



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 2008–14
ОЭФ

А.Н. Васильев, Ю.М. Гончаренко, А.М. Давиденко,
А.А. Деревщиков, В.А. Качанов, Ю.М. Мельник, А.П. Мещанин,
Н.Г. Минаев, В.В. Мочалов, А.В. Рязанцев, П.А. Семенов,
А.В. Узунян¹, А.Е. Якутин

**ВЛИЯНИЕ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЯ
НА СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ
ВОЛЬФРАМАТА СВИНЦА**

Направлено в ПТЭ

Протвино 2008

¹ Электронный адрес: uzunian@ihep.ru

Аннотация

Васильев А.Н., Гончаренко Ю.М., Давиденко А.М. и др. Влияние гамма-облучения на сцинтилляционные и оптические характеристики кристаллов вольфрамата свинца: Препринт ИФВЭ 2008–14. – Протвино, 2008. – 12 с., 10 рис., библиогр.: 21

Проведены измерения радиационной стойкости опытной партии кристаллов вольфрамата свинца, выращенных по новой технологии на Богородицком заводе технохимических изделий в рамках подготовки эксперимента ПАНДА. Исследование оптических свойств кристаллов проведено в диапазоне температур от +20°C до -20°C в поле излучения радионуклидного источника ^{137}Cs . С понижением температуры кристалла значительно возрастает его световыход. Вместе с тем облучение кристалла при низких температурах приводит к более существенным потерям его прозрачности по сравнению с облучением при комнатной температуре. Данные исследования показали, что в итоге, при одинаковой мощности дозы облучения, регистрируемый с кристаллов сигнал при отрицательной температуре может быть заметно больше сигнала при комнатной температуре даже при значительной накопленной дозе.

Abstract

Vasiliev A.N., Goncharenko Yu.M., Davidenko A.M. et al. Influence of Gamma Irradiation on Scintillation and Optical Properties of Lead Tungstate Crystals: IHEP Preprint 2008–14. – Protvino, 2008. – p. 12, figs. 10, refs.: 21.

An experimental set of lead tungstate crystals produced by a new technology method at the Bogoroditsk Techno-Chemical Plant within the frame of PANDA experiment have been irradiated with γ -rays. The study of optical properties of crystals as a result of irradiation has been performed at temperatures between +20°C and -20°C with the use of ^{137}Cs radioactive source. When temperature goes down, a crystal light output essentially goes up. From the other hand, a crystal irradiation at low temperatures causes a more significant crystal transparency loss compared to the one at room temperature. These investigations showed, that under irradiation with the same dose rate, the residual crystal light output at negative temperature might be significantly higher than the one at room temperature even after having a big accumulated dose.

Введение

Монокристалл вольфрамата свинца ($PbWO_4$, PWO) – перспективный сцинтилляционный материал для применения в экспериментах по физике частиц высоких энергий. По совокупности параметров он является оптимальным для электромагнитной калориметрии в экспериментах с большой светимостью. Сцинтиллятор вольфрамата свинца позволяет создавать компактные гомогенные быстродействующие электромагнитные калориметры с хорошим энергетическим разрешением при регистрации электронов и гамма-квантов от 50 МэВ и выше.

Впервые кристалл PWO был выращен в НИИ «Монокристалл» (г. Харьков, Украина) в 1990 г. Данный прозрачный материал имеет плотность 8,28 г/см³ и наименьшие среди известных синтетических кристаллов радиационную длину ($X_0 = 0,89$ см) и радиус Мольера, равный 2,19 см.

В начале 1992 г. первый сцинтилляционный элемент PWO размером 20×20×120 мм³ был исследован на пучках электронов ускорителя У-70 ИФВЭ (г. Протвино). Результаты этой работы легли в основу доклада, представленного на Международной конференции CRYSTAL-2000 в 1992 г. в Шамони (Франция) [1].

В 1993 г. ИФВЭ заключил контракт с Богородицким заводом теххимических изделий (БЗТХИ, Тульская область) на разработку технологии и производство 300 кристаллов PWO для макета электромагнитного калориметра. Тестирование прототипа калориметра проводилось в ЦЕРНе (Швейцария) на пучках частиц канала Н8. Полученные в этих тестах результаты стали основанием для принятия в 1994 г. решения об использовании кристалла PWO в качестве детектирующего элемента электромагнитного калориметра в экспериментах CMS и ALICE на коллайдере LHC (ЦЕРН) [2–4].

С момента изготовления первых кристаллов PWO началось изучение его основных оптических свойств в условиях воздействия радиации. За последние 15 лет по этому вопросу были написаны десятки статей, но и в настоящее время он остается предметом оживленной дискуссии в литературе [5–8].

Понимание физических процессов, происходящих в кристалле, позволило объяснить его люминесцентные характеристики и такие особенности, как возникновение окраски и изменение спектральных свойств под действием ионизирующего излучения.

Свойства PWO определяются технологией его выращивания и могут меняться в довольно широких пределах. По результатам исследований свойств первых кристаллов перед производителями был поставлен ряд проблем по оптимизации технологии выращивания кристалла, которые необходимо было решить, чтобы довести его характеристики до уровня требований экспериментов на LHC.

Первой проблемой, которая была успешно решена, являлось устранение желтого цвета кристаллов, поскольку поглощение света сцинтилляций внутренними центрами в длинном кри-

сталле создает большую неоднородность световыхода вдоль сцинтилляционного элемента, что ухудшает энергетическое разрешение. Второй решенной проблемой стало устранение в кинетике сцинтилляций медленных компонент. И, наконец, третьей, наиболее важной из решенных проблем, явилось радикальное улучшение радиационной стойкости кристалла путем допирования его определенными элементами.

