность рельефа сформирована вдоль одной из координат в плоскости прозрачного контакта. Далее рассмотрим два варианта конструкции ФП СКЯ с ДР: 1) излучение падает на ФП со стороны ДР (случай ХУ ГФС, рассмотренной выше); 2) излучение падает на ФП со стороны подложки (наиболее распространенная конструкция). В последнем случае будем считать, что ДР покрыта сверху отражающей пленкой металла. В первом случае ДР будем называть пропускающей, во втором – отражающей. Для расчета дифракционной картины воспользуемся известным выражением для амплитуды дифрагировавшей волны [74]:

$$U(p) = C \sum_n \int_A \exp[-ikp(x_n + x)] dx = C \sum_m \exp[-ikpx_n] \int_A \exp[-ikpx] dx \quad (3.1)$$

В случае дифракционной решетки $x_n = nd$, d – период решетки, n – номер периода. В (3.1) $k = 2\pi/\lambda$ – волновое число электромагнитной волны; x_n – координата неоднородности (штриха в решетке); $p = \sin\theta$, где θ – угол между нормалью к плоскости решетки и направлением распространения дифрагировавшей волны, C – постоянная. В (3.1) интеграл берется по всей

площади A периода решетки. Учитывая что в ДР $x_n = nd$, преобразуем (3.1) к виду:

$$U(p) = U^{(0)}(p) \sum_{n=0}^{N-1} \exp(-ikndp) = U^{(0)}(p) \frac{1 - \exp(-iNkdp)}{1 - \exp(-ikdp)} \quad (3.2)$$

$$\text{где } U^{(0)}(p) = C \int_A F(x) \exp(-ikpx) dx \quad (3.3)$$

В (3.3) $F(x)$ - функция пропускания ДР, определяемая как $F(x) = V(x)/V_0(x)$, где $V_0(x) = A \cdot \exp(-ikr_0x)$ –возмущение, создаваемое электромагнитной волной в плоскости ДР; $V(x) = A \cdot \exp(-ikrx)$ -возмущение после прохождения ДР. Согласно [74] интенсивность возмущения

$$I(p) = |U(p)|^2 = \left[\frac{\sin(Nkdp/2)}{\sin(kdp/2)} \right]^2 \cdot |U^{(0)}(p)|^2 \quad (3.4)$$

В (3.4) первый сомножитель определяет результат интерференции N вторичных источников излучения (периодических неоднородностей), второй сомножитель определяет действие одного периода решетки. Рассмотрим теперь конкретные конструкции ДР.

Пропускающая ДР

Пусть ДР представляет собой среду с показателем преломления N_r , поверхность которой, граничащая с воздухом (вакуумом), имеет прямоугольные канавки глубиной h и шириной $D/2$. Далее для простоты расчетов будем предполагать, что излучение падает перпендикулярно плоскости решетки (рис.3.15).

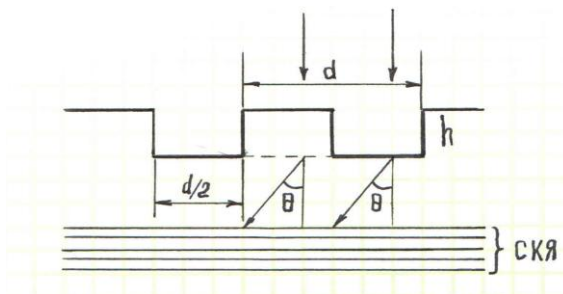


Рис.3.15. Схематическое изображение «пропускающей» фазовой ДР

Поскольку ДР фазовая (отражением от поверхности ДР мы пренебрегаем), то $|F(x)| = 1$.

В этом случае $F(x) = V(x)/V_0(x) = \exp(i\Delta)$, Δ определяет распределение разности фаз в падающей и прошедшей волнах. Для одного периода решетки можно записать:

$$F(x) = \begin{cases} \exp(ikh); -d/2 < x < 0 \\ \exp(ikN_r h); 0 < x < d/2 \end{cases}$$

Вычисление I_0 для такой функции $F(x)$ дает:

$$I_0 = B_0 \left[\frac{\sin(kdpN_r/4)}{(\frac{kd p N_r}{4})} \right]^2 \cdot \cos^2 \left\{ \frac{k}{2} [h(N_r-1) - (pd/2) N_r] \right\} \quad (3.5)$$

где B_0 включает постоянную C из (3.3) и первый сомножитель из (3.4). Нетрудно видеть, что он осциллирует с частотой во много раз большей, чем второй и третий сомножители в (3.5), внося тонкую структуру в дифракционную картину, определяемую двумя последними сомножителями. Второй периодический сомножитель имеет максимумы, когда $p = 0$ и когда $\sin^2(\frac{kd p N_r}{4}) = 1$, т.е. $kd p N_r/4 = \frac{\pi}{2} + \pi m$ ($m=0, \pm 1 \dots$). Угол дифракции 1-го порядка, т.е. при $m=0$, определяется условием: $p = \sin\theta = \lambda/(N_r d)$. Для максимально эффективного поглощения излучения необходимо, чтобы θ был максимально близок к 90° , т.е. $\lambda/(N_r d) \sim 1$. Откуда следует, что для $\lambda = 9 \text{ мкм}$ и $N_r = 3,3$ период ДР должен быть близок к $2,7 \text{ мкм}$, а характерный размер вытравленных ямок порядка $1,5 \text{ мкм}$.

Последний сомножитель в (3.5) определяет соотношение частей дифрагировавшего излучения в различных порядках дифракции. Определим условия, при которых он обращается в ноль при $p=0$, т.е. условия, при которых 0-

й порядок дифракции отсутствует. Это произойдет, когда $\frac{k}{2}h(N_r - 1) = \pm \frac{\pi}{2} + \pi m$ ($m=0, \pm 1 \dots$), откуда (при $m=0$) получаем соотношение :

$$h = \frac{\pi}{k(N_r - 1)} = \frac{\lambda}{2(N_r - 1)}$$

Отметим, что для 1-го порядка дифракции, т.е. когда $p = \sin\theta = \lambda/(N_r d)$, и при условии $h = \lambda/2(N_r - 1)$ величина $\cos$ в (3.5) также равна 1. Это означает, что условие, при котором подавляется 0-й максимум в дифракционной картине, не приводит к подавлению максимумов более высокого порядка .

Оценим величину h для ДР в GaAs. Для $\lambda = 9 \text{ мкм}$ и $N_r = 3,3$ получаем $h = 1,96 \text{ мкм}$. Полученная величина отражает одно из неудобств «пропускающей» конструкции ФП СКЯ, состоящее в необходимости формирования ДР, глубина которой больше, чем характерный размер ямок, вытравливаемых при формировании ДР (см. выше). Указанная проблема в меньшей степени проявляется в случае «отражающих» ДР

Отражающая ДР

Рассмотрим другую конструкцию ДР. В отличие от предыдущей, в данной ДР граница с вытравленными ямками покрыта отражающим слоем металла. Излучение на ДР падает со стороны подложки (рис.3.16).

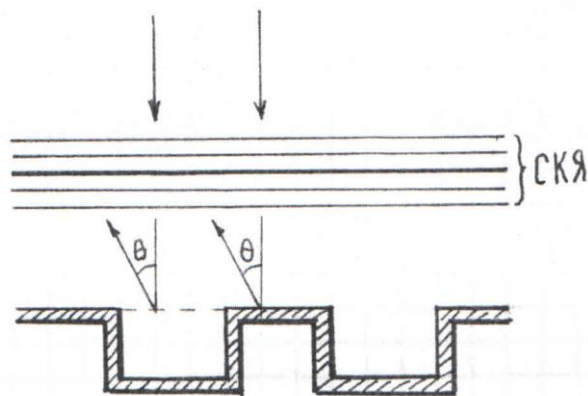


Рис.3.16. Схематическое изображение «отражающей» фазовой ДР

Для расчета дифракционной картины воспользуемся соотношениями (3.2-3.4). Для рассматриваемого случая $F(x)$ будет иметь вид:

$$F(x) = \begin{cases} 1; -\frac{d}{2} < x < 0 \\ \exp(2ikN_r h); 0 < x < d/2 \end{cases}$$

Проводя интегрирование (3.3) аналогично предыдущему случаю, получим выражение для I_0 :

$$I_0 = B_1 \left[\frac{\sin(kdpN_r/4)}{(\frac{kd p N_r}{4})} \right]^2 \cdot \cos^2 \left[\frac{k}{2} (2hN_r - \frac{pd}{2} N_r) \right] \quad (3.6)$$

где B_1 , как и выше включает постоянную из (3.3) и первый сомножитель из (3.4). Выражение (3.6) совпадает с (3.5) за исключением последнего множителя. Условие, при котором исчезает нулевой порядок дифракции, в данном случае будет :

$$\frac{k}{2} (2hN_r - \frac{pdN_r}{2}) = \pm \frac{\pi}{2} + \pi m \quad (m=0,1\dots)$$

При $p = 0$ имеем

$$khN_r = \pm \frac{\pi}{2} + \pi m \quad (m=0,1\dots) \quad (3.7)$$

и при $m = 0$

$$h = \frac{\lambda}{4N_r} \quad (3.8)$$

Данное соотношение упоминалось ранее в работах других авторов (см., например, [75]) для ДР аналогичного типа, однако подробности его вывода не были представлены. Оценим величину h для такой ДР в GaAs. Для $\lambda = 9\text{мкм}$ и $N_r = 3,3$, (как и выше), получаем $h = 0,68\text{ мкм}$. Таким образом, конструкция МФП с отражающей ДР оказывается значительно более мелкой и, как следствие, более простой в изготовлении.

Полученные выше соотношения позволяют проектировать ДР таким образом, чтобы обеспечить преобразование большей части падающего излучения в дифрагировавшие пучки, расходящиеся в стороны от исходного

направления. Такое рассеяние падающего на ДР потока позволяет повысить долю излучения, в которой электрический вектор имеет составляющую, перпендикулярную слоям СКЯ, а также увеличить длину оптического пути, что в совокупности должно привести к повышению квантовой эффективности в ФП СКЯ. Однако, следует отметить, что указанные преимущества, достигаемые с помощью ДР, не являются безусловными. Остановимся на данном утверждении более подробно.

Как устройство ввода излучения ДР является «резонансным» устройством, т.е. таким, которое обеспечивает максимальный эффект на определенной длине волны излучения. Как было показано выше, 0-й порядок дифракции исчезает в отражающей ДР на длине волны, определяемой соотношением (3.7), а наибольшее отклонение 1-го порядка дифракции достигается при $\lambda/(N_r d) \sim 1$. Обычно резонансные условия создаются для длины волны, соответствующей максимуму спектра фоточувствительности СКЯ. Это означает, что более коротковолновая часть спектра излучения будет дифрагировать под меньшими углами, 0-й порядок дифракции для нее будет отличен от 0 тем больше, чем короче длина волны. В этом случае не только будет падать квантовая эффективность ФП в коротковолновой части спектра, но и станет возрастать влияние фотоэлектрической взаимосвязи между ЧЭ или перекрестных наводок. Для иллюстрации последнего эффекта на рис.3.17. представлены два варианта конструкции ГФС: с толстой подложкой ФП и с тонкой [76]. Излучение, попадающее через подложку ФП, рассеивается на ДР в ЧЭ и далее, отражаясь от входной поверхности ФП, может попасть на соседние элементы матрицы (рис.3.17 а)). Если излучение попадает на ДР под углом θ , то направление распространения дифрагировавшего луча в первом порядке дифракции будет определяться соотношением [77]:

$$\sin \theta_{\text{dif}} = \lambda/d - \sin \theta \quad (3.9)$$

где θ_{dif} - угол дифракции падающего луча, λ - длина волны излучения в ЧЭ, т.е.

в GaAs, d – период дифракционной решетки.

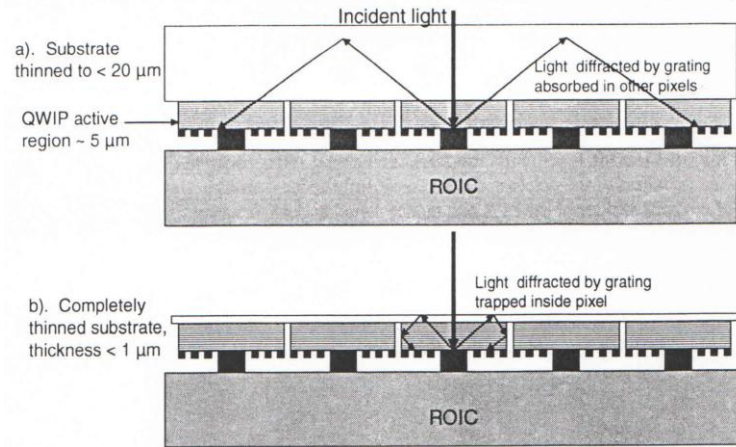


Рис. 3.17. Конструкция ГФС с тонкой и толстой подложкой

После дифракции луч достигнет входной поверхности ФП, отразится от нее и снова попадет на дифракционную решетку, но уже под углом θ_{dif} . Тогда, согласно (3.9), он испытает дифракцию на решетке и снова уйдет к входной поверхности, но уже под углом θ , т.е. под тем же углом, что и при попадании на вход ФП. Это означает, что данный луч уйдет из объема ФП, (испытая, правда, частичное отражение на выходе). Таким образом, входной пучок излучения после дифракции на решетке первого чувствительного элемента и отражения от входной поверхности может внести существенный вклад в сигнал лишь еще одного ЧЭ или части того же ЧЭ, после чего он уйдет из ФП. Область, в которой луч испытает повторную дифракцию, будет находиться от области первой дифракции на расстоянии $2T \tan \theta_{\text{dif}}$, где T – толщина подложки. В качестве примера рассмотрим следующий случай. Пусть луч падает на поверхность ФП под углом 15° (апертурный угол 30°). После преломления на поверхности он попадет на дифракционную решетку под углом $4,5^\circ$ и согласно (3.9) уйдет после дифракции к входной поверхности под углом $\theta_{\text{dif}} = 43^\circ$. При расчетах мы полагали, что $\lambda = 2,7$ мкм – длина волны излучения в арсениде

галлия, $d = 4$ мкм. Тогда при толщине подложки и активной части ФП СКЯ 5 мкм повторную дифракцию луч испытает на расстоянии 9.3 мкм, т.е. в пределах площади одного чувствительного элемента, что позволяет рассчитывать на получение пренебрежимо малой оптической взаимосвязи между элементами. При наличии же толстой подложки – около 400 мкм,- размытие изображения может составить около 0.7 мм.

Таким образом, для эффективного ввода излучения в ФП СКЯ необходимо, кроме собственно устройства ввода, предусмотреть еще и меры для уменьшения влияния перекрестных наводок, т.е. удалить или максимально уменьшить толщину подложки (рис. 3.17 б)).

Подавление перекрестных наводок посредством утонения подложки не решает, однако, проблемы селективного влияния ДР на спектр фоточувствительности ФП СКЯ, как отмечалось выше. Даже в случае подавления селективности чувствительности ФП СКЯ по отношению к поляризации, как это описано в главе 2, дифракция приводит к снижению оптического пути для коротковолновой части спектра излучения, т.е. к снижению квантовой эффективности ФП СКЯ в данной области. Поэтому более перспективной выглядит конструкция устройства ввода, не вызывающая дисперсии излучения. Один из вариантов такого устройства ввода описан, например, в [78], где ЧЭ сконструирован в виде призмы с отражающими поверхностями. Использование такого технического решения позволило достигнуть в ГФС на основе СКЯ квантовой эффективности в десятки %, чего пока не удастся достигнуть с помощью ДР. Дальнейшее совершенствование устройств ввода без дисперсии является одним из резервов повышения качества ФП СКЯ.

3.2.2.3. Устройство ввода без спектральной селекции

Ниже описан один из вариантов конструкций устройств ввода, позволяющий избежать селективности по отношению к длине волны и уменьшения объема активной области, которым сопровождается конструкция из [78]. Техническим результатом предлагаемой конструкции ФП СКЯ является повышение его квантовой эффективности во всем спектральном диапазоне фоточувствительности СКЯ. Следствием указанного результата является существенное улучшение пороговой чувствительности ФП.

Указанный технический результат достигается тем, что в ФП СКЯ, на поверхности верхнего контактного слоя формируют массив элементов, рассеивающих излучение, поступающее со стороны нижнего контактного слоя. При этом рассеивающие элементы имеют сферическую поверхность (выпуклую или вогнутую по отношению к активной области), покрытую слоем металла, отражающего излучение.

Описанный выше способ повышения квантовой эффективности ФП СКЯ сводится к увеличению длины оптического пути, который излучение проходит в объеме ФЧЭ. Такое увеличение достигается путем рассеяния входного излучения с помощью дифракционной решетки. При этом сам ФЧЭ представляет собой оптическую ловушку: излучение, попав в него, совершает несколько проходов между его границами, прежде чем поглотится или выйдет из него. Отражение от границ ФЧЭ обеспечивается тем, что они соприкасаются с воздухом (вакуумом), на границе с которым действует эффект полного внутреннего отражения. Однако рассеяние излучения может производиться не только с помощью дифракционной решетки. Значительно более эффективным средством рассеяния излучения может быть массив рассеивающих элементов в виде сферических поверхностей. Сущность предлагаемого технического решения поясняется с помощью чертежей.

На рис.3.18 а,б схематически представлен ход лучей входного излучения 1 внутри ФЧЭ с выпуклыми (а) и вогнутыми (б) рассеивающими элементами. Входное излучение 1 через нижний контактный слой 2 проходит через СКЯ 3, верхний контактный слой 4, в котором сформированы СРЭ 5, отражается от металлического покрытия 6 и далее распространяется внутри ФЧЭ.

Одним из главных преимуществ от использования сферических рассеивающих элементов (СРЭ) является их неселективность по отношению длине волны входного излучения: угол отражения от СРЭ будет одинаков для излучения с любой длиной волны.

При рассеянии на СРЭ доля излучения, способная, отразившись от него, выйти из ФЧЭ в обратном направлении, значительно меньше, чем это может быть в случае, когда ФЧЭ с ДР используется для детектирования излучения с относительно широким спектром. Нетрудно показать, что минимальная доля уходящего из ФЧЭ излучения P_{out} при первом отражении от СРЭ составляет $\sin^2(\varphi/2)$, где φ – угол полного внутреннего отражения на границе ФЧЭ – воздух. Для случая GaAs –воздух эта доля не превышает 0,024. В случае с ДР данный показатель может быть во много раз выше.

Характерные размеры СРЭ не должны быть обязательно сопоставимы с длиной волны излучения, как в случае ДР, и могут ее существенно превышать, что снижает требования к технологическим проектным нормам при изготовлении СРЭ. Определяющими геометрическими параметрами при выборе конструкции СРЭ являются радиус R кривизны СРЭ и допустимая минимальная глубина рельефа $t_{ср\acute{e}}$. Допустимость означает, что доля уходящего назад из ФЧЭ излучения не должна превышать некоторой заданной величины P_{out} . В этом случае связь между R и $t_{ср\acute{e}}$ с приемлемой точностью может быть описана соотношением: $R \leq K \cdot t_{ср\acute{e}} \cdot [1+(1- K^{-1})]^{1/2}$, где $K = P_{out} / \sin^2(\varphi/2)$. С другой стороны $t_{ср\acute{e}}$ не должна превышать толщины контактного слоя.

На рис.3.19 представлен один из способов формирования сферических рассеивающих элементов. В предлагаемой конструкции ФП на поверхности СКЯ 3 формируется массив цилиндрических или прямоугольных островков из фоторезиста 8. Затем пластина с СКЯ подвергается разогреву до температуры, при которой края островков фоторезиста начинают оплавляться, растекаются и образуют сплошную поверхность с возвышениями, имеющими форму поверхности, близкую к сферической. Сформированный таким образом рельеф из фоторезиста 9 подвергается ионному травлению в аргоне. В результате сформированный в фоторезисте рельеф 10 будет перенесен в задний контактный слой 4 СКЯ и порыв отражающим металлом 6. Данный способ формирования СРЭ был успешно применен при формировании массива микролинз в различных полупроводниковых и диэлектрических материалах [79], в том числе в GaAs [80]. Аналогичным образом может быть сформирован и массив СРЭ с вогнутыми поверхностями. Для этого маска из фоторезиста должна представлять из себя массив из цилиндрических отверстий. После разогрева и оплавления указанные отверстия превратятся в углубления с поверхностью, близкой к сферической. Далее ионное травление перенесет полученный рельеф в контактный слой из GaAs.

Следует отметить, что требование сферичности поверхности рассеивающего элемента в рассматриваемом техническом решении не является строгим, поскольку в нем не преследуется цель фокусировки потока излучения с минимальными искажениями. Главная цель – это изменение направления распространения излучения, вошедшего в ФЧЭ, таким образом, чтобы максимально возможная доля его, независимо от длины волны, испытала максимальное количество проходов внутри ФЧЭ до полного поглощения. Поэтому реальная форма поверхности СРЭ может несколько отличаться от сферической, а допустимые отклонения определяются экспериментально и

могут подбираться путем отработки технологии формирования СРЭ.

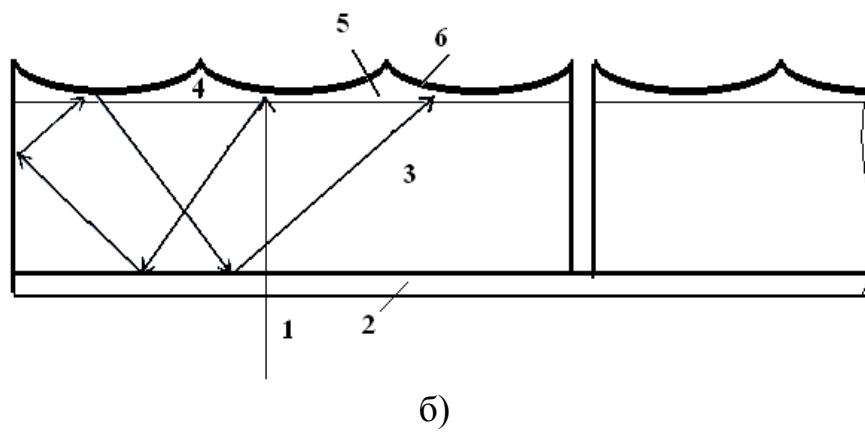
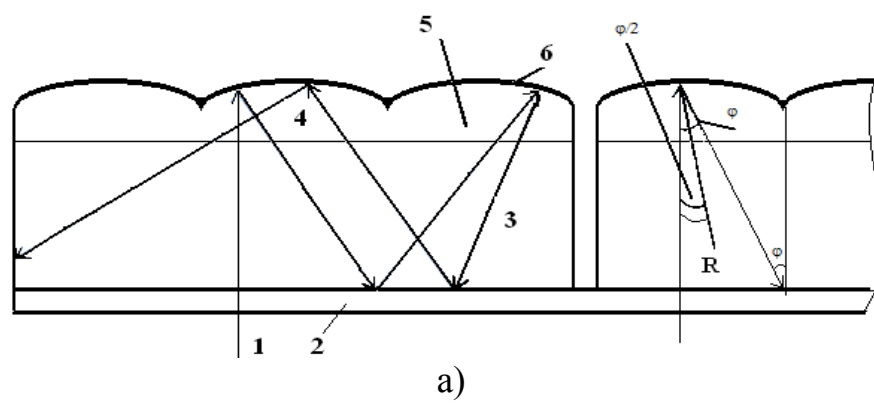


Рис.3.18 а),б)

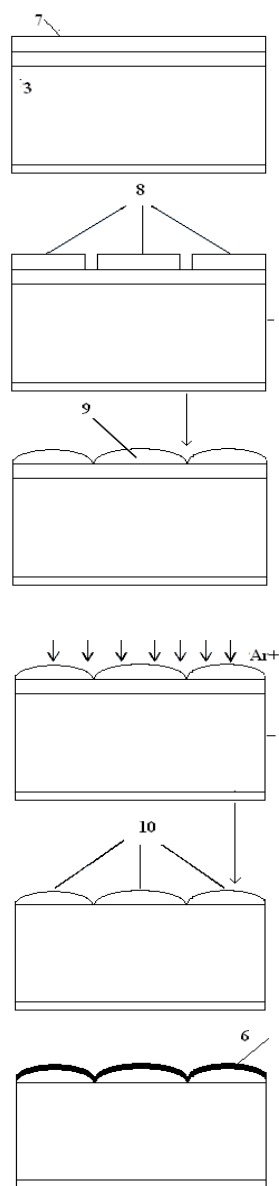


Рис.3.19

3.2.2.4. Матричные ГФС с кадровым накоплением

Матричные ГФС с кадровым накоплением (КН ГФС) наиболее широко используются сегодня в тепловизионной аппаратуре. Конструктивно КН ГФС, как правило, устроены по следующей схеме (см. рис.1.4): двумерный МФП, соединенный электрически и механически с матричным кремниевым мультиплексором (МП) того же формата посредством индиевых столбиков,

образует с последним ГФС. При этом МФП представляет собой матрицу ЧЭ, имеющих один общий контакт, через который подается напряжение смещения на все ЧЭ одновременно. Таким образом, в любой момент сигнальные заряды копятся одновременно во всех ячейках МП, что, в отличие от ХУ ГФС, позволяет более эффективно использовать время кадра. При формировании ЧЭ в таких МФП в основном используются те же технологические операции, что и при создании ХУ ГФС, и были описаны выше. Пожалуй, главным отличием КН ГФС от ХУ ГФС в технологическом отношении являются процесс flip-chip сборки, рассмотренный выше, а также процессы заполнения (underfill) ГФС клеем и утонения подложки МФП. Первый из указанных процессов позволяет обеспечить электрическую связь между МФП и МП и отчасти механическую прочность ГФС. Второй процесс обеспечивает механическую прочность ГФС после утонения подложки, которое, в свою очередь, обеспечивает эластичность МФП при термоциклировании ГФС и снижает степень влияния оптических перекрестных наводок, обсуждение которых будет проведено ниже.

Как уже отмечалось, необходимыми технологическими условиями для создания КН ГФС являются наличие: а) технологии и оборудования для flip-chip сборки; б) технологии формирования индиевых столбиков заданной геометрии на МФП и МП; в) технологии заполнения ГФС клеем; г) технологии и оборудования для утонения подложки МФП.

Указанные условия удалось частично (по п.п. а) и б)) обеспечить в начале 2005г., что позволило успешно завершить работы по одному из госконтрактов, в рамках которого проводились исследования по созданию образцов нового поколения одно- и двухспектральных унифицированных фотоприемных модулей (ФПМ) на основе матричных структур с квантовыми ямами.

При этом односпектральные ФПМ коротковолнового типа должны были обладать фоточувствительностью в диапазоне: 3-5 мкм, а длинноволнового - в диапазоне 8-12 мкм. Двухспектральные ФПМ должны были обладать фоточувствительностью одновременно в двух указанных диапазонах. Формат ГФС в ФПМ всех трех типов -256x256 элементов с шагом 35 мкм.

В отличие от ХУ ГФС в КН ГФС мультиплексор является значительно более сложным прибором, поскольку содержит в одном кристалле и коммутатор строк матрицы, и накопительную секцию с числом ячеек, равным формату ГФС. Для всех трех типов ГФС использовался матричный МП производства компании ООО «РТК Импекс». МП изготавливался по КМОП технологии с проектными нормами 0,8 мкм. МП имел 4 аналоговых выхода и обеспечивал частоту выноса сигналов по одному выходу до 10 МГц. Рассеиваемая мощность МП составляла не более 100 мВт. Собственный шум, приведенный к накопительной ячейке не превышал 800 е⁻. Следует отметить некоторое конструктивное и функциональное различие МП для односпектральных и двухспектральных ГФС: в МП второго типа смещение подавалось на КВ и ДВ секции отдельно, о чем более подробно изложено ниже.

Среди разнообразных подходов к созданию двух- (и более) спектральных ГФС на сегодня наиболее распространенный из них предполагает выращивание СКЯ, содержащую расположенные один над другим наборы КЯ, обеспечивающие чувствительность в заданных областях спектра. Далее из такой СКЯ формируется массив ЧЭ, в зависимости от конструкции которых возможен тот или иной способ формирования изображения одной и той же сцены в двух и более спектральных диапазонах. Из наиболее часто публикуемых результатов по ДС ГФС можно выделить две конструкции ЧЭ. Более сложная из них (см., например [12,27]) представляет собой 3-х электродный ЧЭ, в котором на его поверхность (на один уровень) выведены

3 контакта, соединенных с верхним нижним и промежуточным контактными слоями СКЯ (рис.3.20).

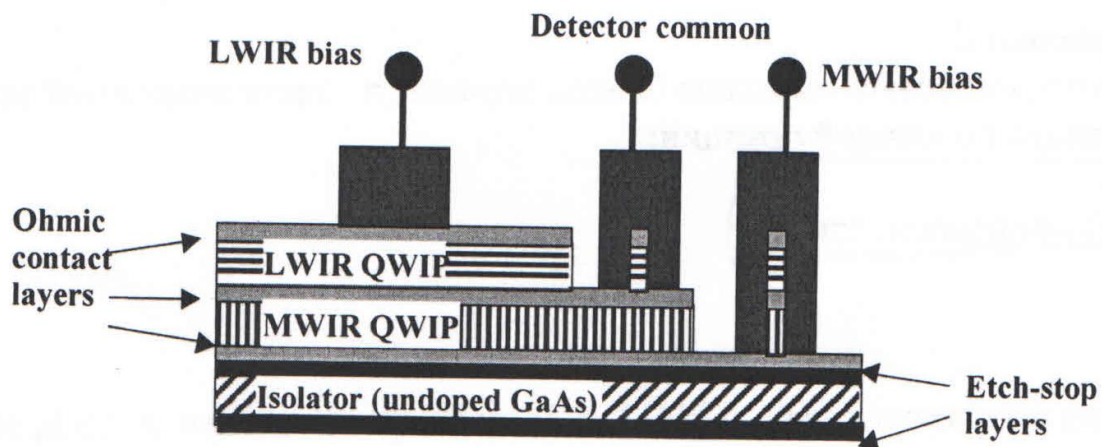


Рис. 3.20. Схематическое изображение двухспектрального ЧЭ

Преимуществом такой конструкции является возможность получения изображений в обоих спектральных диапазонах без потери разрешающей способности: оба массива ЧЭ практически совпадают геометрически. К недостаткам следует отнести технологические сложности, возникающие при формировании ЧЭ такой топологии. Поэтому в настоящей работе был сделан выбор в пользу второй, более простой с технологической точки зрения конструкции ЧЭ, хотя и имеющей потери в разрешающей способности (см., например, [81]). Конструкция МФП, состоящая из таких ЧЭ элементов схематически изображена на рис. 3.21. В представленной конструкции ЧЭ, обеспечивающие чувствительность в одном из спектральных диапазонов, объединены в строки. На рис.3.21 строки направлены перпендикулярно плоскости рисунка. В пределах данной строки ЧЭ одинаковы, а в соседних строках они различаются по конструкции. Одной из важнейших особенностей представленной конструкции является последовательное включение обеих секций СКЯ в цепи электрического питания ЧЭ в строках обоих типов.

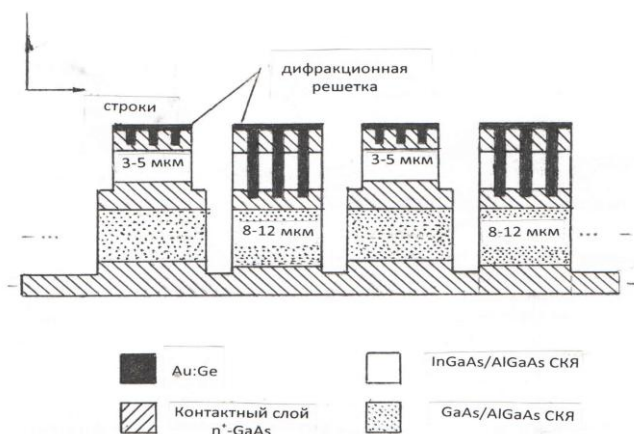


Рис. 3.21. Схематическое изображение двухспектрального МФП с ЧЭ чересстрочной конструкции.

