Государственный научный центр Российской Федерации
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

УДК 539.1.07 На правах рукописи

Рязанцев Андрей Викторович

Разработка и экспериментальное обоснование метода мониторирования электромагнитного калориметра проекта BTeV

Специальность 01.04.23 — физика высоких энергий

Диссертация на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор физико-математических наук
Александр Николаевич Васильев

Протвино 2006 г.

Оглавление

Введение

BTeV - новый эксперимент в области B-физики, предлагавшийся для проведения на встречных пучках Теватрона в Фермилабе, США [6]. В состав установки должен был входить электромагнитный калориметр на кристаллах вольфрамата свинца и фотоэлектронных умножителях (ФЭУ), способный работать при высоких радиационных загрузках, сохраняя при этом хорошее разрешение в течение всего срока службы. Интенсивность потока частиц через калориметр не остаётся постоянной во время набора статиститки, что приводит к изменению его характеристик: в кристаллах может меняться световыход в довольно широком диапазоне, а в фотоумножителях - коэффициент усиления. Чтобы сохранять при таких условиях присущее данному типу калориметров рекордное разрешение, необходимо непрерывное мониторирование этих параметров, при этом к стабильности мониторной системы предъявляются повышенные требования.

Проблема калибровки и мониторирования в каждом конкретном случае решается с учётом конструктивных особенностей детектора и условий эксперимента. Поскольку в состав калориметров всегда входят те или иные фотоприёмники со своей регистрирующей электроникой, возникает необходимость непрерывного контроля стабильности их коэффициентов преобразования. Поэтому, мониторные системы строятся с использованием импульсных источников света, в качестве которых в настоящее время чаще всего используются светодиоды или лазеры, сигналы от которых передаются к ячейкам калориметра.

Мониторные системы с лазерами применяются, как правило, в детекторах, состоящих из большого числа каналов, когда мощности светодиодов для передачи импульсов света по оптическим волокнам - световодам не достаточно для обеспечения требуемого энергетического эквивалента выходного сигнала. Такие системы оказываются довольно сложными и дорогостоящими, при этом очень трудно добиться их высокой долговременной стабильности.

Альтернативным решением в подобных случаях, а также когда по какой-либо причине использование оптических волокон невозможно, является мониторирование каждого канала калориметра отдельным светодиодом. Характерно, что при этом практически отсутствует возможность контролировать стабильность яркости световых вспышек, что является серьёзным недостатком. В качестве иллюстрации применения данного технического решения можно привести мониторную систему электромагнитного калориметра эксперимента NOMAD (WA-96), проводившегося в ЦЕРНе [7]. Калориметр был сделан из свинцового стекла, а черенковский свет, возбуждаемый в стёклах электромагнитными ливнями, регистрировался фототетродами. Для мониторирования в каждом канале использовались по два светодиода, управляемых индивидуальными высокостабильными импульсными источниками тока. В качестве обоснования своего решения авторы приводят выводы о том, что для стабильной работы мониторной системы с оптическими волокнами они должны быть надёжно закреплены на модулях калориметра, что было непросто сделать в их случае, поскольку отдельные модули предварительно тестировались в другом месте и лишь затем перемещались в экспериментальный зал для окончательной сборки детектора. При использовании светодиодов в каждом канале такой проблемы не возникало, но наличие в системе большого количества электронных компонентов со значительным технологическим разбросом параметров создавало дополнительные трудности. Так, приходилось проводить предварительный отбор светодиодов по световыходу. Тем не менее, нестабильность мониторной системы не превышала 1 % за несколько месяцев работы, правда, при использовании линейной поправки на температуру.

Аналогичное техническое решение применено разработчиками мониторной системы для строящегося фотонного спектрометра PHOS эксперимента ALICE на большом адронном коллайдере LHC в ЦЕРНе [8, 13]. Указанный спектрометр состоит из 17280 кристаллов вольфрамата свинца, сигналы с которых регистрируются PIN-фотодиодами большой площади с малошумящими предусилителями. Весь спектрометр должен работать при температуре -25°C, поддерживаемой с точностью (0.3-0.4)°C. Ожидаемые радиационные загрузки в отдельных каналах калориметра невелики, что позволяет, как и в предыдущем случае, разместить светодиоды со своими драйверами непосредственно на входных окнах кристаллов. При испытаниях прототипа такой системы для сборки кристаллов 8×8 было показано, что долговременная нестабильность сигналов от светодиодов, составляла $\sim\ 10^{-3}$ за 100 часов наблюдений. Анализировались сигналы с PIN - фотодиодов, при этом стабильность усилительного тракта мониторировалась инжектированием калиброванного заряда на входы предусилителей. Как и в предыдущем случае, для создания мониторной системы всего спектрометра и обеспечения её надёжного функционирования потребуется выполнить большой объём работы по сборке и настройке электроники.

В тех случаях, когда необходимо обеспечить точность калибровки калориметра на уровне долей процента в течение длительного срока службы, мониторная система должна обязательно содержать специальную подсистему с фотодетектором, контролирующим работу источников света. В качестве такого фотодетектора часто используются PIN-фотодиоды, стабильность которых не подвергается сомнению, либо, фотоумножители, в свою очередь мониторирующиеся калиброванным источником света, например, сцинтиллятором, возбуждаемым радиоактивным источником. В последнем случае система заметно усложняется, а качество мониторирования сильно зависит от свойств используемого сцинтиллятора. В установке GRAAL Европейского центра синхротронных исследований (ESFR, Гренобль) использовался калориметр на кристаллах BGO с фотоэлектронными умножителями [9]. Абсолютная калибровка кристаллов производилась фотонами с энергией 1.27 МэВ от радиоактивного источника ^{22}Na. Для контроля стабильности коэффициентов усиления ФЭУ применялась мониторная система на светодиодах.

В данном случае использовался только один драйвер, управлявший матрицей из семи светодиодов, которые освещали входное окно интегрирующей сферы - смесителя света. Сфера имела диаметр 6 дюймов, а её внутренняя поверхность была покрыта спектралоном - отражающим материалом, обеспечивающим диффузное рассеяние света. Применение интегрирующей сферы позволяло обеспечить однородную засветку пучка из 600 волокон, по которым свет распространялся к ячейкам калориметра, обеспечивая энергетический эквивалент амплитуды выходных сигналов ФЭУ равный 1 ГэВ. Стабильность амплитуды световых вспышек на выходном окне сферы мониторировалась с помощью отдельного фотоумножителя, свет к которому подводился по пяти оптическим волокнам - световодам. На фотокатоде этого ФЭУ был установлен калиброванный источником света - сцинтилляционный кристалл NaI(Tl), возбуждаемый радиоактивным источником ^{137}Cs. Мониторная система в целом позволяла контролировать энергетический отклик калориметра в течение всего периода набора данных с точностью около 1 %.

Описание различных мониторных систем можно продолжить, но уже становится понятным, что на данный момент не существует какого-то одного универсального решения, позволяющего добиться желаемой точности калибровки любого детектора. В случае же калориметра на кристаллах вольфрамата свинца, работающего при высоких радиационных загрузках, саму возможность мониторирования привычным способом необходимо было экспериментально доказать. Кроме того, перед сборкой установки необходимо провести предварительную селекцию кристаллов по их поведению при облучении, чтобы можно было использовать общую схему мониторирования для всех ячеек калориметра.

Актуальность изучаемых задач

Кристаллы вольфрамата свинца ($PbWO_4$, часто - PWO) стали использоваться для строительства калориметров сравнительно недавно, но, благодаря таким крупным экспериментам, как CMS и ALICE на LHC (ЦЕРН), остановившим на них свой выбор, очень быстро прошли путь от изготовления опытных образцов до массового производства [10, 11, 12, 13]. При этом продолжались всесторонние исследования как в области технологии, так и их физических характеристик, одной из которых является радиационная стойкость. Самые первые изучения этого свойства кристаллов велись с помощью радиационных источников гамма-квантов и давали обнадёживающие результаты. Планировавшийся эксперимент BTeV придал новый импульс таким исследованиям, поставив задачу проверить радиационную стойкость кристаллов в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксперимента, т.е. при их облучении высокоинтенсивными и высокоэнергичными смешанными пучками частиц. Результатом таких исследований стал неутешительный вывод о том, что световыход кристаллов заметно изменяется при изменении мощности дозы, с которой они облучаются. Более того, все кристаллы в большей или меньшей степени отличаются друг от друга по диапазону этих изменений. Нахождение общих закономерностей их поведения является актуальнейшей задачей, поскольку даёт возможность разработать единый алгоритм мониторирования всех каналов калориметра при работе в составе установки, тем самым сохраняя его высокое разрешение.

Различные мониторные системы используются в детекторах частиц с давних времён, но разработка новых надёжных и стабильных устройств всегда остаётся актуальной задачей, поскольку быстрое развитие технологий позволяет использовать новые компоненты с улучшенными техническими характеристиками. Соответственно, и технические решения могут быть другими.

Наконец, очень важным представляется решение задачи проверки радиационной стойкости кристаллов при их массовом производстве, поскольку это поможет созданию калориметра с предсказуемым поведением, а значит и с лучшими условиями для калибровки и мониторирования.

Цель работы

Целью данной работы является экспериментальное обоснование возможности непрерывного мониторирования электромагнитного калориметра установки BTeV для сохранения его высокого разрешения на протяжении всего срока службы, разработка стабильной мониторной системы калориметра, а также доказательство того, что радиационные свойства кристаллов $PbWO_4$ могут контролироваться при их массовом производстве.

Основные пункты программы измерений:

- относительное изменение световыхода по длине кристаллов при поперечном облучении их центральной зоны узким пионным пучком;
- относительные изменения сигналов от электронов и синего светодиода при облучении кристаллов пионами и электронами;
- долговременная стабильность светодиодной системы мониторирования прототипа калориметра во время тестовых сеансов на пучках;
- рабочие параметры прототипа модуля мониторной системы на светодиодах калориметра BTeV;
- относительные изменения световыхода кристаллов при их облучении пионами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями и профилями дозы;
- относительные изменения световыхода кристаллов при их облучении электронами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями, но разными профилями дозы.

Научная новизна и практическая ценность работы

Впервые проведены прямые измерения, подтвердившие отсутствие нарушения сцинтилляционного механизма в кристаллах вольфрамата свинца в пределах точности измерений 0.5 % с уровнем достоверности 95 % при их облучении пионными пучками с мощностями доз до ~ 20 рад/ч. Вместе с установленной корреляцией между относительными изменениями сигналов от светодиода и электронов при облучении кристаллов пионными и электронными пучками высокой интенсивности, это позволило обосновать простой и надёжный способ непрерывного мониторирования электромагнитного калориметра с помощью импульсных источников света.

Проведённый детальный анализ долговременной стабильности светодиодной системы мониторирования прототипа калориметра позволил определить техническое решение для создания мониторной системы калориметра BTeV с долговременной нестабильностью менее 0.1 % за неделю. Разработанное и изготовленное устройство не является узкопрофильным и может оказаться востребованным во всех случаях, где необходимы стабильные световые сигналы.

Впервые проведены сравнительные измерения относительного изменения световыхода кристаллов при их облучении пионами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями и профилями дозы. Проведённый анализ результатов показал, что при ограниченных мощностях дозы эти изменения близки по значениям, а значит предварительные измерения радиационной стойкости кристаллов могут проводиться с помощью гамма-источника. Это очень важный с практической точки зрения вывод, поскольку контролирование данного свойства кристаллов при их массовом производстве с использованием ускорительной техники не представляется возможным.

Измеренные токовым методом непосредственно во время облучения гамма-квантами относительные изменения световыхода кристаллов и установленная корреляция с той же величиной, полученной методом амплитудного анализа при электронном облучении с одинаковой мощностью, но другим профилем дозы, позволили найти принципиальное решение контроля радиационной стойкости каждого кристалла при их массовом производстве. На созданной установке можно изучать радиационные свойства одновременно пяти кристаллов, что уже активно используется в работе по улучшению их качества совместно с производителями из Апатитов. При необходимости число одновременно облучаемых кристаллов может быть увеличено.

Богатейший опыт работы с кристаллами $PbWO_4$, накопленный в рамках исследовательской программы по разработке электромагнитного калориметра проекта BTeV, может найти своё применение при создании аналогичных калориметров других экспериментов, например, планирующегося эксперимента PANDA (GSI, Германия) [14].

На защиту выносятся

- Методика и результаты прямого измерения величины изменения световыхода кристаллов вольфрамата свинца из-за нарушения сцинтилляционного механизма.

- Установление корреляции между относительными изменениями сигналов от светодиода и электронов при облучении кристаллов вольфрамата свинца пионными и электронными пучками высокой интенсивности.

- Методика и результаты анализа долговременной стабильности мониторной системы на светодиодах.

- Конструкция и рабочие характеристики модуля прототипа мониторной системы калориметра на кристаллах вольфрамата свинца и ФЭУ.

- Методика и результаты сравнительного изучения относительных изменений световыхода кристаллов вольфрамата свинца при их облучении пионами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями и профилями дозы.

- Поточный метод измерения радиационной стойкости кристаллов вольфрамата свинца при их массовом производстве.

Основные публикации и апробация работы

Основные работы [1, 2, 3, 4, 5] опубликованы в журнале Nuclear Instruments and Methods In Physics Research A. Кроме того, результаты, приведённые в диссертации, опубликованы во внутренних документах сотрудничества BTeV, препринтах ГНЦ ИФВЭ, электронном архиве arxiv.org. Результаты докладывались на международных конференциях "The 8-th International Conference on Advanced Technology and Particle Physics"(6-10 октября 2003 г., Комо, Италия) и "The 9-th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors"(23-26 мая 2004 г., Сиена, Италия), а также на совещаниях сотрудничества BTeV и CMS и семинарах ОЭФ ГНЦ ИФВЭ.

Апробация диссертации прошла в ГНЦ ИФВЭ 24 августа 2005 г.

Структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения.

В **Главе 1** содержится обзор задач, решение которых планировалось в эксперименте BTeV, перечислены детекторы проектировавшейся установки, сформулированы технические требования к электромагнитному калориметру и обосновано решение его создания на основе сцинтиллирующих кристаллов $PbWO_4$. Кроме того, объясняется, почему необходимо непрерывное мониторирование калориметра данного типа, и описывается предложенная процедура калибровки.

В **Главе 2** описаны измерения, проведённые на экспериментальной установке для изучения свойств кристаллов вольфрамата свинца, с помощью которых была доказана возможность непрерывного мониторирования калориметра внешним импульсным источником света. Подробно описана входившая в состав этой установки мониторная система на светодиодах и приведены методика и результаты анализа её долговременной стабильности.

Глава 3 посвящена описанию прототипа мониторной системы на светодиодах калориметра BTeV. В ней обосновывается выбор технического решения и компонентной базы, а также приводятся результаты тестовых испытаний системы.

В **Главе 4** приведены экспериментальные результаты, доказывающие возможность измерения радиационной стойкости всех произведённых кристаллов с помощью источника гамма-квантов в период, предшествующий сборке калориметра.

В **Заключении** сформулированы основные результаты диссертации.

Диссертация содержит 103 страницы, в том числе 43 рисунка и 6 таблиц. Список литературы содержит 34 ссылки.

Глава 1. Электромагнитный калориметр проекта BTeV

1.1. Научные цели проекта BTeV

Главной задачей проекта BTeV являлось изучение нарушения CP симметрии в B-распадах. Предлагалось выполнить прецизионные измерения параметров Стандартной Модели, таких как углы смешивания в матрице Кабиббо-Кобаяши-Маскава. Вычисление параметров одновременно для нескольких мод распадов B-мезонов являлось бы хорошей проверкой Стандартной Модели. Наиболее важные реакции, которые могли наблюдаться в эксперименте, и параметры, которые могли быть определены в результате, перечислены в Таблице 1.1.

Таблица 1.1: Основные измеряемые параметры и моды распадов, которые планировалось изучить, и требования к установке BTeV, необходимые для прецизионных измерений.

Физическая величина	Мода распада	Требования к детектору				
		Вершинный триггер	Разделение K/π	Регистрация γ	Высокое временное разрешение	Идентификация лептонов
$\sin(2\alpha)$	$B^o \to \rho\pi \to \pi^+\pi^-\pi^o$	$\surd$	$\surd$	$\surd$		
$\cos(2\alpha)$	$B^o \to \rho\pi \to \pi^+\pi^-\pi^o$	$\surd$	$\surd$	$\surd$		
$\mathrm{sign}(\sin(2\alpha))$	$B^o \to \rho\pi$, $B^o \to \pi^+\pi^-$	$\surd$	$\surd$	$\surd$		
$\sin(\gamma)$	$B_s \to D_s K^-$	$\surd$	$\surd$		$\surd$	
$\sin(\gamma)$	$B^+ \to D^o K^+$	$\surd$	$\surd$			
$\sin(\gamma)$	$B \to K\pi$	$\surd$	$\surd$	$\surd$		
$\sin(\gamma)$	$B \to \pi^+\pi^-$, $B_s \to K^+K^-$	$\surd$	$\surd$		$\surd$	
$\sin(2\chi)$	$B_s \to J/\psi\eta'$, $J/\psi\eta$	$\surd$	$\surd$	$\surd$	$\surd$	$\surd$
$\sin(2\beta)$	$B^o \to J/\psi K_s$					$\surd$
$\sin(2\beta)$	$B^o \to \phi K_s, \eta' K_s, J/\psi\phi$	$\surd$	$\surd$	$\surd$		$\surd$
$\cos(2\beta)$	$B^o \to J/\psi K^*$, $B_s \to J/\psi\phi$					$\surd$
x_s	$B_s \to D_s\pi^-$	$\surd$	$\surd$		$\surd$	
$\Delta\Gamma$ for B_s	$B_s \to J/\psi\eta'$, K^+K^-, $D_s\pi^-$	$\surd$	$\surd$	$\surd$		$\surd$

В адронных коллайдерах рождаются все типы B-мезонов: B_d, B_u, B_s,

B_c а также b-барионы. В отличие от других экспериментов, таких как BABAR (SLAC) и BELLE (KEK), также изучающих нарушения CP симметрии и редкие распады B_d и B_u, или CDF и D0 (FNAL), изучающих распады B_s и других B-мезонов, BTeV мог бы с гораздо более высокой точностью провести одновременные измерения нескольких мод B-распадов. Лучшая точность измерений обеспечивалась бы благодаря специальной организации триггера и рекордным характеристикам детекторов, из которых должна была состоять установка. В состав установки BTeV должны были входить вершинный детектор, трековая система на кремниевых микростриповых детекторах и дрейфовых трубках, детектор колец черенковского излучения, электромагнитный калориметр и система мюонных камер. Электромагнитный калориметр был призван измерять энергию фотонов конечных состояний, главным образом из распадов π^0 и η, и помогать в идентификации электронов при реконструкции J/ψ распадов и определении полулептонных распадов для мечения типа B-мезона. Основными реакциями, изучение которых невозможно без электромагнитного калориметра, являются:

– $B^o \to \rho\pi \to \pi^+\pi^-\pi^o$ и $B^o \to \rho^+\rho^- \to \pi^+\pi^-\pi^o\pi^o$,

– $B_s \to J/\psi\eta$, $J/\psi\eta'$,

– $B^o \to K^{*o}\gamma$, $\rho\gamma$, $\phi\gamma$, $w\gamma$.

1.2. Основные требования к калориметру

Исходя из физических целей эксперимента, были сформулированы следующие технические требования к калориметру.

- **Размеры детектора:** Система должна регистрировать фотоны в диапазоне углов от 10 до 220 миллирадиан по отношению к оси пучка, что соответствует радиусу калориметра 1.6 м и размеру внутреннего окна $\sim$20×20 см^2. Размер по длине сильно ограничен размерами экспериментального зала и других детекторов установки и составляет $\sim$50 см. Для обеспечения лучшего пространственного разрешения, особенно в удалённых от центра зонах калориметра, предпочтительна проекционная геометрия.

- **Диапазон энергий:** $\geq$1 ГэВ.

- **Энергетическое разрешение:** Энергетическое разрешение фотонных ливней в зависимости от энергии должно быть не хуже $\sigma_E/E = 2/\sqrt{E}\oplus 1$ [%].

- **Координатное разрешение:** Координатное разрешение фотонных ливней в зависимости от энергии должно быть не хуже $\sigma_x = 4/\sqrt{E}\oplus 1$ [mm].

- **Длительность выходного сигнала:** Учитывая, что период пересечения банчей на Теватроне составляет 132 нс, выходной сигнал должен укладываться в эту длительность.

- **Радиационная стойкость:** При поглощённой дозе 10 Мрад энергетическое и координатное разрешения не должны ухудшаться более чем в 2 раза.

- **Неактивные материалы:** Все механические компоненты конструкции, расположенные перед калориметром и в зазорах между его ячейками, должны быть сделаны из вещества с малым Z.

1.3. Электромагнитный калориметр на кристаллах $PbWO_4$

Указанным выше требованиям удовлетворяет конструкция калориметра, в которой в качестве среды для развития электромагнитного ливня и одновременной конверсии его энергии в свет служат кристаллы вольфрамата свинца, а для регистрации этого света используются фотоэлектронные умножители. Применение ФЭУ в качестве фотоприёмника оказывается возможным благодаря тому, что калориметр должен был располагаться в слабом остаточном магнитном поле, экранирование которого не составляло проблемы. Анодные сигналы предполагалось оцифровывать интегрирующими многодиапазонными АЦП типа QIE, разработанными в Фермилабе [15].

Кристалл вольфрамата свинца - это прозрачный, негигроскопичный сцинтиллятор с высокой плотностью (8.3 г/см^3) и коротким временем высвечивания (99 % излучаемого света высвечивается с постоянными времени 5 нс и 15 нс). Максимум спектра высвечивания находится в районе 420 нм. Эти свойства в основном определяют преимущество данного кристалла перед другими материалами, используемыми в калориметрии. Доступность кристаллов $PbWO_4$ с необходимыми геометрическими размерами и заданными свойствами в настоящее время стала возможной благодаря совместным усилиям людей различных специальностей. В начале 90-х программа LHC в ЦЕРНе дала старт многим новым разработкам в области детекторостроения. Для реализации проекта понадобились детекторы больших размеров с невиданными до недавнего времени характеристиками, включая загрузочную способность и радиационную стойкость. Создание подобных детекторов возможно только при тесном взаимодействии технологов, инженеров и специалистов в области физики высоких энергий. Кроме заданных технических характеристик материалов, используемых в детекторах, очень важным требованием является возможность их массового производства и умеренная стоимость. Производство кристаллов $PbWO_4$ прошло путь от выпуска единичных экземпляров до нескольких сотен штук в месяц всего за 5 лет. В настоящее время эти кристаллы используются для создания электромагнитного калориметра эксперимента CMS и фотонного детектора эксперимента ALICE в ЦЕРНе. Массовый выпуск кристаллов для этих экспериментов ведётся в России, соответственно, в Богородицке и Апатитах. Кроме того, ограниченные производственные мощности имеются в Шанхайском Институте Керамики (Китай). На этих предприятиях и планировалось разместить заказ на производство необходимого числа кристаллов для эксперимента BTeV.

Для того, чтобы построить калориметр BTeV потребовались бы 10500 кристаллов со следующими размерами:

– длина - 220 мм ($\sim$25 радиационных длин),

– поперечное сечение входной грани 27.2×27.2 мм^2,

– поперечное сечение со стороны крепления ФЭУ - 28.0×28.0 мм^2.

Предполагалось, что каждый кристалл должен быть обёрнут тайвеком для улучшения светосбора на входном окне ФЭУ. Сами фотоумножители должны иметь кварцевые окна диаметром 1 дюйм и приклеиваться к кристаллам радиационно стойким оптическим клеем. Для окончательного выбора типа клея и фотоумножителей планировалось провести специальные исследования.

1.4. Калибровка и мониторирование калориметра

Для восстановления реального значения энергий частиц, регистрируемых в калориметре, он должен калиброваться, т.е. оцифрованные в АЦП сигналы с калориметра должны быть пересчитаны в единицы энергии. Кроме того, для сохранения высокого энергетического разрешения необходимо непрерывно отслеживать возможные относительные изменения коэффициентов пересчёта.

1.4.1. Калибровка калориметра электронами

Для калибровки калориметра BTeV могли быть использованы изолированные электроны, источниками которых являлись бы конверсия фотонов в электрон-позитронные пары в области соударений и полулептонные B-распады. Импульсы электронов, а значит и их энергия, могли быть измерены по отклонению в магнитном поле. В Техническом обосновании проекта приводятся результаты моделирования, из которых следует, что в общем потоке частиц должно быть достаточно изолированных электронов и позитронов с известными импульсами, по которым можно калибровать калориметр [16]. На Рис. 1.1 показано распределение E/p для изолированных электронов, полученное из 10000 сгенерированных B-событий при наложении необходимых

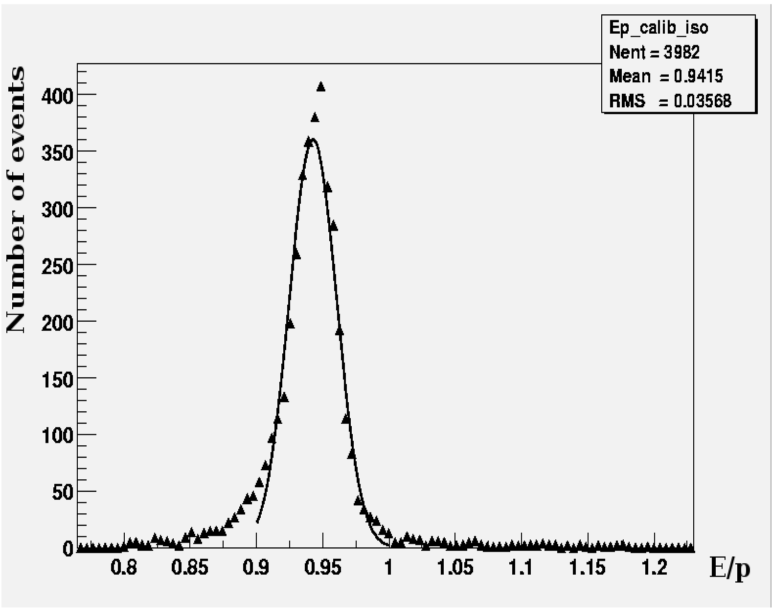

Рис. 1.1: Распределение E/p для изолированных электронов (вычисления методом Монте-Карло).