Разработанная в России технология массового производства кристаллов вольфрамата свинца основана на методе Чохральского. Исходным сырьем являются окислы PbO и WO_3 . Выращивание кристаллов проводится в ростовых установках типа «Кристалл 3М». В качестве затравки используется кристалл вольфрамата свинца, закрепляемый в платиновом охлаждаемом держателе. В установках этого типа температурный градиент между расплавом и кристаллом создается путем отвода тепла от затравочного кристалла. Растущий кристалл вытягивается из расплава, получаемого высокочастотным нагревом в комбинированном платиновом тигле в заданной газовой среде. Установка автоматически поддерживает заданные скорости вытягивания, скорость вращения затравки и температурный режим [9, 10].

В течение ряда лет, начиная с 2001 г., на пучках ускорителя У-70 ИФВЭ проводились исследования 60 кристаллов вольфрамата свинца, изготовленных в России БЗТХИ и Компанией «Северные кристаллы» (Апатиты), а также в Китае. Для этих исследований была построена установка, в состав которой входил прототип электромагнитного калориметра на их основе. Специально созданная система измерения импульса пучка, содержащая четырнадцать дрейфовых камер с разрешением 160 микрон, позволяет измерять импульс с точностью порядка 0,1% при энергии до 45 ГэВ.

При измерениях энергетического и координатного разрешений PWO-калориметра в области энергии электронов 1÷45 ГэВ были получены рекордные для данных кристаллов результаты: энергетическое разрешение уже при энергии 1 ГэВ составляет менее 2%, а при энергии около 30 ГэВ выходит на уровень 0,5%; точность измерения координат электромагнитного ливня лучше 0,5 мм [11].

В ИФВЭ были проведены систематические исследования радиационной стойкости кристаллов при их облучении электронами и адронами, а также смешанным спектром частиц, включавшим заряженные адроны, нейтроны и гамма-кванты [12]. В этом же цикле исследований с высокой достоверностью было показано, что при радиационном облучении в кристаллах PWO меняется только их прозрачность, а сцинтилляционный механизм не нарушается [13], что позволяет мониторить изменения световыхода кристаллов с помощью простейшей системы на световых диодах или лазере [14].

Световыход кристаллов PWO растет при уменьшении температуры с коэффициентом примерно $-2,5\%/^{\circ}C$ в диапазоне температур от $-25^{\circ}C$ до $+25^{\circ}C$. Детектор на основе кристаллов PWO, работающий при отрицательных температурах, имеет более высокое энергетическое разрешение, что открывает возможности для его применения не только в экспериментах по физике высоких энергий, но и в экспериментах по физике средних и низких энергий.

Электромагнитный калориметр эксперимента ALICE был сконструирован для эксплуатации при температуре $-25^{\circ}C$ [15]. Дальнейшее охлаждение кристаллов оказалось нецелесообразным из-за увеличения доли медленной компоненты сцинтилляций. По этому же пути собираются пойти и в эксперименте PANDA (проект FAIR) в Германии [16].

В рамках этого проекта НИИ ядерных проблем (НИИ ЯП, г. Минск, Белоруссия) и БЗТХИ приступили к производству модифицированных кристаллов вольфрамата свинца PWO-II. По сравнению с кристаллами PWO, используемыми, например, в эксперименте CMS, PWO-II имеют в два раза большую величину световыхода – примерно 20 фотоэлектронов/МэВ при сохранении других свойств [17].

Впервые исследования влияния температуры при гамма-облучении кристаллов вольфрамата свинца на их сцинтилляционные и оптические характеристики были проведены в 2006 г. в ИФВЭ [18]. В настоящей работе приводятся результаты исследований радиационной

стойкости пяти кристаллов PWO-II производства БЗТХИ при различных температурных режимах, находящихся в поле гамма-излучения радиоактивного источника ^{137}Cs .

1. Экспериментальная установка

Обычно облучение материалов и измерения их характеристик разнесены во времени. Поскольку многие материалы быстро восстанавливают свои свойства после прекращения облучения, любая потеря времени между окончанием облучения и началом измерений может привести к искажению результатов.

В ГНЦ ИФВЭ разработан метод, лишенный этого недостатка, и создана установка для облучения материалов гамма-излучением радиоактивных источников с возможностью наблюдения за изменением характеристик облучаемых объектов в масштабе реального времени. Диапазон изменения мощности дозы в воздухе, на границе с облучаемой средой, составляет от 2 до 100 рад/час (100 рад = 1 Гр). Диапазон температур, при которых проводятся облучение и измерения, – от $+20^\circ\text{C}$ до -25°C .

Установка позволяет проводить непрерывное измерение относительного световыхода и светопропускания в синей и красной областях спектра кристаллов вольфрамата свинца, находящихся в поле излучения. Под световыходом мы понимаем величину сцинтилляционного сигнала с кристалла, измеренную при заданных условиях светосбора, а именно: светопропускании, геометрических параметрах и эффективности регистрации света. Измерение световыхода осуществляется путем регистрации постоянного тока с анода фотоэлектронного умножителя (ФЭУ), вызванного сцинтилляциями кристалла при его облучении. Для измерения светопропускания используются светодиоды.

Схема установки приведена на **рис. 1**.