При этом для обеспечения чувствительности в КВ диапазоне напряжение смещения прикладывается к верхнему и нижнему контактному слоям. За счет того, что КВ секция имеет сопротивление во много раз больше, чем ДВ секция (см. рис.2.12 и рис.2.23), все приложенное напряжение падает на ней. В результате изменение тока через СКЯ под действием излучения будет происходить в основном за счет изменения сопротивления КВ секции, что и обеспечивает фоточувствительность в КВ диапазоне. Для обеспечения чувствительности в ДВ диапазоне КВ секция в ЧЭ закорачивается посредством травления сквозь нее отверстий и заполнения их металлом (на рис.3.21 указанные отверстия, заполненные металлом, изображены длинными темными полосами, идущими от верхнего контакта вниз). В таком ЧЭ все напряжение смещения будет приложено только к ДВ секции, обеспечивая чувствительность в соответствующем диапазоне. Отметим, что в отличие от предыдущей конструкции в данном случае ДР, необходимая для эффективного ввода излучения в ЧЭ, может быть сконструирована для каждой группы ЧЭ отдельно. Так для КВ группы ЧЭ в соответствии с (3.8) для $\lambda = 4,5$ мкм получим глубину ДР $h = 0,34$ мкм. Для ДВ группы в соответствии с (3.8) при $\lambda = 9$ мкм глубина h должна быть $0,68$ мкм. Однако, учитывая, что в качестве закорачивающих

каналов можно использовать ДР с отверстиями, заполненными металлом, резонно использовать в ней следующий порядок интерференции отраженных потоков излучения, т.е. для определения глубины h использовать формулу (3.7) с $m=1$. Тогда получим, что $h = 3\lambda/4N_r = 2,04$ мкм. Такая глубина каналов ДР позволяет им достигать среднего контактного слоя, находящегося примерно на такой же глубине при количестве периодов ДВ секции СКЯ, равном 25 (см. таблицу 2.3). Таким образом, можно оптимизировать конструкции ЧЭ, обеспечивающих чувствительность в различных спектральных диапазонах двухспектрального МФП. Аналогично можно поступить и при оптимизации периода ДР. Однако в случае КВ ЧЭ оптимальный период должен быть около 1,4 мкм, а характерный размер рельефа около 0,7 мкм. Обеспечение воспроизводимости топологии с указанными характерными размерами при контактной фотолитографии является довольно сложной задачей. Поэтому в нашей практике пришлось отказаться от достижения оптимального периода ДР и ограничиться реально достижимым – 4 мкм для обоих типов ЧЭ.

При изготовлении ДС МФП использовались те же технологические процессы, что и при изготовлении односпектральных аналогов. При этом добавлялась еще одна фотолитография, связанная с необходимостью отдельного вытравливания ДР для каждой из двух групп ЧЭ. Как отмечалось при описании МП для ДС ГФС, на строки МФП, обеспечивающие чувствительность в различных диапазонах, напряжение смещения подавалось отдельно, поскольку оптимальные рабочие режимы для ЧЭ разных групп обеспечивались при различных его значениях. Так оптимальное напряжение для ДВ группы ЧЭ приводило к снижению чувствительности в КВ группе, а оптимальное напряжение для КВ группы могло приводить избыточным токам утечки в ЧЭ ДВ группы и, как следствие, к переполнению МП. Чтобы избежать указанных проблем, нижние контакты соседних строк в МФП были электрически

разделены. В более поздних конструкциях ДС ГФС разделение нижнего контакта не применялось в связи с использованием МП с функцией антиблюминга. Схематическое изображение чересстрочной ДС ГФС представлено на рис.3.22.



Рис.3.22.Схематическое изображение двухспектральной ГФС с ЧЭ чересстрочной конструкции.

На рис.3.23 и рис.3.24 представлены изображения фрагментов односпектрального и двухспектрального МФП, полученные при разном увеличении, а на рис.3.25. изображение 50 мм пластины с МФП.

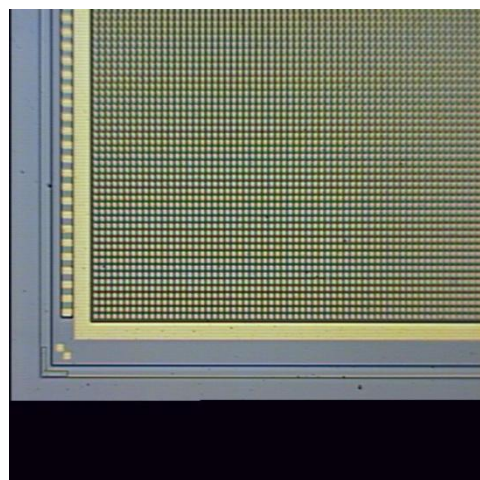
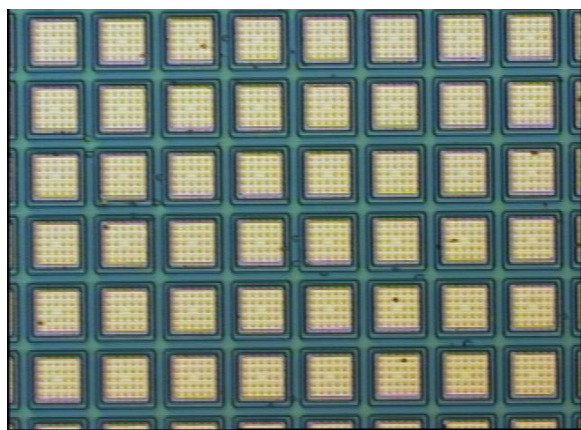


Рис. 3.23. Изображения фрагментов односпектрального МФП, полученные при разном увеличении.

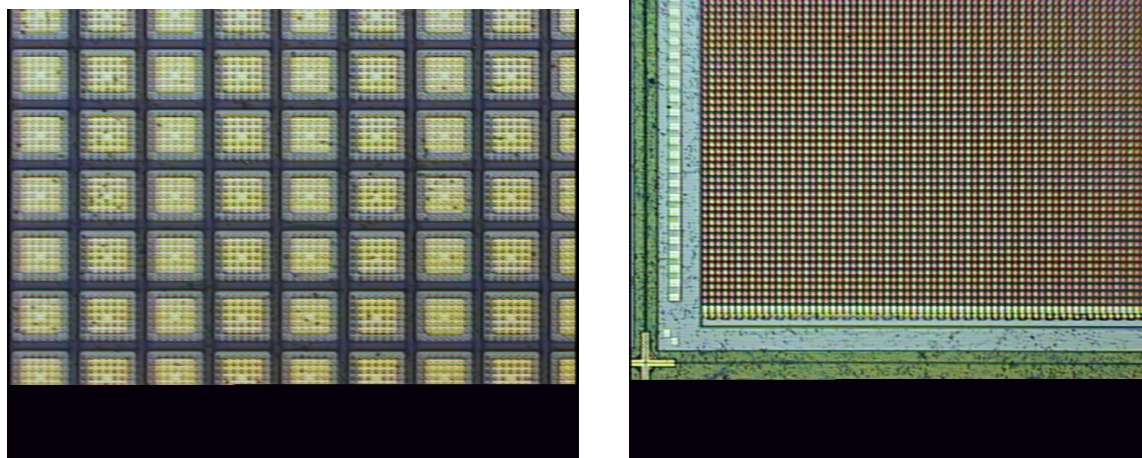


Рис.3.24.Изображения фрагментов двухспектрального МФП, полученные при разном увеличении.

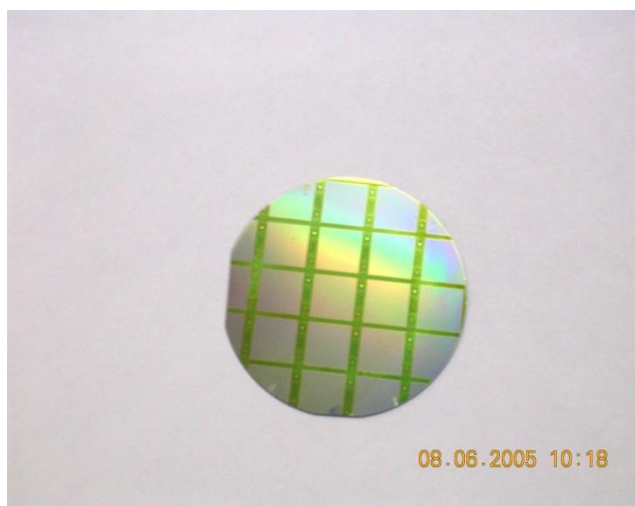


Рис.3.25. Изображение 50 мм пластины с МФП.

На рис.3.26 представлены МФП и МП перед flip-chip сборкой. После flip-chip-сборки ГФС размещались на поликоровой плате, которая затем крепилась на посадочном месте в корпусе- криостате. На рис. 3.27 представлена ГФС, размещенная в корпусе - криостате макета ФПУ.

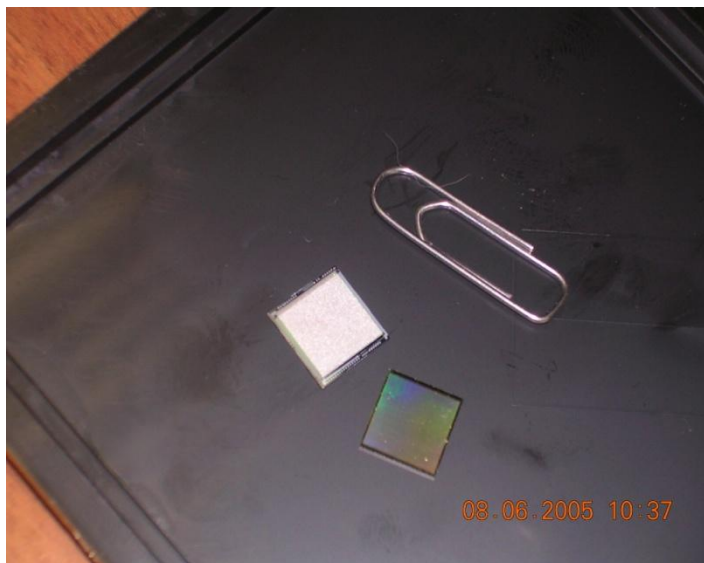


Рис.3.26. МФП и МП перед flip-chip сборкой



Рис. 3.27. ГФС в корпусе - криостате макета ФПУ

Представленные результаты были опубликованы в [55]. Дальнейшее совершенствование конструкций КН ГФС проводилось в рамках нескольких НИР и ОКР. Одним из главных конструктивных отличий новых ГФС явилось увеличения формата до 320x256 элементов и уменьшения шага ЧЭ до 30 мкм. При изготовлении таких МФП использовались в основном те же технологические процессы, что и в случае, описанном выше. Вместе с тем, в отличие от предыдущей версии МФП в новой конструкции контактные

площадки покрывались тонким ≈ 3 мкм,- слоем индия, что улучшало прочность соединения МФП с МП при flip-chip – сборке.

Другим важным конструктивным отличием новых ГФС стало использование МП зарубежного производства типа ISC9705, производства компании Indigo Systems (США). Причиной такого выбора стало с одной стороны требование заказчика указанных работ, а с другой стороны указанная микросхема позволяла приобрести опыт работы с современными зарубежными образцами электронной техники. В частности указанный МП имеет формат 320x256 пикселей, что соответствует международному стандарту и упрощает ее стыковку с периферийными устройствами и программными средствами. Поэтому отработка навыков работы с таким МП и предварительной электроники для нее были среди основных задач указанных НИР и ОКР. Следует также отметить, что ISC 9705 в середине 2000-х годов была одним из лучших в своем классе мультиплексором. Эта интегральная микросхема разработана для гибридизации с р-на-п детекторов, таких как InSb, гетеропереходов типа HgCdTe, QWIP и InGaAs. Матрица предназначена для поддержки широкого набора систем благодаря гибкости и специальным режимам работы. ISC 9705 использует гибкую, программируемую, многоступенчатую сообщающуюся архитектуру, что делает ее подходящей для применений, простирающихся от портативных ИК видеокамер до высокоскоростных промышленных ИК систем.

ISC 9705 изготовлена по технологии 0,6 мкм с одним поликремнием, двумя металлами, при которой используются высокочастотные КМОП транзисторы. Отдельная ячейка имеет размер 30x30 мкм и емкость входного накопителя $1,8 \times 10^7$ е. Прибор разработан для использования в температурном диапазоне 40-300К. Ниже представлены основные технические данные на ISC 9705:

1. Формат - 320 x 256 пикселей
2. Шаг пикселей – 30 мкм.
3. Количество выходов - 4
3. Скорость считывания сигналов – до 10 МГц (Мегапикселей в секунду).
4. Максимальная частота кадров при выводе сигналов:
 - на 4 выхода - 340 кадров/сек.
 - на 2 выхода - 200 кадров/сек
 - на 1 выход - 110 кадров/сек.
5. Уровень выходного сигнала - 3В.
6. Уровень выходного шума:
 - при усилении 1 - 130 мкВ;
 - при усилении 4 - 340 мкВ.
7. Коэффициент усиления – коэффициент преобразования:

1	0,19 мкВ/е
1,33	0,25 мкВ/е
2	0,38 мкВ/е
4	0,65 мкВ/е

8. Интегрирующая емкость в ячейке:

- 0,3 пФ или $1,8 \times 10^7 e^-$

9. Входной ток: 0,02 - 10 нА.

10. Встроенный датчик температуры

11. Рассеиваемая мощность – 120 мВт, не более (при работе на 4 выхода).

12. Функции-

- возможность работы в стандартах PAL и NTSC;
- возможность работы в командном режиме (установка произвольных

частоты и времени кадров)

- скимминг;

- антиблюминг;
- цифровой ввод установок режимов работы;
- функция окна .

Как уже отмечалось, благодаря наличию в данном МП функции антиблюминга удалось упростить конструкцию ДС МФП – исключить из нее разделение нижнего контактного слоя на строки. Результаты по созданию и исследованию ГФС нового формата были опубликованы в [6,59] и будут более подробно обсуждаться в главе 4.

3.3. ГФС форматов 384x288 и 640x512 элементов с шагом 20 мкм

Описанные выше конструкции ГФС отражают определенный этап развития направления разработки приборов данного класса, который можно охарактеризовать как этап преодоления технологического отставания от мировых достижений. Результаты последних наших разработок в данной области, изложенные в данном разделе, показывают, что указанное отставание в значительной степени преодолено.

В 2013-2016г.г. в АО «ЦНИИ «Циклон» был выполнен комплекс работ, направленных, в том числе, на разработку ФПУ на основе СКЯ. На начальной стадии указанного комплекса работ предполагалась разработка ГФС. Результаты данной разработки представлены ниже.

3.3.1 Основные технические требования к ГФС с малым шагом

Согласно техническим требованиям на ГФС необходимо было разработать матрицы двух форматов: 384x288 и 640x512 элементов с шагом 20 мкм. При этом конструкция ГФС должна была содержать фотоприемную секцию в виде матрицы чувствительных элементов, соединенной посредством индиевых столбиков с кремниевым мультиплексором (МП).

Значения фотоэлектрических параметров для ГФС обоих типов должны были соответствовать нормам, приведенным в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значение фотоэлектрических параметров ГФС

Наименование параметра	Значение параметра
Формат ГФС (число чувствительных элементов)	384x288 (формат 1) 640x512 (формат 2)
Шаг чувствительных элементов, не более, мкм	20
Область спектральной чувствительности (по уровню 0,5 от максимума), мкм	7,5-9
Длина волны максимума спектральной чувствительности, мкм	8,6±0,2
Эквивалентная шуму разность температур (NEΔT) при $F/2,5$; $T_{\Phi} = 300$ К ; $F_K = 50$ Гц, не более, град К	0,025
Номинальная частота кадров, Гц	50
Напряжение выходного сигнала, В	1,5±1
Динамический диапазон, дБ	70
Рабочая температура матрицы чувствительных элементов, °С	-45 ÷ +50
Максимальная частота кадров при работе в полном окне на один выход, не менее, Гц	50
Рабочая температура, град. К, не ниже	65

Количество сигнальных выходов ГФС, не более – 4.

Количество внешних контактных площадок ГФС – не более 28.

Указанные конструктивные и фотоэлектрические требования обусловили необходимость внесения изменений и в технологию изготовления ГФС. Одним из важнейших изменений стало использование при выращивании СКЯ более подходящей для этих целей МЛЭ. Для выполнения данной операции было привлечено ЗАО «Светлана-Рост», обладающее сегодня технологией МЛЭ мирового уровня. Современный парк технологического оборудования позволил

там же изготавливать и матрицы фоточувствительных элементов с заданными геометрическими характеристиками.

Уменьшение шага чувствительных элементов до 20 мкм привело также к повышению требований к качеству индиевых столбиков и точности flip-chip-сборки. Увеличение формата фотоприемников привело к необходимости введения таких операций как заполнение промежутка между ФП и МП клеем и утонение подложки ФП, которые не использовались нами ранее, но которые достаточно давно применяются передовыми компаниями разработчиками QWIP ФПУ.

Следует также отметить, что в составе ГФС использовались мультиплексоры разработки ОАО «Интеграл», являвшиеся функциональными аналогами приборов компании FLIR.

Ниже представлено описание особенностей новых конструкций ГФС и технологий их изготовления.

3.3.2 Конструктивные и технологические особенности ГФС с малым шагом.

Шаг пикселей в фотоприемной матрице (ФПМ) 20 мкм обусловил необходимость отработки метода их пространственного разделения зазорами шириной не более 2 мкм. В результате потребовалась отработка процесса плазмохимического травления в СКЯ канавок шириной 2 мкм и глубиной до 3,2 мкм. Указанный процесс был также использован для формирования на поверхности пикселей дифракционных решеток с шагом и глубиной лунок 3 мкм и 0,7 мкм соответственно. Данный процесс был разработан в ЗАО «Светлана-Рост».

Использованные в рамках данной работы кремниевые мультиплексоры представляет собой функциональные аналоги мультиплексоров ISC0208 и ISC0402, ("Flir Systems", США) форматов 384×288 и 640×512 соответственно. Выбор указанных аналогов для разработки мультиплексоров обусловлен следующими причинами.

Мультиплексоры ISC0208 и ISC0402 разрабатывались с ориентацией на использование в сочетании с фотоприемниками на основе СКЯ. Конструкция входной ячейки указанных мультиплексоров позволяет вводить электрический сигнал из ФЧЭ методом прямой инъекции, что обуславливает ее относительную простоту. Архитектура мультиплексоров обеспечивает реализацию основных режимов функционирования ГФС с заданными характеристиками, что было многократно продемонстрировано при использовании их в составе различных тепловизионных приборов. Следует также отметить, что указанные мультиплексоры являются наиболее продаваемыми в мире среди аналогов подобного класса.

Согласно ТЗ на каждый мультиплексор содержит следующие основные блоки:

- матрица накопительных ячеек форматов 384×288 и 640×512 ;
- цифро-аналоговый преобразователь управления смещением детектора;
- цифро-аналоговый преобразователь подстройки мощности;
- регистр команд;
- блок управления;
- блок усилителей;
- температурный датчик.

Мультиплексоры выполняют следующие основные функции:

- режим работы упрощенный (по умолчанию) или – командный;
- четыре коэффициента усиления;
- два режима интеграции (во время считывания и после считывания данных) с регулируемым временем интеграции;
- накопительная ячейка с прямой инъекцией;
- считывание видеоданных на один, два или четыре выхода;

- изменение направления считывания видеоданных по горизонтали и вертикали;
- оконный режим считывания с регулируемым положением и размером;
- вычитание из накопленного видеосигнала регулируемой постоянной составляющей.

Мультиплексоры соответствовали следующим конструктивным требованиям:

- шаг внутренних контактных площадок для подключения фоточувствительных элементов – 20 мкм; размер контактных площадок для монтажа фоточувствительных элементов – 8×8 мкм;
- накопительная вместимость интегрирующей емкости – не менее 10×10^6 электронов;
- количество дефектных накопительных ячеек – не более 0,05%. На рис. 3.28 представлена блок- схема мультиплексора формата 640×512 элементов.

Уменьшение размера пикселя привело к необходимости изменения размеров индиевых столбиков как на ФПМ, так и на МП. В ЗАО «Светлана-Рост» была разработана технология формирования столбиков высотой 5 мкм и размером основания не более 10 мкм. Уменьшение размеров пикселей повлекло за собой также ужесточение требований к точности flip-chip сборки, особенно в части обеспечения плоскопараллельности стыкуемых компонентов. Наиболее приемлемой для решения указанных задач оказалась сборочная установка FC 300 производства компании SET (Франция), которая имелась в наличии в Зеленоградском инновационно-технологическом центре (ЗИТЦ). Следует отметить, что режимы сборки, описанные выше (раздел 3.1.5) применительно к установке M9A, с несущественными изменениями использовались и при сборке на FC 300. Так подготовка столбиков перед сборкой также проводилась путем обработки в растворе щавелевой кислоты.

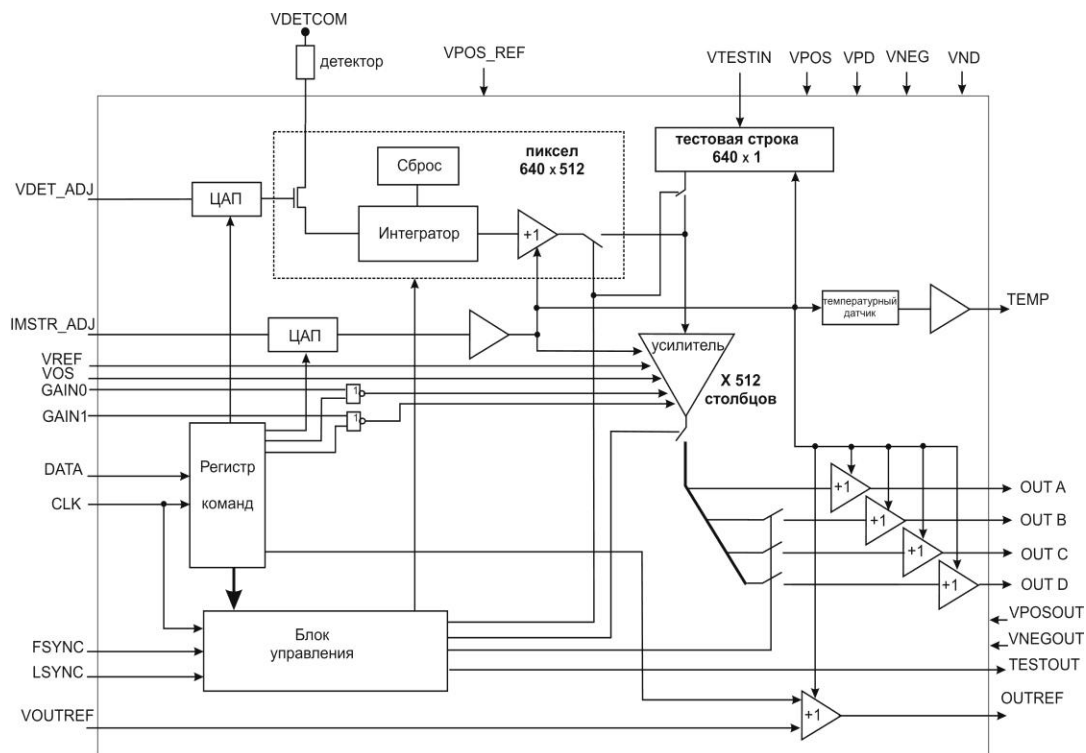


Рис.3.28 - Блок-схема матричного мультиплексора формата 640×512 .

Режимы сборки были следующие:

- механическая нагрузка – 7-8 кг для формата 384x288 элементов;
- 20-22 кг для формата 640x512 элементов;
- температура стыкуемых частей – 140°C ;
- время приложения нагрузки - 5 минут.

После снятия механической нагрузки образцы нагревались до 180°C и далее охлаждались до комнатной температуры. Точность сборки, обеспечиваемая установкой FC 300, позволяла обходиться без дополнительного сжатия после разворота ГФС на 180° . Основными факторами, определявшими дефектность ГФС после сборки, были: неоднородность высоты индиевых столбиков и наличие инородных включений на поверхностях собираемых компонентов. Последний фактор был связан с крошками кремния и арсенида галлия, которые после резки кристаллов застревали между индиевыми столбиками и не всегда могли быть обнаружены и удалены.

Как отмечалось выше, в ГФС новой конструкции были применены две, не применявшиеся ранее, технологических операции: заполнение промежутка между ФП и МП клеем и утонение подложки ФП. Необходимость введения указанных операций была обусловлена следующими причинами. Увеличение формата ГФС приводит к тому, что разница коэффициентов теплового расширения материалов ФП и МП – GaAs и Si, - вызывает при охлаждении ГФС большие механические напряжения в них и, как следствие, к разрушению наиболее хрупкого из них (обычно это происходит с ФП). Чтобы обойти указанную проблему, зарубежные разработчики производят утонение подложки ФП до толщины 30-50 мкм, превращая, таким образом, ее в мембрану, которая может растягиваться под воздействием механических напряжений, не разрушаясь. С другой стороны уменьшение толщины подложки снижает степень влияния перекрестных засветок (см. рис. 3.17),, повышая тем самым разрешающую способность ГФС. Вместе с тем ФП с утоненной подложкой становится менее прочным по отношению к напряжениям, перпендикулярным его плоскости. Для повышения прочности ФП промежутки между ним и МП заполняют клеем (underfill), как правило, на эпоксидной основе. Коротко остановимся на деталях процессов заполнения клеем и утонения подложки.

Заполнение клеем проводят непосредственно после завершения flip-chip сборки и проверки собранной ГФС на работоспособность. Анализ зарубежной и отечественной научно-технической литературы позволил выбрать подходящий для указанных целей тип клея: Epotek 301-2 производства компании Epoxy Technology (США). Технология подготовки клея, его введения в ГФС и сушки в общих чертах состояла в следующем. Компоненты клея в соотношении 100 вес.ч. : 30 вес.ч. для основы и отвердителя соответственно перемешивались, и полученная смесь подвергалась вакуумированию при температуре 50⁰С в течение 5 минут путем откачки мембранным форвакуумным насосом. Далее клей с помощью пластмассовой иглы наносился в виде капли на край ГФС

(см.рис.3.29, Т. Bria, These de doctorat, Paris, 2012.), и размещался в вакуумируемом шкафу при температуре 50° - 60°C . Подогрев уменьшал вязкость клея и увеличивал скорость его проникновения в ГФС.

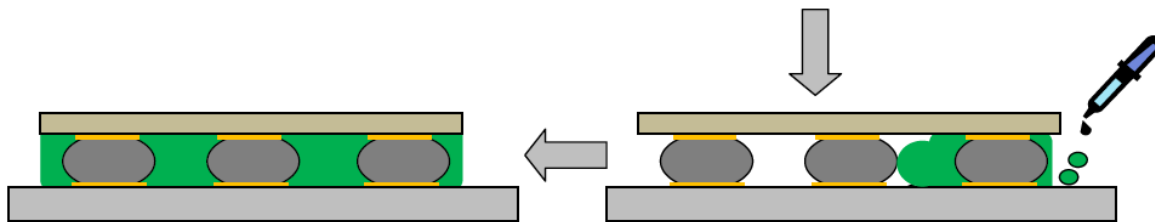


Рис.3.29.Принцип заполнения ГФС клеем

Вакуумирование позволяло избежать образования пузырей в заполняемом промежутке. В указанных режимах заполнение обычно заканчивалось за 20 - 30 минут в зависимости от размера ГФС. Сушка клея производилась при комнатной температуре в течение 2-х суток. Собранный указанным образом ГФС подвергалась далее процедуре утонения подложки фотоприемной секции.

Для выполнения операции утонения использовалась установка шлифовки и полировки Multiprep (рис.3.30) производства компании Allied (США). Данная установка позволяет производить прецизионное утонение полупроводниковых кристаллов размером порядка 1см^2 и менее до толщин в несколько десятков микрон.

Процесс подготовки образца начинается с покрытия периферии мультиплексора ГФС фоторезистом для защиты контактных площадок от повреждения во время шлифовки. После сушки фоторезиста ГФС размещают на планшайбе и закрепляют на ней с помощью расплавленного воска. Далее планшайбу закрепляют в шлифовальной машине Multiprep и отшлифовывают ФП в соответствии с рецептом, рекомендованным компанией Allied High Tech для арсенида галлия. Типичный регламент шлифовки выглядит следующим образом:



Рис. 3.30 - Установка шлифовки и полировки Multiprep.

- с помощью алмазной пленки с размером абразива 6мкм сошлифовывают слой 470мкм;
- с помощью алмазной суспензии с размером абразива 3мкм сошлифовывают слой 3 мкм;
- с помощью алмазной суспензии с размером абразива 1 мкм сошлифовывают слой 50мкм;
- с помощью суспензии из оксида кремния с размером абразива 0.05мкм производят финальную полировку.

При начальной толщине ФП ~600 мкм, конечная толщина составляет ~30 мкм. По окончании шлифовки/полировки план-шайбу разогревают на электрической плите до 60° С и снимают с нее ГФС, отмывают последнюю от воска в бензине-растворителе, нагретом до 50°С' и затем окончательно отмывают с помощью органического мыла и сжатого воздуха.

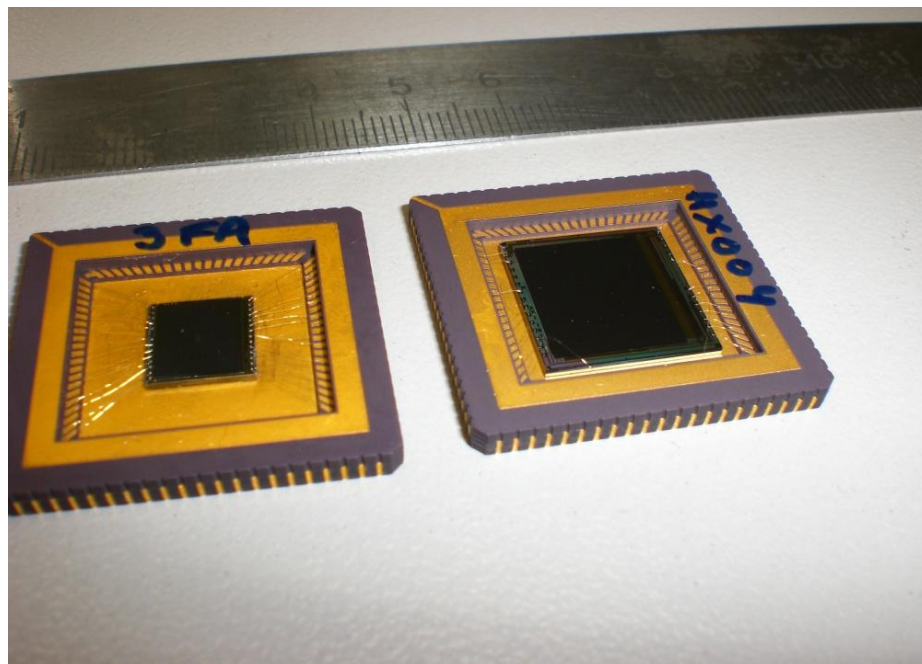


Рис.3.31 - Фото ГФС форматов 384x288 и 640x512 в корпусах LCC 84

После проведения указанных операций ГФС крепят в корпусе LCC84 и далее подвергают испытаниям в разборном корпусе-криостате. ГФС обоих форматов в корпусах LCC84 представлены на рис.3.31.

Выводы к Главе 3:

1. Разработан комплекс технологических операций, позволяющий создавать многоэлементные фотоприемники на основе InGaAs/AlGaAs СКЯ различных конструкций. Указанный технологический комплекс включает в себя процессы формирования ЧЭ, их металлизации и пассивации, а также процессы формирования индиевых столбиков для проведения flip-chip сборки линейных и матричных ГФС, процессы заполнения пространства между компонентами ГФС и утонения подложки МФП.

2. Разработаны конструкции линейных и матричных ГФС с ХУ адресацией. В процессе создания указанных приборов проведена отработка

основных технологических операций по п.1, а также конструктивных и схемотехнических решений.

