

**Белорусский государственный университет**

УДК 539.1.08:53.072:539.21:539.12.04

**Дробышев Глеб Юрьевич**

**Оптимизация сцинтилляционных параметров  
кристаллов вольфрамата свинца для их применения в  
прецизионной электромагнитной калориметрии**

01.04.16 - Физика ядра и элементарных частиц

01.04.07 - Физика твердого тела

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Минск 2000

Работа выполнена в НИИ ядерных проблем Белорусского государственного университета

Научные руководители:

кандидат физико-математических наук

Коржик Михаил Васильевич

доктор физики

Пенье Жан-Пьер

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент

Холмецкий Александр Леонидович

кандидат физико-математических наук,

старший научный сотрудник

Курилин Александр Сергеевич

Опонирующая организация -

Институт физики Национальной  
Академии Наук Беларуси

Защита состоится 12 апреля 2000 г., в 10.15 на заседании совета по защите диссертаций К 02.01.01 при Белорусском государственном университете по адресу: 220050, г. Минск, пр. Ф.Скорины, 4, гл. корпус, к. 206, телефон ученого секретаря 226-55-41.

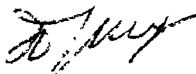
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского государственного университета

Автореферат разослан «06» марта 2000 г.

Ученый секретарь совета

по защите диссертаций

кандидат физико-математических наук



И. П. Прокопович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*Актуальность темы диссертации.* Эксперименты в физике частиц высоких энергий, которые запланированы в самом ближайшем будущем в мировых центрах по исследованию микромира, включая Европейскую лабораторию ядерных исследований (ЦЕРН), где будет построен наиболее современный ускоритель LHC, требуют создания соответствующих систем детектирования и идентификации частиц. Одной из таких систем являются электромагнитные калориметры на основе сцинтилляционных кристаллов. Неорганические сцинтилляционные кристаллы, являются основой новейших систем измерения и обеспечивают лучшие возможности для получения революционных для фундаментальной физики результатов. В физике высоких энергий используются экспериментальные установки с огромными объемами сцинтилляторов. Например, электромагнитные калориметры (ECAL) для двух экспериментов, а именно CMS и ALICE, которые запланированы на LHC, будут построены на основе более чем 110000 детекторных ячеек на базе сцинтилляционных кристаллов вольфрамата свинца.

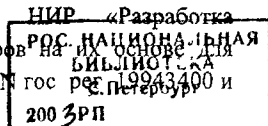
Такие калориметры, например, калориметр эксперимента CMS, должны обеспечить уникальное энергетическое разрешение при регистрации гамма - квантов. Оно должно быть лучше, чем  $2.5\%/\sqrt{E} \oplus 0.3\%$ , где  $E$  - энергия гамма - квантов в ГэВ. Срок работы калориметра должен быть не менее 10 лет. Это означает, что достаточно жесткие требования налагаются на технические параметры используемых сцинтилляторов и дисперсию их свойств.

Сцинтилляционные кристаллы, которые будут использоваться в ячейках детектора проекта CMS, должны быть радиационно стойкими, излучать не менее 90% света в течение 100 нс, их световыход должен превышать 10 фотоэлектрон/МэВ, неоднородность световыхода по длине кристалла не должна превышать несколько процентов.

Новый сцинтиллятор - монокристалл вольфрамата свинца ( $\text{PbWO}_4$ , PWO) – за уникальную совокупность физических свойств был выбран коллаборацией CMS для создания электромагнитного калориметра. Сцинтилляционные элементы, необходимые для проекта CMS, будут изготавливаться на Богородицком Заводе теххимических изделий в России и в Шанхайском Институте Керамики в КНР в течение 5 лет.

В рамках диссертационной работы выполнен цикл исследований, позволивший улучшить сцинтилляционные параметры кристаллов вольфрамата свинца до уровня, обеспечивающего возможность создания электромагнитного калориметра с требуемыми энергетическим разрешением и надежностью.

*Связь работы с крупными научными проектами.* Работы в этом направлении выполнялись в рамках госбюджетных НИР «Разработка быстродействующих тяжелых сцинтилляторов и детекторов для применения в экспериментах по физике высоких энергий»,



«Разработать новое поколение эффективных быстродействующих тяжелых сцинтилляторов и детекторов на их основе для применения в медицинской радиологии, дозиметрии и физике высоких энергий», N гос. рег. 19971570.

Исследования по теме диссертации проводились также в рамках Международной программы МНТЦ (1996 – 1999 гг., Проект МНТЦ 354 и 354b)

**Цель и задачи исследования.** Целями проведенных исследований являются улучшение свойств сцинтилляционных кристаллов вольфрамата свинца и достижение уровня, необходимого для их применения в электромагнитном калориметре проекта CMS, уточнение спецификации на кристаллы и обеспечение сохранения параметров кристаллов в рамках спецификации при их массовом производстве. Данные цели достигаются посредством решения следующих задач:

- 1) Изучить механизм возникновения сцинтилляций и оптимизировать сцинтилляционные свойства кристаллов вольфрамата свинца
- 2) Установить связь между энергетическим разрешением электромагнитного калориметра и параметрами сцинтилляционных элементов и определить требования к сцинтилляционным свойствам кристаллов вольфрамата свинца и их стабильности в условиях высокой радиационной нагрузки для использования в электромагнитном калориметре на ускорителе LHC
- 3) Решить проблему оптимизации светосбора в случае использования крупногабаритного высокорепрозрачного двулучепреломляющего сцинтиллятора сложной формы с низким световыходом при регистрации сигнала фотодетектором малой площади.
- 4) Разработать физические принципы и методологию контроля сцинтилляционных параметров кристаллов вольфрамата свинца, при их массовом производстве гарантирующую создание электромагнитного калориметра с заданными параметрами.

**Объект и предмет исследования.** Объект исследования – сцинтилляционные кристаллы вольфрамата свинца. Предмет исследования – сцинтилляционные параметры кристаллов вольфрамата свинца для применения в прецизионной электромагнитной калориметрии.

**Гипотеза.** В ходе работы была выдвинута гипотеза о механизме радиационного поражения кристаллов вольфрамата свинца, в котором ионизирующее излучение не поражает основные излучающие центры, а регистрируемые потери световыхода происходят исключительно вследствие радиационного поражения оптического пропускания кристалла. В рамках данного механизма, радиационная стойкость кристаллов вольфрамата свинца может быть улучшена посредством легирования специфицированными примесями лантана, иттрия и ниобия. Другим следствием данной гипотезы является то, что радиационную стойкость кристаллов вольфрамата свинца можно контролировать путем исследования оптического пропускания кристаллов.

Также была выдвинута гипотеза об особой роли ионов молибдена в формировании медленной компоненты в сцинтилляциях кристалла вольфрамата свинца.

В ходе исследования обе гипотезы полностью подтвердились

**Методология и методы проведенного исследования.** Работа выполнена с использованием теоретического, экспериментального методов и с привлечением методов математического моделирования. Эксперименты осуществлялись путем проведения лабораторных опытов и экспериментов на реальных пучках частиц. Результаты экспериментов обрабатывались методами математической статистики и методами корреляционного анализа

**Научная новизна и значимость полученных результатов заключается в следующем:**

Разработана модель возникновения сцинтилляций в кристаллах вольфрамата свинца и процессов, влияющих на их сцинтилляционные параметры, включая их радиационное поражение и присутствие медленных компонент в сцинтилляциях.

