

На правах рукописи

Степанов Сергей Николаевич

**Разработка монофотонного сенсора ультрафиолетового
диапазона с улучшенными характеристиками**

01.04.01 — «Приборы и методы экспериментальной физики»

Автореферат диссертации
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва 2011



Работа выполнялась:

в научном учреждении Российской Академии наук Институте кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН,
в ЗАО «Научно-технический центр «Реагент».

Научные руководители:

доктор физико-математических наук *Родионов И. Д.*,
кандидат физико-математических наук *Волошин А. Э.*

Официальные оппоненты:

доктор технических наук *Ведешин Л. А.*,
доктор технических наук, профессор *Усов С. В.*

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук Физический институт им. П. Н. Лебедева РАН.

Защита состоится «15» июня 2011 г. в 15:00 на заседании Диссертационного совета Д 002.135.01 НТЦ Уникального приборостроения РАН по адресу: Москва, ул. Бутлерова, д. 15.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НТЦ Уникального приборостроения РАН или получить электронную версию, сделав запрос по адресу: stepanov_sn@mail.ru

Автореферат разослан «05» мая 2011 г.

Отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 117342, Москва, ул. Бутлерова, д. 15, Диссертационный совет НТЦ УП РАН.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 002.135.01, к. ф-м. н.

 / *Отливанчик Е. А.* /

Актуальность работы

В настоящее время существует широкий класс научных и практических задач (мониторинг состояния силовых энергетических установок и ЛЭП, защита гражданских судов от поражения ракетами, изучение динамики процессов горения и взрыва, обнаружение лесных пожаров на ранних стадиях, изучение озонового слоя и транзиентных люминесцентных явлений в верхней атмосфере и т. п.), решение которых предполагает проведение дистанционных наблюдений в различных диапазонах электромагнитного спектра, в том числе УФ-С диапазона. Преимущество УФ-С диапазона для обнаружения и оценки параметров источников его излучения состоит в том, что благодаря озоновому слою Земли этот диапазон является «солнечно-слепым», что обеспечивает низкий уровень фоновых шумов. Существующие отечественные и зарубежные сенсоры, основанные на использовании матричных приёмников, работающие в УФ-С диапазоне, имеют ряд недостатков: низкую чувствительность, отсутствие возможности определения временных характеристик источника излучения. В связи с этим представляется актуальной разработка **усовершенствованного монофотонного сенсора УФ-С диапазона** с использованием время-координатного чувствительного детектора (ВКЧД) и обладающего улучшенными характеристиками и способностью измерять время-амплитудную зависимость регистрируемого излучения, что позволит существенно расширить класс решаемых задач.

Особенностью разработанного сенсора является способность определения угловых координат регистрируемого фотона УФ-С диапазона и определение (с точностью до 1 нс) времени его прихода на фокальную поверхность сенсора. Это обеспечивает сенсору уникальную возможность измерения временной зависимости регистрируемого излучения и анализа этой зависимости. Таким образом, у созданного сенсора возникает инновационное качество — определение пространственно-временных особенностей УФ-С источника излучения, что коренным образом повышает его эф-

фективность по сравнению с известными отечественными и зарубежными аналогами.

Значимым применением монофотонного сенсора в совокупности с методами обработки его выходной информации является дистанционная диагностика коронных разрядов с целью предупреждения возникновения аварий на подстанциях или на линиях электропередач (ЛЭП).

Разработанный сенсор может применяться в системах обеспечения посадки в сложных метеоусловиях воздушных судов, оснащенных маяками, излучающими в УФ-С диапазоне, что позволяет осуществлять навигацию самолётов и вертолётов как в дневное, так и в ночное время.

Монофотонный сенсор является частью проекта малого космического аппарата «Астрогон-Вулкан», где он выступает в роли безынерционного сенсора в составе прецизионных астродатчиков.

Ещё одно спутниковое применение сенсора — мониторинг состояния озонового слоя Земли. Измерение толщины озонового слоя производится через измерение отражённого солнечного излучения на различных длинах волн в УФ диапазоне.

Высокое временное разрешение прибора может также сыграть ключевую роль при разработке спутникового датчика вспышек, возникающих от стратосферных электрических явлений. Прибор позволил бы не только регистрировать данные явления и фиксировать время их появления, но и изучать их пространственно-временную структуру.

В результате синхронного анализа выходного и отражённого потоков фотонов при активном режиме работы прибора и при наличии синхронной УФ-С подсветки наносекундными импульсами можно получить 3D-изображение наблюдаемого объекта. На основе данного прибора создана система активного 3D-зрения для наблюдения неизлучающих объектов. Это может стать основой создания интеллектуальных робототехнических систем на основе трёхмерного видения без традиционного в таких систе-

мах сканирования с существенно более высокой энергетической эффективностью.

Ещё одной проблемно-ориентированной задачей для монофотонного сенсора является мониторинг лесных пожаров. В рамках системы мониторинга лесных пожаров, которая также включает гиперспектрометр АСМГ-М, монофотонный сенсор является источником целеуказания ядра пожара.

Вышеизложенное свидетельствует об актуальности диссертационной работы.

Цель работы

Основной целью диссертационной работы является создание монофотонного сенсора УФ-С диапазона с улучшенными характеристиками, обладающего повышенной чувствительностью и временным разрешением, способного функционировать в жёстких условиях применения и отличающегося высокой надёжностью:

- спектральный диапазон: 250...280 нм;
- частота регистрации единичных фотонов: 200 000 событий/сек;
- уровень собственных шумов: 80 событий/сек;
- временное разрешение: лучше 1 нс;
- координатное разрешение: 0,2 градуса;
- угол зрения: 120 градусов;
- температура эксплуатации: $-55...+60$ °С;
- срок службы: 3000 часов.