3. Получены аналитические соотношения, позволяющие производить расчет конструкций дифракционных решеток для ввода излучения в МФП. Рассмотрены физические процессы, оказывающие негативное влияние на характеристики МФП, связанное с использованием дифракционных решеток. Предложена конструкция устройства ввода излучения, в котором отсутствует спектральная селективность.

4. Разработаны конструкции матричных ГФС с кадровым накоплением формата до 640 x 512 элементов с шагом 20 мкм.

5. Впервые в РФ разработана двухспектральная матричная ГФС формата 320x256 элементов, обладающая фоточувствительностью в диапазонах 3-5 мкм и 8-12 мкм.

ГЛАВА 4 . ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ГФС НА ОСНОВЕ СКЯ

В данной главе представлены результаты исследования ГФС, конструкции которых были описаны выше [6,55,59]. Подробность изложения результатов определялась актуальностью приборов той или иной конструкции. В связи с тем, что в настоящее время наибольший интерес для разработчиков ИК систем представляют «смотрящие» матрицы, основное внимание в представленных материалах было уделено матричным ГФС с кадровым накоплением. Кроме того, приборы указанной конструкции в наибольшей степени демонстрируют возможности технологий СКЯ. Подробно рассмотрены вопросы, касающиеся методик и оборудования для измерений, имеющих важное значение при создании ГФС практически любой конструкции. Особое внимание уделено последним результатам, касающимся исследований ГФС формата 640x512 элементов с шагом 20 мкм. Указанные изделия по своим конструктивным и фотоэлектрическим характеристикам соответствуют мировому уровню разработок приборов данного класса .

4.1. Измерительное оборудование и методики измерений

Обычно при исследованиях ГФС как двумерного формирователя сигналов изображений основной акцент делается на измерениях пороговых характеристик чувствительности: обнаружительной способности D^* , пороговой облученности $E_{\text{пор.}}$, эквивалентной шуму разности температур $NE\Delta T$, - достижимых при тех или иных режимах эксплуатации ГФС: рабочей температуре, времени интегрирования, напряжении смещения на фотоприемной матрице и т.д. Другими важными характеристиками, определяющими качество ГФС, являются неоднородность чувствительности по площади ГФС и количество дефектов в ней. Поэтому стенд для измерения указанных

характеристик в самом скромном составе должен включать в себя: аттестованный источник излучения, (как правило, это макет абсолютно черного тела (АЧТ)); устройство для криостатирования ГФС, например, разборный криостат, охлаждаемый жидким азотом при откачке его паров; электронный блок управления (ЭБУ) ГФС, совмещенный с персональным компьютером (РС).

Наряду с измерениями указанных характеристик ГФС в процессе изготовления подвергаются многократным проверкам функционирования, которые являются элементами межоперационного контроля. Типичный состав контрольных измерений выглядит следующим образом.

Первое измерение – включение мультиплексоров на зондовой установке непосредственно перед flip-chip сборкой. Второе – включение ГФС на зондовой установке сразу после flip-chip сборки. Третье – после размещения и сборки ГФС на технологическом носителе. Четвертое - после размещения технологического носителя с ГФС в разборном заливном криостате. На ранних стадиях исследований перед размещением в разборном криостате ГФС монтировалась на поликоровой плате с токоведущими дорожками с помощью криогенностойкого теплопроводящего клея типа «Криосил» (BT-10), а ее внешние контактные площадки (на МП) соединялись алюминиевой проволокой толщиной 30 мкм с токоведущими дорожками. Далее плата с ГФС закреплялась на технологическом носителе в виде медной пластины, на которой были смонтированы текстолитовые платы, соединяемые с одной стороны с платой с ГФС, а с другой стороны заканчивающиеся проводами с разъемами (см.рис.4.1.). Позже в качестве технологического носителя стали использовать керамический корпуса типа LCC84 (рис. 4.2.). Технологический носитель с ГФС размещался далее в заливном криостате для проведения исследований (рис.4.3.). Такие контрольные измерения давали информацию о пригодности ГФС для дальнейшей работы с ней в составе ФПУ, т.е. для посадки ее в корпус – криостат, совместимый с микрокриогенной системой Стирлинга.

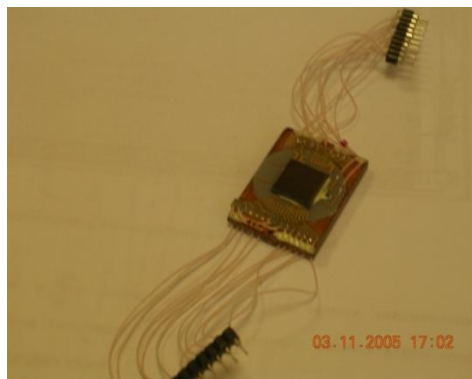


Рис.4.1. ГФС на медном носителе

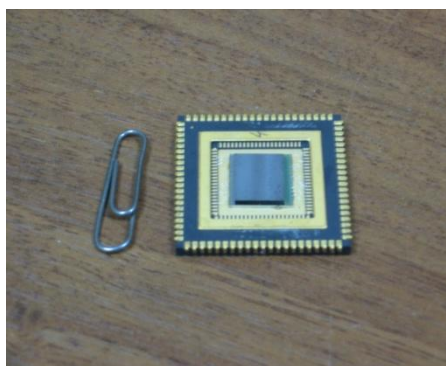


Рис.4.2. ГФС в керамическом корпусе LCC84



а)

б)

Рис. 4.3. ГФС в заливном криостате а) и заливной криостат в сборе б).

Отметим, что сходные контрольные операции производились и над ХУ ГФС, однако использованная при этом оснастка для размещения в криостате оказалась более сложной и в дальнейшем не применялась.

Один из образцов источника сигнала АЧТ, использовавшийся на ранних этапах исследований, мог иметь температуру излучающей полости до 573К, стабилизация которой обеспечивалась с помощью устройства термостатирования. Диаметр выходного отверстия в охлаждаемой диафрагме АЧТ составлял 15 мм. Запуск и управление ГФС осуществлялись с помощью ЭБУ, краткое описание которого представлено ниже. Выходные сигналы с ЭБУ в оцифрованном виде направлялись в РС, где подвергались последующей обработке.

На рис.4.4 представлено изображение измерительного стенда, использовавшегося для исследования фотоэлектрических характеристик ГФС.

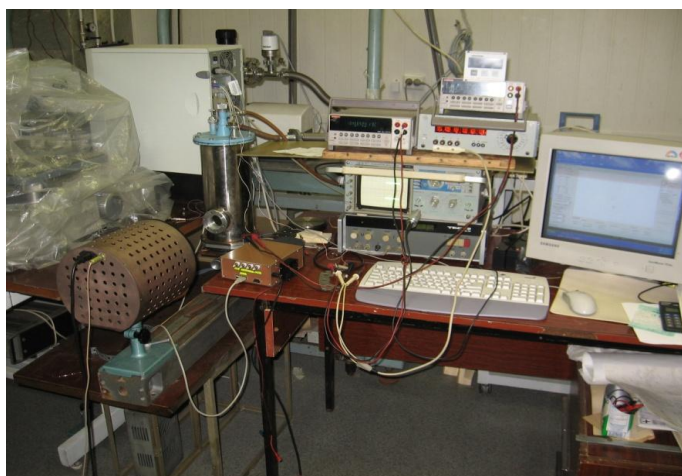


Рис.4.4. Стенд для измерений фотоэлектрических характеристик ГФС.

Отмеченный выше ЭБУ являлся одной из ранних версий такого рода устройств, использовавшихся в обсуждаемых работах, и обеспечивал выполнение набора функций, необходимых для проведения измерений фотоэлектрических характеристик ГФС на основе мультиплексора определенного типа.

Обсуждаемый ниже ЭБУ был разработан для управления мультиплексором типа ISC 9705 производства компании Indigo Systems (США). На примере данного ЭБУ показаны методические и аппаратные особенности измерений, проводившихся и на более ранних этапах исследований. В частности, сходные методики с более простым аналогом описываемого ЭБУ использовались при измерениях ГФС формата 256x256 элементов, описанных выше. ЭБУ и программное обеспечение (ПО) к нему были разработаны коллективом разработчиков из ФГУП «НПП «Пульсар». ЭБУ был предназначен для задания постоянных и импульсных напряжений, обеспечивавших режимы работы мультиплексоров, передачи изображений в РС в аналоговом или цифровом виде. В первом случае предполагалось, что в РС будет размещена плата АЦП, однако в дальнейшем от такого режима работы по ряду технических причин пришлось отказаться, и аналоговые сигналы из мультиплексора оцифровывались АЦП, встроенным в ЭБУ, и поступали в РС в цифровом виде.

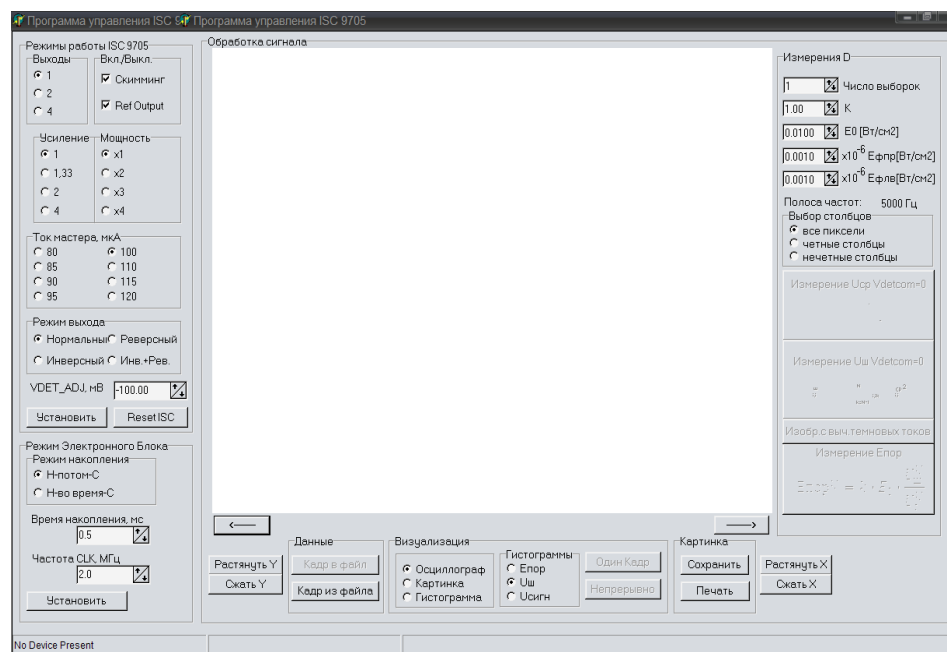


Рис.4.5. Общий вид пользовательского интерфейса на экране РС.

Установка режимов работы МП определялась набором значений радиоконопок, чекбоксов и инкрементируемого поля ввода, расположенных на панели управления режимами работы МП (рис.4.5). Режим «Осциллограф» позволял выводить на экран интерфейса (белое прямоугольное поле в центре) одну или несколько строк ГФС как в непрерывном режиме, так и в режиме фиксации. Инструменты панели управления позволяли производить как растяжение, так и сжатие изображения строк по обеим координатам. Режим «Картинка» позволял преобразовывать видеосигналы, поступающие с ГФС, в непрерывно воспроизводящееся на экране изображение с малой (около 0,3 Гц) частотой кадров либо фотографическое изображение. Малая частота кадров была обусловлена низкой пропускной способностью USB-порта, по которому поступали сигналы от ЭБУ в РС.

При необходимости ПО позволяло:

- изменять диапазон градации оттенков серого цвета изображения;
- получать изображение с вычитанием темновых токов;
- проводить двухточечную коррекцию неоднородности чувствительности ЧЭ ГФС;
- проводить вычисление пороговых характеристик чувствительности ГФС и построение соответствующих гистограмм, отражающих распределение данного параметра по чувствительным элементам (ЧЭ) ГФС.

Расчет пороговых характеристик чувствительности, независимо от их конкретного представления: D^* , $E_{\text{пор.}}$ или $NE\Delta T$, включал в себя измерение средних значений шумового $U_{\text{ш}}$ и сигнального U_c напряжений для каждого ЧЭ ГФС. Для этого сначала определялись средние значения темнового (или фонового) выходного напряжения на выходе ГФС для каждого ЧЭ посредством измерения их по n выборкам (кадрам) и расчета по формуле:

$$\bar{U}_{ij} = \sum_{k=1}^n U_{ijk} \quad (4.1)$$

где U_{ijk} – текущее значение выходного напряжения ГФС, соответствующего ij – му элементу в k -й выборке. Определение среднего значения шума для каждого ЧЭ состояло в измерении, как и выше, текущих значений выходных сигналов ГФС и расчете по формуле:

$$\overline{U}_{ш,ij} = \left(\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (U_{ijk} - \overline{U}_{ij})^2 \right)^{1/2} \quad (4.2)$$

где $\overline{U}_{ij}$ определяется по формуле (4.1).

Наконец, среднее значение сигналов для каждого ЧЭ определялось посредством измерения выходных напряжений ГФС при засветке ее излучением от АЧТ и расчетом по формуле:

$$\overline{U}_{c,ij} = \sum_{k=1}^n (U_{c,ijk} - \overline{U}_{ij}) \quad (4.3)$$

где $U_{c,ijk}$ - значение выходного напряжения ГФС, соответствующего ij – му элементу в k -й выборке при засветке от АЧТ. С использованием результатов, полученных по формулам (4.1-4.3), ПО позволяло рассчитать пороговые характеристики. Обнаружительная способность для каждого ЧЭ рассчитывалась по формуле:

$$D_{ij}^* = \frac{1}{kP} \frac{\overline{U}_{c,ij}}{\overline{U}_{ш,ij}} \sqrt{A\Delta f} \quad (4.4)$$

где P – мощность сигнального излучения от АЧТ, приходящаяся на одни ЧЭ, k – коэффициент использования излучения (вводится, если рассчитывается D_{ij}^* приведенная к максимуму спектра фоточувствительности ГФС), A – площадь ЧЭ, Δf - полоса частот, в которой регистрируется шум, равная $(2t_{int})^{-1/2}$, где t_{int} – время накопления сигнала от ЧЭ на емкости в мультиплексоре.

С учетом того, что по определению $E_{\text{пор}} = \sqrt{A\Delta f}/D^*$, формула для ее расчета по всем ЧЭ ГФС представлялась в виде:

$$E_{ij}^{\text{пор}} = \frac{kP\bar{U}_{\text{ш},ij}}{\bar{U}_{c,ij}} \quad (4.5)$$

Методика измерения и расчета НЕΔТ оказалась несколько сложнее, поскольку предусматривала фиксацию сигнала при двух разных температурах АЧТ. Поэтому $\bar{U}_{c,ij}$, фигурирующее в формулах (4.3-4.5), соответствовало приращению выходного напряжения ГФС при повышении температуры АЧТ на ΔТ градусов (обычно не более 10⁰С), а $\bar{U}_{ij}$ из формулы (4.3) соответствовало сигналам ГФС при начальной температуре АЧТ. С учетом сделанных замечаний формула для расчета НЕΔТ представлялась в виде:

$$NE\Delta T_{ij} = \frac{F\Delta T\bar{U}_{\text{ш},ij}}{\bar{U}_{c,ij}} \quad (4.6)$$

где F – коэффициент, позволяющий пересчитывать полученные значения $NE\Delta T_{ij}$ к условиям, когда угол, под которым видно выходное отверстие АЧТ, отличается от того, которое имеется в данном эксперименте [82]. Т.е., если угол зрения в эксперименте θ , а нужно оценить $NE\Delta T_{ij}$ при θ_1 , то искомое значение можно получить, подставив в (4.6) $F = \sin^2(\theta/2)/\sin^2(\theta_1/2)$.

Следует отметить, что обнаружительная способность D^* , как параметр, характеризующий пороговую чувствительность, в настоящее время весьма редко используется применительно к многоэлементным фотоприемникам, поскольку имеет ограниченную информативность и не дает, например, возможности прямо оценить более естественную в эксплуатации характеристику оптико-электронной системы НЕΔТ. Тем не менее, на начальном этапе обсуждаемых работ по ГФС на основе СКЯ использовалась

именно D^* как основной параметр, характеризующий пороговую чувствительность фотоприемника.

4.2. Результаты измерений ГФС

В данном разделе представлены результаты измерений ГФС с кадровым накоплением. О причинах, побудивших сосредоточить внимание на приборах указанного типа, говорилось выше. Добавим здесь также, что измерения характеристик ХУ ГФС и линейных ГФС на момент их создания не были обеспечены измерительным оборудованием, необходимым для реализации описанных выше методик, поэтому выполнялись в неполном объеме и не отражают наиболее яркие преимущества технологий СКЯ. Отметим также, что представленные в разделах 4.2 и 4.3 результаты получены при исследованиях ГФС, изготовленных с использованием СКЯ, выращенных методом МОСГЭ. Результаты, полученные на ГФС, в которых использовались СКЯ, выращенные МЛЭ, представлены в разделе 4.4. Первые значимые результаты по созданию ГФС с кадровым накоплением в рамках настоящей работы были получены при выполнении НИР, направленной на создание одно- и двухспектральных ГФС формата 256x256 элементов с шагом 35 мкм. Конструкции указанных ГФС описаны в главе 3.

На рис.4.6. представлено распределение по элементам величины обнаружительной способности в ГФС с односпектральным МФП, чувствительным в диапазоне 8-12мкм с максимумом спектра fotocувствительности на длине волны 9,3 мкм (рис. 2.13). Измерение D^* проводилось в соответствии с описанной выше методикой. Среднее значение величины $D^*_{\lambda_{\max}} = 3,22 \times 10^{10} \text{ Вт}^{-1}\text{см Гц}^{1/2}$. Неоднородность чувствительности составила $\pm 14\%$, что, однако, позволяло при использовании цифровой обработки получать с помощью такой ГФС ИК изображения приемлемого качества.

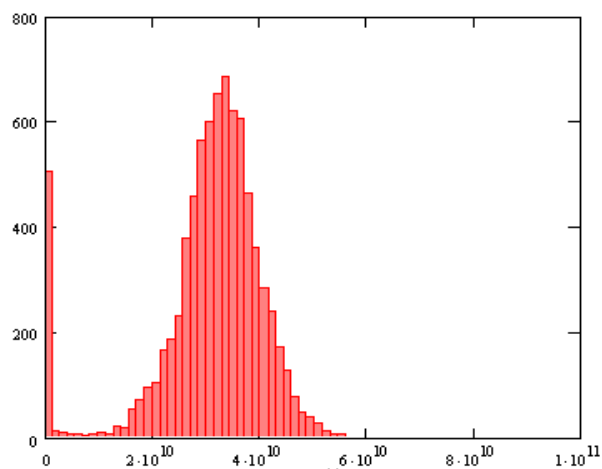


Рис. 4.6. Распределение D^* в односпектральной ГФС формата 256x256 элементов на диапазон 8-12 мкм.

На рис.4.7. представлено распределение по элементам величины обнаружительной способности в ГФС с односпектральным МФП, чувствительным в диапазоне 3-5мкм с максимумом спектра фоточувствительности на длине волны 4,7 мкм (рис.2.22). Среднее значение величины $D_{\lambda_{\max}}^* = 3,2 \times 10^{10} \text{ Вт}^{-1}\text{см Гц}^{1/2}$, а максимуму распределения соответствует величина $3,5 \times 10^{10} \text{ Вт}^{-1}\text{см Гц}^{1/2}$. О причинах низкой величины $D_{\lambda_{\max}}^*$ в коротковолновых МФП отчасти говорилось выше в главе 2: исходный материал, из которого изготавливались фотоприемные матрицы, обладал весьма низкой чувствительностью. Неоднородность чувствительности составила $\pm 17\%$ [55]. Результаты измерений аналогичных характеристик на двухспектральных (ДС) образцах ГФС данного формата оказались довольно похожими на результаты, полученные на односпектральных образцах, т.е. ДС ГФС имели вполне приемлемую чувствительность в ДВ диапазоне и относительно низкую в КВ диапазоне. Поэтому для демонстрации возможностей в достижении пороговых характеристик чувствительности в ДС ГФС ниже представлены результаты, полученные на приборах, изготовленных в рамках более поздней НИР, где были достигнуты более высокие результаты, по крайней мере, в КВ

области. В указанных ГФС использовался МП типа ISC 9705, а формат и шаг ЧЭ составили 320x256 элементов и 30 мкм соответственно.

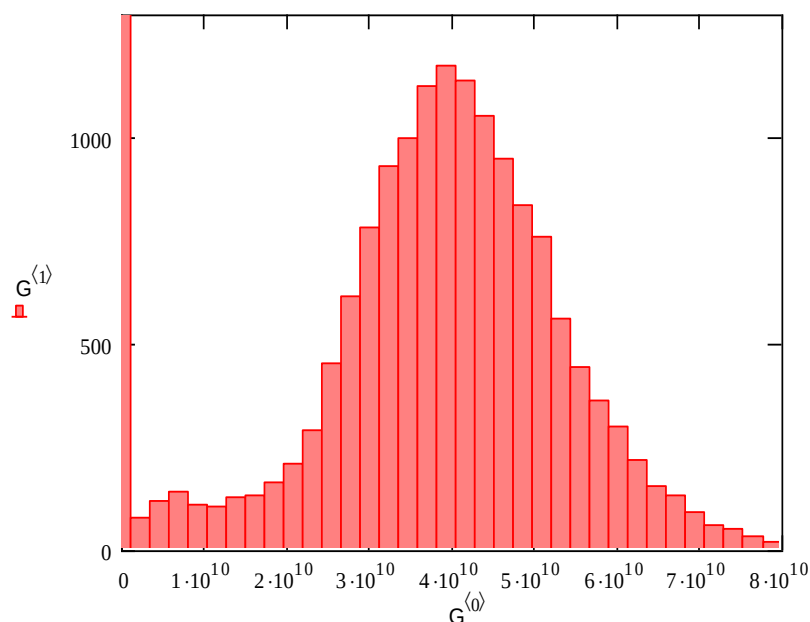


Рис. 4.7. Распределение D^* в односпектральной ГФС формата 256x256 элементов на диапазон 3-5 мкм.

На рис.4.8 представлено распределение по элементам величины обнаружительной способности в ГФС с фотоприемником серии V -951 (со спектральными характеристиками чувствительности на рис.2.26) для элементов длинноволнового диапазона. Значение в максимуме распределения величины $D^*_{\lambda_{\max}} = 3 \times 10^{10} \text{ Вт}^{-1}\text{см Гц}^{1/2}$. Измерения проводились при $T=65\text{К}$. Входная частота $f_{\text{clk}} = 2\text{МГц}$, $t_{\text{int}} = 2\text{мс}$, смещение на фотоприемной секции составило 2,3В. На рис.4.9 представлено распределение по элементам величины обнаружительной способности в ФПМ с фотоприемником серии V - 951 для элементов коротковолнового диапазона. Значение в максимуме распределения величины $D^*_{\lambda_{\max}} = 1.1 \times 10^{11} \text{ Вт}^{-1}\text{см Гц}^{1/2}$. Эта величина значительно превосходит результат, полученный на образцах предыдущей серии, что связано с более высоким качеством ДС СКЯ. Измерения проводились в тех же условиях, что и в случае длинноволновой секции, только t_{int} приходилось поднимать до 20 мс. Это

было обусловлено тем обстоятельством, что величина фотоэлектрического усиления g в коротковолновых СКЯ существенно меньше, чем в случае длинноволновых СКЯ, и увеличивать ее за счет напряжения можно лишь в ограниченных пределах. С другой стороны, темновой ток в коротковолновых СКЯ существенно меньше. Поэтому величину сигнала (и шума) можно увеличивать за счет увеличения времени накопления.

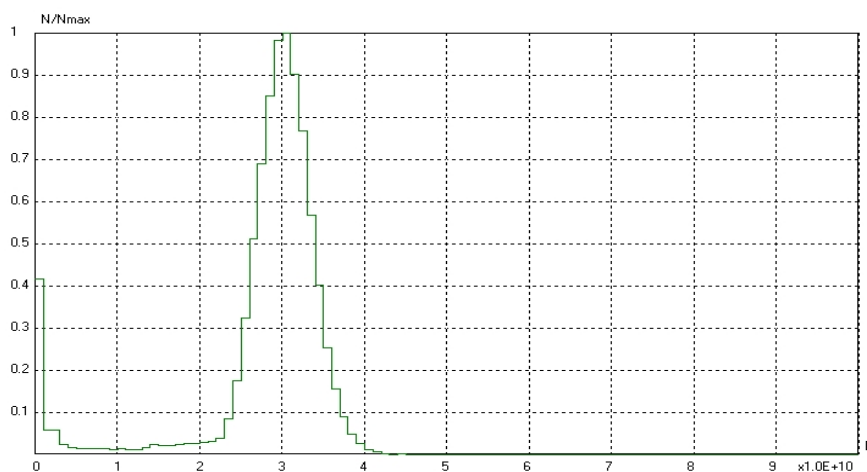


Рис.4.8. Распределение D^* в ДС ГФС формата 320x256 элементов в ДВ секции.

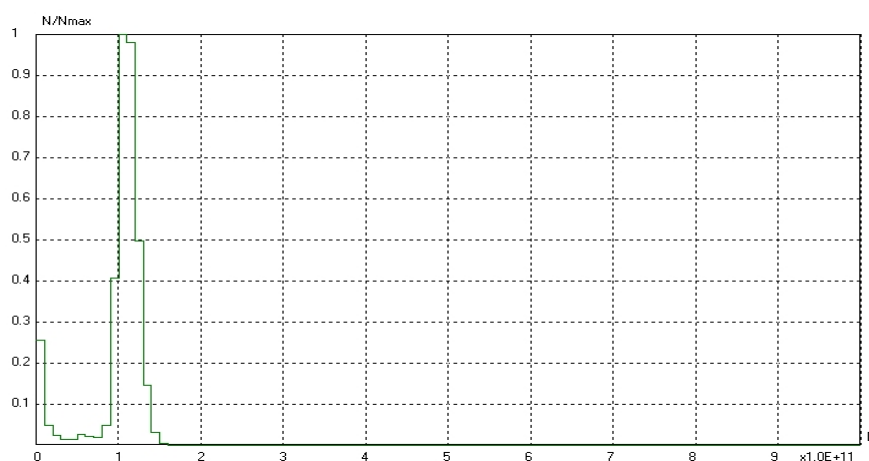


Рис.4.9. Распределение D^* в ДС ГФС формата 320x256 элементов в KB секции.

Неоднородность чувствительности ФПМ составила около $\pm 15\%$, что заметно хуже результатов, обычно получаемых на СКЯ матрицах. Однако, благодаря использованию электронных методов обработки, такой результат не приводит к катастрофическому ухудшению характеристик формируемых ИК изображений.

В рамках данной работы проводились и первые измерения NEΔT ДВ ГФС формата 320x256 элементов. На рис. 4.10 представлено распределение NEΔT по элементам ГФС, в которой СКЯ МФП имеет фотоэлектрические характеристики, аналогичные тем, что у образца v 635 (см. глава 2 рис.2.6 б))

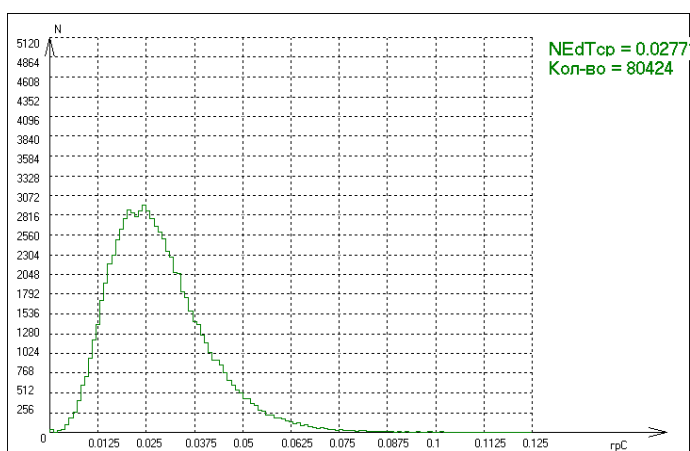


Рис.4.10. Распределение NEΔT в ДВ ГФС формата 320x256 элементов.

Измерения проводились с использованием оборудования и методик, описанных выше. Значение NEΔT приведено к относительному отверстию 1: 2 и получено при $T=65\text{K}$, $t_{\text{int}} = 3$ мс, напряжении смещения на МФП – 2,2 В. Среднее значение NEΔT составило 27 мК, при этом число неработающих элементов не превышало 2% [59].

ДВ и ДС ГФС данной конструкции использовались при выполнении более поздних работ [6].

Следует отметить, что представленные выше результаты, получены при использовании СКЯ, выращенных методом МОСГЭ. О достоинствах и недостатках таких структур говорилось в главе 2. Новый этап в настоящих

исследованиях начался, когда появилась возможность использовать для создания ИК фотоприемников СКЯ, выращенных методом МЛЭ. Высокая однородность и воспроизводимость характеристик СКЯ, получаемых указанным методом, позволили разработать и изготовить ГФС формата 640x512 элементов с шагом 20 мкм, т.е. выйти на проектные нормы, которые характеризуют современный технологический уровень в данной области. Результаты исследований указанных ГФС представлены в разделе 4.4.

4.3. Получение изображений с помощью одно- двухспектральных ГФС

С целью демонстрации возможностей практического применения разработанных ГФС были проведены эксперименты по получению тепловых изображений различных объектов с помощью одно- и двухспектральных приборов формата 320x256. На рис.4.11 показаны характерные изображения слабо нагретых объектов, полученные с помощью односпектральной длинноволновой ГФС. Ограниченные возможности программы обработки изображений не позволили достичь более высокого их качества. Тем не менее, потенциальные возможности таких приборов достаточно известны. Значительно больший интерес представляло оценить возможности менее изученных двухспектральных ГФС при распознавании объектов по их изображениям в диапазонах 3-5 мкм и 8-12 мкм. Оказалось, что в случае слабо нагретых объектов различия изображений, полученных в указанных спектрах, выделить довольно сложно. На рис.4.12. представлены изображения полученные с помощью ГФС на основе InSb (рис.4.12 а) и на основе ДВ СКЯ (рис.4.12 б). (Указанные изображения получены при участии сотрудников НПО «Орион», с использованием разработанного ими программного обеспечения и ИК камеры с матрицей на основе InSb). ГФС на основе InSb была выбрана для получения изображений в диапазоне 3-5 мкм с целью исключить возможное влияние на качество изображений низкой чувствительности КВ секции в ДС СКЯ.

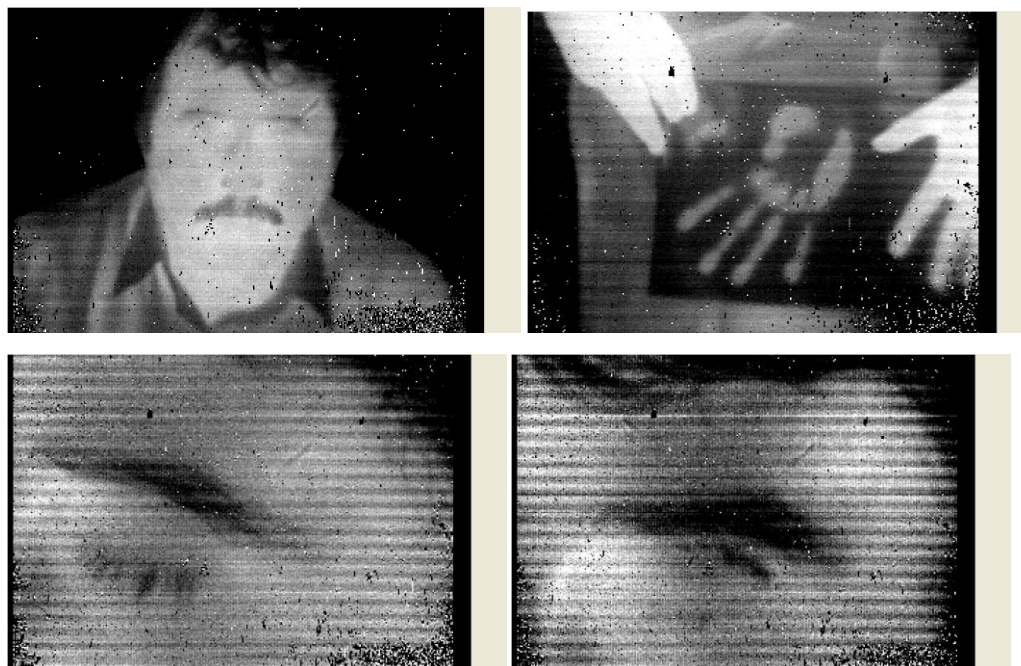


Рис.4.11. Тепловые изображения, полученные с помощью односпектральной ДВ ГФС

Как видно, ярких характерных отличий у этих изображений не наблюдается, если не относить к таковым более высокий контраст изображения, полученного с помощью InSb ГФС.