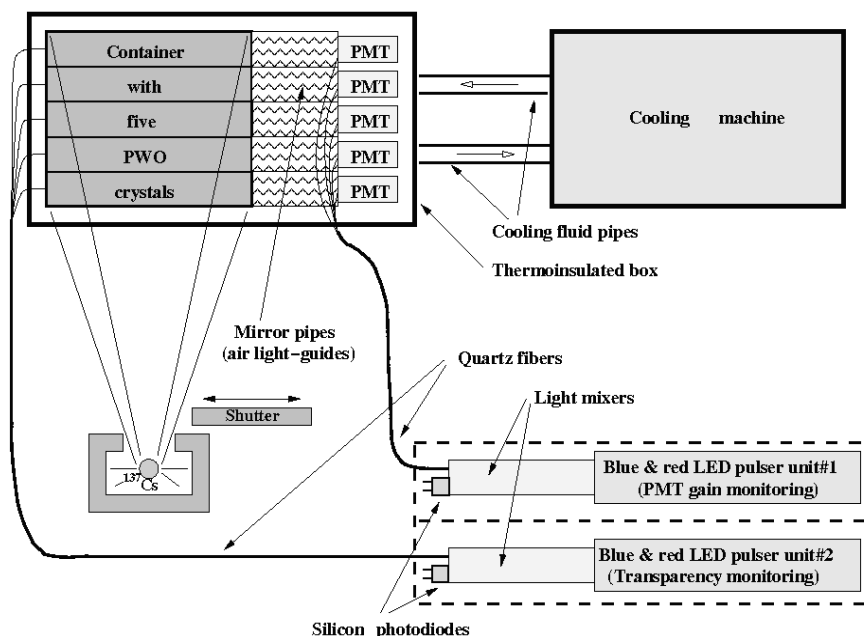


Рис. 1. Схема установки для изучения свойств кристаллов в поле радиоактивного источника гамма-излучения.

В состав установки входят:

- специализированный источник гамма-излучения;
- светонепроницаемый и теплоизолированный бокс с размещенной в нем кассетой-теплообменником для пяти кристаллов PWO и ФЭУ;
- криотермостат LAUDA;
- аппаратура мониторинга;
- регистрирующая электроника и система сбора данных.

1.1 Специализированный источник гамма-излучения

Для облучения кристаллов используется гамма-радиоактивный источник ^{137}Cs активностью $5 \cdot 10^{12}$ распадов в секунду и энергией излучаемых γ -квантов 0,66 МэВ. Источник размещается в специальном контейнере с выходным коллиматором диаметром 40 мм.

Требуемая мощность дозы облучения в указанном диапазоне обеспечивается изменением расстояния между источником и кассетой с кристаллами. Ее неоднородность по поверхности кассеты составляет $<10\%$. Распределение относительной величины мощности дозы по толщине кристалла приведено на **рис. 2**.

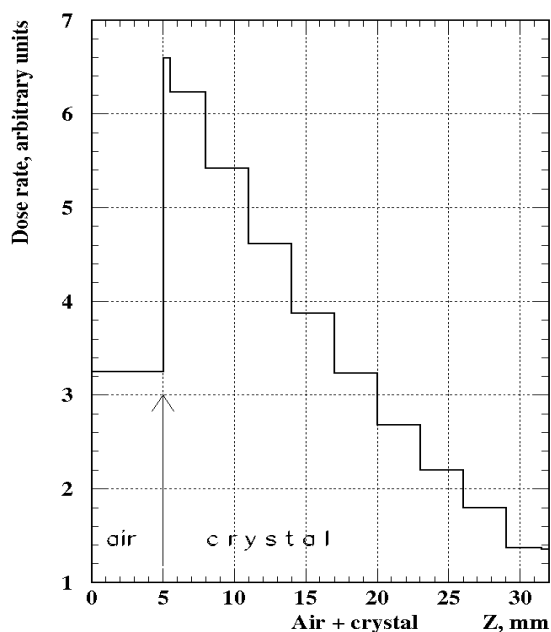


Рис. 2. Распределение относительной величины мощности дозы гамма-излучения в воздухе и по толщине кристалла в направлении потока гамма-квантов.

1.2 Светонепроницаемый теплоизолированный бокс

Кассета с облучаемыми кристаллами находится в светонепроницаемом теплоизолированном боксе. Она изготовлена из меди и является теплообменником для стабилизации температуры кристаллов. Одновременно при облучении можно исследовать свойства пяти кристаллов, которые загружаются горизонтально в индивидуальные ячейки кассеты (**рис. 3**). Кристаллы облучаются в поперечном направлении по всей длине своих боковых граней, обращенных к источнику гамма-излучения. Свет с торцов кристаллов через воздушные световоды регистрируется ФЭУ НАМАМАТСУ R5800 (диаметр фотокатода 25,4 мм; 10 динодов) с активными делителями высокого напряжения, которые находятся в этом же боксе. Вся конструкция позволяет однозначно устанавливать кристаллы на свои места при перезагрузке, что обеспечивает хорошую повторяемость результатов измерений.

Для устранения влажности в теплоизолированном боксе предусмотрена система его продувки сухим азотом. Измерения температуры в контролируемых зонах бокса и кассеты с кристаллами велись с использованием термодатчиков РТ100 и РТ1000.

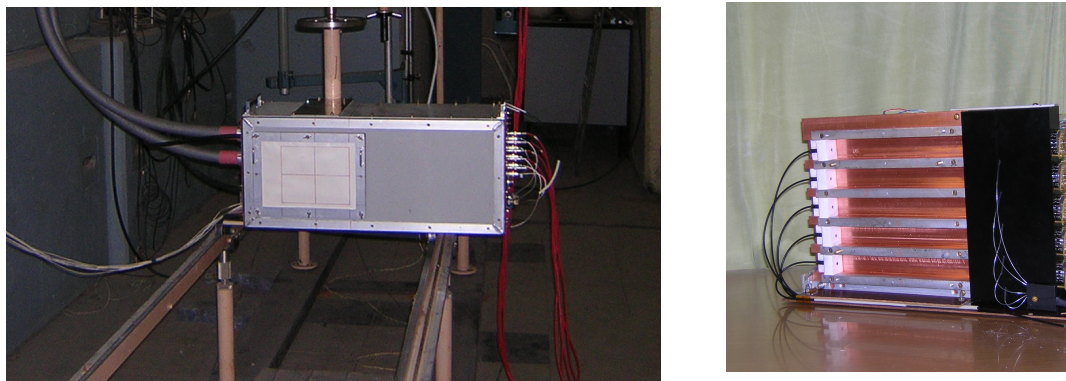


Рис. 3. Светонепроницаемый теплоизолированный бокс (слева), в котором размещается кассета теплообменник для 5 кристаллов PWO (справа).