Выбор цели исследования обусловлен потребностями перечисленных выше практических приложений в повышении дальности (чувствительности) обнаружения излучений, анализа их происхождения и оценки параметров, работоспособности в сложных условиях применения и функционирования без существенного изменения характеристик в течение длительного времени.

Анализ конструкции современных сенсоров показал, что основной потенциал улучшения их характеристик лежит, во-первых, в области создания оптических фильтров, обеспечивающих высокий уровень пропускания в рабочем диапазоне длин волн (30...50 %) при чрезвычайно высоком уровне подавления паразитного видимого диапазона до 10^{-15} раз. Всё осложняется тем, что такой перепад пропускания фильтра должен происходить на узком участке спектра в 5...10 нм. Во-вторых, монофотонный характер регистрации на уровне единичных фотонов предъявляет особенно повышенные требования к разработке электроники для достижения предельной чувствительности и быстродействия сенсоров.

Поэтому достижение поставленной в диссертации цели лежит в направлении создания фильтров УФ-С диапазона с существенно улучшенными характеристиками и в направлении совершенствования электронных трактов.

Основой построения фильтров оптического излучения, обеспечивающих подавление фонового излучения на 14...16 порядков при пропускании в рабочем диапазоне 250...280 нм от 30 % и более, являются водорастворимые кристаллы сульфата никеля и сульфата кобальта, выращиваемые в кристаллизационных установках.

Кристаллы должны быть правильной структуры, не иметь свилей, включений посторонних веществ, отличаться высокой степенью оптической однородности, температурной стабильностью, т. е. относиться к совершенным кристаллам. Для построения реальных оптических систем размеры кристаллов должны превышать 5 см. Выращивание кристаллов требует нескольких месяцев, в течение которых должны поддерживаться стабильные условия роста.

Кристаллы выращиваются в кристаллизационных установках. На сегодняшний день управление кристаллизационными установками осуществляется промышленными системами автоматического регулирования общего назначения (иногда их называют программируемые контроллеры).

В связи с относительно большой продолжительностью роста кристаллов (до полугода непрерывного роста) принципиальное значение имеет надёжность аппаратуры. Использование промышленных программируемых контроллеров приводит к следующему:

- снижается общая надёжность системы в связи с низкой отказоустойчивостью контроллеров;
- усложняется процесс задания, измерения и контроля параметров роста кристаллов в связи с неудобным интерфейсом с пользователем и скудными средствами отображения информации;
- появляется необходимость дополнять систему измерительными и исполнительными устройствами, так как подобные системы не имеют их в своём составе;
- существенно увеличивается общая стоимость системы в связи с высокой стоимостью программируемых контроллеров;
- в ряде случаев имеет место недостаточная стабильность поддержания параметров роста.

Для преодоления этих недостатков в рамках диссертации была разработана и изготовлена специализированная система управления кристаллизационными установками, которая используется как система автоматизации при проведении научных экспериментов при разработке новых кристаллических материалов и как система автоматизации промышленной технологической линии при серийном выращивании кристаллов для монофотонных сенсоров.

Второе направление повышения характеристик монофотонных сенсоров, развиваемое в диссертации, — совершенствование электронных трактов — направлено на преодоление следующих недостатков существующих электронных трактов монофотонных приборов:

- высокого уровня шумов измерительных трактов;

- низкого временного разрешения при регистрации фотонов в координатно-чувствительных системах;
- нестабильной работы трактов в расширенном диапазоне температур;
- изменения характеристик регистрирующих монофотонных детекторов на микроканальных пластинах при изменении температуры;
- воздействия внешнего питания на работу электронных узлов в промышленных применениях в условиях сильных электромагнитных помех.

Для исключения этих недостатков в рамках диссертации проведена разработка новых электронных узлов и методов улучшения характеристик УФ сенсора с использованием управляющего встроенного программного обеспечения.

Научная новизна работы

1. Обоснован выбор основных направлений улучшения характеристик УФ сенсора за счёт:
 - целенаправленного синтеза новых фильтрующих кристаллических материалов;
 - введения узла наносекундных измерений;
 - разработки программно-управляемых электронных модулей сенсора.
2. Определены требования к новым оптическим фильтрующим кристаллическим материалам, обеспечивающим пропускание в УФ-С диапазоне на уровне 30...50 % при подавлении фонового излучения в 10^{-15} раз.
3. Проведён анализ существующих систем управления установками для выращивания оптических фильтрующих кристаллических материалов, определены основные проблемы, препятствующие синтезу данных кристаллов.

4. Разработана концепция новой системы управления установками для выращивания кристаллов, обеспечивающей рост кристаллов с требуемыми свойствами. Рассмотрены варианты схемотехнических решений, проведено их моделирование и оптимизация. Реализовано динамическое управление коэффициентами регулирования.
5. Исследованы пути устранения зависимости характеристик сенсора от температуры.
6. Разработана методика и управляющее программное обеспечение для улучшения временного разрешения до субнаносекундных значений за счёт совместной обработки информации от временного и координатного канала.
7. Найден способ увеличения более чем в 100 раз динамического диапазона фотоэлектронного умножителя за счёт стробирования фотокатода.
8. Определена необходимость создания программно-управляемого многоканального высоковольтного источника для фотоэлектронного умножителя.
9. Обоснована необходимость разработки модуля вторичного электропитания для обеспечения требуемых технических и эксплуатационных характеристик сенсора.
10. Создана концепция построения монофотонного сенсора ультрафиолетового диапазона, способного вести регистрацию единичных фотонов со скоростью до 200 000 соб./сек при уровне собственных шумов не более 80 соб./сек, обладающего временным разрешением на уровне 1 нс, угловым разрешением 0,2 градуса при угле зрения 120 градусов и функционирующего в широком температурном диапазоне: от -55 до $+60$ °C.
11. На основе разработанной концепции был создан монофотонный сенсор, исследованы его характеристики, подтвердившие теоретические оценки.