В следующих экспериментах использовались уже двухспектральные ГФС на основе СКЯ, с помощью которых регистрировались сильно нагретые объекты. На рис. 4.13 представлены изображения паяльника, полученные с помощью такой ГФС в двух спектральных диапазонах. Ярких характерных отличий также не наблюдается за исключением, может быть, более контрастного изображения в КВ области. Более заметными оказались различия в изображениях пламени от газовой горелки и керосиновой лампы (рис. 4.14). Как видно на фотографиях изображение пламени в диапазоне 3-5 мкм является более ярким и протяженным. Указанные различия объясняются наличием большого количества CO_2 , который излучает при высокой температуре на длине волны 4,2 мкм. Поэтому изображение в коротковолновом диапазоне сильно размыто и более контрастное.



а)



б)

Рис.4.12. Тепловые изображения, полученные с помощью ГФС на основе: а) InSb (77K, $T_H=0.9$ мс, $F=7$ МГц); б) ДВ СКЯ (65K, $T_H=3$ мс, $F=6$ МГц)

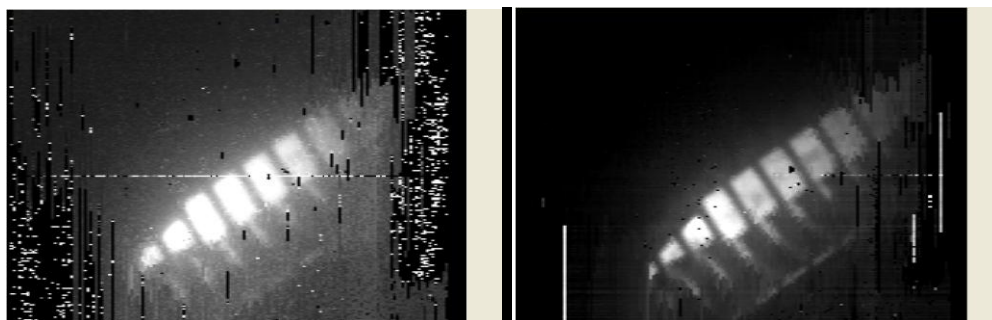
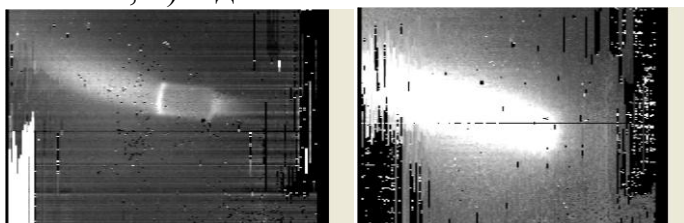
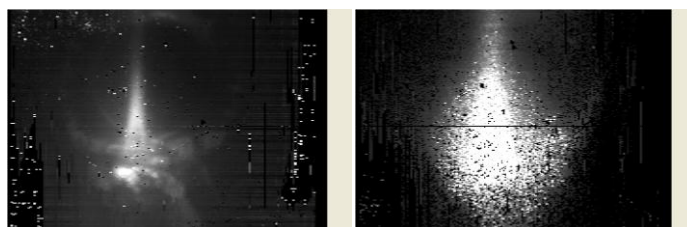


Рис.4.13. Изображения паяльника, полученные с помощью ДС ГФС: а) в диапазоне 3-5 мкм; б) в диапазоне 8-12 мкм.



а)

б)



в)

г)

Рис.4.14. Изображения пламени газовой горелки а), б) и керосиновой лампы в), г), полученные с помощью ДС ГФС в диапазонах: 3-5 мкм б), г); 8-12 мкм а), в).

Представленные экспериментальные результаты не отражают всего многообразия возможностей применения, предоставляемых двухспектральными ГФС, а лишь демонстрируют возможности технологий создания таких формирователей. Данному вопросу посвящено огромное количество публикаций. Здесь же мы коснемся лишь одного из применений, не обсуждавшихся ранее. В работах [56,57] рассмотрены возможности использования одно- и двухспектральных ГФС в системах обнаружения и распознавания с использованием в качестве показателя эффективности таких универсальных критериев, как дальность обнаружения и распознавания объекта наблюдения. Методика определения численных значений критериев была основана на выполнении энергетического расчета с использованием спектральных и пространственно-частотных (частотно-контрастных) характеристик всех звеньев информационного канала «объект наблюдения - атмосфера – прибор – наблюдатель». Расчетная оценка эффективности применения ГФС СКЯ в составе приборного комплекса с использованием реальных спектральных характеристик излучения объектов наблюдения и фонов показала возможность реализации режима одновременного наблюдения сильно- и слабоконтрастных объектов, соответственно, в КВ (3-5 мкм) и ДВ (7-9 мкм) участках ИК спектра. Фотоприемники из указанных диапазонов могут последовательно накапливать сигнал от источника излучения, причем общее время накопления укладывается в пределы допустимого времени формирования кадра при заданной частоте смены информационных кадров. Имеющийся в КВ канале запас в части отношения сигнал/шум позволяет уменьшить размеры приемника и время накопления, что дает возможность оптимизировать в целом конструкцию двухспектрального МФП на основе СКЯ.

Определенный интерес представляет возможность использования ЧЭ коротковолнового канала в качестве информационных датчиков для создания

адаптивной системы автоматического регулирования усиления (АРУ) сигнала в ФПМ на основе СКЯ, а также яркости и контрастности (АРЯ-АРК) изображения на видеомониторе тепловизионной системы при наблюдении сцен с высокой энергетической яркостью (очагов пожаров, факелов твердотопливных ракет и др.) [6,7, 83] . В техническом плане при создании устройства АРУ или АРЯ-АРК чувствительные элементы коротковолнового канала (3-5 мкм) должны работать в высокопороговом режиме и выдавать электрические сигналы только при облучении оптическими сигналами высокого уровня (на 2-3 порядка выше уровней, формируемых фоновыми образованиями). Эти электрические сигналы могут либо уменьшать коэффициенты усиления сигналов, формируемых парными (соседними) чувствительными элементами длинноволнового канала (8-9 мкм), например, в схеме коммутатора сигналов, либо использоваться в устройстве электронной обработки сигналов для исключения высокоуровневых участков из процесса обработки и регулирования. В результате применения коротковолнового канала двухспектрального МФПУ МСКЯ в режиме адаптивной АРУ или для АРЯ-АРК человеку-оператору будут предъявляться изображения, на которых участки, не содержащие источники с высокой энергетической яркостью, должны наблюдаться с оптимальными значениями яркости и контраста. Предложенный вариант построения устройства АРУ или АРЯ-АРК будет обеспечивать более высокую помехозащищенность тепловизионных систем по сравнению с применяемыми в настоящее время функциональными аналогами таких устройств на базе пик-детекторов видеосигнала.

4.4. Результаты измерений характеристик ГФС форматов 384x288 и 640x512 элементов с шагом 20 мкм.

Как отмечалось выше новый этап в работе начался с переходом к созданию ГФС с использованием СКЯ, выращенных МЛЭ [84,85]. Первые

результаты по исследованию ГФС на основе СКЯ, выращенной методом МЛЭ, в рамках настоящей работы были получены на приборе формата 320x256 с мультиплексором типа ISC 9705. Указанная ГФС была аналогична по конструкции той, что имела ФПМ, изготовленную из МОСГЭ СКЯ, и описана в разделе 3.2.2.4. Основные фотоэлектрические характеристики ГФС обоих типов, за исключением спектров fotocувствительности, имели сравнимые значения. Более подробно характеристики указанных ГФС, полученные в составе ФПУ, будут обсуждаться в гл.5.

Благодаря появлению возможности использования при создании СКЯ технологии МЛЭ дальнейшее развитие разработок СКЯ ГФС в рамках настоящей работы продолжалось уже с использованием данной технологии.

Значительное ускорение и выход на качественно новый уровень разработки фотоприемников на основе СКЯ получили в ходе выполнения АО «ЦНИИ «Циклон» комплекса работ, отмеченного выше (см. раздел 3.3), целью которых было преодолеть отставание в области разработки СКЯ ГФС от современных мировых достижений.

Согласно техническим требованиям в рамках данного проекта должны были быть разработаны ГФС на основе СКЯ двух форматов:

- формата 384-288 элементов;
- формата 640-512 элементов.

Состав ГФС обоих типов:

- матрица чувствительных элементов;
- матричный мультиплексор.

Значения фотоэлектрических параметров для ГФС 2-х типов при приемке и поставке должны были соответствовать нормам, приведенным ранее в таблице 3.1. (см. выше раздел 3).

Конструктивные требования:

-количество сигнальных выходов, не более – 4.

-количество внешних контактных площадок – не более 28.

Габаритные и присоединительные размеры ГФС, размеры и расположение контактных площадок определяются на этапе разработки технического проекта.

Ниже представлены отдельные результаты, полученные в ходе государственных испытаний разработанных ГФС, подтвердивших соответствие полученных характеристик заданным требованиям.

Формирование выборки ГФС для проведения испытаний выполнялось путем измерения параметров тестовых (одноэлементных) фотоприемников, изготовленных в одном технологическом цикле с МФП. Первоначально измерялись спектр фотоотклика и ампер-ваттная характеристики тестовых ФП. Типичные зависимости для испытуемых образцов представлены на рис. 4.15 и рис. 4.16. По результатам измерений одноэлементных фотоприемников были определены образцы, которые соответствовали требованиям по длине волны максимума фотоотклика и имели максимальную чувствительность.

Измерения параметров ГФС включали в себя измерение спектра фотоотклика, чувствительности S , эквивалентной шуму разности температур $\Delta T_{ЭШ}$, а также подбор оптимальных режимов работы ГФС (напряжения смещения и времени накопления). Определение $\Delta T_{ЭШ}$ проводилось с использованием методики, описанной выше. Спектр фотоотклика ГФС во многом был аналогичен спектру тестовых фотоприемников (рис.4.15). Зависимость чувствительности ГФС (средней по всем элементам) от напряжения смещения представлена на рис. 4.17, и по характеру аналогична таковой, полученной для тестовых фотоприемников (рис.4.16). Из рисунков видно, что чувствительность S монотонно увеличивается с ростом напряжения смещения. Поэтому эквивалентная шуму разность температур $\Delta T_{ЭШ}$ монотонно уменьшается с ростом напряжения смещения (рис 4.18), так как $\Delta T_{ЭШ}$ обратно

пропорциональна S . Аналогичным образом эквивалентная шуму разность температур $\Delta T_{\text{ЭШ}}$ зависит от времени накопления – $\Delta T_{\text{ЭШ}}$ монотонно уменьшается с увеличением времени накопления. Таким образом, для получения минимально возможного значения $\Delta T_{\text{ЭШ}}$ нужно максимально увеличивать как напряжение смещения, так и время накопления. Напряжение смещения можно увеличивать примерно до 3В. При дальнейшем увеличении коммутатор-мультиплексор ГФС может выйти из строя. Кроме того, как видно и рисунка 4.16, зависимость чувствительности от напряжения смещения после 3-4В достигает насыщения. Максимальное время накопления ограничено частотой кадров. Кроме того, максимальный сигнал на выходе ГФС ограничен входной емкостью ячеек ГФС (типовое значение – 10^7 электронов).

Для оценки однородности распределения параметров были построены гистограммы распределения шума, чувствительности и эквивалентной шуму разности температур по ГФС форматов 640x512 и 384x288 элементов (рис. 4.19-4.24). Распределения шума и $\Delta T_{\text{ЭШ}}$ имеют ярко выраженный единственный максимум и близки по форме к гауссовому. Распределение чувствительности представляет собой единичный достаточно острый пик, что говорит о высокой однородности чувствительности элементов в матрице.

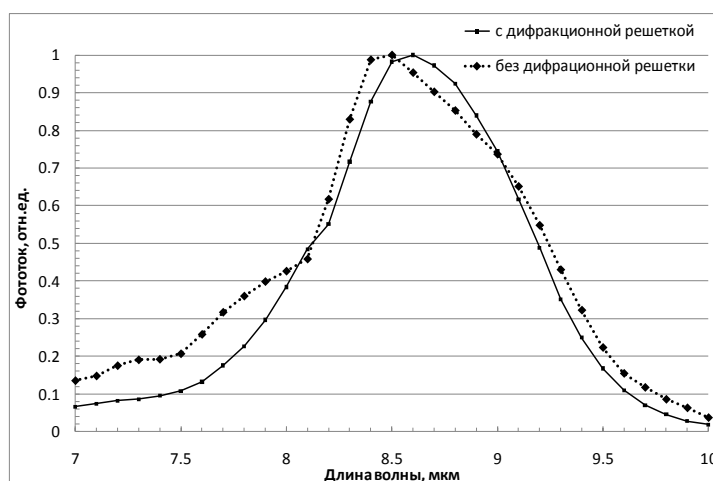


Рис. 4.15 - Спектр фотоотклика тестового (одноэлементного) приемника.

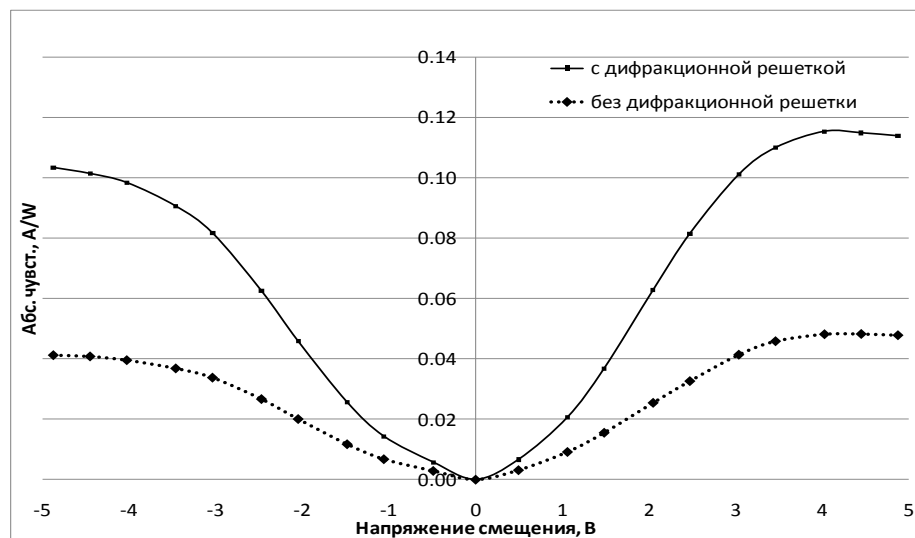


Рис. 4.16 - Зависимость абсолютной чувствительности тестового (одноэлементного) приемника от напряжения смещения.

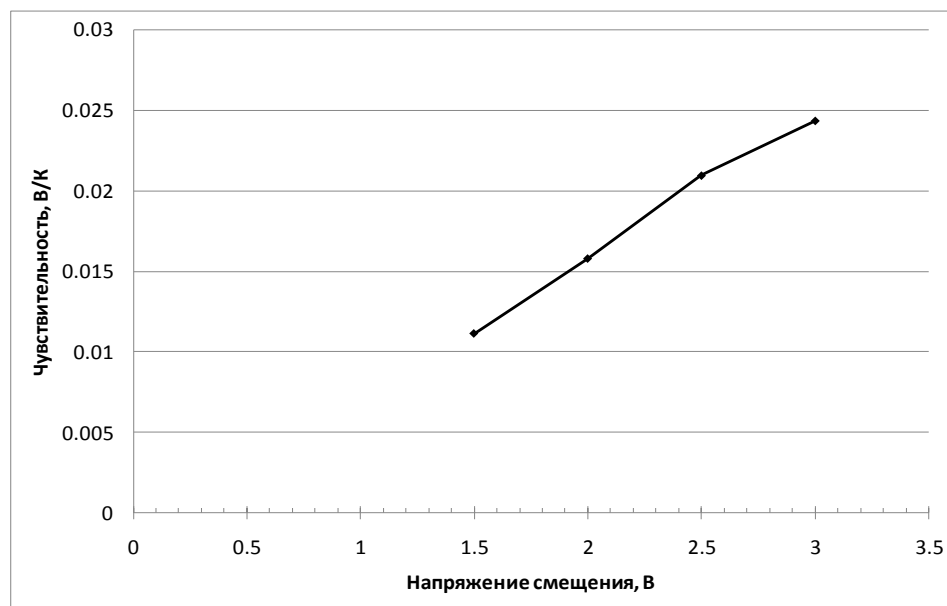


Рис. 4.17 - Зависимость чувствительности ГФС (средней по всем элементам) от напряжения смещения.

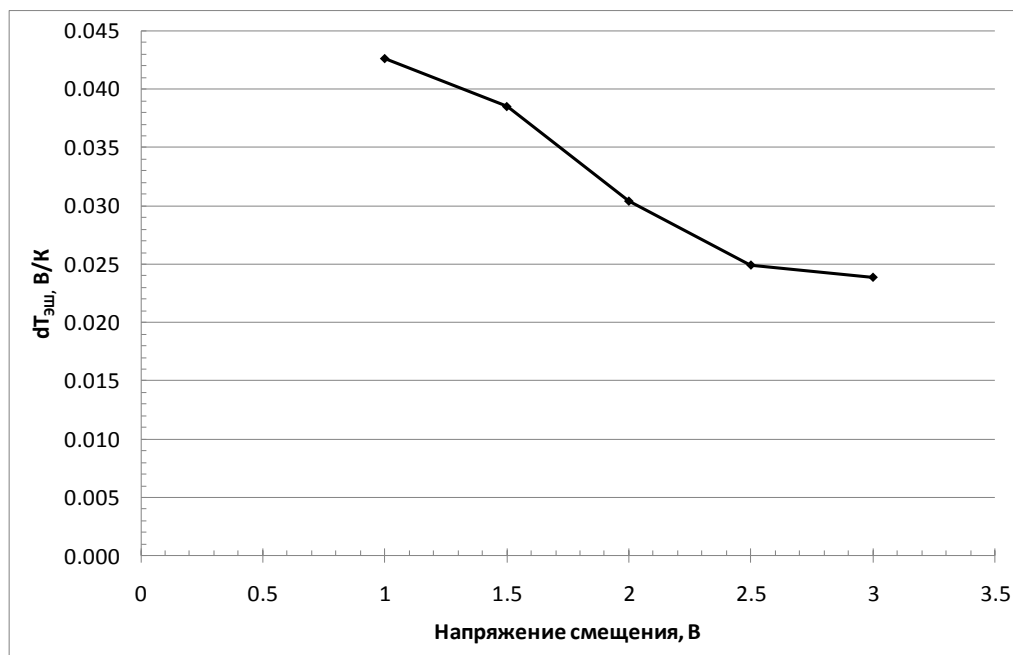


Рис. 4.18 - Зависимость эквивалентной шуму разности температур ГФС (средней по всем элементам) от напряжения смещения.

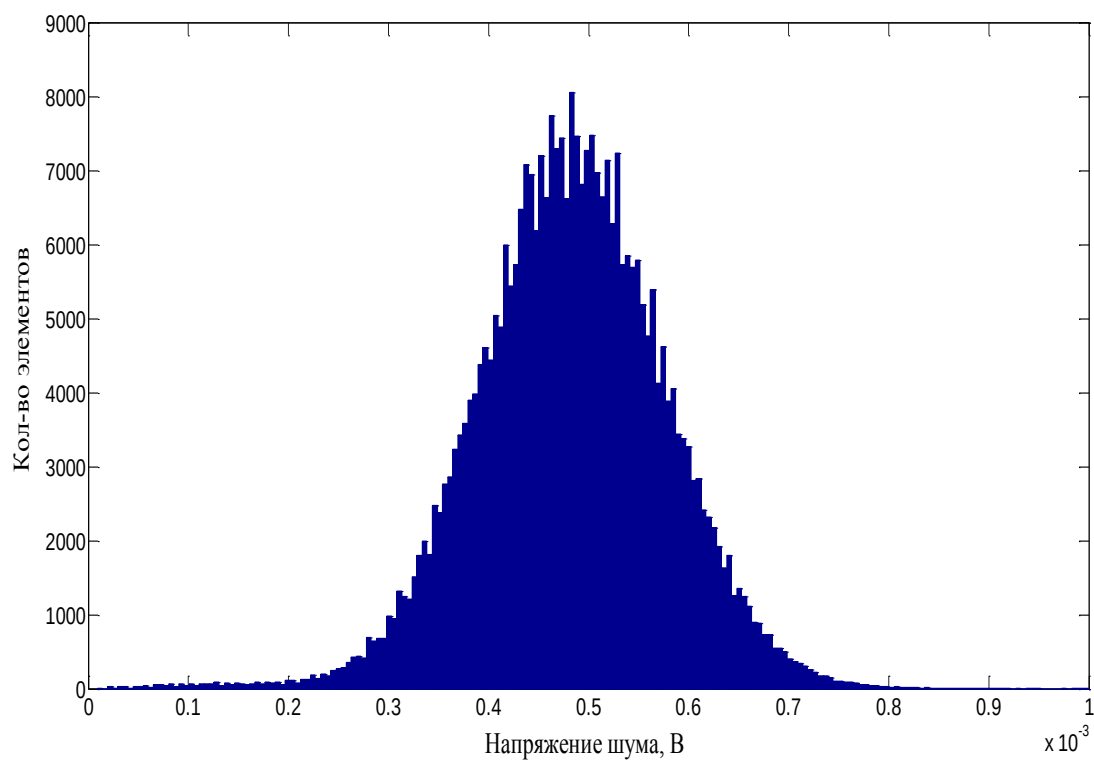


Рис. 4.19 - Гистограмма распределения шума по матричному массиву ДВ ГФС формата 640x512 элементов

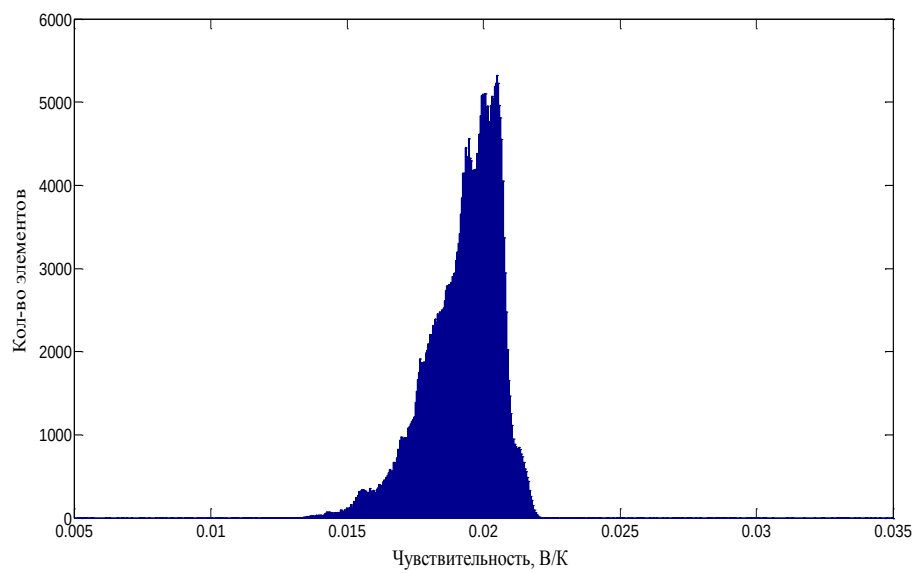


Рис. 4.20 - Гистограмма распределения чувствительности по матричному массиву формата 640x512 элементов

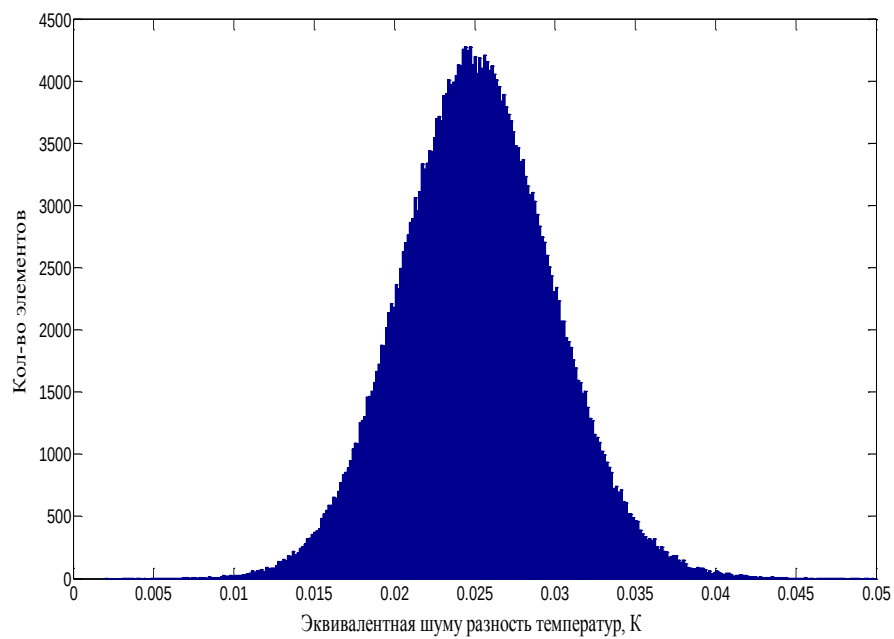


Рис. 4.21 - Распределение эквивалентной шуму разности температур по матричному массиву формата 640x512 элементов

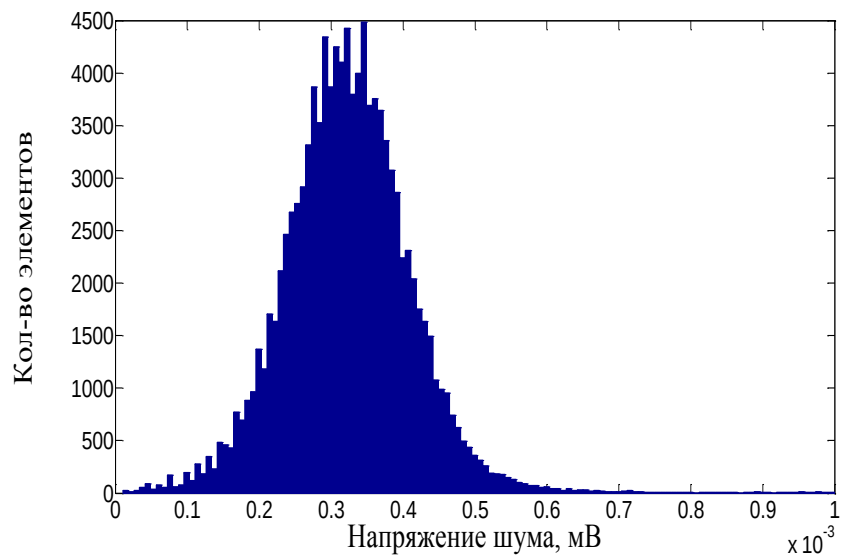


Рис. 4.22 - Гистограмма распределения шума по матричному массиву формата 384x288 элементов

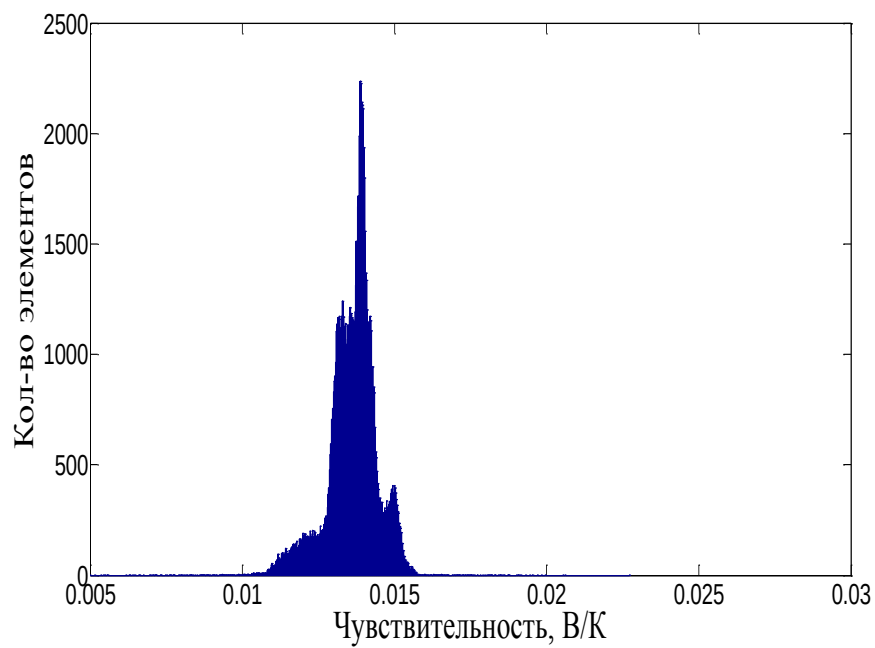


Рис. 4.23 - Гистограмма распределения чувствительности по матричному массиву формата 384x288 элементов

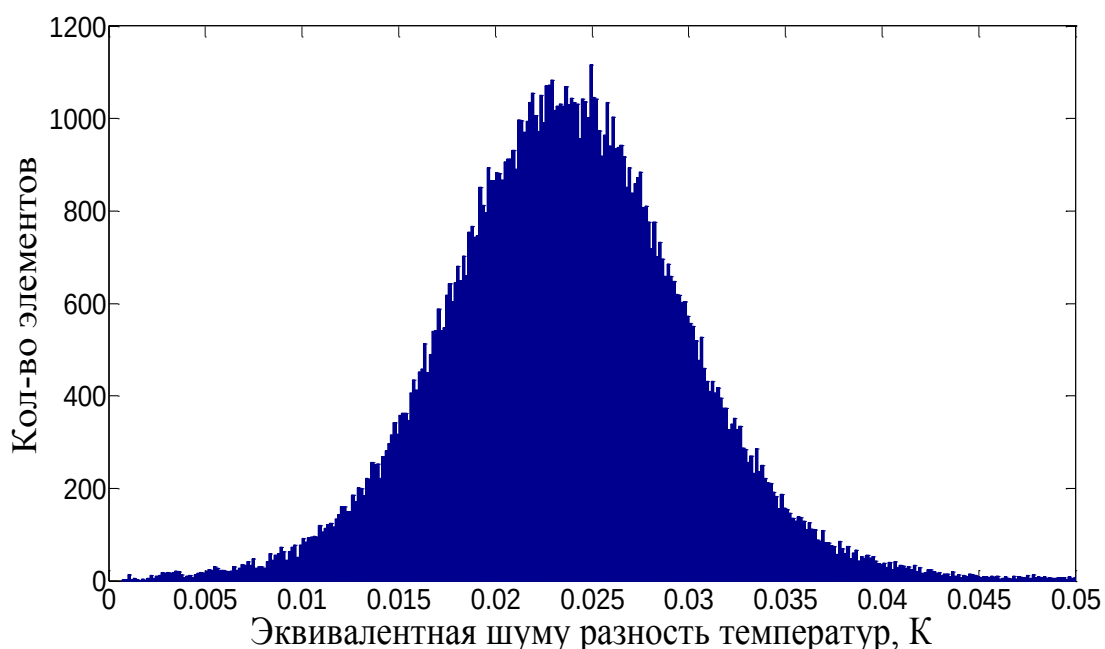


Рис. 4.24 - Распределение эквивалентной шуму разности температур по матричному массиву формата 384x288 элементов

Оценки соответствия ГФС требованиям по стойкости к внешним воздействующим факторам показали, что они обладают уровнем стойкости к воздействиям внешних факторов не ниже, чем установленный соответствующим ГОСТ, при обязательном использовании ее совместно с внешним защитным вакуумным корпусом-криостатом (ВКК).