1.3 Криотермостат LAUDA

Температурный контроль и стабильность температуры кристаллов, установленных в боксе, обеспечивается криотермостатом LAUDA RC6CP. Мощность криотермостата 300 Вт является достаточной для поддержания стабильной температуры в диапазоне от -25°C до $+20^{\circ}\text{C}$ в течение десяти суток с абсолютной точностью не хуже $0,2^{\circ}\text{C}$. Смесь этиленгликоля с водой циркулирует между термостабилизирующей системой LAUDA и кассетой с кристаллами.

1.4 Аппаратура мониторинга

Сцинтилляционный свет с кристалла, попадающий на фотокатод ФЭУ, имеет спектральную характеристику, которая является суперпозицией собственного спектра испускания PWO и его спектра поглощения. При облучении кристаллы PWO теряют свою прозрачность не одинаково в разных областях спектра: наибольшие потери происходят в синей области, наименьшие – в красной. Два светодиода с длинами волн 450 и 640 нм используются для измерения относительного светопропускания кристаллов PWO в этих областях спектра. Свет от них передается к дальним от фотокатодов ФЭУ торцам кристаллов по кварцевым волокнам – световодам.

При долговременных измерениях коэффициенты усиления ФЭУ могут флуктуировать относительно первоначальных значений. Для измерения относительных изменений коэффициентов усиления ФЭУ используются два других светодиода с теми же характеристиками, свет от которых передается непосредственно на фотокатоды ФЭУ также по кварцевым волокнам.

Стабильность светового потока от светодиодов обеспечивается постоянством тока, выдаваемого высокостабильными импульсными источниками питания (драйверами), отдельными для каждого светодиода [19]. Световые потоки дополнительно измеряются с помощью двух полупроводниковых PN-фотодиодов: один из них регистрирует свет от светодиодов, мониторирующих светопропускание кристаллов, другой – от светодиодов, мониторирующих коэффициенты усиления ФЭУ.

Анализ свойств кристаллов при их облучении ведется по трем сигналам: сцинтилляционный сигнал и сигналы от голубого и красного светодиодов, свет от которых проходит через кристалл. Остальные сигналы являются вспомогательными, но очень важными для обеспечения высокой точности измерений.

1.5 Система сбора данных

Все измерения проводятся токовым методом. Для непрерывной регистрации сигналов, описанных в предыдущем параграфе, используется высокочувствительная регистрирующая электроника серии I7000 производства компании ICP DAS. Каждый модуль регистрирующей электроники обеспечивает усиление аналогового сигнала и его преобразование в цифровой код под управлением микроконтроллера, который также поддерживает связь с общей системой сбора данных установки. Вся измерительная электроника системы сбора данных размещена в непосредственной близости от кристаллов.

Таким образом, аналоговые сигналы с ФЭУ и температурных датчиков конвертируются в цифровой вид, минуя длинные кабели, что обеспечивает низкий уровень шумов при высокой чувствительности (единицы наноампер). Для управления и передачи цифровых данных модули электроники связаны между собой и управляющим компьютером с помощью сети промышленного стандарта RS485 с гальванической развязкой. Оцифрованные сигналы поступают в систему обработки в реальном времени и записываются на архивный носитель для последующей дополнительной обработки.

Обработка информации в реальном времени позволяет осуществлять непрерывный контроль работоспособности всей установки и параметров исследуемых кристаллов.

2. Сравнение токового и импульсного методов регистрации сигналов с кристаллов при воздействии радиации

В нашем случае сигнал с фотомножителя представляет собой практически постоянный ток, поскольку интенсивность γ -квантов, попадающих в кристалл, составляет до $1 \times 10^9 \text{ с}^{-1}$, а длительность быстрой компоненты каждой сцинтилляционной вспышки внутри кристалла от одного γ -кванта – несколько десятков наносекунд. Однако вклад в этот ток могут давать и фоновые сигналы, связанные со сцинтилляционными вспышками, например медленные сигналы послесвечения и фосфоресценции кристаллов [9], что может приводить к искажению результатов.

В отличие от этого, в эксперименте на пучках частиц каждый γ -квант или электрон регистрируется импульсным методом с длительностью выходного сигнала $\sim 100 \text{ нс}$. При этом вклад медленных фоновых сигналов послесвечения компенсируется измерением и вычитанием базовой линии (пьедестала). Поэтому мы провели специальные исследования для сравнения токового и импульсного методов регистрации сигналов с кристаллов при воздействии радиации.

В 2004 г. в ИФВЭ на канале 2б ускорителя У-70 была исследована радиационная стойкость 16 кристаллов PWO. Облучение проводилось при комнатной температуре пучком электронов с энергией 27 ГэВ и интенсивностью до 1×10^5 частиц/с. Подробно аппаратура канала, система мониторинга и сбора данных описаны в работах [20, 21].

В качестве фотоприемника сцинтилляционного света, возбуждаемого электронами в кристалле, использовались ФЭУ Hamamatsu R5380Q. Около 99% сцинтилляционного света высвечивается за 100 нс. Регистрация света происходила в импульсном режиме. Выходные сигналы фотомножителей интегрировались во временном интервале 150 нс 15-битным АЦП LeCroy 2285. Средняя мощность дозы при облучении кристаллов электронами составляла около 20 рад/час в течение ~ 36 часов до состояния насыщения в изменении прозрачности кристаллов. В результате были получены значения относительного изменения сигналов от электрона для каждого кристалла.