ограничений. При фитировании Гауссианом получена $\sigma(E/p) \simeq 1.9$ %. Статистическая точность определения положения пика есть $\sigma(E/p)/\sqrt{N_e}$, где N_e - число электронов, отобранных для калибровки. Таким образом, чтобы достичь требуемой точности калибровки 0.2% необходима статистика ~100 электронов на один канал калориметра.

В приведённом распределении 3443 события лежат в коридоре $\pm 2\sigma$, т.е. за одно событие в калориметре может в среднем регистрироваться по ~0.34 электрона, пригодных для калибровки. Однако, как следует из вычислений, эти электроны распределены неравномерно по всем каналам. На Рис. 1.2 показано угловое распределение электронов в калориметре. Два пика в районе ±90 градусов отражают тот факт, что магнитное поле отклоняет заряженные частицы в вертикальном направлении. Из полученного результата следует, что скорости набора электронов, которые могут быть использованы для калибровки, в разных зонах калориметра отличаются до 20 раз, а именно:

- ~8% кристаллов будут регистрировать в среднем $\sim 1.7 \times 10^{-4}$ электронов за событие;
- ~14% кристаллов – $\sim 1.0 \times 10^{-4}$ электронов;

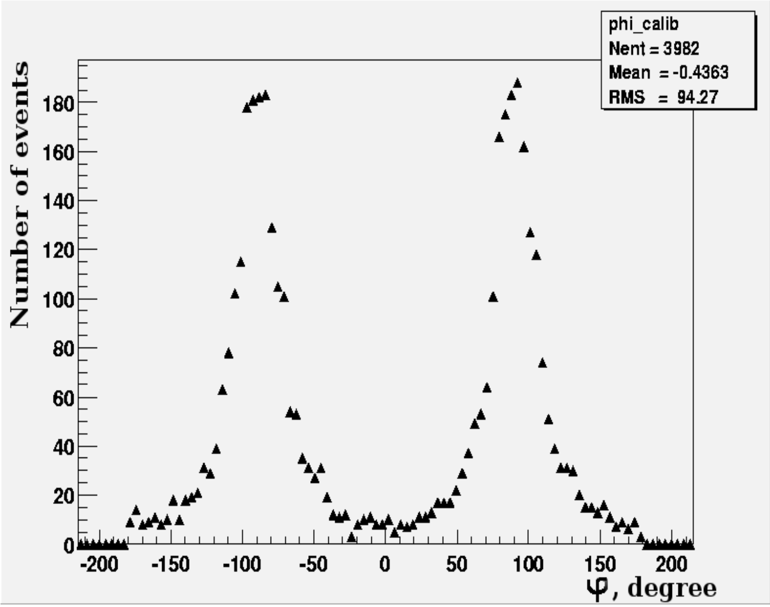

Рис. 1.2: Угловое распределение изолированных электронов в калориметре (вычисления методом Монте-Карло).

- ~11% кристаллов – $\sim 5.0 \times 10^{-5}$ электронов;
- ~22% кристаллов – $\sim 2.0 \times 10^{-5}$ электронов;
- ~45% кристаллов – $\leq 1.0 \times 10^{-5}$ электронов за событие.

Таким образом, узкая область вдоль вертикальной оси калориметра может калиброваться электронами практически непрерывно (каждый час), в то время как для 45% калориметра необходимо накопить $(10-15)\times10^6$ событий, чтобы выделить необходимые 100 электронов на канал. Это соответствует нескольким часам работы при номинальной светимости коллайдера 2×10^{32} см$^{-2}$с$^{-1}$.

Главный вывод, который следует из результатов моделирования, заключается в том, что энергетическая калибровкавсех каналов калориметра с заданной точностью 0.2% могла быть выполнена не реже чем один раз в сутки.

1.4.2. Мониторирование световым источником

Калибровка калориметра по месту (in situ) даёт возможность выразить амплитуды сигналов в единицах энергии, но она не позволяет непрерывно отслеживать возможные изменения коэффициентов пересчёта из-за недостаточной статистической точности в столь короткие промежутки времени. Эти изменения могут быть вызваны, в первую очередь, флуктуациями коэффициентов усиления фотоприёмников, а также изменением световыхода кристаллов. Коэффициенты усиления фотоэлектронных умножителей в калориметре могут заметно меняться по разным причинам в течение дня, или даже часа. Световыход кристаллов $PbWO_4$ также может меняться при резком изменении потока облучающих частиц, например, при новом заполнении Теватрона протонами и антипротонами. Мониторирование таких быстрых изменений, или интеркалибровку, предполагалось делать при помощи источника импульсов света стабильной интенсивности.

Поскольку изменение коэффициента усиления фотоумножителя влияет на выходные сигналы одинаковым образом при регистрации света как сцинтилляционного, так и от внешнего источника, относительные изменения этих сигналов будут также одинаковыми:

$$R = \frac{\Delta_{LS}/S_{LS}}{\Delta_{SC}/S_{SC}} = 1. \tag{1.1}$$

Здесь через S_{LS} и S_{SC} обозначены какие-то начальные измеренные значения сигналов от внешнего источника света и сцинтилляции, а Δ_{LS} и Δ_{SC} соответствуют их вариациям. Легко видеть, что при наличии стабильного внешнего светового источника можно всегда восстановить величину Δ_{SC}/S_{SC} по величине относительного изменения его сигнала Δ_{LS}/S_{LS}.

Конструкция калориметра не позволяет напрямую подать свет от внешнего источника на фотокатоды ФЭУ, поскольку последние должны быть приклеены к кристаллам. Кроме того, необходимо мониторировать изменение прозрачности кристаллов, а для этого свет от внешнего источника должен проходить через них. Если световыход кристалла и его прозрачность не меняются, то всё вышесказанное в этом случае остаётся справедливым. В противном случае, приведённое отношение будет отражать изменение не только коэффициента усиления ФЭУ, но одновременно и световыхода кристалла, а значит будет отлично от 1. Последнее следует из того, что сцинтилляционный свет и свет от источника распространяются в кристалле по-разному, проходя не одинаковые расстояния от места происхождения до фотокатода ФЭУ, поэтому и затухание будет разным. Кроме того, величина этого отношения не будет одинаковой во всех ячейках калориметра из-за разброса оптических и радиационных характеристик от кристалла к кристаллу. Поэтому, чтобы найти значение Δ_{SC}/S_{SC}, необходимо определить величину R для каждой ячейки калориметра.

Задача упрощается, если каким-то образом исключить влияние изменения коэффициента усиления ФЭУ. Это оказывается возможным, поскольку известно, что прозрачность кристаллов при облучении меняется неодинаково во всём диапазоне длин волн и меньше всего - в красной области видимого спектра [17]. Таким образом, используя два источника света с разными длинами волн, одна из которых должна примерно соответствовать максимуму спектра высвечивания кристалла 420 нм, а другая лежать в красной области, можно найти отношение относительных изменений их сигналов в ФЭУ, которое будет отражать только свойство данного кристалла. Такую же процедуру надо проделать и со сцинтилляционным сигналом. Теперь, если построить корреляцию двух полученных таким образом величин во всём диапазоне их изменения, можно вносить необходимые поправки в измерения, учитывая изменение световыхода кристалла, которое мониторируется источником синего света.

Глава 2. Экспериментальное обоснование возможности непрерывного мониторирования калориметра на кристаллах $PbWO_4$

2.1. Экспериментальная установка для изучения свойств кристаллов вольфрамата свинца

Изучение свойств кристаллов вольфрамата свинца и калориметра на их основе проводилось на экспериментальной установке, содержащей прототип калориметра, которая располагалась на канале 2Б протонного синхротрона У-70 в Протвино [18, 19, 20]. Данный канал позволяет получать легко перестраиваемые высокоинтенсивные пучки электронов в диапазоне энергий 1-45 ГэВ (до 10^6 частиц за сброс) и пионов (до 10^7 частиц за сброс), необходимые для исследования радиационной стойкости кристаллов. Для определения точного значения импульса каждой заряженной пучковой частицы в состав установки входил спектрометр, состоявший из 4-х метрового анализирующего магнита и четырёх станций дрейфовых камер (в сумме 14 камер).

Система сбора данных была создана на основе электроники в стандарте CAMAC с интерфейсом VME к шине PCI [19]. Она включала:

- модули АЦП для интегрирования зарядов с ФЭУ;
- модули ВЦП для регистрации сигналов с дрейфовых камер;
- триггерную логику.

2.1.1. Прототип электромагнитного калориметра

Прототип электромагнитного калориметра собирался в виде матрицы 5×5 кристаллов с фотоэлектронными умножителями для съёма информации. Использовались кристаллы, полученные от разных производителей, с геометрическими размерами 27×27×220 мм^3. ФЭУ с диаметром входного окна 1 дюйм, вплотную пристыковывались к торцам кристаллов чаще всего без оптической замазки. Последняя применялась лишь при измерениях разрешения прототипа калориметра с пучками низкой интенсивности, не вызывавшими сколь-нибудь заметной деградации оптического тракта. Кристаллы оборачивались тайвеком толщиной 170 мкм, который служил одновременно для улучшения светосбора и для оптической изоляции ячеек прототипа. Конструкция прототипа позволяла достаточно просто менять кристаллы или ФЭУ в зависимости от решаемой задачи. Так, в ходе тестовых измерений были исследованы свойства кристаллов от разных производителей и испытаны ФЭУ с входными окнами, изготовленными из разных материалов, с разным числом динодов и с использованием той или иной схемы высоковольтного питания.

Световыход кристаллов $PbWO_4$ зависит от температуры (-2.3 %/°C [19], -1.9 %/°C [21]), поэтому прототип калориметра был помещён в специальный термоизолированный и светонепроницаемый ящик, стенки которого выложены листами пенопласта. Сама матрица кристаллов располагалась между медными пластинами, температура которых поддерживалась постоянной с точностью ±0.1 °C с помощью криотермостата. Распределение температуры на передней (вход пучка) и задней (оптический выход) поверхностях сборки кристаллов контролировалось термодатчиками цифровой системы измерения температуры, связанной с системой сбора данных. Ящик был установлен на подвижной платформе, позволявшей перемещать сборку кристаллов в горизонтальной и вертикальной плоскости и устанавливать её в нужном положении относительно оси пучка с точностью до 0.1 мм. Управление перемещением осуществлялось дистанционно. Кроме того, платформа имела возможность вращения вокруг вертикальной оси, осуществляемого вручную.

2.1.2. Мониторная система на светодиодах

Мониторная система в данной установке необходима для изучения изменения прозрачности кристаллов $PbWO_4$ при их облучении высокоэнергичными частицами и для непрерывного контролирования коэффициентов усиления фотоприёмников. Последнее особенно важно для получения достоверных результатов измерений радиационной стойкости кристаллов, проводившихся в течение длительных отрезков времени, когда флуктуации коэффициентов усиления ФЭУ, вызванные, например, нестабильностью высокого напряжения или изменениями среднего анодного тока при различных загрузках ФЭУ, могли быть значительными. Решение об использовании в экспериментальной установке мониторной системы на светодиодах было обусловлено её такими важными достоинствами, как высокая надёжность при низкой стоимости, относительная простота, возможность быстрой установки необходимой длительности и интенсивности световой вспышки, доступность и широкий выбор электронных компонентов, включая сверх-яркие светодиоды со спектрами излучения практически в любой области видимого спектра. Кроме того, по результатам анализа стабильности работы данной мониторной системы в составе установки следовало принять решение о целесообразности применения подобного устройства в реальном эксперименте.

Устройство мониторной системы

Как уже было указано, прозрачность кристаллов меняется неодинаково во всём диапазоне длин волн, поэтому для детальных исследований данного эффекта в мониторной системе использовались четыре разных светодиода:

- ультрафиолетовый (Kingbright L2523UVC), 400 нм;
- синий (Nichia NSPB 500S), 470 нм;
- жёлтый (Kingbright L-53SYC), 590 нм;
- красный (Kingbright L-53SRC-E), 640 нм.

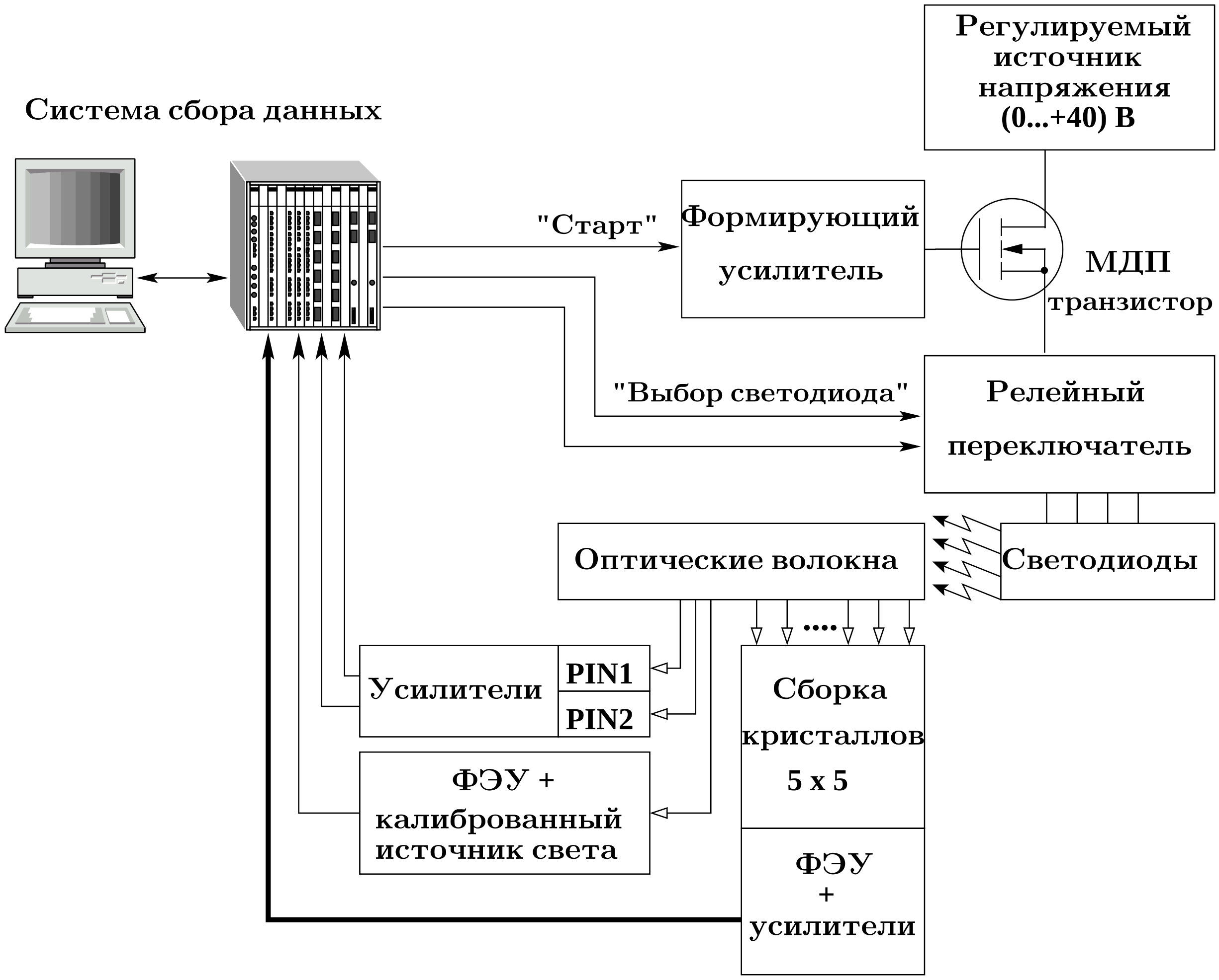

Рис. 2.1: Структурная схема мониторной системы на светодиодах в составе экспериментальной установки для исследования свойств кристаллов $PbWO_4$.

Все изменения коэффициентов усиления ФЭУ отслеживались с помощью красного светодиода.

Структурная схема мониторной системы приведена на Рис. 2.1. В состав системы входили программно управляемый генератор импульсов, запускавших светодиоды, оптические волокна-световоды, и подсистема контроля стабильности источников света. Все компоненты, за исключением источников питающего напряжения, располагались внутри ящика рядом с прототипом калориметра.

Генератор запуска светодиодов представлял собой формирующий усилитель для преобразования импульсов стандартной амплитуды (NIM) в импульсы с заданной длительностью и амплитудой. В выходном каскаде генератора использован мощный МДП-транзистор. Амплитуда выходных электрических импульсов определяла яркость световых сигналов и регулировалась лабораторным источником постоянного напряжения в диапазоне до +40 В. Заданная длительность импульсов по основанию была 100 нс. Выбор именно такой длительности обусловлен тем, что 99 % сцинтилляционного света, рождаемого в кристалле, высвечивается в 100 нс, поэтому выходные сигналы фотоумножителей интегрировались во временном интервале 150 нс 15-битным АЦП LeCroy 2285. Регистрировавшиеся сигналы от светодиодов на выходах ФЭУ полностью укладывались в данном интервале. Светодиоды подключались к выходу генератора через релейный коммутатор. Очерёдность запуска светодиодов и количество импульсов определялось программой сбора данных. Обычно, светодиоды работали в промежутках между сбросами ускорителя. После каждого сброса следовали 10 запусков только одного из них, поэтому полный цикл мониторирования заканчивался после четырёх сбросов.

Для передачи света от светодиодов к кристаллам и подсистеме контроля стабильности источников света использовались оптические волокна диаметром 1 мм с полированными торцами в защитной оболочке. При этом торец жгута, состоявшего из 50-ти волокон, располагался на расстоянии 100 мм от светодиодов для обеспечения однородности засветки. Другими своими концами волокна пристыковывались к кристаллам со стороны, противоположной ФЭУ, по центру каждой ячейки через небольшие отверстия в обёртке кристаллов. На Рис. 2.2 приведены амплитудные распределения сигналов от всех светодиодов в одном из каналов прототипа калориметра, накопленные в 20-минутном временном интервале. Величина 10000, получаемая в результате оцифровки аналогового сигнала с ФЭУ в АЦП, примерно соответствует положению пика от электронов с энергией 20 ГэВ.

Подсистема контроля стабильности источников света состояла из трёх независимых фотоприёмников - двух кремниевых PIN-фотодиодов Hamamatsu S6468-05 и 10-динодного ФЭУ Hamamatsu R5800, - световые сигналы к которым приходили по отдельным волокнам.

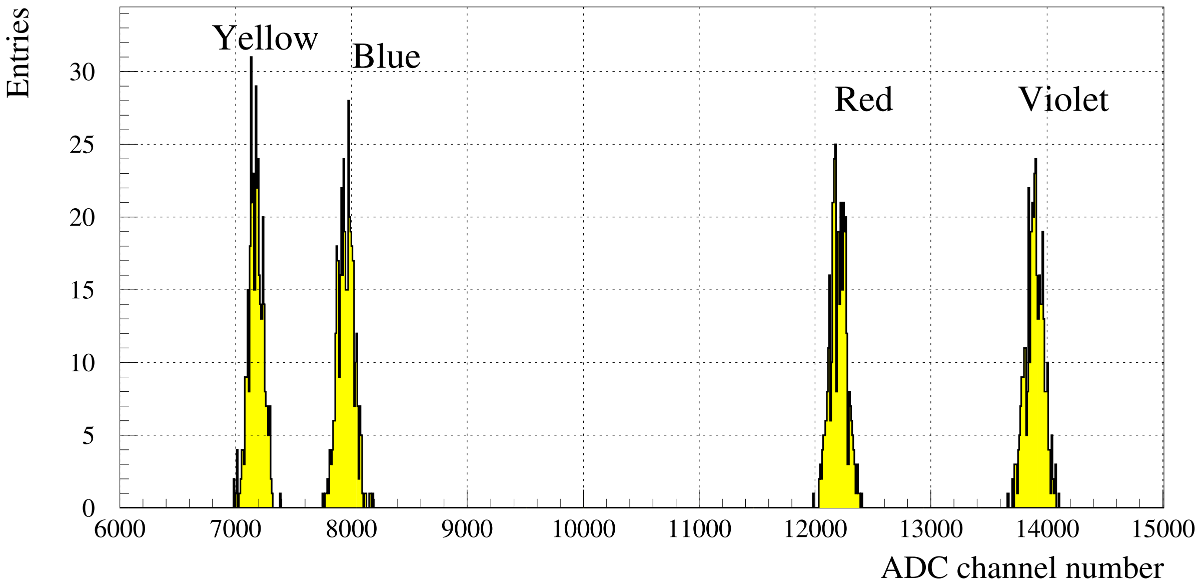

Рис. 2.2: Амплитудные распределения сигналов от 4-х светодиодов в одном из каналов прототипа калориметра, накопленные за 20 мин. RMS распределений составляет 0.85% для жёлтого, 0.83% для синего, 0.60% для красного и 0.53% для ультрафиолетового светодиода.

В корпуса фотодиодов с активной рабочей площадью диаметром 0.8 мм встроены предусилители. Оба фотодиода были смонтироавны на одной печатной плате с дополнительным двухканальным операционным усилителем AD8002 и интегральными стабилизаторами напряжения ±5 В, питающими усилители. Амплитудное распределение сигнала от синего светодиода в одном из фотодиодов, накопленное в течение 20 мин., представлено на Рис. 2.3. Следует отметить, что ширина распределения определяется главным образом шумами усилителей, а не фотостатистикой. Это подтверждается тем, что амплитудный спектр в том же канале АЦП в отсутствие сигнала (пьедестал АЦП) мало отличается по ширине от приведённого на рисунке сигнального спектра.

Если PIN-фотодиоды известны своей стабильностью, а нестабильность их выходного сигнала характеризует, в основном, источник регистрируемого света, то фотоумножитель, даже самый хороший, всегда, когда используется для прецизионных амплитудных измерений, нуждается в мониторировании калиброванным источником света. В данном случае для мониторирования коэффициента усиления ФЭУ применялся кристалл YAP:Ce раз-

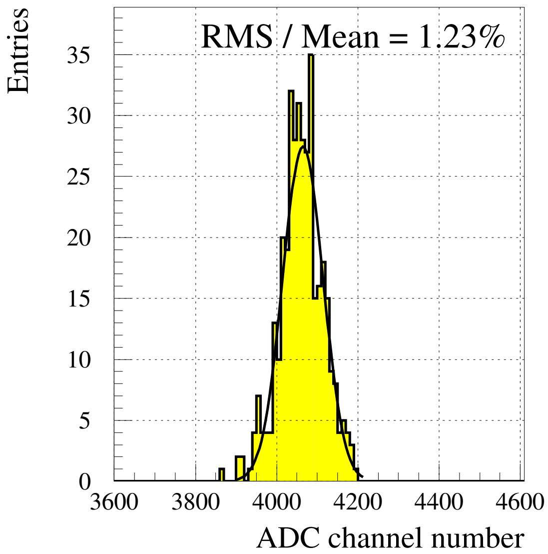

Рис. 2.3: Амплитудное распределение сигнала от синего светодиода в одном из PIN-фотодиодов, накопленное за 20 мин.

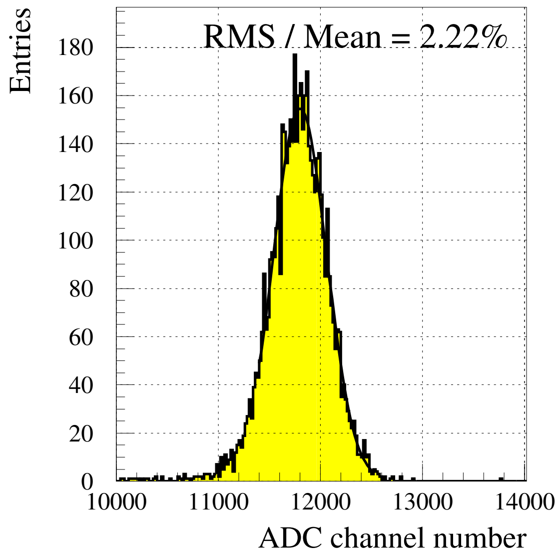

Рис. 2.4: Амплитудное распределение сигнала от калиброванного источника света (кристалл YAP:Ce, возбуждённый α-источником) в ФЭУ подсистемы контроля стабильности источников света, накопленное за 20 мин.

мером $3 \times 3 \times 0.1$ mm^3 с нанесённым на его поверхность радиоактивным α-источником, обеспечивающим порядка 20 вспышек света в секунду [22]. YAP:Ce имеет максимум спектра высвечивания в районе 360 нм и постоянную времени высвечивания около 30 нс. Для выработки триггера использовался сигнал с последнего динода ФЭУ. Запись примерно 50-ти α-событий осуществлялась в каждом промежутке между сбросами ускорителя. Амплитудное распределение, накопленное за 20 минут, приведено на Рис. 2.4.

Рабочие характеристики мониторной системы

Одной из важнейших характеристик мониторной системы является её долговременная стабильность. Стабильность описываемой мониторной системы была оценена по результатам её работы в составе экспериментальной установки во время сеанса в декабре 2002 года и в течение 3-х месяцев после сеанса, когда наблюдалось естественное восстановление кристаллов.

Для анализа стабильности использовались сигналы с PIN-фотодиодов и мониторирующего ФЭУ. Сначала вычислялись средние значения распределе-

Рис. 2.5: Диаграммы долговременной стабильности. По вертикали отложены средние значения амплитудных распределений сигналов ФЭУ, вычисленные в 20-минутные последовательные интервалы для: (a) жёлтого светодиода; (b) калиброванного источника света; (c) жёлтого светодиода поправленного на калиброванный источник света.

ний сигналов от светодиодов (и от калиброванного источника света в ФЭУ) в каждые последовательные 20-минутные интервалы и заносились во временные диаграммы. Примеры таких диаграмм приведены на Рис. 2.5. При проецировании всех значений в интересующем временном интервале на вертикальную ось, получались распределения, RMS которых, выраженные в процентах, характеризовали нестабильность мониторной системы в заданный отрезок времени.