Практическая значимость работы

Созданный сенсор лёг в основу ряда успешно выполненных опытно-конструкторских разработок:

1. Гос. контракт № ГК-14-14-03/2010-11 от 15.03.2010.
2. Гос. контракт № 02.523.12.3004 от 06.08.2007.
3. Гос. контракт № АВ/06/461/РГА/К от 10.11.2006.

Начиная с 2010 года ведётся серийный выпуск разработанного сенсора.

Достоверность результатов работы

Достоверность результатов работы подтверждается результатами экспериментальных лабораторных исследований и предварительных и межведомственных испытаний, в ходе которых измерены основные параметры прибора и проведено их сравнение с расчётными, а также с результатами полевых испытаний как на стационарных объектах, так и на борту воздушного носителя.

Положения, выносимые на защиту

1. Концепция построения и разработка монофотонного сенсора ультрафиолетового диапазона с улучшенными характеристиками и функционирующего в диапазоне температур от -55 до $+60$ °С.
2. Способ повышения статических характеристик координатно-чувствительного детектора:
 - соотношения сигнал/шум — в 100 раз;
 - разрешения — в 10 раз.
3. Способ увеличения динамического диапазона координатно-чувствительного детектора в 100 раз.
4. Способ повышения временного разрешения монофотонного сенсора.
5. Аппаратные и программные средства для модулей сенсора.

б. Концепция построения и разработка высокоточной и высоконадёжной системы управления кристаллизационной установкой.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Втором симпозиуме «Современная химическая физика», Туапсе, сентябрь — октябрь 2010 г.;
- Восьмой Всероссийской Открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» Москва, ИКИ РАН, 15 — 19 ноября 2010 г.;
- Семинарах Института проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН;
- Семинарах Института кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН;
- Семинарах Научно-технического центра «Реагент».

Публикации

В рамках диссертации было опубликовано семь печатных работ и получен один патент на полезную модель. Список работ приведён в конце автореферата.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Она изложена на 147 страницах и содержит 18 таблиц, 99 рисунков и список литературы из 40 наименований.

Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность темы, излагается цель, научная новизна, практическая значимость и достоверность результатов

работы, приводятся положения, выносимые на защиту, отмечается личный вклад автора и приводится структура диссертации.

В **первой главе** проводится обзор монофотонных сенсоров ультрафиолетового диапазона, описание задач, решаемых с применением УФ сенсоров, и обоснование необходимости повышения эффективности работы сенсоров. Применительно к решению задач, рассмотренных в данной главе, осуществляется формулировка научно-технической задачи.

Вторая глава посвящена разработке системы управления кристаллизационной установкой для выращивания кристаллов для объективов монофотонных сенсоров.

Для создания специализированных объективов монофотонных сенсоров требуются кристаллы со строго заданными свойствами, в частности — обеспечивающими пропускание заданного диапазона длин волн. Эти кристаллы должны обладать как большими размерами, так и совершенными и строго заданными оптическими свойствами. Процесс роста кристалла может длиться от двух недель до нескольких месяцев. Это время определяется типом выращиваемого кристалла. На всём протяжении процесса роста кристалла отклонение температуры среды, в которой выращивается кристалл, от заданной температуры не должно превышать $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$, иначе в кристалле образуются дефекты, которые отрицательно скажутся на его качестве, что может сделать невозможным применение его в качестве оптического фильтра.

В *первом параграфе* производится описание установки для выращивания кристаллов из водных растворов.

Во *втором параграфе* осуществляется постановка задачи и описание методов высокоточного измерения температуры, их практическая реализация и выбор подходящего метода для решения данной задачи.

В *третьем параграфе* приводится функциональная схема системы управления кристаллизационной установкой, получившей название СУ-КРУС-1, а также производится описание её составных частей.

Схема СУКРУС-1 с кристаллизационной установкой, которой она управляет (выделена пунктирной линией), показана на Рис. 1. В стеклянном термостате 1 с дистиллированной водой 2 помещается стеклянный резервуар 3 с платформой 4, на которой расположен затравочный кристалл 5. Путём управления нагревательными элементами 6 температура внутри термостата устанавливается в соответствии с технологической программой. Для обеспечения равномерного распределения температуры внутри термостата дополнительно осуществляется вращение конвекционного ротора 7 при помощи электропривода 8, а при помощи электропривода 9 происходит вращение платформы 4 с растущим кристаллом для осуществления равномерного омывания кристалла маточным раствором (раствором, из которого растёт кристалл).