В частности, были установлены условия минимизации кратковременной нестабильности параметров РВО под действием облучения, а также установлено влияние примесей молибдена на появление медленных компонент и послесвечения в кинетике сцинтилляций

Проведены систематические исследования условий оптимизации светосбора в случае использования крупногабаритного высокорепрозрачного двулучепреломляющего сцинтиллятора сложной формы с низким световыходом при регистрации сигнала фотодетектором малой площади.

Проведен анализ влияния световыхода, неоднородности световыхода по длине кристалла и радиационной стойкости, а также кинетики сцинтилляций кристаллов вольфрамата свинца на параметры электромагнитного калориметра и установлены допустимые пределы изменения сцинтилляционных параметров кристаллов РВО в процессе эксплуатации электромагнитного калориметра.

Предложена и экспериментально апробирована многоуровневая схема контроля параметров кристаллов РВО в процессе массового производства. Схема предусматривает проведение комплексных исследований кристаллов на всем протяжении технологического цикла: от момента получения заводом-изготовителем сырья до окончательной установки кристалла в электромагнитный калориметр

На основе анализа экспериментальных распределений кристаллов по радиационной стойкости оценены вероятности попадания в калориметр некондиционных кристаллов (пропуск цели) и вероятность отбраковки годного кристалла (ложная тревога) при применении предложенных методов контроля

Показано, что от контроля радиационного поражения всех кристаллов предложенными методами, возможно перейти к выборочному контролю радиационной стойкости кристаллов, то есть к контролю сохранения достигнутых параметров распределения кристаллов по радиационной стойкости

**Практическая и экономическая значимость полученных результатов.** Практическая значимость полученных в работе результатов состоит в том, что разработанная модель возникновения сцинтилляций в кристаллах вольфрамата

свинца и процессов, влияющих на их сцинтилляционные параметры, позволила выработать рекомендации по оптимизации технологии производства кристаллов вольфрамата свинца, в результате чего, начато производство кристаллов с параметрами, удовлетворяющими требованиям проекта CMS

Проведенные исследования светосбора из кристаллов вольфрамата свинца позволили выработать рекомендации по конструкции детектирующей ячейки электромагнитного калориметра, а также способствовали более широкому применению данных кристаллов в экспериментах с более низкими энергиями чем на ускорителе LHC (до 1 ГэВ)

Результаты анализа пределов допустимых значений параметров кристаллов позволили сформулировать требования отбора кристаллов для их использования в электромагнитном калориметре.

Разработанные алгоритмы экспертной оценки качества кристаллов и методы контроля позволяют осуществлять в условиях массового производства отбор кристаллов с параметрами, необходимыми для проведения планируемых экспериментов.

Проведенные работы имеют большую экономическую значимость. Успешное проведение работ по улучшению физических параметров сцинтилляционного материала, выполненных в НИИ ядерных проблем (Минск, Беларусь) совместно с Богородицким заводом технoхимических изделий (БЗТХИ) вызвало решение руководства ЦЕРНа организовать производство значительной части кристаллов на БЗТХИ, при этом НИИ ЯП будет выполнять роль центра, обеспечивающего научное руководство производством. В соответствии с этим, ЦЕРН произвел крупные инвестиции в организацию производства и исследований, что способствовало сохранению рабочих мест и модернизации оборудования

Использование результатов проведенных исследований и разработанного при этом оборудования, позволит значительно уменьшить расходы по строительству калориметра как результат применения обоснованной системы отбора сцинтилляторов. Также это обеспечивает высокую надежность получаемых результатов в течение нескольких лет работы электромагнитного калориметра вследствие возможности точной калибровки детектирующих ячеек

#### *Основные положения диссертации, выносимые на защиту:*

- 1) Модель возникновения сцинтилляций в кристаллах вольфрамата свинца включающая процессы, влияющие на радиационное поражение свойств кристаллов и наличие медленных компонент в сцинтилляциях
- 2) Результаты анализа влияния изменения сцинтилляционных свойств кристаллов PWO на параметры электромагнитного калориметра
- 3) Методы оптимизации светосбора из крупногабаритного сцинтилляционного элемента сложной формы, изготовленного из высокорепрозрачного двулучепреломляющего сцинтилляционного кристалла с низким световыходом при регистрации сигнала фотодетектором с малой,

относительно выходной поверхности сцинтиллятора, чувствительной поверхностью

- 4) Физическое обоснование методологии отбора сцинтилляционных кристаллов для использования в электромагнитной калориметрии при их массовом производстве.

*Личный вклад соискателя.* Задачи, решенные в диссертации, были сформулированы научными руководителями соискателя к ф.-м н М.В Коржицом и доктором физики, профессором Ж.-П. Пенье

Соискатель внес существенный вклад в разработку физической модели возникновения медленной компоненты и послесвечения в сцинтилляциях PWO, а также способов их подавления. Соискателем были выполнены работы по оптимизации концентрации легирующих примесей в кристаллах, используемых для минимизации процессов поражения оптического пропускания кристаллов при их облучении гамма-квантами.

Соискателем были предложены, смоделированы и проверены экспериментально возможности улучшения светосбора в кристалле. Было детально исследовано влияние типа материала отражающего покрытия и обработки поверхностей кристаллов на условия сбора света сцинтилляций и, в том числе, на проявление эффекта фокусировки выходящего из кристалла света и предложены соответствующие решения. Также проведено детальное исследование возможности применения смесителей спектра для повышения сбора света сцинтилляций.

Соискателем было проанализировано влияние параметров кристаллов PWO, таких как световойход, понижение световыхода под действием облучения и кинетики сцинтилляций, на параметры электромагнитного калориметра. Уточнены предельно допустимые значения данных параметров кристаллов PWO, для их использования в электромагнитной калориметрии.

Соискатель внес существенный вклад в разработку, создание и испытание методологии отбора сцинтилляционных кристаллов для использования в электромагнитной калориметрии при их массовом производстве. Соискателем были проведены систематические измерения параметров и анализ результатов измерений первых промышленных партий кристаллов вольфрамата свинца на автоматической системе контроля качества кристаллов (ACCOS) и анализ результатов измерений радиационной стойкости и предложена схема отбора сцинтилляционных кристаллов для использования в электромагнитной калориметрии при массовом производстве.

Соискателем был проведен анализ экспериментальных распределений кристаллов по радиационной стойкости и оценены вероятности попадания в калориметр некондиционных кристаллов (пропуск цели) и вероятность отбраковки годного кристалла (ложная тревога) при применении предложенных методов контроля.

*Апробация результатов диссертации.* Результаты, изложенные в диссертации, были представлены на шести конференциях: IEEE Nuclear Science

Symposium 1994, IEEE Nuclear Science Symposium 1995, VII International Conference on Calorimetry in High Energy Physics 1997, IEEE Nuclear Science Symposium 1998, Journées CMS-France de la Bussière 1998, SCINT'99 а также на регулярных семинарах, проводящихся в ЦЕРНе.

**Опубликованность результатов диссертации.** Результаты, полученные соискателем в соавторстве с другими членами научного коллектива, опубликованы в семи препринтах и отдельных выпусках Вестника Коллаборации CMS (CMS Notes) и пяти статьях в известных научных журналах (IEEE Transactions on Nuclear Science, Nuclear Instruments and Methods, Physica Status Solidi, Radiation Measurements), а также в семи трудах материалов конференций. Общее количество опубликованных материалов составляет 222 страницы.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация написана на русском языке и включает Введение, Общую характеристику работы, три Главы, разделенные на разделы и параграфы, Заключение, Список использованных источников и Приложения. Полный объем диссертации составляет 148 страниц в том числе рисунки в количестве 66 на 42 страницах, таблицы в количестве 19 на 11 страницах и приложения в количестве 2 на 5 страницах. Библиография включает 127 источников на 8 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приводится краткая информация о строящемся в настоящее время в ЦЕРНе протон- протонном ускорителе на встречных пучках ЛНС с энергией 14 ТэВ. На этом ускорителе планируется провести несколько важнейших для современной фундаментальной физики экспериментов, в том числе, проект CMS по поиску бозонов Хиггса. Одним из принципиальных преимуществ детектора проекта CMS является электромагнитный калориметр на основе нового сцинтилляционного материала вольфрамата свинца ( $PWO$ ,  $PbWO_4$ ).