Следует отметить тот факт, что данный метод характеризует мониторную систему как единое целое, т.е. полученные значения отображают нестабильность всего мониторного тракта, включающего в себя как источники света, так и фотоприёмники с усилителями, а также АЦП. Однако для сравнительного анализа компонентов мониторной системы можно пренебречь неста-

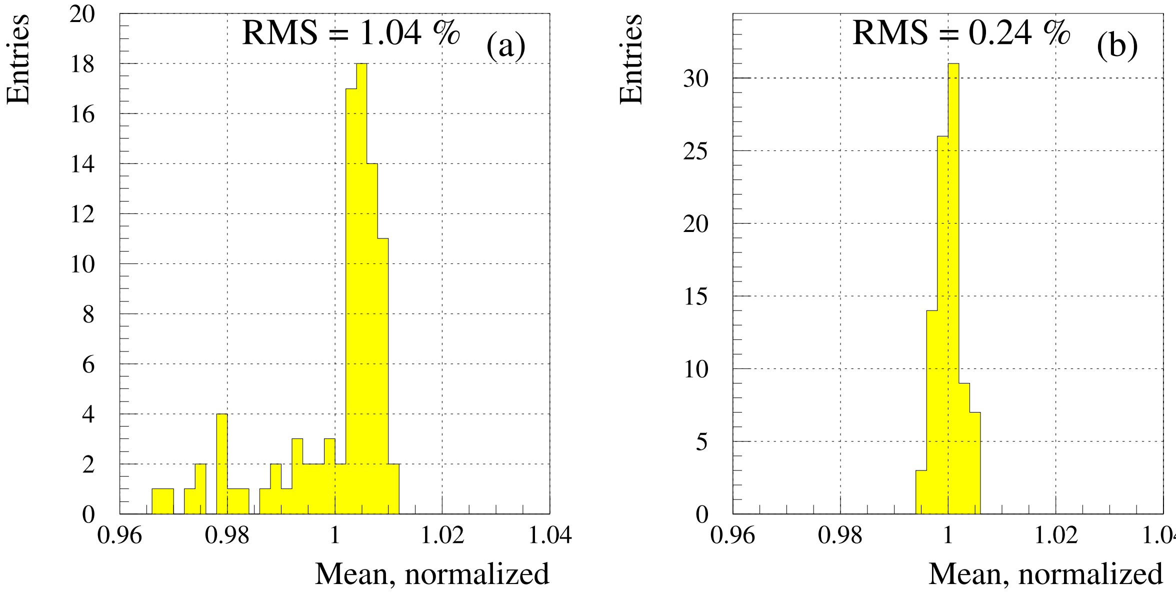

Рис. 2.6: Нормализованные распределения средних амплитуд сигналов мониторирующего ФЭУ от жёлтого светодиода за 30 часов: (a) без поправок; (b) поправленное на сигнал от калиброванного источника света.

бильностью АЦП. Учитывая тот факт, что на результаты, полученные для мониторирующего ФЭУ, существенное влияние могли оказывать флуктуации высокого напряжения, все сигналы от светодиодов, зарегистрированные этим ФЭУ, поправлялись на сигналы от α-источника. На Рис. 2.5(a) и (b) приведены, соответственно, временные диаграммы поведения сигналов ФЭУ от жёлтого светодиода и α-источника, где видны коррелированные флуктуации. Это говорит о флуктуациях коэффициента усиления ФЭУ на данном временном отрезке. На Рис. 2.5(c) приведена диаграмма, полученная путём деления 2.5(a) на 2.5(b), а на Рис. 2.6 - численные значения нестабильностей до и после поправки. Как видно, поправка на сигнал от калиброванного источника света значительно уменьшила значение RMS распределения сигналов жёлтого светодиода, позволив оценить истинную нестабильность данного источника света в выбранном временном интервале.

Используя описанный метод, была оценена стабильность мониторной системы для непрерывных интервалов различной длительности - 25, 200 и 2000 часов. Полученные результаты представлены в Таблице 2.1.

Таблица организована следующим образом. Для каждого фотоприём-

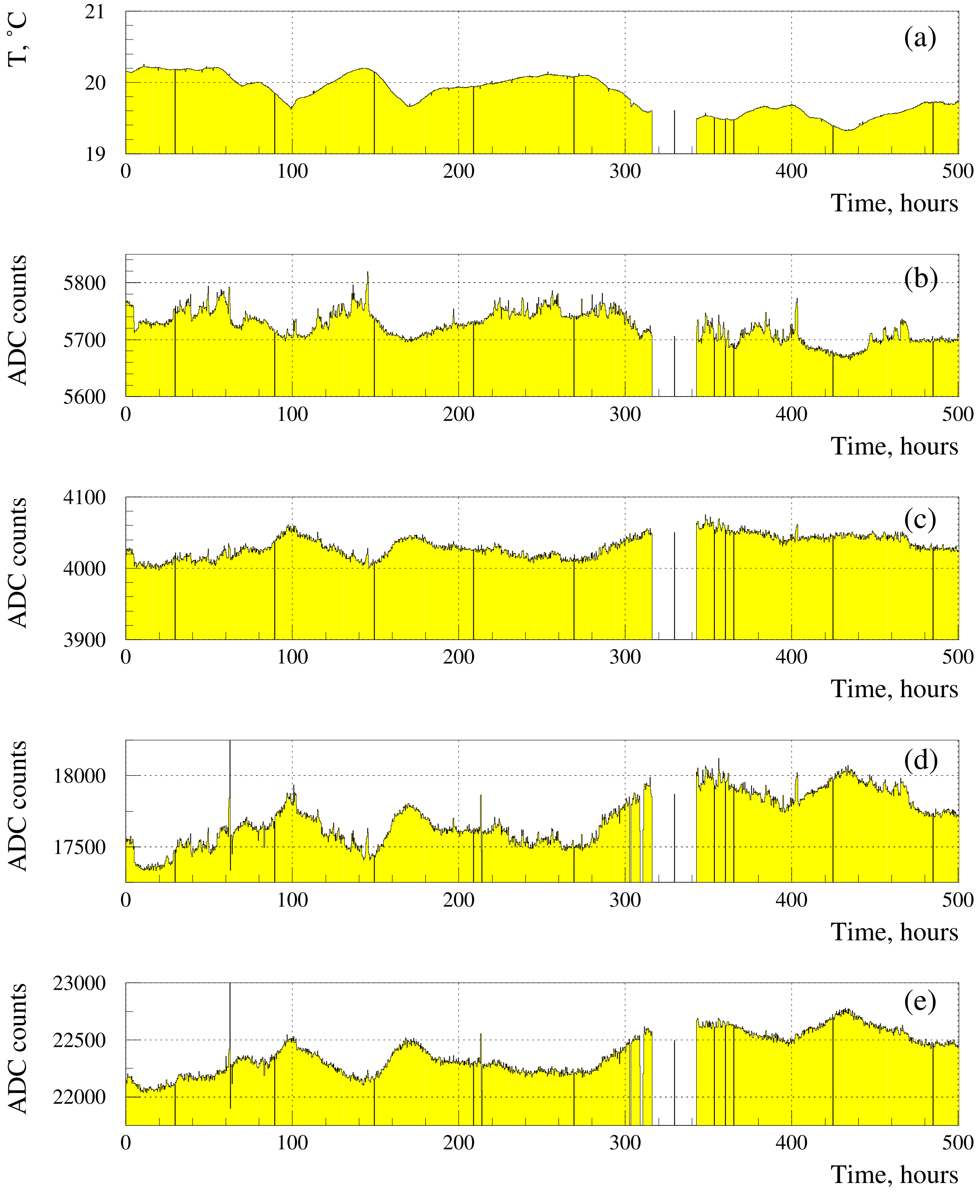

Рис. 2.7: Диаграммы долговременной стабильности: (a) температура на поверхности сборки кристаллов со стороны ФЭУ; (b) ультрафиолетовый светодиод в PIN2; (c) синий светодиод в PIN2; (d) жёлтый светодиод в мониторирующем ФЭУ; (e) красный светодиод в мониторирующем ФЭУ. Каждая точка на диаграммах является средним значением соответствующего амплитудного распределения, накопленного за 20 мин.

Таблица 2.1: Нестабильность мониторной системы (RMS, %) вычисленная для интервалов 25, 200 и 2000 часов. Первые строки в графах 25 и 200 часов содержат результаты, полученные во время работы У-70; вторые строки, а также графа 2000 часов соответствуют набору данных после остановки У-70. Сигнал от красного светодиода в PIN2 был за пределами динамического диапазона АЦП.

Фотоприёмник	ФЭУ				PIN1				PIN2		
Светодиод	УФ	С	Ж	К	УФ	С	Ж	К	УФ	С	Ж
25 ч	0.38	0.23	0.28	0.12	0.37	0.29	0.16	0.05	0.21	0.14	0.16
	0.29	0.22	0.19	0.09	0.33	0.35	0.15	0.04	0.21	0.10	0.15
200 ч	0.57	0.46	0.50	0.36	0.57	0.50	0.32	0.08	0.38	0.45	0.23
	0.41	0.33	0.95	0.72	0.47	0.38	0.55	0.07	0.38	0.40	0.42
2000 ч	0.54	0.34	0.95	0.73	0.79	0.41	0.55	0.08*	0.47	0.50	0.46

* Результат для первых 550 ч.

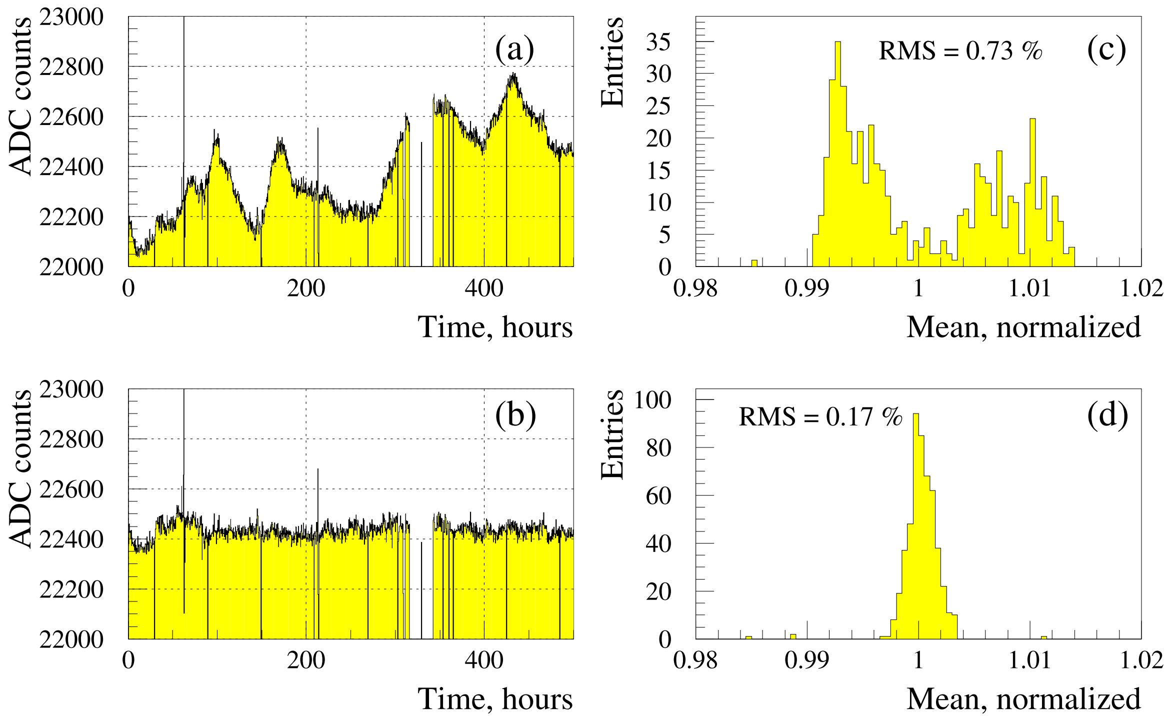

Рис. 2.8: Поправка на температуру для сигнала от красного светодиода в мониторирующем ФЭУ: (a) и (c) до поправки; (b) и (d) после применения поправки. Гистограммы (c) и (d) получены для интервала 2000 ч, а временные диаграммы (a) и (b) показывают первые 500 часов этого интервала.

ника указаны значения RMS распределений сигналов от всех четырёх светодиодов, выраженные в процентах, вычисленные для заданных временных интервалов. Для интервалов 25 и 200 часов приведены по 2 значения RMS. Первые строки в этих графах содержат результаты, полученные во время работы ускорителя. Вторые строки, а также графа 2000 часов, соответствуют набору данных при исследовании процесса восстановления кристаллов после остановки ускорителя.

Чувствительность кремниевых фотодиодов намного выше в красной области, чем в синей, и сигнал от красного светодиода в PIN2 оказался за пределами динамического диапазона АЦП. Для измерения его стабильности в PIN1 было использовано волокно с плохой прозрачностью, что привело к ослаблению сигналов от всех остальных светодиодов. В результате выросли относительные статистические ошибки при вычислении средних значений амплитудных распределений и, как следствие, результирующие значения RMS.

Сравнивая результаты, полученные во время сеанса и после него в интервалах 25 часов, можно заметить, что в среднем они мало отличаются друг от друга, но стабильность несколько выше при неработающем ускорителе. Это можно объяснить отсутствием наводок, вызываемых электрооборудованием ускорителя во время его работы. Такая же тенденция просматривается и в результатах для интервалов 200 часов, но лишь для синего и ультрафиолетового светодиодов. Напротив, стабильность сигналов жёлтого и красного светодиодов в ФЭУ и жёлтого светодиода в обоих фотодиодах заметно ухудшилась в период после сеанса. Стабильность системы за 2000 часов немного хуже, чем за первые 200 часов из этого же интервала, тем не менее все значения RMS оказались меньше 1 %.

Для того, чтобы объяснить причины ухудшения стабильности в интервалах 200 и 2000 часов, обратимся к временным диаграммам, приведённым на Рис. 2.7. На этом рисунке поведение сигналов от светодиодов в фотоприёмниках сравнивается с температурной кривой (а), измеренной одним из датчиков, расположенных на задней поверхности сборки кристаллов, рядом

Таблица 2.2: Нестабильность мониторной системы (RMS, %) вычисленная для интервалов 200 и 2000 часов с поправкой на изменение температуры. Первая строка в графе 200 часов содержит результаты, полученные во время работы У-70; вторая строка, а также графа 2000 часов соответствуют набору данных после остановки У-70.

Фотоприёмник	ФЭУ				PIN1				PIN2		
Светодиод	УФ	С	Ж	К	УФ	С	Ж	К	УФ	С	Ж
200 h	-	-	0.37	0.21	-	-	0.27	-	0.28	0.42	0.22
	-	-	0.29	0.16	-	-	0.23	-	0.24	0.13	0.19
2000 h	-	-	0.29	0.17	-	-	0.29	-	0.37	0.34	0.26

с фотоумножителями. Как видно, температура внутри ящика заметно менялась в указанный период - разница между максимальным и минимальным её значениями составила 0.9 °C. Нетрудно заметить, что огибающие диаграмм сигналов от светодиодов (b)-(e) ведут себя подобным образом, и можно с уверенностью утверждать, что именно колебания температуры стали причиной увеличения нестабильности мониторной системы. Сильнее всего температурная зависимость проявилась в сигналах от жёлтого светодиода во всех фотоприёмниках, а также от красного в ФЭУ. Интересно, что сигнал от красного светодиода в PIN1 был очень стабилен и не зависел от температуры, хотя в технических характеристиках фирма Kingbright указывает, что красный светодиод, также как жёлтый и фиолетовый, имеют отрицательные температурные коэффициенты [23]. Наиболее вероятным объяснением этого факта является то, что PIN-фотодиод имеет положительный температурный коэффициент в красной области, равный по величине температурному коэффициенту красного светодиода, и происходит их взаимная компенсация. Это же рассуждение справедливо и по отношению к сигналу от ультрафиолетового светодиода в PIN2. Как следует из диаграммы 2.7(b), изменение этого сигнала происходит с тем же знаком, что и изменение температуры, хотя сам светодиод, как указывалось выше, имеет отрицательный температурный коэффициент. В данном случае имеет место перекомпенсация, т.е. температурный коэффициент фотодиода в фиолетовой области больше по абсолютному значению, чем у светодиода. К сожалению, фирма Hamamatsu не приводит данных по температурной зависимости этих фотодиодов.

Поскольку не производились измерения температуры непосредственно в местах расположения светодиодов и мониторирующих фотоприёмников, их точные температурные коэффициенты не могли быть вычислены. Тем не менее, оказалось возможным выполнить температурную коррекцию сигналов, поскольку её качественное изменение во всех датчиках было одинаковым и определялось поведением внешней температуры. Пример такой коррекции для сигнала ФЭУ от красного светодиода, имеющего самую низкую стабильность среди остальных, приведён на Рис. 2.8. Как видно из гистограмм (c) и (d), после поправки на изменение температуры RMS уменьшился более чем в 4 раза.

Результаты коррекции других сигналов, имевших температурную зависимость, приведены в Таблице 2.2. Как видно, долговременная нестабильность мониторной системы при отсутствии колебаний температуры составляла бы всего (0.2-0.4) %.

Итак, по результатам проведённого анализа можно сделать следующие заключения:

- используемая в экспериментальной установке мониторная система позволяет проводить измерения с точностью выше 1 %;
- главным источником нестабильности мониторной системы в анализируемый период были колебания температуры;
- данное техническое решение могло бы быть применено для создания мониторной системы эксперимента BTeV при условии решения проблемы температурной нестабильности.

2.2. Исследование возможного нарушения сцинтилляционного механизма в кристаллах $PbWO_4$ после пионного облучения

Как было указано в главе 1, калориметр BTeV должен калиброваться по месту. Для получения требуемой точности калибровки необходим набор статистики в течение определённого промежутка времени - для разных зон калориметра временные интервалы могут составлять от единицы до десятков часов. В течение этих временных интервалов необходимо производить непрерывное мониторирование возможного изменения не только коэффициентов усиления ФЭУ, но и световыхода кристаллов под действием радиации. Однако это не трудно сделать лишь в том случае, если изменение световыхода кристаллов происходит только по причине изменения прозрачности, а сцинтилляционный механизм не нарушается. При таком условии мониторная система с импульсным источником света прекрасно справится с этой задачей. Несмотря на то, что некоторые авторы указывают в своих работах на отсутствие нарушения сцинтилляционного механизма в кристаллах $PbWO_4$ под действием радиации, объясняя это уникальной комбинацией свойств этих кристаллов [24], и не было обнаружено указаний на нарушение при облучении кристаллов гамма-источником [25], экспериментального подтверждения отсутствия нарушения сцинтилляционного механизма при облучении кристаллов адронами в литературе не встречалось. Косвенное доказательство этого, правда, следует из результатов, представленных в работе [20]. Авторами была измерена неоднородность световыхода по длине кристалла с использованием мюонного пучка до и после облучения пионами. Для измерения неоднородности вся сборка кристаллов поворачивалась своей боковой поверхностью перпендикулярно оси пучка, а облучение проводилось в положении, когда пучок попадал в торцы кристаллов. Поглощённая кристаллами доза составила до 4 крад, что вызвало потерю сигналов до 30 %. При этом мощность дозы в передней части кристаллов (3-10 радиационных длин) изменялась почти в 2 раза по длине развития ливня. Однако это никак не повлияло на неоднородность световыхода по длине кристалла, которая до и после облучения была на уровне 0.5 %/см, что указывает на неизменность количества рождаемого света в каждой его точке.

Ren-Yuan Zhu (CALTECH) предложил идею прямой экспериментальной проверки отсутствия нарушения сцинтилляционного механизма [26]. Суть предложенного метода заключается в следующем. Сначала узким мюонным пучком измеряется световыход кристалла в нескольких точках по его длине (кристаллы должны быть повёрнуты своей боковой поверхностью перпендикулярно оси пучка). Затем в одной из точек производится облучение узким пучком пионов высокой интенсивности и снова сканируется световыход от мюонов. Если количество рождаемого света меняется во время облучения, то при повторном сканировании световыхода должна проявиться неоднородность.

2.2.1. Постановка эксперимента и моделирование ожидаемых результатов

Для реализации этой идеи были использованы пять кристаллов, произведённых в Богородицке и пять кристаллов, изготовленных Шанхайским Институтом Керамики. Измерения проведены в декабре 2002 года. В том сеансе для регистрации света с кристаллов использовались 6-динодные ФЭУ Hamamatsu R5380Q с дополнителными усилителями с коэффициентом усиления 10. Фотокотатоды и диноды ФЭУ были запитаны от независимых источников высоковольтного напряжения. Кристаллы занимали 2 ряда в сборке, в верхнем ряду располагались шанхайские кристаллы. Боковая поверхность сборки была установлена перпендикулярно оси пучка, как изображено на Рис. 2.9, показывающем вид на кристаллы сверху.

При измерении продольной неоднородности световыхода кристаллов их сборка перемещалась в горизонтальной и вертикальной плоскости для набора необходимого количества статистики сигналов от мюонов в каждой точке измерения по длине кристаллов. Интенсивность мюонного пучка была низкая,

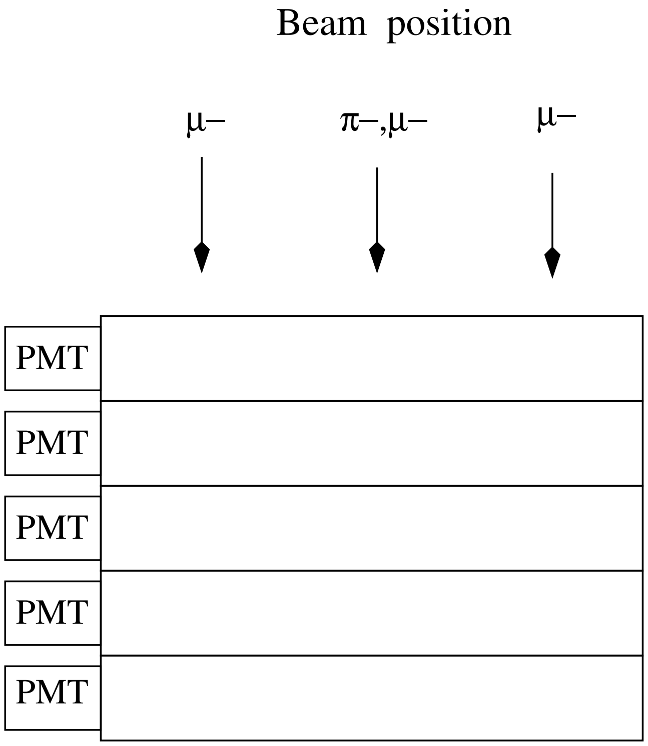

Рис. 2.9: Расположение сборки кристаллов (вид сверху) по отношению к оси пучка при измерении продольной неоднородности световыхода и облучении пионами.

и координаты мюонных треков восстанавливались по данным с дрейфовых камер.

Облучение пионами производилось с интенсивностью $\sim 2.6\times10^6$ частиц за сброс в течение 30 часов. Длительность сброса составляла $\sim$ 1.5 с, а период их следования - $\sim$ 9 с. Пучок был вытянут по вертикали - 95 % пионов находились в площади шириной 2 и высотой 6 см - и облучал одновременно два ряда кристаллов примерно посередине. Распределение мощности дозы для каждого облучённого кристалла было получено программой моделирования GEANT3. Пример поперечного профиля мощности дозы для одного из кристаллов приведён на Рис. 2.10(a), а максимальная мощность дозы, полученная каждым кристаллом, представлена на Рис. 2.10(b).

Чтобы качественно представить ожидаемый эффект, была разработана математическая модель распространения сцинтилляционного света в кристалле и добавлена в программу GEANT3. Предполагалось, что кристалл имеет идеальные оптические свойства. Анизотропия и диффузное отраже-

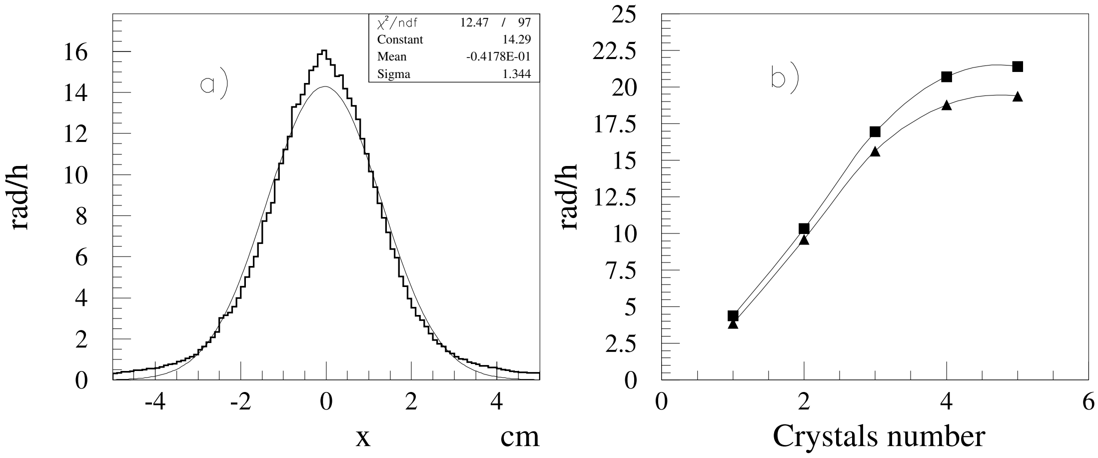

Рис. 2.10: Результаты моделирования программой GEANT3: (a) Поперечный профиль мощности дозы в одном из кристаллов во время облучения пионным пучком; (b) Максимальные мощности доз в кристаллах при пионном облучении. Квадратами обозначены шанхайские, а треугольниками - богородицкие кристаллы.