Облучение этих же кристаллов в поле гамма-радиоактивного источника ^{137}Cs мощностью дозы 100 рад/час было осуществлено в апреле 2005 г. после восстановления кристаллов при комнатной температуре. Измерения проводились токовым методом, а относительное падение прозрачности определялось величиной сигнала в состоянии насыщения.

На рис. 4 показана корреляция между величинами относительного падения сигналов от электронов (импульсный метод) и гамма-квантов (токовый метод) для 16 кристаллов. Как видно, данные кристаллы сильно отличаются друг от друга по радиационной стойкости, но результаты, полученные двумя различными методами измерений, хорошо коррелируют между собой. Таким образом, применение описанного в данной работе токового метода для изучения стойкости кристаллов к радиации является обоснованным.

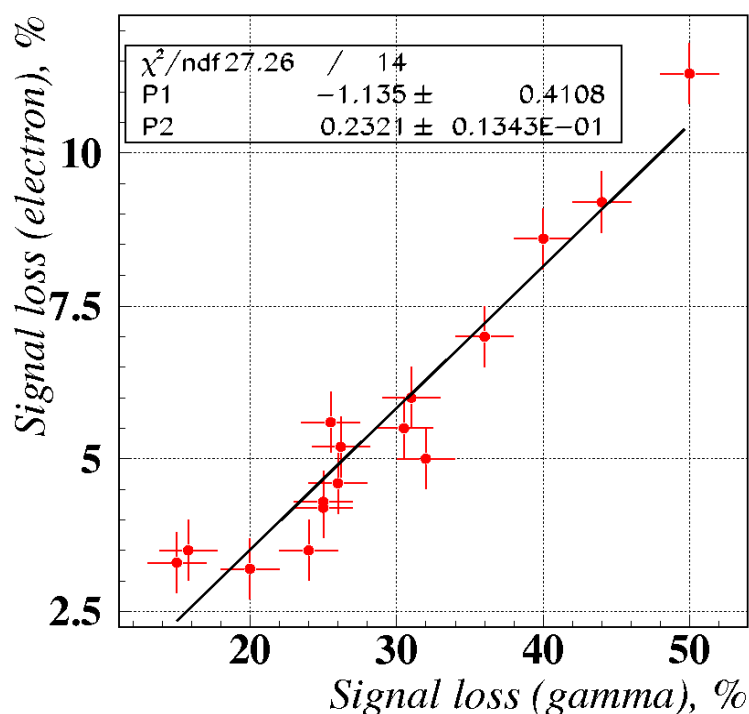


Рис. 4. Корреляция между величинами относительного падения сигналов от электронов (импульсный метод) и гамма-квантов (токовый метод) после, соответственно, электронного и гамма-облучения кристаллов.

3. Результаты

Проведены исследования пяти кристаллов PWO-II (b4; b16; b17; b24 и b30) длиной 20 см и поперечным сечением $2,6 \times 2,6$ см² каждый. Световыход кристаллов, представленный заводом изготовителем, составлял соответственно 18,0; 18,0; 18,4; 17,7 и 16,9 фотоэлектронов/МэВ. Поверхность одной из длинных граней каждого кристалла была матирована для улучшения однородности светосбора по длине. Кристаллы были обернуты в Туvek.

Облучение и измерения проводились в два этапа. На первом этапе облучение кристаллов велось с мощностью дозы гамма-излучения 80 рад/час при трех значениях температуры: +20°C; 0°C и -20°C. После окончания этого цикла измерений и после отжига кристаллов (восстановления их оптических свойств) на БЗТХИ они вновь были облучены, но уже при мощности дозы гамма-излучения 2 рад/час и температуре -20°C. Выбор мощности дозы в 2 рад/час связан с тем, что именно такая максимальная величина радиационной нагрузки ожидается на кристаллы электромагнитного калориметра эксперимента PANDA.

Длительность облучения с мощностью дозы 80 рад/ч составляла ~230 часов для каждой заданной температуры кристаллов. Облучение не прерывалось и при переходах с одного температурного режима на другой. Длительность перехода составляла ~2 часа. Динамика изменения

относительного световыхода кристаллов при данных условиях измерения представлена на **рис. 5**. Экспериментальные кривые для каждого кристалла отнормированы на величину его световыхода, измеренную в начале облучения при температуре +20°C.

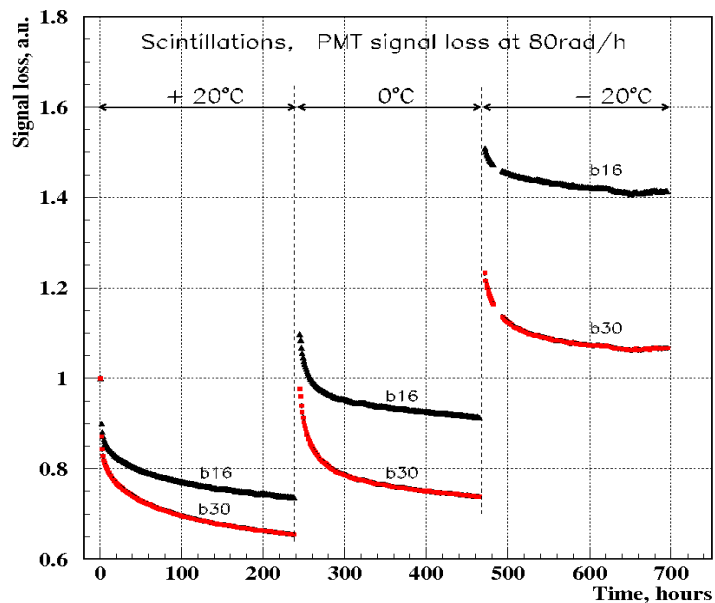


Рис. 5. Относительные изменения во времени сцинтилляционных сигналов кристаллов b16 и b30 в поле гамма-излучения мощностью дозы 80 рад/час при различных температурных режимах.

