

УЧРЕЖДЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
СПЕЦИАЛЬНАЯ АСТРОФИЗИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ РАН

№ госрегистрации 01200964100

УДК 520.2/.8

УТВЕРЖДАЮ  
Директор САО РАН  
член-корр. РАН Балегга Ю.Ю.

---

12 сентября 2011 г.

ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

В рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры  
инновационной России» на 2009-2013 годы

по теме:  
РАЗРАБОТКА НОВЫХ МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ ДЛЯ КРУПНЕЙШЕГО  
ОПТИЧЕСКОГО РОССИЙСКОГО ТЕЛЕСКОПА БТА

**Шифр** 2009-1.1-000-081-024

**Государственный контракт от « 30 » сентября 2009 г. № 02.740.11.0472**

Руководитель НИР,  
канд. физ.-мат. наук,

\_\_\_\_\_

В. В. Власюк

12 сентября 2011 г.

Нижний Архыз 2011

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы, директор, докт. физ.-мат. наук, член-корр. РАН		Балега Ю.Ю. (введение, заключение, раздел 1)
Исполнители темы:		
Зам. директора, канд. физ.-мат. наук		Власюк В.В. (введение, заключение, раздел 3)
Зав.лаб., докт. физ.-мат. наук, проф.		Терехов А.С. (раздел 2)
Зав.лаб., канд. техн. н.		Маркелов С.В. (раздел 1,4)
Ведущий научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		Бескин Г.М. (раздел 2)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		Плохотниченко В.Л. (раздел 2)
Старший научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		Карпов С.В. (раздел 2)
Старший научный сотрудник, канд. техн. наук		Якопов М.В. (раздел 3)
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		Емельянов Э.В. (раздел 3)
Научный сотрудник, канд. техн. наук		Якопов Г.В. (раздел 3)
Научный сотрудник, канд. физ.-мат. наук		Москвитин А.С. (раздел 2)
Ведущий инженер		Мурзин В.А. (раздел 1,4)
Старший инженер		Притыченко М.А. (раздел 1)
Старший инженер		Борисенко А.А. (раздел 1)
Старший инженер		Ломакин А.А. (раздел 1)
Инженер/аспирант		Османов М.М. (раздел 3)
Аспирант		Беркутов В.С. (раздел 2)
Аспирант		Рецлов Я.О. (раздел 2)
Инженер/аспирант		Митиани Г.Ш. (раздел 1)
Главный экономист		Узденова Ш.А.

## Реферат

Отчет 46 стр., 23 рис., 3 таблицы.

Объектом исследования являются методы астрономических наблюдений в оптическом диапазоне длин волн.

Цель работы – проведение испытаний новых методов наблюдений для крупнейшего оптического телескопа России БТА, подготовка высококвалифицированных специалистов, развитие научно-исследовательского коллектива, специализирующегося в области разработки методов оптических наблюдений. Обеспечение достижения научных результатов мирового уровня, подготовка и закрепление в сфере науки и образования научных и научно-педагогических кадров, формирование эффективных и жизнеспособных научных коллективов.

Разрабатываемые методы:

- ПЗС-системы нового поколения с высокими чувствительностью, фотометрической стабильностью и производительностью.
- Метод регистрации отдельных фотонов с использованием КЧД на основе GaAs катода.
- Методика изготовления сверхпроводящих пленок для регистрации оптического излучения астрономических объектов.

В процессе работы разработаны и испытаны новые методы для наблюдений на БТА.

Степень внедрения – опубликованы результаты исследований по теме НИР в высокорейтинговых журналах.

Создание новых методов наблюдений на БТА позволит повысить эффективность наблюдений на крупнейшем наземном телескопе России.

Полученные результаты можно применять для решения актуальных задач в области наблюдательной астрофизики.

## СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	5
1	ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЗС-СИСТЕМЫ И ЕЕ ИСПЫТАНИЯ	7
2	ТЕСТИРОВАНИЕ ИЗГОТОВЛЕННОГО ПРИБОРА НА ОСНОВЕ КЧД НА ТЕЛЕСКОПЕ БТА	18
3	ПРОГНОЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК В АСТРОНОМИИ	34
4	ПРОВЕДЕНИЕ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	43
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	44

## ВВЕДЕНИЕ

Специальная астрофизическая обсерватория РАН является крупнейшим центром наземной астрономии в России. В оптическом диапазоне обсерватория оснащена телескопом мирового уровня с диаметром главного зеркала 6 метров (БТА). Обсерватория создавалась в 1966 году как центр коллективного пользования под строящимся крупнейший (того времени) в мире телескоп и остается таковым центром и в настоящее время, на котором проводят наблюдения ученые астрономического сообщества мира. БТА работает в режиме коллективного пользования с 1976 года (безвозмездно) и оснащен современной навесной аппаратурой. Методы наблюдений на телескопе постоянно модернизируются и создаются новые силами сотрудников обсерватории (поскольку телескоп является уникальным сооружением и для него промышленность не изготавливает навесное оборудование).

В результате выполнения работ по проекту были изготовлены и испытаны новые методы наблюдений на оптическом телескопе БТА:

- ПЗС-системы нового поколения с высокими чувствительностью, фотометрической стабильностью и производительностью.
- Метод регистрации отдельных фотонов с использованием КЧД на основе Ga-As катода.
- Методика изготовления сверхпроводящих пленок для регистрации оптического излучения астрономических объектов.

Содержание работ по контракту на четвёртом этапе выполнения госконтракта:

1. Изготовление ПЗС-системы и ее испытания.
2. Тестирование изготовленного прибора на основе КЧД на телескопе БТА.
3. Прогноз использования сверхпроводящих пленок в астрономии.
4. Проведение патентных исследований.

Работы, проводимые за счет внебюджетных источников: Изготовление ПЗС-системы и ее испытания. Тестирование изготовленного прибора на основе КЧД на телескопе БТА.

К выполнению НИР привлекались аспиранты и студенты.

*Актуальность работ*, проводимых по контракту. В области фундаментальных исследований наблюдательная астрофизика обеспечивает получение новейших знаний о происхождении и эволюции объектов Вселенной. Этот вопрос является одним из самых важных в естествознании. Исследование Вселенной как целого позволяет проводить

тестирование физических моделей микромира. Результаты астрофизических исследований, полученных сегодня, составят основу для развития физических наук человечества в XXI веке.

*Новизна работы.* Создаваемые новые методы наблюдений на телескопах являются оригинальными (впервые полученные) и уникальными (созданы специально для БТА).

## 1 ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПЗС-СИСТЕМЫ И ЕЕ ИСПЫТАНИЯ

На первом этапе выполнения госконтракта был подготовлен обзор по современному состоянию проблемы разработки высокочувствительных ПЗС-систем для оптической астрономии. Показано, что ПЗС-матрицы, что являются наиболее эффективным средством для астрономических наблюдений в оптическом диапазоне, что обусловлено их высокой квантовой эффективностью, низкими шумами и большим пространственным разрешением или высоким временным разрешением. В последние годы разработаны и производятся высококачественные ПЗС-матрицы различных типов, предназначенные для научного приборостроения. Широкое применение находят большие ПЗС-матрицы с кадровым переносом заряда, импактроны (ПЗС с внутренним усилением), быстродействующие pnCCD.

На основе таких приемников разрабатываются ПЗС-системы научного класса, отличительными характеристиками которых являются высокие чувствительность, точность измерения потоков излучения и, соответственно, пространственная или временная разрешающая способность, что определяет их высокие сложность построения и стоимость. Большие ПЗС-матрицы и составные приемники используются во всех длинноэкспозиционных методах наблюдений (фотометрия, спектрофотометрия и т.д.), импактроны применяются в короткоэкспозиционных методах с повышенной частотой смены кадров от десятков нескольких сотен в зависимости от формата приемника (спеклинтерферометрия, регистрация волнового фронта), pnCCD – в методах, требующих очень высокой частоты смены кадров вплоть до 1000 Гц (регистрация волнового фронта).

В лучших образцах современных научных ПЗС-систем на основе матриц с кадровым переносом достигаются:

- шум считывания – 2 - 4  $e^-$ /пиксел, квантовая эффективность - около 90% в максимуме спектральной чувствительности, спектральный диапазон - 200-1100 нм;
- нелинейность передаточной характеристики - 0.1-0.3 %;
- фотометрическая стабильность – 0.6 – 0.8 %
- число пикселей - от 2048 x 2048 до 4096 x 4096 для монокристаллических матриц;
- число пикселей – от 4096 x 4096 до 18560 x 18432 для составных матричных приемников;
- скорость считывания – до 500 Кпикселей/с одного канала.

В системах на матрицах с внутренним усилением используются импактроны с числом пикселей от 128 x 128 до 1024 x 1024 с коэффициентом усиления 1000 и более, скоростью считывания до 11 Мпикселей/с, шумом считывания менее  $1 e^-$ , квантовой эффективностью около 90%.

В системах на основе pnCCD, находящихся пока только в стадии разработок, применяется уникальный приемник с числом пикселей 264 x 264, с шумом считывания 2-3  $e^-$ , частотой считывания до 1000 Гц и квантовой эффективностью до 100 %.

Коммерческие профессиональные ПЗС-системы выпускаются только тремя ведущими компаниями: Photometrics (США), Princeton Instruments (США) и Spectral Instruments (США), но их характеристики не соответствуют требованиям астрономии. Более высококачественные системы разрабатываются и изготавливаются непосредственно в нескольких крупных обсерваториях, включая САО РАН.

Ключевыми требованиями к построению аппаратуры для самых разных методов наблюдений на телескопах являются:

- обеспечение ее максимальной чувствительности;
- обеспечение предельной фотометрической точности, то есть долговременной фотометрической стабильности и линейности преобразования светового излучения в конечные цифровые изображения;
- реализация ПЗС-контроллеров, обеспечивающих как указанные требования, так и универсальные возможности по управлению различными типами приемников изображения в широком диапазоне скоростей считывания;
- реализация архитектур систем управления и сбора данных с высокой пропускной способностью.

На втором этапе выполнено математическое моделирование и лабораторное исследование МОП-транзисторов с широким и коротким каналом, которые обычно используются в выходных устройствах малошумящих ПЗС-матриц. Предпосылками этой работы являлись выводы теории МОП-транзисторов о том, что транзисторы такого типа обеспечивают максимальную крутизну передачи входного сигнала, но ее величина и линейность передачи значительной степени зависят от дифференциальной проводимости сток-исток транзистора. Построена математическая модель выходного устройства ПЗС-матрицы, преобразующего зарядовые пакеты в электрический сигнал, на основе его полной эквивалентной схемы. Предложен способ исключения влияния дифференциальной проводимости сток-исток посредством стабилизации напряжения сток-исток. Экспериментальные исследования выходного МОП-транзистора при компенсации проводимости сток-исток достигаются увеличение на 30 % его зарядовой



чувствительности, уменьшение нелинейности и стабильности передачи сигнала в 5-10 раз в сравнении с типичными схемами включения транзистора в виде истокового повторителя с резистивной нагрузкой или с генератором тока.

На третьем выполнены математическое, имитационное моделирование и разработка алгоритмов цифровой оптимальной фильтрации видеосигнала из его смеси с шумом, а также разработана методика и алгоритмы цифровой коррекции неустойчивости и нелинейности сквозного видеоканала ПЗС-системы. Показано, что методами цифровой фильтрации может быть достигнуто снижение шума считывания до его физически допустимой минимальной величины. А методика коррекции неустойчивости и нелинейности позволяет обеспечить предельную на практике фотометрическую точность и долговременную стабильность ПЗС-системы. Разработаны схемные реализации алгоритмов для ПЛИС типа Cyclon II.

На четвертом этапе произведены анализ и выбор универсальной архитектуры и форм-фактора компьютерной системы ввода цифровых изображений с высокой пропускной способностью, которая позволит обеспечить прием и сохранение потоков данных от ПЗС-матриц или мозаичных детекторов, имеющих самую различную производительность. В основу проработанных технических решений заложены технология PCI Express и форм-фактор (то есть промышленный стандарт) SHB Express.

На пятом, завершающем, этапе выполнено изготовление лабораторного образца ПЗС-системы, в основу которого легли разработанные способы прецизионной обработки видеосигнала ПЗС-матриц и скоростного ввода потоков цифровых видеоданных.

На рис. 1 показан общий вид криостатируемой ПЗС-камеры, конструкция которой позволяет использовать матричные приемники изображения различных типов. Камера состоит из заливного непроливаемого оптического криостата с навесным ПЗС-контроллером и блока питания камеры. ПЗС-матрица устанавливается в криостат и управляется ПЗС-контроллером. В Табл. 1 приведены основные характеристики криостата, на рис.2 представлен чертеж криостата в разрезе. Блок питания обеспечивает подачу на контроллер набора высокостабилизированных напряжений питания.

ПЗС-контроллер построен по модульному расширяемому принципу. Он включает в себя модули управления и оптоволоконного интерфейса, видеопроцессора, генератора-драйвера (рис.3). Количество модулей может наращиваться при использовании многоканальных матриц. Контроллер обеспечивает формирование временной развертки ПЗС-матрицы, усиление и аналого-цифровое преобразование видеосигнала при считывании накопленных во время экспозиции зарядовых пакетов, цифровую фильтрацию и коррекцию в реальном времени считывания и

передачу данных в систему сбора через интерфейс GigaStar 1 Гб/с. Все модули основаны на ПЛИС Cyclon II со встроенными процессорными ядрами.



Рис. 1. Криостатируемая ПЗС-камера (справа криостат с контроллером, слева блок питания)

Таблица 1. Основные характеристики криостата.