ние не учитывались. Предполагалось также, что распределение цветовых центров, образующихся при радиационном повреждении кристаллов, такое же, как представлено на Рис. 2.10(a) - Гауссово распределение с σ=1.3 см. Для наглядности предполагалось, что деградация световыхода пропорциональна поглощённой энергии и в зоне максимума поглощённой дозы составляет 3 %. Результаты моделирования представлены на Рис. 2.11. По горизонтальной оси отложены расстояния от точек сцинтилляционных взаимодействий до фотокатода ФЭУ. Сплошная линия показывает световыход кристалла до облучения, а штриховая - после облучения, которое привело к снижению сигналов по всей длине кристалла. Зона, в которой была задана деградация световыхода, проявилась в виде дополнительного ослабления сигнала на фоне общего падения. Для сравнения, пунктиром нанесена кривая, полученная при условии отсутствия нарушения сцинтилляционного механизма в зоне облучения.

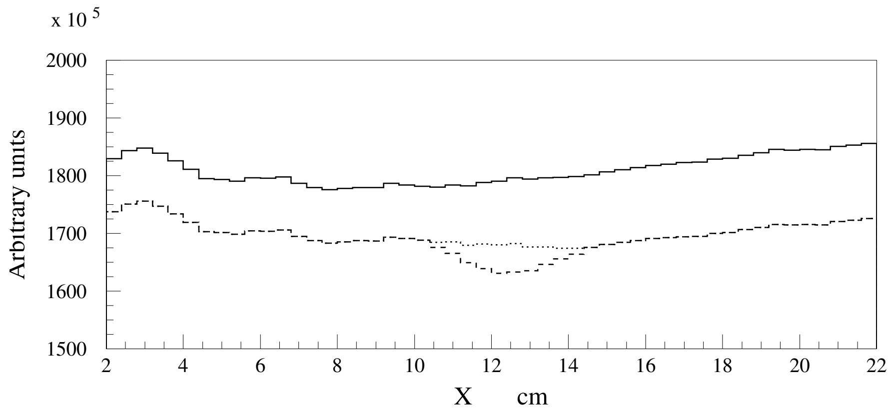

Рис. 2.11: Результаты моделирования программой GEANT3 продольной неоднородности световыхода кристалла. По горизонтальной оси отложены расстояния от точек сцинтилляционных взаимодействий до фотокатода ФЭУ. Сплошная линия показывает световыход кристалла до облучения, а штриховая - после облучения при наличии деградации эмиссии фотонов 3 % в зоне максимума поглощённой дозы. Пунктиром нанесена кривая, полученная при условии отсутствия нарушения сцинтилляционного механизма.

2.2.2. Экспериментальные результаты

Для вычисления положения пиков амплитудных распределений, накопленных для выбранных областей кристаллов при сканировании мюонами, они были профитированы комбинацией распределений Ландау и Гаусса. На Рис. 2.12 приведены примеры спектров сигналов от мюонов в одном из кристаллов до (вверху) и после облучения. Параметр P2, вычисленный в результате процедуры фитирования, соответствует положению максимума амплитудного распределения. Остальные параметры: P1 - нормализующий коэффициент; P3 - величина, обратная FWHM распределения Ландау; P4 - σ распределения Гаусса.

По результатам вычисления параметров P2, для каждого кристалла были построены кривые изменения световыхода по длине кристалла до и после облучения пионами. На Рис. 2.13 приведены результаты, полученные для одного из богородицких кристаллов. На этом рисунке центр зоны облучения обозначен стрелкой, а измеренный до и после облучения световыход в этом месте - треугольниками. Полученные результаты (вверху) были профитирова-

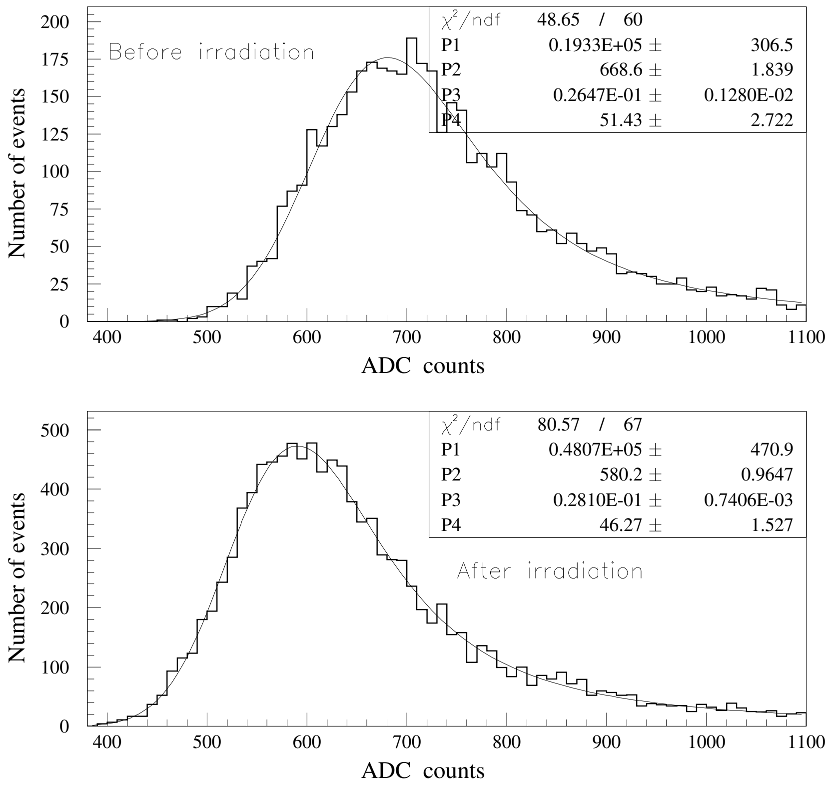

Рис. 2.12: Спектры сигналов от мюонов в одном из кристаллов до (вверху) и после облучения, профитированные комбинацией распределений Ландау и Гаусса. Параметр P2 соответствует положению максимума амплитудного распределения; P1 - нормализующий коэффициент; P3 - величина, обратная полной ширине на полувысоте (FWHM) распределения Ландау; P4 - σ распределения Гаусса.

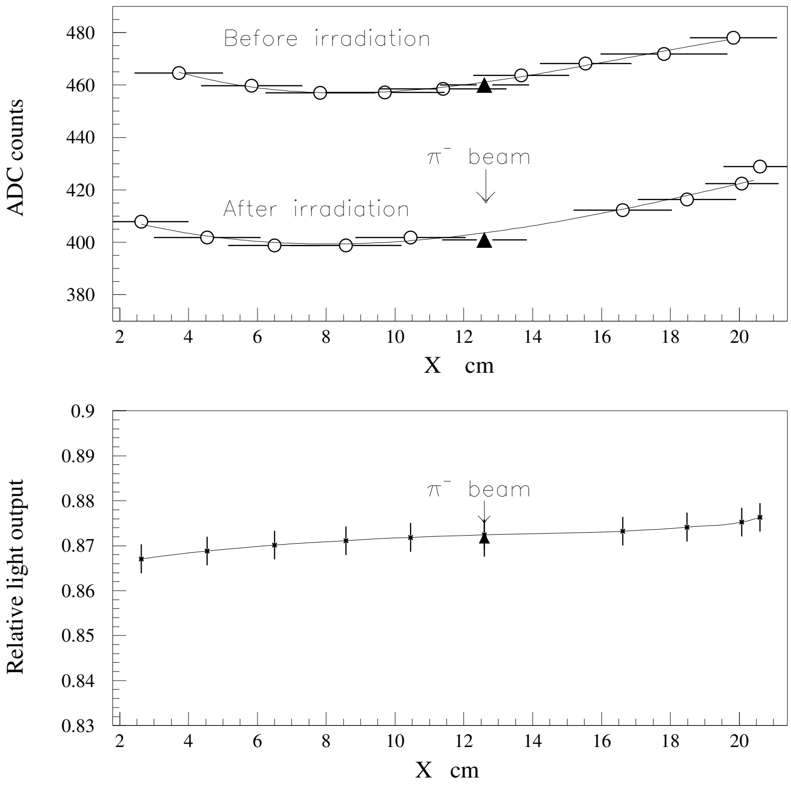

Рис. 2.13: Вверху: результаты измерения световыхода по длине одного из кристаллов до и после облучения пионным пучком, профитированные полиномом 3-ей степени. Максимальная интенсивность пучка была на расстоянии 12.6 см от фотокатода ФЭУ. Внизу: относительное изменение световыкода кристалла по его длине после облучения.

ны полиномом 3-ей степени, причём экспериментальное значение световыхода в зоне облучения при фитировании не учитывалось. Как видно, для данного кристалла дополнительного падения световыхода в зоне облучения не наблюдается, что свидетельствует о том, что при данном уровне поглощённой дозы сцинтилляционный механизм не пострадал. Нижняя картинка на том же рисунке показывает относительное изменение световыкода кристалла по его длине после облучения и позволяет численно оценить величину эффекта по отклонению относительного световыхода в зоне облучения от кривой, построенной по другим точкам. Действительно, световыход в любой точке кристалла $LO(x)$ можно представить в виде произведения двух сомножителей: первый, $LT(x)$, зависит только от изменения прозрачности, а второй, $LE(x)$, - от изменения количества испускаемых при сцинтилляции фотонов:

$$LO(x) = LT(x)LE(x). \tag{2.1}$$

Тогда относительный световыход после облучения, $RLO(x)$, будет

$$RLO(x) = \frac{LT^a(x)}{LT^b(x)}\frac{LE^a(x)}{LE^b(x)}. \tag{2.2}$$

Индексы a и b обозначают, что величина берётся, соответственно, после $(after)$ и до $(before)$ облучения. В точке, в которой производилось облучение, x_π, значение относительного световыхода выразится следующим образом:

$$RLO(x_\pi) = \frac{LT^a(x_\pi)}{LT^b(x_\pi)}\frac{LE^a(x_\pi)}{LE^b(x_\pi)}. \tag{2.3}$$

Если нарушения сцинтилляционного механизма нет, то $\frac{LE^a(x_\pi)}{LE^b(x_\pi)} = 1$, и значение $RLO(x_\pi)$ ляжет на кривую, построенную по значениям RLO в точках, где облучения не производилось. В противном случае, отклонение от кривой, выраженное в относительных единицах, составит:

$$rs(x_\pi) = \frac{\frac{LT^a(x_\pi)}{LT^b(x_\pi)}\frac{LE^a(x_\pi)}{LE^b(x_\pi)}}{\frac{LT^a(x_\pi)}{LT^b(x_\pi)}} = \frac{LE^a(x_\pi)}{LE^b(x_\pi)} \tag{2.4}$$

Как видно из полученного результата, величина rs характеризует относительное изменение числа испускаемых при сцинтилляции кристалла фотонов и не зависит от изменения прозрачности кристалла.

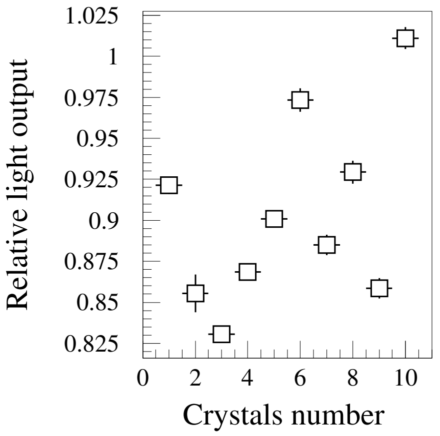

Рис. 2.14: Относительные изменения световыхода для 10-ти кристаллов после их облучения пионным пучком, вычисленные в зонах его максимальной интенсивности. Первые пять кристаллов богородицкие, вторые - шанхайские.

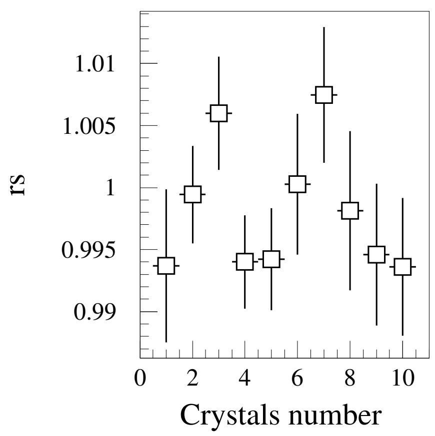

Рис. 2.15: Относительные изменения эмиссии фотонов сцинтилляций для 10-ти кристаллов после их облучения пионным пучком, вычисленные в зонах его максимальной интенсивности. Первые пять кристаллов богородицкие, вторые - шанхайские.

Значения $RLO(x_\pi)$ для всех 10-ти облучённых кристаллов приведены на Рис. 2.14, а значения rs для них показаны на Рис. 2.15. Можно утверждать, что в пределах точности измерений ~ 0.5 % нарушения эмиссии фотонов после пионного облучения не наблюдалось ни в одном из них. Среднее значение величины $1 - rs$ по 10- ти кристаллам составило (0.20 ± 0.15) %.

Таким образом, итогом проведённых измерений стало заключение об отсутствии повреждений сцинтилляционного механизма в кристаллах $PbWO_4$, произведённых в Богородицке и Шанхае, более чем на ~ 0.5 % с уровнем достоверности 95 % при их облучении пионными пучками с мощностями доз до ~ 20 рад/ч. Примерно 90 % всех кристаллов установки BTeV должны были находиться под воздействием радиации с меньшими мощностями доз, а значит изменение их световыхода можно мониторировать, контролируя изменение прозрачности с помощью источника света с длиной волны в районе максимума их спектра высвечивания.

2.3. Установление корреляции между изменениями сигналов от светодиода и электронов при облучении кристаллов пучками частиц высокой интенсивности

После того, как было доказано, что по причине отсутствия нарушения сцинтилляционного механизма в кристаллах $PbWO_4$ под действием радиации изменение световыхода можно контролировать световым источником, например, синим светодиодом, а также показано, что мониторная система экспериментальной установки имеет хорошую стабильность, стало важным установить вид зависимости между изменениями сигналов от светодиода и от электронов при облучении кристаллов электронными и пионными пучками высокой интенсивности. Это было необходимо для определения, с какой точностью можно поддерживать изначально (до облучения) рекордное разрешение калориметра, мониторируя изменения сигналов от радиации с помощью световой мониторной системы.

При изменении коэффициента поглощения света в кристалле на величину $\Delta\alpha$ световыход меняется в $e^{-\Delta\alpha\lambda}$ раз, где λ - это длина пути, которую свет проходит в кристалле до регистрации фотоприёмником. Предполагается, что $\Delta\alpha\lambda < 0.1$ для нескольких часов набора данных, и поэтому возможно использовать линейную аппроксимацию. Следовательно, потери сигнала будут пропорциональны $\Delta\alpha\lambda$. Учитывая, что длина пути, которую проходит сцинтилляционный свет, не равна той, что проходит свет от светодиода, изменения сигналов от электрона и светодиода будут происходить по-разному, но при этом пропорционально друг другу. В экспериментальной установке волокна, по которым распространяется свет от светодиода, пристыкованы к кристаллам со стороны, противоположной ФЭУ, поэтому длина пути, пробегаемого светом, примерно равна длине кристалла. Действительно, свет выходит из волокна в воздух в пространственном угле $\sim 25\ ^\circ$, который уменьшается до $\sim 11\ ^\circ$ при вхождении в плотную среду кристалла. Таким образом, максимальный пробег света в кристалле длиной l составит

$$\lambda = \frac{l}{\cos 11^\circ} \approx 1.02l. \tag{2.5}$$

Сцинтилляционный свет изотропный. Кроме того, кристаллы обёрнуты диффузным отражателем, поэтому длина пробега этого света больше из-за многократных отражений. Вдобавок, радиационные повреждения прозрачности в кристалле для длины волны светодиода 470 нм меньше, чем для максимума спектра высвечивания 420 нм. Поэтому можно предположить, что значение отношения изменения сигнала от светодиода к изменению сигнала от электрона, K, будет меньше 1.

Профили мощностей доз от электронных и пионных пучков значительно отличаются по длине кристалла [20], что может привести к различиям в коэффициентах пропорциональности при пионном и электронном облучении. Анализ данных, накопленных в декабре 2002 г. во время облучения сборки кристаллов пионным пучком с эненргией 34 ГэВ и электронным пучком с эненргией 23 ГэВ, позволил получить эти коэффициенты для кристаллов от разных производителей. Исследовались 25 кристаллов, расположенных в виде сборки 5×5. Длинная сторона кристаллов была сориентирована вдоль оси пучка. Все исследуемые кристаллы получили за время измерений поглощённую дозу от 0.5 до 1.5 крад.

2.3.1. Процедура облучения кристаллов пионами и экспериментальные результаты

Периоды облучения пионами чередовались с короткими интервалами, во время которых производились измерения световыхода кристаллов от электронного пучка низкой интенсивности (калибровка). На время калибровки включались дрейфовые камеры, по которым при амплитудном анализе отбирались электроны, попадавшие в центральную область 2×2 мм^2 торца каждого кристалла. Полученные значения световыхода затем нормировались на результаты самой первой калибровки всех кристаллов, предшествовавшей

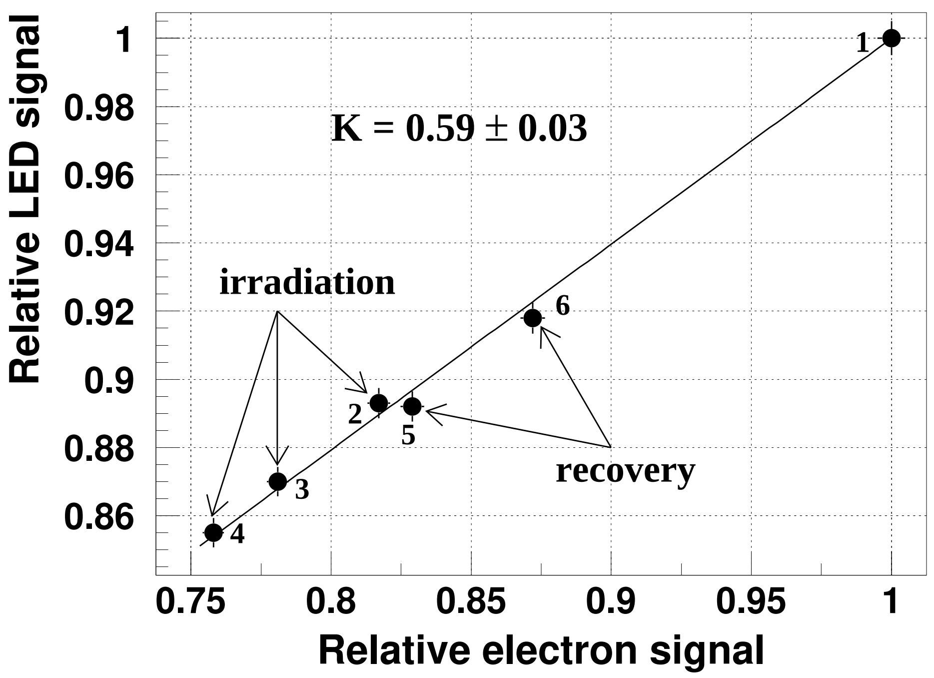

Рис. 2.16: Зависимость между относительными изменениями сигналов от электронов и синего светодиода в одном из кристаллов сборки при пионном облучении. Точки соответствуют результатам, полученным при калибровках электронным пучком низкой интенсивности. Результаты профитированы линейной функцией с коэффициентом пропорциональности $K = 0.59 \pm 0.03$.

началу облучения. Следует отметить, что при облучении одновременно засвеченными оказывались 9 кристаллов, поэтому промежуточные калибровки выполнялись только для ячеек сборки, занятых ими. Потребовалось 4 цикла облучений, чтобы провести измерения для всех кристаллов: в центре пионного пучка поочерёдно оказывались кристаллы, занимавшие позиции на пересечении рядов сборки 2 и 4 с колонками 2 и 4. По окончании облучения последней группы из девяти кристаллов была проведена калибровка всех 25 кристаллов.

На Рис. 2.16 представлена зависимость между относительными изменениями сигналов от электронов и синего светодиода в одном из кристаллов сборки, построенная по результатам обработки калибровочных наборов данных. Точки 1–4 соответствуют периоду, когда данный кристалл облучался, а 5–6 - когда происходило восстановление его оптических показателей после смещения из зоны облучения. Как видно, во время облучения сигналы от светодиода и электрона падали, а во время восстановления - росли. Замеча-

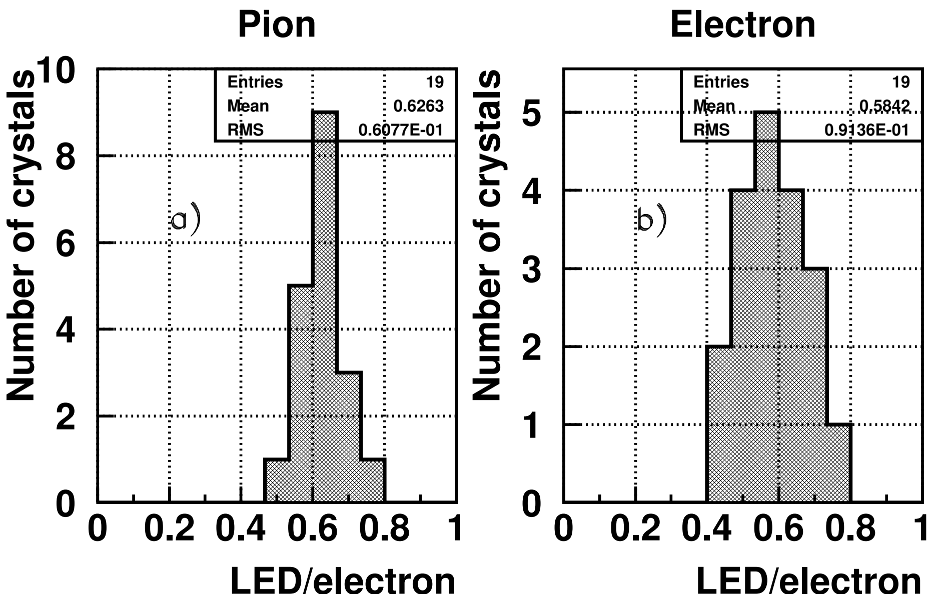

Рис. 2.17: Коэффициенты пропорциональности между относительными изменениями сигналов от электронов и синего светодиода, вычисленные для 19-ти кристаллов по результатам (a) - пионного и (b) - электронного облучений.

тельно, что все относительные изменения сигналов - как падение, так и рост - происходили вдоль одной прямой линии, которой фитировались экспериментальные точки. Прямая проходила через начальную точку 1:

$$1 - y = K(1 - x) \ , \tag{2.6}$$

где x и y - нормированные сигналы от электрона и светодиода, а K - коэффициент пропорциональности между их относительными изменениями. Как и предполагалось, в ограниченном промежутке времени хорошо работает линейная аппроксимация данной зависимости со значением $K = 0.59 \pm 0.03$ для выбранного кристалла. Коэффициенты пропорциональности, вычисленные для других кристаллов, представлены в виде распределения на Рис. 2.17(a). Среднее значение распределения оказалось равным $K = 0.63 \pm 0.06$.

2.3.2. Результаты электронного облучения

При облучении электронным пучком высокой интенсивности изменение световыхода кристаллов можно отследить по изменению положения электронного пика в процессе набора статистики. Таким образом, отпадает необходимость в калибровке низкоинтенсивным пучком, а сам процесс выглядит

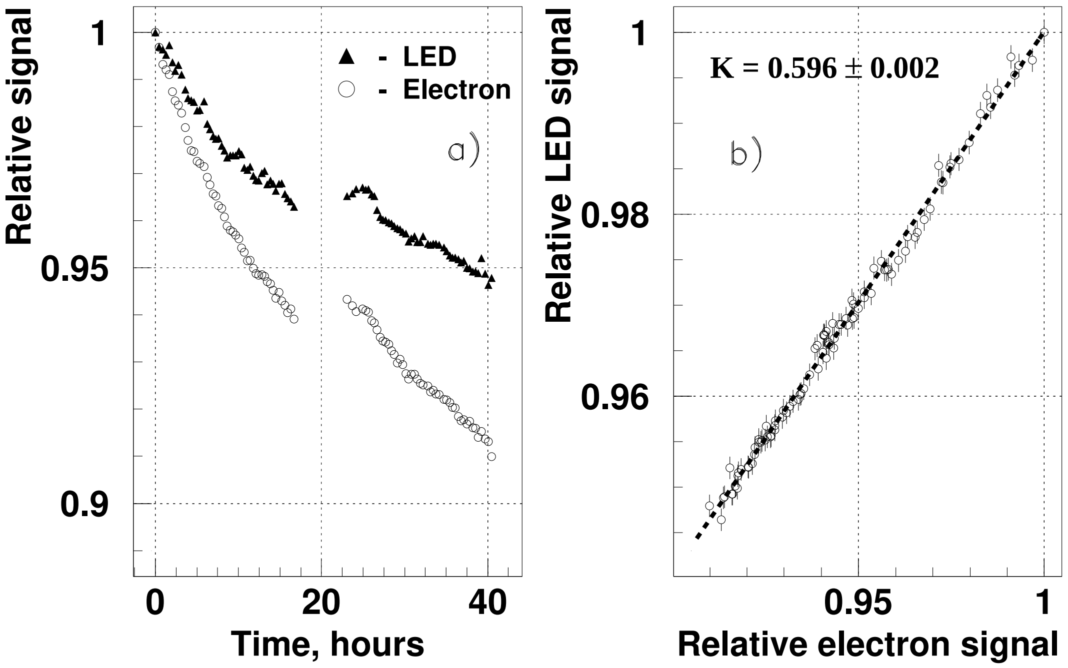

Рис. 2.18: (a) Поведение электронного сигнала (кружки) и сигнала от синего светодиода (треугольники) в одном из кристаллов сборки во время облучения электронным пучком со средней мощностью дозы 20 рад/ч и (b) зависимость между относительными изменениями этих же сигналов, профитированная линейной функцией с коэффициентом пропорциональности $K = 0.596 \pm 0.002$.

как калибровка по месту в реальном калориметре. Высокая интенсивность электронного пучка позволяла вычислять значения световыхода с хорошей статистической точностью в последовательные интервалы времени по 15 минут, что в конечном результате дало плавную картину изменения световыхода. Для каждого кристалла из группы 3×3 вычислялись средние значения сигналов, а стандартная процедура вычисления калибровочных коэффициентов обращением матрицы выполнялась не более, чем за 6 итераций.