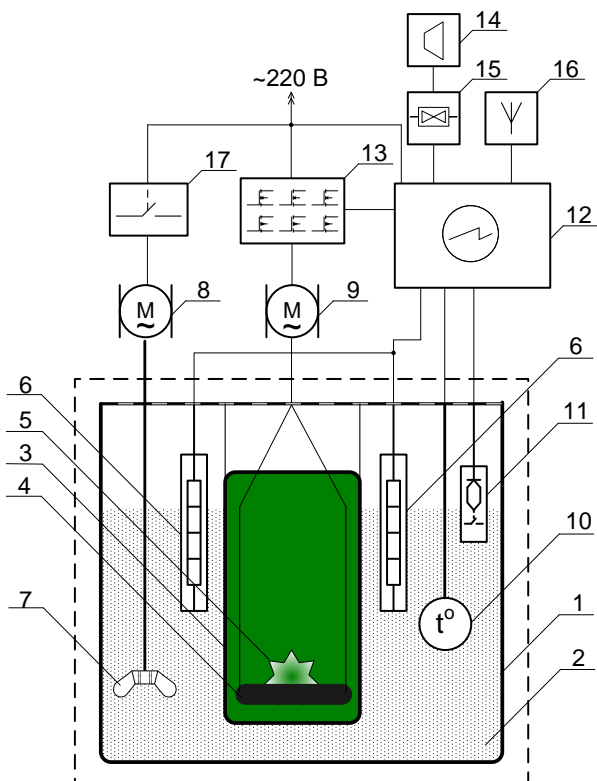


Рис. 1. Функциональная схема системы СУКРУС-1 с кристаллизационной установкой.

Измерение температуры в термостате осуществляется с помощью датчика 10. Для контроля за уровнем воды в термостате используется датчик уровня жидкости 11.

Система СУКРУС-1 состоит из следующих составных частей:

12 — блок управления (БУ) — выполняет функции управления и контроля всех составных частей системы кроме двигателя электропривода 8. В БУ производится вычисление результатов измерений, через него осуществляется связь с оператором, а также взаимодействие с ЭВМ;

13 — силовой блок (СБ) — выполняет функции управления исполнительным двигателем платформы с кристаллом;

14 — преобразователь интерфейсов (ПИ) RS-485 / RS-232 — служит для соединения одного или нескольких БУ, объединённых в сеть, с ЭВМ;

15 — коробка разветвительная (КР) — служит для соединения в сеть RS-485 нескольких БУ;

16 — GSM модем — служит для связи с оператором или удалённой системой посредством GSM связи;

17 — коробка пускателя электропривода 8 конвекционного ротора термостата — обеспечивает работу данного двигателя.

Элементы 14, 15, 16 являются опциональными. Элементы 14 и 15 могут входить в состав сразу нескольких систем СУКРУС-1.

В *четвёртом параграфе* производится описание основного элемента созданной системы — **блока управления (БУ)**, выполняющего функции управления и контроля всех составных частей системы.

Был проведён сравнительный анализ блока управления разработанной системы с промышленными образцами (Табл. 1).

Среди прочих преимуществ разработанного блока управления особо следует отметить высокую разрешающую способность и точность регулирования, достигнутые за счёт сочетания схемотехнических приёмов и теоретических подходов, одним из которых является реализация ПИД-

регулирования, а также возможность динамического изменения коэффициентов регулирования в процессе работы.

Табл. 1. Сравнение характеристик блоков управления.

Параметр	Прибор			
	Овен ТРМ151-05	Ремиконт Р-130	Eurotherm 2404	СУКРУС-1
Разрешающая способность, °С	0,1	0,05	0,01	0,01
Количество каналов измерения температуры	2	4	1	2
Количество технологических программ/шагов	12/10	1/99	20/16	10/40
Прямое управление нагревательными элементами	Нет	Нет	Нет	Да
Измерение мощности нагревательных элементов	Нет	Нет	Нет	Да
Управление приводом кристаллодержателя	Нет	Да	Нет	Да
Протоколирование данных	Нет	Нет	Нет	Да
Цифро-буквенный индикатор с русским шрифтом	Нет	Нет	Нет	Да
Клавиатура 4x4	Нет	Нет	Нет	Да
Оповещение об ошибках и авариях	Индикация	Индикация	Индикация	Индикация/ звук/SMS
Потребляемая мощность, Вт	6	15	н/д	1,5
Страна-производитель	Россия	Россия	США	Россия

Рассмотрим эту функцию более подробно.

В обычном ПИД-регуляторе выходной сигнал регулятора u определяется тремя слагаемыми:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt} = P + I + D,$$

где K_p , K_i , K_d — коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора, соответственно;

e — рассогласование.

Блок управления обладает функцией измерения мощности нагревательных элементов. Таким образом, в случае изменения потребляемой мощности нагревательных элементов, например из-за повреждения или из-за изменения напряжения в сети, система может подстроить коэффициенты регулирования с целью компенсации данного изменения, т. е. осуществить динамическое изменение коэффициентов регулирования:

$$u(t) = \frac{W}{\alpha_p} P + \frac{W}{\beta_I} I + D,$$

где α_p , β_I — коэффициенты влияния мощности W на пропорциональную и интегральную составляющую, соответственно.

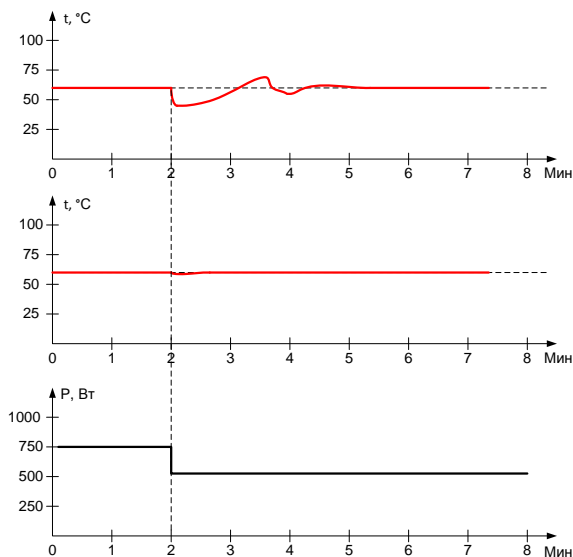


Рис. 2. Пример работы системы регулирования при изменении мощности нагревательных элементов (снизу): без динамического изменения коэффициентов (первый сверху) и с динамическим изменением коэффициентов (посередине).