Наименование	Тип, величина
Конструкция криостата	непроливаемый
Хладагент	жидкий азот
Емкость хладагента	1 л
Материал криостата	титан
Вакуумные уплотнения	индий
Рабочая температура матрицы	- 110 °С
Нестабильность температуры матрицы	не более $\pm 0.1$ °С/7 суток

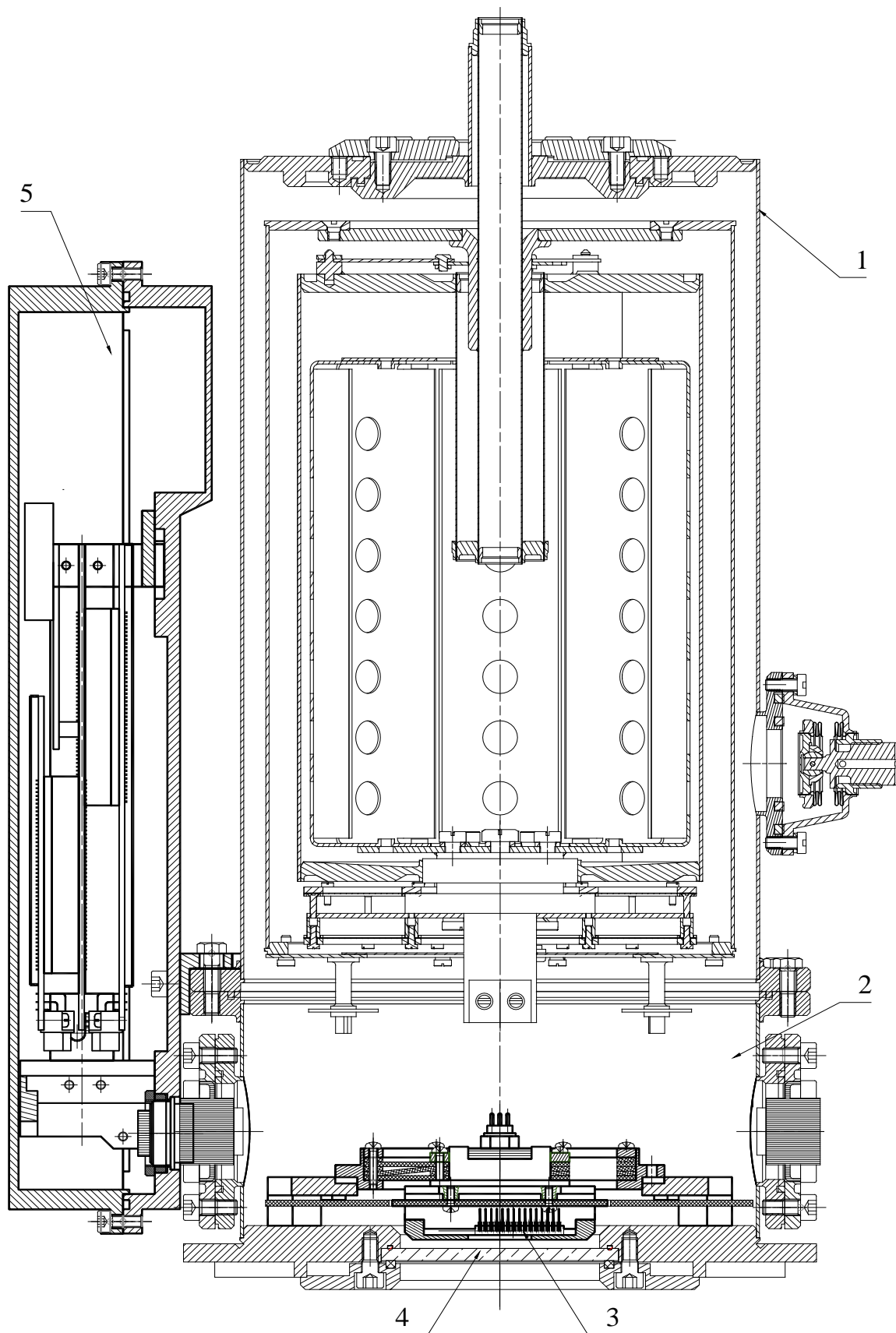


Рис. 2. Криостат с контроллером в разрезе: 1 – корпус криостата; 2- оптическая головка криостата; 3 - ПЗС-матрица; 4 – входное оптическое окно; 5 – ПЗС-контроллер



Модуль управления и оптоволоконного интерфейса:

- Объединяет до 4-х генераторов-драйверов и 8-и модулей видеопроцессоров
- Принимает и выполняет команды от управляющего компьютера
- Обеспечивает термостабилизацию фотоприемника



Модуль видеопроцессора:

- 2/4 видеоканала
- Динамический диапазон видеоканала (при скорости считывания 3 Мпиксел/с) >20000
- Встроенная цифровая обработка сигнала



Модуль генератора-драйвера:

- Формирует до 24 управляющих сигналов фотоприемника
- Обеспечивает программно-управляемую скорость считывания от 20 Кпиксель/с до 16.5 Мпиксель/с

Рис. 3. Модули ПЗС-контроллера, их функции и характеристики

Со стороны управляющего компьютера данные принимаются также модулем GigaStar, конвертируются в стандарт Camera Link и вводятся во фрейм-граббер Matrox Gelios eCL (или любой другой с входным интерфейсом Camera Link). Интерфейс Camera Link предоставляет для связи с камерой медленный двунаправленный канал управления камерой и быстрый однонаправленный канал видеоданных. Программная модель камеры представляет собой набор адресуемых регистров, доступных на запись и чтение.

На рис. 4 наглядно показана реализованная структура системы ввода цифровых изображений. Поточковые данные поступают через интерфейс GigaStar и Camera Link во фрейм-граббер, из которого вводятся в промышленный компьютер SHB Express, то есть записываются в системную память, затем из памяти переносятся посредством контроллера RAID в дисковый массив.

В составе экспериментальной системы нами использованы следующие технические средства:

- фрейм-граббер Matrox Helios eCL с шиной PCI Express;
- одноплатный компьютер серверного типа SHB Express™ (PICMG® 1.3) Trenton MCXT 6633 с двумя 4-ядерными процессорами Intel Xeon;
- пассивная кросс-плата PICMG 1.3 Trenton BPX6610 с одним слотом PCI Express x16 и

пятью слотами PCI Express x8, а также с 6-ю слотами PCI-X/PCI;

- RAID-контроллера Intel® SRCASJ4 с восемью слотами SAS/SATA и с максимальной пропускной способностью не менее 1.5 ГБ/с;
- массив RAID 0 из 4-х дисков SSD 120 Gb SATA-II OCZ Vertex 2 (максимальная скорость записи на диск 275 МБ/с).

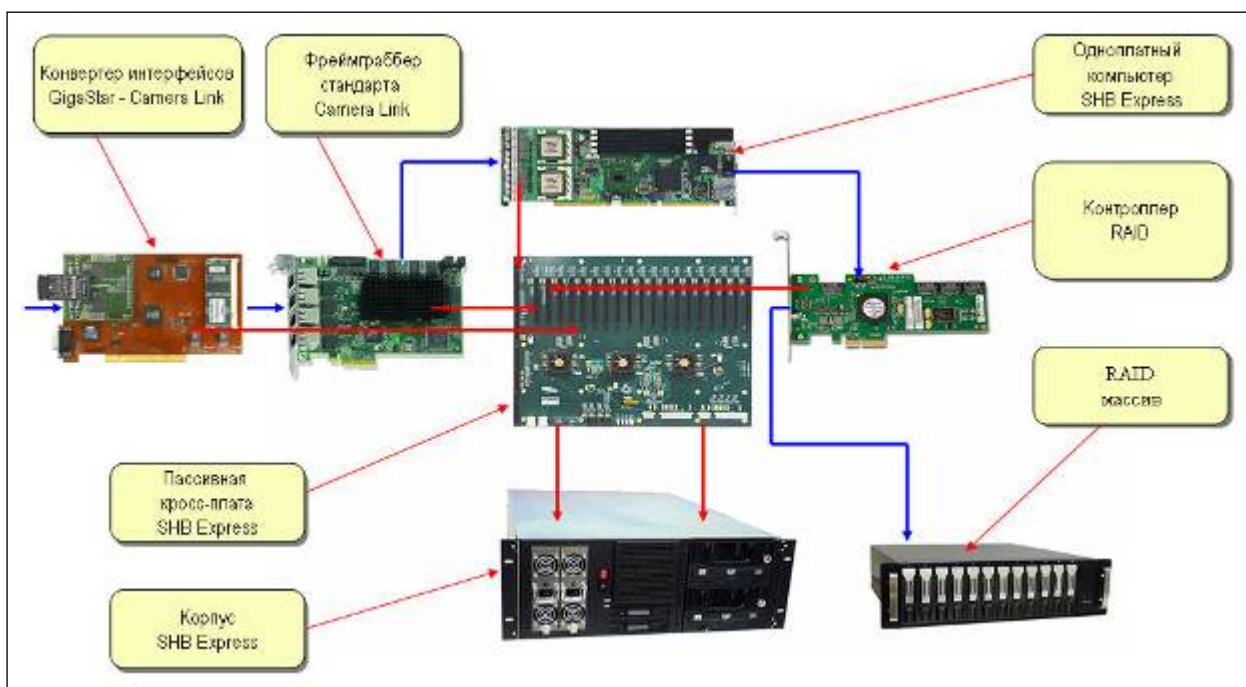


Рис.4. Структура системы ввода цифровых изображений

Технические характеристики фрейм-граббера Matrox Helios eCL состоят в следующем:

- пропускная способность 680 МБ/с;
- интерфейс захвата цифровых изображений Full Camera Link;
- встроенный процессор обработки изображений Matrox Oasis с 64-мя параллельными процессорными элементами и суммарной производительностью 100 BOPS;
- встроенная память 512 MB DDR SDRAM со скоростью записи/чтения 5 ГБ/с;
- интерфейс PCI Express x4.

Matrox Helios eCL программируется с помощью высокооптимизированной библиотеки Matrox Imaging Library (MIL), содержащей многочисленные функции по вводу-выводу, экспресс-анализу и обработке потоковых данных, что позволяет выполнять предварительную обработку астрономических изображений до ввода в основную подсистему процессор-память, сокращая, в частности, избыточность данных.

Исследования в данной области нами не приводятся ввиду разнообразия вариантов их возможной практической реализации в разнотипных методах наблюдений в оптической астрономии.

На рис. 5 показан общий реализованной системы ввода испытательной камеры и многомодового волоконно-оптического кабеля длиной 200 м для дуплексной связи камеры и системы. Испытательная ПЗС-камера основана на pnCCD с производительностью 170 МБ/с, что позволяет проверить пропускную способность системы ввода. Испытания показали, что при максимальной загрузке хост-компьютера обеспечивается пропускная способность 200 МБ/с. Это позволяет использовать в составе ПЗС-систем самые различные ПЗС-матрицы.



Рис. 5. Общий вид системы ввода цифровых изображений (на заднем плане) с испытательной камерой на pnCCD (на переднем плане)

Разработано инструментальное программное обеспечение ПЗС-системы для Windows XP по технологии «клиент–сервер». ПО имеет многооконный интерфейс и позволяет управлять настройками электрического режима матрицы ПЗС-матрицы и ее температуры (рис.6), а также визуализировать изображения и выполнять их экспресс анализ (рис. 7).

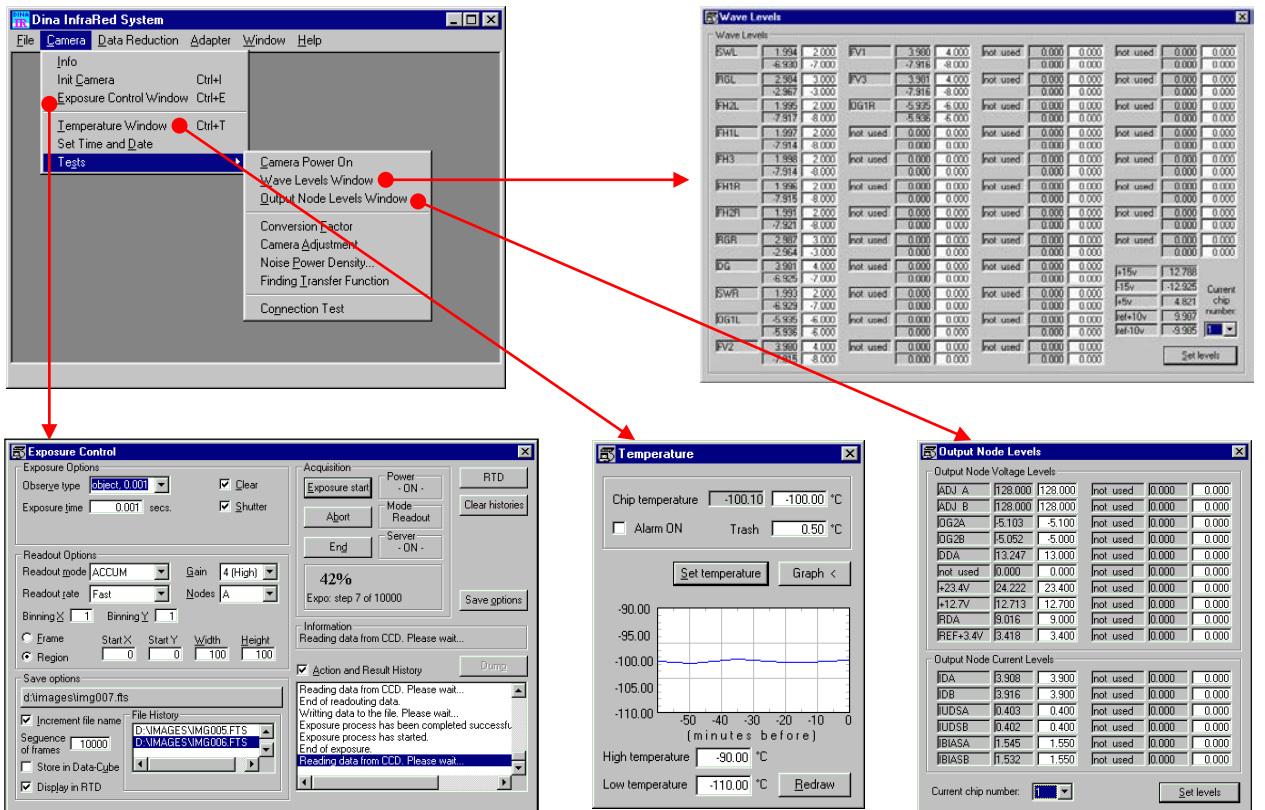


Рис.6. Окна настройки ПЗС-матрицы, управления экспозицией и считыванием

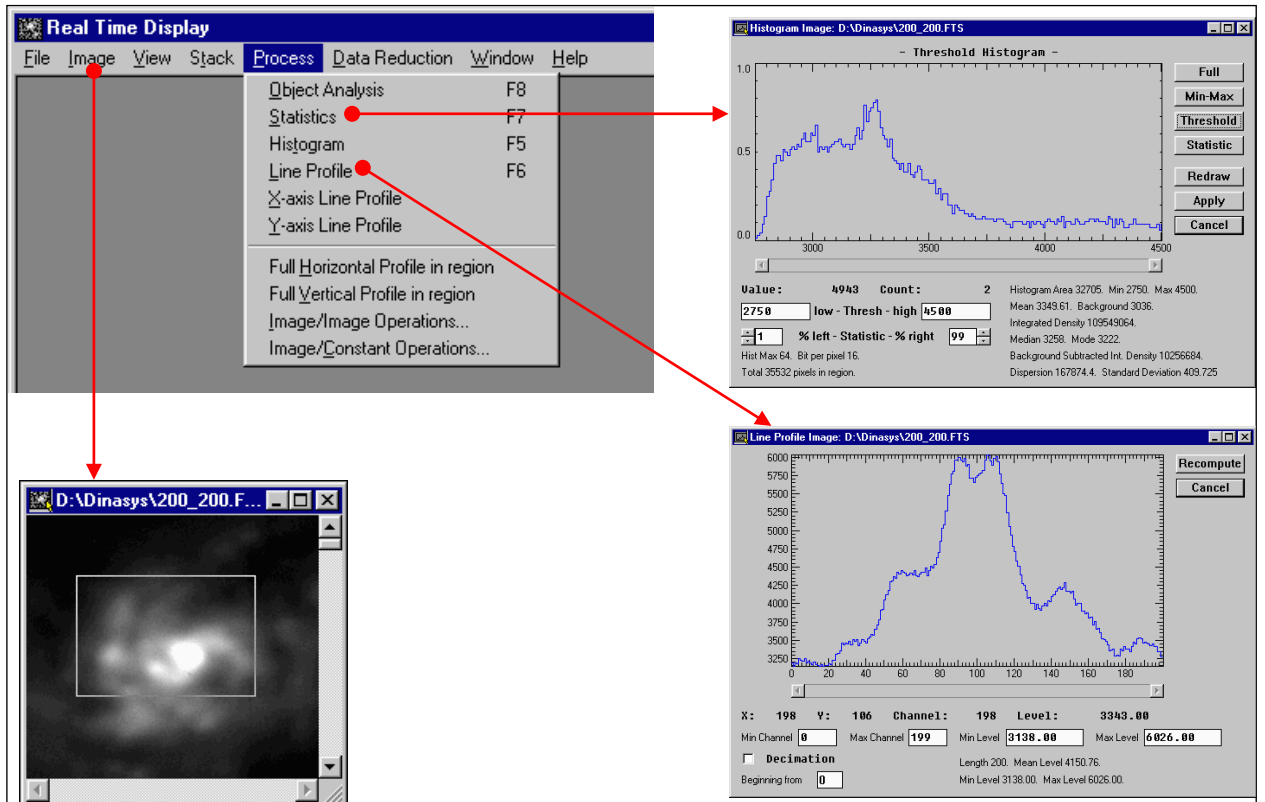


Рис.7. Окна визуализации и экспресс анализа изображений.