На Рис. 2.18(a) показано поведение сигналов от электрона и светодиода при электронном облучении в том же кристалле, что и на Рис. 2.16. Средняя мощность дозы составляла 20 рад/ч. Оба сигнала отнормированы на свои начальные значения. В районе временной отметки 20 ч пучок отсутствовал, и кристалл восстанавливался, что выразилось в увеличении сигналов в первый момент после возобновления облучения. Зависимость между относительными изменениями сигналов от светодиода и электронов представлена на Рис. 2.18(b). Видно, что как и в случае пионного облучения, эта зависимость хорошо фитируется линейной функцией 2.6, но при этом коэффициент пропорциональности K определяется с гораздо лучшей точностью, $\pm0.3\%$, и составляет 0.596 ± 0.002. Это связано с тем, что при облучении электронами можно было следить за уменьшением прозрачности кристаллов прямо по набираемым данным, используя полное энерговыделение электрона в кристаллах и небольшую ширину электронного ливня. При облучении пионами такой возможности не было - большинство пионов проходили кристаллы насквозь, а адронные ливни, где они всё же были, обладали гораздо большей шириной, чем электронные. Поэтому точность определения коэффициента K на электронах на порядок лучше, чем на пионах.

Все полученные коэффициенты представлены в виде распределения на Рис. 2.17(b) со средним значением $K = 0.58 \pm 0.09$. Видно, что в пределах ошибок этот результат совпадает со средним значением K, полученным для тех же кристаллов при их облучении пионами.

Рис. 2.19(a) демонстрирует, насколько точно может быть выполнена коррекция энергии в отдельном канале калориметра с помощью стабильного сигнала от светодиода, если известно значение коэффициента пропорциональности K в формуле 2.6. Результаты, показанные на этом рисунке, отражают около 35 часов набора данных. Вычисленные в каждые 15 минут средние значения сигналов от электронов одинаковой энергии в данном канале прототипа калориметра отличались друг от друга из-за изменения прозрачности кристалла под действием облучения. Зная коэффициент пропорциональности для данной ячейки, оказалось возможным поправить полученные значения энергии на средние сигналы от светодиода, вычисленные в те же интервалы времени. Скорректированное нормированное значение энергии для данного канала прототипа представлено в виде гистограммы, профитированной распределением Гаусса с $\sigma = 0.2\%$.

На Рис. 2.19(b) показано распределение значений гауссовых σ, вычисленных по результатам коррекции энергии в 19-ти каналах прототипа. Среднее значение этого распределения оказалось равным 0.25 % с $RMS = 0.07$ %

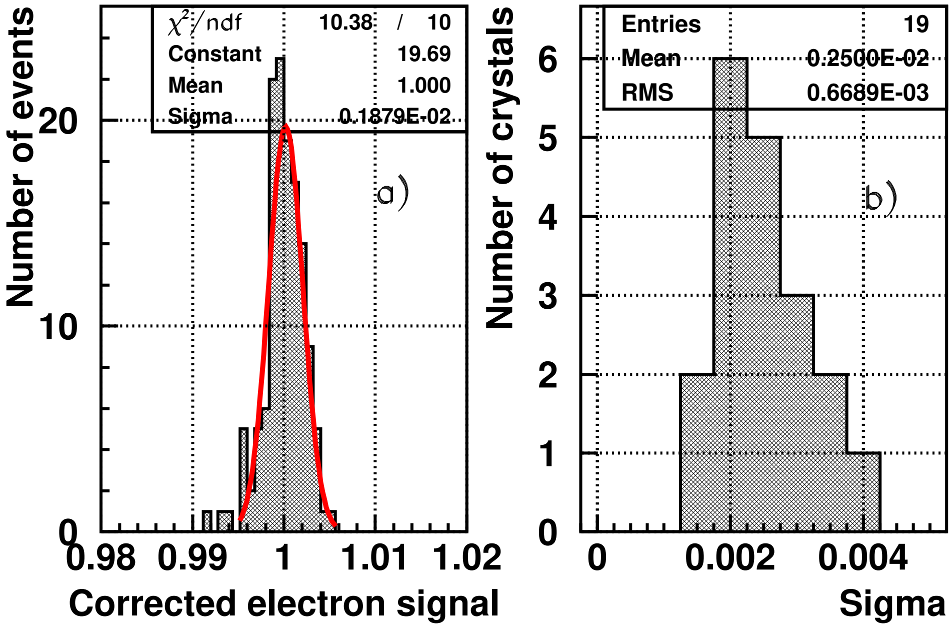

Рис. 2.19: (a) Средние нормированные значения сигналов от электронов в одном из кристаллов за каждые 15 мин электронного облучения в течение 35 часов после коррекции на сигналы от синего светодиода, профитированные распределением Гаусса с σ=0.2%. (b) Распределение гауссовых σ, вычисленных для 19-ти кристаллов по примеру (a).

Итак, главным результатом проведённых измерений стало доказательство наличия корреляции между изменениями сигналов от светодиода и электронов при облучении кристаллов пионными и электронными пучками высокой интенсивности. Было показано, что на ограниченных интервалах времени зависимости между относительными изменениями этих сигналов хорошо описываются линейными функциями. Средние значения распределений коэффициентов пропорциональности, вычисленных для группы кристаллов при пионном и электронном облучениях, совпали в пределах ошибок. При коррекции сигналов от электронов, полученных во время непрерывного облучения прототипа калориметра электронным пучком, на сигналы от синего светодиода, полученные в те же интервалы времени, достигнута средняя точность восстановления энергии 0.25 % для целой группы кристаллов, произведённых в Шанхае и Богородицке. Всё это позволило разработать простую процедуру поправок сигналов калориметра во время его работы в составе установки BTeV.

Глава 3. Прототип мониторной системы калориметра

После того, как было экспериментально доказано отсутствие нарушения сцинтилляционного механизма в кристаллах $PbWO_4$ для радиационных условий, при которых они должны были находиться в составе калориметра во время набора данных, установлено наличие корреляции между изменениями сигналов в ячейках калориметра от электронов и светодиода, а также показано, что мониторная система на светодиодах с требуемой долговременной стабильностью может быть создана на современной компонентной базе, был разработан, изготовлен и испытан на стенде прототип мониторной системы калориметра BTeV.

3.1. Обоснование выбора технического решения и компонентная база

Были рассмотрены два возможных варианта построения мониторной системы электромагнитного калориметра. Один из них подразумевал использование в качестве источников света лазеров, другой - светодиодов. В обоих случаях свет должен передаваться к кристаллам через оптические волокна.

Мониторная система на лазерах разработана и будет применяться в эксперименте CMS в ЦЕРНе. Это весьма сложная и дорогостоящая система, которая предназначена для мониторирования электромагнитного калориметра, состоящего из более чем 70000 кристаллов $PbWO_4$. В работе [27] показано, что применение лазерной системы мониторирования позволяет сохранять энергетическое разрешение калориметра на уровне 0.5 % для энергии 120 ГэВ. Недостатком системы, наряду с её высокой стоимостью, является сложность технической реализации и обслуживания. В отличие от CMS, калориметр BTeV должен был содержать "всего"около 10000 кристаллов, а использование фотоэлектронных умножителей, дающих лучшее, чем в системе "лавинный фотодиод + усилитель", отношение сигнал/шум, позволяло снизить требования к интенсивности мониторных световых сигналов до уровня, достижимого при использовании современных светодиодов.

Основные достоинства мониторной системы на светодиодах были перечислены в разделе 2.1.2. По этим критериям, а также по результатам анализа стабильности работы подобной системы в составе экспериментальной установки для изучения свойств кристаллов вольфрамата свинца было принято решение о создании мониторной системы калориметра BTeV со светодиодами в качестве источников света. Предполагалось изготовить четыре одинаковых мониторных модуля и расположить их по периметру калориметра. Это позволило бы использовать волокна меньшей длины и упростило бы их монтаж в установке.

Чтобы не усложнять систему, было решено не использовать ФЭУ для мониторирования стабильности светодиодов, как это было сделано в мониторной системе прототипа калориметра. Вместе с тем, для увеличения надёжности мониторирования предполагалось использовать несколько фотодиодов (до 4-х штук) на одну пару светодиодов.

При анализе причин, вызывающих нестабильность мониторной системы, было установлено, что главной является температурная зависимость её электронных компонентов. Было показано также, что температурные коэффициенты светодиодов и фотодиодов для некоторых длин волн могут иметь противоположные знаки, что в конечном счёте может привести к неправильным результатам при поправках на мониторный сигнал с фотодиода. Учитывая это, был проведён анализ параметров доступных на данный момент светодиодов и кремниевых фотодиодов. Наряду с температурными характеристиками при выборе светодиодов учитывалась их яркостная характеристика, а при выборе фотодиодов - их чувствительность в синей области спектра. В результате при изготовлении прототипа были использованы светодиоды фирмы Lumileds Lighting, США: синий (455 нм), LXHL-PR02, и красный

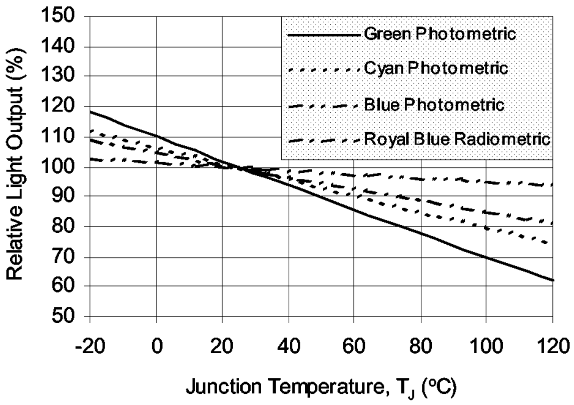

Рис. 3.1: Температурная зависимость светодиода Luxeon LXHL-PR02 (Royal Blue Radiometric) [28].

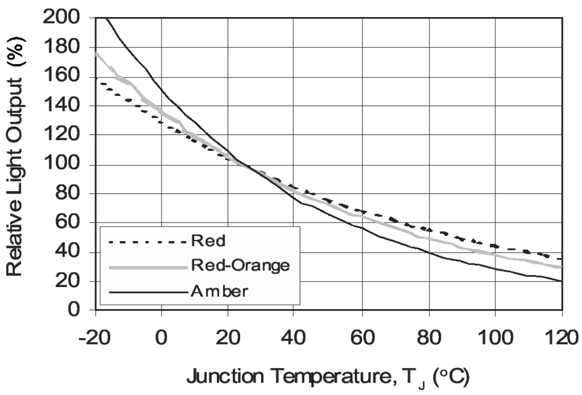

Рис. 3.2: Температурная зависимость светодиода Luxeon LXHL-PD01 (Red) [28].

Таблица 3.1: Основные технические параметры светодиодов, выбранных для использования в прототипе мониторной системы калориметра [28].

Характеристика светодиода	Синий (royal blue) LXHL-PR02	Красный LXHL-PD01
Тип	Luxeon V Emitter	Luxeon Emitter
Световой поток		44 лм (@350 мА)
Мощность светового потока	700 мВт (@700 мА)	
Диаграмма направленности	Ламбертиан	Ламбертиан
Конусный угол	150 градусов	140 градусов
Размер излучающей поверхности	5×5 мм^2	1.5×1.5 мм^2
Длина волны в максимуме спектра излучения	455 нм	627 нм
Ширина спектра излучения на полувысоте	20 нм	20 нм
Максимальный прямой ток	700 мА	350 мА

(625 нм), LXHL-PD01. Их температурные зависимости приведены на Рис. 3.1 и Рис. 3.2, а основные характеристики перечислены в Таблице 3.1 [28]. Эти светодиоды отличаются высокой надёжностью: фирма гарантирует среднее время наработки на отказ в режиме постоянного тока 100000 часов.

В качестве фотоприёмников, мониторирующих стабильность сигналов от светодиодов, было решено использовать кремниевые фотодиоды Hamamatsu S1226-5BQ с эффективной площадью рабочей области 5.7 мм^2. Данная площадь оказывается достаточной, чтобы использовать фотодиоды без усилителей - потенциальных источников нестабильности. При этом собственный темновой ток фотодиодов менее 50 пкА при напряжении обратного смеще-

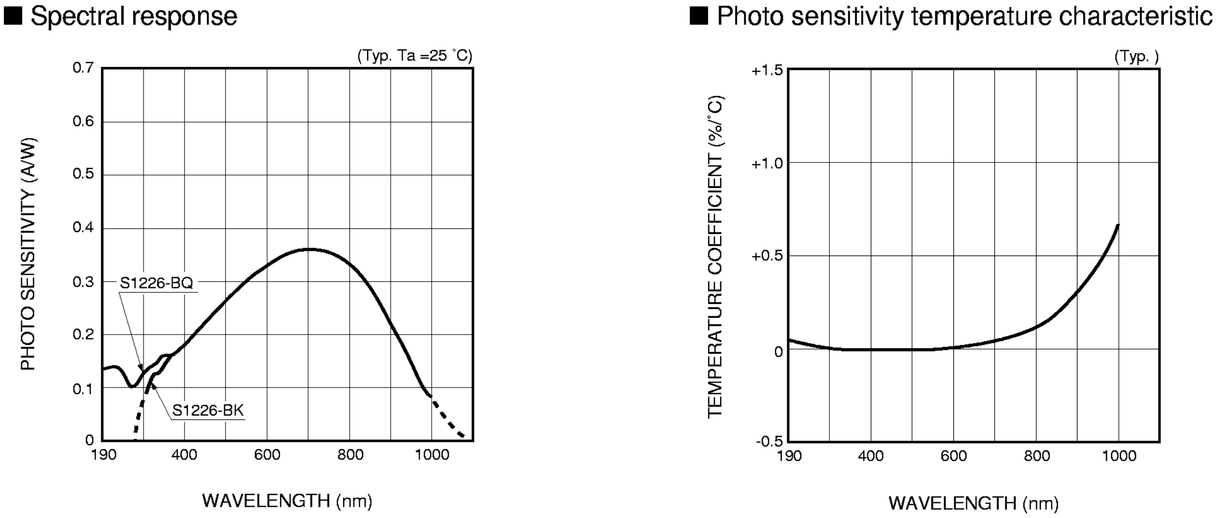

Рис. 3.3: Спектральная характеристика и температурная зависимость кремниевого фотодиода Hamamatsu S1226-5BQ [29].

ния 5 В. Их спектральная характеристика и температурная зависимость во всём рабочем диапазоне длин волн приведены на Рис. 3.3 [29].

Для передачи света от светодиодов к ячейкам калориметра планировалось использовать кварцевые волокна с высокой радиационной стойкостью в защитной оболочке. Такие волокна выпускаются, например, фирмой Polymicro Technologies, США [30]. Ниже перечислены основные параметры волокон типа FIL300330370, использовавшихся в прототипе:

- кварцевые керн и оболочка;
- алюминиевая защитная оболочка;
- диаметр керна - 270 мкм;
- внешний диаметр - 400 мкм;
- численная апертура - 0.22;
- пространственный угол захвата света - 25.4 °.

По данным измерений группы CMS ECAL, указанные волокна не меняют прозрачность при гамма-облучении с поглощённой дозой до 12 Мрад [31].

Со стороны светодиодов волокна собираются в жгут, торец которого предполагалось освещать через световод-смеситель (предпочтительно, кварцевый) с подходящим поперечным сечением квадратной формы. Применение световода-смесителя обусловлено необходимостью равномерной засветки одновременно жгута волокон и фотодиодов: последние предполагалось расположить по углам выходного окна смесителя.

3.2. Устройство прототипа

Структурная схема прототипа мониторной системы приведена на Рис. 3.4. В состав устройства входят:

- два генератора импульсов управления светодиодами;
- синий и красный светодиоды;
- диффузный отражатель света;
- световод-смеситель;
- два фотодиода;
- жгут волокон-световодов;
- система регулирования и стабилизации температуры;
- корпус из теплоизолирующего материала.

Важным техническим решением является размещение всех компонентов прототипа в теплоизолирующем корпусе, температуру внутри которого можно поддерживать на заданном уровне. Тем самым окончательно снимается проблема влияния поведения внешней температуры на стабильность системы. Чтобы не зависеть от внешней температуры, в систему стабилизации должны входить как нагреватели, так и охладители. Исходя из того, что в экспериментальном зале BTeV температура могла меняться слабо, было решено поддерживать внутреннюю температуру на уровне, незначительно превышающем внешнюю, т.е. использовать только нагреватель. Это превышение

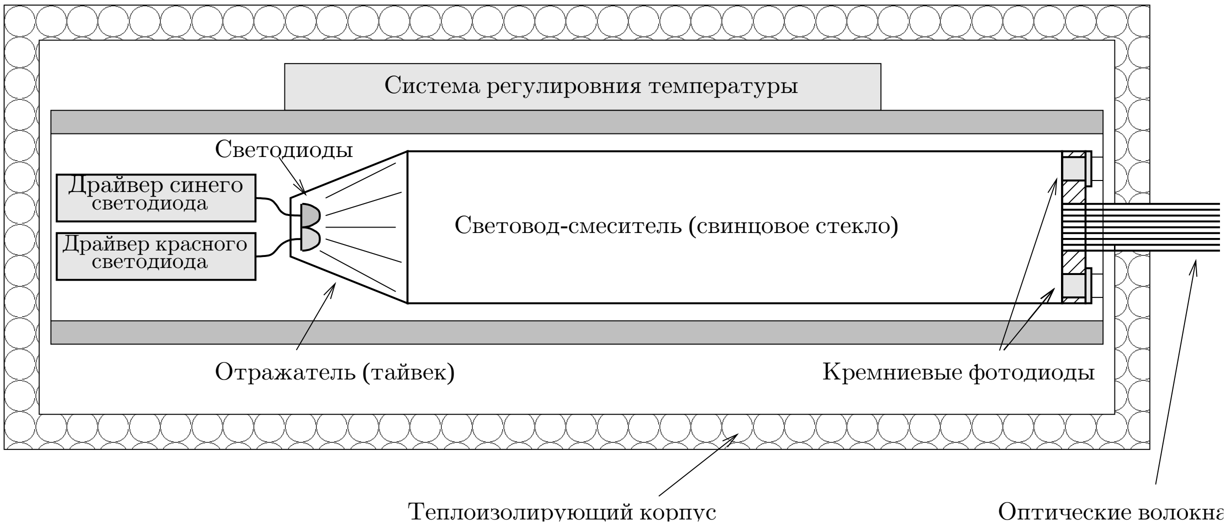

Рис. 3.4. Структурная схема прототипа мониторной системы калориметра.

может составлять всего 3-5 °C, что не требует больших энергозатрат с учётом малой величины корпуса.

Принципиальная схема устройства приведена в Приложении А на Рис. А.1. В качестве нагревателей были использованы четыре мощных биполярных транзистора и токоограничивающие резисторы, стоящие в их коллекторных цепях. Они были закреплены на общем алюминиевом швеллере, обеспечивающем короший отвод тепла и его равномерное распределение внутри корпуса. Швеллер, кроме того, служил для механического крепления всех компонентов прототипа, включая и печатную плату регулятора температуры. Температура транзисторов менялась при изменении их коллекторных токов. Их величина зависела от разности напряжения уставки и напряжения, определяемого сопротивлением термистора обратной связи. В стабильном состоянии эти напряжения равны. При уменьшении температуры внутри корпуса появляется рассогласование, приводящее к увеличению тока через транзисторы, а значит и к повышению температуры. Для работы устройства необходим источник постоянного напряжения 12 В с максимальным током до 1 А.

Генераторы импульсов, управляющие синим и красным светодиодами, одинаковые. Небольшое отличие имеется лишь в номиналах резисторов выходного каскада, вызванное различием в параметрах светодиодов. Базовая принципиальная схема генератора приведена в Приложении А на Рис. А.2. Генератор запускается внешним импульсом стандартной амплитуды (NIM), который преобразуется во входной цепи в импульс TTL. Этот сигнал поступает на схему формирования длительности. Сформированный импульс длительностью 50 нс через буфер управляет выходным транзисторным ключом, который на время импульса коммутирует светодиод с внешним источником постоянного напряжения. Требуемая интенсивность световой вспышки устанавливается регулировкой величины выходного напряжения этого источника, поэтому его стабильность очень важна. При изучении характеристик прототипа использовался блок питания Б5-9, максимальная нестабильность которого, по паспорту не превышает ± 0.2 % от величины установленного напряжения. В выходном каскаде использован мощный МДП-транзистор IRFIZ34E фирмы International Rectifier, США, обеспечивающий импульсный ток до 100 А при максимальном напряжении между стоком и истоком до 60 В [32]. Фотография модуля, состоящего из двух смонтированных печатных плат генераторов и предназначенного для размещения внутри корпуса прототипа, приведены на Рис. 3.5. Кроме упомянутого регулируемого источника напряжения, для работы генераторов требуется источник постоянного напряжения 6 В.

В прототипе использовался световод-смеситель из свинцового стекла размером $38 \times 38 \times 200$ мм^3, обёрнутый тайвеком. Единственным критерием выбора была доступность материала нужного размера: указанное поперечное сечение позволяет засвечивать одновременно четыре фотодиода и около 3000 волокон диаметром 0.4 мм, собранных в пучок. На входном окне световода-смесителя был зафиксирован диффузный отражатель света, сделанный из тайвека в виде квадратной пирамиды с основанием 38×38 мм^2. Высота пирамиды была оптимизирована по условию максимального захвата смесителем света от светодиодов, располагавшихся у её вершины, и составляла 35 мм. Опытным путём было установлено, что применение диффузного отражателя, в сравнении с зеркальным, увеличивает количество захватываемого смесите-

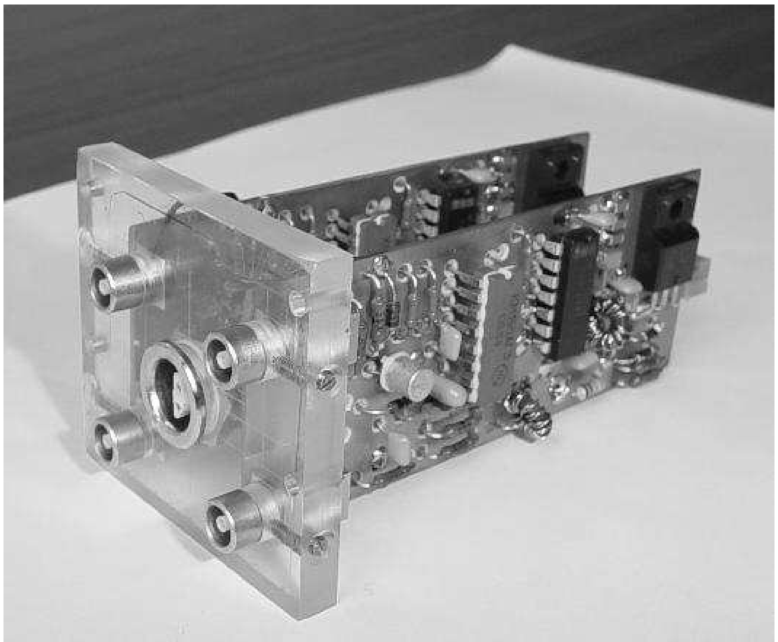

Рис. 3.5: Модуль, состоящий из двух смонтированных печатных плат генераторов управления светодиодами прототипа калориметра.

лем света. Смеситель в сборе со светодиодами располагался внутри корпуса рядом с генераторами, и светодиоды подсоединялись к генераторам короткими проводами.

Для крепления волокон к выходному окну смесителя использовалась пластина из пластика размером 38×38×10 мм^3. В сквозные отверстия, распределённые в центральной части пластины равномерно на площади диаметром 20 мм, были вклеены 50 волокон. Торцы волокон затем были отполированы в сборе вместе с пластиной. В двух противоположных углах пластины имелись отверстия, в которых фиксировались фотодиоды.

Фотография прототипа в сборе приведена на Рис. 3.6. После измерения технических характеристик на стенде в ИФВЭ прототип мониторной системы был перевезён во ФНАЛ, где вошёл в состав тестовой установки, аналогичной описанной в разделе 2.1.

3.3. Результаты тестовых испытаний

При исследовании технических характеристик прототипа мониторной системы была задействована система сбора данных экспериментальной уста-

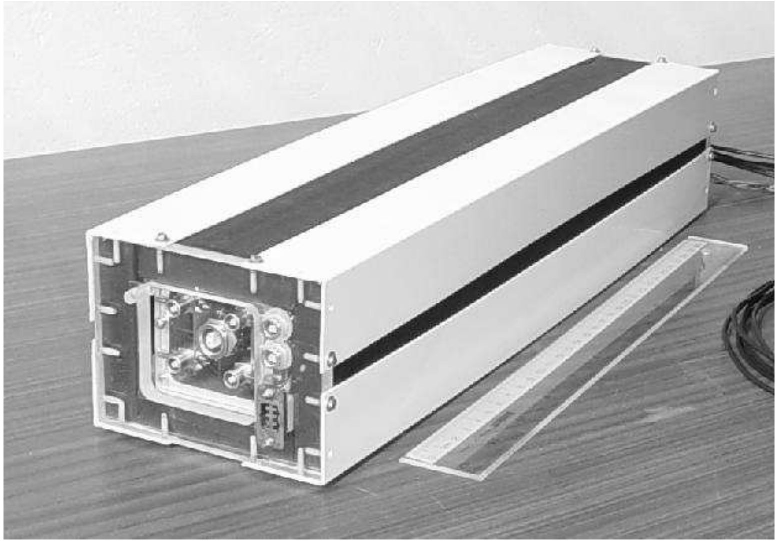

Рис. 3.6. Прототип мониторной системы калориметра в сборе.

новки для изучения свойств кристаллов вольфрамата свинца, адаптированная для этих измерений. В частности, вместо сигналов цикла У-70 использовались сигналы от задающего генератора, при этом длительность сброса устанавливалась минимальной, а частота следования была увеличена для более эффективного использования времени. Также, как и при работе с пучком, в интервалах между сбросами происходил запуск светодиодов и, соответственно, записывалась амплитудная информация с фотоприёмников, а также заносились данные с температурных датчиков. Два датчика располагались внутри корпуса прототипа, рядом со светодиодами и фотодиодами, и два - вне корпуса. Один из внешних датчиков измерял температуру окружающего воздуха, а другой был закреплён на корпусе ФЭУ, назначение которого описывается в разделе 3.3.1.