Полученные экспериментальные результаты показывают, что предложенные и практически реализованные в ходе проведения настоящей работы технические решения позволяют обеспечить создание СКЯ ГФС формата вплоть до 640x512 элементов с шагом не более 20мкм.

Достигнутый научно-технический уровень разработанных образцов ГФС соответствует уровню зарубежных аналогов из данного класса приборов. Исследования разработанных ГФС были продолжены в составе ФПУ. Их результаты представлены в гл.5.

В заключение настоящей главы представлены результаты исследований ГФС имеющих, важное практическое значение для ряда применений.

4.5. Исследования ГФС на основе ФП СКЯ в условиях интенсивного лазерного облучения.

При анализе характеристик многоэлементных фотоприемников, работающих в том или ином спектральном диапазоне и предназначенных для решения задач военного характера, обычно в обязательном порядке рассматривают их стойкость по отношению к спецвоздействиям, в частности, к интенсивному лазерному излучению (ИЛИ). Интерес к данной теме вызван тем, что в принципе любой ФП может быть выведен из строя интенсивной засветкой, которую проще всего обеспечить с помощью лазера, позволяющего формировать короткие импульсы излучения с подходящей длиной волны и большой энергией. Т.е. поражение происходит дистанционно и очень быстро. ФП СКЯ, изготовленные из относительно термостойких материалов GaAs/AlGaAs, выглядят в смысле стойкости по отношению к лазерному облучению более предпочтительно, чем их аналоги на основе узкозонных материалов, таких как InSb или HgCdTe. Однако информация, подтверждающая данное предположение, практически отсутствует как в отечественных, так и в зарубежных публикациях. В настоящей работе проведены экспериментальные исследования, дающие некоторое представление о стойкости ФП СКЯ по отношению к ИЛИ, проанализированы процессы, определяющие результаты лазерного воздействия.

4.5.1. Облучение в непрерывном режиме.

Первые экспериментальные исследования воздействия ИЛИ на ФП СКЯ были проведены в 2008г. [59]. В качестве объекта исследования использовались односпектральные ДВ ГФС формата 320x256 элементов на основе ФП СКЯ, конструкции которых подробно обсуждались в главах 2 и 3. Спектр фоточувствительности ФП СКЯ представлен на рис.4.25.

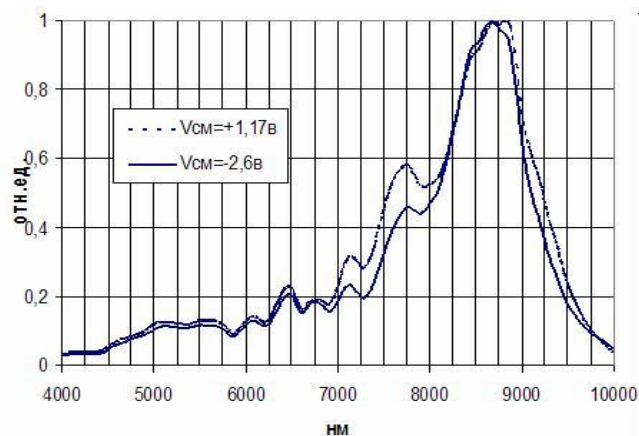


Рис.4.25 Спектр фоточувствительности ФП СКЯ.

Целью исследований было изучение влияния ИЛИ на характеристики указанных ГФС. Исследуемая ГФС размещалась в разборном корпусе – криостате (см.выше) и охлаждалась до примерно 80К жидким азотом. В качестве источника излучения использовался непрерывный CO_2 –лазер с длиной волны излучения 10,6 мкм и мощностью излучения 15 Вт (лазер типа LCD-15, см.разд.2.7), которую можно было регулировать с помощью аттенюатора. Излучение без фокусировки подавалось на фокальную плоскость ГФС. Пятно от лазерного пучка регистрировалось с помощью облучаемой ГФС и могло отображаться либо в виде двумерного изображения либо в осциллографическом режиме в виде отдельных строк ГФС. Облучение ГФС проводилось в непрерывном режиме или в квазиимпульсном режиме с длительностью одиночных импульсов не менее 1с. На рис.4.26 показаны изображения и осциллограммы распределения интенсивности лазерного излучения по плоскости ГФС при непрерывной засветке мощностью 1Вт и импульсной засветке -1с мощностью 15 Вт. После указанных воздействий разрушений или деградации характеристик ГФС обнаружено не было. В случае непрерывного облучения наблюдалось повышение температуры посадочного места ГФС на несколько градусов. Было сделано предположение, что излучение от лазера слабо поглощается и в значительной степени отражается от ГФС и рассеивается.

Чтобы определить механизмы взаимодействия лазерного излучения с ГФС был проведен следующий эксперимент.

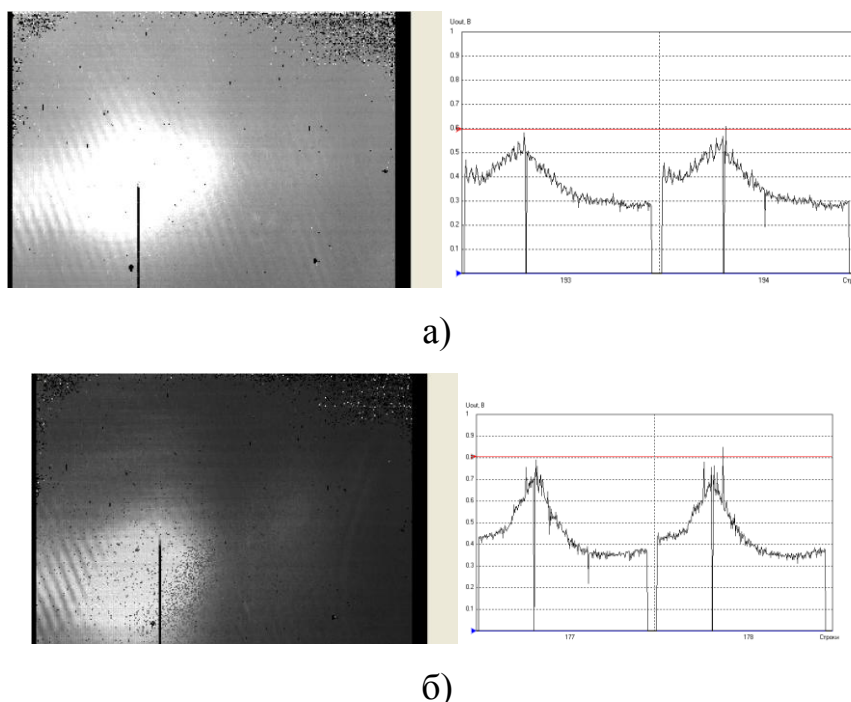


Рис.4.26 Изображения и осциллограммы распределения интенсивности лазерного излучения по плоскости ГФС: а) непрерывный режим , 1 Вт; б) импульс -1с, 15 Вт.

На ГФС, закрепленную в зажиме и лишенную специального теплоотвода, подавалось излучение от лазера мощностью 1Вт, а картина распределения отраженного и рассеянного излучения регистрировалась с помощью другой ГФС того же типа, размещенной в криостате и работавшей в режиме формирования изображения, т.е. в составе лабораторной тепловизионной камеры на основе разборного корпуса – криостата, ЭБУ и германиевого объектива. На рис.4.27 представлено изображение облучаемой ГФС. Равномерное свечение ГФС, как оказалось, связано с ее разогревом на несколько десятков градусов. При этом никаких видимых повреждений обнаружено не было.

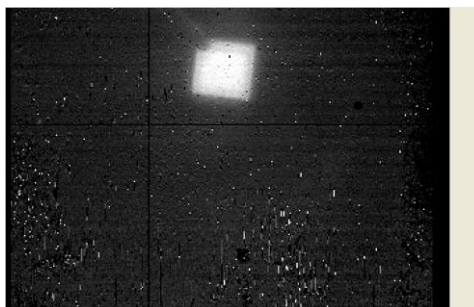


Рис.4.27 Тепловое изображение ГФС, облучаемой ИЛИ.

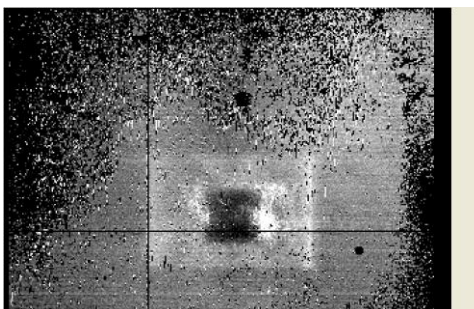


Рис.4.28 Тепловое изображение ГФС, облучаемой ИЛИ, размещенной на теплоотводе.

После того как ГФС была помещена на теплоотвод, картина поменялась: на рис.4.28. видно излучение, которое выходит через торцы фотоприемной секции ГФС. При определенной ориентации ГФС можно было наблюдать распределение излучения, напоминающее дифракционную картину при рассеянии двумерной периодической структурой (рис.4.29). Напомним, что МФП имеет два двумерных периодических массива: массив ЧЭ и ДР на поверхности ЧЭ.

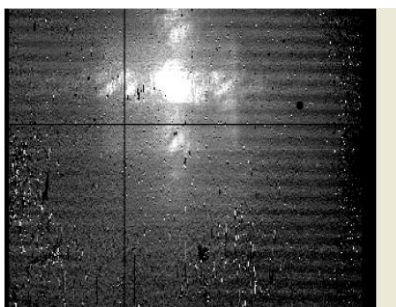


Рис.4.29. Дифракционная картина от МФП

Полученные результаты дали основания предположить, что излучение в фотоприемной секции в основном рассеивается, дифрагируя на периодической структуре внутренней поверхности МФП, и выходит из кристалла по различным направлениям. Поглощенная же часть мощности излучения отводится с помощью теплоотвода или в его отсутствие приводит к нагреву ГФС. Следует отметить, что поглощение ИЛИ активной частью СКЯ весьма мало (см.рис.4.25). Поэтому можно предположить, что разогрев ГФС связан в основном с поглощением ИЛИ в сильно легированных контактных слоях СКЯ. Приблизженные оценки, сделанные с учетом условий экспериментов, показали, что в реальных условиях, когда ГФС охлаждается, т.е. находится на теплоотводе, добиться ее деградации вследствие локального разогрева можно в том случае, если облучать импульсом с плотностью энергии свыше 1 Дж/см^2 и длительностью около 1мкс. В этом случае возможен локальный разогрев МФП до 300°C , что может привести к испарению мышьяка из СКЯ и деградации ГФС. Таким образом, первые эксперименты подтвердили предположение о стойкости ФП СКЯ и ГФС на их основе к воздействию ИЛИ. Дальнейшие исследования в данном направлении проводились с использованием импульсных источников ИЛИ.

4.5.2. Облучение в импульсном режиме.

Дальнейшие экспериментальные исследования стойкости ГФС на основе СКЯ по отношению к ИЛИ проводились с использованием в качестве источников излучения импульсных лазеров. Целью исследований являлось получение экспериментальных данных по параметрам лазерного излучения импульсного DF-химического лазера, определяющим деградацию ГФС на основе СКЯ [86-88].

Объектами исследования являлись одно- и двухспектральные ГФС формата 320x256 элементов, конструкции и фотоэлектрические

характеристики которых описаны в главах 2-4. Односпектральные ГФС имели спектр фоточувствительности близкий к тому, что представлен на рис.4.25. Двухспектральные ГФС имели спектр фоточувствительности ДВ секции аналогичный представленному на рис.4.25. Спектр фоточувствительности КВ секции представлен на рис.4.30.

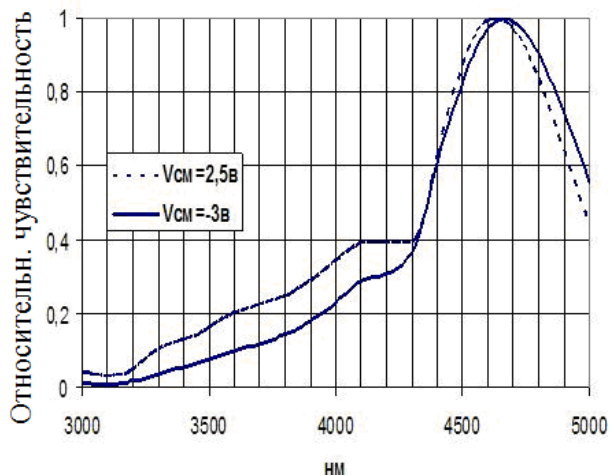


Рис.4.30. Спектр фоточувствительности КВ секции

Конструкции СКЯ, использованных в указанных ГФС, соответствовали по параметрам тем, что представлены в таблицах 2.2 и 2.3. ГФС обоих типов были собраны с использованием flip-chip – технологии и представляли собой формирователи изображений с кадровыми накоплением (см. например, рис. 3.21). ГФС для экспериментов размещали в вакуумируемом корпусе -криостате и охлаждали до температуры жидкого азота. Входная оптика криостата представляла собой широкоформатный объектив (фокусное расстояние 50 см, диаметр 4 см) из германия и была просветлена в диапазонах 4—5 и 8—10 мкм.

ГФС, как и ранее при измерениях их фотоэлектрических характеристик, запускались с помощью ЭБУ, а сигналы с них поступали в РС для последующей обработки. Рассмотренные матричные фотоприемники подвергали воздействию излучения импульсно-периодических молекулярных химических лазеров ИПХЛ-2, генерирующих на смеси DF и DF—CO₂, которые были разработаны в

лаборатории лазерной химии ФГУ ИПХФ РАН (г. Черноголовка, Московская обл.). Основные параметры лазерного излучения представлены ниже.

Длина волны излучения, мкм:

DF..... 3,6—4,2

DF—CO₂.....10,6

Энергия импульсов

на указанных длинах волн, Дж..... 5—15

Диаметр лазерного пучка на выходе, мм..... 40

Расходимость лазерного пучка, мрад:

на длинах волн 3,6—4,2 мкм.....2

на длине волны 10,6 мкм.....5

Длительность импульсов, мкс..... 2—4

Форма волновой поверхности лазерного пучка близка к гауссовой. Оптическая система позволяла управлять размером поперечного сечения пучка, а также плотностью мощности излучения с помощью нейтральных ослабителей. Для формирования тестового сигнала в фотоприемнике использовали маломощную специальную лампу накаливания, спектр излучения которой близок к спектру абсолютно черного тела и при выборе режима работы перекрывал рабочие диапазоны чувствительности исследуемых матриц.

Конструкция ГФС предполагала его освещение через подложку. ГФС длинноволнового диапазона (8—12 мкм) в первой серии экспериментов облучали при комнатной температуре импульсами лазера, генерирующего излучение на смеси DF (3,6—4,2 мкм) с длительностью импульса 3 мкс. Поперечное сечение лазерного пучка ограничивали таким образом, что площадь пятна излучения не превышала 7—8 % от общей площади матрицы. Проведенные эксперименты показали, что чувствительность матричных фотоприемников практически не меняется после их облучения, вплоть до плотности энергии 3,5 Дж/см². Основным результатом такого воздействия сводился к некоторому росту шумов при регистрации тестового сигнала. При увеличении плотности энергии излучения в импульсе до 4 Дж/см² происходит резкое

падение чувствительности примерно на 30 % от первоначального уровня. При плотности мощности $8,2 \text{ Дж/см}^2$ сигнал падает на 90 % от исходного уровня и на внешней поверхности МФП появляются видимые разрушения, что свидетельствует о необратимом характере деградационных процессов. При плотности энергии излучения свыше 10 Дж / см^2 наступает полная потеря чувствительности матричного фотоприемника. Двухспектральную ГФС подвергали облучению импульсами лазеров и на DF, и на смеси DF—CO₂ длительностью 3 мкс. Коэффициент поглощения излучения в диапазоне длин волн 3,6—4,2 мкм элементами, чувствительными в КВ диапазоне, больше примерно в 6 раз по сравнению с аналогичным коэффициентом поглощения элементами, чувствительными в ДВ диапазоне. В то же время значение коэффициента поглощения излучения с длиной волны 10,6 мкм фоточувствительными элементами дальнего ИК-диапазона близко по величине к значению аналогичного коэффициента поглощения элементами, чувствительными в спектральном диапазоне 3,6—4,2 мкм. В процессе исследований было обнаружено, что порог необратимых деградационных эффектов при облучении DF-лазером в пределах погрешности измерений одинаков как для элементов, чувствительных в КВ диапазоне, так и для элементов, чувствительных в ДВ диапазоне, и составляет примерно $3,8 \text{ Дж / см}^2$. При воздействии импульсами излучения с длиной волны 10,6 мкм деградационные эффекты начинают проявляться при плотности энергии $0,8 \text{ Дж / см}^2$ для элементов, чувствительных в КВ диапазоне, и при $2,8 \text{ Дж/ см}^2$ для элементов, чувствительных в ДВ диапазоне. Исходя из полученных результатов, было сделано предположение, что механизм деградации исследуемых фотоприемников не определяется энергией излучения, поглощенной в фоточувствительном материале. Вместе с тем, очевидно, что причиной обнаруженных деградационных эффектов являются процессы, связанные с преобразованием энергии оптического излучения в тепловую. В

отличие от ситуации, когда регистрируемое излучение полностью поглощается в фоточувствительной области фотоприемника, как например в узкозонных материалах, в рассматриваемом случае поглощение происходит, по-видимому, в приконтактных областях ЧЭ. В этих областях формируются сильно легированные слои GaAs (см. таблицы 2.2 и 2.3.) суммарной толщиной около 2 мкм. В таких слоях может происходить поглощение ИК излучение на свободных носителях. Кроме того, на поверхности полупроводникового контактного слоя осаждается слой Au:Ge, который затем вжигается в GaAs, вследствие чего образуется слой материала с высокой степенью разупорядочения структуры, обладающий более высоким коэффициентом поглощения, чем у полупроводника. При высокой интенсивности лазерного излучения именно в указанных приконтактных слоях происходит максимальное поглощение света и вызванное этим выделение тепла, и, следовательно, возникают термоупругие механические напряжения, приводящие к деградации контактов и при дальнейшем повышении интенсивности излучения к разрушению полупроводникового материала в объеме МФП. Расчет величин указанных напряжений достаточно сложен из-за отсутствия информации об оптических, тепловых и механических свойствах материала приконтактного слоя. Большие трудности возникают также при попытках определения температуры, до которой нагреваются в поле интенсивного лазерного излучения различные области матрицы. Обычно подобные оценки выполняются путем решения уравнения теплопроводности, как это практикуется в задачах с однородными полупроводниковыми материалами [89 - 91]. Однако в данном случае такой подход затруднен из-за отсутствия надежных данных по теплофизическим свойствам рассматриваемого фоточувствительного материала. Расчет, выполненный по модели, предложенной в работе [91] для случая, когда в качестве оптических характеристик использовали характеристики материала СКЯ, а в качестве теплофизических — для арсенида

галлия, показал, что температура фоточувствительной области даже при уровнях воздействия, соответствующих началу необратимых процессов деградации, не превышает 450 К и далека от температуры плавления материала. То, что определяющую роль в процессах деградации исследуемых матричных фотоприемников играет именно приконтактная область, подтверждается также анализом формы кратеров, возникающих при испарении материала матрицы. При уровнях плотности энергии воздействия более 15 Дж/см^2 происходит испарение полупроводниковой структуры, вплоть до появления на дне кратера материала контактных столбиков. На снимках, приведенных на рис.4.31, на подложке МФП отмечаются побежалости, образующиеся в результате быстрого неравномерного по поверхности ГФС нагрева и последующего остывания материала подложки и внутренних слоев МФП на СКЯ. Полученный результат свидетельствует о том, что основной источник тепла формируется в приконтактной области, от которой и происходит процесс возгонки материала. В противном случае глубина кратера имела бы монотонную зависимость от плотности энергии в лазерном импульсе. Используя предположение о разогреве контактных областей МФП в ГФС как основной фактор, вызывающий деградацию последней, проанализируем данный процесс с помощью упрощенной математической модели.

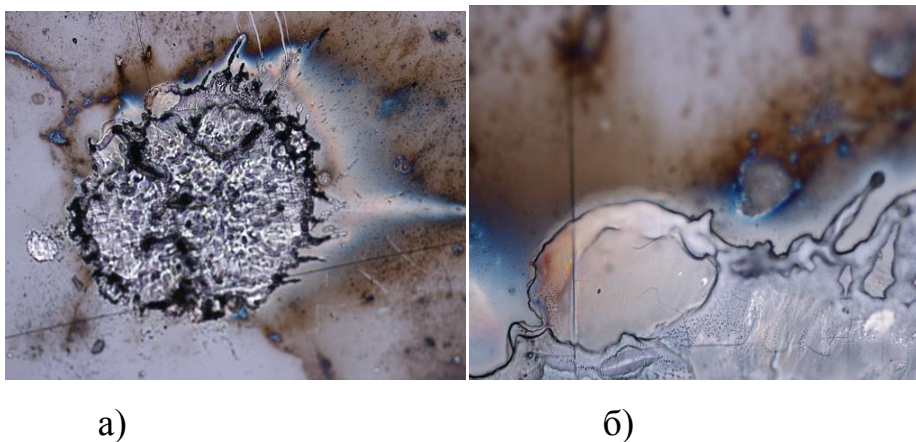


Рис.4.31. Снимки кратера, возникающего после воздействия импульсом $15 \text{ Дж} \cdot \text{см}^{-2}$ под микроскопом при увеличении $\times 250$: кратер (а), край кратера (б)

4.5.3. Моделирование процесса разогрева ГФС и интерпретация результатов

Для упрощения аналитических выражений воспользуемся следующей моделью ГФС: МФП в ней располагается на поверхности кремниевого МП, будучи соединенным с последним посредством индиевых столбиков. Мультиплексор располагается на посадочном месте, которое имеет постоянную температуру и может рассматриваться как среда с бесконечными теплоемкостью и теплопроводностью. Лазерное излучение направляется на ГФС через подложку МФП и поглощается в тонкой области, содержащей, кроме собственно СКЯ, сильно легированные контактные слои n^+ -типа и металлическую пленку из Au:Ge на поверхности фоточувствительных элементов, также существенно поглощающие ИК излучение. Будем считать, что излучение равномерно засвечивает входную поверхность МФП. Запишем уравнение для баланса энергии, поглощаемой и распространяющейся в описанной структуре:

$$\Delta Q_{\text{фп}} = \Delta Q_{\text{вх}} - \Delta Q_y \quad (4.7)$$

где $\Delta Q_{\text{фп}}$ - энергия, аккумулируемая в поглощающей области МФП в течение импульса лазерного излучения; $\Delta Q_{\text{вх}}$ - энергия, поглощаемая в МФП за то же время; ΔQ_y - часть поглощенной энергии, уходящая из фотоприемника в направлении мультиплексора. Здесь мы пренебрегаем утечкой энергии из области поглощения в подложку МФП, поскольку последняя изготовлена из GaAs, который имеет коэффициент теплопроводности в несколько раз меньше чем Si, из которого изготовлен МП. Для аккумулируемой в поглощающей области энергии можно записать:

$$\Delta Q_{\text{фп}} = m_{\text{фп}} \cdot C_{\text{GaAs}} \cdot \Delta T = \rho_{\text{GaAs}} \cdot l_{\text{фп}} \cdot S \cdot C_{\text{GaAs}} \cdot \Delta T \quad (4.8)$$

где $m_{\text{фп}} = \rho_{\text{GaAs}} \cdot l_{\text{фп}} \cdot S$ - обобщенная масса поглощающей излучение области МФП, ρ_{GaAs} - плотность GaAs; $l_{\text{фп}}$ и S - толщина и площадь указанной области, C_{GaAs} - удельная теплоемкость GaAs, ΔT - приращение температуры

области, вызванное поглощением излучения. Для поглощенной оптической энергии можно записать:

$$\Delta Q_{\text{вх}} = P_{\text{вх}} \cdot \eta \cdot \Delta t \cdot S \quad (4.9)$$

где $P_{\text{вх}}$ – плотность мощности входного излучения; η – доля его, поглощенная в МФП, с учетом отражения от поверхности последнего; Δt – длительность лазерного импульса. Для описания ΔQ_y , строго говоря, нужно решать нестационарное уравнение теплопроводности. Чтобы избежать анализа громоздких выражений, которые дает такое решение, и получить более наглядный результат, сделаем ряд упрощающих предположений. Рассмотрим решение уравнения теплопроводности:

$$T_t(x,t) = a \cdot T_{xx}(x,t) \quad (4.10)$$

которое может быть представлено в обобщенном виде [92]:

$$T(x,t) = C \cdot \exp(-q^2 a t) \cdot \exp(\pm i q x) \quad (4.11)$$

В выражении (4.11) экспоненциальные сомножители определяют временную и пространственную составляющие процесса установления температуры $T(x,t)$ в среде. При этом множитель $(q^2 a)^{-1}$ – есть некоторая постоянная времени τ_{Si} , характеризующая масштаб временного интервала, в течение которого устанавливается равновесное распределение температуры, q^{-1} – по порядку величины соответствует протяженности рассматриваемой среды, т.е. в нашем случае сравнима с толщиной кремниевого мультиплексора. Можно показать, что для нашего случая $a = \kappa_{\text{Si}} / (\rho_{\text{Si}} \cdot C_{\text{Si}})$, где входящие в правую часть равенства сомножители – коэффициент теплопроводности, плотность и удельная теплоемкость кремния соответственно. Оценим величину $(q^2 a)^{-1}$, подставив вместо q , величину, обратную толщине мультиплексора $l_{\text{Si}} = 0,06$ см; в выражение для a следующие значения: $\kappa_{\text{Si}} = 1,49$ Вт/см·К; $\rho_{\text{Si}} = 2,33$ г/см³; $C_{\text{Si}} = 0,68$ Дж/г·К. Расчет показывает, что характерное время установления

равновесного распределения температуры в рассматриваемой структуре составляет $3,8 \times 10^{-3}$ с, что на несколько порядков больше длительности лазерных импульсов, использованных в наших экспериментах. Это позволяет предположить, что перенос тепла в мультиплексоре за время действия лазерного импульса Δt происходит на расстояниях порядка $l_{Si} \Delta t / \tau_{Si}$. Поскольку при переносе тепла часть его аккумулируется в среде, в которой происходит перенос, а другая часть распространяется в направлении, определяемом температурным градиентом, можно предположить, что первая из указанных составляющих будет в основном сосредоточена в области размером порядка $l_{Si} \Delta t / \tau_{Si}$, а соответствующее ей значение будет: $\Delta Q_y^a = \rho_{Si} \cdot C_{Si} \cdot (l_{Si} \Delta t / \tau_{Si}) \cdot S \cdot \Delta T$. Поскольку нас не интересует точное пространственное распределение температуры по толщине мультиплексора, вторую составляющую можно записать в следующем виде: $\Delta Q_y^{тп} = \Delta t \cdot S \cdot \alpha_{Si} \cdot \Delta T / l_{Si}$. Тогда суммарный вклад утечки тепла в мультиплексор:

$$\Delta Q_y = \Delta Q_y^a + \Delta Q_y^{тп} = 2 \Delta t_{ли} \cdot S \cdot \alpha_{Si} \cdot \Delta T / l_{Si} \quad (4.12)$$

Подставляя (4.8), (4.9) и (4.12) в (4.7), получим

$$\rho_{GaAs} \cdot l_{фп} \cdot C_{GaAs} \cdot \Delta T = P_{вх} \cdot \eta \cdot \Delta t - 2 \Delta t \cdot \alpha_{Si} \cdot \Delta T / l_{Si} \quad (4.13)$$

Разделив левую и правую части уравнения на Δt и устремив его к 0, получим:

$$d(\Delta T)/dt + \Delta T/\tau = P_{вх} \cdot \eta \cdot (\rho_{GaAs} \cdot l_{фп} \cdot C_{GaAs})^{-1} \quad (4.14)$$

где $\tau = \rho_{GaAs} \cdot l_{Si} \cdot l_{фп} \cdot C_{GaAs} / 2 \cdot \alpha_{Si}$. Решением уравнения (4.14) будет выражение:

$$\Delta T(t) = P_{вх} \cdot \eta \cdot l_{Si} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) / 2 \alpha_{Si} \quad (4.15)$$

Полученное выражения описывает процесс установления локального температурного баланса в системе МФП – МП.

За время порядка τ температура ΔT в области поглощения нарастает почти линейно, а затем стабилизируется на уровне $P_{вх} \cdot \eta \cdot l_{Si} / 2 \alpha_{Si}$.

Оценим величину $\tau = \rho_{GaAs} \cdot l_{Si} \cdot l_{фп} \cdot C_{GaAs} / 2 \cdot \alpha_{Si}$, подставляя использованные выше значения соответствующих параметров для Si, а также $\rho_{GaAs} = 5,3$ г/см³, $C_{GaAs} = 0,35$ Дж/г К, $l_{фп} = 5 \times 10^{-4}$ см. Получаем $\tau = 1,7 \times 10^{-5}$ с. Т.е. при

длительностях импульсов менее полученной величины приращение температуры будет линейно зависеть от энергии импульса – от произведения плотности мощности на длительность импульса. При длительностях больших τ приращение температуры будет определяться главным образом плотностью мощности.

Для дальнейших оценок выделим два значения температуры : 157°C и 300°C . Первое из них соответствует температуре плавления индия, которое в нашем случае может приводить к разрушению электрических контактов между МФП и мультиплексором. Второе значение соответствует температуре, при которой из GaAs начинает испаряться мышьяк, т.е. происходит необратимая деградация материала МФП. Предположим, что облучение ГФС производится короткими импульсами, такими, что $t < \tau$. Тогда приращение температуры в активной области МФП может быть представлено с учетом (4.15) как:

$$\Delta T(t) = P_{\text{вх}} \cdot \eta \cdot I_{\text{Si}} \cdot t / 2\tau \alpha_{\text{Si}} \quad (4.16)$$

Плотность энергии, обеспечивающей данное температурное приращение, будет:

$$P_{\text{вх}} \cdot t = 2 \cdot \Delta T \cdot \tau \cdot \alpha_{\text{Si}} / \eta \cdot I_{\text{Si}} \quad (4.17)$$

Следует иметь в виду, что ΔT необходимо отсчитывать от рабочей температуры фотоприемника, т.е. по крайней мере, от температуры жидкого азота. Поэтому для первой из отмеченных нами выше температур - 157°C получим около $3,0 \text{ Дж/см}^2$. Для второй температуры 300°C получим $4,25 \text{ Дж/см}^2$. В расчетах использовалось значение $\eta = 0,1$, которое, согласно многочисленным экспериментам, представляется вполне правдоподобным.

Из экспериментов получено, что образование кратеров на поверхности МФП происходит при плотности энергии 15 Дж/см^2 . Согласно (4.16) это соответствует температуре активной области МФП около 1500°C , которая значительно превышает температуру плавления GaAs, равную 1240°C .

Численные оценки пороговых значений энергии лазерного импульса, при которых могут начаться процессы деградации, полученные с использованием предложенной математической модели процесса разогрева активной области МФП, с удовлетворительной (с учетом сделанных упрощающих предположений при построении модели) точностью близки к экспериментальным результатам. Вопрос о доминирующем механизме деградации ГФС требует дополнительных экспериментальных исследований. Однако тот факт, что расплавление индиевых столбиков происходит при самой низкой из рассмотренных температуре, а их положение в ГФС не зафиксировано клеем, заполняющим промежуток между МП и МФП, дает основание полагать, что деградация начинается именно с разрушения индиевых контактов. Предложенная модель позволяет выделить направления совершенствования конструкции ГФС с целью повышения ее стойкости к лазерному воздействию. Главное из них – это уменьшение толщины МП. Из (4.15) видно, что при $t > \tau$ величина ΔT зависит только от толщины МП. Причем эта зависимость линейная, т.е. уменьшение толщины МП всего в 2 раза приведет к аналогичному уменьшению ΔT . Например, при плотности энергии $3,0 \text{ Дж/см}^2$ в условиях, использованных при расчетах выше, температура активной области МФП не достигнет и 0°C . Уменьшение толщины МП в 10 раз до 60 мкм позволит получить еще более значительный результат.