Выполнены экспериментальные исследования фотоэлектрических и фотометрических характеристик ПЗС-системы с матрицей E2V Technnnologies CCD42-40 с форматом 2048 x 2048 пикселей, давшие следующие результаты: шум считывания на частоте считывания 18 кГц не превышает 2 электронов за счет использования оптимальной цифровой фильтрации, остаточная нелинейность сквозной передаточной характеристики «свет-цифровой сигнал» не превышает 0.03%, фотометрическая нестабильность не превышает 0.03% за недельный период контрольных измерений (рис.8).

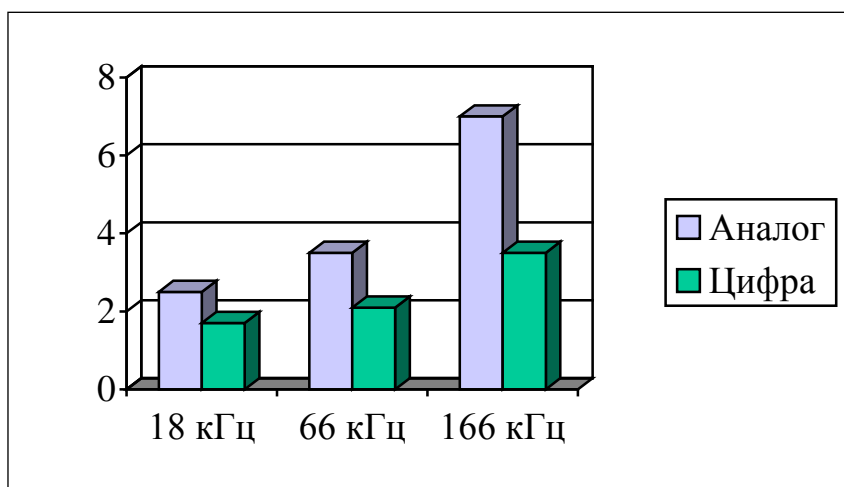


Рис.8. Оптимальный цифровой фильтр с оптимизированными электрическими режимами детектора дает реальное снижение шума считывания на 40..50% по сравнению с традиционной аналоговой коррелированной выборкой

Таким образом, результаты показывают, что разработанные способы и методы построения ПЗС-системы на практике обеспечивают предельные фотометрические характеристики и высокую производительность, что позволяет эффективно использовать такие системы в любых методах наблюдений в оптической астрономии для прецизионной регистрации слабых изображений. Аналогов разработанной ПЗС-системы в мировой практике не имеется.

В рамках настоящей темы на пятом этапе студент 5 курса Митиани Гурам Шотаевич из кафедры «Полупроводниковая Электроника и Физика Полупроводников» Института Новых Материалов и Нанотехнологий НИТУ «МИСиС», обучающийся по специальности 210104 «Микроэлектроника и твердотельная электроника», защитил с оценкой «отлично» дипломную работу на тему «Изучение эффекта спектрально-



зависимых геометрических искажений при преобразовании излучения в матричных ФПЗС с высокорезистивной подложкой».

Митиани Г.Ш. поступил в очную аспирантуру указанного института и принят на работу в САО РАН.

Студентка 6 курса группы 5-ИЭ Романова Юлия Дмитриевна кафедры информационных систем и информационного менеджмента Нижегородского коммерческого института, обучающаяся по специальности 080801 “Прикладная информатика в экономике”, защитила с оценкой «отлично» дипломную работу на тему “Разработка программы визуализации и предварительной обработки FITS–изображений для аэрокосмических целей”.

В 2011 г. для проведения исследований по разработке новых методов построения ПЗС-системы нового поколения из средств госконтракта на этапах 4 и 5 было закуплено оборудование и материалы на сумму 283000 руб.:

1. Радиоэлектронные изделия, ООО «Чип-Дип», 1 компл.
2. Микросхемы LT3080, ООО «Форсайт», 10шт.
3. Радиоэлектронные изделия, ООО «ЭФО», 1 компл.
4. Радиоэлектронные изделия, ООО «Форсайт», 1 компл.
5. Программное обеспечение Matrox, ООО «СВГА», 1шт.
6. Компьютерные комплектующие, ООО «Норма», 1 компл.
7. Канцелярские товары.
8. Металлический шкаф с ячейками для хранения оптических и электронных изделий, ООО «Эликс», 2шт.

## 2 ТЕСТИРОВАНИЕ ИЗГОТОВЛЕННОГО ПРИБОРА НА ОСНОВЕ КЧД НА ТЕЛЕСКОПЕ БТА

На первом этапе выполнения работ по госконтракту был подготовлен обзор состояния проблемы регистрации фотонов с высоким временным разрешением и проведено обоснование использования в астрономических целях этих систем с Ga-As фотокатодами и многоэлементными анодами. Показано, что в настоящее время наиболее эффективными при наблюдениях слабых объектов с высоким временным разрешением оказываются панорамные детекторы с микроканальным усилением и позиционно-чувствительным анодом. Эти системы были введены в астрономическую практику в 1970-80х гг., но вплоть до конца 90х использовались просто как панорамные детекторы в стандартной фотометрии и спектроскопии и, разумеется, в таком качестве не выдерживали конкуренции с ПЗС-матрицами. Однако после создания МАМА-камеры и впечатляющей демонстрации ее возможностей с их помощью проводятся и планируются исследования различных объектов именно с высоким временным разрешением. Разработанные в последние годы координатно-чувствительные детекторы обладают пространственным разрешением до 5 мкм, предельной скоростью счета - 100 КГц и более, а также временным разрешением в доли микросекунды. Были проведены лабораторные исследования координатно-чувствительного детектора с помощью испытательного стенда для детекторов высокого временного разрешения. Квантовая эффективность фотокатода измерена в лаборатории в токовом режиме. Квантовый выход арсенид галлиевого детектора в красном диапазоне в несколько раз выше, чем у мультищелочного. На втором этапе были проведены работы по конструированию и частичному изготовлению компонентов электроники и системы сбора данных координатно-чувствительного детектора (КЧД); выполнен анализ перспективы использования оснастки КЧД (разработанной в Курчатовском институте и применяющиеся в биологических исследованиях); выполнены работы по повышению надежности комбинированного источника питания фотоприемного устройства и обеспечению его использования в режиме удаленных наблюдений на БТА. Модифицирован процесс изготовления GaAs фотокатода - найдены способы повышения квантового выхода арсенид-галлиевых фотокатодов в коротковолновой области их чувствительности. На третьем этапе были завершены методические работы по расширению рабочего поля КЧД и изготовление лабораторного экземпляра 16-анодного GaAs КЧД и проведены некоторые исследования прибора. На четвертом этапе была изготовлена холодильная камера для GaAs детектора на

основе эффекта Пельтье. Создана и исследована новая плата ЗЧУ с резистивной матрицей. Выяснилось, что, несмотря на то, что она обеспечивает почти предельное пространственное разрешение для применяемого КЧД, требуется дальнейшая доработка. Оценка распределения зарядов, выдаваемым микроканальными пластинами по анодам КЧД соответствует расчетным ожиданиям, что свидетельствует о правильности принятого решения о делении анода на 16 квадратных секций. В совокупности с применением резистивной матрицы такая конструкция обеспечивает достаточно хорошую линейность поля зрения детектора.

Созданный в Новосибирске GaAs КЧД является составной частью астрофизического прибора - панорамного фотоспектрополяримера, предназначенного для поиска и изучения переменности блеска астрофизических объектов с временным разрешением до 1мкс, который благодаря использованию сменных оптических блоков, позволяет проводить наблюдения в четырех модах - спектральной, спектрополяриметрической, фотометрической и фотополяриметрической. Именно координато-чувствительный детектор является незаменимым детектором в приборах такого рода. С ним можно регистрировать флуктуации потоков от объектов и звезд сравнения одновременно в различных цветовых полосах и различных ориентациях плоскости поляризации после записи их с микросекундным временным разрешением в память компьютера системой регистрации "Квантохрон 4-48".

**Оптико-механическая схема прибора.** Задачи астрономии высокого временного разрешения можно разделить на две группы - поисковые и исследовательские. Ясно, что в первом случае необходимо использовать приборы максимально упрощенной конструкции с минимальными потерями света. Для выполнения же наблюдений по детальному исследованию нестационарных процессов необходимы инструменты с расширенными функциями, позволяющие получать максимум информации о каждом зарегистрированном фотоне. Созданный нами прибор (рис.9) объединяет в себе поисковые и исследовательские функции, реализация каждой из которых осуществляется использованием соответствующего оптического блока.

Перечислим основные элементы прибора.

Блок фокальной плоскости включает:

- зеркальную щель, раздвигающуюся на ширину от 0.1мм до 1.2мм (0.9-10.5 для масштаба 6-метрового телескопа), имеющую квадратное в проекции на фокальную плоскость телескопа отверстие (10x10мм), в котором установлена линза поля ( $D=9\text{мм}$ ,  $f=50\text{мм}$ ). Зеркало имеет два рабочих положения (рис. 9, разрез А-А) - для наблюдений со щелью или линзой поля (малое и большое поля);

- просветленный двухлинзовый объектив ( $D=15\text{мм}$ ,  $f=50\text{мм}$ ), коллимирующий расходящийся осевой пучок;

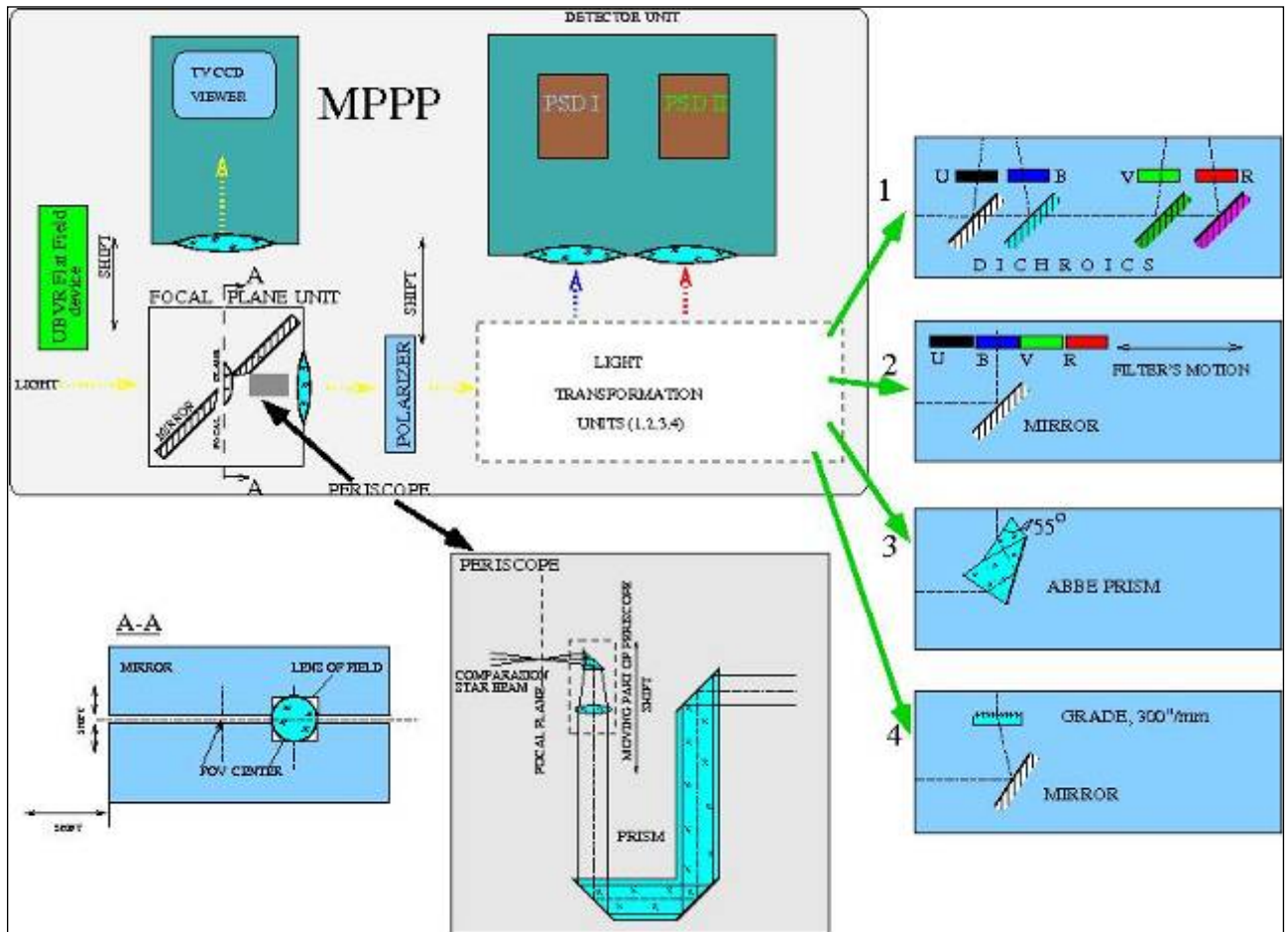


Рис.9. Схема многомодового панорамного фотоспектрополяриметра (МППП).