3.3.1. Распределение света по площади выходного окна светововода-смесителя

Одним из требований к мониторной системе было требование однородности засветки жгута волокон в пределах 20 %. Измерения проводились сканированием поверхности выходного окна световода-смесителя оптическим волокном. Источником света являлся синий светодиод. Другим своим концом

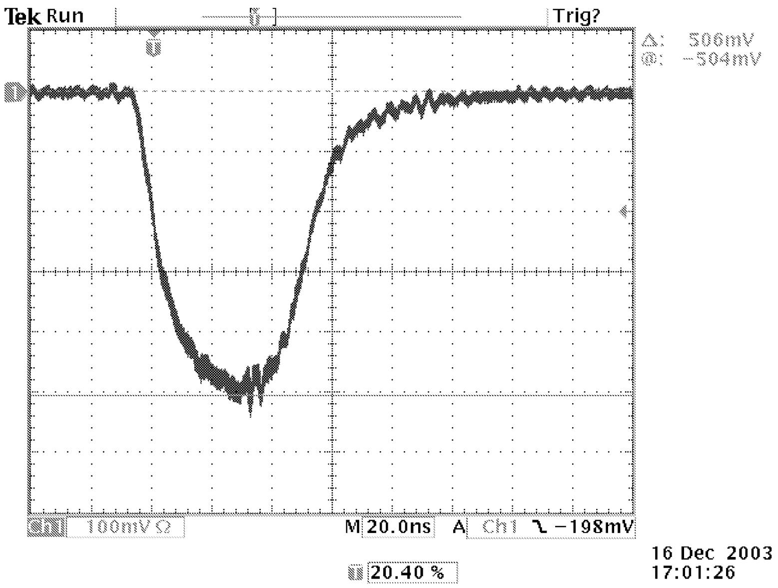

Рис. 3.7. Осциллограмма сигнала синего светодиода на аноде ФЭУ.

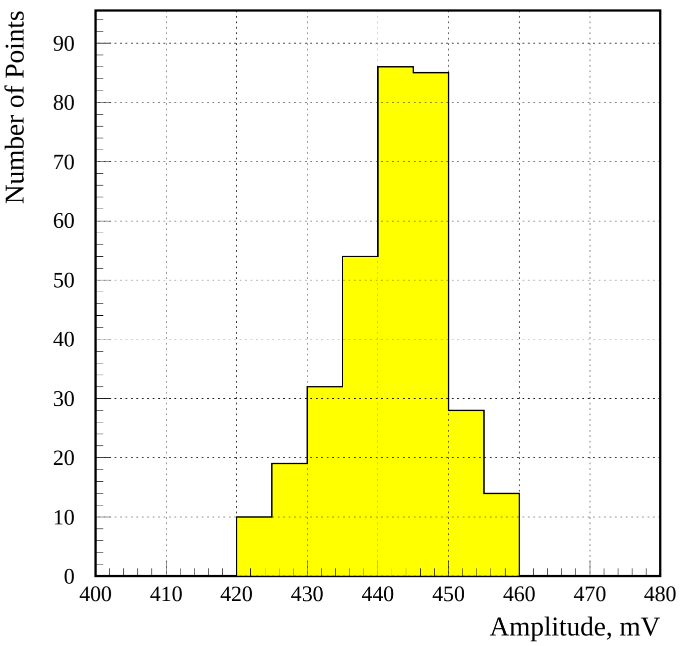

Рис. 3.8: Распределение амплитуд анодных сигналов ФЭУ от светодиода, измеренных осциллографом при сканировании выходного окна световода-смесителя оптическим волокном с шагом 2 мм по горизонтали и вертикали. Волокно освещало фотокатод ФЭУ через кристалл $PbWO_4$.

волокно было пристыковано к кристаллу $PbWO_4$, как это делалось в прототипе калориметра при тестах на пучке. Световой сигнал регистрировался фотоумножителем, который в паре с этим кристаллом составлял одну из ячеек прототипа. Амплитуды анодных сигналов ФЭУ измерялись осциллографом. Величина высокого напряжения на фотокатоде ФЭУ была установлена такой же, как и при работе в составе прототипа, таким образом было известно примерное соответствие амплитудной шкалы анодного сигнала шкале энергетической. Осциллограмма импульса с анода ФЭУ приведена на Рис. 3.7. Энергетический эквивалент составляет $\sim$ 20 ГэВ.

Перемещение волокна осуществлялось вручную с шагом 2 мм по вертикали и горизонтали. Результаты измерений представлены в виде распределения на Рис. 3.8. Полная ширина полученного распределения составляет 8 %, что удовлетворяет техническому требованию.

3.3.2. Температурная зависимость системы

Специальных точных измерений температурной зависимости не проводилось. Тем не менее, можно оценить температурную зависимость компонентов мониторной системы, используя результаты измерений при двух разных значениях температуры внутри корпуса: 27 °С и 45 °С. Анализировались амплитудные распределения сигналов фотоприёмников от синего и красного светодиода. Предполагалось, что температурные зависимости являются линейными в указанном диапазоне, и оценки коэффициентов получаются из соотношений $\Delta A/(A\Delta T)$, где ΔA - разность средних амплитуд при изменении температуры на величину ΔT=18°, A - среднее значение амплитуды при 27 °С.

Температура ФЭУ при этих измерениях оставалась постоянной, и по изменению средней амплитуды анодного сигнала при переходе от одного режима к другому были вычислены температурные коэффициенты для источников синего и красного света. Под источником света здесь подразумевается генератор и светодиод как единое целое. Аналогичные вычисления были сде-

Таблица 3.2: Измеренные температурные коэффициенты компонентов мониторной системы (%/°C при 27 °C). Под источником света здесь подразумевается генератор и светодиод как единое целое.

Длина волны	Источник света	Источник света + фотодиод	Фотодиод
455 нм	-0.64	-0.60	0.04
625 нм	-1.06	-0.81	0.25

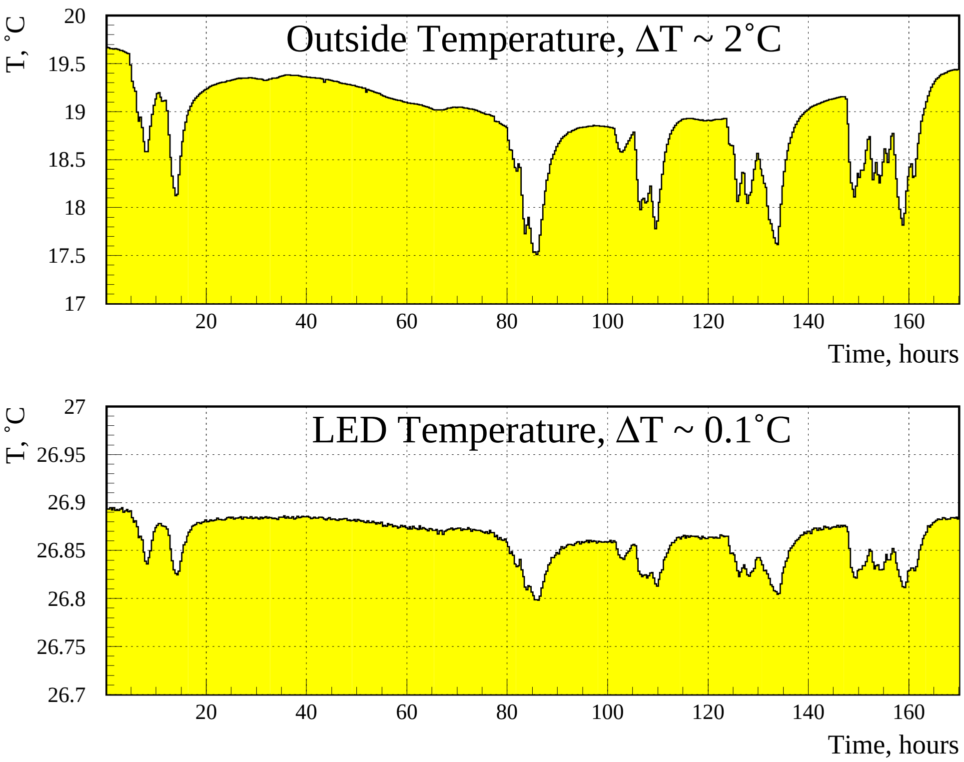

Рис. 3.9: Температурные флуктуации снаружи и внутри корпуса прототипа мониторной системы в период измерения его долговременной стабильности.

ланы и для сигналов с фотодиодов, которые, в отличие от ФЭУ, находились в одинаковых условиях с источниками света. Полученные при этом значения отличаются от первых на величину темературного коэффициента фотодиодов. Вычисленные по результатам измерений коэффициенты представлены в Таблице 3.2.

Видно, что температурные колебания внутри корпуса мониторной системы, $\Delta T = T_{max} - T_{min}$, не должны превышать 0.2 °C, чтобы её сигналы оставались стабильными с точностью до 0.2 %.

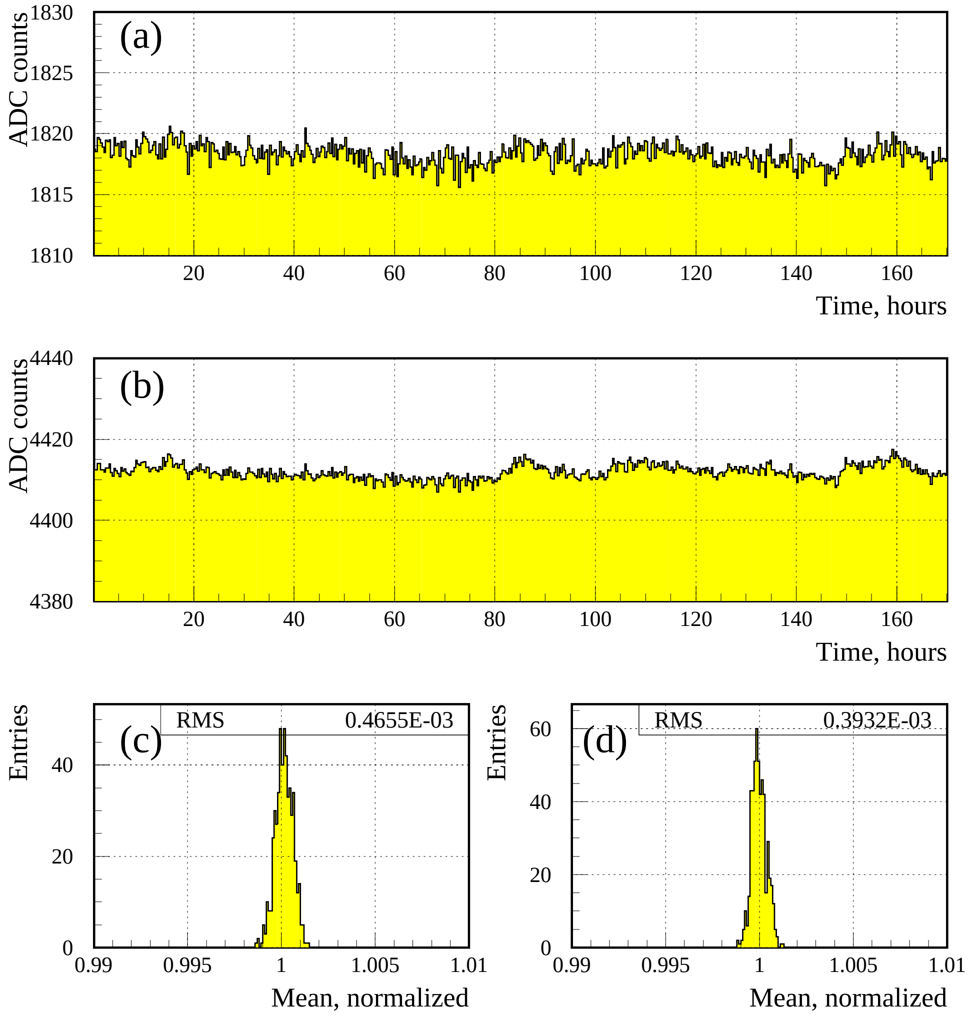

Рис. 3.10: Стабильность сигналов синего ((a) и (c)) и красного ((b) и (d)) светодиодов, измеренная одним из фотодиодов прототипа мониторной системы за неделю непрерывной работы.

3.3.3. Долговременная стабильность

Долговременная стабильность прототипа мониторной системы была оценена по результатам его непрерывной работы в течение недели. Процедура анализа стабильности была подробно описана в разделе 2.1.2.

На Рис. 3.9 показано, как менялась температура в период измерений. Как видно, форма температурных кривых, измеренных снаружи и внутри корпуса прототипа, практически одинаковая, а пределы их изменений существенно отличаются: внешняя температура менялась в диапазоне 2 °C, в то время как внутри термостабилизируемого корпуса её изменения составили всего лишь 0.1 °C.

Поведение сигналов от синего и красного светодиодов на выходе одного из фотодиодов приведено на Рис. 3.10 в виде временных диаграмм (a) и (b), а также в виде их нормализованных проекций на вертикальную ось (c) и (d). Сигналы во втором фотодиоде вели себя подобным образом. За неделю непрерывной работы нестабильность всех сигналов системы (RMS) не превышала 0.05 %, что с большим запасом удовлетворяет техническим требованиям к мониторной системе, диктуемым условиями эксперимента.

3.4. Возможные усовершенствования

Несмотря на то, что характеристики прототипа мониторной системы полностью удовлетворяют всем требованиям эксперимента, планировались некоторые доработки, без которых использование такого устройства в калориметре было бы не совсем удобно.

Во-первых, для работы мониторной системы необходимы, кроме регулируемого, источники фиксированного напряжения +6 В, +12 В. Использование стандартных блоков питания возможно, но гораздо удобнее, если в состав системы будет входить свой блок питания со всем набором необходимых напряжений.

Во-вторых, напряжение, отвечающее за интенсивность светового сигнала, должно регулироваться дистанционно, поэтому в состав блока питания необходимо включить логический модуль для связи с последовательным портом компьютера.

И, наконец, нет необходимости передавать по длинным кабелям аналоговые сигналы с фотодиодов в АЦП, как это делалось при тестах. Лучше на месте оцифровывать сигналы, что усилит помехозащищённость системы. Для этого планировалось разработать схему на базе интегральных компонентов микроконтроллера и АЦП, выбор которых в настоящее время достаточно велик.

Глава 4. Предварительная селекция кристаллов по радиационной стойкости как необходимое условие надёжного мониторирования калориметра

К любому многоканальному детектору частиц предъявляется требование однородности эффективности по всем каналам регистрации. Как правило, для сцинтилляционных детекторов это требование сводится к обеспечению одинакового световыхода во всех каналах, что контролируется на стадии изготовления детектора. Для электромагнитных калориметров требование однородности световыхода от ячейки к ячейке является также актуальным, поскольку при этом упрощается настройка детектора в целом. В случае калориметра на кристаллах $PbWO_4$ ситуация осложняется тем, что световыход не остаётся постоянным, а меняется в зависимости от мощности дозы, которую получает кристалл в процессе набора данных, причём каждый кристалл ведёт себя по-своему. Поэтому перед окончательной сборкой калориметра желательно провести предварительную селекцию кристаллов по радиационной стойкости, т.е. по величине падения сигнала при фиксированной мощности дозы. Кроме того, уже на этом этапе можно было бы предварительно сгруппировать кристаллы по величине коэффициента линейной аппроксимации взаимного изменения сцинтилляционного сигнала и сигнала от светодиода. Такой отбор улучшил бы условия непрерывного мониторирования световыхода кристаллов при их работе в составе калориметра, поскольку при его сборке можно было бы избежать локальных неоднородностей, т.е. большого разброса параметров кристаллов в соседних ячейках. Понятно, что не реально проводить подобную селекцию, облучая кристаллы пучками частиц от ускорителя, поскольку речь идёт о тысячах кристаллов, и стоимость таких измерений была бы чрезвычайно высока. С другой стороны эту работу можно было бы сделать с использованием радиоактивного источника гамма-квантов. Для этого необходимо показать, что по уровню радиационных повреждений кристалла от гамма-квантов можно судить о поведении этого же кристалла при его облучении заряженными частицами с той же мощностью дозы. Если это так, то значение радиационной стойкости кристалла можно занести в базу данных, как один из критериев оценки его качества, наряду со значениями световыхода, его однородности по длине кристалла и точностью геометрических размеров, т.е. всех тех параметров, которые должны удовлетворять определённым требованиям при приёмке кристаллов от производителя.

4.1. Сравнение радиационной стойкости кристаллов вольфрамата свинца под действием пионного и гамма-излучений

Калориметр BTeV должен был занимать пространство с радиусом 160 см с центром на оси пучка. Кристаллы при этом находились бы в разных радиационных условиях. Ожидавшееся распределение мощностей доз и поглощённых доз за год по всем кристаллам калориметра BTeV для светимости коллайдера 2×10^{32} см$^{-2}$с$^{-1}$ и времени экспозиции 10^7 с представлено в Таблице 4.1 [16].

Таблица 4.1: Ожидаемое распределение мощностей доз и поглощённых доз за год по всем кристаллам калориметра BTeV для светимости коллайдера 2×10^{32} см$^{-2}$с$^{-1}$ и времени экспозиции 10^7 с.

Относительное число кристаллов (%)	Поглощённая доза (крад/год)	Мощность дозы (рад/ч)
33	0.3 - 2	0.11 - 0.72
27	2 - 5	0.72 - 1.8
12	5 - 10	1.8 - 3.6
16	10 - 50	3.6 - 18
6.2	50 - 100	18 - 36
3.2	100 - 200	36 - 72
2	200 - 500	72 - 180
0.4	500 - 1000	180 - 360
0.2	1000 - 2000	360 - 720

Из таблицы видно, что для большинства кристаллов, ~72 %, средняя мощность дозы не должна была превышать 4 рад/ч. В то же время, значительная часть кристаллов калориметра облучалась бы с мощностью дозы до 36 рад/ч. Исходя из этих данных и для лучшей визуализации эффекта деградации световыхода кристаллов было решено производить облучение группы кристаллов пионным пучком с энергией 40 ГэВ и мощностями доз от 30 до 60 рад/ч. После естественного восстановления световыхода кристаллов, длившегося больше года при комнатной температуре, кристаллы облучались радиоактивным источником ^{137}Cs. При этом каждый кристалл облучался с той же мощностью дозы, что и на пучке.

Для изучения были взяты три богородицких и три шанхайских кристалла. Четыре кристалла имели геометрические размеры 27×27×220 мм^3, а два богородицких кристалла, изготовленные для калориметра CMS, при той же длине имели продольные сечения в форме трапеций с длинами оснований 27 мм и 29 мм. Облучение пионами и измерение световыхода первых четырёх кристаллов производилось в апрельском сеансе 2001 года, а двух последних - в апрельском сеансе 2002 года на экспериментальной установке канала 2Б. Измерения с радиоактивным источником производились в мае-июне 2003 года на специально созданной для этого установке.

4.1.1. Облучение пионами

Процедура пионного облучения кристаллов и мониторирования относительного изменения их световыхода была такая же, как при измерениях, описанных в разделе 2.3.1. Для каждого из кристаллов облучение происходило до момента, когда его световыход при выбранной мощности дозы практически переставал меняться, т.е. до так называемого состояния "насыщения". По достижении этого состояния мощность дозы увеличивалась и облучение продолжалось до нового "насыщения".

На Рис. 4.1 для каждого кристалла приведена зависимость относительного падения его световыхода в состоянии "насыщения"от мощности дозы, с которой облучался данный кристалл. Для удобства восприятия эксперимен-

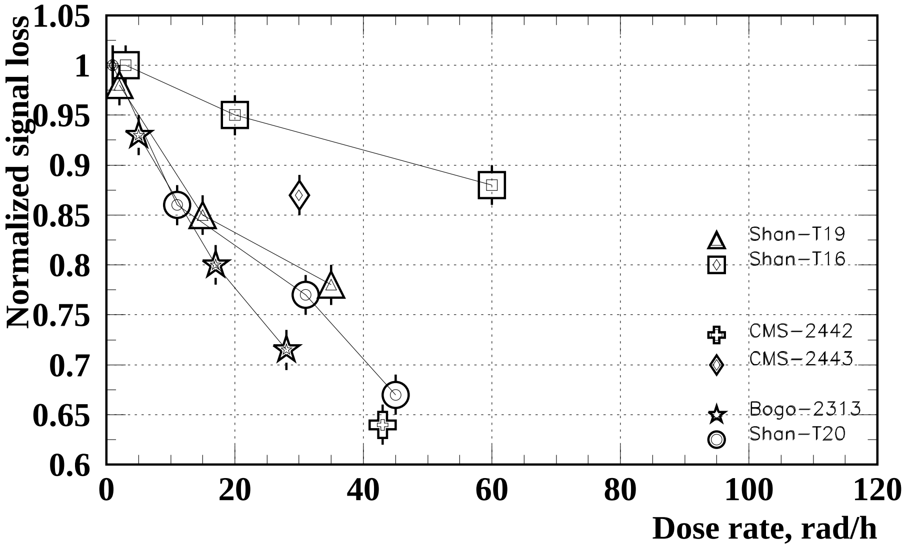

Рис. 4.1: Зависимость относительного падения световыхода кристаллов в состоянии "насыщения"от мощности дозы, с которой облучался каждый кристалл пучком пионов 40 ГэВ.

тальные точки, полученные при разных мощностях доз для одного и того же кристалла, соединены линиями. Два кристалла, CMS-2442 и CMS-2443, облучались лишь с одной мощностью дозы.

4.1.2. Облучение гамма-квантами

Облучение производилось радиоактивным источником гамма-квантов энергии 661 кэВ ^{137}Cs с активностью $5{\times}10^{12}$ Бк. В отличие от пионного облучения, кристаллы располагались так, чтобы их продольная ось находилась в поперечном направлении к потоку гамма-квантов. Было решено облучать каждый кристалл с мощностью дозы, совпадающей с её максимальным значением при облучении пионами. Требуемую мощность дозы можно было получить, меняя расстояние от источника до места расположения кристалла. Её значение в воздухе измерялось дозиметром ДКС-АТ1123, обеспечивающим точность измерения лучше 25 %. В результате были найдены расстояния, на которые каждый из кристаллов должен быть удалён от источника при об-

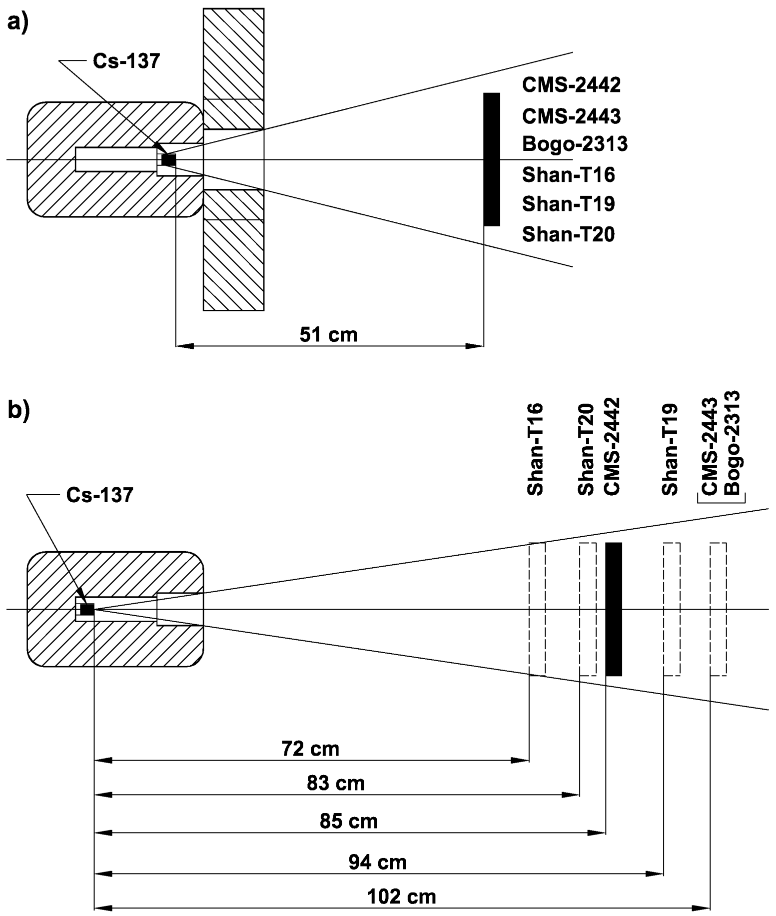

Рис. 4.2: Схема расположения кристаллов при гамма облучении с мощностью дозы (a) - 110 рад/ч и (b) - 30–60 рад/ч.

лучении, как показано на Рис. 4.2(b). После измерения световыхода и двухнедельного восстановления при комнатной температуре все кристаллы были повторно облучены с одинаковой мощностью дозы 110 рад/ч (Рис. 4.2(a)). Это облучение и последущее измерение световыхода кристаллов после него были предприняты с целью узнать, можно ли по результатам облучения с малыми мощностями доз предсказать, как поведут себя кристаллы при более высоких мощностях.