**Глава 1** посвящена исследованию сцинтилляционных и спектрометрических свойств кристаллов вольфрамата свинца.

В **Разделе 1.1** описаны исследованные образцы кристаллов  $PWO$ , а также примененные методы исследований и экспериментальное оборудование.

В **Разделе 1.2** рассматривается модель возникновения сцинтилляций в кристаллах  $PWO$ . На основе спектроскопических исследований кристаллов  $PWO$  нами установлено, что люминесценция в кристаллах вольфрамата свинца возникает вследствие переходов с переносом заряда в анионных молекулярных комплексах  $WO_4^{2-}$  и  $WO_3$ . На рис. 1 приведена схема нижних энергетических уровней и оптических переходов в люминесцентных центрах в кристаллах  $PWO$ .

Из полученных спектроскопических данных и схемы энергетических уровней был сделан вывод, что нерегулярные центры являются тушителями люминесценции регулярных групп. Таким образом, подавление дефектов типа  $WO_3$ , базирующихся на кислородных вакансиях, является необходимым для



увеличения световыхода кристаллов PWO. Подавление этих дефектов в кристаллах нами осуществлено посредством подстройки технологии выращивания кристаллов. Установлено, что в кристаллах с минимальным присутствием нерегулярных групп  $WO_3$ , обнаруживаемому по сильно подавленным зеленой и красной люминесценции, световыход в образцах  $1 \times 1 \times 1$  см<sup>3</sup> увеличивается в, по крайней мере, 2 раза и достигает 30 фото <sup>электрон</sup> / МэВ (ФЭУ XR2262). Поэтому, в кристаллах, выращенных в оптимальных условиях, доминирует люминесценция регулярных вольфрамовых групп, вследствие чего спектр радиoluminesценции или сцинтилляций локализован в голубой области и имеет максимум 420 нм

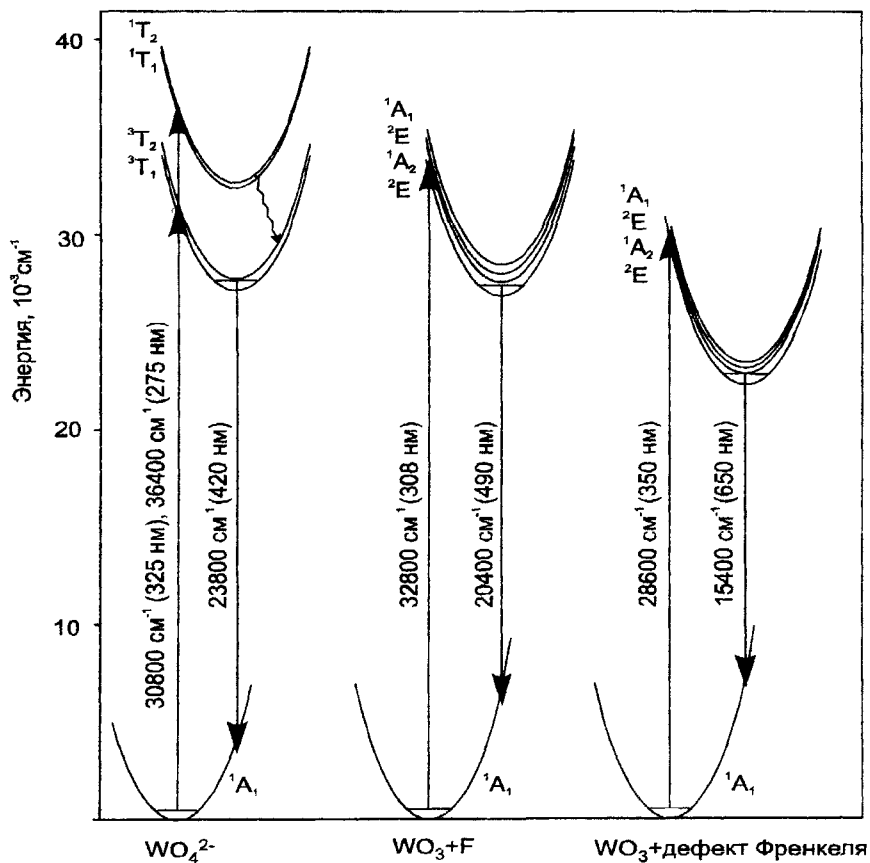


Рис 1.

На основании анализа данных рентгеновской и нейтронной дифракции установлено, что синтетические кристаллы PWO являются твердым раствором двух фаз. Кристаллы, полученные из расплава, содержащего смесь  $PbO$  и  $WO_3$  в

стехиометрическом соотношении, обладают структурой шеелита и химической формулой  $\text{PbWO}_4$ . В кристаллах, полученных из расплава с дефицитом свинца, возникает суперструктура катионных вакансий. Данный тип кристалла назван нами шеелитоподобным, а его химическая формула определена нами как  $\text{Pb}_{7,5}\text{W}_8\text{O}_{32}$ .

В Разделе 1.3 рассматривается проблема подавления радиационного поражения оптического пропускания кристаллов вольфрамата свинца. Нами установлено, что вследствие относительно небольшой ширины запрещенной зоны (4 эВ) в кристаллах не возникают электронные и дырочные центры на основе собственных точечных дефектов, которые образуются за счет захвата одного электрона либо одной дырки. В кристаллах возникают метастабильные центры, которые захватывают только две дырки или два электрона. Ионизирующее излучение не поражает механизм спинтиллиаций, а наблюдаемое снижение световыхода вызвано появлением наведенного оптического поглощения в кристаллах. Установлено, что двух-дырочные центры на базе катионных вакансий являются основным источником наведенного поглощения в кристаллах  $\text{PWO}$ .

Поэтому, для оценки радиационной стойкости кристаллов возможно использовать измерение величины радиационно индуцированного оптического поглощения. На основании экспериментальных данных были установлены корреляции между величиной наблюдаемого поражения световыхода  $(I-I_0)/I_0$  под действием электронов с энергией 120 ГэВ и оптического пропускания  $(T-T_0)/T_0$  при  $\gamma$ -облучении с энергией 1.25 МэВ для полноразмерных кристаллов, и между индуцированным поглощением на длине волны 500 нм, измеренным на полноразмерных элементах вдоль оси  $A_{\text{full}}$  и индуцированным поглощением измеренным на образцах, извлеченных из верхних частей кристаллов  $A_{\text{top}}$ , приведенные на рис.2.

Для подавления механизмов радиационного поражения нами был предложен и апробирован метод компенсации дефектов с помощью легирования неизоморфными 5-валентными, замещающими ионы вольфрама, и 3-х валентными, замещающими ионы свинца, примесями La, Lu, Y, Nb, а также при совместном легировании несколькими примесями из вышеперечисленных. В первом случае, ионы ниобия, локализуясь в позициях  $\text{W}^{6+}$  создают избыточный некомпенсированный отрицательный заряд, что приводит к подавлению дырочных центров. Во втором случае, ионы лантана при локализации в положениях  $\text{Pb}^{2+}$  создают избыточный некомпенсированный положительный заряд, что приводит к подавлению электронных центров. Как нами установлено, при совместном легировании примесями оптимальная концентрация каждой из них составляет порядка 100 ppm. В этом случае еще не происходит их совместная сегрегация (коррелированное вхождение) в кристалле, а примеси распределяются статистически, при этом происходит эффективное подавление как дырочных как и электронных центров.