- перископ (вставка на рис. 9), установленный за щель и переносящий фрагмент изображения площадки размером 2мм (19") из фокальной плоскости телескопа на расстояние 12 - 40мм от оптической оси, на катод КЧД;
- устройство калибровки на плоское поле в UBVR полосах (UBVR flat field device), представляющее собой белый экран на внутренней стороне крышки прибора, освещаемый через оптоволоконный кабель набором светодиодов, включаемых дистанционно при подготовке к наблюдениям;
- блок подзора звездного поля, состоящий из TV CCD-матрицы Sony(TC5101) с объективом, формирующим изображение фокальной области размером 17x25мм (2'.5x3'.5 в масштабе 6-метрового телескопа), перемещающийся вдоль щели вплоть до расстояния в 40мм от оптической оси. Экспозиции матрицы изменяется от 0.001 до 1000 сек;

- поляризатор, представляющий собой комбинацию призмы Волластона и ахроматической полуволновой фазосдвигающей пластины, перекрывающей половину сечения пучка и поворачивающей плоскость поляризации этой части потока излучения в пучке на  $45^\circ$ . При этом формируются четыре пучка с углами поворота плоскости поляризации (относительно главной плоскости призм)  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$ , разнесенные по полю детектора, что позволяет одновременно измерять три параметра Стокса объекта. Также возможна установка обычной призмы Волластона, поворачивающейся вокруг оптической оси на  $\pm 22.5^\circ$  с заданной длительностью фазы сохранения неподвижного состояния. В будущем планируется использование сдвоенной призмы Волластона. На выходе поляризованные пучки попадают на деполяризатор для обеспечения одинаковости условий работы последующих оптических элементов, дихроичных зеркал и входных окон КЧД. Кроме того, работа с поляризационным блоком предусматривает введение деполяризатора и во входной пучок, что позволяет создать контрольный источник к исследуемому объекту из потока света от самого объекта.

**Блок детекторов**, состоит из двух взаимозаменяемых КЧД с фотокатодами S20 (КЧДИ) и GaAs (КЧДИ) для регистрации фотонов синей и красной частей спектра; перед каждым КЧД установлен объектив, формирующий увеличенное в 3 раза фокальное изображение;

**Блоки преобразователей излучения** сменные, могут по очереди устанавливаться в центральном корпусе на пути луча для изменения функции прибора, фотометрии или анализа спектров. Основные блоки показаны на рис. 10:

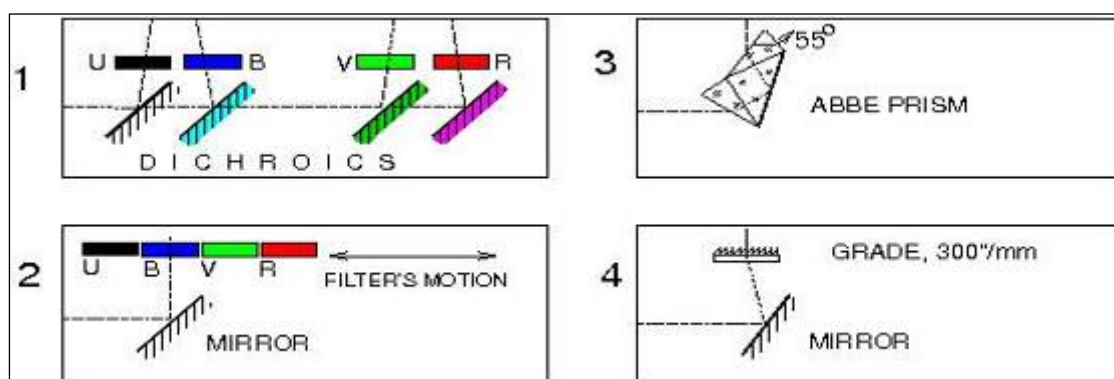


Рис.10. Преобразователи излучения

- блок 1 - набор из 4-х дихроичных фильтров, отражающих излучение с длиной волны, короче 3600, 5200, 6000 и 8000 АА, соответственно; в сочетании с 4-мя дополнительными склейками цветных стекол они формируют спектральные полосы U,

В, V и R, близкие к системе Джонсона; изображения в U и B полосах передаются на фотокатод КЧД1, а в V и R полосах - на фотокатод КЧД2;

- блок 2 - полностью отражающее диагональное зеркало в сочетании со сменными U,B,V,R фильтрами проектирует изображение в одной из полос на один из КЧД (на рис.9 - PSD I);
- блок 3 - призма Аббе, формирующая спектр длиной 5 мм в диапазоне 4000 - 8000 (при ширине щели диагонального зеркала 0.1мм реализуется спектральное разрешение 240/элемент), который проектируется также на один КЧД;
- блок 4 - прозрачная решетка (300 шт/мм), формирующая спектр длиной около 20 мм в диапазоне 4000 - 8000 (при минимальной ширине щели 0.1мм разрешение - 60/элемент).

Прибор может использоваться в упрощенном варианте для работы с одним детектором. В этом случае с помощью одного из трех дихроиков и стеклянного фильтра формируется изображение в одной из полос (U, B, V), а с помощью диагонального зеркала и стеклянного фильтра - в другой (B, V, R), как, например, показано на рис. 11. Оптические блоки просты в изготовлении и юстировке и могут быть собраны под требования выполняемой задачи. В будущем планируется создание конструкции для дистанционной установки выбранного блока на оси прибора.

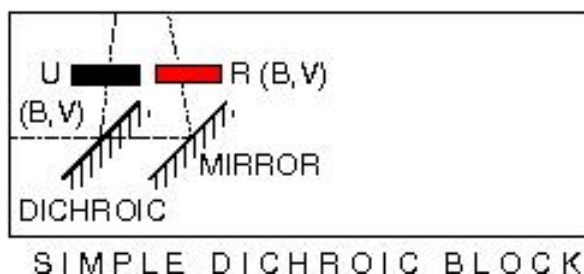


Рис.11. Упрощенный блок цветоделителей для одновременных наблюдений в цветовых полосах U и R

На рис. 12 приведен общий вид многомодового панорамного фотоспектрополяриметра (MPPP). Сделаем несколько поясняющих замечаний к рис. 12. В блоки детекторов входят фотоприемные устройства, состоящие из КЧД, вмонтированных в камеры с холодильниками, зарядовыми усилителями, аналого-цифровыми преобразователями и источниками питания. Блок управления использует PIC-контроллер для опроса датчиков состояния узлов прибора и передачи сигналов на двигатели подвижных элементов под управлением компьютера. Прибор рассчитан на работу с детектором, имеющим

фотокатод до 25 мм в диаметре, что при трёхкратном увеличении изображения в оптической схеме соответствует полю зрения 8мм или 90" в первичном фокусе БТА. В настоящее время используется детектор с диаметром фото катода около 12 мм, что соответствует полю зрения 45" при наблюдениях в широкопольном варианте. В других наблюдательных модах размер поля задается апертурной диафрагмой, меняющейся в пределах от 1"x14" до 10"x14". Управление приборами осуществляется дистанционно по линии RS232 специально изготовленным контроллером с использованием графического интерфейса, позволяющего "видеть" в реальном времени оптическую схему прибора. Установленное перед началом экспозиции состояние прибора автоматически записывается в журнал наблюдений.

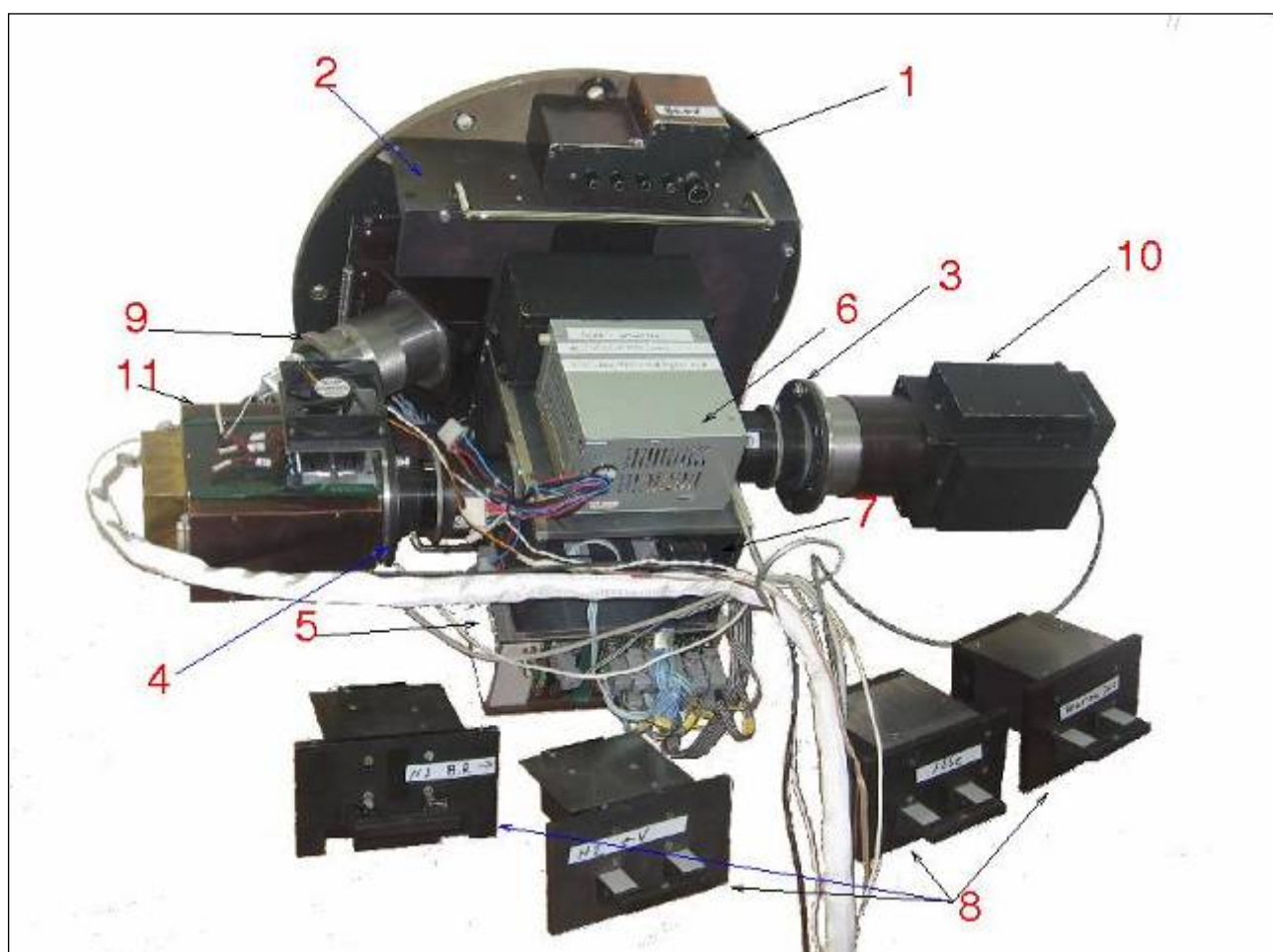


Рис.12. Общий вид фотоспектрополяриметра. 1 -- фланец для установки на телескопе; 2 -- блок фокальной плоскости; 3 -- фланец для установки КЧД I; 4 -- фланец для установки КЧД II; 5 -- блок контроля состояния детекторов и управления подвижными элементами; 6 -- источник питания; 7 -- короб для сменных блоков преобразователей излучения; 8 -- блоки преобразования излучения; 9 -- TV-CCD подсмотр; 10 -- КЧД I; 11 -- КЧД II;

**Вспомогательная электроника.** Для обеспечения полноценного функционирования прибора на большом телескопе, управления прибором в дистанционном режиме, поддержания заданного уровня охлаждения камеры КЧД и плавного включения высокого напряжения детектора, его коррекции, а также питания усилителей, были разработаны дополнительные электронные блоки, тоже связанные с управляющим компьютером по линиям RS232. Опции для взаимодействия с ними также выведены в виде "кнопок" на графическом экране. Электроника управления Пельтье-элементами холодильной камеры обеспечивает перепад температуры между детектором и окружающей атмосферой до  $-40^{\circ}\text{C}$  и периодический контроль ее через каждые 10 секунд. Высокое напряжение после выхода на заданный начальный уровень может быть откорректировано для обеспечения оптимальных параметров работы КЧД и тоже периодически контролируется, но уже каждую секунду. Полученная телеметрическая информация вписывается в заголовки секундных порций принятых отсчетов от КЧД и в последующем используется для верификации накопленных данных с целью исключения артефактов аппаратурного происхождения. Перед оцифровкой сигналы от зарядочувствительных усилителей суммируются в резистивной матрице, описанной в предыдущих отчетах, для измерения моментов зарядов по осям XY на катоде детектора и суммарного заряда. Эти измерения, обрабатываемые согласно простого алгоритма, позволяют получить координаты приходящих квантов. А сопровождающий их строб-пульс служит сигналом для начала их приема регистрирующей системой. Время его прихода измеряется и сохраняется в накапливаемых потоках данных для поиска различных вариаций яркости, переменности в потоках квантов с временным разрешением до  $10^{\circ}$  сек.

**Охлаждение фотоприемного устройства.** В ходе выполнения проекта разработан и изготовлен управляемый источник питания элементов Пельтье для охлаждения камеры, в которой установлен КЧД, с использованием трансформаторной схемы, на современной элементной базе. В результате значительно снизился уровень индуцируемых помех по сравнению с таковыми при использовании импульсных источников питания. Проведены исследования зависимости максимального градиента температур на элементах Пелтье от напряжения питания в реальном конструктиве. Полученный перепад температуры в  $41^{\circ}\text{C}$  позволяет работать как в лабораторных условиях, так и на телескопах САО. Предусмотрен вариант подключения микроконтроллера для дистанционного управления и контроля режимов работы холодильной камеры, чтения датчиков температуры и поддержания связи с управляющим компьютером.

**Система регистрации и накопления данных.** Для регистрации данных в МРРР используется преобразователь время-код Квантохрон 4-48, определяющий,



упорядочивающий и накапливающий характеристики потока фотонов [31]. Этот прибор является развитием систем накопления данных, описанных в работах [32, 33, 34]. Основным его элементом является микросхема SPARTAN XCS40XL\_4PQ240C FPGA (Field Programmable Gate Arrays). Прибор, являющийся интерфейсом между КЧД и компьютером, изготовлен в виде PCI-карты, устанавливаемой в стандартный компьютер типа Pentium III или Pentium IV. Конфигурационный код работы 'Квантохрона 4-48' написан на языке VHDL проектирования логических матриц.