Пример работы системы при изменении мощности нагревательных элементов показан на Рис. 2. Как видно из рисунка, без динамического изменения коэффициентов переходный процесс вызывает изменение температуры на несколько градусов, а при динамическом изменении коэффициентов переходный процесс пренебрежимо мал. Как уже было сказано, ко-

лебания температуры на всём протяжении процесса роста кристаллов не должны превышать 0,05 градусов.

Высокая точность измерения температуры (0,01 °С) достигнута благодаря реализации особого метода включения термопреобразователя сопротивления — *радиометрического метода*.

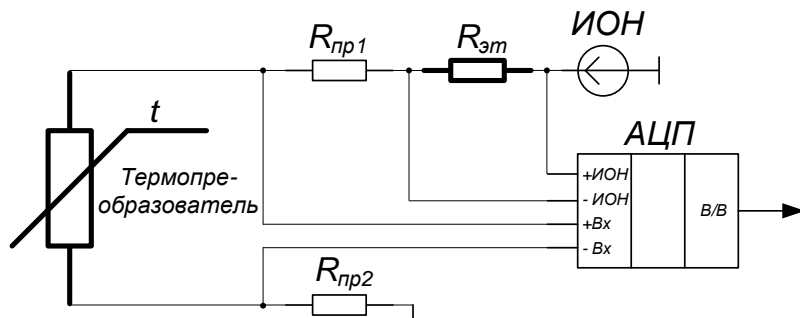


Рис. 3. Радиометрический метод включения термопреобразователя сопротивления.

Результат преобразования АЦП в таком случае:

$$D = \frac{R_T}{R_{Эт}} N,$$

где D — результат преобразования АЦП;

N — разрядность АЦП;

R_T — сопротивление термопреобразователя;

$R_{Эт}$ — сопротивление эталонного резистора.

Таким образом, результат измерения АЦП зависит только от сопротивления термопреобразователя и эталонного резистора (в качестве которого может выступать прецизионный резистор) и не зависит ни от сопротивления соединительных проводов, ни от напряжения на ИОН. В связи с этим, термопреобразователь может быть отдалён от измерительной системы на сотни метров, а в качестве ИОН может применяться такой примитивный элемент, как стабилитрон.

Высокая надёжность блоков управления Системы СУКРУС-1 подтверждается опытом эксплуатации в течение продолжительного времени.

Для подтверждения надёжности блока управления Системы СУКРУС-1 относительно промышленных блоков управления приводится Табл. 2, где сведены данные по отказам блоков управления (по четыре образца каждого типа), работавших в течение одного года в одинаковых условиях.

Табл. 2. Данные по отказам блоков управления.

Тип отказа	Количество отказов		
	Овен ТРМ151-05	Ремиконт Р-130	СУКРУС-1
Сбой встроенного программного обеспечения	3	2	0
Сбой технологической программы	2	3	0
Аппаратный сбой	1	1	0

Любой сбой, указанный в Табл. 2, приводил к разрушению кристаллов, после чего процесс роста нужно было начинать заново.



Рис. 4. Фотография трёх систем управления и кристаллизаторов (филиал ИК РАН им. А. В. Шубникова, ул. Бутлерова, 17А).

В *пятом параграфе* подводится итог работы по созданию данной системы управления. На момент написания работы в эксплуатацию было введено пять систем управления (Рис. 4), и планируется ввод ещё тридцати систем управления в 2011 году.

Под управлением Системы СУКРУС-1 были выращены совершенные кристаллы сульфата никеля (Рис. 5) и кобальта больших размеров и весом 1,5 кг, из которых были изготовлены высококачественные фильтры для объективов монофотонного сенсора.

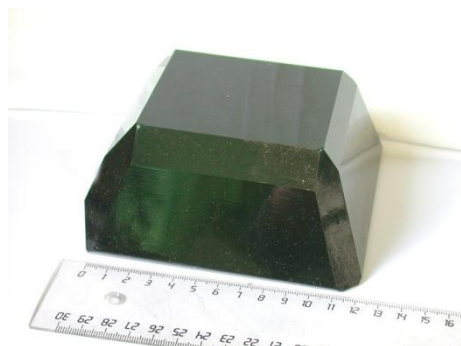


Рис. 5. Кристалл сульфата никеля, выращенный под управлением системы СУКРУС-1.

В **третьей главе** производится описание концепции построения разрабатываемого монофотонного сенсора и описание разработки усовершенствованных электронных узлов.

В *первом параграфе* приводится описание структурной и функциональной схемы сенсора. Структурная схема монофотонного сенсора показана на Рис. 6.

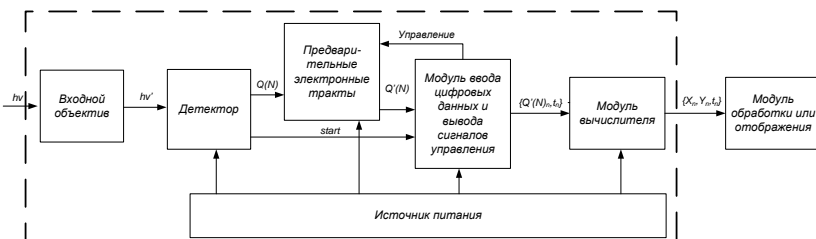


Рис. 6. Структурная схема монофотонного сенсора.