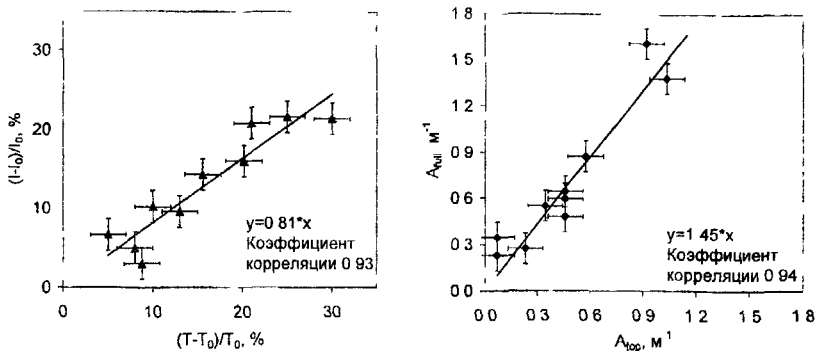


Рис.2.

В Разделе 1.4 приводятся результаты исследований кинетики сцинтилляций, в том числе, рассматриваются механизмы возникновения медленных компонент и послесвечения в сцинтилляциях монокристаллов PWO. Установлено, что относительный вклад различных типов центров в световыход сцинтилляций варьируется при отдельных изменениях в технологии и очень чувствителен к чистоте исходного сырья. Основной примесью, которая изначально присутствует в кристаллах PWO, является примесь молибдена. Ион молибдена изовалентен вольфраму, образует такие же кристаллические соединения и очень трудно выделяется при очистке сырья. Нами было установлено, что присутствие ионов молибдена является основным источником послесвечения, медленных компонент и тушения люминесценции регулярных центров. Тушение регулярных центров происходит из-за того, что энергетические уровни первого возбужденного состояния ионов анионного комплекса молибдена  $\text{MoO}_4^{2-}$ , лежат ниже на  $3600 \text{ см}^{-1}$  ( $0.45 \text{ эВ}$ ) чем уровни первого возбужденного состояния ионов анионного комплекса вольфрама  $\text{WO}_4^{2-}$ , вследствие чего возникает безизлучательное тушение за счет кулоновского взаимодействия. При этом, при концентрациях молибдена порядка  $100 \text{ ppb}$  в сцинтилляциях возникает медленная компонента с характерным временем высвечивания  $200 - 300 \text{ нс}$  и послесвечение с временами в миллисекундном диапазоне. При увеличении концентрации молибдена до уровня порядка  $1000 \text{ ppb}$ , послесвечение, связанное с присутствием молибдена переходит в область микросекунд, то есть, становится дополнительной медленной компонентой сцинтилляций, а тушение сцинтилляций становится значительным. Благодаря тушению люминесценции регулярных групп комплексами  $\text{MoO}_4^{2-}$ , доля быстрых компонент в сцинтилляциях кристаллов, легированных молибденом, уменьшается. Установлено, что в зависимости от концентрации молибдена максимум суммарного спектра люминесценции меняется в диапазоне от  $440$  до  $520 \text{ нм}$ .

В Разделе 1.5 приведены результаты анализа влияния параметров кинетики кристаллов PWO на возможности его использования для быстрых детекторов

излучения Исследованы особенности зависимости кинетики сцинтилляций от температуры кристаллов вольфрамата свинца, выращенных в различных условиях Установлено, что для достижения заданного уровня параметра кинетики сцинтилляций определяющей является самая медленная компонента кинетики сцинтилляций ( $\tau_3=100-300$  нс), интегральный вклад которой не должен превышать 0.5% На основе проведенных расчетов и измерений кинетики сцинтилляций кристаллов с примесью молибдена установлено, что предельно допустимое содержание примеси молибдена в кристаллах для calorimetра проекта CMS составляет 5 ppm.

В Главе 2 рассмотрены вопросы оптимизации светосбора из крупногабаритного сцинтилляционного элемента сложной формы, изготовленного из высокорелрактивного двулучепреломляющего сцинтилляционного кристалла с низким световыходом при регистрации сигнала фотодетектором с малой, относительно выходной поверхности сцинтиллятора, чувствительной поверхностью.

В Разделе 2.1 обсуждены особенности светосбора из кристаллов с малой интенсивностью сцинтилляций.

В Разделе 2.2 описаны примененные методы исследований. Для исследования процессов распространения света в кристалле и системе кристалл - фотодетектор использовались как экспериментальные методы, так и моделирование методом Монте-Карло.

В Разделе 2.3 Приведены результаты анализа влияния изменения сцинтилляционных свойств кристаллов PWO, таких как световыход, неоднородность световыхода и падение световыхода под действием облучения на энергетическое разрешение электромагнитного calorimetра

Зависимость между величиной  $a_{photo}$  – терма стохастической компоненты в энергетическом разрешении электромагнитного calorimetра, зависящего только от фотостатистики и избыточного шумового фактора  $F$  лавинного фотодиода (ЛФД, Avalanche Photo Diode, APD) и световыходом кристалла  $LY_{PM}$  измеренном с помощью ФЭУ XR2262 описывается следующей формулой:

$$a_{photo} = \sqrt{\frac{F}{LY_{PM} \cdot (QE_{APD}/QE_{PM}) \cdot K_{imm} \cdot \xi}}, \quad (1)$$

где  $\xi = S_{w2eff}/S_{w1eff}$  - отношение эффективной площади фотодетектора к эффективной площади выходной поверхности сцинтиллятора, с учетом эффекта фокусировки,  $QE_{PM}$  и  $QE_{APD}$  – соответственно квантовые эффективности фотокатода ФЭУ и ЛФД,  $K_{imm}$  - коэффициент, учитывающий дополнительный светосбор от применения в случае ЛФД оптического клея с коэффициентом преломления 1.7 вместо оптической иммерсии с коэффициентом преломления 1.5, как в случае использования ФЭУ

В результате нами были уточнены предельные значения сцинтилляционных параметров кристаллов PWO, при которых еще достижимо энергетическое разрешение электромагнитного calorimetра необходимое для

экспериментов проекта CMS

Определен нижний предел световыхода сцинтилляционной ячейки электромагнитного калориметра CMS, равный 8 фотоэлектронов/МэВ при измерении, проведенном с помощью ФЭУ XR2262, при времени интегрирования 100 нс температуре 18<sup>0</sup>С и источнике излучения, расположенном в 80 мм от выходной поверхности кристалла, что обеспечивает вклад фотостатистической компоненты энергетического разрешения не более 2,3%. Учет допустимого снижения световыхода под действием облучения определяет нижний предел световыхода сцинтилляторов PWO, равный 10 фотоэлектронов/МэВ (ФЭУ XR2262). Определено предельно допустимое наведенное поглощение в полноразмерных (длиной 230 мм) кристаллах  $\Delta k_{\text{full}} = 1,14 \text{ м}^{-1}$  и соответствующее индуцированное поглощение, измеренное на образцах, извлеченных из верхних частей кристаллов,  $\Delta k_{\text{top}} = 0,8 \text{ м}^{-1}$ , при которых дополнительный вклад в статистическую компоненту энергетического разрешения не выше 0,2%.