Ещё одним необходимым условием для сравнения влияния пионного и гамма облучений на световыход кристаллов является сходство продольного (т.е. по длине кристалла) и поперечного профилей мощности дозы. Для решения первой части задачи была расчитана и изготовлена свинцовая защита с переменной толщиной, которая закрывала часть кристалла при облучении, ослабляя мощность дозы. Для того, чтобы выровнять поперечный профиль,

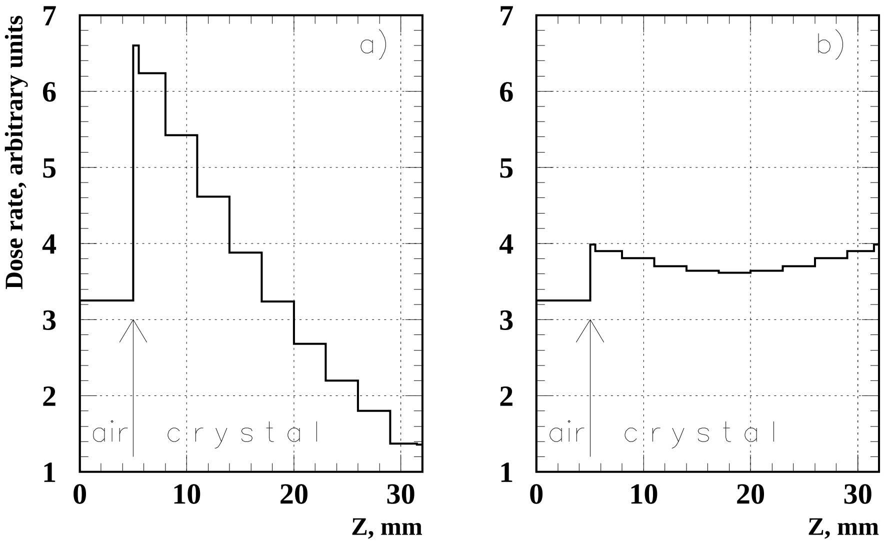

Рис. 4.3: Изменение мощности дозы по толщине кристалла при облучении его гамма-источником ^{137}Cs: (a) - боковое облучение неподвижного кристалла, (b) - боковое облучение кристалла, непрерывно вращающегося вокруг своей продольной оси. Расчёт программой ROZ-6 [33].

применялось вращение кристалла электродвигателем с постоянной скоростью на протяжении всего периода облучения. На Рис. 4.3 представлены результаты расчёта поперечного профиля мощности дозы программой ROZ-6 [33] для (a) - неподвижного и (b) - вращающегося кристалла. Видно, что при вращении кристалла распределение мощности дозы по толщине становится практически однородным. Результат расчёта той же программой продольного профиля мощности дозы в кристалле с учётом его вращения и применения свинцовой защиты показан на Рис. 4.4 штриховой линией. Сплошной линией на этом рисунке обозначен продольный профиль при пионном облучении, расчёт которого был выполнен программой MARS [20, 34]. Видно, что кривые практически совпадают.

После набора каждым кристаллом определённой поглощённой дозы он переносился из зоны облучения на специально созданный стенд для измерения световыхода, которое производилось токовым методом. Если по результатам измерений выяснялось, что световыход изменился слабо, по сравнению

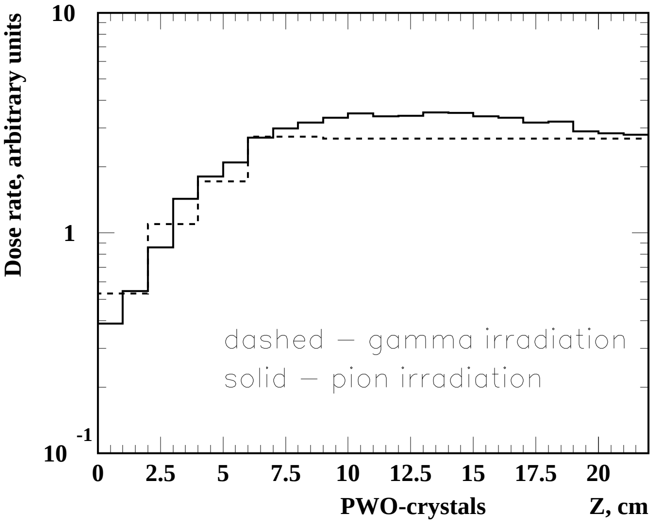

Рис. 4.4: Профиль дозы по длине кристалла при пионном (сплошная линия) и гамма (штриховая линия) облучениях. Положение фотоумножителя при измерениях световыхода - в районе Z=22 см. Расчёты выполнены программой MARS для пионного и ROZ-6 - для гамма облучения [20, 34, 33].

с предыдущим измерением, считали, что достигнуто "насыщение"и дальнейшее облучение кристалла не проводилось. В противном случае кристалл возвращался в зону облучения. Облучение с мощностью дозы 110 рад/ч проводилось непрерывно для каждого кристалла в течение 60-70 часов. При этом полагалось, что световыход выходил на "насыщение", поэтому он измерялся один раз по окончании цикла.

Измерения световыхода производились следующим образом. Сцинтилляционный свет, возбуждавшийся в кристалле радиоактивным источником ^{137}Cs с активностью 7×10^8 Бк, регистрировался фотоумножителем XP2020Q. Средний ток через анодную нагрузку 20 кОм измерялся 11-битным АЦП. Нелинейность данного ФЭУ в режиме измерения постоянного анодного тока составляет менее 1 % при катодном напряжении в диапазоне 1.2–2 кВ. При выбранном рабочем напряжение 1.5 кВ темновой ток ФЭУ был на уровне $\sim 2\times10^{-3}$ от средней величины сигнала. Фоновый ток, возникавший при облучении ФЭУ радиоактивным источником в процессе измерений, в худшем случае составлял $\sim 5\times10^{-3}$ от сигнала.

Кристаллы во время измерений были обёрнуты тайвеком, открытой оставалась лишь грань кристалла со стороны фотоумножителя. Оптическая замазка не применялась. Радиоактивный источник находился в свинцовом коллиматоре с диаметром отверстия 5.3 мм. Измерения тока производились в девяти точках, расположенных по длине кристалла с шагом 2 см, при этом расстояние от коллиматора до поверхности кристалла составляло 5 мм. Среднее по девяти измерениям значение тока использовалось для оценки относительного изменения световыхода кристалла. Перед измерением световыхода каждого нового кристалла производилась калибровка системы с использованием одного и того же необлучённого кристалла. По результатам этих калибровок было установлено, что повторяемость результатов, или систематическая ошибка, находилась в пределах 3 %. Она включала в себя, главным образом, температурную зависимость световыхода кристалла $PbWO_4$, поправка на которую не делалась. Тем не менее, температура во время измерений контролировалась: её изменения за весь период были в пределах 2 °C. Зависимость относительного изменения световыхода от поглощённой дозы при фиксированной мощности дозы для каждого из шести кристаллов представлена на Рис. 4.5. Видно, что световыход довольно быстро падал с ростом поглощённой дозы до 100-200 рад, после чего его падение заметно замедлялось, что указывало на "насыщение"кристалла.

На Рис. 4.6 приведены результаты относительного изменения световыхода кристаллов в состоянии "насыщения"в зависимости от мощности дозы. Видно, что при увеличении мощности дозы до 110 рад/ч не все кристаллы уменьшили свой световыход: у двух из них, CMS-2443 и Shan-T20, световыход практически не изменился. Примечательно, что эти кристаллы были получены от разных производителей. Кристалл Shan-T20, который являлся самым "нестойким"при облучении с мощностью дозы до 60 рад/ч, оказался более стойким, чем три других кристалла при её увеличении до 110 рад/ч.

Наконец, на Рис. 4.7 для каждого кристалла приведено отношение потерь сигналов в состоянии "насыщения"при его облучении пионами и гамма-

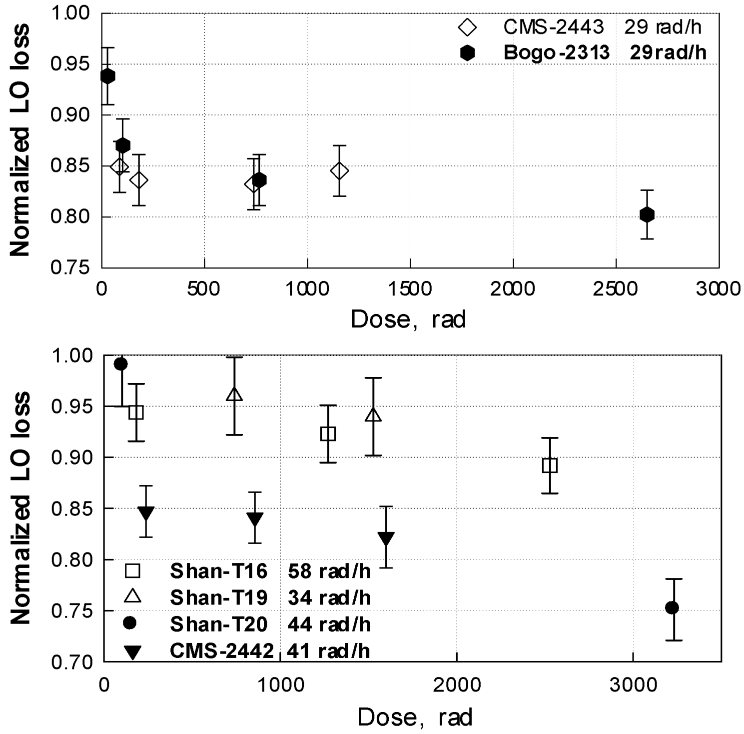

Рис. 4.5: Зависимость относительного изменения световыхода от поглощённой дозы при фиксированной мощности дозы от источника ^{137}Cs для каждого из шести кристаллов.

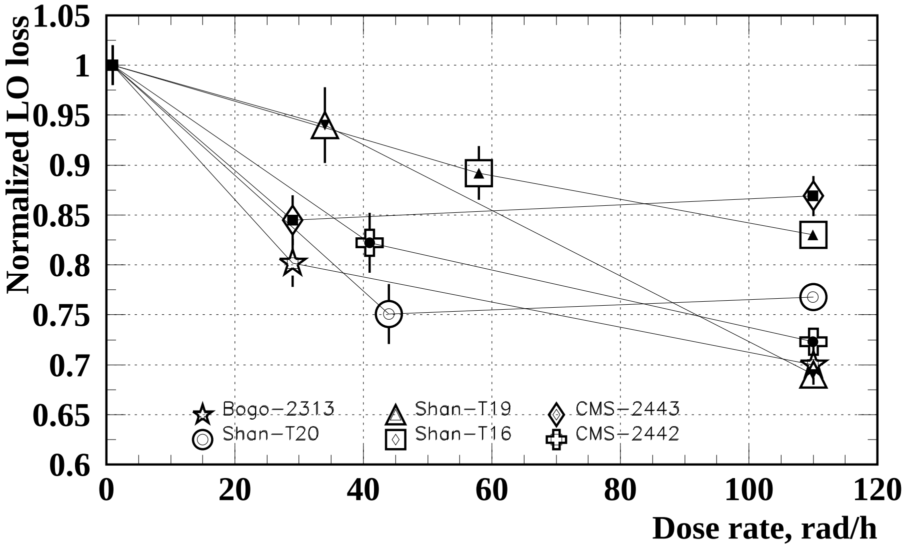

Рис. 4.6: Относительное изменение световыхода кристаллов, измеренного в состоянии "насыщения", в зависимости от мощности дозы при их облучении источником ^{137}Cs.

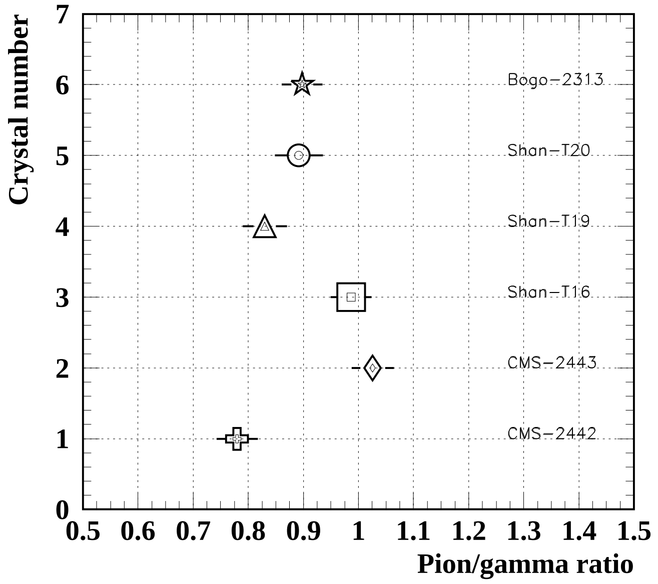

Рис. 4.7: Отношение потерь сигналов в состоянии "насыщения"при облучении кристаллов пионами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями и профилями доз.

квантами с одинаковыми мощностями доз. Полученные отношения не сильно отличаются от кристалла к кристаллу и лежат в диапазоне от 0.8 до 1. На основании этого можно сделать заключение, что облучение пионами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями доз дают схожий результат потери световыхода кристаллов. Это наблюдение позволяет проводить предварительную селекцию кристаллов по радиационной стойкости, облучая их радиационным источником. Мощность дозы при этом могла быть выбрана в пределах 60–100 рад/ч, что позволяло бы предсказать поведение ∼98 % от общего числа кристаллов калориметра BTeV при их работе в составе установки.

4.2. Прототип установки для тестов кристаллов с источником гамма-излучения

Описанный в предыдущем разделе метод измерения радиационной стойкости кристаллов с использованием радиоактивного источника является даже более трудоёмким, чем измерения на пучке. Тем не менее эти измерения позволили получить представление о соотношении радиационных повреждений в кристаллах, вызванных пионами и гамма-квантами. Естественно, что для измерения $\sim$10000 кристаллов процедура должна быть другая. В первую очередь, необходимо исключить перемещения кристаллов из зоны облучения для измерений световыхода и производить эти измерения на месте. Поскольку для облучения кристаллов применяется источник с высокой активностью, можно использовать токовый метод, регистрируя сцинтилляционный свет фотоумножителем, который следует защитить от излучения. В таком случае можно непрерывно наблюдать за изменением токового сигнала в процессе облучения. При таком подходе становится возможным облучать и измерять световыход одновременно нескольких кристаллов. Естественно, в состав установки должна входить мониторная система на светодиодах. Желательно также поддерживать стабильную температуру кристаллов в процессе облучения, но можно ограничиться её непрерывным измерением с последующим внесением поправок в результаты измерения световыхода.

Учитывая всё выше сказанное, был создан прототип установки для измерения радиационной стойкости кристаллов с использованием гамма-источника ^{137}Cs, на котором был проведён ряд измерений. Прототип располагался в градуировочном домике ОРИ в экспериментальном зале 1БВ. При измерениях была задействована система сбора данных экспериментальной установки для изучения свойств кристаллов вольфрамата свинца (см. раздел 2.1).

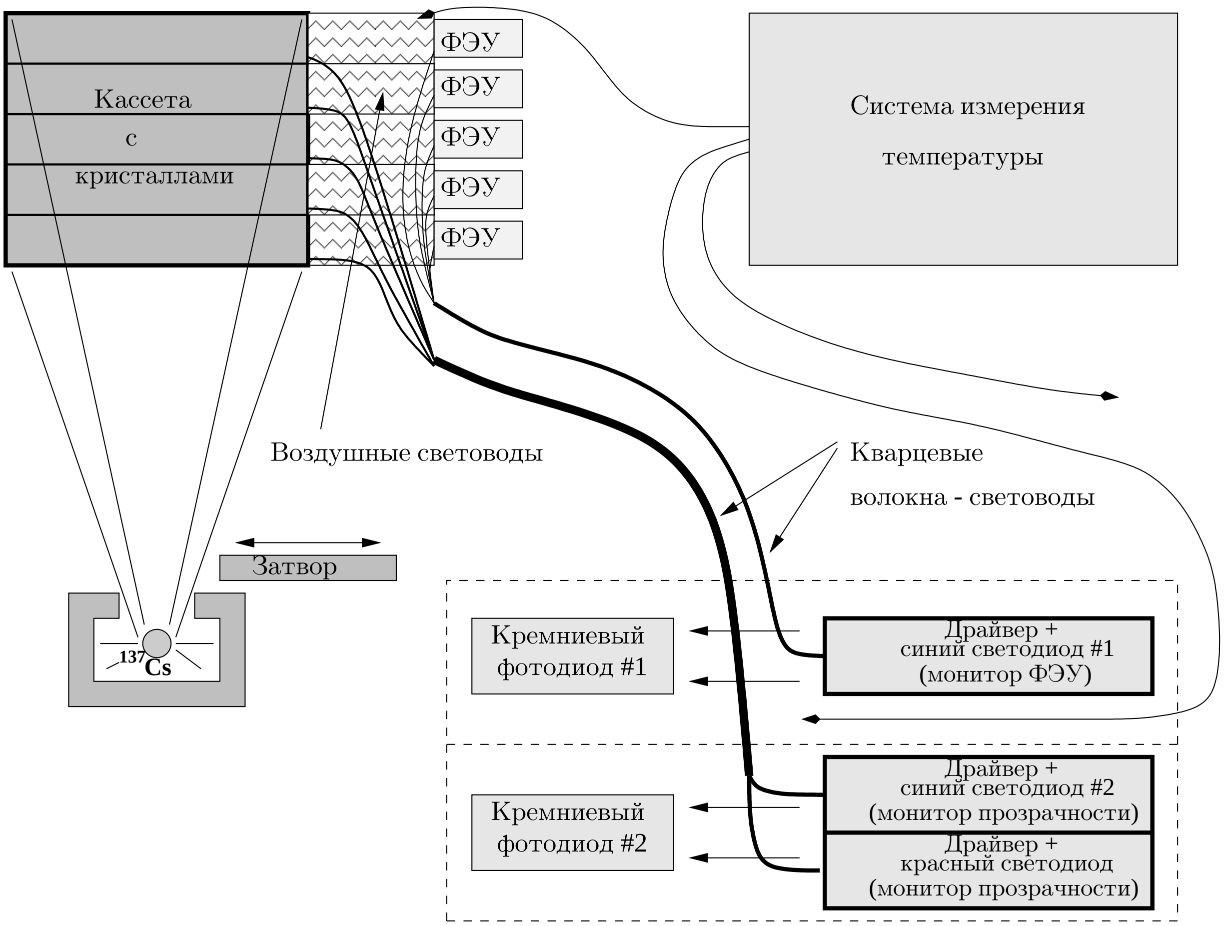

Рис. 4.8: Блок-схема прототипа установки для радиационного контроля качества кристаллов.

4.2.1. Технические возможности прототипа

Структурная схема прототипа установки (далее по тексту - установки) приведена на Рис. 4.8. В её состав входят:

- коллимированный источник ^{137}Cs с активностью 5×10^{12} Бк;
- сменная кассета для размещения пяти кристаллов;
- пять световодов в виде трубок длиной 10 см с зеркальной внутренней поверхностью;
- пять ФЭУ с делителями;
- мониторная система на светодиодах с оптическими волокнами и фотодиодами;
- система измерения температуры.

Установка позволяет одновременно облучать и измерять световыход пяти кристаллов. Мощность дозы облучения зависит от расстояния между источником и кассетой с кристаллами и может доходить до 100 рад/ч. Кроме того, предусмотрено мониторирование изменения прозрачности кристаллов не только синим, но и красным светодиодами, поскольку коэффициенты усиления ФЭУ контролируются отдельным синим светодиодом, свет от которого через оптические волокна попадает непосредственно на фотокатоды. Это позволяет производить прямые измерения отношения падений сигналов от синего и красного светодиода при облучении кристаллов, что является очень актуальным, поскольку максимально допустимое значение этой величины также регламентируется.

Таким образом, в мониторную систему входят три светодиода - два синих и один красный - со своими управляющими генераторами и три пучка оптических волокон для передачи света от светодиодов к кристаллам и фотокатодам. Стабильность светодиодов контролируется двумя фотодиодами:

один из них освещается попеременно синим и красным светодиодами, мониторирующими прозрачность кристаллов, а другой - только синим светодиодом, отвечающим за мониторирование коэффициентов усиления ФЭУ. В мониторной системе использованы компоненты и схемотехника, подробно описанные в Главе 3. Световоды-смесители и система стабилизации температуры в данной системе отсутствуют. Для питания генераторов был разработан блок питания с источником напряжения +6 В и двумя источниками регулируемого до +40 В напряжения для независимой настройки интенсивности вспышек красного и синего светодиодов. Регулировка напряжений осуществляется потенциометрами, но в будущем планировалось добавить схему управления для связи с компьютером, поскольку разработка этого блока питания являлась следующим шагом в создании мониторной системы калориметра BTeV. Следует ещё отметить и то, что в описываемой установке волокна пристыкованы к кристаллам со стороны ФЭУ, как это планировалось делать в калориметре, правда сами ФЭУ, во избежание ненужного облучения, отнесены от кристаллов на 10 см, и свет на фотокатоды собирается через воздушные зеркальные световоды. Тем самым длина пути, проходимого светом от светодиода в кристалле увеличивается по крайней мере в два раза, по сравнению со всеми предыдущими измерениями.

Фотоумножители с делителями и световодами представляют собой единый модуль, расположенный внутри светонепроницаемого корпуса из текстолита. Кристаллы, предназначенные для исследования, укладываются в специально разработанную кассету из аллюминия, которая затем по направляющим однозначно занимает своё место внутри того же корпуса. Тем самым обеспечена хорошая геометрическая повторяемость процедуры замены кристаллов. Всего имеется три сменных кассеты, что позволяет проводить измерения большого числа кристаллов практически без задержки.

Для выхода света с кристаллов в кассете предусмотрены круглые окна, по диаметру совпадающие с воздушными световодами. Кроме того, с той же стороны кассеты имеются пять небольших отверстий, через которые к кристаллам пристыковываются оптические волокна мониторной системы так, что свет от них попадает в угловые зоны торцов кристаллов.

Сам светонепроницаемый корпус закреплён на несущем алюминиевом профиле прямоугольного сечения. На корпусе установлены коаксиальные разъёмы для подсоединения пяти высоковольтных и пяти сигнальных кабелей. Кроме того, имеются отверстия для ввода жгутов оптических волокон мониторной системы. Мониторная система выполнена в виде единого модуля, который также крепится к несущему профилю. В целом конструкция позволяет легко менять мощность дозы облучения кристаллов и изучать однородность их световыхода по длине при наличии двухкоординатной системы перемещения.

Коллиматор радиоактивного источника выполнен таким образом, чтобы при фиксированном расстоянии до корпуса облучению подвергались только кристаллы. Тем не менее, перед корпусом устанавливается дополнительная свинцовая защита, закрывающая воздушные световоды, фотоумножители и оптические волокна.

Температурные датчики расположены в трёх точках: в районе кассеты с кристаллами (внутри корпуса, но в стороне от потока гамма-квантов), в районе светодиодов и в стороне от всей конструкции.

4.2.2. Результаты исследования кристаллов

На установке проводились сравнительные исследования кристаллов, произведённых в Богородицке, Шанхае и Апатитах. Главным образом, исследовались апатитские кристаллы, поскольку компания "Северные кристаллы"рассматривалась сотрудничеством BTeV как один из главных производителей кристаллов для калориметра.

Измерения проводились по следующему сценарию. Группа кристаллов, включавшая в себя двенадцать апатитских, два шанхайских и два богородицких кристалла, была предварительно изучена на предмет радиационной стойкости при облучении электронами на пучке в ноябре 2004 года. Кристал-

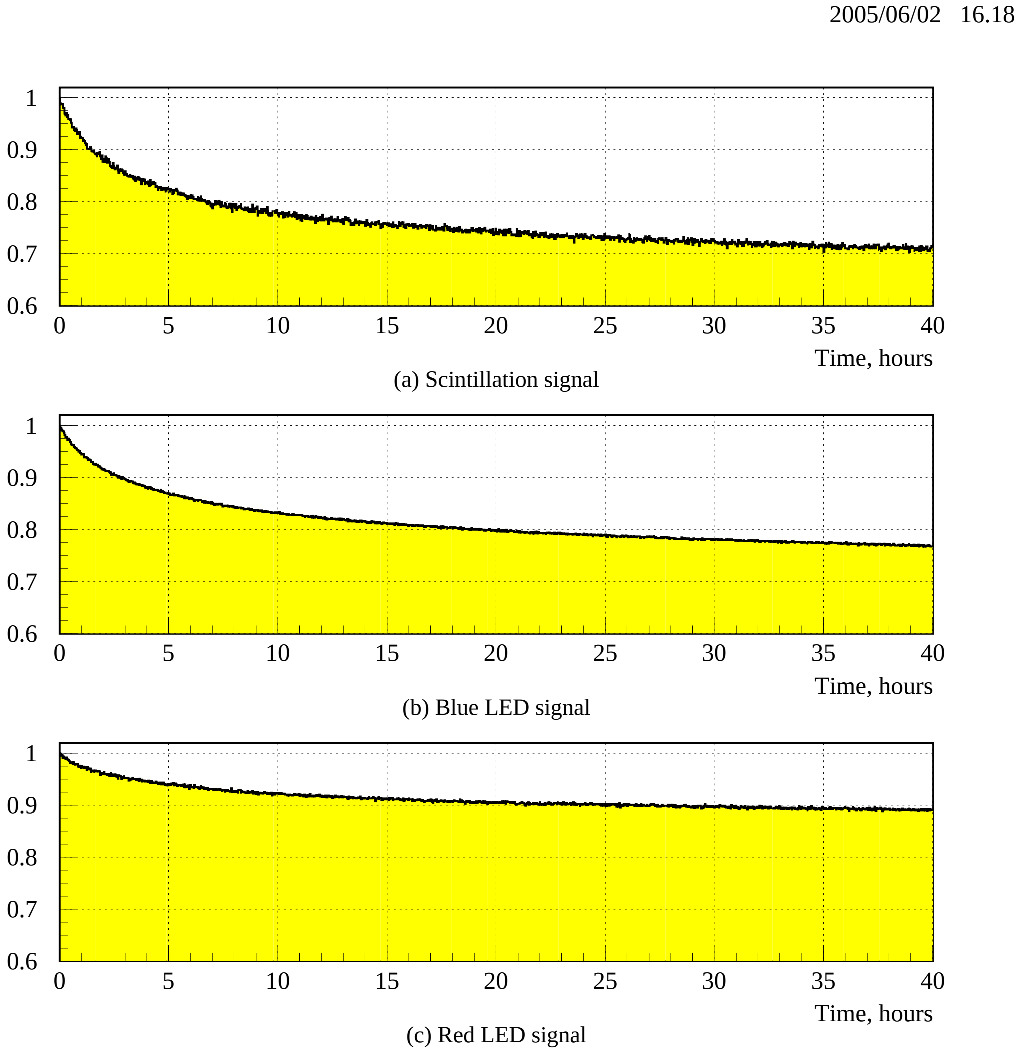

Рис. 4.9: Характерное поведение анодных сигналов ФЭУ с учётом поправок (см. в тексте) при облучении кристалла гамма-источником: (a) - сцинтилляционный сигнал; (b) - сигнал от синего светодиода, прошедший через кристалл (c) - сигнал от красного светодиода, прошедший через кристалл.