Основные характеристики Квантохрона 4-48:

- точность измерения моментов времени регистрации фотонов -- 30 ns;
- мёртвое время системы -- 30 ns;
- предельный поток отсчетов, регистрируемый без потерь – 10<sup>6</sup> фотоотсч/с;
- размерность входящих кодов -- 48.

Схема взаимосвязи компонент в аппаратном комплексе во время выполнения наблюдений на телескопе показана на рис. 13.

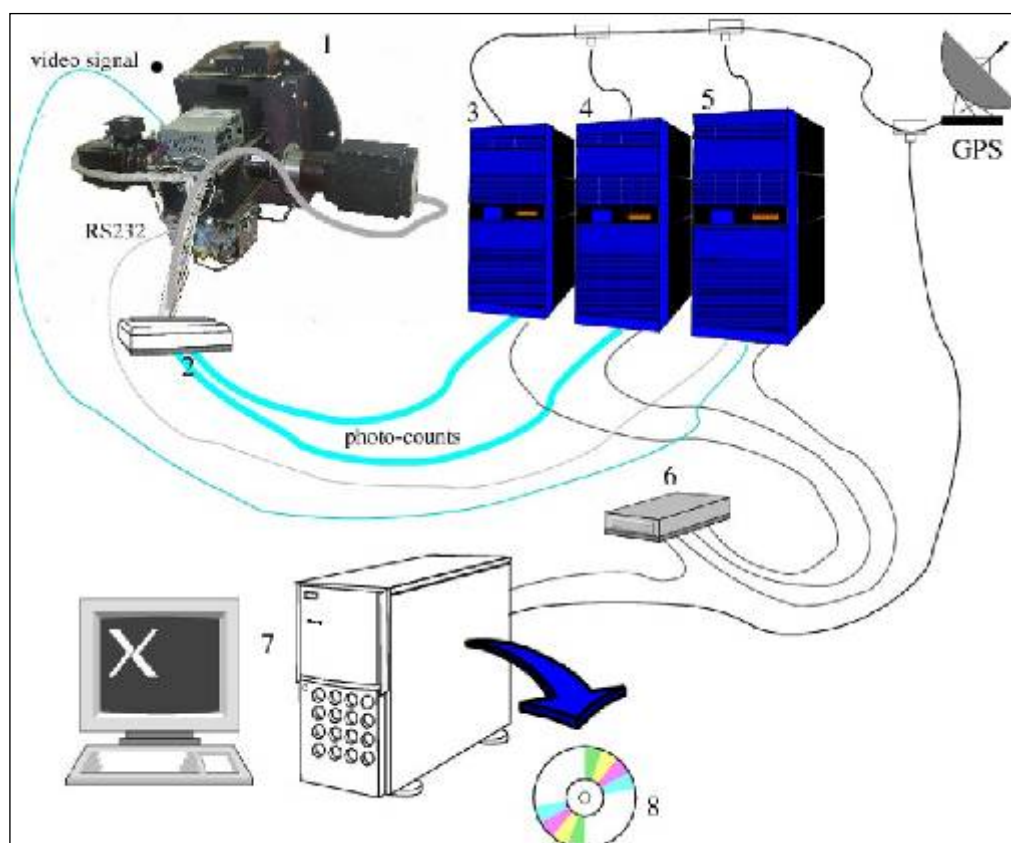


Рис. 13. Схема наблюдательного комплекса 1 -- многомодовый панорамный фотоспекрополяриметр (МРРР); 2 -- мультиплексор поток данных; 3, 4 -- компьютеры приема данных с Квантохронами 4-48 на PCI шине; 5 -- компьютер TV подсмotra и управления кинематикой; 6 -- локальный сетевой переключатель; 7 -- компьютер управления; 8 -- накопленные данные.

В процессе наблюдений КЧД формирует последовательность 40-разрядных кодов, соответствующих координатам каждого зарегистрированного фотона. Эти коды поступают в Квантохрон по 48-разрядной стробируемой линии. Для измерения времени регистрации используются три счетчика импульсов различных частот - 1Hz (pps, секундный счетчик), 10kHz (тактовый счетчик) и 33MHz (нониусный счетчик). Первые два сигнала подаются от GPS, последний от PCI-шины. Нониусный 12-разрядный отсчет времени формируется счетом импульсов внутренней частоты PCI шины и добавляется к 48-разрядам координат, дополняя их до 64-разрядного кода. Набор последних запоминается во внутренней FIFO - памяти Квантохрона и порциями по 32 кода считывается компьютером. Каждый приём данных начинается после прихода сигнал pps и длится одну секунду. Для обеспечения непрерывности приема информации на протяжении сколь угодно длительного времени используются два идентичных Квантохрона, установленные в двух компьютерах, работающих в режиме flip-flop, - когда один принимает отсчёты, второй по межкомпьютерной сети передает ранее принятые данные в компьютер управления. Если используются два КЧД одновременно, то их коды смешиваются в специальном мультиплексоре (2 на рис. 13), приписывающем каждому событию номер принявшего его детектора. Типичный объем накопленных данных за одну наблюдательную ночь составляет несколько гигабайт. Временное разрешение комплекса и точность привязки моментов регистрации фотонов к мировому времени составляет 1мкс.

**Обработка данных.** Наблюдательные данные сохраняются в собственном бинарном формате, содержащем информацию о времени прихода каждого кванта, а также зарядах на отдельных электродах коллектора КЧД. Величины этих зарядов позволяют определять координаты события на фотокатоде, с коррекцией электронных искажений, вносимых КЧД. На этапе первичной обработки данные преобразуются в так называемый фотонный лист, содержащий моменты времен и координаты прихода квантов. Благодаря использованию системы глобального позиционирования GPS для абсолютной временной привязки, моменты прихода в дальнейшем могут быть приведены к барицентру Солнечной системы, что позволяет использовать их для изучения строго периодических сигналов от астрофизических объектов (радиопульсаров, белых карликов и т.д.). Использование фотонного листа дает возможность как производить стандартные процедуры анализа астрономических изображений (фотометрию и астрометрию), так и проводить изучение последовательности моментов регистрации фотонов. Для выделения информации, относящейся к отдельным объектам в поле зрения МРРР, проводится пространственная фильтрация фотонного листа - наложение маски, сформированной из анализа суммарного изображения, полученного за время полной экспозиции.

В фотонных листах компенсируются искажения координат отдельных фотонов объекта, обусловленные внешними причинами, ухудшающими качество изображения (атмосферное дрожание, плохое ведение телескопа, поворот поля и так далее). Кроме того, запись потока отсчетов от фона неба, попадающего в поле зрения прибора, позволяет учесть при обработке всевозможные атмосферные артефакты, такие как зарницы и пролет светящихся объектов. Для этого строится набор изображений с короткими экспозициями, которые, тем не менее, должны содержать достаточное число квантов от фона неба. В каждом из таких кадров определяется яркость фона, наличие треков и положение объекта либо опорной звезды, интерполируется кривая отклонений координат от средних значений на моменты прихода отдельных квантов и проводится соответствующая коррекция их координат, (см. например, рис. 14).

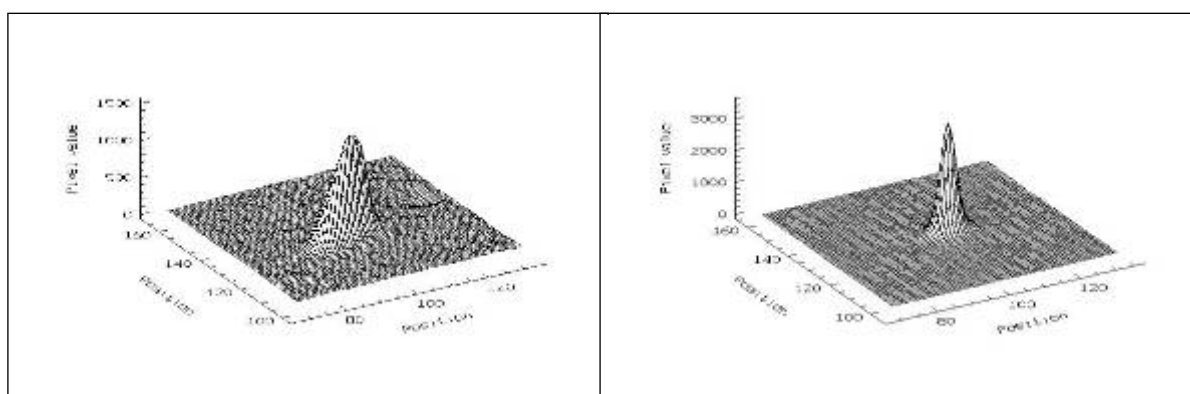


Рис. 14. Вариант применения процедуры компенсации атмосферных искажений при наблюдениях NZ Her на БТА.

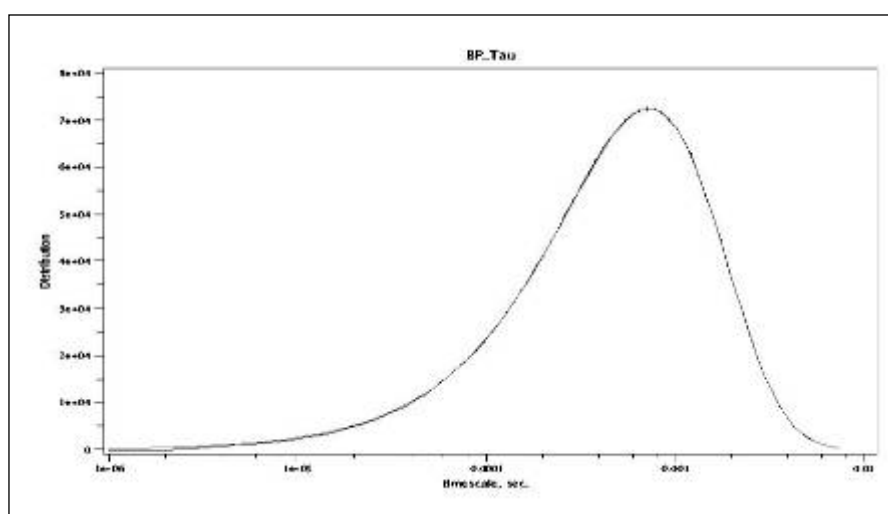


Рис. 15. Распределение интервалов между интервалами в потоке регистрируемых отсчетов от КЧД

Скорректированные фотонные листы могут обрабатываться любым из стандартных методов, в число которых входят построение и анализ кривых блеска с произвольным шагом, исследование статистики интервалов между событиями, свертка с предполагаемой моделью сигнала для периодических процессов. Распределение интервалов между зарегистрированными отсчетами от КЧД при различных засветках его катода светом постоянной интенсивности демонстрирует очень хорошее совпадение с математически ожидаемым распределениями (рис. 15). Это свидетельствует о высоком качестве детектора и вспомогательной электроники, обрабатывающей принимаемые сигналы.

**Пропускная способность МРРР и его чувствительность.** Оптические компоненты МРРР имеют простой состав и работают в параллельных пучках. Общая пропускная способность прибора определяется пропускной способностью всех его компонент, причем параметры фильтров измерены в лаборатории, а оценки пропусканий всех остальных элементов взяты из справочника. В широкопольном режиме используются пять компонент (рис. 9 и 10):

1. тонкая двухлинзовая склейка входного объектива с непросветленными поверхностями (кварц + ЛК7) имеет коэффициент пропускания около 0.9 во всем используемом нами диапазоне длин волн;
2. тонкая кварцевая линза поля с коэффициентом пропускания 0.9;
3. алюминированное зеркало с защитным слоем - отражение 0.9;
4. набор UBVR фильтров, кривые пропускания которых приведены на рис. 16;
5. объектив выходной камеры, состоящий из одной кварцевой линзы, просветленной для синего диапазона, с пропусканием, изменяющимся от 0.98 на длине волны 3300 АА до 0.87 на 6000 АА.

Кривые пропускания в широкопольной моде приведены на рис. 16. Результирующие прозрачности фотометра в полосах U,B,V,R с учетом потерь на отражение на всех оптических поверхностях -- 35, 53, 45 и 47%.

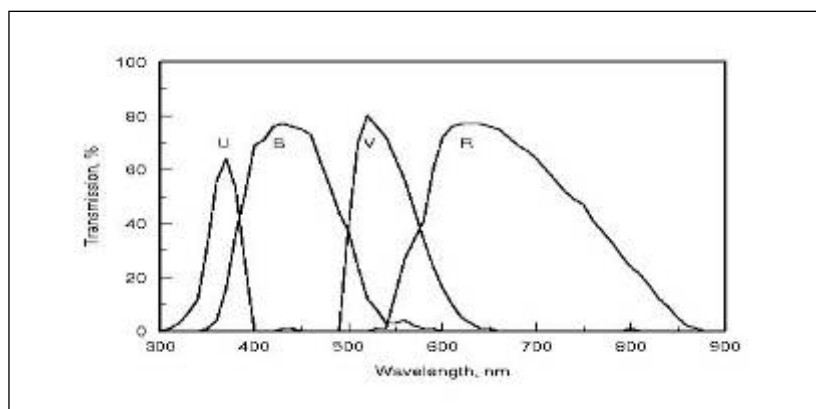


Рис. 16. Кривые спектрального пропускания стеклянных фильтров.

UBVR-фильтры сформированы из цветных оптических стекол (ГОСТ 9411-74) как показано в таблице 2.

Таблица 2. Состав фильтров для 4-х фотометрических полос. В скобках указаны толщины цветных стекол в мм.

U	B	V	R
УФС-2 (1.0)	СС-5 (1.0)	ЖС-17 (1.0)	ОС-14 (1.0)
СС-21 (3.1)	СЗС-21(3.6)	СЗС-21 (3.6)	СЗС-26(3.6)

Полная эффективность МРРР с арсенид-галлиевым КЧД в широкополной моде - 3, 7, 10 и 11% ( в тех же полосах).

МРРР позволяет исследовать переменность астрономических объектов в диапазоне от 1 мкс (мертвое время КЧД) до полного времени накопления данных. Точность измерений параметров зарегистрированного излучения близка к математически ожидаемой (пуассоновской) практически при любых его интенсивностях, см. рис. 7. При плохих погодных условиях точность зависит от нестабильности атмосферы, не всегда компенсируемой при анализе данных. Например, пределы на амплитуду переменной компоненты излучения кандидата в черные дыры объекта МАСНО-99-BLG-22, полученные в наблюдениях с фотометрическим комплексом, составили 4% в диапазоне 1-:-0.1с и 50% в диапазоне  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  с.

**Установка на телескоп и результаты.** На рис. 17 показан МРРР, установленный в стакане БТА САО РАН при подготовке к плановым наблюдениям.



Рис. 17. Наблюдательный комплекс в стакане первичного фокуса БТА. Слева блок из трех компьютеров для управления прибором и приема данных.