В Разделах 2.4 и 2.5 проведен анализ влияния различных типов отражающих покрытий кристаллов и применения световодов различной конструкции на светосбор и неоднородность световыхода по длине кристалла. Диффузные отражатели обеспечивают лучший светосбор по сравнению с зеркальными. Наилучшим отражающим материалом с точки зрения достижения максимального световыхода является TYVEK®. Однако TYVEK® неоднороден по толщине, которая составляет 200 мкм, что приводит к увеличению зазора между кристаллами в калориметре, и, следовательно, к ухудшению энергетического разрешения. Поэтому нами был исследован новый материал TEDLAR® и предложено использовать комбинированные двухслойные покрытия типа Тедлар-Майлар, имеющие общую толщину 75 мкм.

Изучение особенностей обнаруженного эффекта фокусировки света в кристаллах PWO, имеющих форму, выбранную для электромагнитного калориметра проекта CMS, позволили сформулировать рекомендации по оптимальному расположению на кристалле фотодетектора, площадь которого значительно меньше площади выходной поверхности кристалла, как это имеет место в случае применения ЛФД. В этом случае необходимо покрывать остальную часть выходной поверхности сцинтиллятора отражающим материалом, чтобы обеспечить фокусировку света в центральной части выходной поверхности. Обнаружено смещение максимума потока света от центра к периферии при использовании поглощающего покрытия вокруг фотодетектора вместо отражающего.

Установлено, что покрытие выходной поверхности моделированных кристаллов поглощающим материалом не может эффективно подавлять регистрацию многократно отраженных в кристалле фотонов.

В Разделе 2.6 рассмотрены вопросы оптимизации сбора света сцинтилляций в области сочленения кристалла и фотодетектора. Приведены результаты анализа светосбора в случае сопряжения кристалла PWO с лавинным фотодиодом посредством световодов различной конструкции. Проведен анализ

применения метода концентрации флуоресцентного потока с помощью сместителей спектра для увеличения светосбора на фотодетекторе с малой чувствительной поверхностью Установлено что при этом сбор света на лавинном фотодиоде может быть увеличен до 5 раз по сравнению с прямой установкой ЛФД на кристалле. Данные результаты способствуют применению данных кристаллов в экспериментах с более низкими энергиями чем на LHC

Исследовано влияние величины коэффициента преломления оптического контакта кристалла и ЛФД. Оптическая иммерсия в зоне сопряжения ЛФД с кристаллом должна иметь максимально возможный показатель преломления, наиболее близкий к показателю преломления кристалла вольфрамата свинца

Также исследован случай сбора света сцинтилляций при установке системы из 4 ЛФД на одном кристалле Установлено, что комбинирование нескольких ЛФД, установленных на одном кристалле, приводит к увеличению светосбора не пропорционально увеличению поверхности оптического контакта вследствие эффекта фокусировки

В Разделе 3.1 Главы 3 рассмотрены проблемы сертификации сцинтилляционных параметров кристаллов PWO при их массовом производстве. Производство сцинтилляторов вольфрамата свинца для комплектации электромагнитного калориметра CMS представляет собой конвейерное производство, которое будет работать с максимальной производительностью в течение нескольких лет, чтобы изготовить более 80000 кристаллов PWO, причем без складирования выпускаемой продукции Это означает, что производство и поставка кристаллов должны сопровождаться хорошо продуманной системой мероприятий, обеспечивающей эффективное производство сцинтилляционных кристаллов с заданными свойствами и минимальным количеством рекламаций.

Предложена трехуровневая схема контроля параметров кристаллов PWO, которая предполагает следующее:

- Пилотные исследования сырья, т.е. выращивание образцовых кристаллов и исследование их параметров в лаборатории.
- Сертификация серийных кристаллов на заводе - изготовителе.
- Повторная сертификация в ЦЕРНе

В условиях массового производства кристаллов в столь больших масштабах, применение для сертификации кристаллов лабораторных методов и аппаратуры оказывается крайне затруднительным, а в случае контроля радиационной стойкости кристаллов практически невозможным, вследствие их низкой производительности и высокой стоимости оборудования. Поэтому возникла необходимость в создании и физическом обосновании методологии контроля, которая, на основе установленных нами корреляций, позволяет заменить комплексные лабораторные исследования набором ключевых экспрессных измерений. В частности, для контроля радиационной стойкости предлагается использовать результаты измерения радиационно индуцированного поглощения образцов, извлеченных из верхних частей кристаллических булей, где концентрация дефектов минимальна.

Важным элементом программы сертификации кристаллов PWO в условиях массового производства является разработанная в НИИ ядерных проблем (Минск, Беларусь) совместно с ЛАПП (Анси-ле-Вье, Франция) и ЦЕРН (Женева, Швейцария) Автоматическая система контроля качества кристаллов ACCOS (Automatic Crystal Control System), описанная в [Разделе 3.2](#). Система ACCOS представляет собой программно-аппаратный комплекс, предназначенный для измерения геометрических размеров, оптического пропускания вдоль и перпендикулярно оси кристалла, кинетики сцинтилляций, световыхода и неоднородности световыхода в автоматическом режиме.

В [Разделе 3.3](#) приведены результаты исследований воспроизводимости результатов измерений, проведенных с помощью системы ACCOS и результаты измерений кристаллов первой предмассовой партии, проведенных на системе ACCOS. Установлены корреляции между результатами измерений, полученных на системе ACCOS и на лабораторном оборудовании

Радиационная стойкость кристаллов является одним из наиболее важных параметров, обеспечивающих долговременную работу калориметра. С целью стабилизации технологии выращивания кристаллов PWO с воспроизводимой радиационной стойкостью и контроля элементов PWO для сборки первого супермодуля электромагнитного калориметра CMS, были проведены измерения более 900 кристаллов PWO. В результате нами установлены предельные допустимые номера повторных кристаллизации для кристаллов PWO различных типов. В частности, для кристаллов с двойным легированием, выращенных в оптимальных условиях, предельной допустимой кристаллизацией является девятая

Анализ распределений кристаллов по величине радиационно индуцированного поглощения позволил оценить вероятности попадания в калориметр некондиционных кристаллов (пропуск цели) и вероятность отбраковки годного кристалла (ложная тревога) при применении предложенных методов контроля.

Среднее количество некондиционных кристаллов, которое может попасть в калориметр  $N$ :

$$N = \int_0^{x_0} F(x)G(x - x_0)dx \quad , \quad (2)$$

а среднее количество годных кристаллов, которые могут быть отбракованы  $M$ :

$$M = \int_{x_0}^{x_m} F(x)G(x - x_0)dx \quad , \quad (3)$$

где  $F(x)$  - функция распределения кристаллов по величине радиационно индуцированного поглощения,  $G(x - x_0, \sigma)$  - функция отклика системы измерения,  $\sigma$  - погрешность метода измерения,  $x_0$  - предельно допустимое значение радиационно-индуцированного поглощения,  $x_m$  - максимальное для данной выборки значение радиационно-индуцированного поглощения.

Для электромагнитного калориметра проекта CMS с общим числом кристаллов 83000 в случае оптимизированных по радиационной стойкости кристаллов, среднее число некондиционных кристаллов, которые могут попасть в калориметр оценено в  $320 \pm 21$ , а среднее количества годных кристаллов, которые могут быть отбракованы оценено в  $213 \pm 14$ . Таким образом, представляется принципиально возможным создать калориметр с требуемой стабильностью в условиях облучения. При этом от контроля радиационного поражения всех кристаллов, возможно перейти к выборочному контролю радиационной стойкости кристаллов путем измерения радиационно-индуцированного поглощения в образцах, извлеченных из верхних частей кристаллических булей.