Выводы к главе 4:

1. Проведены измерения фотоэлектрических характеристик ГФС различных конструкций. Сравнение полученных результатов с результатами измерений зарубежных аналогов показывает, что лучшие из разработанных в рамках данной работы образцы ГФС по своим фотоэлектрическим характеристикам сопоставимы с зарубежными приборами того же класса (т.е. имеющими те же формат, шаг ЧЭ, спектральный диапазон) и могут найти применение в современной тепловизионной аппаратуре различного назначения.

2. Проведены исследования возможностей использования одно- и двухспектральных ГФС для получения ИК изображений. При использовании односпектральных ГФС были получены ИК изображения удовлетворительного качества, которое может быть значительно улучшено при использовании более совершенных методов обработки изображений. При использовании двухспектральных ГФС были получены изображения различно нагретых объектов одновременно в средневолновом и длинноволновом диапазонах. Данный результат получен в России впервые.

3. Экспериментальные исследования одно- и двухспектральных ГФС на основе СКЯ показали, что они обладают значительной стойкостью по отношению к интенсивному лазерному излучению (ИЛИ) как в непрерывном, так и в импульсном режиме облучения. В импульсном режиме необратимые деградационные процессы в ГФС начинаются при уровнях плотности энергии в импульсе ИЛИ свыше 3 Дж/см^2 и не зависят явно от спектров фоточувствительности ГФС. Экспериментально установлено, что деградационные процессы в исследованных ГФС могут начинаться при уровнях плотности энергии в импульсе ИЛИ, не приводящих к изменениям физических свойств фоточувствительного материала. Возможными причинами полученного результата являются термоупругие напряжения, возникающие в приконтактных областях при разогреве ИЛИ, а также низкая температура плавления индия. Указанные причины в совокупности могут приводить к нарушению электрических контактов между МФП и МП. Численные оценки, сделанные на основе разработанной математической модели процесса разогрева ГФС под действием ИЛИ, с удовлетворительной точностью совпадают с экспериментальными результатами. Согласно разработанной модели одним из путей повышения стойкости ГФС по отношению к ИЛИ может быть использование мультиплексора с тонкой подложкой.

ГЛАВА 5.

РАЗРАБОТКА ФПУ НА ОСНОВЕ СКЯ ГФС И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В СОСТАВЕ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ ПРИБОРОВ

5.1 Особенности ФПУ на основе СКЯ.

Фотоприемное устройство или ФПУ является ключевым элементом оптико-электронных систем, предназначенных для формирования и обработки изображений в различных участках спектра электромагнитного излучения. Современные ФПУ, предназначенные для работы в средней и дальней областях ИК спектра, как правило, содержат охлаждаемый матричный фотоприемник, размещенный в корпусе - криостате вакуумной или газонаполненной конструкции, а также микрокриогенную систему (МКС) того или иного типа. Особенностью ФПУ на основе СКЯ, разработке которых посвящена настоящая работа, является необходимость охлаждения содержащегося в них фотоприемника до температур около 65К, что налагает более жесткие требования на характеристики корпуса-криостата и МКС, чем в случае традиционных ФПУ с фотоприемниками на основе узкозонных материалов. Ужесточение указанных характеристик связано с тем, что охлаждение до температур ниже точки кипения азота требует значительно больших энергетических затрат в МКС и более низких паразитных теплопритоков в корпусе - криостате. В связи с этим принципиальным является использование в составе ФПУ корпус – криостат с вакуумной изоляцией (ВКК), что позволяет значительно снизить тепловую нагрузку на микрокриогенную систему, уменьшить теплоприток и охлаждаемую массу (за счет отсутствия конвективной составляющей), сократить время выхода фотоприёмника на рабочий режим. О современном уровне развития СКЯ ФПУ говорилось в главе 1. Здесь напомним лишь, что сегодня промышленно выпускаются тепловизионные приборы с ФПУ на основе СКЯ ГФС формата 640 x 480 элементов на спектральные диапазоны как 3-5 мкм, так и 8 -12 мкм. Имеются

сообщения и о создании СКЯ ФПУ формата свыше 1000x1000 элементов. СКЯ ФПУ, разработанные в настоящей работе, по отдельным принципиальным характеристикам (пороговая чувствительность, формат, шаг и т.д.) сопоставимы с указанными выше аналогами. Содержание работ на наиболее значимых этапах разработок указанных СКЯ ФПУ кратко представлено ниже. Данные материалы показывают наиболее важные проблемы, возникающие при создании СКЯ ФПУ, а также пути их разрешения.

5.2 Результаты исследований по созданию экспериментальных образцов СКЯ ФПУ

При разработке охлаждаемых ФПУ наряду с достижением требуемых фотоэлектрических характеристик стремятся обеспечить в его конструкции совместимость ГФС с ВКК, МКС и электронным блоком управления и предварительной обработки сигналов (ЭБУ). Указанные компоненты, как правило, и определяют состав ФПУ. В данном разделе представлены результаты по созданию образцов ФПУ с использованием ГФС форматов 256x256 элементов и 320x256 элементов, описанных в разделе 3.2.2.4. Представленные материалы достаточно подробно отражают объем и содержание возникающих на данном этапе проблем, выявление и частичное решение которых значительно упростило работу по созданию с ФПУ большего формата.

Существуют различные сценарии подбора компонентов ФПУ: от одновременной разработки всех входящих в ФПУ компонентов до использования части уже готовых и разработки недостающих. Перед началом работ по созданию ФПУ с ГФС формата 256x256 элементов единственным разработанным компонентом, который можно было использовать в составе ФПУ, была лишь микрокриогенная система (МКС) на основе цикла Стирлинга производства ООО «НТК «Криогенная техника» (г. Омск). Поэтому кроме ГФС

в рамках указанной работы были созданы образцы ВКК и ЭБУ. Остановимся подробнее на МКС и ВКК.

5.2.1. Микрокриогенная система (МКС)

В современных тепловизионных системах для обеспечения необходимой рабочей температуры ГФС в составе ФПУ обычно используют МКС замкнутого цикла, работающие по циклу Стирлинга. Такие МКС могут обеспечивать рабочую температуру на посадочном месте корпуса - криостата вплоть до 50К. Большинство отечественных МКС такого типа разработаны для обеспечения рабочих температур ФПУ около 80К. Для обеспечения же работы ГФС на основе СКЯ типов обычно требуется охлаждение до 60-65К. При этом холодопроизводительность такой МКС должна обеспечивать указанные температуры при теплопритоках на посадочном месте ФПМ не менее 0,5 Вт. Анализ спецификаций на известные отечественные МКС и результатов их эксплуатации на различных предприятиях показал, что для решения указанных выше задач наиболее подходящей является МКС серии МСМГ-5А -1,3/80 типа сплит - Стирлинг. По предварительным данным, предоставленным производителем МКС, указанная машина допускала охлаждение посадочного места при тепловой нагрузке не менее 0,5 Вт до 50К, однако ТУ определяет штатный режим работы на уровне 80К. Выбор именно сплит – конфигурации был основан на предположении о том, что в этом случае можно ожидать меньшего влияния механических вибраций, генерируемых компрессором МКС. Кроме того, указанная машина имела компрессор с так называемым линейным приводом, что обеспечивало, по утверждению разработчиков МКС, достижение ею ресурса в 10000 часов.

На рис. 5.1 представлено изображение МКС МСМГ-5А-1.3/80 с блоком управления.



Рис.5.1. Внешний вид МКС типа MCSMG-5A-1.3/80

Для определения возможности работы МКС типа MCSMG-5A-1,3/80 в условиях, не предусмотренных ТУ, были проведены испытания данной МКС в НТК «Криогенная техника». Вместо ВКК использовался его имитатор, производящий тепловую нагрузку на посадочном месте около 0,75 Вт и имеющий охлаждаемую тепловую массу 10г (в пересчете на медь). МКС включалась в режиме без термостабилизации, т.е. по существу в пусковом режиме. Оказалось, что выход на температурный уровень 53К происходит за 17минут при потребляемой мощности 143 Вт. По мнению разработчиков данной МКС, ее работа в указанном режиме сокращает ресурс до нескольких сотен часов, поскольку значительно возрастает износ деталей. Таким образом, полученные результаты показали, что для работы в диапазоне температур ниже 70К нужна другая, специально сконструированная под этот температурный диапазон МКС. Усовершенствованные варианты конструкции МКС были разработаны позже.

5.2.2 Вакуумируемый корпус-криостат (ВКК)

Первоначально решение задачи создания ВКК предполагалось производить следующим путем: использовать разработанную ВНЦ ГОИ им.С.И. Вавилова модель НП79-000.ТУ с некоторыми изменениями,

касающимися количества и размеров вакуумных электрических разъемов, и конструкции посадочного места. На рис.5.2. представлен чертеж корпуса криостата. Важно отметить, что корпус такой конструкции совместим с МКС замкнутого типа МСМГ-5А-1.3/80, описанной в предыдущем разделе.

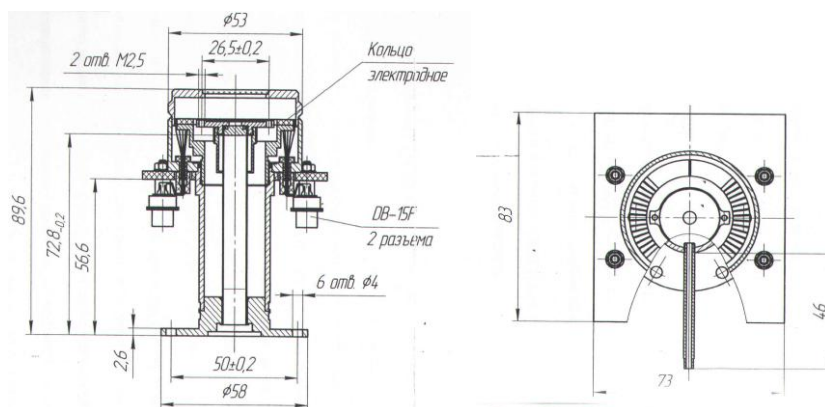


Рис.5.2. Чертеж корпуса криостата НП79-000.ТУ.

Внешний вид макета корпуса криостата представлен на рис.5.3 а) и б). На рис. 5.3 б) корпус криостат закрыт крышкой с входным окном из ZnSe. Измерения теплопритоков в указанных ВКК, проведенные в ООО «НТК «Криогенная техника» по уточненной методике РТМ 3-1033-77 дали величину 0,47 Вт.



а)

б)

Рис.5.3. Внешний вид макета корпуса криостата : а) без крышки; б) с крышкой с входным окном.

Были проедены измерения зависимостей температуры криостатирования ВКК на посадочном месте от тепловой нагрузки на нем с использованием МКС двух типов: МСМГ-5А-1,8/80 и МСМГ-5А-1,3/80. Первая модель построена по схеме с роторным двигателем, вторая – с линейным приводом. Первая обеспечивает холодопроизводительность 1,8 Вт при температуре криостатирования 80К, вторая при той же температуре – 1.3 Вт. При более низкой холодопроизводительности вторая модель имеет по оценкам ее разработчиков значительно больший ресурс – 10000 часов против 2000 часов у первой. Кроме того, вторая модель имеет пониженный уровень шума, связанного с механическими вибрациями. На рис.5.4 представлено изображение испытательного стенда с МКС МСМГ-5А-1,3/80.



Рис.5.4. Изображение испытательного стенда с МКС МСМГ-5А-1,3/80.

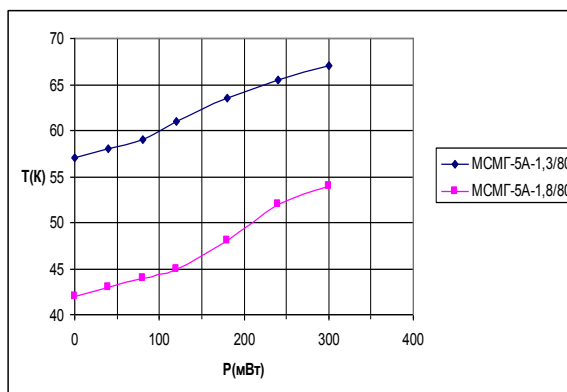


Рис.5.5. Зависимости температуры криостатирования от тепловой нагрузки от имитатора ГФС.

Результаты измерений зависимости температуры криостатирования от тепловой нагрузки от имитатора ГФС представлены на рис.5.5.

Испытания показали, что в ВКК описанной конструкции при стыковке с МКС обоих типов обеспечивается температура криостатирования на посадочном месте при отсутствии тепловой нагрузки от имитатора ГФС ниже 55К (для МСМГ-5А 1,8/80 была достигнута температура 43К). При включении имитатора температура повышается в среднем на 1° на каждые 40 мВт тепловой нагрузки. Учитывая, что, согласно экспериментальным данным, тепловыделение ГФС не превышает 100 мВт, можно было ожидать, что в штатном режиме работы ГФС температура посадочного места поднимется не более чем на $2-3^{\circ}$. Кроме того, поскольку требуемые фотоэлектрические характеристики ГФС обеспечиваются при температуре 60-65К, можно было предполагать, что указанные корпуса - криостаты в сочетании с МКС МСМГ-5А имеют технологический запас, позволяющий размещать в них ГФС большего формата, т.е. с большим тепловыделением. Вместе с тем оказалось, что время выхода на уровень температур даже около 60К превышало 5 минут – обычно задаваемое время выхода на рабочий режим для тепловизионных приборов. Данный результат определил направление усовершенствования как ВКК, так и МКС, которое состояло в том, чтобы проектировать внешнюю оболочку канала охладителя МКС как неотъемлемую часть ВКК. Т.е. канал для стыковки с охладителем является каналом вытеснителя МКС. В этом случае существенно снижаются балластная тепловая масса ВКК и теплопритоки.

5.2.3 Сборка ФПУ

Технология сборки ФПМ включает в себя посадку ГФС на диэлектрической плате в корпус-криостат, распайку площадок с платы на контактное кольцо, запайку корпуса и его откачку (вакуумирование), стыковку

с ЭБУ и МКС. Ниже описан процесс сборки ФПМ на примере изделия с ГФС формата 256x256 элементов .

Посадка ГФС на диэлектрической плате в корпус-криостат.

Диэлектрическая плата с ГФС посредством пайки размещалась на посадочном месте корпуса-криостата. Пайка осуществлялась припоем на основе In-Sn (1:1), температура плавления которого около 125⁰С. Стыкуемые поверхности платы и посадочного места были предварительно залужены указанным припоем. После припайки платы производилась распайка контактных площадок платы на соответствующие площадки на контактном кольце в корпусе криостате. Распайка осуществлялась с использованием оловянно свинцового припоя ПОС-61 и нихромовой проволоки диаметром 30 мкм. Внешний вид ГФС на посадочном месте в ФПУ представлен на рис.3.28.

Запайка и откачка корпуса

После посадки ГФС корпус – криостат закрывался крышкой с окошком, а стык пропаивался припоем ПОС-61. Откачка корпуса осуществлялась вакуумным постом типа DRYTEL до остаточного давления 6×10^{-6} торр в течение 8 часов, при этом осуществлялся подогрев посадочного места через канал охладителя горячей водой с температурой около 90⁰С. Затем медная откачная трубка пережималась. На этом процесс откачки (вакуумирования) заканчивался.

Стыковка с ЭБУ и МКС

Перед измерениями ВКК соединялся через разъемы с ЭБУ и крепился на нем. Использованный в данном примере макет ЭБУ представлял собой прототип ЭБУ, описанного выше в разделе 4.1. Он формировал постоянные и переменные напряжения, необходимые для запуска ГФС и осуществлял передачу аналоговых сигналов с ГФС в РС, для оцифровки и последующей обработки. Макет ФПУ в сборе (без МКС) представлен на рис. 5.6.



Рис.5.6. Макет ФПУ в сборе.

5.3. Измерение характеристик ФПУ

Измерения характеристик ФПУ проводились по той же методике, что и измерения ГФС, с использованием того же набора измерительного оборудования. Основное отличие в измерениях ФПУ заключалось в использовании для его охлаждения не жидкого азота (с откачкой его паров по необходимости), а МКС.

ФПУ с ГФС формата 256x256 элементов

Как и в случае ГФС в измерениях ФПУ данного типа определялся основной параметр – обнаружительная способность и неоднородность чувствительности. Следует отметить, что результаты измерений основных характеристик ФПУ, точнее ГФС в составе ФПУ, мало отличались от результатов, полученных при измерениях характеристик ГФС в составе заливного корпуса-криостата. Главное отличие заключалось в наличии избыточных помех на фоне сигналов с ФПУ при включении МКС. Поэтому при проведении шумовых измерений приходилось на время отключать МКС, что создавало серьезные неудобства и отрицательно сказывалось на воспроизводимости результатов. Тем не менее, в ходе проведенных измерений результаты, представленные на рис.4.6 и 4.7, в основном были подтверждены (с учетом потерь мощности сигнального излучения на входном окне).

ФПУ с ГФС формата 320x256 элементов

Представленные результаты получили свое дальнейшее развитие при разработке фотоприемных модулей на основе описанных СКЯ ГФС формата 320x256 элементов. В работах [6,83,84] представлены результаты исследования зависимостей пороговых характеристик чувствительности ФПУ на основе СКЯ от рабочей температуры и времени накопления.

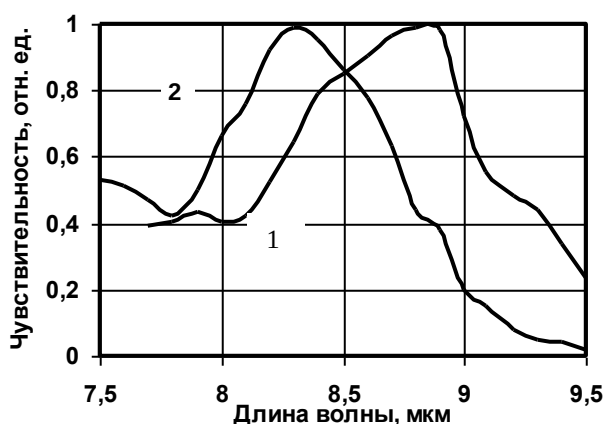


Рис. 5.7. Спектральные характеристики СКЯ ГФС:
1– МОСГЭ; 2-МЛЭ

Заметим, что в указанных работах исследовались ГФС, в которых МФП изготавливались из СКЯ, выращенных как МОСГЭ (ФГУП «НИИ «Полус»), так и МЛЭ (ЗАО «Светлана-Рост»). Спектральные характеристики ГФС, измеренные на тестовых образцах СКЯ, приведены на рис.5.7.

Структуры, полученные с использованием МЛЭ, имели максимум фоточувствительности на длине волны 8,3 мкм, полученные с использованием МОСГЭ – 8,7 мкм. ГФС, изготовленные с использованием указанных СКЯ, имели одинаковую конструкцию, которая описана в в главе 3. Подложка GaAs в МФП после гибридной сборки не удалялась. ГФС были смонтированы в вакуумных металлокерамических криостатах производства ОАО «МЗ

«Сапфир» (www.mzsapphir.ru), охлаждаемом микрокриогенной системой МСМГ-3А-0,6/80 производства НТК «Криогенная техника». Криостаты были снабжены охлаждаемой диафрагмой с диафрагменным числом 1,8. Теплоприток криостата, измеренный по стандартной методике с учетом теплоты отходящих паров жидкого азота не превышал 0,35 Вт. Температура ГФС контролировалась диодным температурным датчиком и изменялась регулировкой микрокриогенной системы. В состав ФПУ входили также закрепленные на криостате малошумящие предварительные усилители и логический повторитель управляющих сигналов. На рис.5.8 представлены фото ГФС и ФПУ на его основе.

Параметры ФПУ измерялись на стенде, обеспечивавшем засветку матрицы широкоапертурным АЧТ и оцифровку сигналов 14-разрядным АЦП с последующей обработкой компьютером. В память для обработки записывались по 32 кадра при температурах АЧТ 20°C и 30°C.

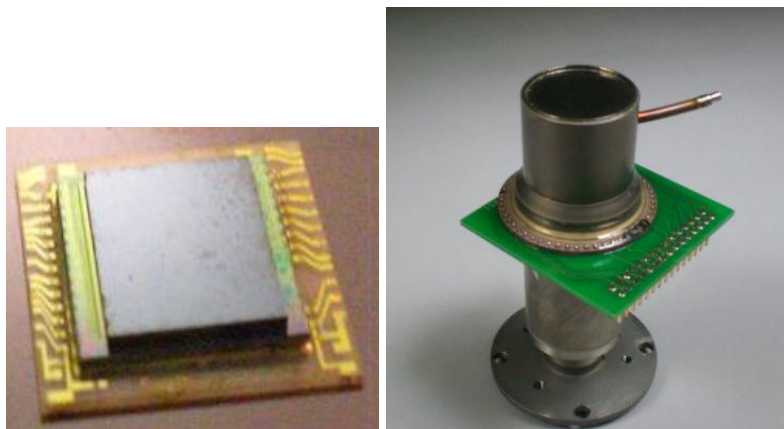


Рис.5.8. Изображение ГФС и ФПУ на его основе.

На рис. 5.9 и 5.10 представлены зависимости эквивалентной шуму разности температур ($NE\Delta T$) от температуры ГФС при переменном времени накопления и напряжении смещения.

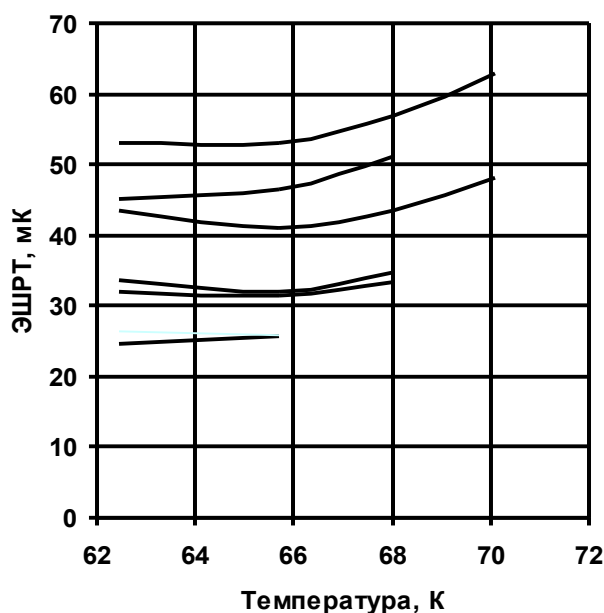


Рис.5.9. Зависимость NEAT от температуры для ФПУ с ГФС с МОСГЭ СКЯ: 1 – $\tau_n=3$ мс, $U_{см}=2,0$ В, 2 – $\tau_n=2$ мс, $U_{см}=2,0$ В, 3 – $\tau_n=3$ мс, $U_{см}=1,5$ В, 4 – $\tau_n=2$ мс, $U_{см}=1,5$ В, 5 – $\tau_n=1$ мс, $U_{см}=2,5$ В, 6 – $\tau_n=1$ мс, $U_{см}=1,5$ В, 3 – $\tau_n=3$ мс, $U_{см}=1,5$ В, 4 – $\tau_n=2$ мс, $U_{см}=1,5$ В, 5 – $\tau_n=1$ мс, $U_{см}=2,5$ В, 6 – $\tau_n=1$ мс, $U_{см}=1,5$ В

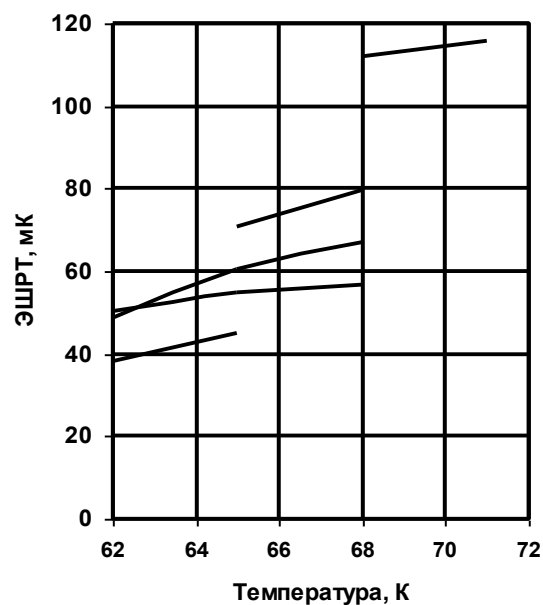


Рис. 5.10. Зависимость NEAT от температуры для ФПУ с ГФС с МЛЭ СКЯ: 1 – $\tau_n=6$ мс, $U_{см}=2,5$ В, 2 – $\tau_n=6$ мс, $U_{см}=2,0$ В, 3 – $\tau_n=4$ мс, $U_{см}=2,5$ В, 4 – $\tau_n=4$ мс, $U_{см}=2$ В, 5 – $\tau_n=4$ мс, $U_{см}=1,5$ В

Аналогичные зависимости были получены также для температурной чувствительности и напряжения шума. Анализ полученных зависимостей показал, что с увеличением времени накопления и напряжения смещения в определенных пределах имеет место увеличение температурной чувствительности и напряжения шума и уменьшение NEAT. При дальнейшем увеличении времени накопления и/или напряжения смещения происходит насыщение сигнала. Область допустимых значений времени накопления и напряжений смещения зависит от рабочей температуры матрицы. При температуре 65К насыщение не наблюдалось при времени накопления 2 мс и напряжении смещения 2,5 В или при времени накопления 3 мс и напряжении смещения 2 В. В этих режимах обеспечивается значение NEAT менее 30 мК. При повышении рабочей температуры до 70К область допустимых значений

времени накопления ограничивается 2 мс при напряжении смещения 1,5 В. При этом обеспечивается значение $NE\Delta T$ менее 50 мК.

Для анализа зависимостей $NE\Delta T$ от характеристик ФПУ и внешних факторов, определяющих условия его функционирования используем следующее соотношение:

$$NE\Delta T = u_n \cdot C_{in} \cdot [t_{in} \cdot S^{\max} \cdot F(T, \lambda)]^{-1},$$

$$F(T, \lambda) = \int S_{rel}(\lambda) \cdot dR(\lambda, T)/dT \cdot d\lambda \quad (5.1)$$

Где u_n – шумовое напряжение ЧЭ на выходе из предварительной электроники, включающий в себя генерационно-рекомбинационный (ГР) шум фотоприемника, обусловленный тепловой и оптической генерацией носителей тока, а также составляющую, связанную с собственными шумами мультиплексора и предварительной электроники; C_{in} – интегрирующая емкость накопительной ячейки мультиплексора; t_{in} – время интегрирования сигнала и шума; $S^{\max}$ – токовая чувствительность ФЧЭ в максимуме спектра фоточувствительности; S^{rel} – относительная спектральная характеристика ФЧЭ; $dR(\lambda, T)/dT$ – спектральная плотность мощности излучения АЧТ на поверхности ФЧЭ в единичном температурном интервале, включающая потери на отражение и поглощение. Поскольку условия измерений для всех ФПУ одинаковы, то $F(T, \lambda)$ в (5.1) будет изменяться в зависимости от типа фотоприемника в ФПУ только за счет $S_{rel}(\lambda)$. Поэтому далее сосредоточим внимание на соотношении $u_n \cdot C_{in} \cdot [t_{in} \cdot S^{\max}]^{-1}$. Рассмотрим наиболее простой случай, когда u_n определяется шумом предварительной электроники, включая наводки, и явно не зависит от t_{in} . Тогда, учитывая, что $S^{\max} = (e/h\nu_{\max}) \cdot \eta^{\max} \cdot g$, где $h\nu_{\max}$ и $\eta^{\max}$ – энергия фотонов и квантовая эффективность, соответствующие максимуму спектра фоточувствительности ФЧЭ, g – коэффициент фотоэлектрического усиления в ФЧЭ, e – заряд электрона, получим:

$$NE\Delta T \sim u_n \cdot C_{in} \cdot [t_{in} \cdot (e/h\nu_{\max}) \cdot \eta^{\max} \cdot g]^{-1} \quad (5.2)$$

Из (5.2) следует, что в температурном диапазоне, в котором доминирует шум предварительной электроники, $NE\Delta T$ не зависит от температуры фотоприемника и обратно пропорционален произведению $t_{in} \cdot g$, т.е. времени интегрирования и напряжению смещения на фотоприемнике. Представленные экспериментальные зависимости находят удовлетворительное объяснение в рамках рассматриваемой модели. Действительно, заметный рост шума с температурой начинается примерно с 67-70 К, а при более низких температурах он от температуры не зависит. С другой стороны, вполне очевидно, что $NE\Delta T$ тем меньше, чем больше $t_{in} \cdot g$, для обоих типов ФПУ. Оценки показывают, что измеренный в наших экспериментах шум, по крайней мере, в два-три раза выше, чем ожидаемый от ФЧЭ. Таким образом, полученные результаты по $NE\Delta T$ определяются не фундаментальными ограничениями, связанными с шумами фотоприемников, а шумом предварительной электроники, и могут быть значительно улучшены, о чем будет сказано ниже.

Остановимся теперь на различиях в величинах $NE\Delta T$, полученных с ФПУ на основе СКЯ, изготовленных с помощью различных технологий. ФПУ на основе СКЯ, выращенных методом МОСГЭ, имеют более низкие значения $NE\Delta T$, чем ФПУ на основе СКЯ, выращенных методом МЛЭ. Причиной этого является более низкое значение абсолютной чувствительности у ФПУ последнего типа [83-85]. Причинами такого результата являются не только более коротковолновое положение спектра у МЛЭ СКЯ (см. рис.5.7), но и различная зависимость фоточувствительности структур от поляризации излучения. Детали указанного эффекта обсуждались в главе 2 [47]. В результате при одинаковой конструкции ФЧЭ на основе МОСГЭ СКЯ данного типа имеют более высокую квантовую эффективность и более низкую $NE\Delta T$.

Оценим теперь возможные пути уменьшения $NE\Delta T$ в случае, когда шум ФПУ будет определяться процессами генерации и рекомбинации носителей

тока в ФЧЭ. В этом случае выражение (5.1) без учета $F(T, \lambda)$ может быть записано в следующем виде:

$$NE\Delta T \sim 2(h\nu_{\max}/\eta^{\max}) \cdot [(G_{th} + G_{opt}) \cdot d \cdot \sigma \cdot \Delta f]^{1/2} \quad (5.3)$$

где G_{th} и G_{opt} – скорости тепловой и оптической (фоновой) генерации свободных носителей в ФЧЭ; d – толщина активной области ФЧЭ, σ – площадь ФЧЭ; Δf – полоса частот, в которой регистрируется шум. Для дальнейшего анализа введем ограничение на время интегрирования из условия, что в течение его накопительная емкость будет заполняться только на половину, т.е. $t_{in} = N_{in} \cdot [2 \cdot (G_{th} + G_{opt}) \cdot d \cdot \sigma \cdot g]^{-1}$, где N_{in} – максимальное число электронов, которое может быть размещено в накопительной ячейке мультиплексора. Учитывая, что $\Delta f = (2 t_{in})^{-1}$, получим:

$$NE\Delta T \sim 2(h\nu_{\max}/\eta^{\max}) \cdot (G_{th} + G_{opt}) \cdot d \cdot \sigma \cdot (g/N_{in})^{1/2} \quad (5.4)$$

Рассмотрим два наиболее характерных случая условий функционирования ФПУ.

1. ФПУ находится в BLIP-режиме, т.е. $G_{th} \ll G_{opt}$. Из (5.4) следует, что до тех пор, пока ФПУ находится в BLIP-режиме, $NE\Delta T$ не будет явно зависеть от температуры ФЧЭ. При этом для достижения минимально возможных значений $NE\Delta T$ необходимо, чтобы ФЧЭ работал при минимально возможных g , т.е. при минимальных напряжениях смещения. Данный результат уже обсуждался ранее [1], и может рассматриваться как одно из преимуществ QWIP по сравнению с фотодиодными приемниками.