MPPP с фотоприемным устройством на основе GaAs детектора был испытан на телескопе. С его помощью получен научный материал, демонстрирующий эффективность детектора в астрофизических исследованиях. На рис. 18 показана суммарная картина потоков фотонов, накопленных от блазара 0716+714 в двух цветовых полосах и четырех ориентациях плоскости поляризации, получаемых при поворотах призмы Волластона на  $+22.5^\circ$  с длительностью удержания каждой фазы 5сек. Динамически накопленные данные при обработке разделяются на два вложенных друг в друга временных ряда, записываются в fits-формате и затем используются для обнаружения долговременных нестабильностей поляризации.

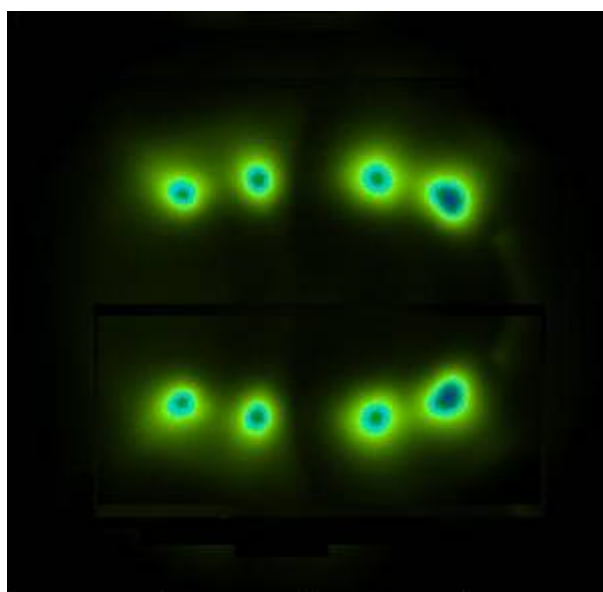


Рис. 18. Наблюдения блазара 0716+714 с GaAs детектором в полосах В и V и 4х поляризациях.

С использованием КЧД проводятся наблюдения и вспыхивающих звезд (рис. 19). В отличие от ранее проводимой нами подобной программы наблюдений, возможность постоянно контролировать наличие атмосферных нестабильностей позволяет очищать временных ряды от ее влияния.

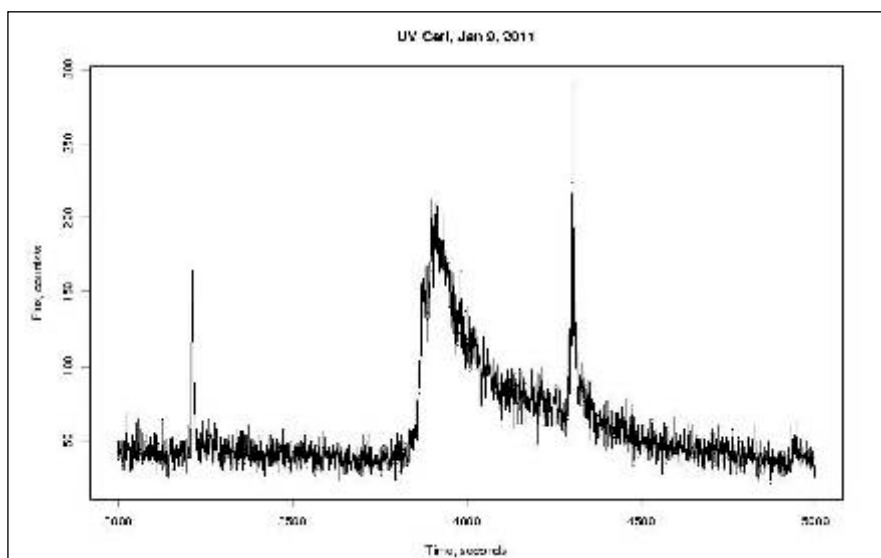


Рис. 19. Образец получения кривой блеска вспыхивающей звезды UV Ceti и участок с максимальной яркостью с секундным разрешением.

На рис.20 показаны изменения яркости фона неба во время зарниц. А представленный на рис. 21 набор вспышек демонстрирует их сходство с ожидаемыми быстрыми астрофизическими явлениями. Принципиальным отличием является изменение яркости во всем поле детектора. Именно это обстоятельство позволяет исключить атмосферные артефакты при поиске переменности астрофизических объектов. Обнаружение подобных событий, но от компактных источников было бы существенным вкладом в астрофизику быстропеременных объектов.

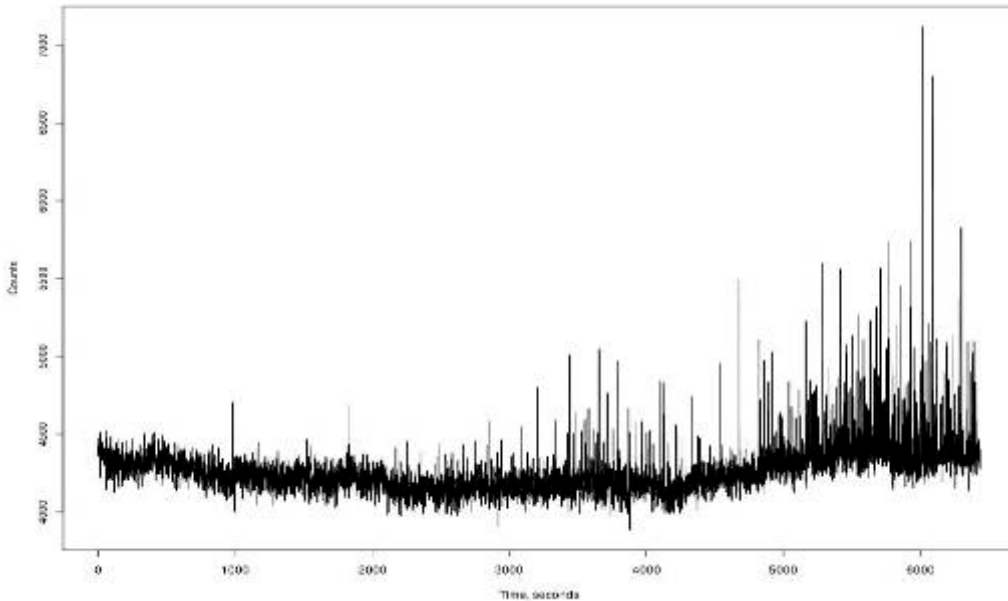


Рис. 20. Зарницы.

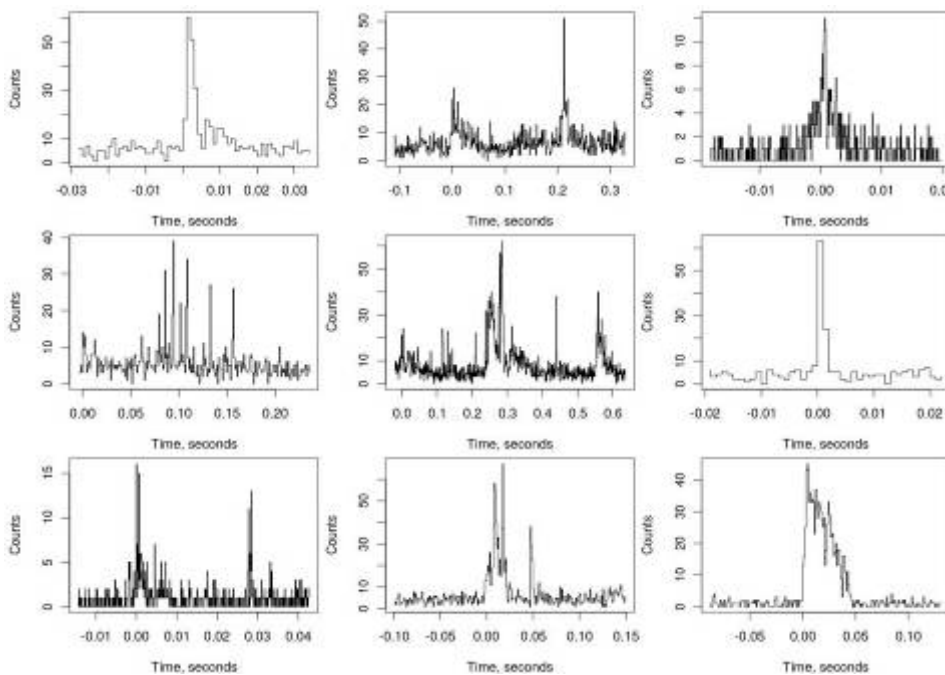


Рис. 21. Профили отдельных вспышек во время зарниц с различными характерными временами.

Пульсар в Крабе является образцом тех астрофизических объектов, которые требуют для своего изучения использования разрабатываемой нами техники. На рис.22 показана развертка кривой блеска с временным разрешением 3.3мс. Развернутая кривая блеска хорошо демонстрирует пульсы и субпульсы, что было практически не достижимо с ранее применяемыми нами детекторами.

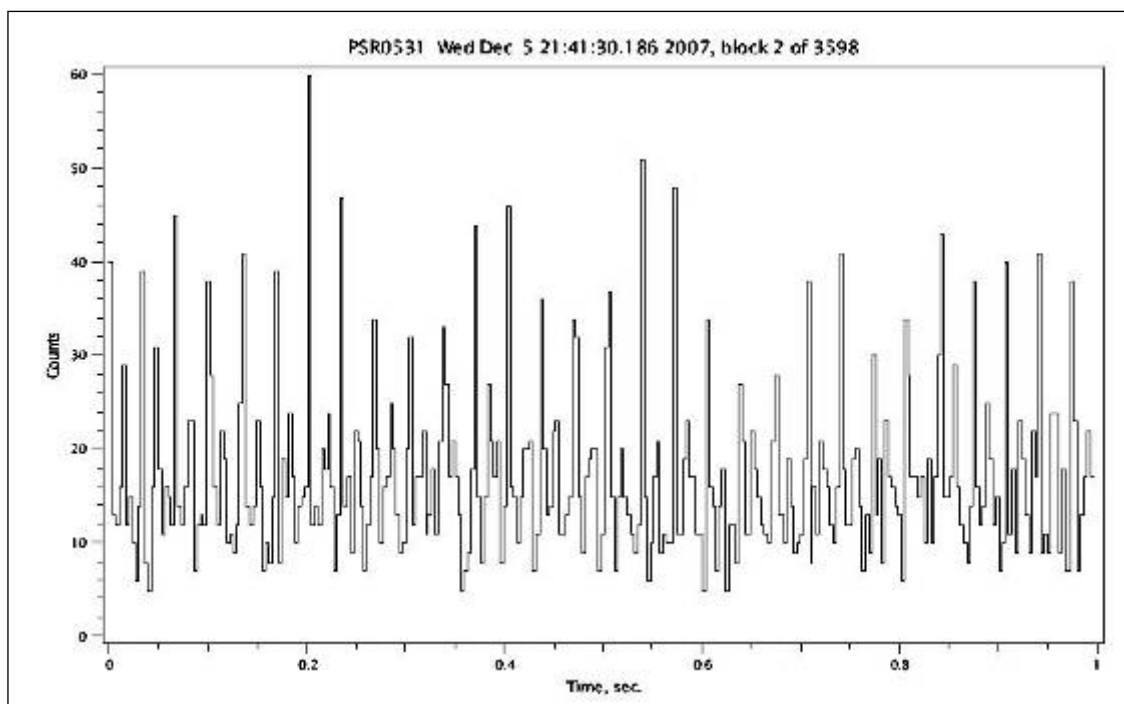


Рис. 22. Изменения блеска пульсара в Крабовидной Туманности с временным разрешением 3.3мс.

Использование GaAs КЧД на телескопе показало его хорошие эксплуатационные качества и существенно лучшую эффективность по сравнению с мультищелочными детекторами. В то же время, приобретенный опыт создания детектора показал, что на этом пути можно добиться и существенно больших успехов.

Полученные результаты исследований планарного GaAs координато-чувствительного детектора показали его высокую эффективность и пригодность к применению в наблюдениях быстропеременных астрофизических объектов. В процессе создания детектора были лучше поняты многие физические проблемы его функционирования и отработаны новые технологические возможности, создающие хороший задел для нового этапа работа над ним.

**Промежуточный электрод.** Опыт, накопленный в работе с КЧД, подсказал, что в его конструкции, между микроканальными пластинами желательно использовать промежуточный электрод, на который можно подавать потенциал от делителя напряжения



высоковольтного питания детектора. Промежуточный электрод между двумя МКП позволяет использовать сборки из двух МКП с разными сопротивлениями, позволяет отдельно оптимизировать режимы работы первой и второй МКП путём независимого приложения двух напряжений, увеличивать напряжение на второй МКП, компенсирующее деградацию её коэффициента усиления в процессе эксплуатации прибора. Угловое распределение электронов на выходе МКП зависит от многих факторов, включающих характер металлизации выхода канала, режим работы МКП (линейный нелинейный), напряжённость вытягивающего поля и может быть получено только путём измерения на конкретной МКП в конкретном режиме работы. Используя КЧД с управляемым напряжением в промежутке между МКП можно решить много разных проблем, связанных с независимой оптимизацией работы каждой из МКП, что улучшит как счётные характеристики прибора (в т.ч. благодаря сужению зарядового распределения лавин), так и его долговечность. Использование промежуточного электрода, конечно, требует проведения исследования работы детектора при различных комбинациях напряжений, устанавливаемых на нем и на других электродах и определения их оптимальных соотношений.

**Ускоряющий зазор.** Как уже отмечалось выше, для вычисления координат центров электронных лавин на многоэлементном аноде КЧД требуется некоторая размазка их. Для этого выходной участок детектора сделан удлиненным, чтобы электронные пучки, вылетающие из микроканальных пластин, получили заметное уширение в тангенциальной плоскости анода за счет тепловой скорости и эффектов косоугольного падения на стенки микроканалов. Работа с опытными образцами КЧД и модельные расчеты на основе более точной информации о геометрии прохождения электронов через микроканальные пластины показали, что в этих приборах с существующим ускоряющим зазором величиной 15мм расширение электронных лавин слишком велико, и, в результате, основная часть заряда из лавин (даже на оси прибора!) захватывается 17м электродом. Поэтому было решено уменьшить этот зазор до 3мм. Уменьшение зазора устранит бесполезные потери зарядов со всеми вытекающими положительными следствиями. Это, прежде всего, увеличение амплитуды принимаемых сигналов, что благоприятно скажется на точности регистрации центров лавин, или снижение коэффициента усиления, что позволит и увеличить ресурс прибора.