В Приложениях содержатся Акты о приемке завершенных научно-исследовательских работ «Разработка быстродействующих тяжелых сцинтилляторов и детекторов на их основе для применения в экспериментах по физике высоких энергий», N гос. рег. 19943400 и «Разработать новое поколение эффективных быстродействующих тяжелых сцинтилляторов и детекторов на их основе для применения в медицинской радиологии, дозиметрии и физике высоких энергий», N гос. рег. 19971570.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана модель возникновения сцинтилляций в кристаллах вольфрамата свинца включающая процессы, влияющие на радиационное поражение свойств кристаллов и наличие медленных компонент в сцинтилляциях. Установлено, что в кристалле существует по крайней мере три типа люминесцентных центров: регулярная группа  $WO_4^{2-}$ , нерегулярная группа  $WO_3$  с кислородной вакансией и нерегулярная группа  $WO_3$  со смещенным в междоузлие ионом кислорода (дефект Френкеля). Показано, что регулярные группы  $WO_4^{2-}$  вносят основной вклад в сцинтилляции, а центры на основе дефектов типа  $WO_3$  приводят к тушению этих сцинтилляций. Установлено, что световыход кристаллов PWO может быть увеличен не менее чем в 2 раза в случае минимизации в кристалле количества нерегулярных групп на базе анионных вакансий [1, 9, 10].

Обнаружено, что наряду с фазой чистого шеелита в синтетических кристаллах вольфрамата свинца возникают упорядоченные в суперструктуру катионные вакансии в позиции ионов свинца. Такая фаза названа нами шеелитоподобной. При этом кристаллы PWO, выращенные методом Чохральского, является твердым раствором двух фаз [9].

Обнаружено, что потери световыхода в кристаллах вольфрамата свинца при их облучении ионизирующим излучением происходят вследствие радиационного поражения оптического пропускания кристалла, при этом основным источником индуцированного поглощения являются двух-дырочные центры на базе катионных вакансий. Для подавления механизмов радиационного поражения предложен и апробирован метод компенсации дефектов с помощью



дополнительного легирования неизоморфными примесями La, Lu, Y, Nb, а также совместного легирования несколькими примесями из вышеперечисленных. Установлено, что десятикратное подавление наведенного поглощения в спектральном диапазоне сцинтилляций 350-600 нм достигается при концентрации активаторов от 70 до 100 ppm [3, 11, 14, 15].

Установлено, что присутствие ионов молибдена в кристаллах PWO является основным источником послесвечения, медленных компонент в сцинтилляциях и тушения люминесценции регулярных центров. При этом, при концентрациях молибдена порядка 100 ppm в сцинтилляциях возникают медленная компонента с характерным временем высвечивания 200 - 300 нс и послесвечение с временами в миллисекундном диапазоне. При увеличении концентрации молибдена до уровня порядка 1000 ppm, послесвечение, связанное с присутствием молибдена переходит в область микросекунд, то есть, становится дополнительной медленной компонентой сцинтилляций, а тушение сцинтилляций становится значительным. Благодаря тушению люминесценции регулярных групп комплексами  $MoO_4^{2-}$ , доля быстрых компонент в сцинтилляциях кристаллов, легированных молибденом, уменьшается [1, 9, 10].

2. В рамках модели гомогенного калориметра с идентичными по параметрам детектирующими ячейками было установлено влияние величин световыхода, продольной неоднородности световыхода, падения световыхода под действием облучения кристаллов PWO, на энергетическое разрешение электромагнитного калориметра, а также влияние параметров кинетики сцинтилляций на наложение импульсов. В результате установлены пределы допустимых значений изменения сцинтилляционных свойств кристаллов PWO в процессе эксплуатации электромагнитного калориметра. Показано, что величина фотостатистической компоненты энергетического разрешения не более 2,3% достигается при световыходе 8 фотоэлектрон/МэВ (ФЭУ XP2262). В результате, с учетом допустимого изменения световыхода за счет радиационного поражения оптического пропускания, требуемый световыход кристаллов должен составлять 10 фотоэлектрон/МэВ (ФЭУ XP2262). Расчитано соответствующее предельно допустимое индуцированное поглощение в полноразмерных кристаллах, которое составляет  $\Delta k_{full} = 1.14 \text{ м}^{-1}$  в диапазоне длин волн сцинтилляций (350 - 600 нм). Для минимизации уровня наложения импульсов определяющей является присутствие медленной компоненты кинетики сцинтилляций ( $\tau_3 \sim 200 - 300 \text{ нс}$ ), обусловленной наличием неконтролируемой примеси ионов молибдена, при этом ее интегральный вклад не должен превышать 0,5%. На основе проведенных расчетов и измерений кинетики сцинтилляций кристаллов с примесью молибдена установлено, что предельно допустимое содержание примеси молибдена в кристаллах для калориметра проекта CMS составляет 5 ppm [4].

3 Для оптимизации светосбора и регистрации сигнала фотодетектором малой площади в случае использования крупногабаритного высоко-рефрактивного двулучепреломляющего сцинтиллятора сложной формы с низким световыходом

предложено использовать метод концентрации флуоресцентного потока с помощью смесителей спектра Установлено что при этом светосбор из сцинтиллятора на лавинном фотодиоде может быть увеличен до 5 раз Для уменьшения неоднородности светосбора из сцинтилляционной ячейки калориметра предложено использовать комбинированные двухслойные покрытия типа Тедлар-Майлар Обнаружен и исследован эффект фокусировки выходящего из кристалла света и в частности, сдвиг от центра к периферии максимума потока выходящего из кристалла света при использовании поглощающих покрытий зоны вокруг выходного окна кристалла [4, 8, 13].

4 Разработано физическое обоснование методологии отбора сцинтилляционных кристаллов для использования в электромагнитной калориметрии при их массовом производстве Предложенные методы позволяют заменить при массовом производстве кристаллов PWO комплексные лабораторные исследования набором ключевых экспрессных измерений, гарантирующих отбор кристаллов высокого качества [2, 5, 7, 12, 17, 18]

Для проведения контроля радиационной стойкости кристаллов были установлены корреляции между величиной изменения световыхода под действием облучения пучком электронов и величиной радиационно индуцированного оптического поглощения под действием  $\gamma$ -облучения. а также между величиной радиационно индуцированного оптического поглощения в полноразмерных элементах (длиной 230 мм) и в образцах, извлеченных из верхних частей кристаллических булей, где концентрация дефектов минимальна [6, 16, 18]

На основе полученных корреляций разработана многоуровневая схема контроля параметров кристаллов PWO в процессе массового производства. Схема предусматривает проведение измерений параметров кристаллов на всем протяжении технологического цикла: от момента получения заводом-изготовителем сырья до окончательной установки кристалла в электромагнитный калориметр [2, 16, 19]

Проведенный анализ экспериментальных распределений по радиационной стойкости кристаллов, произведенных до и после их оптимизации технологии, позволил оценить вероятности попадания в калориметр некондиционных кристаллов (пропуск цели) и вероятность отбраковки годного кристалла (ложная тревога) при применении предложенных методов контроля Для электромагнитного калориметра проекта CMS с общим числом кристаллов 83000, в случае оптимизированных по радиационной стойкости кристаллов, среднее число некондиционных кристаллов, которые могут попасть в калориметр оценено в  $320 \pm 21$ , а среднее количества годных кристаллов, которые могут быть отбракованы оценено в  $213 \pm 14$  Показано, что от контроля радиационного поражения всех кристаллов, возможно перейти к выборочному контролю радиационной стойкости кристаллов, то есть сохранения достигнутых параметров распределения кристаллов по радиационной стойкости [6]