Входной объектив служит для формирования изображения на детекторе. Детектор, реализованный на координатно-чувствительном фотоэлектронном умножителе на микроканальных пластинах, осуществляет преобразование фотонов в электрические импульсы (пять каналов), которые усиливаются и оцифровываются при помощи предварительных электронных трактов (ПЭТ) для передачи на модуль ввода цифровых данных (ВЦД). После обработки модулем ВЦД данные поступают на модуль вычислителя, где происходит определение координат источника излучения и

времени прихода фотонов, а также формируются данные для передачи на модуль обработки или отображения информации. Источник питания обеспечивает питанием все узлы сенсора.

В подразделах данного параграфа производится детальное рассмотрение каждого структурного узла.

Также в данном параграфе описывается **способ увеличения динамического диапазона координатно-чувствительного детектора (КЧД) на два порядка.**

При входной освещённости на фотокатоде начиная с $2 \cdot 10^{-13}$ Вт/см² частота событий $F_{\text{соб}}$ снижается вследствие насыщения КЧД. График данной зависимости приведён на Рис. 7.

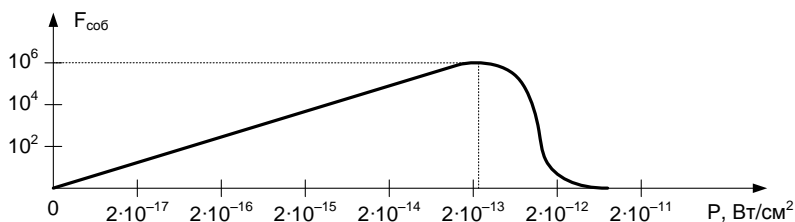


Рис. 7. Зависимость частоты появления событий на выходе КЧД от входной освещённости.

Для увеличения динамического диапазона введено стробирование фотокатода. Механизм стробирования фотокатода заключается в снятии с него напряжения на определённое время после регистрации фотона.

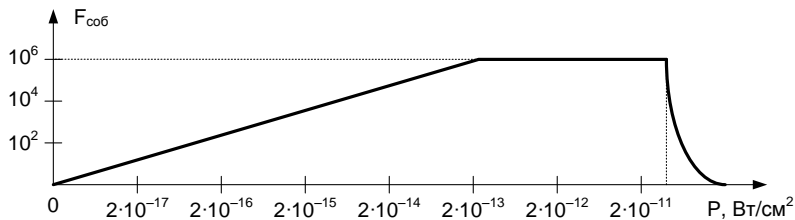


Рис. 8. Зависимость частоты появления событий на выходе КЧД от входной освещённости при стробировании фотокатода.

Опытные данные свидетельствуют о том, что при снятии напряжения с фотокатода КЧД прекращает формирование электронных лавин, причём реакция на снятие напряжения не превышает 1 нс.

При подаче напряжения на фотокатод его функционирование восстанавливается за время 1...2 нс. Кратковременное снятие напряжения с фотокатода (или его смещение в обратном направлении) позволяет расширить динамический диапазон КЧД в 100 раз (Рис. 8).

Кроме того, в этом параграфе приводится **способ повышения временного разрешения монофотонного сенсора на два порядка.**

При работе сенсора в составе системы оптической локации измерение времени производится между началом излучения источника и моментом регистрации отражённого излучения сенсором. Моменту регистрации отражённого излучения соответствует сигнал стартового канала («start» на Рис. 6), формирующийся при пересечении выходного сигнала регистратора, соответствующего приходу электронной лавины, с задаваемым пороговым значением (Рис. 9). Свойством монофотонного сенсора, снижающим точность измерений, является то, что измеренное значение зависит от интенсивности отражённого излучения: чем выше интенсивность, тем раньше появится сигнал на выходе стартового канала.

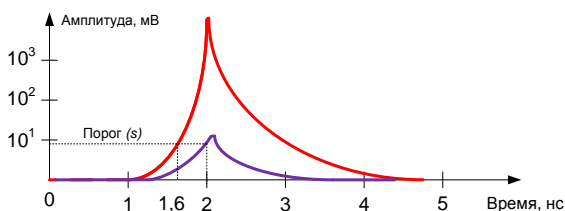


Рис. 9. Выходной сигнал регистратора стартового канала при высокой интенсивности сигнала (верхняя кривая) и при низкой интенсивности (нижняя кривая).

Дисперсия в измерениях, вызванная данным обстоятельством, может составлять до 10 нс, или 3 м. Для устранения этой дисперсии результат измерения корректируется с учётом суммы зарядов, измеряемых предварительными электронными трактами (Рис. 6).

На Рис. 10 иллюстрируется вычисление суммы всех зарядов.

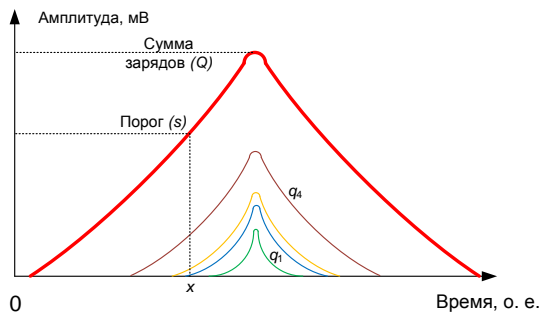


Рис. 10. Иллюстрация вычисления суммы зарядов.

Значение x момента времени срабатывания стартового канала, значение порога срабатывания s и величина суммы зарядов Q связаны следующим выражением:

$$s = Q(1 - e^{-x}).$$

Вычисление окончательного значения производится по выражению:

$$\tilde{t} = t + f(Q) = t + \alpha \ln \left(1 - \frac{s}{Q} \right),$$

где \tilde{t} — вычисленный временной интервал;

t — измеренный временной интервал;

α — масштабный коэффициент.