### 3 ПРОГНОЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНОК В АСТРОНОМИИ

На первом этапе выполнения работ по госконтракту был подготовлен обзор литературы по проблеме получения слабых астрономических изображений. Приведена классификация приемников излучения. Описан принцип действия СТП. Показана динамика развития детекторов на основе СТП-структур в мире. Сформулированы основные технические требования к созданию таких приемников оптического излучения. На втором этапе был разработан прототип камерных головок детекторов на основе СТП под условия имеющейся спектральной аппаратуры БТА САО РАН; оптимизирован технологический процесс с целью получения качественных структур, удовлетворяющих высоким требованиям, предъявляемым к детекторам излучения; разработана модель, учитывающая влияние подслоя алюминия на электрофизические параметры туннельной структуры - «эффект близости»; разработан и изготовлен криозонд для предварительного тестирования и исследования вольтамперных характеристик тестовых структур при гелиевых температурах (4,2 К); предложен способ использования СТП в спектроскопии высокого разрешения; разработаны основы технологии формирования СТП, базирующиеся на SNEP-процессе; разработана модель СТП, учитывающая влияние подслоя алюминия на электрофизические параметры туннельной структуры - «эффект близости»; разработан и изготовлен комплект фотошаблонов для изготовления тестовых структур с целью определения необходимых параметров и вывода их на расчетные. На третьем этапе были изготовлены криозонд и стенд для исследования ВАХ переходов. Обоснованы толщина поглощающей области детектора, геометрическая форма электродов, исследованы туннельные переходы с удельными сопротивлениями от 100 до 2000 Ом/ $\mu\text{m}^2$ , использовались токоподводы малой ширины. На четвертом этапе был изготовлен калибровочный узел, предназначенный для ослабления света путем ввода в оптическую ось различных аттенюаторов. Совместно с ИФП РАН, ИРЭ РАН, НИЯФ МГУ были проведены лабораторные исследования вольт-амперных характеристик СТП структур при температуре 0.3К.

Применение нового поколения детекторов излучения на основе сверхпроводящих туннельных переходов (СТП) имеет огромные потенциальные возможности в наблюдательной астрономии. По совокупности основных параметров, таких как быстродействие, квантовая эффективность, шумовая температура, спектральное разрешение СТП не имеет конкурентов. Однако, существующего на сегодняшний день спектрального разрешения  $R=10$  (в оптическом диапазоне) и даже перспективного  $R=100$

(с использованием гафния в качестве абсорбера), для серьезных спектроскопических исследований явно не достаточно. Ниже приведена оценка возможности применения СТП с различными видами диспергирующих элементов для повышения разрешающей способности прибора. Рассмотрен частный случай – БТА с комплексом спектральной аппаратуры. Приведены сравнительные характеристики различных схем. Показано, что вариант эшелле + СТП превосходит все используемые схемы по потенциальному качеству.

Для спектроскопических исследований с высоким спектральным разрешением астрофизических объектов во всем мире используются схемы спектрографов, в которых функцию основного диспергирующего элемента выполняет эшелле решетка, работающая в высоких порядках дифракции. Для пространственного разведения порядков эшелльной решетки и упаковки спектра на двумерный твердотельный приемник излучения (матрицу ПЗС) в схему спектрографов вводят дополнительный диспергирующий элемент, плоскость дисперсии которого перпендикулярна плоскости дисперсии эшелле, так называемый элемент скрещенной дисперсии (кроссдисперсер). Различие схем эшелле спектрографов связано в основном с применением элементов скрещенной дисперсии различного типа, а именно, в качестве кроссдисперсера может использоваться либо дифракционная решетка, работающая в первом (реже во втором или более высоком) порядке, либо призма; также в разных схемах может быть различная последовательность диспергирующих элементов. Выбор той или иной схемы спектрографа связан с наиболее оптимальной упаковкой спектра на двумерном приемнике излучения при заданных параметрах спектрографа (разрешение, спектральный диапазон, светосила). Применение приемников излучения на сверхпроводящих туннельных переходах СТП, обладающих спектральной чувствительностью снимает проблему пространственного разведения порядков эшелле решетки, что позволяет отказаться от элемента скрещенной дисперсии в схеме эшелле спектрографа, снижающего светосилу спектрографа на величину от 15% до 40%. Поскольку, при отказе от элемента скрещенной дисперсии мы получаем одномерное изображение спектра, как в случае обычного дифракционного спектрографа, то и приемник излучения со спектральной чувствительностью может быть одномерный (линейка) или квазидвумерным (несколько линеек), что упрощает процедуру считывания сигнала. Так же немаловажным фактором является и временное разрешение приемника СТП, работающего в режиме счета фотонов. Рассмотрим варианты использования СТП-приемников на эшелле спектрографах 6-метрового телескопа БТА, оценим выигрыш в эффективности спектроскопических наблюдений на эшелле спектрографах в сочетании с СТП-приемниками в терминах потенциального качества.

**Возможные варианты применения СТП-приемников на телескопе БТА.** В настоящее время на 6-метровом телескопе БТА используются для выполнения спектроскопических и спектрополяриметрических наблюдений с высоким и умеренным спектральным разрешением четыре эшелле спектрографа, три из которых установлены стационарно на платформах фокусов Нэсмит-1 и Нэсмит-2, а один монтируется в первичном фокусе телескопа. Из-за конструктивных особенностей криостата СТП-приемник может быть ориентирован на использование только в сочетании со стационарными спектрографами, поэтому рассмотрим спектрографы установленные в фокусах Нэсмит-1 и -2.

Кварцевый эшелле спектрограф высокого разрешения НЭС стационарно расположен в фокусе Нэсмит-2 телескопа БТА. Спектральное разрешение спектрографа НЭС  $R=\lambda/\Delta\lambda=60000$ , спектрограф оптимизирован для работы в коротковолновой части оптического диапазона и ближнем УФ-диапазоне. На сегодняшний день спектрограф НЭС оснащен тонкой матрицей ПЗС с максимальной чувствительностью около 90% в синем диапазоне и размером 2052x2052 элементов, размер элемента 15x15 мкм<sup>2</sup>. На одном кадре матрицы ПЗС умещается диапазон длин волн общей длиной примерно 150 нм, смена диапазона осуществляется разворотом элемента скрещенной дисперсии, в данном приборе в качестве кроссдисперсера используется дифракционная решетка.

Светосильный многомодовый эшелле спектрограф высокого разрешения Рысь стационарно расположен в фокусе Нэсмит-2. Спектральное разрешение спектрографа Рысь  $R=30000$ , спектрограф оснащен толстой (красной) матрицей ПЗС размером 1040x1160 элементов и оптимизирован для наблюдений в длинноволновой части оптического диапазона и ближнем ИК-диапазоне. Смена различных вариантов наблюдений осуществляется сменой эшелле решеток и элементов скрещенной дисперсии (дифракционных решеток с различным периодом). У спектрографа Рысь предусмотрен также и вариант наблюдения без пространственного разведения порядков эшелле решетки, изначально этот вариант использовался для высокоточного измерения лучевых скоростей в так называемом режиме астроспидометра. Следовательно этот спектрограф не требует каких либо конструктивных изменений для использования его в сочетании с СТП-приемником.

Эшелле спектрограф умеренного разрешения Краб стационарно расположен в фокусе Нэсмит-1. Спектральное разрешение  $R=4000$ , оснащен матрицей ПЗС размером 1024x1024 элементов, с размером элемента 24x24 мкм<sup>2</sup>. Спектрограф неперестраиваемый, на одном ПЗС-кадре умещается весь оптический диапазон, в качестве элемента скрещенной дисперсии используется призма.

Перейдем теперь к описанию свойств СТП-приемников, необходимых для использования их в сочетании с эшелле спектрографами без элементов скрещенной дисперсии. А именно, рассмотрим, какой спектральной чувствительностью должен обладать СТП-приемник для разделения порядков эшелле-решетки.

Уравнение дифракционной решетки:

$$(m\lambda)/\sigma = \cos\gamma (\sin\alpha + \sin\beta)$$

где  $m$  – целое число, соответствующее номеру дифракционного порядка эшелле решетки,  $\lambda$  – длина волны,  $\sigma$  – постоянная решетки (расстояние между соседними штрихами),  $\alpha$  – угол падения,  $\beta$  – угол дифракции,  $\gamma$  – угол между осью падающего на решетку пучка света и главной плоскостью решетки. Без элемента скрещенной дисперсии на один и тот же элемент СТП-приемника будет попадать множество длин волн ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots \lambda_n$ ) из разных порядков решетки ( $m_1, m_2, m_3 \dots m_n$ ) с одинаковыми углами дифракции  $\beta$ , т.е. будет выполняться условие:

$$m_1\lambda_1 = m_2\lambda_2 = m_3\lambda_3 = \dots = m_n\lambda_n$$

Расстояние между соседними порядками в пространстве длин волн  $\Delta\lambda$  получим из следующего соотношения:

$$m\lambda = (m+1)(\lambda + \Delta\lambda) \Rightarrow \Delta\lambda = -\lambda / (m+1)$$

знак «минус» означает, что с увеличением номера порядка длина волны уменьшается. Из этой зависимости можно сделать следующие выводы. Во-первых, для надежного разделения длин волн попадающих на один и тот же элемент СТП-приемника из соседних порядков эшелле решетки спектральное разрешение СТП-приемника должно быть не хуже  $r = \lambda/\Delta\lambda = m+1$ . Здесь мы обозначили спектральное разрешение приемника излучения символом  $r$ , чтобы не путать со спектральным разрешением спектрографа, обозначаемым символом  $R = \lambda/\Delta\lambda$ , где  $\Delta\lambda$  – минимальный интервал длин волн разрешаемый спектрографом на длине волны  $\lambda$ . Во-вторых, поскольку из уравнения дифракционной решетки  $m \sim 1/\lambda$ , то при  $m \gg 1$  получаем  $\Delta\lambda \sim \lambda^2$ . Следовательно, в идеальном случае для разделения эшелле порядков во всем диапазоне чувствительности СТП-приемника необходимо, чтобы спектральное разрешение приемника имело сходное поведение с длиной волны. Однако, из уравнения энергетического разрешения сверхпроводящего материала получаем, что спектральное разрешение СТП-приемника описывается зависимостью  $\Delta\lambda \sim \lambda^{3/2}$ . Это обстоятельство приводит к необходимости ограничивать коротковолновый диапазон наблюдений на эшелле спектрографе без элемента скрещенной дисперсии в сочетании с СТП-приемником. Ограничить диапазон

можно фильтром, который будет отрезать все высокие порядки дифракции эшелле решетки.

На эшелле спектрографах телескопа БТА проводятся наблюдения в следующих порядках эшелле решетки. На спектрографе НЭС  $m=70\div 147$  в диапазоне  $\lambda=670\div 320\text{нм}$  соответственно. На спектрографе Рысь в одном из вариантов наблюдений  $m=28\div 49$  в диапазоне  $\lambda=760\div 450\text{нм}$  соответственно. На спектрографе Краб  $m=6\div 16$  в диапазоне  $\lambda=980\div 390\text{нм}$  соответственно. Видно, что для спектрографа НЭС необходимо, чтобы спектральное разрешение СТП-приемника было не хуже  $r\approx 150$  на длине волны  $320\text{нм}$ , для спектрографа Рысь  $r\approx 50$  на длине волны  $450\text{нм}$ , для спектрографа Краб  $r\approx 20$  на длине волны  $390\text{нм}$ . В качестве абсорбера здесь необходимо использовать гафний, тантал и ниобий, соответственно. В случае спектрографа НЭС подобрать сверхпроводящий материал с необходимой спектральной чувствительностью предельно сложно ввиду вышеупомянутых технологических моментов, поэтому остановимся на рассмотрении вариантов наблюдений на спектрографах Рысь и Краб.

Оценим теперь размеры линейки из СТП-приемников необходимые для наблюдений без потерь позиционных характеристик спектрографов относительно существующих вариантов наблюдений с матрицами ПЗС. На эшелле спектрографе Рысь используется матрица ПЗС общей протяженностью вдоль спектральных порядков  $16\text{мм}$ , полуширина аппаратной функции спектрографа соответствует  $56\text{мкм}$ . Для уверенного измерения фотометрических и позиционных характеристик различных спектральных деталей необходимо чтобы полуширина аппаратной функции была не меньше размера двух элементов приемника (так называемый критерий двух-пиксельного разрешения). Для регистрации спектра с помощью линейки СТП-приемников без потерь в количестве одновременно регистрируемых элементов спектра необходимо иметь линейку из примерно  $600$  элементов, ширина элемента должна быть  $28\text{мкм}$ . Высота входной щели спектрографа Рысь  $2\text{мм}$ , что в проекции на фокальную поверхность камеры спектрографа соответствует  $260\text{мкм}$ , следовательно, и высота элемента приемника должна быть не меньше этого значения, если ограничиться наблюдениями при хороших погодных условиях, то высота элемента линейки СТП-приемников должна быть не менее  $130\text{мкм}$ . Следует отметить, что изготовление переходов со стороной менее  $10\text{мкм}$  и более  $100\text{мкм}$  является отдельной задачей. Так, уменьшение геометрических размеров ограничивается возможностями литографии (необходимо высокое разрешение), а увеличение площади перехода предъявляет высокие требования к однородности слоев, особенно к качеству барьерного слоя  $\text{AlOx}$ . На эшелле спектрографе Краб используется матрица ПЗС размером вдоль спектральных порядков  $25\text{мм}$ , полуширина аппаратной функции  $50\text{мкм}$ . Высота

проекции изображения звезды на фокальную поверхность камеры спектрографа при хороших погодных условиях 50мкм. Следовательно для этого спектрографа необходима линейка СТП-приемников из 1000 элементов, ширина элемента должна быть 25мкм, высота 50мкм. Напомним, что спектральная чувствительность материала приемника в случае спектрографа Краб может быть в 2.5 раза хуже, чем в случае спектрографа Рысь.

Рассмотрим выигрыш в эффективности наблюдений на спектрографах Рысь и Краб в сочетании с линейкой СТП-приемников относительно вариантов наблюдений с матрицей ПЗС. Для оценки эффективности того или иного спектрального прибора, а также для сравнения спектральных приборов друг с другом, существует величина, называемая потенциальным качеством:

$$W=RLN\tau$$

где R – спектральное разрешение спектрографа, L – светосила системы спектрограф + приемник излучения, N – количество одновременно регистрируемых элементов спектра,  $\tau$  – временное разрешение приемника излучения. В табл.3 приведено сравнение потенциального качества спектрографов Рысь и Краб в вариантах наблюдений с матрицами ПЗС и линейками СТП-приемников.

Таблица 3. Сравнение спектрографов Рысь и Краб в вариантах наблюдений с матрицами ПЗС и линейками СТП-приемников.