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Influence of Mo impurity on the spectroscopic and scintillation properties of  $PbWO_4$  crystals / M Böhm, A.E.Borisevich, G Yu.Drobychev, A Hofstaetter, O V.Kondratiev, M V.Korzhik, M Luh., B K.Meyer, J.-P.Peigneux, A.Scharmann – Annecy-le-Vieux, December 1997 – 22 p. (Preprint LAPP, LAPP-EXP-97 13)
- 2 Studies and Proposals for an Automatic Crystal Control System / G Drobychev, A.Fedorov, M.Korzhik, A.Khruschunsky, O.Missevitch, J P.Peigneux, A.Oriboni, M.Schneegans. // CMS TN – 1997 - No.036 – 38 p.
3. Systematic Study of the  $PbWO_4$  Crystal Short-Term Instability Under Irradiation. / A.N. Annenkov, E.Auffray, R.Chipaux, G.Yu.Drobychev, A.A.Fedorov, M Geleoc, N.A.Golubev, M.V.Korzhik, P.Lecoq, A.A.Lednev, A.B.Ligun, O.V Missevitch, V B.Pavlenko, J.-P.Peigneux, A.V.Singovski // CMS Note – 1997 - No.055 – 20 p
4. Measurements of Light Collection of CMS  $PbWO_4$  Crystals. Comparison with the CRISTAL Monte-Carlo Simulation Program and Further Evaluation. / G.Yu Drobychev, J -P.Mendiburu, J.-P.Peigneux, P.Rivoalan. // CMS Note – 1998 - No.035 – 20 p
- 5 Analysis of ACCOS System results reproducibility and results of first pre-mass production PWO certification / G.Yu.Drobychev, E.Auffray, M.V.Korzhik, O.V.Missevich, J.-P.Peigneux, M.Schneegans, R.F.Zouevski. // – Annecy-le-Vieux, October 1, 1999. – 6 p. (Preprint LAPP, LAPP-EXP-99.07).
6. Results of PWO radiation hardness optimization. / G.Yu.Drobychev, A N.Annenkov, E.Auffray-Hillemans, A E.Borisevich, M.V.Korzhik, V.L.Kostylev, P. Lecoq, V.D.Ligoun, J.-P Peigneux. // CMS Note – 1998 – No. 062 – 8 p.
7. Performance of ACCOS, an Automatic Crystal quality CONTROL System for PWO. / E.Auffray-Hillemans, G.Chevenier, M.Freire, P.Lecoq, J.-M.Le Goff, R.Marcos, G.Drobychev, O Missévitch, A.Oskine, R.Zouevsky, J.-P Peigneux, M.Schneegans // CMS Note – 1999 – 067 - 19 p. (Также готовится к публикации в Nucl. Instr. Meth )
8. Optimization of the Lead Tungstate Crystal/Photodetector System for High-Energy Physics. / G Yu.Drobychev, A A.Fyodorov, V A.Katchanov, M.V.Korzhik, O V.Misevich, and J P Peigneux. // IEEE Trans. on Nucl. Sci. - 1995 – V.42 - No.4 – P.341-344.
- 9 Slow components and afterglow in  $PbWO_4$  crystal scintillations. / A N Annenkov, E Auffray, A.E.Borisevich, G.Yu.Drobychev, A.A.Fedorov, O V Kondratiev, M.V.Korzhik, P.Lecoq, V.D.Ligun, O.V.Missevitch, V.B Pavlenko, J.-P.Peigneux, Yu D.Prokoshkin, A.V.Singovski, R.F.Zouevski // Nucl. Instr Meth A – 1998 – No.403 – P.302-312.
10. Influence of Mo impurity on the spectroscopic and scintillation properties of  $PbWO_4$  crystals / M Böhm, A.E.Borisevich, G.Yu Drobychev, A Hofstaetter, O V.Kondratiev, M V.Korzhik, M.Luh., B.K.Meyer, J -P Peigneux, A Scharmann // Phys Stat. Sol. A. – 1998 – V 167 - N1 - P.243-252

11 Systematic Study of the PbWO<sub>4</sub> Crystal Short-Term Instability Under Irradiation / A N Annenkov, E Auffray, R Chipaux, G Yu Drobychev, A A Fedorov, M Geleoc, N A Golubev, M.V.Korzhih, P Lecoq, A.A Lednev, A B Ligun, O.V Missevitch, V B.Pavlenko, J-P Peigneux, A V Singovski // Radiation Measurements – 1998 - V 29. - N1. – P.27-38.

12 Fast method of PWO scintillation light collection time calculation / O Missevich, G Drobychev, M Korzhik, A Oskine, R Zouevski // Принята к публикации в Nucl. Instr. Meth. – 6 с.

13 Optimization of the Lead Tungstate Crystal/Photodetector System for High-Energy Physics / G.Yu.Drobyshev, A A Fyodorov, V A Katchanov, M V Korzhik, O V Missevich, and J P.Peigneux. // IEEE Nucl. Sci. Symp. Norfolk, 1994 - NSS02-02 - P.14-17. Also is published in CMS TN 1994 - No.313 – 4 p.

14. Further Progress in Lead Tungstate Crystals / G Alekseev, V Katchanov, V Khodyrev, P Shagin, P Semenov, A Singovsky, V Solovianov, D Baryshevsky, G.Drobyshev, A Fyodorov, M.Korzhih, O Missevich, V.Pavlenko, R.Zuevsky, J P Peigneux, M.Poulet, J.P Vialle, M Schneegans, F Binon. // IEEE Nucl. Sci. Abst. - 1994 - NSS05-10 - p. 7.

15 Lead Tungstate Scintillator Parameters / M V Korzhik, G Yu.Drobyshev, A.A Fyodorov, V.B.Pavlenko, J.-P Peigneux, J.-L Faure, A.N.Annenkov, V D Ligun, and W.P.Trower. // IEEE Nucl. Sci. Abst. – 1995 - NSS36-21 - p. 58

16 Control of lead tungstate crystals radiation hardness through optical transmission measurements / A.N.Annenkov, E.Auffray, R Chipaux, G Yu.Drobychev, A Fedorov, M Geleoc, N A Golubev, M.V Korzhik, P.Lecoq, A A Lednev, A.B.Ligun, O.V.Missevich, V.B.Pavlenko, J -P.Peigneux, A V Singovski. // VII International Conference on Calorimetry in High Energy Physics University of Arizona, Tucson, November 9-14, 1997, - 8 p (Также принята к публикации в Nucl Instrum Meth )

17 G.Drobychev Banc de contrôle ACCOS (ACCOS – Un Système Automatique de Contrôle des Cristaux) // Journées CMS-France de la Bussiere 2-4 Novembre 1998 – 23 p

18. Certifying Procedures for Lead Tungstate Crystal Parameters During Mass Production for the CMS ECAL. / E Auffray, G.Chevenier, R Chipaux, G Yu Drobychev, G Dromby, A A.Fedorov, M.Freire, M Geleoc, O V Kondratiev, M.V.Korzhih, P Lecoq, J -M Le Goff, P.Letournel, A.R Lopatic, O V Missevitch, A.Oriboni, A.V Oskine, B M Panov, J -P Peigneux, M Schneegans, A V Singovski, R.F Zouevski // IEEE'98 Abstr Toronto, Canada, November 8-14, 1998, -N20-31-6p

19. Methodology of certification of scintillators for large scale detectors / E.Auffray, A N Annenkov, G Yu.Drobychev, V.A Evdokimov, A A Fedorov, M V Korzhik, V.L Kostylev, P.Lecoq, O V Missevitch, A V.Oskine, V V.Panov, J -P Peigneux, M Schneegans, R F Zouevski // The Fifth International Conference on Inorganic Scintillators and Their Applications SCINT'99. Moscow. August 16-20 – 1999, -p 12

## РЕЗЮМЕ

Дробышев Глеб Юрьевич

### "ОПТИМИЗАЦИЯ СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛОВ ВОЛЬФРАМАТА СВИНЦА ДЛЯ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРЕЦИЗИОННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ КАЛОРИМЕТРИИ."