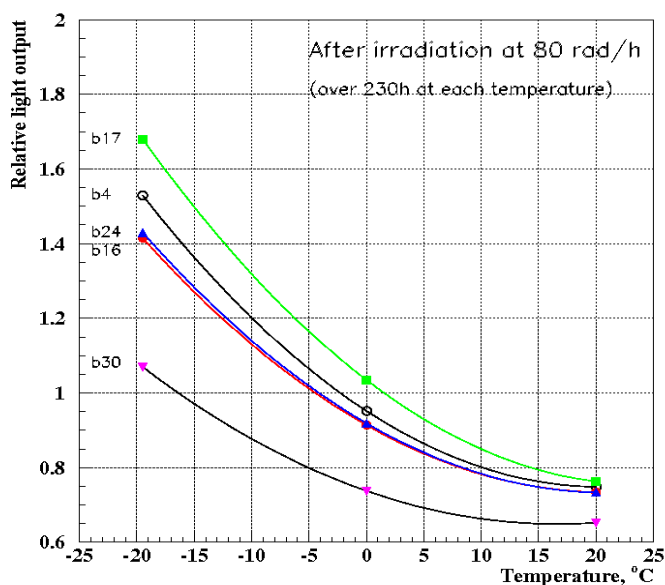


Рис. 6. Зависимость результирующих значений относительного световыхода кристаллов b4; b16; b17; b24 и b30 от температуры, при которой проводилось облучение. Метки соответствуют результатам измерений после ~230 часов непрерывного облучения мощностью дозы 80 рад/час при фиксированных значениях температуры кристаллов +20; 0 и -20°C. Результаты нормированы на величины сигналов в начале облучения при +20°C.

Результирующие значения относительного световыхода всех пяти кристаллов в конце облучения при каждой температуре обозначены метками на **рис. 6**. Метки соединены плавными линиями для наглядности. Результаты нормированы на величины сигналов в начале облучения при температуре +20°C. Наименее стойким к радиации оказался кристалл b30. Падение световыхода этого кристалла после 230 часов облучения при температуре +20°C составило ~35%. Световыход остальных кристаллов уменьшился на (23÷26)%.

Ранее в нашей работе [18] было показано, что увеличение сцинтилляционного сигнала при охлаждении кристалла PWO определяется его фундаментальными свойствами и не зависит от технологии его изготовления. При воздействии радиации увеличение световыхода с понижением температуры кристалла частично компенсируется уменьшением его прозрачности, при этом величина изменения прозрачности зависит как от дозы облучения, так и от технологических особенностей получения кристалла. Установлено, что физическая природа температурной зависимости радиационной стойкости кристалла PWO обусловлена зависимостью скорости восстановления радиационных дефектов от внутренней тепловой энергии кристалла. Более подробно подобное свойство кристаллов рассмотрено в работе [15].

При наших условиях облучения рост световыхода при понижении температуры кристаллов от +10 до 0°C происходит с коэффициентом примерно -1,7%/°C, а в диапазоне температур от -10 до -20°C – с коэффициентом примерно -3%/°C.

Облучение кристаллов с мощностью дозы 2 рад/час проводилось непрерывно в течение ~400 часов при температуре -20°C. Температура поддерживалась на данном уровне с точностью до 0,2°C. Поведение сцинтилляционного сигнала и сигнала от голубого светодиода, мониторирующего светопропускание, в процессе облучения кристаллов при указанном режиме приведено на **рис. 7** и **8**. Отметим, что основные закономерности поведения сигналов аналогичны тем, которые наблюдались при облучении этих же кристаллов мощностью дозы 80 рад/час. Видно, что и в этих условиях кристалл b30, потеряв после облучения ~31% от начального значения световыхода, является наименее стойким к воздействию радиации. Остальные кристаллы потеряли в световыходе по (20÷25)% .

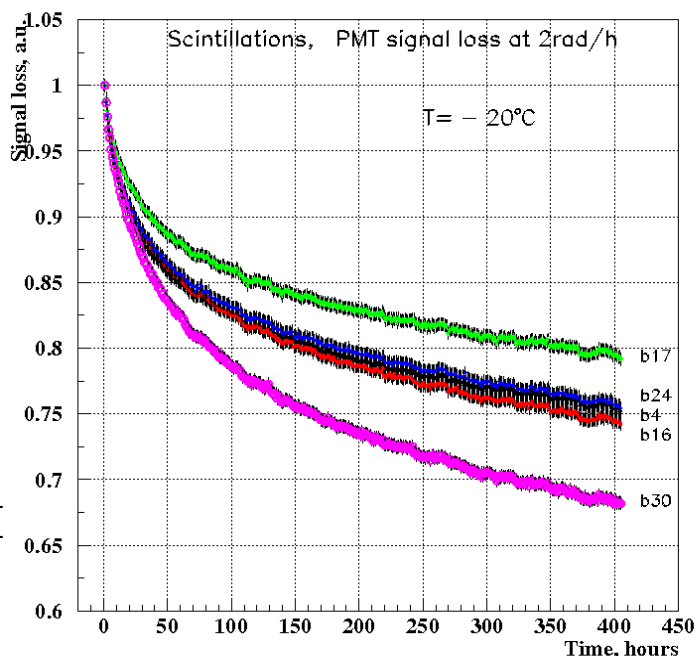


Рис. 7. Зависимость сцинтилляционного сигнала от времени в процессе облучения кристаллов мощностью дозы 2 рад/час при температуре -20°C.