Во *втором параграфе* приводится описание разработки модуля многоканального высоковольтного источника питания, обеспечившего **повышение статических характеристик координатно-чувствительного детектора:**

- соотношения сигнал/шум — в 100 раз;
- разрешения — в 10 раз.

В первом разделе данного параграфа приводится структурная схема многоканального высоковольтного модуля, показанная на Рис. 11.

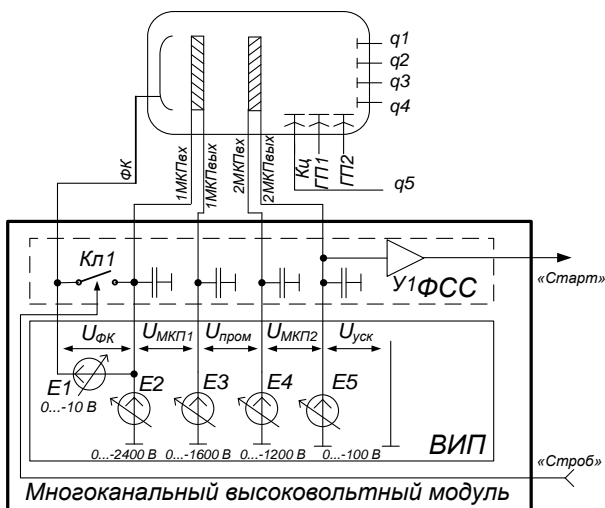


Рис. 11. Структурная схема модуля многоканального высоковольтного источника питания.

Модуль состоит из платы программируемого многоканального высоковольтного источника питания (ВИП), собственно формирующего напряжения, и платы фильтрации, стробирования и старта (ФСС), расположенной в непосредственной близости от ФЭУ, функцией которой является подавление пульсаций с ВИП и прочих шумов. На плате фильтров также расположен узел стробирования фотокатода (схематично показан как Кл1) и узел стартового канала (схематично показан как У1).

Плата ВИП формирует пять напряжений: напряжение для фотокатода ($U_{ФК}$), МКП1 ($U_{МКП1}$), промежутка ($U_{пром}$), МКП2 ($U_{МКП2}$) и для ускорения лавины ($U_{уск}$).

Во втором разделе производится описание разработки платы высоковольтного источника питания (ВИП): раскрываются общие положения, формулируются технические требования к ВИП, производится сравнение существующих промышленных образцов ВИП, анализ их недостатков и обоснование необходимости разработки специализированного ВИП, приводится функциональная схема платы ВИП и описание работы составных

узлов, в заключение данного раздела приводятся основные характеристики созданной платы.

В третьем разделе производится описание разработки узла стробирования фотокатода: формулируются технические требования к узлу, приводится структурная и функциональная схема узла и описание работы составных частей узла, в заключение приводятся основные характеристики созданного узла.

В четвёртом разделе данного параграфа производится описание разработки узла стартового канала: формулируются технические требования к узлу, приводится структурная и функциональная схема узла и описание работы составных частей узла, в заключение приводятся основные характеристики созданного узла.

В *третьем параграфе* производится описание разработки модуля зарядочувствительного усилителя (ЗЧУ), осуществляющего преобразование зарядовых импульсов, приходящих на аноды КЧД, в импульсы напряжения, пригодные для дальнейшей обработки.

В первом разделе данного параграфа рассматривается принцип функционирования ЗЧУ. Во втором разделе формулируются технические требования к ЗЧУ. В третьем разделе производится сравнение существующих промышленных образцов ЗЧУ, анализ их недостатков и обоснование необходимости разработки специализированного модуля. В четвёртом разделе приводится функциональная схема модуля ЗЧУ и описание работы составных узлов. В пятом разделе данного параграфа приводятся основные характеристики созданного модуля.

В *четвёртом параграфе* производится описание разработки многофункционального модуля электропитания, обеспечивающего питанием все узлы сенсора.

В первом разделе данного параграфа формулируются технические требования к модулю электропитания. Во втором разделе производится обоснование и описание топологии организации питания составных частей

сенсора с целью подавления шумов. В третьем разделе приводится функциональная схема модуля электропитания и описание работы составных узлов. В четвёртом разделе данного параграфа приводятся основные характеристики созданного модуля.

В **четвёртой главе** демонстрируется применение разработанного усовершенствованного монофотонного сенсора ультрафиолетового диапазона.

В *первом параграфе* демонстрируется применение сенсора в одной из важнейших задач — проведении диагностических работ и выявлении повреждений высоковольтного электрооборудования и линий электропередачи (ЛЭП). В 2005 году на электроподстанции Чагино в Москве за несколько недель до аварии, приведшей к серьёзным перебоям в электроснабжении Москвы и Московской области, при помощи данного сенсора было зарегистрировано мощное ультрафиолетовое излучение, свидетельствующее об износе электрооборудования.

Во *втором параграфе* демонстрируется применение сенсора с целью изучения индустриальных и естественных источников излучения в УФ-С диапазоне спектра и прохождения УФ-С излучения сквозь атмосферу.

В *третьем параграфе* приводится пример работы сенсора в составе системы оптической локации (или монофотонного датчика микрорельефа — МДМ-локатора).

В **заключении** приводятся основные результаты:

1. Проведён анализ существующих систем управления установками для выращивания оптических фильтрующих кристаллических материалов, определены основные проблемы, препятствующие синтезу данных кристаллов.
2. Разработана концепция новой системы управления установками для выращивания кристаллов, обеспечивающей рост кристаллов с требуемыми свойствами. Рассмотрены варианты схмотехнических реше-

ний, проведено их моделирование и оптимизация. Реализовано динамическое управление коэффициентами регулирования.