лы были разделены на четыре группы, состоящие из трёх апатитских и одного не апатитского кристаллов. Средняя мощность дозы при облучении кристаллов составляла около 20 рад/ч, а облучение каждой четвёрки происходило в течение $\sim$36 часов до состояния "насыщения"в изменении световыхода кристаллов. По результатам этого сеанса были получены значения относительного падения сигналов от электрона ("импульсный"метод) для каждого из 16-ти кристаллов, которые необходимо было сравнить со значениями относительного падения сигналов от гамма-квантов, измеренными токовым методом при той же мощности дозы, но с другим её продольным и поперечным распределением в кристалле. При наличии корреляции снимались бы все вопросы о применимости токового метода для селекции кристаллов по радиационной стойкости. (Измерения световыхода после гамма-облучения, представленные в разделе 4.1, также проводились токовым методом, однако в том случае радиоактивный источник был коллимирован.)

Измерения с гамма-источником были проведены в апреле 2005 года после восстановления кристаллов при комнатной температуре. Для удобства было решено облучать по четыре кристалла, сгруппированных, как при измерениях на пучке. Таким образом было произведено четыре цикла облучения. Система сбора данных была адаптирована для этих измерений аналогичным образом, как и во время тестов прототипа мониторной системы (см. раздел 3.3). Было задействовано семь каналов АЦП: пять каналов для измерения анодных сигналов ФЭУ и два - для сигналов с фотодиодов. С каждым тактом генератора, один раз в 6 секунд, записывалась следующая информация:

– 20 измерений пьедесталов АЦП (во всех каналах);

– 20 сигналов от синего светодиода, мониторирующего изменение прозрачности кристаллов (присутствовали во всех каналах ФЭУ и в канале соответствующего фотодиода);

– 20 сигналов красного светодиода (аналогично предыдущему);

– 20 сигналов синего светодиода, мониторирующего усиление фотоумножителей (аналогично предыдущему);

– показания термодатчиков;

– данные измерения высокого напряжения в каналах питания ФЭУ системой высоковольтного питания LeCroy 1440.

Из-за высокой интенсивности сцинтилляций в кристалле в анодной цепи ФЭУ возникал постоянный ток, изменявшийся вместе со световыходом кристалла. Для того, чтобы его измерить, длительность ворот АЦП (одинаковая для всех каналов) была увеличена до 1 мкс. Таким образом, при измерении пьедестала в канале АЦП, соединённом с ФЭУ, получали его смещённое значение, равное сумме значений собственного пьедестала данного канала АЦП и численного эквивалента анодного тока ФЭУ. Собственный пьедестал АЦП измерялся перед началом каждого цикла облучения при закрытом коллиматоре и затем вычитался при обработке данных из полученного при открытом коллиматоре смещённого пьедестала. В результате оставалось измеренное значение анодного тока.

Сигналы от всех светодиодов на анодах ФЭУ присутствовали на фоне постоянного тока, вызванного сцинтилляционным светом кристалла, и интегрировались в АЦП вместе с ним. При обработке данных чистые сигналы от светодиодов получались обычным образом: из полученной величины вычиталось измеренное значение смещённого пьедестала.

В целом обработка результатов велась также, как и при анализе долговременной стабильности мониторной системы, подробно описанном в разделе 2.1.2. Благодаря тому, что число запусков светодиодов и измерений пьедесталов было увеличено, по сравнению с набором данных на пучке, стало возможным вычислять средние значения интересующих сигналов за более короткие интервалы времени, не теряя статистической точности. На Рис. 4.9 показано характерное поведение токового сигнала и сигналов от светодиодов при облучении одного из кристаллов. Каждая точка на представленных гистограммах является средним значением в интервале 2 мин. Сигналы от всех светодиодов, измеренные ФЭУ, предварительно были скорректированы на показания фотодиодов. Все приведённые кривые получены с учётом поправки на коэффициент усиления ФЭУ, а сцинтилляционный сигнал был дополнительно скорректирован по температуре.

Для сравнения с результатами, полученными на пучке, для всех кристаллов были вычислены относительные изменения сцинтилляционных сигналов через 35 часов после начала облучения. На Рис. 4.10 показана корреляция между величинами относительного падения сигналов от электронов и гамма-квантов, полученная по 16-ти кристаллам. Как видно, кристаллы сильно отличаются друг от друга по радиационной стойкости, но именно благодаря этому обстоятельству оказалось возможным сделать вывод о правомочности применения описанного в данном разделе токового метода для её оценки.

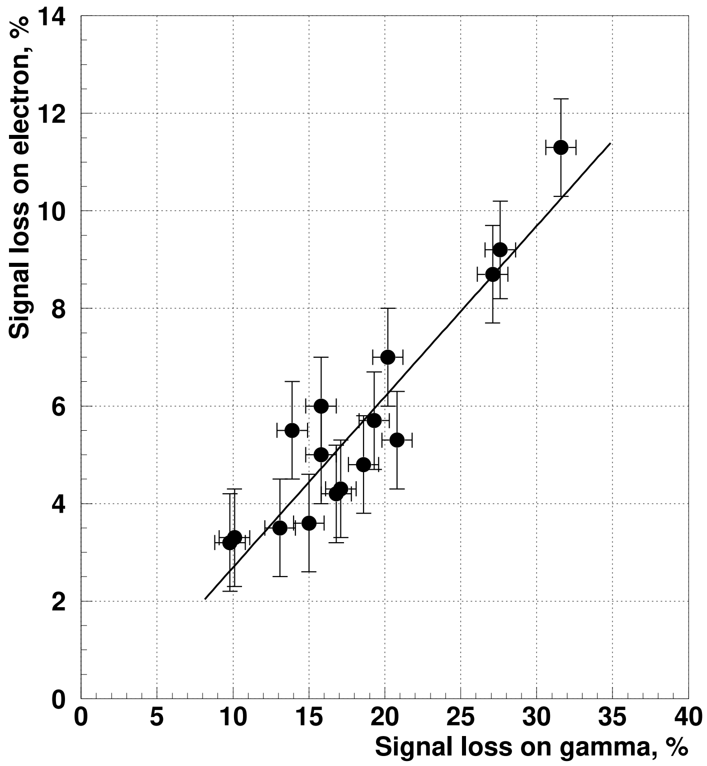

Рис. 4.10: Корреляция между величинами относительного падения сигналов от электронов и гамма-квантов после, соответственно, электронного и гамма облучения кристаллов с одинаковыми мощностями дозы.

Заключение

В рамках подготовки эксперимента BTeV в Фермилабе при решающем вкладе диссертанта было показано, что электромагнитный калориметр на основе сцинтилляционных кристаллов вольфрамата свинца и фотоумножителей можно непрерывно мониторировать во время набора статистики при помощи стабильной системы на светодиодах, тем самым сохраняя присущее данному типу калориметра высокое энергетическое разрешение. В диссертации описаны проведённые измерения, необходимые для доказательства применимости данного метода мониторирования, и методика анализа полученных результатов. Кроме того, приводится обоснование выбора компонентов мониторной системы калориметра, её устройство и результаты измерения параметров прототипа, разработанного и изготовленного при непосредственном участии диссертанта. Наконец, изложен метод непрерывного измерения относительного изменения световыхода одновременно группы кристаллов в процессе облучения радиоактивным источником, предложенный автором, описана установка, на которой проводились измерения и приведены экспериментальные доказательства возможности предварительной селекции кристаллов по радиационной стойкости. Основные результаты и выводы следующие.

1. Впервые проведены прямые измерения, доказавшие отсутствие нарушения сцинтилляционного механизма в кристаллах $PbWO_4$ при их облучении адронами с мощностями доз до ~ 20 рад/ч. Для десяти кристаллов, произведённых в Богородицке и Шанхае, получено, что изменений их световыхода из-за нарушения интенсивности сцинтилляций не наблюдается в пределах ошибки измерений ~ 0.5 % с уровнем достоверности 95 %. Таким образом, изменение световыхода кристаллов происходит практически полностью за счёт изменения их прозрачности, по край-

ней мере, для указанных мощностей доз облучения. Примерно 90 % всех кристаллов установки BTeV должны были находиться под воздействием радиации с меньшими мощностями доз, а значит изменение их световыхода можно было бы непрерывно мониторировать с помощью источника света с длиной волны в районе максимума их спектра высвечивания.

2. Было установлено наличие корреляции между изменениями сигналов от светодиода и электронов при облучении кристаллов пионными и электронными пучками высокой интенсивности и показано, что на ограниченных интервалах времени зависимости между относительными изменениями этих сигналов корошо описываются линейными функциями. Средние значения распределений коэффициентов пропорциональности, вычисленных для группы кристаллов по наклонам фитирующих прямых при пионном и электронном облучениях, совпали в пределах ошибок. Это позволяет разработать простую процедуру поправок результатов измерения энергии в промежутках между калибровками in situ при работе калориметра в составе установки BTeV. При коррекции сигналов от электронов на сигналы от синего светодиода во время непрерывного облучения прототипа калориметра электронным пучком достигнута средняя точность восстановления энергии 0.25 % для целой группы кристаллов, произведённых в Шанхае и Богородицке, что удовлетворяло техническим требованиям к калориметру BTeV.

3. По результатам анализа долговременной стабильности мониторной системы на светодиодах, применявшейся в экспериментальной установке для изучения свойств кристаллов вольфрамата свинца во время всех измерений на пучке, установлено:

   - имеющаяся мониторная система позволяет проводить долговременные измерения с точностью лучше,чем 1 %, при этом суточная нестабильность была на уровне 0.2 % RMS;

- главным источником нестабильности мониторной системы в анализируемый период были колебания температуры;
- данное схемотехническое решение могло быть применено для создания мониторной системы эксперимента BTeV при условии решения проблемы температурной нестабильности.

4. Предложен вариант секционированной мониторной системы калориметра BTeV на светодиодах с использованием четырёх одинаковых модулей генераторов импульсов синего и красного света, каждый из которых обеспечивал бы мониторирование до 3000 ячеек калориметра через жгут оптических волокон-световодов. С помощью синего светодиода предполагалось отслеживать изменение прозрачности кристаллов, а значит и их световыхода. Красный светодиод необходим для мониторирования нестабильности коэффициентов усиления ФЭУ. Разработан и изготовлен на современной компонентной базе прототип модуля мониторной системы. Измеренная однородность засветки жгута волокон составляет 8 % при требовании не хуже 20 %. Для уменьшения влияния внешней температуры на стабильность мониторных сигналов вся система размещена в термоизолированном корпусе с возможностью стабилизации температуры внутри него. При колебании внешней температуры в пределах 2 °C температура в районе светодиодов менялась не более, чем на 0.1 °C. Нестабильность мониторного сигнала для этих условий, измеренная фотодиодом, составила 0.05 % RMS за одну неделю непрерывных наблюдений. Полученный результат с большим запасом удовлетворяет требованиям по стабильности мониторной системы (0.2 %).

5. Проведены сравнительные измерения потерь световыхода кристаллов $PbWO_4$ при облучении пионами и гамма-квантами с одинаковыми профилями и мощностями доз (до 60 рад/ч). Для шести испытанных образцов кристаллов, полученных от разных производителей, отношения

потерь лежат в диапазоне от 0.8 до 1. На основании этого можно сделать заключение, что облучение пионами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями доз дают схожий результат потери световыхода кристаллов. Это наблюдение позволило обосновать возможность предварительной селекции кристаллов по радиационной стойкости с помощью радиоактивного источника.

6. Предложен метод непрерывного измерения относительного изменения световыхода кристаллов непосредственно в процессе их облучения гамма-источником с высокой активностью. Он основан на регистрации постоянного тока с анода ФЭУ, вызванного большой интенсивностью сцинтилляций в кристалле при облучении. Данное решение позволяет проводить измерения одновременно нескольких кристаллов, что очень важно, учитывая общее количество кристаллов, которое необходимо протестировать перед сборкой калориметра.

7. Проведены сравнительные измерения относительного падения световыхода кристаллов при их облучении электронами и гамма-квантами с одинаковыми мощностями доз, но разными их профилями. Методы измерения также были различными: при облучении электронами использовался обычный метод амплитудного анализа импульсов с анодов ФЭУ, а при облучении гамма-квантами использовался токовый метод. Получена чёткая корреляция между результатами двух измерений одних и тех же кристаллов, что доказывает правомочность применения токового метода для оценки радиационной стойкости кристаллов при их облучении гамма-источником.

В заключении автор хотел бы выразить благодарность научному руководителю дфмн А.Н.Васильеву за чёткую постановку задачи, активную поддержку и внимательное руководство. Автор признателен членам сотрудничества BTeV: Фермилабу, Сиракузскому Университету и Университету Миннесоты за предоставленные электронику для системы сбора данных и исследуемые кристаллы $PbWO_4$, а также лично руководителям проекта BTeV Д. Батлеру, Ш. Стоуну и Ю. Куботе за плодотворное сотрудничество, интересные идеи и критические замечания при проведении измерений, обработке результатов и подготовке публикаций. Кроме того, автор благодарен за неоценимую помощь в подготовке измерений, наборе статистики и анализе данных всей группе ИФВЭ в BTeV: В.А. Батарину, Ю.М. Гончаренко, В.Н. Гришину, А.М. Давиденко, А.А. Деревщикову, В.А. Качанову, А.С. Константинову, В.А. Кормилицыну, В.И. Кравцову, В.С. Луканину, Ю.А. Матуленко, Ю.М. Мельнику, А.П. Мещанину, Н.Г. Минаеву, Н.Е. Михалину, Д.А. Морозову, В.В. Мочалову, Л.В. Ногач, В.А. Пикалову, Л.Ф. Соловьеву, А.В. Узуняну, В.Ю. Ходыреву, К.Е. Шестерманову, Ю. Ярбе и А.Е. Якутину, а также коллегам по работе А.М. Горину, В.Г. Лапшину и В.И. Рыкалину за полезные консультации.

Литература

1. V.A. Batarin, J. Butler, T.Y. Chen, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, V.A. Kormilitsin, Y. Kubota, Y.A. Matulenko, V.A. Medvedev, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhalin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.
   LED monitoring system for the BTeV lead tungstate crystal calorimeter prototype./ Nucl. Instrum. and Meth. A534 (2004) 486-495.

2. V.A. Batarin, J. Butler, T.Y. Chen, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, V.Y. Khodyrev, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.S. Lukanin, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhalin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.
   Comparison of radiation damage in lead tungstate crystals under pion and gamma irradiation./ Nucl. Instrum. and Meth. A530 (2004) 286-292.

3. V.A. Batarin, J. Butler, T.Y. Chen, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, V.A. Kormilitsin, Y. Kubota, V.S. Lukanin, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhalin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev,

A.E. Yakutin, J. Yarba.
Study of possible scintillation mechanism damage in $PbWO_4$ crystals after pion irradiation./ Nucl. Instrum. and Meth. A540 (2005) 131-139.

4. V.A. Batarin, J. Butler, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, A.S. Konstantinov, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.S. Lukanin, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhalin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.
Correlation of beam electron and LED signal losses under irradiation and long-term recovery of lead tungstate crystals./ Nucl. Instrum. and Meth. A550 (2005) 543-550.

5. V.A. Batarin, J. Butler, A.M. Davidenko, A.A. Derevschikov, Y.M. Goncharenko, V.N. Grishin, V.A. Kachanov, V.Y. Khodyrev, A.S. Konstantinov, V.A. Kormilitsin, V.I. Kravtsov, Y. Kubota, V.S. Lukanin, Y.A. Matulenko, Y.M. Melnick, A.P. Meschanin, N.E. Mikhalin, N.G. Minaev, V.V. Mochalov, D.A. Morozov, L.V. Nogach, A.V. Ryazantsev, P.A. Semenov, V.K. Semenov, K.E. Shestermanov, L.F. Soloviev, S. Stone, A.V. Uzunian, A.N. Vasiliev, A.E. Yakutin, J. Yarba.
Design and performance of LED calibration system prototype for the lead tungstate crystal calorimeter/ Nucl. Instrum. and Meth. A556 (2006) 94-99.

6. A. Kulyavtsev, et al. Proposal for an Experiment to Measure Mixing, CP Violation and Rare Decays in Charm and Beauty Particle Decays at the Fermilab Collider - BTeV, May 2000;
G.Y. Drobychev et al., Update to Proposal for an Experiment to Measure Mixing, CP Violation and Rare Decays in Charm and Beauty Particle

Decays at the Fermilab Collider - BTeV, March 2002.
http://www-btev.fnal.gov/cgi-bin/public/DocDB/ShowDocument?docid=316 .

7. D. Autiero, et al. A high stability light emitting diode system for monitoring lead glass electromagnetic calorimeters./ Nucl. Instrum. and Meth. A372 (1996), 556.

8. Blick A.M., et al. Test of a LED monitoring system for the PHOS spectrometer: IHEP Preprint 99-50.- Protvino, 1999.

9. F. Ghio, et al. The GRAAL high resolution BGO calorimeter and its energy calibration and monitoring system./ Nucl. Instrum. and Meth. A404 (1998), 71-86.

10. O. Buyanov, et al. Beam studies of EM calorimeter prototype built of $PbWO_4$ Crystals: IHEP Preprint 93-144.- Protvino, 1993; Published in Proceedings of Calorimetry in High Energy Physics, 1993, La Biodola, Italy, pp.292-300.

11. O.V. Buyanov, et al. A first electromagnetic calorimeter prototype of $PbWO_4$ crystals./ Nucl. Instrum. and Meth. A349 (1994), 62-69.

12. CMS, The Electromagnetic Calorimeter Project Technical Design Report: CERN/LHCC 97-33, CMS TDR 4 (1997).

13. ALICE, Technical Design Report of the Photon Spectrometer (PHOS): CERN/LHCC 99-4, ALICE TDR 2 (1999).

14. http://www.ep1.rub.de/∼panda/auto/det/_home.htm .

15. R.J. Yarema, et al. A fast wide range charge integrator and encoder ASIC for photomultiplier tubes: FERMILAB-PUB-92-311 (1992).

16. The BTeV Detector Technical Design Report, December 2004.
http://www-btev.fnal.gov/cgi-bin/public/DocDB/ShowDocument?docid=2115 .

17. E. Auffray. Results on different measurements on Endcap crystals (2368-2467) made in RC CERN/lab27: CERN, CMS, in: Minutes of the Detector Performance Group meeting on June 11, 2002.
E.Auffray, et al. Comparison of different irradiation procedures for recently optimized russian $PbWO_4$ crystals: CERN, CMS NOTE 98/069 (1998).

18. V.A. Batarin, et al. Development of a momentum determined electron beam in the 1–45 GeV range./ Nucl. Instrum. and Meth. A510 (2003), 211-218.

19. V.A. Batarin, et al. Precision measurement of energy and position resolutions of the BTeV electromagnetic calorimeter prototype./ Nucl. Instrum. and Meth. A510 (2003), 248-261.

20. V.A. Batarin, et al. Study of radiation damage in lead tungstate crystals using intense high-energy beams./ Nucl. Instrum. and Meth. A512 (2003), 488-505.

21. G.A. Alexeev, et al. Proc. 5th Int. Conf. on Calorimetry in High Energy Physics, La Biodola, eds. H.A. Gordon and D. Rueger (World Scientific, Singapore, 1994) p. 97; Beam test results of a $PbWO_4$ crystal calorimeter prototype./ Nucl. Instr. and Meth. A364 (1995) 307-310.

22. V.A. Kachanov, et al. Light source for energy stabilization of calorimetric detectors based on photodetectors./ Nucl. Instrum. and Meth. A314 (1992), 215-218.

23. http://www.us.kingbright.com .

24. A.A. Annenkov, et al. Lead tungstate scintillation material./ Nucl. Instr. and Meth. A 490 (2002) 30-50.

25. R.Y. Zhu. Radiation damage in scintillating crystals./ Nucl. Instr. and Meth. A 413 (1998) 297-311.
N. Gender. Studies of $PbWO_4$ Crystals and Construction and Tests of a Compact Crystal Calorimeter for ZEUS: Dissertation. DESY-thesis-00-024, May 2000.

26. R.Y. Zhu, частная беседа.

27. E. Auffray, et al. Beam tests of lead tungstate crystal matrices and a silicon strip preshower detector for the CMS electromagnetic calorimeter./ Nucl. Instrum. and Meth. A412 (1998), 223-237.

28. http://www.luxeon.com .

29. http://usa.hamamatsu.com .

30. http://www.polymicro.com .

31. Vasken Hagopian. Radiation damage of quartz fibers: CMS CR 1999/002; Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, Volume 78, Issues 1-3, August 1999, P. 635-638.

32. http://www.irf.com .

33. A.V. Averin, A.M. Voloschenko, E.P. Kondratenko, et al. The ROZ-6 One-Dimensional Discrete Ordinates Neutrons, Gamma-Rays and Charged Particles Transport Code./
Proc. Int. Topical Meeting on Advaces in Mathematics, Computations and Reactor Physics, Pittsburgh USA, 1991, vol.5.

34. I. Azhgirey, I. Kurochkin, V. Talanov. Development of MARS code package for radiation aspects of electronuclear installations design./ Proceedings of the 15th Conference on Charged Particles Accelerators, Protvino, 22-24 October, 1996, 74.

Список иллюстраций

Список таблиц

Приложение А.

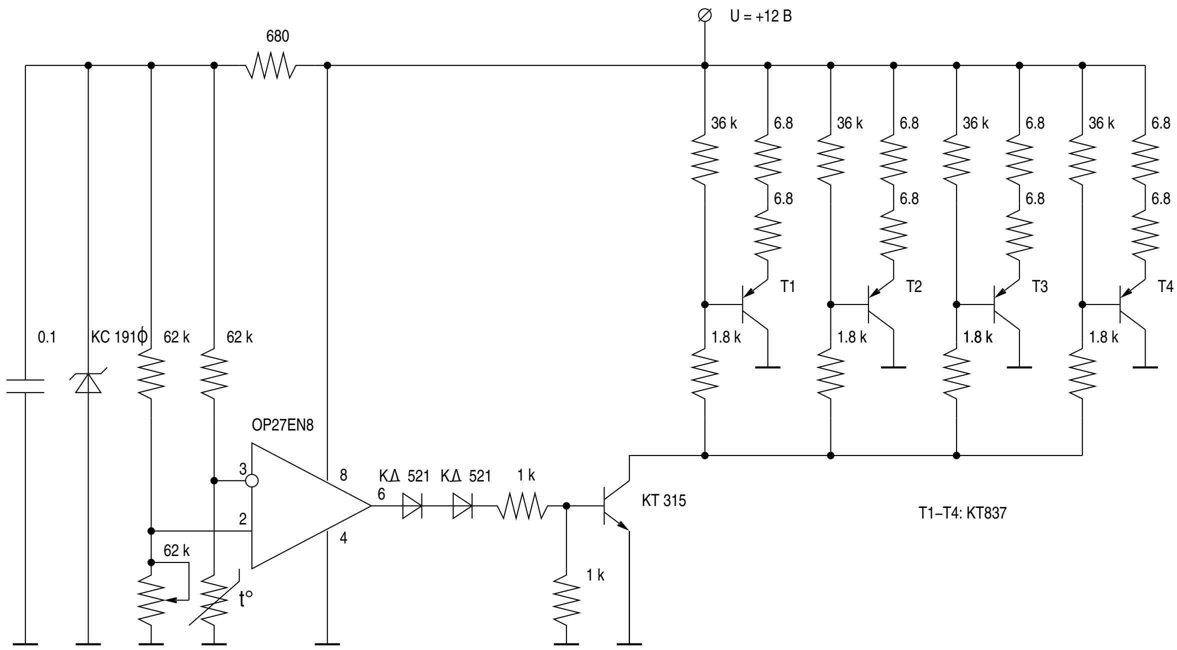

Рис. А.1: Принципиальная схема устройства стабилизации температуры внутри корпуса прототипа мониторной системы калориметра.

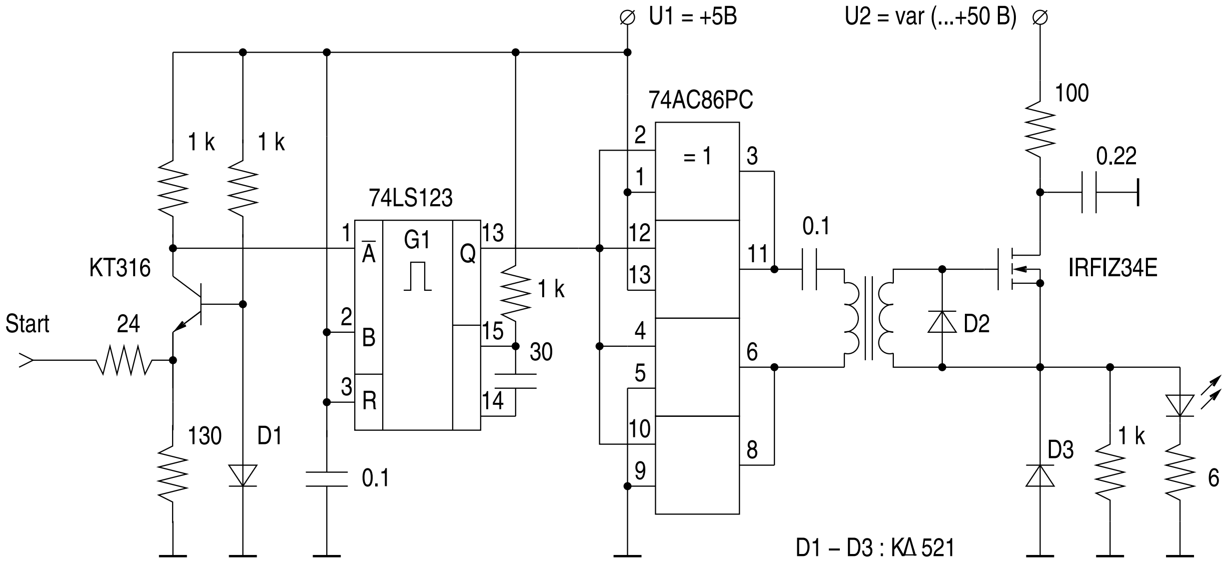

Рис. А.2. Принципиальная схема генератора управления светодиодом.