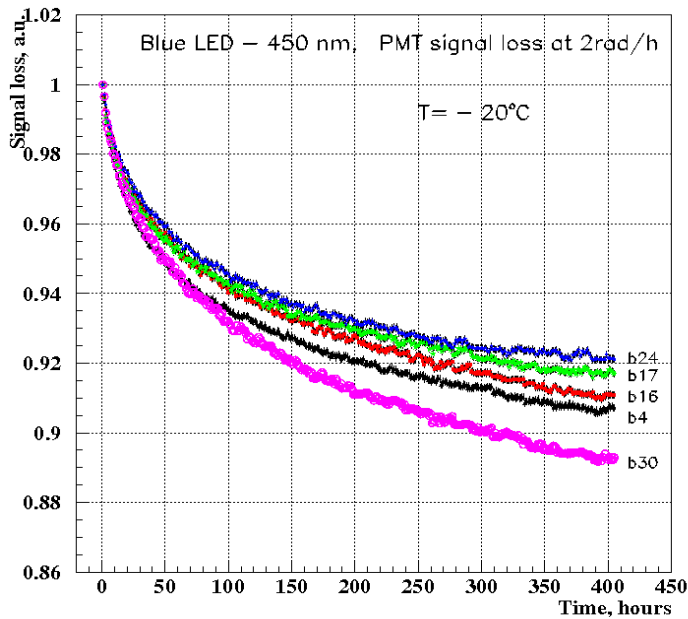


Рис. 8. Поведение сигнала от голубого светодиода, мониторирующего светопропускание, в процессе облучения кристаллов мощностью дозы 2 рад/час при температуре -20°C .

Наличие определенных корреляций в падениях сцинтилляционных сигналов и сигналов от голубого светодиода (см. **рис. 9**) позволяет отслеживать потерю прозрачности в кристаллах в процессе воздействия радиации и вносить поправки в ходе обработки экспериментальных данных при восстановлении энергии фотонов и электронов, поглощенной в электромагнитном калориметре.

На **рис. 10** показано соотношение результирующих падений световых кристаллов после их облучения мощностью дозы 80 рад/час при температуре $+20^{\circ}\text{C}$ и падений световых кристаллов после облучения мощностью дозы 2 рад/час при температуре -20°C . Наличие корреляции позволяет проводить предварительный отбор стойких к радиации кристаллов для работы в составе калориметра при отрицательной температуре, исследуя их свойства при комнатной температуре.

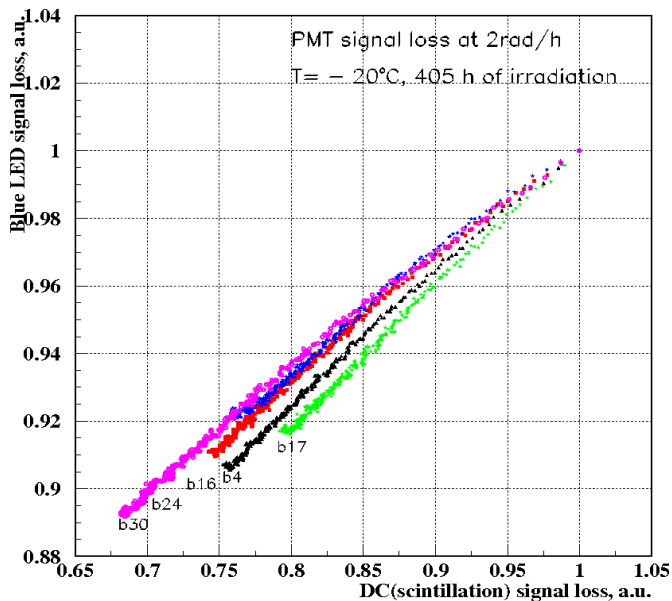


Рис. 9. Зависимость между относительными величинами падений сигнала голубого светодиода и сцинтилляционного сигнала при облучении кристаллов мощностью дозы 2 рад/час и температуре -20°C в течение 405 часов.

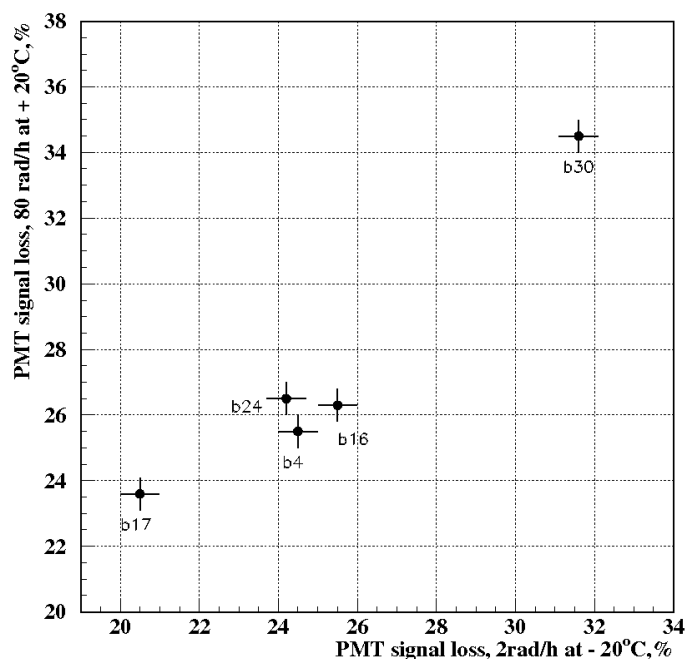


Рис. 10. Корреляции между результирующими уровнями падения токовых сигналов кристаллов b4; b16; b17; b24 и b30 после их облучения мощностью дозы 80 рад/час в течение 230 часов при температуре +20°C и после облучения мощностью дозы 2 рад/час в течение 405 часов при температуре -20°C.