2. ФПУ находится в режиме доминирования тепловой генерации носителей $G_{th} \gg G_{opt}$. Поскольку G_{th} зависит от температуры $\sim \exp(-\Delta E/kT)$, где ΔE – термическая энергия активации основного состояния в квантовой яме, k – постоянная Больцмана, то $NE\Delta T$ будет непрерывно возрастать во всем температурном диапазоне, где выполняется указанное выше неравенство. Как и в предыдущем случае, для достижения минимально возможных значений $NE\Delta T$

необходимо, чтобы ФЧЭ работал при минимально возможных g , т.е. при минимальных напряжениях смещения.

Сделанные выше оценки приводят к несколько неожиданному заключению: чем ниже g , т.е. абсолютная чувствительность, тем выше пороговая чувствительность. Объяснить полученный результат можно следующим образом. При фиксированной величине N_{in} величина t_{in} тем больше, чем меньше g . В свою очередь, чем больше t_{in} , тем уже полоса частот, в которой интегрируется шумовой ток. Иными словами, один и тот же сигнальный заряд сопровождается тем меньшим шумом, чем больше время, за которое он накоплен.

Представленные выше результаты по созданию ФПУ характеризуют собой начальные этапы решения данной проблемы. Значительное ускорение указанные работы получили при переходе к разработке приборов большего формата - вплоть до 640x512 элементов,- с существенно меньшим шагом -20 мкм. Указанный переход был направлен на разработку базовых технологий, позволяющих создавать ФПУ, отвечающие современным требованиям в данной области.

5.4. Результаты разработки ФПУ форматов 384x288 и 640x512 элементов с шагом 20 мкм.

Разрабатываемые ФПУ [93,94] согласно техническим требованиям представляли собой гибридную фоточувствительную схему (ГФС), размещенную в ВКК, состыкованном с МКС замкнутого типа.

В ходе выполнения ОКР были разработаны два типа ФПУ: формата 384 x 288 элементов и формата 640 x 512 элементов.

В состав ФПУ обоих типов входят : ГФС соответствующего формата, ВКК, МКС замкнутого типа.

По сравнению с описанными выше рассматриваемые в настоящем разделе ФПУ имели ряд отличий, касающихся основных компонентов: ГФС, ВКК и МКС. Особенности ГФС новых форматов подробно описаны в главе 3. Конструктивные особенности ВКК и МКС кратко рассмотрены ниже.

Значения фотоэлектрических параметров для ФПУ обоих типов должны были соответствовать нормам, приведенным в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Значения фотоэлектрических параметров ФПУ

Наименование параметра	Значение параметра	
	384x288 (формат 1)	640x512 (формат 2)
Формат ФПУ (число чувствительных элементов)	384x288 (формат 1)	640x512 (формат 2)
Шаг чувствительных элементов, не более, мкм	20	
Область спектральной чувствительности, мкм	7,5-9	
Длина волны максимума чувствительности, мкм	8,6±0,2	
Эквивалентная шуму разность температур (NEΔT) при F/2,5; T _ф = 300 К ; F _к = 50 Гц, не более, град.К	0,03	
Номинальная частота кадров, Гц	50	
Напряжение выходного сигнала, В	1,5±1	
Динамический диапазон, дБ	70	
Потребляемая мощность, Вт, не более	15	18
Напряжение питания, В, не более	27	
Рабочая температура, °С	-45 ÷ +55	

Наиболее значимыми конструктивными отличиями новых ФПУ по сравнению с описанными выше являются значительно больший формат и более мелкий шаг элементов, что позволяет отнести данные приборы к классу ФПУ высокого разрешения (ВР).

5.4.1. Конструкция ВКК

ВКК двух типов были разработаны ОАО «Швабе - Фотосистемы» (www.mzsapphir.ru). Схематическое изображение ВКК представлено на рис.5.11

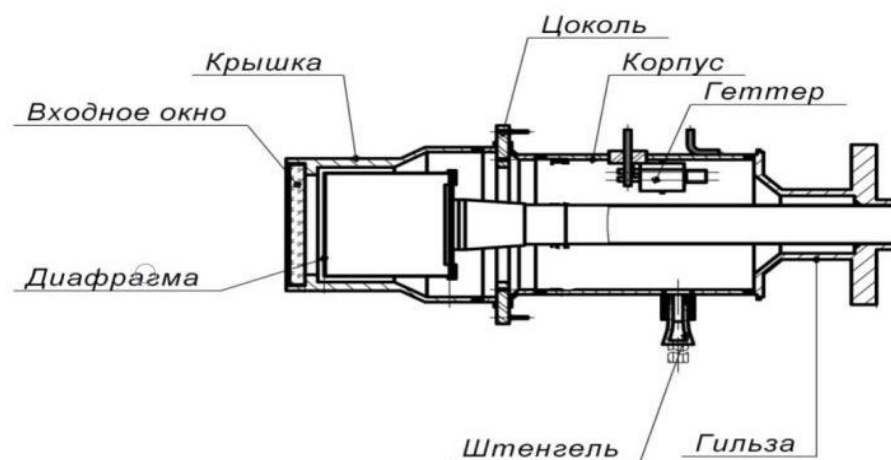


Рис. 5.11. Схематическое изображение вакуумного криостатируемого корпуса

ВКК представляет собой конструкцию, состоящую из гильзы- держателя, корпуса с газопоглотителями (геттерами) и медным штангелем, а также крышки с входным окном и диафрагмой. В отличие от описанных выше ранее разработанных аналогов гильза - держатель одновременно является зоной перемещения вытеснителя газовой криогенной машины. На торце гильзы-держателя закреплен поликоровый наконечник, который является посадочным местом для ГФС, термодатчиков и диафрагмы.

Контактные площадки наконечника соединялись с контактными площадками цоколя проводниками (диаметром 0,03 мм) из сплава платина (80 %) – иридий (20 %), обеспечивающими удовлетворительное сочетание значений теплопроводности и электрического сопротивления. В ряде

случаев для соединения указанных контактных площадок использовалась никелевая проволока диаметром 25 мкм.

Крышка ВКК предназначена для его герметизации и представляет собой конструкцию, в состав которой входят:

- собственно крышка (корпус крышки), изготовленная из прецизионного сплава 29 НК ВИ с защитным покрытием (Ni);

- входное окно из германия, просветленное на спектральный диапазон (7,5-9) мкм.

Корпус ВКК изготовлен из прецизионного сплава 29 НК ВИ. В верхней части корпуса ВКК расположен металлокерамический цоколь (вакуумноплотно соединенный с основной конструкцией), предназначенный для коммутации электрических сигналов из внутреннего вакуумированного объема ВКК к внешним электронным блокам. В корпус ВКК вмонтирован медный штенгель, предназначенный для откачки криостата. Обычно для обеспечения теплофизических параметров изделия внутренний объем ВКК должен откачиваться до давления остаточных газов не выше 10^{-7} торр. Откачка производится через медный штенгель, который через переходные втулки впаян в корпус «твердой» высокотемпературной пайкой (припой ПСР-72). После откачки штенгель перекусывается специальными кусачками, обеспечивающими холодную (диффузионную) сварку стенок штенгеля, в результате которой осуществляется герметизация вакуумного объема ВКК.

Сохранение вакуума в полости ВКК обеспечивается выбором оптимальных конструкционных материалов, входным контролем качества материалов деталей конструкции ВКК, технологией изготовления деталей конструкции, технологией сборки и откачки. Отметим, что конструктивно ВКК обоих типов отличались в основном размерами ГФС и, соответственно, размерами наконечников и диафрагм. Входное окно с просветляющим покрытием обеспечивало пропускание в диапазоне 7,5 – 9 мкм с максимумом

пропускания 95% на длине волны $8,25 \pm 0,25$ мкм. Величина теплопритоков к посадочному месту ГФС при температуре окружающей среды 20 ± 5 °С не превышала 0,25Вт и 0,35Вт для ВКК малого формата и большого формата соответственно.

Для сохранения в ВКК вакуума на уровне 10^{-4} мм. рт. ст., обеспечивающем работоспособность ФПУ с заданными теплофизическими характеристиками, в его составе предусмотрено устройство, позволяющее поглощать выделяющиеся в процессе эксплуатации и хранения газы, - нераспыляемый геттер. Геттер активируется прогревом и далее, до наступления сорбционного насыщения, поглощает газы, натекающие в объём ВКК через течи и выделяющиеся со стенок вакуумной полости.

5.4.2 Конструкция микрокриогенной системы

Одним из наиболее значительных результатов рассматриваемых работ явились разработка и изготовление типоразмерного ряда микрокриогенных систем (далее - МКС) для обеспечения рабочей температуры СКЯ ФПУ, выполненная ООО «НТК «Криогенная техника» (г.Омск, www.cryontk.ru).

МКС были разработаны в двух вариантах:

-вариант 1 – унифицированная микрокриогенная система охлаждения МСМГ-0,9А-0,35/65 КВО.0751.000-01 с электропитанием номинальным напряжением 27 В для обеспечения рабочей температуры СКЯ ФПУ форматом 640х512 элементов;

-вариант 2 – унифицированная микрокриогенная система охлаждения МСМГ-0,7А-0,25/65 КВО.0754.000 с электропитанием номинальным напряжением 12 В для обеспечения рабочей температуры СКЯ ФПУ форматом 384х288 элементов. Основные параметры МКС МСМГ-0,9А-0,35/65 и МСМГ-0,7А-0,25/65 представлены в таблице 5.2

Таблица 5.2.

Наименование параметра	Обозначение	Единица измерения	Значение параметра	
			вариант 1	вариант 2
1 Температура криостатирования ¹	T_K	К	65 ± 5	65 ± 5
2 Напряжение питания ²	U_{Π}	В	$27^{(-3+2)}$	12^{+2}_{-3}
3 Потребляемая электрическая мощность при температуре среды $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ в пусковом режиме, не более	$P_{\text{ВЫХ}}$	Вт	25	15
4 Потребляемая электрическая мощность при температуре среды $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ в стационарном режиме при температуре криостатирования 65 К и холодопроизводительности ³	$P_{\text{СТ}}$	Вт	15	10
		Вт	0,5	0,35
5 Утечка по гелию, не более	W_r	$\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$	10^{-8}	10^{-8}
6 Время выхода на режим при: температуре среды $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$, теплопритоке и охлаждаемой массе, приведенной к меди ⁴	$t_{\text{ВЫХ}}$	мин	6	6
	$P_{\text{ТП}}$ g_M	Вт г	0,35 3	0,25 2
7 Среднеквадратичное значение виброускорения на торце холодильного пальца в диапазоне частот от 10 до 10000 Гц, не более	$H_{\text{ВУ}}$	g	3	3
8 Стабильность поддержания температуры криостатирования	σT_K	К	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
9 Уровень шума, создаваемого при работе микрокриогенной системы, не более	$S_{\text{Ш}}$	дБА	50	50
10 Масса, не более	G	кг	0,9	0,7

С целью сокращения сроков исполнения работы и экономии финансовых средств в качестве базовой конструкции для указанных МКС был выбран один из аналогов: МКС типа МСМГ-0,5В-0,5/80 КВО.0751.000, разработанная НТК «Криогенная техника».

Разработанные МКС работают по замкнутому обратному циклу Стирлинга с внутренней регенерацией тепла и с использованием постоянного количества рабочего газа (криоагента) – гелия газообразного высокой чистоты и представляют собой одноступенчатую машину с газовым приводом вытеснителя. Среди конструктивных особенностей указанных МКС следует выделить использование компрессора с линейным приводом по схеме с контактом поршня и цилиндра и с двигателями с подвижным магнитом. Блок управления МКС имеет микропроцессорное управление.

МКС обоих типов в компрессорной части конструктивно практически идентичны, имеют достаточно близкие габариты и отличаются главным образом расположением блока управления: в случае МСМГ-0,9А-0,35/65 он имеет моноблочное исполнение, в случае МСМГ-0,7А-0,25/65 отделен от МКС. Поэтому для иллюстрации на рис.5.12. представлена более мощная из МКС.



Рис.5.12. Внешний вид МКС МСМГ-0,9А-0,35/65 КВО.0751.000-01
(с сайта www.cryontk.ru)

Отметим, что гильза – держатель, являющаяся одновременно элементом конструкции МКС и ВКК, имеет у МКС обоих типов одинаковые габаритно-присоединительные размеры.

5.4.3 Особенности электронного блока управления и предварительной обработки сигналов (ЭБУ)

Электронный блок управления (ЭБУ) формально не являлся объектом исследований настоящей работы. Однако он начинает играть важную роль на различных стадиях создания ФПУ при проведении межоперационного контроля. Кроме того, ЭБУ является прообразом блока предварительной обработки сигналов для тепловизионных приборов (ТВП). С его помощью не только производится запуск и управление ГФС, но и осуществляется предварительная обработка сигналов, о чем будет сказано ниже. Поэтому представляется целесообразным кратко остановиться на описании его конструкции.

ЭБУ предназначен для управления ГФС в ФПУ, формирования сигналов ИК изображений, последующей их предварительной обработки и вывода в цифровом формате. Основными функциональными блоками ЭБУ являются: АЦП, устройство обработки видеоизображения, устройство скоростного вывода изображения и устройство управления и синхронизации. ФПУ регистрирует изображение, преобразуя поток фотонов с каждого элемента матрицы в электрический заряд, который в свою очередь формирует напряжение пропорциональное освещенности пикселя.

На выход ФПУ поступает аналоговый сигнал, формируемый последовательным переключением усиленных напряжений с каждого фоточувствительного элемента матрицы. Причем вывод сигналов осуществляется по четырем каналам (один канал на группу пикселей).

Далее, четырехканальный аналоговый сигнал с ФПУ поступает на АЦП, в котором он предварительно усиливается и преобразуется в многоканальный цифровой параллельный код. Цифровые параллельные сигналы каждого канала мультиплексируются и подготавливаются к передаче в сигнальный процессор.

Параллельно с видеосигналом подобным образом регистрируется температура холодной зоны ФПУ. В состав АЦП также входит модуль управления ФПУ, обеспечивающий необходимые сигналы тактирования и задание режима работы ФПУ. Режимы работы мультиплексора и модуля управления ФПУ задаются устройством управления и синхронизации.

Центральным элементом электронной системы является сигнальный процессор, входящий в состав устройства обработки видеоизображения. В сигнальный процессор закладывается микропрограмма, определяющая логику его функционирования. Сигнальный процессор принимает параллельные цифровые сигналы из мультиплексора, производит построение и цифровую обработку изображения, выводит сформированное видеоизображение в параллельном цифровом коде. Кроме того, он выполняет функции связи с внешними устройствами, связь с которыми обеспечивается с помощью контроллера UART для интерфейса RS-422.

В устройство обработки видеоизображения также входят элементы, обеспечивающие функционирование процессора: тактовые генераторы, супервизор, SDRAM память, Flash память для микропрограммы и для пользовательских данных. Выводимое с процессора цифровое видеоизображение поступает и в устройство скоростного вывода изображения, и с помощью видеоэнкодера, преобразуется в аналоговый ТВ сигнал, необходимый для технологических целей.

Заключительным этапом следования цифрового видеосигнала в ЭБУ является устройство скоростного вывода изображения. В нем параллельный цифровой код видеоизображения дополняется необходимыми служебными кодами, для соответствия стандарту скоростного вывода (Fiber Channel, Ethernet или ARINC-818), преобразуется в высокоскоростной последовательный код и, с помощью выходных каскадов, транслируется в передающую линию.

Координирование работы составных частей ЭБУ осуществляется посредством устройства управления и синхронизации. Входными сигналами для этого устройства являются управляющие команды от сигнального процессора и сигнал внешней синхронизации. Кроме того, устройство управления осуществляет работу с приводом и датчиком узла фокусировки.

5.4.4. Особенности технологии сборки ФПУ

Описанные выше устройства являются основными узлами, из которых производится сборка ФПУ. Каждый из узлов собирается и испытывается отдельно. Разработка технологий, позволяющих их объединить в составе ФПУ, являлась одной из основных целей настоящей работы.

ФПУ собираются из следующих сборочных единиц: ГФС, ВКК, МКС.

Ниже представлено описание основных технологических этапов сборки ФПУ.

Входной контроль ВКК.

Входной контроль ВКК, поставлявшихся ОАО «Швабе-Фотосистемы», был направлен на проверку качества электрических соединений (отсутствия обрывов, замыканий, утечек между контактами на цоколе и между платино - иридиевыми или никелевыми проволочками, выводами геттера). Проводился контроль вакуумной плотности корпуса и крышки путем их откачки на испытательном стенде.

Измерялось оптическое пропускание входного окна, расположенного на крышке.

Входной контроль ГФС.

Входной контроль ГФС в общем случае проводится путем зондового контроля функционирования при комнатной температуре на зондовой установке ЭМ -6070А. Однако ввиду того, что ГФС собирались и проходили окончательную доработку (заполнение клеем, утонение подложки) силами

производителя ФПУ (ОАО «ЦНИИ «Циклон») дополнительный входной контроль не проводился.

Приклейка ГФС и термодатчиков на наконечник ВКК

Перед размещением ГФС и термодатчиков на поверхности поликоровой платы-наконечника производилась подготовка клея «Криосил». Компоненты клея смешивались, после чего смесь подвергалась вакуумированию с помощью форвакуумного насоса в течение 3-5 мин. в сушильном шкафу при подогреве до 40⁰С. Далее приклеиваемые компоненты и посадочные места для них обезжиривались с помощью изопропилового спирта. На посадочное место под ГФС клей наносился из расчета обеспечить толщину слоя не более 10-20 мкм. Соответствующее его количество подбиралось экспериментально. Кроме того, после размещения ГФС на посадочном месте на нее устанавливался груз весом 20г, чтобы обеспечить равномерное растекание клея по склеиваемым поверхностям. Приклейка термодатчиков производилась тем же клеем, в который добавлялся наполнитель из нитрида бора для повышения теплопроводности соединения.

Сушка клея происходила при комнатной температуре в течение 2-х суток.

Разварка соединительных выводов

По окончании сушки клея производилась разварка ГФС на токоведущие дорожки на поликоровой плате с помощью алюминиевой проволоки диаметром 27 мкм. Разварка осуществлялась на установке ультразвуковой сварки West Bond 7476. Термодатчики с уже имеющимися золотыми выводами разваривались с помощью той же установки. По окончании разварки производился визуальный контроль отсутствия обрывов и замыканий выводов. В случае положительных результатов проверки ФПУ подключалось к ЭБУ и контролировалась работоспособность ГФС. На рис.5.13 представлено фото ФПУ с размещенной на наконечнике ГФС.

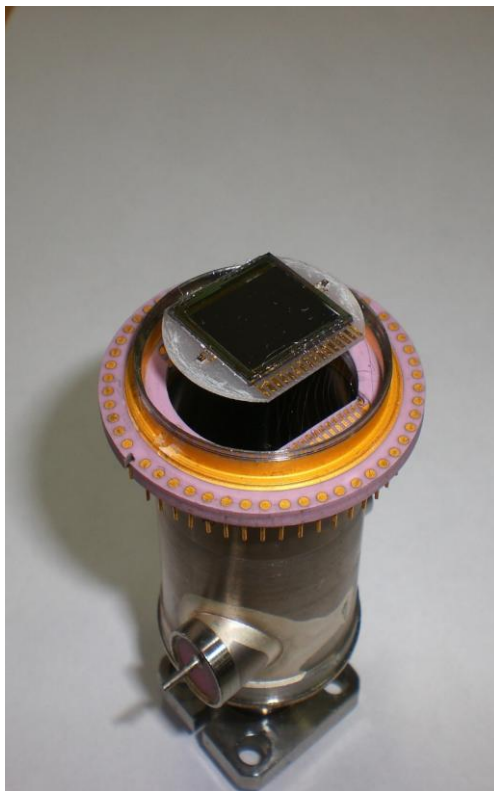


Рис.5.13. ФПУ с размещенной на наконечнике ГФС

Приклейка диафрагмы

После проверки ФПУ с помощью ЭБУ производилась приклейка диафрагмы. Для этой операции также использовался клей «Криосил», приготовление которого осуществлялось, как описано выше. Сушка клея производилась в течение 2-х суток при комнатной температуре. По окончании сушки ФПУ подключалось к электронному блоку управления ЭБУ и контролировалась работоспособность ГФС.

В случае положительных результатов контроля ФПУ направлялось на монтаж крышки к корпусу криостата. На рис.5.14 представлено фото ФПУ с приклеенной диафрагмой.

Шовная лазерная сварка крышки с окном и корпуса криостата.

Крепеж крышки осуществлялся с помощью лазерной сварки на установке «Rofin». Сварка выполнялась в соответствии с инструкцией по эксплуатации установки. По окончании сварки производилась проверка отсутствия



Рис.5.14 ФПУ с приклеенной диафрагмой.

течей с помощью течеискателя Varian 679. При положительном результате проверки ФПУ направлялось на вакуумирование.

Вакуумирование ФПУ

Откачка – вакуумирование - ФПУ производилась на откачном посту типа Varian. Продолжительность откачки составляла около 8 суток. При этом обеспечивался подогрев ФПУ с помощью электрической плитки до температуры 100⁰С. Для предотвращения перегрева ГФС ее посадочное место через гильзу - держатель обдувалось сжатым воздухом, что позволяло сохранять температуру вблизи ГФС не выше 80⁰С. Перед завершением откачки остаточное давление в ФПУ обычно не превышало 3х10⁻⁷ торр.

На заключительном этапе вакуумирования ФПУ производится активация геттера. Данная процедура включает в себя подачу на геттер постоянного

электрического напряжения, обеспечивающего протекание через него тока величиной 4,5 А в течение 10 мин. При этом, чтобы избежать повреждения керамического уплотнения входного электрода геттера вследствие перегрева, в процессе активации производится его охлаждение сжатым воздухом. После окончания процесса активации геттера производится перекусывание медной трубки (штенгеля), через которую производилась откачка ФПУ, с помощью пережимных клещей Refco14200. Завершающим этапом вакуумирования ФПУ является проверка герметичности, которая качественно определяется по величине теплопритоков на посадочном месте ГФС. Для проведения указанной операции в гильзу – держатель заливается жидкий азот и измеряется время его испарения. В хорошо откачанных герметичных ФПУ время выкипания жидкого азота из гильзы составляет около 25 минут. На рис.5.15 представлено фото ФПУ с приваренной крышкой после вакуумирования.



Рис.5.15 ФПУ с приваренной крышкой после вакуумирования

Стыковка ВКК с МКС и проверка работоспособности ФПУ в сборе.

После завершения вакуумирования корпуса ФПУ производится его стыковка с МКС. Данная операция производится в соответствии с руководством по эксплуатации для МКС с использованием специализированного заправочного устройства. После завершения операции стыковки производится подключение ФПУ к ЭБУ и проверяется работоспособность ФПУ при комнатной температуре. Затем включается МКС и определяется время выхода ФПУ на рабочий режим, т.е. определяется время, через которое температура на посадочном месте ГФС достигнет 65К. Согласно ТЗ указанное время не должно превышать 6 минут. Структура ФПУ в сборе представлена на рис.5.16

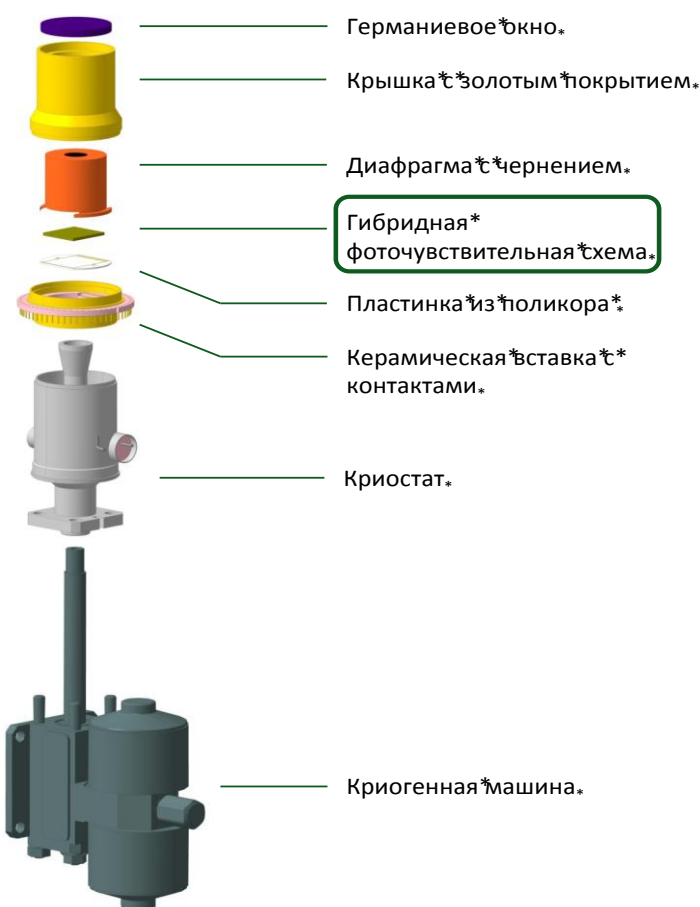


Рис.5.16 Структура ФПУ в сборе

Измерение параметра – критерия годности

Заключительным этапом технологического маршрута сборки ФПУ является контроль параметра – критерия годности изделия, которым является эквивалентная шуму разность температур (NETD). Измерение NETD производится на специализированном стенде PI 7700.

На рис.5.17 представлены образцы ФПУ обоих форматов, изготовленные с использованием описанной выше технологии сборки.

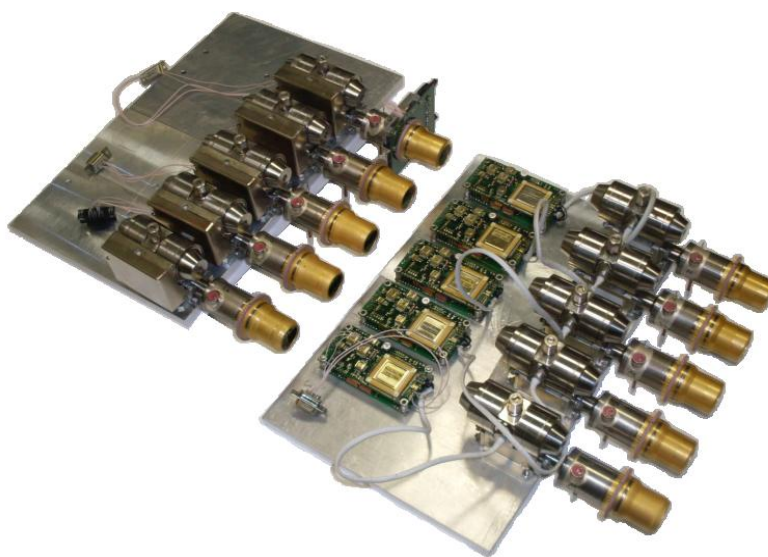


Рис.5.17 СКЯ ФПУ форматов 640x512 и 384x288 в сборе

5.4.5. Результаты испытаний ФПУ на соответствие требованиям ТЗ

Измерения параметров ФПУ включали в себя измерение спектра фотоотклика, чувствительности S , эквивалентной шуму разности $\Delta T_{ЭШ}$, а также подбор оптимальных режимов работы ФПУ (рабочей температуры $T_{\text{раб}}$, напряжения смещения $V_{\text{смещ}}$ и времени накопления $\tau_{\text{нак}}$).

Спектр фотоотклика ФПУ практически был практически идентичен спектру одноэлементных фотоприемников, из которых состоит матрица (см. рис. 4.1).

Для подбора оптимальных режимов работы ФПУ были сняты зависимости чувствительности и эквивалентной шуму разности температур от напряжения смещения и времени накопления – $S(V_{\text{смещ}}, \tau_{\text{нак}})$ и $\Delta T_{\text{ЭШ}}(V_{\text{смещ}}, \tau_{\text{нак}})$. Данные зависимости представлены на рис. 5.18 и 5.19.

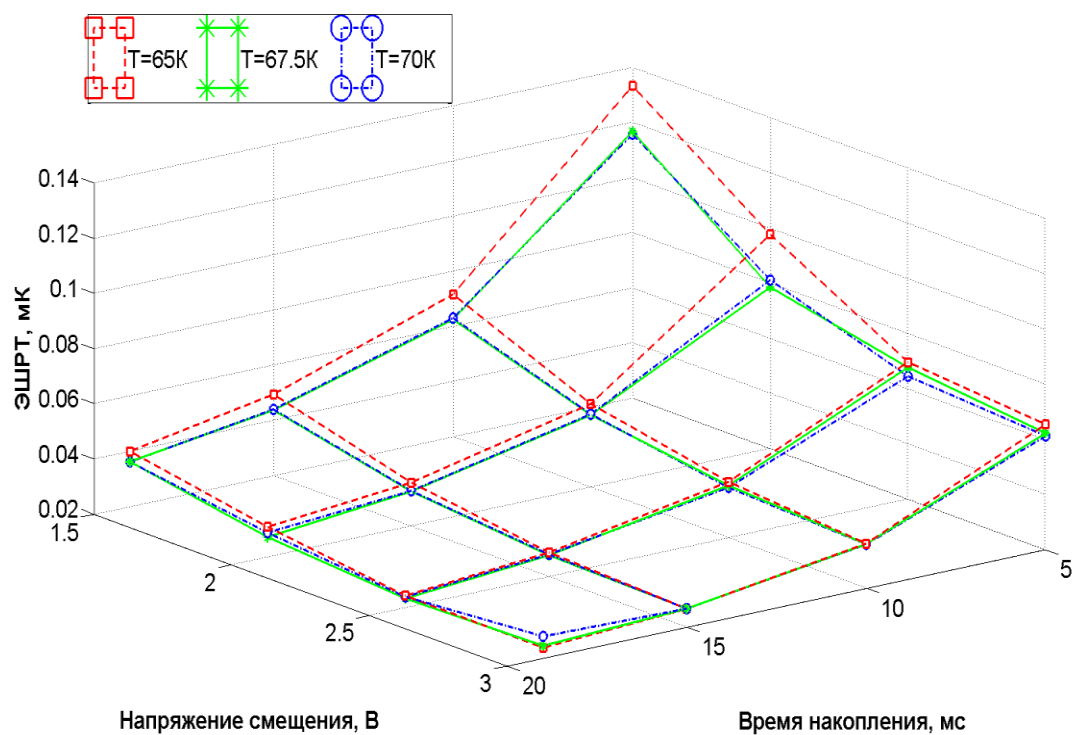


Рис. 5.18 Зависимость средней по матрице эквивалентной шуму разности температур от напряжения смещения и времени накопления при различных рабочих температурах ФПУ.

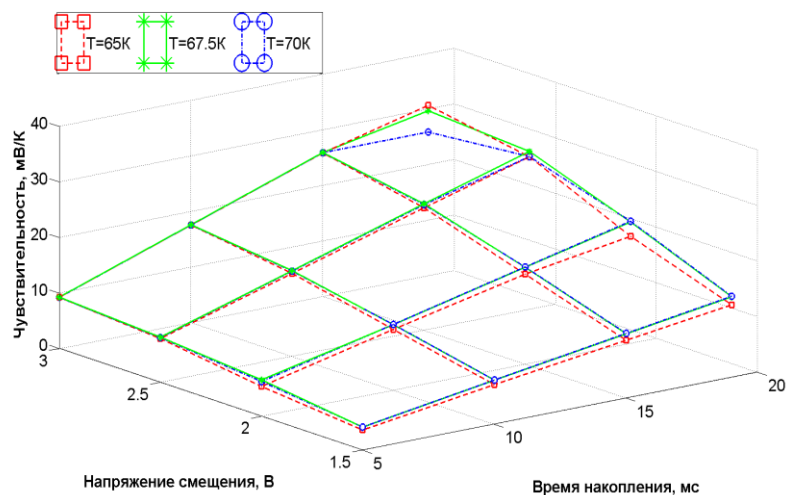


Рис. 5.19. Зависимость средней по матрице чувствительности от напряжения смещения и времени накопления при различных рабочих температурах ФПУ.