Вариант наблюдений	R	N	L	$\tau$	lgW
Рысь + матрица ПЗС	30 000	6600	0.12	0.01	5.38
Рысь + линейка СТП-приемников	30 000	9900	0.20	1	7.77
Краб + матрица ПЗС	4 000	5500	0.17	0.01	4.57
Краб + линейка СТП-приемников	4 000	5500	0.19	1	6.62

Остановимся подробнее на рассмотрении величины временного разрешения  $\tau$ . Временное разрешение СТП-приемника порядка  $10^{-4}$  сек., т.е. такой приемник способен зарегистрировать  $10^4$  событий в секунду, время релаксации сверхпроводящего

туннельного перехода крайне мало, поэтому мертвое время, величина которого порядка  $10^{-8}$  сек, принимать во внимание не будем. Для уверенного обнаружения переменности внутри профиля спектральных линий необходимо чтобы единичный спектр имел отношение сигнал/шум не хуже 100, это означает, что для получения единичного спектра необходимо зарегистрировать порядка  $10^4$  отсчетов на элемент приемника. Если мы наблюдаем яркий объект с предельно высоким потоком, то для получения единичного спектра необходимо затратить время порядка 1 секунды. Поэтому для предельно ярких объектов временное разрешение СТП-приемника  $\tau$  берем равным 1. При наблюдении аналогичного объекта с матрицей ПЗС нам также необходимо копить сигнал 1 секунду для получения отношения сигнал/шум около 100, однако на считывание изображения спектра с матрицы ПЗС нужно потратить время около 100 секунд, и запустить следующую экспозицию мы сможем не раньше чем через 100 секунд после первой. Поэтому временное разрешение для матрицы ПЗС  $\tau$  берем равным 0.01. Здесь и далее при сравнении характеристик матрицы ПЗС и линейки СТП-приемников мы предполагаем, что квантовая эффективность обоих приемников сравнима, действительно, квантовая эффективность матриц ПЗС, используемых на спектрографах Рысь и Краб, меняется от 45% до 60% по диапазону, квантовая эффективность СТП-приемников также около 60%.

Из табл.3 видно, что использование линейки СТП-приемников приводит к увеличению потенциального качества эшелле спектрографов более чем на 2 порядка, но при этом линейка СТП-приемников имеет на 3 порядка меньше элементов по сравнению с матрицей ПЗС. В основном увеличение эффективности спектрографов связано с временными характеристиками СТП-приемников, работающих в режиме счета фотонов. В области слабых потоков, где временное разрешение не дает ощутимого увеличения эффективности наблюдений, потенциальное качество спектрографа Рысь увеличивается примерно в 3 раза, спектрографа Краб – на 10%. Однако при наблюдении слабых объектов у счетчика фотонов есть дополнительное преимущество перед матрицей ПЗС, связано это с шумами считывания приемника излучения. Теоретическое значение сигнал/шум в спектре звезды величиной  $m_v$  можно рассчитать по формуле:

$$S / N = \frac{N_0 \kappa T \times 10^{-0.4(m_v - m_0)}}{\sqrt{N_0 \kappa T \times 10^{-0.4(m_v - m_0)} + W b^{-1} N_r^2 + WTD}}$$

где  $T$  – время экспозиции в часах (hr),  $N_0$  – эффективность спектрографа ( $e^- \text{ hr}^{-1} \text{ pix}^{-1}$ ) при качестве изображения  $1''$  (размер турбулентного диска звезды) для звезды величины  $m_0$ ,  $W$  – высота спектрального порядка (pix),  $N_r$  – шум считывания ( $e^- \text{ pix}^{-1}$ ),  $D$  – темновой ток ( $e^- \text{ hr}^{-1} \text{ pix}^{-1}$ ),  $b$  – фактор бининга в направлении, перпендикулярном дисперсии эшелле,



$k$  – отношение пропусканий щели спектрографа при качестве изображения звезды в момент наблюдения и при качестве  $1''$ .

На рис.23 показаны измеренные значения  $S/N$  в спектрах звезд различной величины  $m_V$ , полученных на спектрографе Рысь при хороших погодных условиях (размер турбулентного диска звезды около  $1''$ ) за время накопления сигнала 1 час. Сплошной линией показана теоретическая зависимость, рассчитанная по приведенной выше формуле. На спектрографе Рысь используется матрица ПЗС с шумом считывания  $N_r = 7.7 e^- \text{ pix}^{-1}$ . Пунктирной линией показана теоретическая зависимость отношения сигнал/шум в спектрах звезд различной величины, которые можно получить на спектрографе Рысь с использованием линейки СТП-приемников в режиме счета фотонов при аналогичных условиях (качество изображения, время интегрирования сигнала). Видно, что наиболее значимый выигрыш в проникающей способности имеет СТП-приемник в области слабых потоков, для звезд слабее 13 звездной величины.

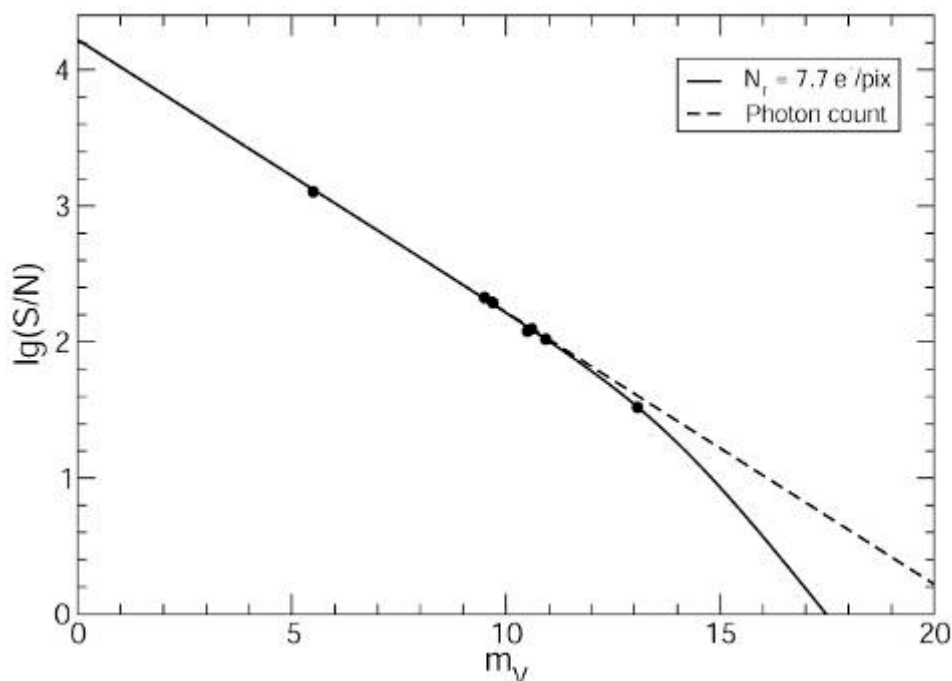


Рис.23. Теоретическая зависимость отношения  $S/N$  от звездной величины  $m_V$  для спектрографа Рысь в сочетании с матрицей ПЗС с шумом считывания 7.7 электронов на элемент (сплошная линия). Точками отмечены результаты экспериментального определения отношения сигнал/шум в спектрах звезд, полученных на спектрографе Рысь при хороших погодных условиях за время экспозиции 1 час. Штриховой линией показана теоретическая зависимость отношения  $S/N$  от яркости объекта, при наблюдении на спектрографе Рысь в сочетании с линейкой СТП-приемников, работающих в режиме счета фотонов.

Для спектрополяриметрических наблюдений используется анализатор поляризации, расщепляющий изображение звезды на входе в спектрограф на две ортогонально поляризованные компоненты. Соответственно, на фокальной поверхности камеры спектрографа эшелле порядки в таком варианте наблюдений расщепляются на две компоненты. В классическом варианте эшелльной спектроскопии для избежания перекрытия компонент соседних порядков меняют элемент скрещенной дисперсии сильнее разводящий порядки эшелле решетки, либо ставят эшелле решетку с меньшим периодом. Так или иначе, наблюдения в спектрополяриметрической моде на эшелле спектрографах связано зачастую с потерей в количестве одновременно регистрируемых элементов спектра  $N$ . В случае применения СТП-приемников проблемы с разведением эшелле порядков нет, но для спектрополяриметрических наблюдений необходим приемник, состоящий из двух параллельных линеек, на которые проецируются ортогонально поляризованные компоненты эшелле порядков. В этом варианте мы получаем дополнительный выигрыш до 2 раз по потенциальному качеству, относительно варианта спектрополяриметрических наблюдений с матрицей ПЗС.

Прогноз по другим вариантам наблюдений. Наблюдение с умеренным спектральным разрешением с использованием сканирующего эталона Фабри-Перо. Необходим массив из СТП-премников размером  $2 \times 2$  или более элементов, с размером элемента  $100 \times 100$  мкм (или больше). В этом варианте спектральная чувствительность СТП-приемников используется для разведения интерференционных порядков эталона в центральном пятне. Широкополосная и среднеполосная фотометрия. Массив из СТП-премников помещается в фокус телескопа, на приемнике строится прямое изображение звезды. Спектральная чувствительность СТП-приемников используется для разделения квантов различных энергий аналогично фильтрам, применяемым для фотометрических наблюдений.

На международной научно-технической конференции и молодежной школе-семинаре "Нанотехнологии-2010" (сентябрь 2010г, Геленджик) было представлено сообщение по теме проекта: Якопов Г.В. Юшкин М.В. Сверхпроводниковые туннельные переходы (СТП) в спектроскопии высокого разрешения.

#### **4 ПРОВЕДЕНИЕ ПАТЕНТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В соответствии с календарным планом госконтракта проведены патентные исследования. Отчет о патентных исследованиях подготовлен в соответствии с ГОСТ Р 15.011-96 и представлен в составе отчетной документации отдельным документом.

Техническое решение «Способ обработки видеосигнала в ПЗС-контроллере для матричных приёмников изображений» предложен к правовой охране. Начата подготовка документации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном отчете представлены результаты разработки новых методов наблюдений для крупнейшего оптического телескопа России БТА, в т.ч. с привлечением молодых специалистов, аспирантов и студентов.

В результате выполнения работ по контракту:

Разработана ПЗС-система с высокими чувствительностью, фотометрической стабильностью и производительностью, в основу которого легли разработанные способы прецизионной обработки видеосигнала ПЗС-матриц и скоростного ввода потоков цифровых видеоданных. Пропускная способность системы ввода обеспечивает пропускную способность 200 МБ/с, что позволяет использовать в составе ПЗС-систем самые различные ПЗС-матрицы. Экспериментальные исследования фотоэлектрических и фотометрических характеристик ПЗС-системы с матрицей E2V Technologies CCD42-40 с форматом 2048 x 2048 пикселей показали следующие результаты: шум считывания на частоте считывания 18 кГц не превышает 2 электронов за счет использования оптимальной цифровой фильтрации, остаточная нелинейность сквозной передаточной характеристики «свет-цифровой сигнал» не превышает 0.03%, фотометрическая нестабильность не превышает 0.03% за недельный период контрольных измерений. Новизна решений состоит в реализации способов получения максимальных на практике фотометрической стабильности и чувствительности пзс-систем, а также высокоскоростного ввода цифровых изображений в систему сбора данных. Предложенные способы построения высокоточных измерительных пзс-систем для регистрации слабых изображений не имеют аналогов в мире.

Разработан метод регистрации отдельных фотонов с использованием КЧД (координатно-чувствительный детектор) на основе GaAs катода. Созданный в Новосибирске GaAs КЧД является составной частью панорамного фотоспектрополяриметра, предназначенного для поиска и изучения переменности блеска астрофизических объектов с временным разрешением от 1мкс (мертвое время КЧД). Наблюдения могут проводиться в четырех модах - спектральной, спектрополяриметрической, фотометрической и фотополяриметрической. Прозрачность фотометра в полосах U, B, V, R с учетом потерь на отражение на всех оптических поверхностях - 35, 53, 45 и 47%. Для регистрации данных используется преобразователь время-код Квантохрон 4-48: точность измерения моментов времени регистрации фотонов -- 30 ns; мёртвое время системы -- 30 ns; предельный поток отсчетов, регистрируемый без потерь --  $10^6$  фотоотсч/с; размерность входящих кодов -- 48. Пределы на амплитуду

переменной компоненты излучения кандидата в черные дыры объекта, полученные в наблюдениях с фотометрическим комплексом, составили 4% в диапазоне 1-: -0.1с и 50% в диапазоне  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  с. Новизна решений состоит в использовании КЧД особой конструкции с GaAs фотокатодом и многоэлементным анодом. Полученное уникальное сочетание параметров (высокая квантовая эффективность детектора и высокое пространственное до 10 мкм и временное разрешение) не имеют мировых аналогов.

Разработана методика изготовления сверхпроводящих пленок для регистрации оптического излучения астрономических объектов. СТП-приемники, изготовленные с использованием сверхпроводящих пленок, позволяют получить временное разрешение порядка  $10^{-4}$  сек. и зарегистрировать  $10^4$  событий в секунду. Новизна решений состоит в использовании линейки СТП-приемников в увеличении потенциального качества эшелле спектрографов более чем на 2 порядка при наблюдениях ярких объектов. Использование СТП-приемников в астрономии имеет начальный опыт в мире, а в нашей стране – единственный (данная работа).

В рамках разработки программы внедрения результатов НИР в образовательный процесс разработано учебно-методическое пособие по работе с астрономическими ПЗС-системами (четвертый этап). Проведены патентные исследования – одно техническое решение предложено к правовой охране (пятый этап).

Выполнение индикаторов и показателей проекта:

К проведению исследований привлечены 6 аспирантов, 4 молодых кандидата наук и 10 студентов. Среди исполнителей – 2 доктора наук. Представлена 1 докторская диссертация в диссертационный совет. Защищена 1 кандидатская диссертация. 3 студента, начавшие работы по проекту, после окончания вуза поступили в аспирантуру и продолжили работы по теме проекта. 5 исследователей опубликовали результаты работы в научных изданиях. 2 аспиранта и 4 студента (поступили в аспирантуру) закреплены в сфере науки. Всего было привлечено 2400000 руб. из внебюджетных средств. Доля молодых участников в общем ФОТ составляет более 50%.

Разрабатываемые методы наблюдений рекомендуется использовать не только на телескопе БТА, но и на других телескопах. Данные разработки и полученные результаты можно применять для решения актуальных задач в области наблюдательной астрофизики. В связи с тем, что все представленные в отчете разработки методов проводятся в лабораториях САО РАН, данные результаты эффективны как в экономическом плане, так и в плане внедрения этих разработок. Работы по развитию методов наблюдений на БТА ведутся в САО РАН постоянно. Это необходимо для поддержания эффективности работы телескопа и получения новых знаний о строении Вселенной. В процессе создания методов

наблюдений были лучше поняты многие физические проблемы их функционирования и отработаны новые технологические возможности, создающие хороший задел для нового этапа работа над ними.

Таким образом, настоящий Отчет иллюстрирует, что все задачи, поставленные по государственному контракту, выполнены полностью и в соответствии с Техническим заданием и Календарным планом.

Руководитель работ,

В.В. Власюк