Заключение

В работе исследовались сцинтилляционные и оптические характеристики кристаллов PWO-II с повышенным световыходом при различных температурах под влиянием гамма-облучения. Опытная партия из пяти образцов была изготовлена на Богородицком заводе химических изделий. Кристаллы экспонировались в поле γ -излучения с мощностями дозы 2 и 80 рад/час при разных температурах в диапазоне от +20°C до -20°C.

Воздействие радиации на кристаллы при отрицательной температуре приводит к тому, что они теряют в световыходе значительно больше, чем при комнатной температуре. Такое поведение световыхода может объясняться «замораживанием» процесса восстановления прозрачности при отрицательных температурах из-за уменьшения внутренней энергии кристаллов.

Тем не менее, несмотря на значительную потерю прозрачности кристаллами при их облучении в условиях отрицательных температур, эффект возрастания световыхода приводит к увеличению выходного сигнала даже при значительных накопленных дозах. Так, после ~700 часов непрерывного облучения мощностью дозы 80 рад/час при последовательном изменении температуры от +20°C до -20°C величина сцинтилляционного сигнала кристалла b17 осталась примерно в 1,7 раза выше, чем в начальный момент измерений при температуре +20°C.

Выбранная температура -25°C для работы электромагнитного калориметра на кристаллах вольфрамата свинца в составе установки PANDA позволит сохранить выигрыш в световыходе кристаллов в 1,5–2 раза даже после длительной радиационной нагрузки в ходе набора статистики.

Работа была частично поддержана контрактом с Росатомом № Н.4д.47.03.08.118 и грантом ИИТАС № 06-10000012-8914.

Список литературы

1. V.A.Kachanov. Study of characteristics of real-size PbWO₄ crystal cells for precise EM-calorimeters to be used at LHC energies. CRYSTAL 2000 Workshop, Chamonix, 1992.
2. O.V.Buyanov, R.Chipaux, A.A.Fyodorov, V.A.Kachanov et al. A first electromagnetic calorimeter prototype of PbWO₄ crystals. NIM, A349 (1994) 62.
3. CMS. The Electromagnetic Calorimeter Project Technical Design Report, CERN/LHCC 97-33, CMS TDR 4, 1997
4. ALICE. Technical Design Report of the Photon Spectrometer (PHOS), CERN/LHCC 99-4, ALICE TDR 2, 1999.
5. A.A Annenkov et al. Lead tungstate scintillation material, Nucl. Instr. and Meth. A 490 (2002) 30.
6. Ren-Yuan Zhu. IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-51 (2004) 1560.
7. V.I Dormenev et al. Studying the kinetics of radiation damage in PWO crystals for the CMS electromagnetic calorimeter (CERN), Prib.Tekh.Eksp. 48N2(2005) 71-77, Instrum. Exp.Tech. 48 (2005) 303-307.
8. S. Burachas et al. Physical origin of coloration and radiation hardness of lead tungstate scintillation crystals, J. Crystal Growth 293 (2006) 62.
9. В.М.Коржик. Физика сцинтилляторов на основе кислородных монокристаллов (монография). БГУ, Минск, Беларусь, 2003.
10. В.Л. Костылев. Разработка технологии производства сцинтилляторов с улучшенными характеристиками на основе вольфрамата свинца. Диссертация на соискания ученой степени кандидата технических наук. (Иваново, 2004).
11. V.A. Batarin et al. Precision measurement of energy and position resolutions of the BTeV electromagnetic calorimeter prototype. Nucl. Instr. and Meth. A510 (2003) 248.
12. V.A.Batarin et al. Study of radiation damage in lead tungstate crystals using intense high-energy beams. Nucl. Instr. and Meth. A512 (2003) 488.
13. V.A. Batarin et al. Study of possible scintillation mechanism damage in PbWO₄ crystals after pion irradiation, Nucl. Instr and Meth. A 540 (2005) 131.
14. V.A. Batarin et al. [LED monitoring system for the BTeV lead tungstate crystal calorimeter prototype](#). Nucl. Instr and Meth. A 534 (2004) 486.
15. D.V. Aleksandrov et al. A High Resolution Electromagnetic Calorimeter Based on Lead Tungstate Crystals. Nucl. Instr. and Meth., A 550 (2005) 169.
16. R.W. Novotny. Fast and Compact Lead Tungstate-Based Electromagnetic Calorimeter for the PANDA Detector at GSI, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 51, no. 6, pp.3076-3080, December 2004.
17. R.W. Novotny et al. High Resolution Calorimetry With PWO-II, in Proc. 2005 IEEE Nuclear Science Symposium, Puerto Rico, 2005, Conference Record, ISBN: 0-7803-9222-1, N12-4.
18. P.A Semenov et al. First study of radiation hardness of lead tungstate crystals at low temperatures, Nucl. Instr. and Meth. A 582 (2007) 575.
19. V.A.Batarin et al. Design and performance of LED calibration system prototype for the lead tungstate crystal calorimeter, Nucl. Instr. and Meth. A556 (2006) 94.
20. V.A.Batarin et al. Development of a momentum determined electron beam in the 1–45 GeV range, Nucl. Instr. and Meth. A 510 (2003) 211.
21. V.A.Batarin et al. Correlation of beam electron and LED signal losses under irradiation and long-term recovery of lead tungstate crystals, Nucl. Instr. and Meth. A 550 (2005) 543.

Рукопись поступила 15 сентября 2008 г.

А.Н. Васильев, Ю.М. Гончаренко, А.М. Давиденко и др.
Влияние гамма-облучения на сцинтилляционные и оптические характеристики
кристаллов вольфрамата свинца.

Редактор Н.В.Ежела.

Подписано к печати	18.09.2008.	Формат 60 × 84/8.	Офсетная печать.
Печ.л. 1,75.	Уч.–изд.л. 1,45.	Тираж 90.	Заказ 61. Индекс 3649.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий,
142281, Протвино Московской обл.

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2008-14, ИФВЭ, 2008