Из зависимостей, представленных на рис. 5.18 и 5.19, видно, что при рабочей температуре ФПУ $T_{\text{раб}}=65\text{ К}$ чувствительность монотонно увеличивается с ростом напряжения смещения и времени накопления. При этом эквивалентная шуму разность температур монотонно уменьшается, так как $\Delta T_{\text{ЭШ}}$ обратно пропорциональна S , как и ожидалось согласно формуле (5.2) для условий, когда доминирует шум ЭБУ.

Таким образом, для получения минимально возможного значения $\Delta T_{\text{ЭШ}}$, ограниченного шумом электроники, нужно максимально увеличивать как напряжение смещения, так и время накопления. Напряжение смещения можно увеличивать до предельного значения 3 В, при превышении которого мультиплексор в ГФС может выйти из линейного режима функционирования. Максимальное время накопления ($\approx 19\text{ мс}$) ограничено установленной в ТЗ частотой кадров 50 Гц. При рабочей температуре ФПУ $T_{\text{раб}}=65\text{ К}$ значение $\Delta T_{\text{ЭШ}}$ достигает требуемого по ТЗ значения 30 мК при напряжении смещения $\geq 1,5\text{ В}$ и времени накопления $\geq 15\text{ мс}$. При установке максимально допустимых значений напряжения смещения и времени накопления (3 В и 19 мс, соответственно) измеренное значение достигает минимального 24 мК.

Следует отметить, что максимальный сигнал на выходе ФПУ ограничен входной емкостью ячеек мультиплексора ($\sim 10^7$ электронов). В условиях, когда входные емкости ячеек мультиплексора оказываются близкими к заполнению, сигнал на выходе ФПУ переходит в насыщение и при дальнейшем увеличении напряжения смещения и времени накопления перестает расти. В результате чувствительность начинает падать, а эквивалентная шуму разность температур – возрастать. Тот факт, что при $T_{\text{раб}}=65$ К чувствительность монотонно возрастает во всем допустимом диапазоне изменения $V_{\text{смещ}}$ (до 3 В) и $\tau_{\text{нак}}$ (до 19 мс), говорит о том, что входные ячейки мультиплексора при такой рабочей температуре заполнены не полностью. Поэтому допускается повысить рабочую температуру ФПУ до такого значения, при котором возросший темновой ток вместе с полезным фотосигналом (практически не зависящим от температуры ФПУ) не заполняют полностью входные ячейки коммутатора-мультиплексора.

Как видно из рис. 5.18 и 5.19 при более высокой рабочей температуре ФПУ $T_{\text{раб}}=67,5$ К поведение зависимостей $S(V_{\text{смещ}}, \tau_{\text{нак}})$ и $\Delta T_{\text{ЭШ}}(V_{\text{смещ}}, \tau_{\text{нак}})$ аналогично их поведению при $T_{\text{раб}}=65$ К. При этом минимальное достигаемое значение $\Delta T_{\text{ЭШ}}$ также равно 24 мК. Таким образом, повышение рабочей температуры ФПУ до 67,5 К не оказывает ощутимого влияния на фотоэлектрические характеристики ФПУ. При дальнейшем повышении рабочей температуры ФПУ – до 70 К – ситуация изменяется. При увеличении $V_{\text{смещ}}$ и $\tau_{\text{нак}}$ до максимально допустимых значений (3 В и 19 мс, соответственно) чувствительность начинает уменьшаться, а эквивалентная шуму разность температур – возрастать, что говорит о том, что входные ячейки коммутатора-мультиплексора полностью заполнены, а дальнейшее увеличение $V_{\text{смещ}}$ и $\tau_{\text{нак}}$ приведет к еще большему ухудшению фотоэлектрических характеристик ФПУ. Однако следует отметить, что при определенных значениях $V_{\text{смещ}}$ и $\tau_{\text{нак}}$, близких, но не равных их максимально допустимым значениям, удастся получить значение $\Delta T_{\text{ЭШ}}$, равное 25 мК, что находится в пределах требований

ТЗ (≤ 30 мК). Таким образом, для выполнения требования ТЗ по $\Delta T_{\text{ЭШ}}$, допустимо увеличить рабочую температуру ФПУ до 70 К, что существенно уменьшит тепловую нагрузку на газовую криогенную машину (ГКМ), а следовательно и на потребляемую ею мощность (Таблица 5.3).

Таблица 5.3.

Рабочая температура, К	Минимально достижимое значение $\Delta T_{\text{ЭШ}}$, мК	Мощность, потребляемая ГКМ, Вт	Оптимальные параметры работы ФПУ ($V_{\text{смещ}} / \tau_{\text{нак}}$)
65	24	14,3	$V_{\text{смещ}}=3$ В / $\tau_{\text{нак}}=19$ мс
67,5	24	13,0	$V_{\text{смещ}}=3$ В / $\tau_{\text{нак}}=19$ мс
70	25	11,9	$V_{\text{смещ}}=2,5$ В / $\tau_{\text{нак}}=19$ мс

При анализе рис. 5.18 можно также заметить, что $\Delta T_{\text{ЭШ}}$ возрастает при понижении рабочей температуры ФПУ до 65К, что особенно заметно при малых напряжениях и временах накопления. Данный результат является несколько неожиданным, поскольку обычно уменьшение рабочей температуры ФПУ дает обратный результат благодаря уменьшению темнового тока и связанных с ним шумов. На рис.5.19 при этом также заметно уменьшение чувствительности ФПУ.

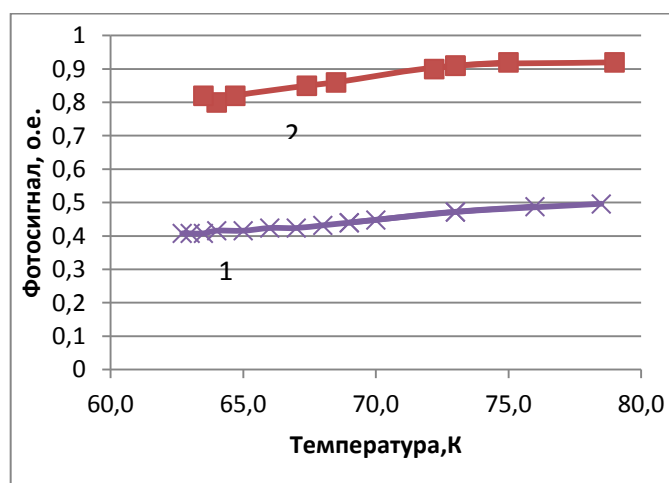


Рис.5.20. Температурные зависимости чувствительности тестового ФП СКЯ при напряжении смещения: 1- 1В; 2 – 1,5В.

Для установления причин обнаруженного эффекта была снята зависимость чувствительности тестового ФП СКЯ от рабочей температуры

(рис.5.20). Как видно из рис.5.20, чувствительность ФП СКЯ имеет явную тенденцию к уменьшению при понижении рабочей температуры. Наиболее вероятной причиной такого результата может быть наличие энергетического барьера в зоне проводимости на границе контактного слоя и СКЯ. Влиянии указанного барьера на ВАХ ФП СКЯ обсуждалось в главе 2.

Оценка однородности распределения шумов, чувствительности и $\Delta T_{ЭШ}$ в ФПУ дали результаты, сходные с теми, что были получены при аналогичных измерениях на ГФС (см. рис. 4.5-4.10).



Рис.5.21. Изображение, полученное с помощью СКЯ ФПУ формата 640x512 элементов при использовании цифровой коррекции.

Указанные распределения имеют ярко выраженный единственный максимум. Приближенная количественная оценка дает среднеквадратичную величину неоднородности не хуже $\pm 15\%$, что сопоставимо с результатами зарубежных аналогов и позволяет при использовании цифровых методов обработки получать изображения приемлемого качества (см. рис.5.21).

В ходе различных испытаний ФПУ, предусмотренных условиями разработки, было установлено, что они обеспечивают выполнение технических требований, предъявляемых к приборам данного типа.

5.5. Результаты использования СКЯ ФПУ в составе тепловизионных приборов

Одним из результатов комплекса работ, проводившихся в 2013-2016г.г. в АО «ЦНИИ «Циклон» (см. раздел 3.3), было создание опытных образцов тепловизионных приборов (ТВП), в которых использовалось ФПУ с ГФС на основе СКЯ. В России такая разработка была выполнена впервые. В указанной разработке были использованы ФПУ, описанные в предыдущем разделе.

Были разработаны два типа ТВП:

- на основе ФПУ формата 384x288 элементов;
- на основе ФПУ формата 640x512 элементов.

Оба типа ТВП обладали чувствительностью в спектральном диапазоне 8-12 мкм.

Значения параметров ТВП 2-х типов приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Значения параметров ТВП

Наименование параметра	Значение параметра	
Формат ФПУ (число чувствительных элементов)	384x288 (формат 1)	640x512 (формат 2)
Шаг чувствительных элементов, не более, мкм	20	
Область спектральной чувствительности, мкм	7,5-9	
Длина волны максимума чувствительности, мкм	8,6±0,2	
Эквивалентная шуму разность температур (NEΔT) при F/2,5; T _ф = 300 К ; F _к = 50 Гц, не более, К	0,03	
Минимально разрешимая разность температур, не более, К		
- в широком поле зрения на частоте (1300±50) рад ⁻¹	0,5	
- в узком поле зрения на частоте (4100±150) рад ⁻¹	0,6	
Частота кадров, Гц	50	
Диапазон перестройки фокусного расстояния, мм	80...190	

Диапазон перестройки поля зрения		
- в широком поле зрения	$5,5 \times 4,1$	$9,2 \times 7,3$
- в узком поле зрения	$2,3 \times 1,7$	$3,9 \times 3,1$
Время перестройки поля зрения, не более, с	20	
Время выхода на рабочий режим, не более, мин	12	
Потребляемая мощность, Вт, не более	25	35
Напряжение питания, В, не более	12	27
Рабочая температура, $^{\circ}\text{C}$	$-45 \div +55$	
Масса, не более, кг	6	

ТВП на основе СКЯ ФПУ были разработаны с использованием элементной базы и основных технических решений, примененных при создании базовых изделий АО «ЦНИИ «Циклон» - «Беркут» и «Ястреб», разработанных в инициативном порядке. Чертеж общего вида ТВП формата 640x512 элементов представлен на рис.5.23.

Конструктивно ТВП представляет герметичный моноблок, состоящий из корпуса, крышки и оптико-электронного блока. Алюминиевые корпус и крышка при сборке соединяются стальными винтами и обеспечивают жесткую конструкцию ТВП. На корпусе установлен патрон осушки. Для крепления к объекту установки предусмотрены 8 отверстий диаметром 6 мм.

Оптико-электронный блок (ОЭБ) состоит из АЦП, узлов видеообработки, управления, скоростного цифрового вывода и ФПУ. В ОЭБ имеются температурные датчики, установленные на корпусе входного объектива, кронштейне проекционного объектива и ФПУ.

ФПУ состоит из матричного фотоприемника в ВКК, МКС и платы согласования, установленной на кронштейне.

Устройства видеообработки и управления установлены на каркасе, обрамляющем ФПУ.

Оптико-механическое устройство состоит из объектива, платы выходного разъема и корпуса. Объектив предназначен для построения ИК изображения в фокальной плоскости ФПУ и формирования поля зрения. Конструктивно объектив представляет собой корпус с тремя неподвижными линзами и тремя подвижными. Подвижные линзы, служащие для перефокусировки, имеют возможность перемещения в диапазоне от - 2 до +4 мм от исходного положения.

Панель соединителей установлена на окно в корпусе и крышке и содержит соединители для подачи питания изделия, для связи с оптико-электронной системой по информационному каналу, для вывода телевизионного сигнала.

Внешний вид ТВП обоих форматов является одинаковым и представлен на рис.5.22



5.22. Внешний вид КЯ ТВП-384 и КЯ ТВП-640

Изображение внутренней компоновки ТВП со снятой боковой крышкой представлено на рис. 5.23

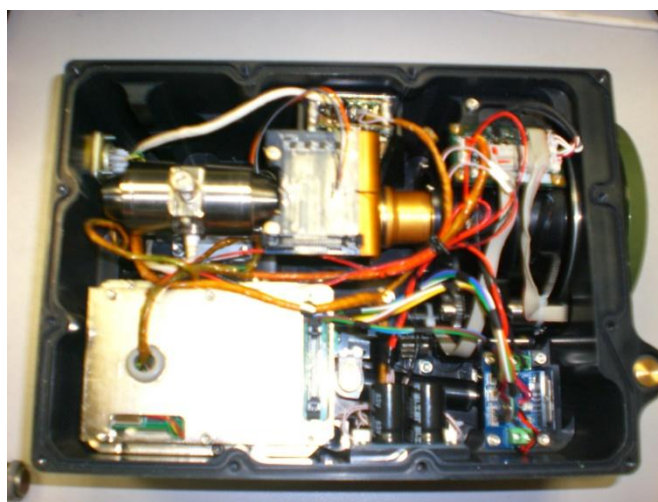


Рис. 5.23 Изображение внутренней компоновки ТВП

В ходе различных испытаний, предусмотренных условиями разработки, было установлено, что образцы ТВП обеспечивают выполнение технических требований, предъявляемых к приборам данного типа.

Наряду с указанными испытаниями проводились эксперименты по получению изображений различных объектов в городских условиях, результаты которых представлены ниже.



Рис. 5.24 – Тепловизионное изображение зданий и сооружений, сформированное ТВП



Рис. 5.25 – Тепловизионное изображение труб ТЭЦ, сформированное ТВП в узком поле зрения



Рис. 5.26 – Тепловизионное изображение труб ТЭЦ, сформированное ТВП в широком поле зрения



Рис. 5.27 – Тепловизионное изображение труб ТЭЦ, Сформированное ТВП в узком поле зрения



Рис. 5.28 – Тепловизионное изображение участка дороги, сформированное ТВП в узком поле зрения



Рис. 5.29 – Тепловизионное изображение участка дороги, сформированное ТВП в широком поле зрения



Рис. 5.30 – Тепловизионное изображение участка улицы, сформированное ТВП в узком поле зрения



Рис. 5.31 Тепловизионное изображение участка улицы, сформированное ТВП в широком поле зрения



Рис.5.32. Изображения летательных аппаратов

Выводы к главе 5

1. Представлены результаты по созданию экспериментальных и опытных образцов СКЯ ФПУ среднего формата. Выявленные в ходе указанных работ проблемы и найденные способы их решения были учтены при разработке ФПУ большого формата.

2. Представлены результаты разработки опытных образцов СКЯ ФПУ 2-х типов: форматов 384x288 и 640x512 элементов с шагом элементов 20 мкм. В ходе работы по созданию ФПУ были отработаны специальные технологические процессы, необходимые при их изготовлении, разработаны комплекты рабочих конструкторской и технологической документации.

3. Проведенные испытания ФПУ подтвердили их соответствие заданным техническим требованиям. Научно-технический уровень разработанных СКЯ ФПУ соответствует уровню зарубежных аналогов из данного класса приборов.

4. Разработанные СКЯ ФПУ были использованы при создании впервые в стране матричных ТВП для длинноволнового ИК диапазона, предназначенных для использования в составе аппаратуры специального и двойного назначения. Проведенные испытания разработанных ТВП подтвердили их соответствие заданным техническим требованиям и сопоставимость по уровню технических характеристик с зарубежными аналогами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа посвящена решению научной проблемы, имеющей важное народно-хозяйственное значение – созданию матричных фотоприемных устройств (ФПУ) на основе структур с квантовыми ямами (СКЯ), предназначенных для использования в перспективных ИК оптико-электронных системах различного назначения. В ходе выполнения работы был проделан путь от исследований фоточувствительных материалов –СКЯ , - до создания оптико-электронной аппаратуры –ТВП,- на их основе. При решении указанной проблемы были получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Создан значительный научно-технологический задел в области разработки многоэлементных ИК фотоприемников на основе СКЯ. Для получения указанных результатов были проведены теоретические и экспериментальные исследования фотоэлектрических характеристик СКЯ, позволившие установить их новые свойства и построить теоретические модели характеристик, связывающие их с конструктивными параметрами СКЯ. Результаты теоретических и экспериментальных исследований СКЯ были использованы при разработке конструкций матричных фотоприемников. Для изготовления предложенных конструкций были разработаны технологические маршруты, использование которых позволило создать одно- и двухспектральные матричные фотоприемники.

2. Экспериментально установлено, что температурная зависимость темнового тока в ФП СКЯ определяется механизмом термогенерации, лежащим в основе двумерной модели ВАХ. Показано, что существенное влияние на ВАХ оказывает резкость границ яма-барьер: увеличение пологости границ приводит к возрастанию темнового тока, снижению пороговых характеристик чувствительности. Предложена модель ВАХ, построенная с учетом указанных

особенностей, которая удовлетворительно совпадает с экспериментальными результатами.

3. Экспериментально установлено, что ФП СКЯ могут обладать весьма значительной фоточувствительностью по отношению к нормально падающему излучению без использования специальных устройств ввода, что означает подавление в них селективности чувствительности по отношению к поляризации излучения. Наиболее ярко указанный эффект проявляется в СКЯ, выращенных методом МОСГЭ. Анализ результатов дает основания предположить, что причиной указанного эффекта может быть встроенное электрическое поле, возникающее на границах барьер-яма вследствие диффузии донорной примеси в барьеры в процессе роста и последующей ее ионизации при охлаждении.

4. Разработаны конструкции и технологии создания линейных и матричных ГФС с различной организацией считывания сигналов. Среди них к наиболее важным разработкам следует отнести ГФС с кадровым накоплением формата 640x512 элементов с шагом 20 мкм, а также двухспектральную ГФС, обладающую фоточувствительностью в диапазонах 3-5 мкм и 8-12 мкм. Измерения характеристик ГФС различных конструкций в том числе в составе ФПУ показали, что лучшие из них по своим фотоэлектрическим характеристикам сопоставимы с зарубежными приборами того же класса (т.е. имеющими те же формат, шаг ЧЭ, спектральный диапазон) и могут найти применение в современной тепловизионной аппаратуре различного назначения. Предложены конструкции ФП СКЯ и ГФС на их основе, обладающие повышенными квантовой эффективностью и рабочей температурой.

5. Проведены исследования влияния воздействия интенсивного лазерного излучения (ИЛИ) на ГФС на основе СКЯ. Показано, что ГФС СКЯ обладают значительной стойкостью по отношению к ИЛИ как в непрерывном, так и в импульсном режиме облучения.

6. На основе СКЯ ГФС разработаны конструкции и технологии создания матричных ФПУ, включающих в себя помимо ГФС корпус – криостат с вакуумной изоляцией и микрокриогенную систему замкнутого типа.

7. На основе СКЯ ФПУ были впервые в РФ разработаны и изготовлены опытные образцы тепловизионных приборов, позволяющие получать ИК изображения формата 640 x 512 элементов удовлетворительного качества.

Литература:

1. A.Rogalsky, J.Appl.Phys., V105, 091101, (2009)
2. B.F.Levine, J.Appl.Phys., V74, R1, (1993)
3. В.Б. Куликов, Г.Х. Аветисян, Л.М. Василевская и др. ФТП, т.38, вып.2. СС 218-221, (2004).
4. C.G.Bethea et al., IEEE Trans.El.Dev. V38, N5, p1118, (1991)
5. S. D. Gunapala, J.K Liu, J.S. Park et al., IEEE Trans. El.Dev. V44, p 51, (1997)
6. А.Б. Барабанов, П.В. Бирюлин, В.Б. Куликов и др., Тезисы докладов XXII международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2012г.
7. А.Б. Барабанов, П.В. Бирюлин, А.А. Солодков др. Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений,- сб. статей. вып.3, с.166-172, Москва, 2011г.
8. M.Z.Tidrow et al., Proc. SPIE, V 3061, p.772 (1997)
9. A.G.M. Dahlberg, Proc.SPIE, V 5406, p.639, (2004)
10. M. Sundaram et al. Proc.SPIE, V 4028, p.311, (2000)
11. A.C. Goldberg et al. Proc.SPIE, V 4721, p.184, (2002)
12. S. D. Gunapala , S.V. Bandara, A.Sigh et al., Proc.SPIE, V 3698, p.687-697, (1999)
13. M.Runtz, F. Perrier, N. Ricard et al, Proc. of SPIE, V8353, 835339, (2012).
- 14 K. K. Choi, S. C. Allen, J. G. Sun, Y. Wei, K. A. Olver, and R. X. Fu, Appl. Opt. **56**, B26-B36 (2017)
15. N. Sclar, IEEE Trans.El.Dev., VOL. **ED-27**, NO. 1, pp 109-116,(1980)
16. V.B. Kulikov, I.V. Budkin, Proc. of SPIE, 5126, pp153-159, (2002).
17. А.А. Мармалюк, Автореферат диссерт. на соиск. уч. ст.д.т.н., Москва, 2006г.
18. И.Д. Залевский, Автореферат диссерт. на соиск. уч. ст. к.т.н., Москва, 1999г.
19. Kulikov V.B.,Gorbylev V.A., Zalevsky I.D.,Petrov A.I.,Chukichev M.V.,Yunovich A.E. Abstracts bucler of First International Conference on narrow gap semiconductors, Univ.of Southampton,UK.July 1992,r.12.2; p.145.

20. Куликов В.Б., Аветисян Г.Х.Залевский И.Д.Кузнецов Ю.А.- Материалы международной конференции « ПЗС и системы на их основе», Геленджик, сентябрь 1992г
21. Куликов В.Б., Аветисян Г.Х.Залевский И.Д.Кузнецов Ю.А.- Электронная промышленность, 1993г. № 6-7,сс 69-70.
22. Куликов В.Б., Горбылев В.А., Залевский И.Д., Петров А.И., Чельный А.А., Аветисян Г.Х., Юнович А.Э., Чукичев В.М.- ФТП, 1993г.,Том 27, Вып.9.,сс 1453-1462.
23. Kulikov V.B., Avetisyan G.H., Zalevsky I.D., Kovalevsky V.V.,Plotnikov A.F.- Proc.of SPIE,Vol 2694,1996, pp82-88
24. Интегральная оптика, под ред. Т.Тамира, М.Мир; 1978г.
25. D.F. Levine, C.G. Bethea,V.O. Shan et al, Appl.Phys.Lett., **57**(4), pp 383-395, (1990).
26. M.Jhabvala, K.Choi, A. Goldberg et al, Proc. of SPIE v.5167, pp175-185, (2004)
27. Ph. Bois, E. Costard, J.Y. Duboz, J.Nagle, Proc. of SPIE v.3061, pp764-771, (1997)
28. K.K. Choi, S.W. Kennerly, J,Yao, D.C. Tsui, Infrared Phys. Technol. **42**, pp 221-235 (2001).
- 29.М.А. Kinch, A. Yariv, Appl.Phys.Lett., **55**(20), pp 2093-2095 (1989).
30. K.Brennan, Y.Wang, Appl.Phys.Lett., **57**(13), pp 1337-1339 (1990).
31. S.R. Andrews, B.A. Miller, J. Appl.Phys., **70**(2), pp 993-1003 (1991).
32. Ф.Л. Серженко, В.Д. Шадрин, ФТП, **25**(9), сс 1579-1588, (1991)
33. С. Зи, Физика полупроводниковых приборов, - (М. «Мир», 1984г.), т.1.
34. E.Pelve, F. Beltram, C.G. Bethea, B.F.Levine, V.O. Shen, S.J.Hsieh, R.R. Abbott, J. Appl.Phys., **66**(№11), pp 5656-5658 (1989).
35. A.Brandel, A.Fraenkel, E.Finkman, G. Bahir, G. Livescu, M.T. Asom, Semicond. Sci. Technol., **8**, s412-s416, (1993).
36. J.W. Little, R.P. Leavitt. Appl. Phys. Lett., **84** (14), 2682 (2004).
37. D.G. Deppe, N. Holonyak, J. Appl.Phys., **64**(12), R93-R113 (1988).

38. W.A.Beck, Appl.Phys.Lett., 63 (26), 3589, (1993)
39. J.Y. Duboz, L. Saminadayar, J.M. Gerard,- J.Appl.Phys.,**78**(4), pp2803-2807, (1995)
40. R.Rehm, H.Schneider, K.Schwarz et. al., - Proc. of SPIE, V.4288, pp379-385, (2001).
41. М.Шур, -Современные приборы на основе арсенида галлия, -М.Мир,с 41, 1991г.
- 42.Y.Zhang, N.Baruch, W.I. Wang, Electr. Letters, v.29, №2, pp 213-214 (1993). 43. S.Y. Wang, C.P.Lee, Appl.Phys.Lett., v.71, №1, pp119-121,(1997)
44. W.E. Hagston, T. Stirner, F. Rasul. J. Appl. Phys., **89** (2), 1087 (2001).
45. D.G. Deppe, N. Holonyak. J. Appl. Phys., **64** (12), R93 (1988).
46. А.Я.Шик, ФТП, т.20, вып.9 с.1598 (1986).
47. В.Б. Куликов, В.П. Чалый, ФТП ФТП, т.48, вып.2, с.225 (2014).
48. Приборы с зарядовой связью, под ред. Д.Ф. Барба, М., Мир, 1982г., с.93.
49. Залевский И.Д., В.Б. Куликов, Булаев П.В. и др.,- Известия ВУЗов, Материалы электронной техники, в.3, сс 8-11, (1999г.).
50. И.Д. Залевский, В.Б. Куликов, А.А. Падалица и др., -Ученые записки МИТХТ,.,вып.3, сс 69-71 (2001г.).
51. I.D. Zalevsky, V.B. Kulikov, A.A. Padalitsa, et al -Proc. of SPIE V. 5126, pp 178-180, (2002)
- 52.И.Д. Залевский, В.Б. Куликов, А.А. Падалица и др.,- Тезисы докладов XVII международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2002г.
53. И.Д. Залевский, В.Б. Куликов, А.А. Падалица и др.,- Прикладная физика, № 5, с. 76-78, (2002г.)
54. В.Б. Куликов, И.Д. Залевский, Г.Х. Аветисян, и др.,-Электронная промышленность, №2, сс143- 150, 2003г.

55. А.А. Казаков, В.Б. Куликов, В.П. Котов и др.,-Тезисы докладов XIX международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2006г.
56. А.А. Солодков, В.Б. Куликов, - Тезисы докладов XIX международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2006г.
57. А.А. Солодков, В.Б. Куликов, - Прикладная физика №2, сс93-96, (2007г.)
58. В.Б.Куликов, А.В. Борошнев, Тезисы XIX международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2006г.
59. А.А. Казаков, В.Б. Куликов, Г.М. Зверев и др.,- Тезисы докладов XX международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2008г.
60. K.L.Tsai, C.P.Lee, K.H. Chang *et.al.* J. Appl. Phys., **76**(1), pp274-277, (1994).
61. R.K.Richards, D. Hutchinson, C.A. Bennett, Proc. of SPIE. 2003. V. 4820. P. 250.
62. В.Б. Куликов, И.В. Будкин, - Прикладная физика. 2003. №. 5. С. 79.
63. П.А. Богомоллов, В.И. Сидоров, И.Ф. Усольцев, «Приемные устройства ИК – систем», - М., Радио и связь, 1987г., с.49.
64. Патент РФ №2589759 , Фотоприемник на основе структур с квантовыми ямами, В.Б. Куликов, А.А. Солодков, В.В. Тарасов. Опубликовано 10.07.2016. Бюл.№19.
65. J. Jiang, S. Tsao, T.O'Sullivan, M. Razeghi, G. J. Brown , Infrared Physics & Technology, **45**(2) , pp.143-151 (2004)
66. Сайт www.flipchips.com
67. Дж.А. Рилей, Мир микро- и наноэлектроники, - К. «Экспромт», 2009г. 78с.
68. Г.Х Аветисян, И.Д. Залевский, В.Б. Куликов, В.П. Котов, А.К. Еркин, Тезисы докладов V международной конференции «ПЗС и системы на их основе», Новый свет, Крым, (1995г.).
69. G.H. Avetisjan, V.B. Kulikov, V.P. Kotov, A.K. Erkin, I.D. Zalevsky, Proc. of SPIE, v.2790, pp 30-37 (1996).

70. В.Б. Куликов, Л.М. Василевская, Г.Х. Аветисян и др. Тезисы докладов Тезисы докладов XVII международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2002г.
71. В.Б. Куликов, Л.М. Василевская, Г.Х. Аветисян и др. Прикладная физика, №5, сс 84-87 (2003г.).
72. Ж. Госсорг, Инфракрасная термография, - М.Мир, 1988г.с 296.
73. Г.Х. Аветисян, И.Д. Залевский, В.Б. Куликов, Патент РФ № 2125321, пр.10.04. 1997г.
74. М.Борн, Э.Вольф, Основы оптики, - М. Наука, СС 362-372, 1973г.
75. S.V. Bandara, S.D. Gunapala, J.K. Liu et al, Infrared Phys. and technol., v. 44, pp 369-375, (2003).
76. A. Goldberg, E. Cho, B. McQuiston, Proc. of SPIE, v.5783, pp755-786, (2005).
77. J. Le Rouso, I. Ribert-Mohamed, N. Guerineau et al, Proc. of SPIE, v.5783, pp747-754, (2005).
78. K.- K. Choi, C. Monroy, V. Swaminathan et al, Infrared Phys. And Technol., v. 50, pp 124-135 (2007).
79. Ph.Nussbaum, R. Volkel, H.P. Herzig et al., Pure Appl. Opt., vol.6 (1997) 617-636.
80. E.M. Strzelecka, G.D. Robinson et al, Microelectronic Engineering, v.35 (1997) 385-388.
81. S.D. Gunapala, S.V. Bandara, A. Singh et al, IEEE Trans. On El.Dev., v.47, № 5, pp 963- 971(2000).
82. S.D. Gunapala, S.V. Bandara, J.K. Liu et al, Proc. of SPIE, v.5406, pp 600-604,(2004)
83. А.Б. Барабанов, П.В. Бирюлин, А.А. Солодков др. Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений,- сб. статей. вып.3, с.173-179, Москва, 2011г.

84. О.Ф. Бутягин, Н.И. Кацавец, В.Б. Куликов и др. Письма в ЖТФ, т.38, вып.9, СС81-87, (2012г.)

85. А.Л. Дудин, Н.И. Кацавец, В.Б. Куликов и др. Труды XXII международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2012г.

86. В.Б. Куликов, М.В. Сахаров, В.Г. Средин, - Труды XXI международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2010г.

87. В.Г. Средин, В.Б. Куликов, М.В. Сахаров, Ю.В. Васильева, - Труды XXII международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2012г.

88. В.Г. Средин, М.В. Сахаров, В.Б. Куликов, Г.К. Васильев, Б.В. Бравый.. Изв. вузов. Материалы электронной техники. 2011, №1, с. 25-29.

89. А. В. Войцеховский, С. А. Шульга, В. Г. Средин, Н. Х. Талипов, Изв. вузов. Физика. - 2010. - № 9. - С. 53—58.

90. В. И. Стафеев, И. Д. Бурлаков, К. О. Болтарь и др., Изв. вузов. Материалы электрон. Техники,- 2007. - № 2. - С. 31—34.

91. В. Г. Средин, М. В. Сахаров, Прикладная физика. - 2011. - № 2. - С. 5—10.

92. Н.С. Кошляков, Э.Б. Глинер, М.М. Смирнов – Основные дифференциальные уравнения математической физики, - ГИФМЛ, Москва, 1962г.

93. В.В. Тарасов, А.А. Солодков, В.Б. Куликов и др. Тезисы докладов научно-практической конференции «Оптико-электронные приборы и комплексы», - АО «Швабе», ПАО «КМЗ им. С.А. Зверева», ОНТА «Контенант», с.52 (2017г.).

94. В.Б. Куликов, Д.В. Маслов, А.Б. Барабанов, А.А. Солодков, Патент РФ на полезную модель №169683 , Фотоприемное устройство, Опубликовано 28.03.2017г. Бюл.№10.

95. В.В. Тарасов, А.А. Солодков, В.Б. Куликов и др., - Труды XXV международной научно – технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, Москва, 2018г.