3. Исследованы пути устранения зависимости характеристик сенсора от температуры.
4. Разработана методика и управляющее программное обеспечение для улучшения временного разрешения до субнаносекундных значений за счёт совместной обработки информации от временного и координатного канала.
5. Найден способ увеличения более чем в 100 раз динамического диапазона фотоэлектронного умножителя за счёт стробирования фотокатода.
6. Создан многоканальный программируемый высоковольтный источник питания, функционирующий в широком диапазоне температур, для работы с координатно-чувствительным детектором на основе фотоэлектронного умножителя. Работа включала в себя как создание аппаратной части, так и разработку низкоуровневого программного обеспечения для платы и управляющего программного обеспечения для ЭВМ.
7. Создан узел стартового канала и узел стробирования фотокатода. Последний обеспечивает сохранность чувствительного элемента и позволяет функционировать прибору в условиях чрезмерной световой интенсивности.
8. Создан зарядочувствительный усилитель, функционирующий в широком диапазоне температур, для работы с координатно-чувствительным детектором, отличающийся высокой стабильностью параметров, малыми габаритами и низким энергопотреблением.
9. Создан многофункциональный модуль электропитания для бортового варианта УФ сенсора. Созданный модуль, имея обширные возможности диагностики и регулирования основных параметров, обеспечивает надёжное функционирование всех электронных узлов сенсора.
10. В результате использования данных разработок был создан время-координатно-чувствительный УФ сенсор, обладающий усовершенствованными характеристиками.

ванными техническими характеристиками (Табл. 3), а именно улучшены по сравнению с промышленными аналогами:

- чувствительность — в 10 раз;
- временное разрешение — в 100 раз;
- число регистрируемых событий увеличено до 200 000;
- поле зрения увеличено до 120 градусов.

Благодаря высоким техническим характеристикам разработанного сенсора имеется возможность его использования в таких приложениях, как защита воздушных судов от поражения ракетами, дистанционная диагностика высоковольтной изоляции, мониторинг состояния озона в стратосфере, изучение стратосферных электрических явлений, мониторинг лесных пожаров, трёхмерная локация, радиационная безопасность, и в других промышленных, научных и специальных применениях.

Табл. 3. Технические характеристики созданного УФ сенсора.

Характеристика	Значение
Поле зрения, град	120
Точность оценки координат точки, град,	0,2
Временное разрешение, нс	1
Спектральный диапазон, нм	250...280
Интенсивность шумовых фотонов со всей поверхности фотокатода, 1/с	≤ 100
Энергопотребление, Вт	30
Соответствие требованиям ГОСТ для применения на борту авиационного судна	Полное
Рабочая температура, °С	-55...+60
Ресурс работы, ч	3000

Внешний вид созданного УФ сенсора показан на Рис. 12.



Рис. 12. Внешний вид созданного УФ сенсора.

Публикации автора по теме диссертации

1. **Непобедимый С. П., Белов А. А., Калинин А. П., Крысюк И. В., Родионов А. И., Родионов И. Д., Степанов С. Н.** Дистанционная диагностика коронного разряда монофотонным детектором в ультрафиолетовом диапазоне / Доклады академии наук. — М., 2010, том 432, № 6, с. 764 — 768.
2. **Белов А. А., Егоров В. В., Калинин А. П., Крысюк И. В., Родионов И. Д., Родионова И. П., Степанов С. Н.** Исследование возможностей дистанционного обнаружения экранированных источников УФ-С излучения // Тезисы VIII Всероссийской Открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М., 2010. — ИКИ РАН.
3. **Белов А. А., Калинин А. П., Крысюк И. В., Родионов А. И., Родионов И. Д., Степанов С. Н.** Монофотонный универсальный сенсор ультрафиолетового диапазона // Тезисы XXII Симпозиума «Современная химическая физика». Туапсе, 24 сентября — 3 октября.
4. **Степанов С. Н., Белов А. А., Волошин А. Э., Калинин А. П., Крамаренко В. А., Крысюк И. В., Мамоменова В. Л., Родионов А. И., Родионов И. Д., Руднева Е. Б.** Универсальная система управления кристаллизационной установкой для выращивания кристаллов из водных растворов // Датчики и системы, № 3. — 2011. — С. 13 — 17.
5. **Белов А. А., Калинин А. П., Родионов И. Д., Родионов А. И., Крысюк И. В., Степанов С. Н.** Дистанционная диагностика коронных разрядов электроустановок высокого напряжения переменного тока. — Препринт № 907. М.: ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН, 2009. — 38 с.
6. **Белов А. А., Егоров В. В., Калинин А. П., Крысюк И. В., Осипов А. Ф., Родионов А. И., Родионов И. Д., Степанов С. Н.** Универсальный монофотонный сенсор ультрафиолетового диапазона. — Препринт № 935. М.: ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН, 2010. — 48 с.
7. **Степанов С. Н., Белов А. А., Волошин А. Э., Калинин А. П., Крамаренко В. А., Крысюк И. В., Мамоменова В. Л., Родионов А. И., Родионов И. Д., Руднева Е. Б.** Специализированная установка выращивания кристаллов, предназначенных для создания фотоприемной аппаратуры в ультрафиолетовом диапазоне. — Препринт № 944. М.: ИПМех им. А. Ю. Ишлинского РАН, 2010. — 27 с.
8. Установка для выращивания кристаллов из раствора. Патент на полезную модель № 102941. Заявка № 2010138473.