**Ключевые слова:** прецизионная электромагнитная калориметрия, Компактный мюонный соленоид (CMS), сцинтилляционный кристалл, вольфрамат свинца, моделирование, сцинтилляционные параметры, световыход, кинетика сцинтилляций, радиационная стойкость, технология выращивания кристаллов, сертификация, массовое производство

**Объект исследования** – сцинтилляционные кристаллы PWO

**Предмет исследования** – сцинтилляционные параметры кристаллов PWO для их применения в прецизионной электромагнитной калориметрии.

**Цели исследования** - улучшение свойств сцинтилляционных кристаллов PWO, достижение уровня требований спецификаций проекта CMS (ЦЕРН), удержание параметров кристаллов в рамках спецификации при их массовом производстве

**Методология и методы исследования** - использовались теоретический, экспериментальный методы и методы математического моделирования. Эксперименты осуществлялись путем проведения лабораторных опытов и экспериментов на реальных пучках частиц. Результаты экспериментов обрабатывались методами математической статистики и методами корреляционного анализа.

**Полученные результаты и их новизна.** Исследованы влияния условий получения кристаллов PWO на их параметры. Проанализировано влияние некоторых параметров кристаллов PWO на параметры электромагнитного калориметра и уточнены их предельные значения. Исследованы возможности улучшения светосбора из кристалла PWO и оптимизации соединения кристалл-фотодетектор. Разработан алгоритм отбора сцинтилляционных кристаллов для использования в электромагнитной калориметрии при массовом производстве. Исследованы кристаллы первой предмассовой партии.

**Степень использования результатов** В результате оптимизации технологии на заводе-изготовителе начато производство кристаллов, пригодных по своим параметрам для использования в проекте CMS.

**Область применения** - разработка и создание электромагнитных калориметров для экспериментов по физике высоких энергий

## РЭЗЮМЭ

Дробышаў Глеб Юр'евіч

### "АПТЫМІЗАЦЫЯ СЦЫНТЫЛЯЦЫЙНЫХ ПАРАМЕТРАЎ КРЫШТАЛЁЎ ВАЛЬФРАМАТА СВІНЦА ДЛЯ ІХ ПРЫМЯНЕННЯ У ПРЭЦЫЗІЕННАЙ ЭЛЕКТРАМАГНІГНАЙ КАЛАРЫМЕТРЫІ."

**Ключавыя словы:** прэцызійная электрамагнітная каларыметрыя, Кампактны мюонны саляноід (CMS), сцынтыляцыйны крышталі, вальфрамат свінца, мадэляванне, сцынтыляцыйныя параметры, светавыхад, кінетыка сцынтыляцый, радыяцыйная трываласць, тэхналогія вырошчвання крышталёў, сертыфікацыя, масавы выбар

**Аб'ект даследавання** – сцынтыляцыйныя крышталі PWO.

**Прадмет даследавання** – сцынтыляцыйныя параметры крышталёў PWO для іх прымянення ў прэцызійнай электрамагнітнай каларыметрыі

**Мэты даследавання** – паляпшэнне ўласцівасцей сцынтыляцыйных крышталёў PWO, дасягненне ўзроўня патрабаванняў спецыфікацыі праекта CMS (ЦЭРН), утрыманне параметраў крышталёў у рамках спецыфікацыі пры іх масавым выбары.

**Метадалогія і метады даследавання** – выкарысталіся тэарэтычны, эксперыментальны метады і метады матэматычнага мадэлявання. Эксперыменты праводзіліся як у лабараторных умовах, так і на пучку часцінак. Вынікі эксперыментаў апрацоўваліся статыстычнымі метадамі і метадамі карэляцыйнага аналізу.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Даследаваны ўплывы ўмоў атрымання крышталёў PWO на іх параметры. Прааналізаваны ўплыў некаторых параметраў крышталёў PWO на параметры электрамагнітнага каларыметра і ўдакладнены іх межавыя значэнні. Даследаваны магчымасці паляпшэння светазбора з крышталя PWO і аптымізацыі злучэння крышталі-фотадэтэктар. Распрацаваны алгарытм атбору сцынтыляцыйных крышталёў для выкарыстання ў электрамагнітнай каларыметрыі пры масавым выбары. Даследаваны крышталі першай прадмасавай партыі.

**Ступень выкарыстання вынікаў** У выніку аптымізацыі тэхналогіі распачата вытворчасць крышталёў, прыгодных па сваім параметрам для выкарыстання ў праекце CMS

**Галіна выкарыстання** – распрацоўка і стварэнне электрамагнітных каларыметраў для эксперыментаў па фізіцы высокіх энергій

## SUMMARY

Gleb Yu. Drobychev

### OPTIMIZATION OF THE SCINTILLATION PARAMETERS OF THE LEAD TUNGSTATE CRYSTALS FOR THEIR APPLICATION IN PRECISION ELECTROMAGNETIC CALORIMETRY.

**Keywords:** precision electromagnetic calorimetry, Compact Muon Solenoid (CMS), scintillation crystal, lead tungstate, simulation, scintillation parameters, light yield, scintillation kinetics, radiation hardness, crystals growth technology, certification, mass production.

**Research Object** – PWO scintillation crystals.

**Research subject** – scintillation parameters of PWO crystal for their application in precision electromagnetic calorimetry.

**Research goals** - improvement of the PWO scintillation crystals properties, achievement of the required parameters level of CMS Project (CERN) specification, keeping the parameters level in frame of specification during mass production.

**Methodology and research methods** - the theoretical, experimental methods as well as mathematical simulation methods were used. The experiments carried out as well in laboratory conditions as on the beam of particles. The experimental results proceeded by the statistical methods and methods of correlation analysis.

**Obtained results and their novelty.** The influence of the PWO crystals growth conditions on their parameters were studied. Influence of some PWO crystals parameters on the parameters of electromagnetic calorimeter were analyzed and limitations on them were specified. Possibilities for improvement of the collection of light outgoing from PWO crystals and for the optimization of the crystal-photodetector connection were studied. An algorithm of the scintillation crystals selection during their use in electromagnetic calorimeter was developed. The first pre-mass production crystals were certified.

**Scale of the results application.** As a result of technology optimization the producer started a production of crystals with parameters acceptable for use in CMS project.

**Field of application** - development and construction of the electromagnetic calorimeters for high energy physics experiments.

Подписано в печать 28.02.00. Формат 60×84/16. Бумага офсетная.  
Тираж 100 экз. Заказ № 128.

Белорусский государственный университет.  
Лицензия ЛВ № 315 от 14.07.98.  
220050, Минск, пр. Ф. Скорины, 4.  
Отпечатано в Издательском центре БГУ.  
220030, г. Минск, ул. Красноармейская, 6.

РНБ Русский фонд

2003-4

820